經濟部

計畫編號：102-5226904000-06-01

經濟部中央地質調查所

102年度委託專業服務計畫執行期末報告書

「斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析(1/4)」(第一年度)

全 程 計 畫：自102年4月至105年12月止
本年度計畫：自102年4月至102年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立臺灣大學
中 華 民 國 102 年 12 月

計畫編號：102-5226904000-06-01

經濟部中央地質調查所

102年度委託專業服務計畫執行期末報告書

「斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析(1/4)」(第一年度)

全 程 計 畫：自102年4月至105年12月止
本年度計畫：自102年4月至102年12月止

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立臺灣大學

中 華 民 國 102 年 12 月

斷層活動性觀測研究第三階段-
斷層整合性觀測與潛勢分析(1/4)
(第一年度)

計畫主持人：胡植慶

協同主持人：劉啟清、楊燦堯、景國恩、鄭錦桐

研　究　員：陳宏宇、吳善薇、唐昭榮、劉聰桂、
郭明錦、饒瑞鈞、李元希、張午龍、
李建成、邵國士、林柏伸、顏銀桐

副 研 究 員：李易叡、王順民

博士後研究員：傅慶州

委託機關：經濟部中央地質調查所
執行單位：國立臺灣大學

中　華　民　國　102　年　12　月

目錄

目錄.....I
表目錄..... VII
圖目錄.....IX
摘要..... XXIII
Abstract..... XXV
第一章、緒　論.....1
1-1 計畫整體概述.....1
1-2 研究目的.....12
1-2-1 移動式 GPS 及精密水準測量.....12
1-2-2 連續式 GPS.....17
1-2-3 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術 (PS-InSAR).....18
1-2-4 井下應變儀資料分析.....20
1-2-5 地球化學及地下水觀測.....20
1-2-6 整合觀測資料分析.....21
1-2-7 活動斷層發生潛勢圖建置.....21
1-3 工作內容概述.....24
1-4 第二階段工作成果.....26
1-4-1 GPS 觀測及精密水準測量.....26
1-4-2 井下應變儀觀測資料分析.....28
1-4-3 地球化學與地下水觀測資料分析.....32
1-4-4 斷層活動潛勢分析.....40
1-4-5 整合資料分析.....42
第二章、移動式 GPS 及精密水準測量.....45
2-1 2013 GPS 測量資料檢核.....45
2-1-1 GPS 座標計算穩定度分析.....45
2-1-2 座標殘差分析.....45
2-1-3 均方根誤差分析.....45
2-1-4 嘉南地區 GPS 觀測成果分析.....45
2-1-5 高屏地區 GPS 觀測成果分析.....47
2-1-6 中部地區 GPS 觀測成果分析.....48
2-1-7 GPS 移動站速度場檢核.....49
2-2 精密水準測量精度分析.....62
2-2-1 垂直速度場之推求.....62

2-2-2 台 2_石門至萬里測線 63
2-2-3 三芝至士林測線 64
2-2-4 淡水至士林測線 65
2-2-5 五股至台北測線 66
2-2-6 縣 115_新屋至童話世界測線 67
2-2-7 縣 122_新竹至五峰測線 68
2-2-8 縣 117_新竹至峨眉測線 69
2-2-9 苗栗至南庄測線 70
2-2-10 縣 132_大安至東勢測線 71
2-2-11 縣 136_龍井至太平測線 72
2-2-12 縣 148-台 14_王公至草屯測線 73
2-2-13 縣 150-台 16_北斗至水里測線 74
2-2-14 縣 164_金湖至瑞峰測線 75
2-2-15 縣 174_北門至楠西測線 76
2-2-16 台 19 甲_善化至關廟測線 77
2-2-17 縣 182_安平至龍崎測線 78
2-2-18 台 28_路竹至茂林測線 79
2-2-19 台 22_岡山至安坡測線 80
2-2-20 佳冬至七佳測線 81
2-2-21 瀧澗至嶺頂測線 82
2-2-22 光復至豐濱測線 83
2-2-23 紅葉至靜浦測線 84
2-2-24 東成至富岡測線 85
2-2-25 台 2_梗枋至東澳測線 86
2-2-26 恆春半島地區測線測線 87
2-2-27 跨車籠埔斷層之測線 89
2-2-28 精密水準速度場檢核 92
2-3 地表變形研究回顧 95
2-3-1 地殼矩率研究 95
2-3-2 大地測量矩率計算 96
2-3-3 結果展示及分析 97
2-4 地震資料處理 99
2-4-1 資料來源及品質 99
2-4-2 地震矩率計算 99
2-4-3 地殼矩率分布圖 101
2-4-4 矩率分布 102

第三章、全球衛星定位系統連續觀測站(CGPS) 105
3-1 連續 GPS 站解算成果分析 107
3-2 GPS 連續記錄資料分析 108
3-3 南投地震同震變形資料分析 112
3-4 瑞穗地震同震變形資料分析 113
3-5 小結 116
第四章、PS-InSAR 技術 117
4-1 結果檢驗方法簡介：GPS 向量轉換法 118
4-2 PS-INSAR 成果 119
4-2-1 ENVISAT、GPS 與精密水準測量 119
4-2-2 ERS、GPS 與精密水準測量 122
4-2-3 ALOS (Path 446 Frames 460 & 470)、GPS 與精密水準測量 125
4-3 小結 128
第五章、活動斷層發生潛勢圖建置 129
5-1 車籠埔斷層 129
5-1-1 參數表之建立及說明 129
5-1-2 車籠埔斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 134
5-1-3 車籠埔斷層特徵地震模式 137
5-1-4 發震機率之推估 139
5-2 梅山斷層 142
5-2-1 參數表之建立及說明 142
5-2-2 梅山斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 145
5-2-3 梅山斷層特徵地震模式 146
5-2-4 發震機率之推估 147
5-3 大茅埔-雙冬斷層 148
5-3-1 參數表之建立及說明 148
5-3-2 大茅埔-雙冬斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 151
5-3-3 大茅埔-雙冬斷層特徵地震模式 152
5-3-4 發震機率之推估 153
5-4 彰化斷層 156
5-4-1 參數表之建立及說明 156
5-4-2 彰化斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 161
5-4-3 彰化斷層特徵地震模式 162
5-4-4 發震機率之推估 163
5-5 九芎坑斷層 167
5-5-1 參數表之建立及說明 167

5-5-2 九芎坑斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 171
5-5-3 九芎坑斷層特徵地震模式 172
5-5-4 發震機率之推估 173
5-6 大尖山斷層 175
5-6-1 參數表之建立及說明 175
5-6-2 大尖山斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 179
5-6-3 發震機率之推估 179
5-7 觸口斷層 180
5-7-1 參數表之建立及說明 180
5-7-2 觸口斷層破裂模式及邏輯樹權重分配 187
5-7-3 觸口斷層特徵地震模式 188
5-7-4 發震機率之推估 190
5-8 斷層面滑移虧損率評估 192
5-8-1 中部 7 條活動斷層幾何參數及塊體模型設定 192
5-8-2 中部 7 條活動斷層長期滑移速率及虧損率 194
5-9 小結 199
第六章、井下應變儀資料分析 203
6-1 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷 203
6-1-1 影響應變儀資料變化的因素 203
6-1-2 檢視井下應變儀資料中異常事件 210
6-2 時頻圖分析案例 216
6-2-1 2013 年井下應變儀資料時頻分析 216
6-2-2 自然事件案例分析 220
6-2-3 不同頻段強度變化成因分析 242
6-3 井下應變儀相關建議事項 244
第七章、地球化學觀測與研究 259
7-1 緒論 259
7-1-1 觀測站分布位置 260
7-1-2 觀測站相關地震選擇依據 261
7-1-3 利用時序分析方法處理觀測資料 262
7-2 土壤氣體觀測結果 264
7-2-1 新竹大平地土壤氣體觀測站 264
7-2-2 雲林古坑土壤氣體觀測站 273
7-2-3 屏東屏科大土壤氣體觀測站 279
7-2-4 臺東池上土壤氣體觀測站 284
7-2-5 花蓮土壤氣體觀測站 294

7-2-6 嘉義中崙濁水潭土壤氣體觀測站 303
7-2-7 新觀測站設置之評選與研究區域 312
7-2-8 土壤氣體綜合觀測結果 320
7-3 地下水壓觀測 329
7-3-1 臺北地區地下水壓觀測 329
7-3-2 新竹地區地下水壓觀測 332
7-3-3 嘉義地區地下水壓觀測 337
7-3-5 歷年水位資料的氣壓修正與異常重新確認 352
7-3-6 各站井體與儀器狀況說明 356
7-4 地下水水氡觀測結果 358
7-4-1 安通站與地震活動之關聯性 358
7-4-2 社頂站與地震活動之關聯性 359
7-5 綜合觀測結果 360
第八章、整合觀測資料分析 361
8-1 地震特性與相關的觀測異常 361
8-2 GPS、水準及 PS-INSAR 觀測資料綜合討論 362
8-2-1 大安-東勢 (AA') 剖面與地表變形觀測 364
8-2-2 龍井-國姓 (BB') 剖面與地表變形觀測 366
8-2-3 北斗-水里 (CC') 剖面與地表變形觀測 368
8-3 異常記錄與大地震活動之關係 370
8-4 GPS 與井下應變儀的共同解釋：GPS 應變分析 375
8-5 高頻 GPS 連續觀測資料的運用 379
第九章、結論與建議 381
參考文獻 387
委員審查意見 403

(附錄請參閱光碟)

[附錄 1-1] CGPS 觀測站基本資料
[附錄 1-2] 井下應變儀與地下水位監測井站基本資料
[附錄 1-3] 井下應變儀基本設計、測量原理、分析理論與資料校正
[附錄 1-4] 土壤氣體觀測站之選址依據與相關背景
[附錄 1-5] 土壤氣體觀測站之儀器使用
[附錄 1-6] 水氡監測站之區域地質背景
[附錄 1-7] 地下水水氡量測分析方法
[附錄 1-8] 地球化學觀測之研究方法
[附錄 2-1] GPS 移動站速度表

[附錄 2-2] 精密水準速度表
[附錄 3-1] CGPS 時間序列
[附錄 3-2] CGPS 速度表
[附錄 4-1] PS-InSAR 影像資料
[附錄 5-1] 活動斷層地震潛勢評估方法論
[附錄 5-2] 邏輯樹專家諮詢會議
[附錄 6-1] 井下應變儀資料分析結果
[附錄 6-2] 井下應變儀資料管理系統網站
[附錄 6-3] 時間序列資料分析理論
[附錄 6-4] 2013 年井下應變儀資料時頻分析結果
[附錄 7-1] 土壤氣體觀測站每月連續觀測圖
[附錄 7-2] 地下水壓逐月觀測資料
[附錄 7-3] 地下水水氡觀測結果

表目錄

表 A：本年度預期進度甘梯圖(GANTT CHART)。 XVI
表 B：預期進度查核點(CHECK POINT)。 XVIII
表 C：期末須交付之各項工作項目。 XX
表 1-1.1：中央地質調查所建置的 GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。 8
表 1-1.2：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起迄時間表。 9
表 1-1.3：土壤氣體觀測站資料接收起始時間表。 9
表 1-1.4：地下水水氡觀測站資料接收起始時間表。 9
表 1-1.5：地下水位觀測站資料接收起始時間表。 9
表 1-1.6：全程計畫預期進度甘梯圖(GANTT CHART)。 11
表 1-4.1：第二階段已設置之連續觀測站配置儀器及分析項目。 33
表 1-4.2：主要地震活動發生前於多個測站皆有異常氡氣反應。 34
表 1-4.3：活動斷層潛勢分析評估結果。 40
表 2-2.1：測線段及其配對 GPS 連續站點位名稱、距離及圖例。 92
表 2-4.1：台灣中部地區-災害性地震列表〔資料來源自中央氣象局網頁－災害地震彙總報告〕。 101
表 3-2.1：GPS 高程方向修正量。 110
表 5-1.1：車籠埔斷層幾何面各調查方法及斷層參數。 130
表 5-1.2：車籠埔斷層模型簡化幾何各模式比較及斷層參數。 130
表 5-1.3：車籠埔斷層參數表。 132
表 5-1.4：車籠埔斷層長期滑移速率彙整。 135
表 5-1.5：車籠埔斷層各破裂事件規模及權重。 136
表 5-1.6：車籠埔斷層各破裂事件邏輯樹分支週期及權重。 138
表 5-1.7：車籠埔斷層整段以 BPT 模式評估之發生機率。 139
表 5-1.8：車籠埔斷層北段以 BPT 模式評估之發生機率。 140
表 5-1.9：車籠埔斷層南段以 BPT 模式評估之發生機率。 140
表 5-1.10：車籠埔斷層發生機率評估。 141
表 5-2.1：梅山斷層參數表。 143
表 5-2.2：梅山斷層各破裂事件規模及權重。 145
表 5-2.3：梅山斷層以 BPT 模式評估之發生機率。 147
表 5-3.1：大茅埔-雙冬斷層參數表。 149
表 5-3.2：大茅埔-雙冬斷層各破裂事件規模及權重。 151
表 5-3.3：大茅埔-雙冬斷層各破裂事件分支週期及權重。 153
表 5-3.4：大茅埔-雙冬斷層整段破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 154
表 5-3.5：大茅埔斷層破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 154
表 5-3.6：雙冬斷層破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 155
表 5-3.7：大茅埔-雙冬斷層發生機率評估。 155
表 5-4.1：彰化斷層傾角資料及文獻列表。 157
表 5-4.2：彰化斷層深度資料及文獻列表。 157
表 5-4.3：彰化斷層參數表。 159
表 5-4.4：彰化斷層各破裂事件規模及權重。 161
表 5-4.5：彰化斷層各破裂事件分支週期及權重。 163
表 5-4.6：彰化斷層（A）整段+大甲斷層破裂事件以 BPT 模式評估之發生機率。 164
表 5-4.7：彰化斷層（B）整段破裂事件以 BPT 模式評估之發生機率。 164
表 5-4.8：彰化斷層（A）破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 165
表 5-4.9：彰化斷層（B）破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 165
表 5-4.10：彰化斷層發生機率評估。 166
表 5-5.3：九芎坑斷層參數表。 169
表 5-5.4：九芎坑斷層各破裂事件規模及權重。 172
表 5-5.5：九芎坑斷層各破裂事件分支週期及權重。 173
表 5-5.6：九芎坑斷層（A）破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 174
表 5-5.7：九芎坑斷層（B）破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 174
表 5-5.8：九芎坑斷層發生機率評估。 174

表 5-6.1：集集地震大尖山斷層兩側變位量及地表破裂地點(林啟文等, 2000A)。 176
表 5-6.2：大尖山斷層參數表。 177
表 5-6.3：大尖山斷層破裂事件規模及權重。 179
表 5-7.1：觸口斷層參數表。 185
表 5-7.2：觸口斷層各破裂事件規模及權重。 187
表 5-7.3：觸口斷層各破裂事件分支週期及權重。 189
表 5-7.4：觸口斷層（A）破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 190
表 5-7.5：觸口斷層（B）破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 190
表 5-7.6：觸口斷層（C）破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 191
表 5-7.7：觸口斷層（D）破裂事件以 POISSON 模式評估之發生機率。 191
表 5-7.8：觸口斷層發生機率評估。 191
表 5-8.1：圖 5-8.1 中所示九條斷層之幾何參數 193
表 5-8.2：圖 5-8.1 中所示 EULER'S POLE 所在的位置及誤差範圍值 196
表 5-8.3：由最佳塊體模型所得之斷層滑移速率及滑移虧損率(SLIP DEFICIT RATE)。 198
表 6-1.1：井下應變儀面應變中氣壓的影響係數。 209
表 6-3.1 各測站地潮反應比較。 249
表 7-1.1：既有觀測站的座標。座標系統為 TWD67。 261
表 7-2.1：大平地站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/28。 265
表 7-2.2：大平地站低反應時段經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/28。 267
表 7-2.3：新竹大平地觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/11/3）。 270
表 7-2.4：古坑站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/21。 274
表 7-2.5：雲林古坑觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/10/21）。 276
表 7-2.6：屏科大站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/26。 280
表 7-2.7：屏東屏科大觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/11/2）。 282
表 7-2.8：池上站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/28。 286
表 7-2.9：錦園站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/9/5。 286
表 7-2.10：池上站及錦園站異常區間編號與相關地震。 287
表 7-2.11：臺東池上及錦園觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/11/3）。 290
表 7-2.12：東華站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/28。 295
表 7-2.13：花蓮東華觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/11/3）。 298
表 7-2.14：中崙站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/5/20。 305
表 7-2.15：嘉義中崙濁水潭觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/5/20）。 307
表 7-2.16：異常點位土壤氣體成份分析結果。 318
表 7-2.17：地震與多個土壤氣體觀測站的氡氣異常反應。 321
表 7-3.1：2013 年符合臺北三個觀測井篩選條件的地震。 330
表 7-3.2：2013 年符合新竹二個觀測井篩選條件的地震。 334
表 7-3.3：2013 年符合嘉義四個觀測井篩選條件的地震。 338
表 7-3.4：新竹站群經氣壓修正後仍無影響之水位異常與地震列表。 354
表 7-3.5：嘉義站群經氣壓修正後仍無影響之水位異常與地震列表。 356
表 7-5.1：2012 年 12 月至 2013 年 11 月間，規模大於 5 且多個土壤氣體觀測站有前兆訊號的地震事件與各地球化學觀測站之前兆反應列表。 360
表 8-3.1：2009 年 1 月至 2013 年 11 月規模大於五之地震事件列表。 370
表 9.1：台灣北部地區 ENVISAT 影像，白色區塊為建議採購影像。 382

圖目錄

圖 1-1.1：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站之全台分布圖。 2
圖 1-1.2：台灣活動斷層分布圖與本計畫擬定之研究區域。 3
圖 1-1.3：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站 - 台北網分布圖。 4
圖 1-1.4：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站 – 新竹網分布圖。 5
圖 1-1.5：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站 -嘉義網及甲仙網分布圖。 6
圖 1-1.6：圖 1-1.3~圖 1-1.5 構造線圖例說明。 7
圖 1-1.7：地表變形、地震活動與現今大地測量觀測之相關性。 10
圖 1-1.8：斷層活動性觀測研究第三階段之架構。 11
圖 1-2.1：GPS 連續觀測站分布圖（中央地質調查所）。 12
圖 1-2.2：GPS 與精密水準測量監測點位分布圖。 13
圖 1-2.3：全臺灣相對於澎湖白沙站(S01R)之 GPS 水平速度場（胡植慶等，2012）。 14
圖 1-2.4：全臺灣相對於澎湖白沙站(S01R)之垂直速度場（胡植慶等，2012）。 15
圖 1-2.5：全臺應變率場分布圖。 16
圖 1-2.6：屏東平原 NJOU 站高程向時間序列與地下水位、日雨量比較圖。 17
圖 1-2.7：2003 成功地震 CGPS 30 秒解。 18
圖 1-2.8：ERS-1/2、ENVISAT C 波段影像降軌之框架 (FRAME) 與軌道 (TRACK) 圖。 19
圖 1-2.9：ALOS 衛星影像於台灣之升軌軌道涵蓋圖。 19
圖 1-2.10：美國加州地區活動斷層與孕震構造潛勢評估之四大流程 (摘錄自 WG07, 2008)。 22
圖 1-2.11：加州地區孕震構造之三維幾何形貌 (WG07, 2008)。 22
圖 1-2.12：加州地區地震潛勢評估之專家討論成果邏輯樹 (摘錄自 WG07, 2008)。 22
圖 1-2.13：加州地區未來 30 年發生地震規模為 5、6.7、7.7 以上之機率分布圖。 23
圖 1-2.14：日本主要孕震構造未來 30 年之活動潛勢評估成果 (日本全國地震動預測圖，2010)。 23
圖 1-4.1：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 連續站水平方向速度場。 27
圖 1-4.2：由 GPS 及水準測量所得臺灣現今垂直速度場。 28
圖 1-4.3：2009 年至 2012 年 11 月井下應變儀地震前兆相關之地震。 29
圖 1-4.4：科羅莎颱風前後面應變的時間序列。 30
圖 1-4.5：TSUN 科羅莎颱風前後面應變時頻圖。 30
圖 1-4.6：DARB 科羅莎颱風前後面應變時頻圖。 31
圖 1-4.7：甲仙地震前後面應變的時間序列。 31
圖 1-4.8：甲仙地震前後 DARB 面應變時頻圖。 31
圖 1-4.9：甲仙地震前後 TSUN 面應變時頻圖。 32
圖 1-4.10：甲仙地震前後 TAIS 面應變時頻圖。 32
圖 1-4.11：本計畫已設置之觀測站與未來 4 年預定設置觀測站之區域。 34
圖 1-4.12：嘉義中崙濁水潭觀測站對於發生於台灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應（2003/1/1~2004/7/31），非常適合持續長期觀測。 35
圖 1-4.13：新竹大平地觀測站對於發生於台灣北部與東北部地區的地震活動有敏感的反應（2006/6/14-2007/9/9），非常適合持續長期觀測。 35
圖 1-4.14：嘉南地區的中興、太興、達邦水位觀測站(2008/1/1-2008/3/31)對於發生於台灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應。 36
圖 1-4.15：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。 37
圖 1-4.16：台灣島與鄰近地區的板塊構造架構以及台北地區觀測井（JH：錦和站、SLN：樹林站、MD：明德站）有前兆反應的地震震央分布圖（2008 年 11 月至 2011 年 11 月）。 38
圖 1-4.17：大平地氣體觀測站與新樂水位觀測站之比較（2009/9/1-2009/12/31）。 38
圖 1-4.18：利用四分位數統計分析安通站地下水水氡濃度。 39
圖 1-4.19：社頂站地下水水氡濃度變化，及監測到地下水水氡濃度異常下降前兆之地震。 39
圖 1-4.20：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震發生機率。 41
圖 1-4.21：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震發生機率。 41
圖 1-4.22：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震發生機率。 42
圖 1-4.23：2009 年至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 43
圖 1-4.24：2009 年至 2012 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。 43
圖 2-1.1：2002 - 2012 年及 2013 年 GPS 點位座標殘差分布圖。 46

圖 2-1.2：2002 - 2012 年及 2013 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。 46
圖 2-1.3：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 47
圖 2-1.4：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 48
圖 2-1.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 49
圖 2-1.6：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 50
圖 2-1.7：2002-2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 ...51
圖 2-1.8：2002-2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 ...52
圖 2-1.9：2002-2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 ...53
圖 2-1.10：2002-2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 .54
圖 2-1.11：2002-2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 .55
圖 2-1.12：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 56
圖 2-1.13：2002-2013 年高屏地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 .57
圖 2-1.14：2002-2013 年高屏地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 .58
圖 2-1.15：高屏地區 GPS 移動站 S036 周圍環境全景圖。 58
圖 2-1.16：高屏地區 GPS 移動站 GC66 周圍環境全景圖。 59
圖 2-1.17：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形。 59
圖 2-1.18：2002-2013 年中部地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 .60
圖 2-1.19：2002-2013 年中部地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站（S01R）之位移-時間序列圖。 .61
圖 2-2.1：精密水準測量結果分析圖。 62
圖 2-2.2：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。 63
圖 2-2.3：三芝至士林測線水準高程變化圖。 64
圖 2-2.4：淡水至士林測線水準高程變化圖。 65
圖 2-2.5：五股至台北測線水準高程變化圖。 66
圖 2-2.6：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。 67
圖 2-2.7：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。 68
圖 2-2.8：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。 69
圖 2-2.9：水準點位 GB90 現地情形。 69
圖 2-2.10：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。 70
圖 2-2.11：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。 71
圖 2-2.12：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。 72
圖 2-2.13：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。 73
圖 2-2.14：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。 74
圖 2-2.15：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。 75
圖 2-2.16：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。 76
圖 2-2.17：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。 77
圖 2-2.18：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。 78
圖 2-2.19：水準點位 G435 現地情形。 78
圖 2-2.20：縣 184_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。 79
圖 2-2.21：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。 80
圖 2-2.22：水準點位 G533 現地情形。 80
圖 2-2.23：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。 81
圖 2-2.24：瀧澗至嶺頂測線水準高程變化圖。 82
圖 2-2.25：光復至豐濱測線水準高程變化圖。 83
圖 2-2.26：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。 84
圖 2-2.27：東成至富岡測線水準高程變化圖。 85
圖 2-2.28：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。 86
圖 2-2.29：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。 87
圖 2-2.30：台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。 88
圖 2-2.31：五光至黃竹水準高程變化圖。 89
圖 2-2.32：曾厝至霧峰水準高程變化圖。 90
圖 2-2.33：北勢至峰谷水準高程變化圖。 90
圖 2-2.34：烏溪南岸水準高程變化圖。 91
圖 2-2.35：中興新村水準高程變化圖。 91
圖 2-2.36：精密水準測線與 GPS 連續站之位移-時間序列圖。 93
圖 2-2.37：精密水準測線與 GPS 連續站之位移-時間序列圖。 93

圖 2-2.38：精密水準測線與 GPS 連續站之位移-時間序列圖。 94
圖 2-3.1：斷層錯位理論示意圖〔修改自 MATSU'URA ET AL.，1986〕。 95
圖 2-3.2：地殼應變示意圖〔修改自 KOSTROV，1974〕。 95
圖 2-3.3：2002 – 2013 年中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。 97
圖 2-3.4：中部地區應變率場分布圖。 98
圖 2-3.5：最小大地測量矩率分布圖。 98
圖 2-4.1：1900 年至 2013 年之地震資料品質展示。 99
圖 2-4.2：台灣地區 1604-2012 年災害性地震分布圖。 100
圖 2-4.3：地震矩率分布圖。 102
圖 2-4.4：台灣中部地區取樣格點之矩率在矩率區間與個數關係圖。 103
圖 2-4.5：台灣中部地區矩率綜合分析圖。 103
圖 3.1：本計畫約制之國際連續站與國內連續站分布圖。 105
圖 3.2：地調所連續站和與其它單位所交換之連續站分布圖。 106
圖 3-2.1：測站 SUN1 每日解時間序列。 108
圖 3-2.2：測站 SUN1 單日解時間序列。 109
圖 3-2.3：測站 DOSH 每日解時間序列。 110
圖 3-2.4：整合歷史資料至 2013 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場(相對 ITRF2008 全球座標系)。 111
圖 3-2.5：整合歷史資料至 2013 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場(相對 S01R 澎湖白沙)。 111
圖 3-3.1：20130602 南投地震同震變形圖。 112
圖 3-4.1：20131031 瑞穗地震同震變形圖。 113
圖 3-4.2：測站 PING 高頻動態解地震前後 1 小時時間序列。 114
圖 3-4.3：測站 DSIN、GUFU、JPEI、JSUI 高頻動態解地震前後 1 分時間序列。 115
圖 4.1：精密水準測線位置。 117
圖 4-1.1：運用方法幾何關係說明圖(摘自 黃孟涵, 2006)。 118
圖 4-2.1：ENVISAT 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。 119
圖 4-2.2：比較 ENVISAT 與編號 10 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 120
圖 4-2.3：比較 ENVISAT 與編號 11 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 120
圖 4-2.4：ENVISAT 與編號 17 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 121
圖 4-2.5：比較 ENVISAT 與編號 19 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 121
圖 4-2.6：ERS 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。 122
圖 4-2.7：比較 ERS 與編號 10 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 123
圖 4-2.8：比較 ERS 與編號 11 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 123
圖 4-2.9：比較 ERS 與編號 17 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 124
圖 4-2.10：比較 ERS 與編號 19 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 124
圖 4-2.11：ALOS(PATH 446 FRAMES 460 & 470)與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。 125
圖 4-2.12：比較 ALOS(PATH 446 FRAMES 460 & 470)與編號 10 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 126
圖 4-2.13：比較 ALOS(PATH 446 FRAMES 460 & 470)與編號 11 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 126
圖 4-2.14：比較 ALOS(PATH 446 FRAMES 460 & 470)與編號 17 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 127
圖 4-2.15：比較 ALOS(PATH 446 FRAMES 460 & 470)與編號 19 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。 127
圖 5-1.1：本計畫車籠埔斷層 8 種破裂模式。 129
圖 5-1.2：車籠埔斷層各槽溝的古地震事件（CHEN ET AL., 2007）。 134
圖 5-1.3：車籠埔斷層之分段破裂及權重分配。 135
圖 5-1.4：車籠埔斷層邏輯樹。 136
圖 5-1.5：整段之特徵地震模式。 137
圖 5-1.6：北段之特徵地震模式。 137
圖 5-1.7：南段之特徵地震模式。 137
圖 5-2.1：梅山斷層地表破裂位置(紅色實線)，噴砂現象(綠色點線)與航照判釋(藍色虛線)所推測之斷層延伸位置圖。 142
圖 5-2.2：梅山斷層三種可能破裂長度之模式。 145
圖 5-2.3：梅山斷層邏輯樹。 146

圖 5-2.4：梅山斷層之特徵地震模式。 146
圖 5-3.1：大茅埔-雙冬斷層三種可能破裂長度事件之模式與權重。 151
圖 5-3.2：大茅埔-雙冬斷層邏輯樹。 152
圖 5-3.3：整段之特徵地震模式。 152
圖 5-3.4：大茅埔斷層之特徵地震模式。 152
圖 5-3.5：雙冬斷層之特徵地震模式。 153
圖 5-4.1：左圖為彰化斷層地表分布圖，右圖為彰化斷層條帶地質圖。 156
圖 5-4.2：彰化斷層沿線地形及構造線形套疊。 156
圖 5-4.3：彰化一號井、東芳井等層序地層對比。 158
圖 5-4.4：彰化斷層兩種可能破裂長度之模式與權重。 161
圖 5-4.5：彰化斷層邏輯樹權重分配。 162
圖 5-4.6：整段+大甲斷層破裂事件之特徵地震模式。 162
圖 5-4.7：整段破裂事件之特徵地震模式。 162
圖 5-5.1：左圖為九芎坑斷層地表分布圖，右圖為中油十萬分之一地質圖。 167
右圖標示布蓋重力曲線、地層、構造及鄉鎮(中油，1986) 167
圖 5-5.2：九芎坑斷層槽溝開挖結果北側牆面。(陳文山，2003) 168
圖 5-5.3：桐樹湖斷層和九芎坑斷層之分布關係。 171
圖 5-5.4：九芎坑斷層兩種可能破裂事件之模式與權重。 171
圖 5-5.5：九芎坑斷層邏輯樹權重分配。 172
圖 5-5.6：A 破裂事件九芎坑斷層+桐樹湖斷層之特徵地震模式。 173
圖 5-5.7：B 破裂事件九芎坑斷層之特徵地震模式。 173
圖 5-6.1：大尖山斷層地質圖。 175
圖 5-6.2：大尖山斷層邏輯樹權重分配。 179
圖 5-7.1：觸口斷層地質圖。 180
圖 5-7.2：深部構造剖面地理位置圖。 181
圖 5-7.3：觸口斷層與崙後斷層之深度構造剖面圖。 182
圖 5-7.4：觸口斷層的地球物理探勘結果。 182
圖 5-7.5：陳郁文(2006) 使用淺層反射震測法探討觸口斷層及其附近地下構造。 183
圖 5-7.6：台灣西南部發震構造與最大地震潛能評估圖。 183
圖 5-7.7：瑞里地震所收集之餘震之震央分布圖，和深度剖面圖。 184
圖 5-7.8：觸口斷層各分段之分布關係及四種可能破裂之模式。 187
圖 5-7.9：觸口斷層邏輯樹權重分配。 188
圖 5-7.10：A 破裂事件之特徵地震模式。 188
圖 5-7.11：B 破裂事件之特徵地震模式。 188
圖 5-7.12：C 破裂事件之特徵地震模式。 189
圖 5-7.13：D 破裂事件之特徵地震模式。 189
圖 5-8.1：本文所用的台灣中部三維塊體模型。 193
圖 5-8.2：在 2002-2012 期間利用連續 GPS（藍色箭頭）及 CAMPAIGN GPS（紅色箭頭）資料所觀測的水平地表速度場（相對於澎湖白沙站） 195
圖 5-8.3：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 EULER'S POLE 所在的位置(黑點)及誤差範圍(黑色橢圓)。 195
圖 5-8.4：(A) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 EULER'S POLE 為軸的旋轉角速度。 196
圖 5-8.5：(A) 由圖 5-8.4B 所推求的斷層長期滑移速率。 197
圖 5-8.6：比較 GPS 觀測速度場（藍色箭頭）以及本研究所得之最佳塊體模型（圖 5-8.5）所預估的地表運動（紅色箭頭）。 197
圖 5-8.7：計算平均滑移速率及滑移虧損率(SLIP DEFICIT RATE)的斷層(斷層段)分段點。 198
圖 5-9.1：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震發生機率。 200
圖 5-9.2：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震發生機率。 201
圖 5-9.3：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震發生機率。 202
圖 6-1.1：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。 204
圖 6-1.2：井下應變儀中地潮分量的評估。 204
圖 6-1.3：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。 205
圖 6-1.4：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花國小測站(PFMT)地下水位持續下降。 205
圖 6-1.5：台北地區地下水各測站水位資料。 205
圖 6-1.6：台北地區地下水各測站水位資料與井下應變儀面應變。 206
圖 6-1.7：嘉義網達邦測站(DARB)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 207

圖 6-1.8：嘉義網中興國小測站(TSUN)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 207
圖 6-1.9：嘉義網太興國小測站(TAIS)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 208
圖 6-1.10：台北網錦和國小測站(JING)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 208
圖 6-1.11：台北網明德中學測站(SANS)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 208
圖 6-1.12：台北網樹林測站(SLIN)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。 209
圖 6-1.13：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 211
圖 6-1.14：嘉義網達邦測站(DARB)應變資料。 212
圖 6-1.15：嘉義網中興國小測站(TSUN)應變資料。 213
圖 6-1.16：嘉義網太興國小測站(TAIS)應變資料。 213
圖 6-1.17：嘉義網達邦測站(DARB)應變資料。 214
圖 6-1.18：嘉義網達邦測站(DARB)與太興國小測站(TAIS)應變資料。 215
圖 6-2.1：2013 年 1 月達邦測站(DARB)面應變資料時頻圖與能量變化。 217
圖 6-2.2：2013 年 8 月太興國小測站(TAIS)面應變資料時頻圖與能量變化。 218
圖 6-2.3：2013 年 3 月中興國小測站(TSUN)面應變資料時頻圖與能量變化。 219
圖 6-2.4：中興國小(TSUN)測站科羅莎颱風前後面應變時頻分析結果。 221
圖 6-2.5：達邦(DARB)測站科羅莎颱風前後面應變時頻分析結果。 222
圖 6-2.6：甲仙地震前後中興國小(TSUN)測站面應變時頻分析結果。 223
圖 6-2.7：甲仙地震前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。 224
圖 6-2.8：甲仙地震前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。 225
圖 6-2.9：南瑪督颱風前後中興國小(TSUN)測站面應變時頻分析結果。 226
圖 6-2.10：南瑪督颱風前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。 227
圖 6-2.11：南瑪督颱風前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。 228
圖 6-2.12：日本東北地震前後中興國小(TSUN)測站面應變時頻分析結果。 229
圖 6-2.13：日本東北地震前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。 230
圖 6-2.14：日本東北地震前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。 231
圖 6-2.15：2013 年 3 月地震前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。 232
圖 6-2.16：2013 年 3 月地震前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。 233
圖 6-2.17：2013 年 6 月 2 地日地震前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。 234
圖 6-2.18：2013 年 6 月 2 地日地震前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。 235
圖 6-2.19：2013 年蘇力颱風前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。 236
圖 6-2.20：2013 年蘇力颱風前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。 237
圖 6-2.21：2013 年潭美颱風前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。 238
圖 6-2.22：2013 年潭美颱風前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。 239
圖 6-2.23：2013 年天兔颱風前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。 240
圖 6-2.24：2013 年天兔颱風前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。 241
圖 6-2.25：太興國小(TAIS)測站與達邦(DARB)測站 0.15~0.5HZ 面應變強度趨勢變化與氣壓趨勢變化。 242
圖 6-2.26：太興國小(TAIS)測站與達邦(DARB)測站 0.15~0.5HZ 面應變強度趨勢變化與地下水水位趨勢變化。 243
圖 6-2.27：太興國小(TAIS)測站與達邦(DARB)測站 0.15~0.5HZ 面應變強度趨勢變化與累積雨量趨勢變化。 243
圖 6-3.1：新樂國小測站(CINT)的 CH0 資料異常情況。 245
圖 6-3.2：中興國小測站(TSUN)的資料異常情況。 245
圖 6-3.3：樹林測站(SLIN)的資料異常情況。 246
圖 6-3.4：2005 年 7 月 15 日至 7 月 22 日期間降雨資料比對。 246
圖 6-3.5：井下應變儀中的原始氣壓記錄。 247
圖 6-3.6：氣象局屬自計站氣壓記錄。 248
圖 6-3.7：各井下應變儀訊號中地潮振幅之比較。 249
圖 6-3.8：達邦測站(DARB)平面應變與地下水水位。 250
圖 6-3.9：太興國小測站(TAIS) 2013 年平面應變與地下水位。 250
圖 6-3.10：達邦站 CH0 觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較(0-40MHZ)。 252
圖 6-3.11：達邦站觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較。 253
圖 6-3.12：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。 253
圖 6-3.13：觀測應變去除氣壓響應後的結果。 254
圖 6-3.14：氣壓對應變資料的影響，可看兩者間是屬於負相關性。 254
圖 6-3.15：降雨與面應變間之關係，藍線表示面應變，綠線表示單位時間降雨量。 255

圖 6-3.16：地下水位歷時曲線中因降雨造成的快速與緩慢響應的示意圖。 256
圖 6-3.17：大坪國小觀測站(BMMT)受到降雨引發的快速響應函數。 257
圖 6-3.18：錦和國小觀測站(JING)受到降雨引發的快速響應函數。 257
圖 6-3.19：明德國中觀測站(SANS)受到降雨引發的快速響應函數。 258
圖 6-3.20：應用模擬降雨響應至原始觀測應變資料上，可有效地除去降雨造成的快速響應的異常現象。 258
圖 7-1.1：既有觀測站的分布位置。 260
圖 7-1.2：氣體異常與地震發生的時間關係圖。 262
圖 7-2.1：新竹大平地觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。 264
圖 7-2.2：大平地站氡氣數據經時序分析方法處理後結果。 266
圖 7-2.3：大平地站低反應區間之氡氣數據經時序分析方法處理後的結果。 269
圖 7-2.4：大平地觀測站相關地震位置分布圖。 272
圖 7-2.5：雲林古坑觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。 273
圖 7-2.6：古坑站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果。 275
圖 7-2.7：古坑觀測站相關地震位置分布圖。 278
圖 7-2.8：屏東屏科大觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。 279
圖 7-2.9：屏科大站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果。 281
圖 7-2.10：屏科大觀測站相關地震位置分布圖。 283
圖 7-2.11：臺東池上觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。 284
圖 7-2.12：池上站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果。 288
圖 7-2.13：錦園站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果。 289
圖 7-2.14：池上及錦園觀測站相關地震位置分布圖。 293
圖 7-2.15：花蓮東華觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。 294
圖 7-2.16：東華站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果。 297
圖 7-2.17：東華觀測站相關地震位置分布圖。 300
圖 7-2.18：花蓮美崙簡易型土壤氣體觀測站位置示意圖。 301
圖 7-2.19：美崙土壤氡氣簡易觀測站配置示意圖。 301
圖 7-2.20：東華與美崙土壤氡氣比較圖。 302
圖 7-2.21：嘉義中崙濁水潭觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/5/20。 303
圖 7-2.22：嘉義中崙濁水潭觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2013/6/19-2013/11/30。 304
圖 7-2.23：中崙站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果。 306
圖 7-2.24：中崙濁水潭觀測站相關地震位置分布圖。 308
圖 7-2.25：中崙濁水潭觀測站野外現地照片。 309
圖 7-2.26：嘉義中崙濁水潭觀測站土壤氣體成分及氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。 310
圖 7-2.27：三義斷層兩萬五千分之一條帶地質圖（林啟文等，2008）。 313
圖 7-2.28：車籠埔斷層兩萬五千分之一條帶地質圖，豐原以北段（李元希等，2000）。 314
圖 7-2.29：苗栗台中地區土壤氣體採樣點分佈圖，共 67 個（三義斷層）。 315
圖 7-2.30：苗栗台中地區土壤氣體採樣點分佈圖，共 30 個（車籠埔斷層豐原以北段）。 315
圖 7-2.31：三義斷層土壤氡異常點分布圖。 316
圖 7-2.32：車籠埔斷層豐原以北段土壤氡異常點分布圖。 317
圖 7-2.33：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。 320
圖 7-2.34：2012/12/24 臺東外海地震與各測站觀測情形。 322
圖 7-2.35：2013/2/2 花蓮外海地震與各測站觀測情形。 323
圖 7-2.36：2013/3/7 花蓮秀林地震與各測站觀測情形。 324
圖 7-2.37：2013/3/27 南投仁愛地震與各測站觀測情形。 325
圖 7-2.38：2013/6/2 南投仁愛地震與各測站觀測情形。 326
圖 7-2.39：2013/6/29 花蓮外海地震與各測站觀測情形。 327
圖 7-2.40：2013/10/31 花蓮瑞穗地震與各測站觀測情形。 328
圖 7-3.1：臺北地區 2012 年 12 月至 2013 年 11 月，明德、錦和與樹林三個觀測井水壓、地震、降雨以及氣壓之對比圖。 332
圖 7-3.2：新竹地區 2012 年 12 月至 2013 年 11 月，新樂與大坪觀測井水壓、地震、降雨以及氣壓之對比圖。 335
圖 7-3.3：新竹地區 2013 年 3 月新樂與大坪觀測井水壓、地震、降雨以及氣壓之對比圖。 336
圖 7-3.4：嘉義地區 2012 年 12 月至 2013 年 11 月，沄水、中興、太興與達邦觀測井水壓、地震、降雨以及氣壓之對比圖。 340
圖 7-3.5：3 月 27 日地震前，臺北站群水位圖。 342

圖 7-3.6：3 月 27 日地震前，新竹站群水位圖。 343
圖 7-3.7：3 月 27 日地震前，嘉義站群水位圖。 344
圖 7-3.8：3 月 27 日南投地震與霧台地震，新樂站水位異常比較圖。 345
圖 7-3.9：6 月 2 日地震前，臺北站群水位圖。 345
圖 7-3.10：6 月 2 日地震前，新竹站群水位圖。 346
圖 7-3.11：6 月 2 日地震前，嘉義站群水位圖。 347
圖 7-3.12：10 月 31 日地震前，臺北站群水位圖。 349
圖 7-3.13：10 月 31 日地震前，新竹站群水位圖。 350
圖 7-3.14：10 月 31 日地震前，嘉義站群水位圖。 351
圖 7-3.15：兩種水位計類型簡示。 352
圖 7-3.16：2013 年沄水站 1、2 月資料氣壓修正結果。 353
圖 7-3.17：臺北站群震前異常分布，氣壓修正前後比較圖。 354
圖 7-3.18：新竹站群震前異常分布，氣壓修正前後比較圖。 355
圖 7-3.19：沄水的特有不穩定現象例圖(圖中時段為 2011 年 4 月中旬至 6 月中旬)。 355
圖 7-3.20：嘉義站群震前異常分布，氣壓修正前後比較圖。 356
圖 7-4.1：利用四分位數統計分析安通站地下水水氡濃度。 358
圖 7-4.2：安通站以 SARAD 量測之氣相氡濃度。 358
圖 7-4.3：社頂站地下水水氡濃度變化，及監測到地下水水氡濃度異常下降前兆之地震。 359
圖 7-4.4：社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較。 359
圖 8-2.1：研究區域內之垂直速度場（色階）、GPS 水平速度場、水準測線位置及三條剖面線位置。 363
圖 8-2.2：沿著 AA'剖面之綜合各項觀測結果。 365
圖 8-2.3：沿著 BB'剖面之綜合各項觀測結果。 367
圖 8-2.4：沿著 CC'剖面之綜合各項觀測結果。 369
圖 8-3.1：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 374
圖 8-3.2：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。 374
圖 8-3.3：2009 年 1 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。 375
圖 8-4.1：嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站。 377
圖 8-4.2：GS07-GS62-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013 年的觀測換算成應變量的變化。 377
圖 8-4.3：GS07-GS66-W029 所形成的 GPS 三角網在 2013 年的觀測換算成應變量的變化。 378
圖 8-5.1：GS63 高頻 GPS 連續觀測站資料在 2013 年 6 月 2 日南投地震的每秒座標解(右圖)，左圖則為鄰近井下應變儀站同時間的應變資料。 380
圖 8-5.2：JHCI 高頻 GPS 連續觀測站資料在 2013 年 6 月 2 日南投地震的每秒座標解(右圖)，左圖則為鄰近井下應變儀站同時間的應變資料。 380

表 A：本年度預期進度甘梯圖(Gantt Chart)。

計畫名稱：斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析（1/4）										
月次 工作項目　月份	第1月 (4)	第2月 (5)	第3月 (6)	第4月 (7)	第5月 (8)	第6月 (9)	第7月 (10)	第8月 (11)	第9月 (12)	備註
第一季查核點										
第二季查核點										
期中報告										
第三季查核點										
期末報告										
第四季查核點										
GPS 移動站資料檢核及分析 (由成大工作團隊負責)										
GPS 及水準測量規劃、督導 (由成大工作團隊負責)										
計算結果檢驗及分析 (由臺大與成大工作團隊負責)										
地殼矩率及大地測量矩率分析 (由成大工作團隊負責)										
GPS 連續站資料檢核、計算及時序分析解算(由臺大工作團隊負責)										
PSInSAR 與水準測線之垂直變形資料比較 (由臺大工作團隊負責)										
建構活動斷層鄰近地區三維幾何形貌 (由臺大工作團隊負責)										
井下應變儀資料校正及計算分析 (由臺大工作團隊負責)										
嘉義網測站時頻分析 (由臺大工作團隊負責)										
維護井下應變儀資料庫 (由臺大工作團隊負責)										
整合並綜合分析觀測資料 (由臺大工作團隊負責)										
既有氣體觀測站持續分析數據 (由臺大地化工作團隊負責)										
既有水位觀測站持續分析數據 (由臺大地化工作團隊負責)										
既有水氡觀測站持續分析數據 (由臺大地化工作團隊負責)										
苗栗台中地區土壤氣體調查結果及未來設站地點評估(由臺大地化工作團隊負責)										
安通溫泉持續定期監測分析 (由臺大地化工作團隊負責)										
墾丁公園地下水持續定期監測分析 (由臺大地化工作團隊負責)										
活動潛勢評估方法論研究 (由中興工程顧問社負責)										

月次 工作項目　月份	第1月 (4)	第2月 (5)	第3月 (6)	第4月 (7)	第5月 (8)	第6月 (9)	第7月 (10)	第8月 (11)	第9月 (12)	備註
車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、梅山斷層活動特性參數表 (由中興工程顧問社負責)										
建立車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、梅山三維幾何形貌 (由中興工程顧問社負責)										
車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、梅山參數邏輯樹專家諮詢會議 (由中興工程顧問社負責)										
彰化斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層、觸口斷層活動特性參數表 (由中興工程顧問社負責)										
建立彰化斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層、觸口斷層三維幾何形貌 (由中興工程顧問社負責)										
彰化斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層、觸口斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 (由中興工程顧問社負責)										
利用地表運動場來推測中部地區 7 條活動斷層之斷層面的震間滑移速率 (由中興工程顧問社負責)										
探討各活動斷層的滑移虧損(slip deficit) (由中興工程顧問社負責)										
地震規模尺度研究 (由中興工程顧問社負責)										
中部地區 7 條活動斷層斷層活動潛勢評估 (由中興工程顧問社負責)										
預定進度（累積數）	5 %	15%	30%	45%	55%	70%	85%	95%	100%	

說明：(1) 工作項目請視計畫性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起訖日期，期中報告與期末報告必須明列於本表中。

(2) 預定進度百分比一欄係為配合追蹤考核作業所需，累計百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：1.工作天數 2.經費之分配 3.工作量之比重 4.擬達成目標之具體數字。

(3) 計畫進度控制若有分項協同計畫請分別列出整體計畫執行與各分項計畫執行之甘梯圖（表 A）與預期進度查核點（表 B）。

表 B：預期進度查核點(Check Point)。

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
1	（第一季查核點） 1. 工作進度報告表 a. GPS 連續站計算及時序分析 12-3 月 b. 井下應變儀資料校正 12-3 月 c. 既有氣體觀測站 12-3 月資料分析 d. 既有水位觀測站 12-3 月資料分析 e. 既有水氡觀測站 12-3 月資料分析	四月三十日	第一季工作進度報告
2	（第二季查核點） 1. 修正後之契約書與工作計畫書 2. 第一期請款 3. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核 4-5 月 b. GPS 連續站計算及時序分析 4-5 月 c. 彙整中部地區 SAR 影像對 d. 井下應變儀資料校正 4-5 月 e. 既有氣體觀測站 4-5 月資料分析 f. 既有水位觀測站 4-5 月資料分析 g. 既有水氡觀測站 4-5 月資料分析 h. 苗栗台中地區土壤氣調查初步結果 i. 嘉義網測站時頻分析 j. 整合觀測資料至最新 k. 車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、梅山斷層活動特性參數表 l. 車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、梅山三維幾何形貌 m. 斷層參數邏輯樹專家諮詢會議	六月三十日	第一期請款 第二季工作進度報告
3	（期中報告） 1. 工作進度報告表 2. 期中報告書面資料 3. 期中報告簡報資料 4. 會計報表 5. 第二期款請款收據	八月三十一日	期中報告書面與簡報資料 會議記錄與委員意見辦理狀況 第二期請款
4	（第三季查核點） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料查核 6-8 月 b. GPS 連續站計算及時序分析至 6-8 月 c. 初步處理 PSInSAR 平均視衛星方向位移之數值資料 d. 井下應變儀資料校正及計算分析 6-8 月 e. 既有氣體觀測站 6-8 月資料分析 f. 既有水位觀測站 6-8 月資料分析 g. 既有水氡觀測站 6-8 月資料分析 h. 嘉義網測站時頻分析 i. 整合觀測資料至最新 j. 彰化斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層、觸口斷層活動特性參數表 k. 彰化斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層、觸口斷層三維幾何形貌	九月三十日	第三季工作進度報告

序號	查核點 請詳填交付項目	預定達成日期	完成狀態
5	（期末報告） 1. 工作進度報告表 a. GPS 及水準資料 9-10 月查核及分析 b. 地殼矩率及大地測量矩率分析 c. GPS 連續站計算及時序分析 9-10 月 d. PSInSAR 與水準測線之垂直變形資料比較 e. 建構活動斷層鄰近地區三維幾何形貌 f. 既有氣體觀測站 9-10 月資料分析 g. 既有水位觀測站 9-10 月資料分析 h. 既有水氡觀測站 9-10 月資料分析 i. 苗栗台中地區土壤氣體調查結果 j. 井下應變儀資料校正 9-10 月 k. 嘉義網測站時頻分析 l. 綜合分析觀測資料 l. 中部地區 7 條活動斷層斷層活動潛勢評估 m. 中部地區 7 條活動斷層之斷層面的震間滑移速率 n. 各活動斷層的滑移虧損 o. 斷層參數邏輯樹專家諮詢會議 2. 期末報告書面資料初稿	十一月三十日	期末報告書面初稿與簡報資料 會議記錄與委員意見辦理狀況
6	（第四季查核點，驗收） 1. 正式研究成果報告書 30 份 2. 正式研究成果報告書電子檔 10 份 3. 會計報表 4. 尾款請款收據	十二月三十一日	成果報告書 30 份 成果報告書電子檔 10 份

表 C：期末須交付之各項工作項目。

	工作項目	章節
移動式 GPS 及精密水準測量	1. 測量外業督導（GPS 移動站測量全臺灣分為 8 個地區，每區抽樣督導 5 點，共計 40 點；水準測量每條測線抽樣督導 1 測段，共計 41 測段。以上數據將以 2013 年度測量公司承辦之業務範圍為準)、GPS 分區測量數量之 10%（小數點以下四捨五入）抽樣檢核測量、GPS 測量成果與抽測結果基線差檢核及水準測量成果閉合差檢核。	2-1 2-2
	2. 藉由 GPS 移動站（依據透空度及距斷層遠近規劃測量點位）與核心連續站（以解算移動站座標框架時所需約制者為限）及精密水準測量資料，計算地表位移向量，以推求地表水平與垂直方向的速度場，並提供區域之應變速率分析。	2-1 2-3
	3. GPS 與水準測量歷年誤差及成果分析。	2-1、2-2
	4. 利用所得之地表速度場及應變矩率，推估研究區域彈性地殼內對應之能量累積，同時也估計並比較同時期由地震所釋放之地震矩率，藉以探討研究地區內能量蘊含之盈虧空間分布,提供地震潛能分析模式之依據。	2-3
連續式 CGPS 及 PS-InSAR	1. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料，進行資料檢核及坐標與高程差解算，獲得地表水平與垂直方向的位移量及速度場之初解。	3-1
	2. 完成地調所全台連續 GPS 測量資料之時序分析，提供周期性變化結果(以超過一年以上之資料做分析)。GPS 連續站資料分析包含各測站的雜訊特性、週期性效應與自然界影響因子分析。	3-2
	3. 交付中部地區雷達影像之原始格式(RAW)，單觀點複數影像(SLC: Single Look Complex)和 PS-InSAR 技術所得之平均視衛星方向位移之數值資料。	已交付
	4. 利用 GPS 水平位移，將 PS-InSAR 的視衛星方向位移轉換成垂直分量變形資訊，並與水準測線所得之垂直變形資料比較。	4-2
	5. 利用中油構造平衡剖面資料及重定位地震位置，建構活動斷層鄰近地區三維幾何形貌。並將測地學(GPS、水準及PS-InSAR)所得之變形反演斷層面震間滑移分布及滑移虧損。	5-8
井下應變儀資料檢核與分析	1. 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓計、潮汐影響及井孔溫度校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係；並進行面應變、剪應變分析。	附錄 1-3 D 附錄 6-1
	2. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。並經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。	6-1 附錄 1-3 D

	3. 針對嘉義網測站進行時頻分析，利用時頻分析技術尋找應變儀測站之特徵頻率、分析颱風或地震事件是否有異常頻率的發生，進而探討可能的產生原因。	6-2 附錄 6-2
	4. 維護井下應變儀資料庫，持續更新，並維護更新網頁資訊。	附錄 6-3
地球化學觀測分析	1. 嘉義中崙濁水潭觀測站 2012 年 12 月至 2013 年 11 月土壤氣體之甲烷、水氣、氪氣、氧氣、氬氣、二氧化碳、氡氣氣體觀測結果。	7-2-6
	2. 新竹大平地、雲林古坑、屏東屏科大、台東池上、花蓮東華站 2012 年 12 月至 2013 年 11 月土壤氣體之二氧化碳與氡氣氣體觀測結果。	7-2-1~ 7-2-5
	3. 苗栗台中地區的土壤氣體調查結果，評估未來土壤氣體觀測站的可能設站地點。	7-2-7
	4. 嘉義沄水國小水位觀測站 2012 年 12 月至 2013 年 11 月水位觀測結果。	7-3-3
	5. 台東安通站 2012 年 12 月至 2013 年 11 月地下水水氡觀測結果。	7-4-1
	6. 墾丁社頂站 2012 年 12 月至 2013 年 11 月地下水水氡觀測結果。	7-4-2
	7. 台東安通站 2012 年 12 月至 2013 年 11 月定期採樣地下水水氡分析結果。	7-4-1
	8. 墾丁社頂站 2012 年 12 月至 2013 年 11 月定期採樣地下水水氡分析結果。	7-4-2
	9. 將觀測資料同步轉移至委託單位之伺服器。	資料已轉移
	10. 彙整第二期四年觀測結果之總結報告及建議項目。	(誤植，去年度已繳交。)
整合觀測資料分析	1. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料，同時利用地球化學觀測站及地下水資料加以比較，找出其相關性。	第八章
	2. 以井下應變儀時間點為主，分析連續地震資料，理解是否有無慢地震徵兆、以進一步解釋應變異常。	無發現
	3. 將井下應變儀嘉義網與新竹網附近 GPS 觀測資料換算成 GPS 應變，並與井下應變做整合性的分析。	8-4
	4. 選擇一個較大之異常事件做高頻 GPS 分析，從地殼位移與地殼應變的觀點來解釋斷層的活動性。	3-3 3-4 8-5
斷層活動潛勢分析	1. 召開 1 次活動斷層參數表及邏輯樹專家討論會議，針對斷層分段特性、三維幾何形貌、最近一次活動時間、長期滑移速率、可能引致地震規模等參數不確定性，進行邏輯樹架構與參數權重之合理性探討。	附錄 5-2
	2. 蒐集包含利用台灣陸域構造平衡剖面資料以及重定位地震資料建立活動斷層三維幾何形貌、並研究活動斷層之活動特性與地震規模尺度，建立活動斷層特性之參數表。包含：斷層名稱、分段資訊、斷層長度與破	5-1-1 5-2-1 5-3-1 5-4-1 5-5-1

	裂深度、面積、斷層機制、傾角、錯動量及分布、長短期滑移速率、再現週期、最近一次活動時間、可能最大地震規模。可將參數表之資訊以及野外調查成果彙整為 GIS 圖層。	5-6-1 5-7-1
	3. 槽溝，地形或是地球化學定年之相關研究成果，推估活動斷層之長期滑移速率資料；並利用 GPS 地表速度場及活動斷層地下幾何形貌，推估斷層面上短期滑移速率，進一步推算斷層的能量累積率與發生特徵地震規模間的關係。	5-8-2
	4. 利用 GPS 連續觀測站以其他測地學的觀測資料所記錄的地表運動場(速度及應變率)來推測斷層面的震間滑移速率；並與背景地震度比較，探討各活動斷層的滑移虧損；分析短期及長期滑移速率及其在活動斷層潛勢分析上的意義。	5-8-2
	5. 完成中部地區 7 條活動斷層(彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、觸口斷層)之錯動機率評估。其項目包括：(a)建立活動斷層之特徵地震模式、(b)評估活動斷層未來發生機率、(c)製作活動斷層發生機率潛勢圖。	5-1-3 5-1-4 5-2-3 5-2-4 5-3-3 5-3-4 5-4-3 5-4-4 5-5-3 5-5-4 5-6-3 5-7-3 5-7-4

摘要

截至期末報告前，精密水準已完成 34 條測線共 1147 個測段之施測及查核；GPS 亦完成恆春地區 32 點、桃竹地區 114 點、嘉南地區 183 點、高屏地區 113 點及中部地區 155 點之移動站測量及查核工作。藉由誤差分析及與 GPS 連續站座標時間序列比對後，顯示觀測資料品質符合歷年施測水準且穩定可靠。

本計畫計算 2013 年全台連續全球定位系統測站共 246 站，由於各測站設置背景不同，利用 GAMIT 計算時所需提供資基本資料各有差異，由於某些測站資料的精度不佳，造成解算誤差過大而遭剔除，因此今年本研究主要瞭解各測站之狀況，並彙整時間序列，分析座標跳變動過大與誤差過大的點位，以瞭解發生的原因，以利於測站移動速度場分析。在同震變形研究方面，2013 年 3 月及 6 月南投地震的震央位置相當接近日月潭站(SUN1)，受到較大同震影響的測站為 DPIN、PLIM、S167、S170、SINY 以及位移量最大的 SUN1。其最大水平位移量為 0602 地震時的同震變形，向北向西分量各為 32.6 mm 以及 33.0 mm；另外在高頻解算部分(1 秒採樣率)，針對 2013 年 6 月南投地震，利用美國推進噴射實驗室(Jet propulsion laboratory, JPL)所研發的 GIPSY 軟體，計算高頻的資料，以期望得到地震發生前後，地震震央附近地表動態變形過程，與其他單位(GPSLAB、CWB、成功大學)公布的解算結果相似。南投地震同震位移都以水平方向比較為明顯，最大變形位於日月潭的 SUN1 測站，其他周圍距離約 50 km 的測站以內也能觀測到明顯的同震地表變形，而 2013 年 10 月 31 日 20 時 02 分花蓮瑞穗地區發生一芮氏規模 6.3 的地震，本研究團隊同樣針對此地震進行高頻 GPS 動態解算，取其地震前後 10 小時動態解，並整合其他單位 GPS 單日解同震位移速度場，與單日解結果相似，更利用瑞士波昂大學所研發的後處理計算程式，以池上牧野渡假村 SHAN 為參考站，計算震央附近 DSIN, GUFU, JPEI 及 JSUI 連續固定站一秒採樣率的地震前後一分鐘的動態結果，成果顯示一秒採樣率可詳細記錄測站的地形變化，可作為後續動態變形模式的參考。

PS-InSAR 工作部份彙整臺灣中部地區，由 ALOS、ERS-1/2 以及 ENVISAT 等衛星所拍攝的 SAR 影像，並分析其相對基線值，以檢核可供產生干涉之影像對，製作干涉影像。在本期期末報告中，我們應用並修正黃孟涵(2006)方法，將 GPS 的垂直與水平速度場轉換成 LOS 方向的向量，最後，與 PS-InSAR 結果做比較。另外，由於水準測站上缺少水平的速度場資料 (即 GPS 與水準測站不共站)，因此我們直接比較 PS-InSAR 之 LOS 速度場與水準的垂直速度場。

關於斷層活動潛勢分析部分，初步建立台灣地區評估活動斷層潛勢之方法論。斷層潛勢評估的目的是建立台灣活動斷層潛勢評估流程，以中部 7 條進行評估，分別為車籠埔斷層、梅山斷層、大茅埔-雙冬斷層、彰化斷層、九芎坑斷層、大尖山斷層、觸口斷層。首先建立活動斷層參數表，透過本計畫建立之活動斷層潛勢評估方法論，了解斷層的重複間隔相關資訊後，以機率法評估活動斷層未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率。車籠埔斷層利用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 2.2%、5.9%和 17.7%；梅山斷層利用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 30.9%、44.1%和 63.4%；大茅埔-雙冬斷層利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 3.2%、5.1%和 9.6%；彰化斷層利用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 15.0%、22.4%和 35.5%，採用 Poisson 模式未來 30 年、50 年及 100 年發生機率各為 10.5%、16.4%及 27.9%；九芎坑斷層利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 3.1%、5.0%和 9.2%；觸口斷層利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 11.7%、18.2%和 30.3%。

本研究藉由三維塊體模型 DEFNODE (McCaffrey, 2005)，針對台灣中部地區由 GPS 所觀測到的現今(2002-2012)水平地表變形速率進行運動學分析。模型中將此區共分為 12 個塊體(另加外圍 3 個塊體作為邊界約制條件)，並由地調所公佈的活斷層(義竹斷層除外)當成各塊體的邊界。利用 DEFNODE，我們同時解算符合 GPS 觀測速度的各塊體最佳剛體旋轉速率及邊界斷層上的最佳滑移速率及滑移虧損率(slip deficit rate)。研究結果顯示車籠埔斷層南段的觸口—大尖山及東邊(上盤)的大茅埔—雙冬斷層有較高的滑移虧損率(slip deficit rate)，其值約在 12-19 mm/yr。

井下應變儀部份，處理台北網、新竹網及嘉義網共11個測站，目前利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式，並作修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與大地震相關的應變"異常"。從2012年12月至2013年11月，在嘉義網觀測到3個應變異常事件，可能與下列三個地震事件相關：(1)2013年3月7日芮氏規模5.9花蓮地震與3月27日芮氏規模6.2南投地震；(2)2013年6月2日芮氏規模6.5南投地震；(3)2013年10月31日芮氏規模6.3花蓮地震。針對嘉義網井下應變儀測站所記錄的面應變時間序列資料進行時頻分析，並以地震與颱風等九項事件及2013年1~9月資料為分析對象，成果顯示各個測站的特徵頻率(0.1、0.03~0.06Hz)會隨站井環境的不同而變。特殊事件則會產生異常頻率，如颱風影響台灣時，各站時頻圖中皆在0.1~0.5Hz之間出現有雲狀頻率變化，0.1Hz以下有局部山狀頻率變化。各個測站的0.15~0.5Hz強度變化趨勢都與氣壓、降雨量與地下水位的變化趨勢具有相關性。

在本年度觀測期間，在2013年3月27日M_L = 6.2南投地震發生前，大平地和古坑土壤氣體觀測站出現顯著的土壤氡氣濃度異常上升；同時，新樂觀測井亦發現於3月17日出現40公分的水位驟降異常的現象，應為該地震的前兆訊息。2013年地下水壓觀測主要研究結果如下：（1）各站水位經過氣壓修正後，震前水位異常數量已經大幅減少。（2）臺北觀測站對於雨量與氣壓反應敏感，目前所觀測到的水位變化皆與此二者相關，尚無發現震前水位異常之現象。（3）嘉義地區震前水壓異常反應之地震，震央主要分布在台灣中南部以及東部、東南部外海。2009年3月至2013年10月計畫執行期間，安通站中地下水水氡濃度未觀測到異常之變化。另外，社頂站在2013年8月29日和2013年10月22日觀測到地下水水氡異常下降之現象，預期將有相對應的地震發生。

整合分析部分，共包括地下水位異常、地化異常、井下應變儀異常和地震訊號異常之整合，整合期間含跨 2009 年整年到 2013 年 11 月間 146 個地震事件。本次報告考慮的異常觀測中，並無任何同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測，但有一個地震(ID=124)同時觀測到地下水位(新竹網)、井下應變儀(嘉義網)和地化氣體記錄(新竹網、雲林古坑測站)三樣異常，其為 2013/03/27 10:03 規模 6.2 發生在南投縣政府東方 36.9 公里的地震。此次規模大於六的陸地地震發生在南投地區，距離台北、新竹、嘉義三個觀測網都有相當距離，各種感應方法無法同時偵測到異常的觀測。

本次配合性的觀測資料(非固定觀測站固定時間觀測的)新增了數種，包括 PS-InSAR、GPS 應變與 GPS 高頻解三種資料，PS-InSAR 是可提供區域性的地殼的垂直位移或速度場，結合其它的大地測量觀測，可將原本點狀或面狀的觀測擴展成面狀的觀測，後二者都是 CGPS 的產物，高頻解除了可看出大地震近場的同震位移外，尚可與地震儀資料及井下應變儀資料做共同解釋，三者分別代表地殼的位移、加速度與應變，在這階段尚在可靠性分析，將來可盡速建立共同解釋的機制。

關鍵詞：全球衛星定位系統、連續觀測站、PS-InSAR、井下應變儀、氣體地球化學、水位觀測井、斷層活動潛勢分析、滑移虧損率(slip deficit rate)

Abstract

For the 2013 final-term report, we have achieved the examinations of results from 33 precise leveling routes with 1147 sessions and from 32 campaign-mode GPS stations in Hengchun area , 114 campaign-mode GPS stations in Taochu area, 183 campaign-mode GPS stations in Jainan area , 113 campaign-mode GPS stations in Kaoping area and 155 campaign-mode GPS stations in central area that have been measured up-to-date. After comparing the coordinate time series from campaign-mode GPS sites and precise leveling benchmarks with the time series from continuous GPS stations, the velocity field is consistent with previous data.

We utilize GAMIT/GLOBK software to estimate the precise coordinates for continuous Global Positioning System station (CGPS) of Central Geological Survey (CGS) in Taiwan. To promote the software estimation efficiency, 246 stations are divided by 8 subnets which have been considered by station numbers, network geometry and fault distributions. Each of subnets include around 30 CGPS and 16 international GNSS service (IGS) stations. 8 subnets process in parallel mode, then combined into a daily solution. Due to the data comes from different research centers, the basic information for stations such as antenna types, antenna height and other maintain record cannot been obtained by exchanging the data. Under the requirement of processing software, the basic information of stations need to be corrected. A poor accuracy or a big error will be occurred by incorrect basic information, then the station will be removed. Through the, the velocity of stations can be acquired. After long period of data collection and estimation, a time series variation can be build up to study the effect of earthquakes and estimate the velocity of stations. In terms of co-seismic deformation research, two earthquake epicenters location close to Sun Moon Lake in Nantou (SUN1) on March and June, 2013, respectively, larger effects of co-seismic station for the DPIN, PLIM, S167, S170, SINY, as well as SUN1. Maximum horizontal displacement reaches 32.6 mm in the north and 33.0 mm in the east components for SUN1 station on 0602 Nantou earthquake. At high frequency study (1 second sampling rate), we apply GIPSY software (Jet Propulsion Laboratory, JPL) to evaluate the instantaneous ground motion on Nantou earthquakes on June 2013, in order to acquire the surface dynamic deformation process before and after the earthquake. Compare with other units (GPSLAB, CWB, success University), the co-seismic displacement is similar to those released. On October 31, 2013, near Juisuei county, Hualien occurred a ML 6.3 earthquake, we conducted high rate data for the positioning estimation. We utilize the data in 10 hours before and after the earthquake to estimate the co-seismic displacement, the result is similar to daily solutions. Furthermore, we utilize post processing algorithm with respect to station SHAN to study the detail ground motion for station DSIN, GUFU, JPEI and JSUI before and after a minutes of dynamic results of earthquake, results displayed a high sampling rate result can detailed records measuring station of ground motion.

In PS-InSAR, we collect and process SAR images taken by ALOS (Advanced Land Observing Satellite), ERS (European Remote Sensing Satellite)-1/2 and ENVISAT. In order to generate interferograms, perpendicular baseline for each pair of SAR images has to be carefully examined. In this final report, we transform/convert both vertical and horizontal components of GPS to the LOS according to Huang's (2006) method, which has been slightly modified. Hence, we can compare GPS and PSInSAR results along the LOS. On the other hand, we can only compare PSInSAR result with vertical velocity of leveling since there is no horizontal velocity in leveling.

According to the methods and the results form WG07 (Working Group on California Earthquake Probabilities) (2008) and The National Seismic Hazard Map for Japan (2008), we preliminary establish the method in analysis of probabilities of active faults in Taiwan.

The goal of probability analysis of active faults is to establish the flow chart of 33 active faults in Taiwan. For instance, 7 active faults were assessed to get the recurrence interval and the probabilities for the characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years along the following faults: Chelungpu fault, Meishan fault, Damaopu-Shuangtung fault, Changhua fault, Chiuchiungkeng fault, Tachienshan fault and Chukou fault. By using BPT model, the probabilities for the characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years along Chelungpu fault are 2.2%, 5.9% and 17.7%, respectively. For Meishan fault with BPT model, the probabilities of characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 30.9%, 44.1% and 63.4%, respectively. For Damaopu-Shuangtung fault with Poisson models, the probabilities of characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 3.2%, 5.1% and 9.6%, respectively. For Changhua fault with BPT models, the probabilities of characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 15.0%, 22.4% and 35.5%, respectively, with Poisson models, the probabilities of characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 10.5%, 16.4% and 27.9%, respectively. For Chiuchiungkeng fault with Poisson models, the probabilities of characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 3.1%, 5.0% and 9.2%, respectively. For Chukou fault with Poisson models, the probabilities of characteristic earthquake occurred in 30, 50 and 100 years are 11.7%, 18.2% and 30.3%, respectively.

This research evaluated the slip rate and slip deficit rate of active faults by 3D block model DEFNODE (McCaffrey, 2005). First, we have to gather the surface fault lines and the fault geometry parameters, and then establish the block boundary model of central Taiwan. The surface deformation data we used is the 2002-2012 average horizontal velocity field measured by GPS network in central Taiwan. We can evaluate the most corresponding block rotate rates, long term slip rates and slip deficit rates by inputting the velocity field data and fault geometry parameters into DEFNODE. Our result shows that Chukou + Tachienshan (S. segment) and Damaopu- Shuangtung fault have higher slip deficit rates, which range from 12 to 19 mm/yr.

The persisted data processing on 11 borehole strainmeter stations is carried out in Chiayi, Hsinchu and Taipei networks. We try to remove the barometric effect from the strainmeter data by several events with significant barometric pressure changes to search the strain anomalies relative to big earthquake. From December 2012 to October 2013, we found three strain-anomaly events in Chiayi network, the first one might related to M_L 5.9 earthquake occurred near Hualien on March 7 and M_L 6.2 event occurred in Nantou on March 27, the second one might related to the M_L 6.5 event occurred in Nantou on June 2, 2013 and the third one might related to the M_L 6.3 event occurred in Hualien on October 31, 2013. Time series data of areal strain associated with events of typhoon and earthquake are analyzed via time-frequency analysis. Those data are collected in stations of Chiayi network. Time span of analysis ranges from January to September in 2013. Analysis results show existence of long lasting characteristic frequencies ranging from 0.03 to 0.06 Hz. Different station has different characteristic frequencies. Events of typhoon introduce broad band frequencies from 0.1 to 0.5 Hz. The phenomena are observable for all stations. Marginal time analysis shows the strength of such frequencies is interrelated to atmospheric pressure, precipitation, and groundwater variations.

During the period of the first half year, the Tapingti and Gukeng stations show a significant increase of soil radon concentrations and Shin-Le(CINT) monitoring well also show a big water-level decreasing anomaly at March 17th, which might be precursors related to the Nantou earthquakes (M_L 6.2) occurred on March 27, 2013.The groundwater pressure data from December 2012 to October 2013 was analyzed. The followings are the major results: (1) After the air pressure calibration, the water level anomalies of all stations

were decreased. (2) In Taipei area, the water level reacts sensitively toward rainfall and atmosphere pressure. None anomaly was observed from December 2008 to now. (3) In Chiayi area, most of the earthquakes with water level anomaly were located at middle Taiwan and eastern, south-eastern Taiwan.

During the period from March 2009 to July 2013, no anomalous decreases of groundwater radon was recorded near the Antung station. Anomalous declines in groundwater radon was recorded at the Kenting station at August 29 and October 22, 2013, which might be precursors related to impending earthquake in the future.

We have searched for possible precursory anomalies for magnitude greater than 5 earthquakes (M>5), using geochemical, hydrological observation, borehole strainmeter, and seismological observations. During the study period of Jan.2009 to Oct. 2013, there are 144 M >5 events occurred in Taiwan. We detected some anomalies related to these events, but no any event can be related to three or more individual anomalies in the same network. Only one (ID=124) are assigned to groundwater anomaly (Hsinchu Network), borehole strain anomaly (Chiayi network) and geochemical gas anomalies (Taipei and Chiayi networks).

We also add 3 new new observations in addition to the regular schedule, fix site observations. These including PS-InSAR, GPS strain and high freqPS strain data is similar to borehole strain observation with less sensitivity, but due to already densily distributed CGPS networks, it can be useful in the future.

KEYWORDS: GPS, CGPS, PS-InSAR, Borehole strainmeter, Gas geochemistry, Water-level observation well, Probabilistic analysis for active faults, Slip deficit rate

第一章、緒　論

1-1 計畫整體概述

災害性地震主要源於斷層的活動，瞭解活動斷層的活動性及分析潛在孕震斷層的潛勢評估是地震與活動斷層危害度評估的重要參考數據。經濟部中央地質調查所於 91～95 年「地震地質調查及活動斷層資料庫建置」計畫中，已逐年在台灣陸上活動斷層帶設置監測點位，包括全球定位系統(Global Positioning System，簡稱 GPS)與井下應變儀(borehole strainmeter)。累積至 101 年為止，已完成連續 GPS 站共 71 站(圖 1-1.1 和表 1-1.1)和 11 口井下應變儀(圖 1-1.1 和表 1-1.2)及地球化學觀測站共 17 站(圖 1-1.1 和表 1-1.3~表 1-1.5)。而從 98 年至 101 年的「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究」四年計畫研究當中，已藉由高精度的水準與大地測量瞭解各斷層的活動特徵；藉由連續 GPS 觀測的時間序列分析除可瞭解各斷層於間震、同震以及震後的變形型態變化，尚可計算出間震期短期的滑移速率，以及利用同震及震後的斷層面滑移特性推導地表下斷層面的滑移特性。利用地球化學方法與地下水位觀測斷層活動性。當斷層錯動引發地震發生前，常伴隨周遭環境流體的物理性質、氣體成分、液體化學成分和同位素組成發生改變，會出現異常現象。在整合性地表變形觀測的手段中，針對各孕震構造的觀測的重點在於是否可以觀測到災害性地震前的應變異常訊號，由過去四年井下應變儀分析的經驗得知，井下應變儀可以觀測到極小的應變率變化，但此應變速率變化亦可能由環境因子所引起。這些環境因子包含地下水位升降、降雨、氣壓變化(一般是颱風引起)和潮汐。目前的分析成果已能評估潮汐、地下水位和氣壓的影響進行修正，而在降雨部分則已經得到部分成果。有些應變速率異常與慢地震(slow earthquake)和長微震(tremor)有關，有些極可能與規模大於 5.5 以上的地震前應變異常相關。然而，2011 年 3 月 11 日發生於日本 M_w 9.0 宮城外海的地震，深深地提醒我們下列兩件事之重要性：(1)辨識已知與未知高發震潛能構造的位置及(2)評估其所蘊含之地震潛能。這些高發震潛能構造不一定會通過主要城市，然其引發之重大地震卻會對周遭城市造成慘重之災情。經由過去近十年之大地測量監測資料，我們觀測到數個在台灣可能存在高發震潛能構造之區域，例如：東部縱谷、宜蘭平原及台灣西南部。因此，本計畫將利用整合性大地測量技術所獲得之地表運動觀測值，期望得到：(1)辨識台灣地區已知與未知高發震潛能構造的位置；(2)推估這些區域地殼內能量之變化及(3)探討大地測量觀測資料在地震災害分析上的應用。

過去四年已針對臺灣 8 條活動斷層(瑞穗斷層、車籠埔斷層、山腳斷層、新城斷層、六甲斷層、木屐寮斷層、池上斷層和小崗山斷層)做了斷層活動度及地震潛能分析，針對孕震構造與活動斷層逐步進行了詳細的參數研究及地震發生機率評估。然而，在本階段的計畫裡，欲透過蒐集與分析地調所及國內既有之 33 條活動斷層資料(圖 1-1.2)，並參考日本地震研究推進本部及美國加州之經驗方法，將各孕震構造之活動特性予以統計數量化，以製作台灣地區第一版之斷層活動潛勢圖。經由本計畫系統性地研究各活動斷層之活動特性，建立全國之活動斷層發生機率潛勢圖，以及可能引致之地震規模，據此成果可後續再完成鄰近斷層地區之震度，可充分利用地調所研究之活動斷層與孕震構造之地質資訊，逐步充實我國地震防災整備資訊內容，並可使我國之地震與活動斷層研究與世界先進國家水準並駕齊驅。

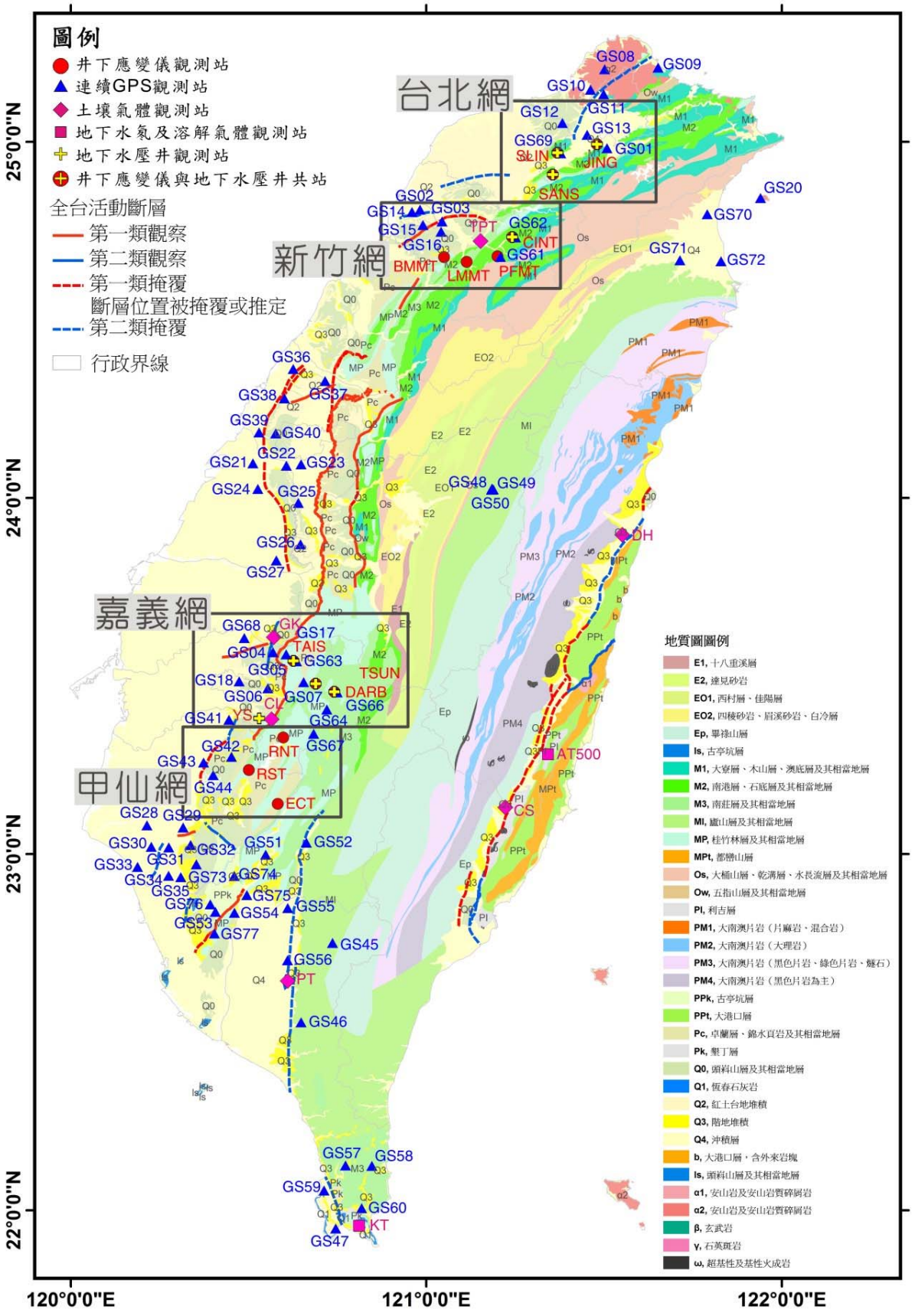


圖 1-1.1：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站之全台分布圖。

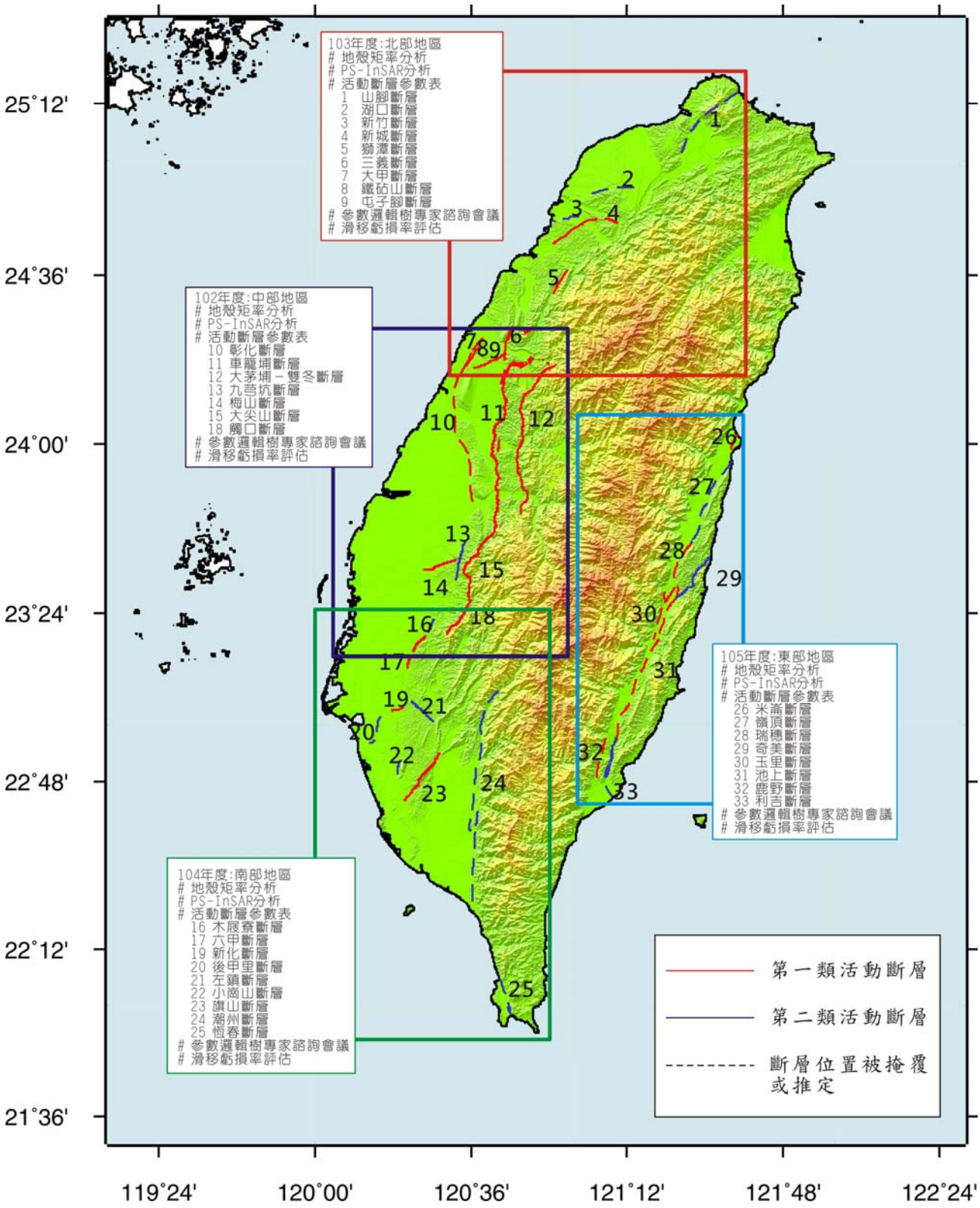
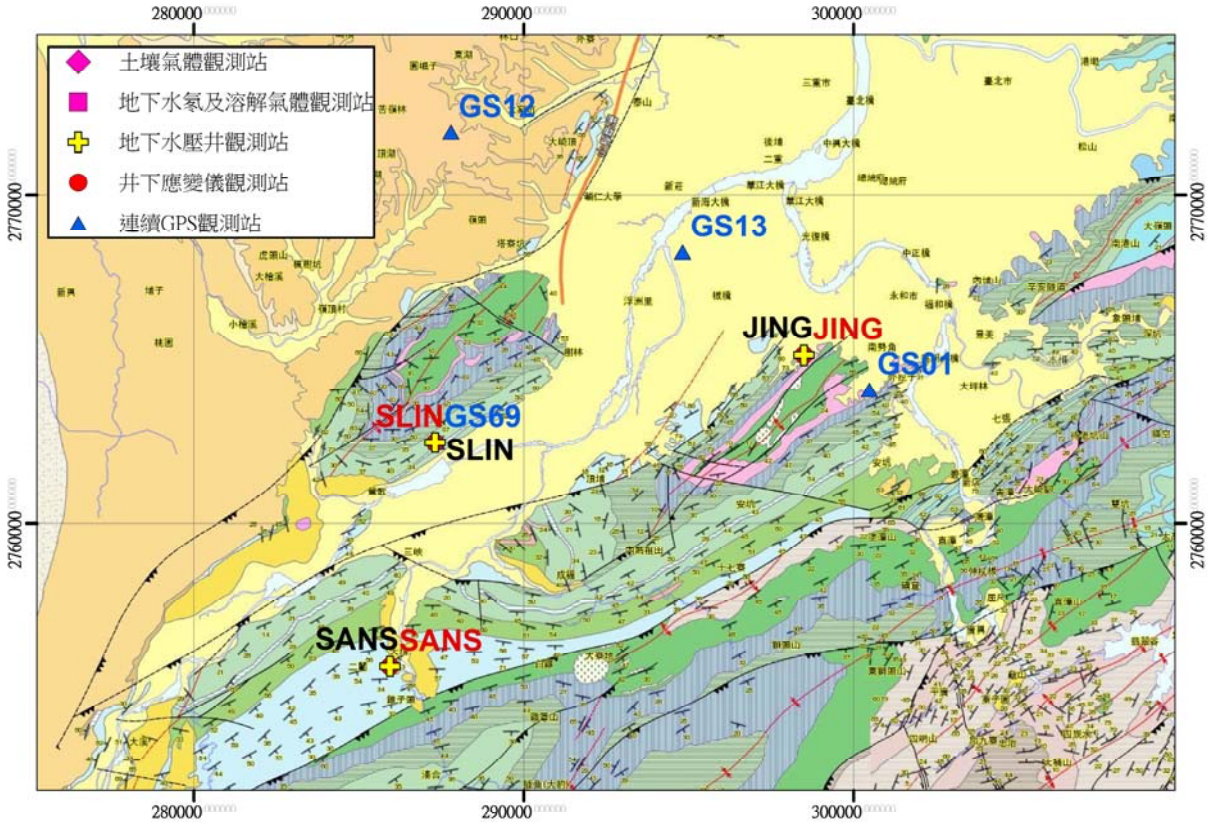


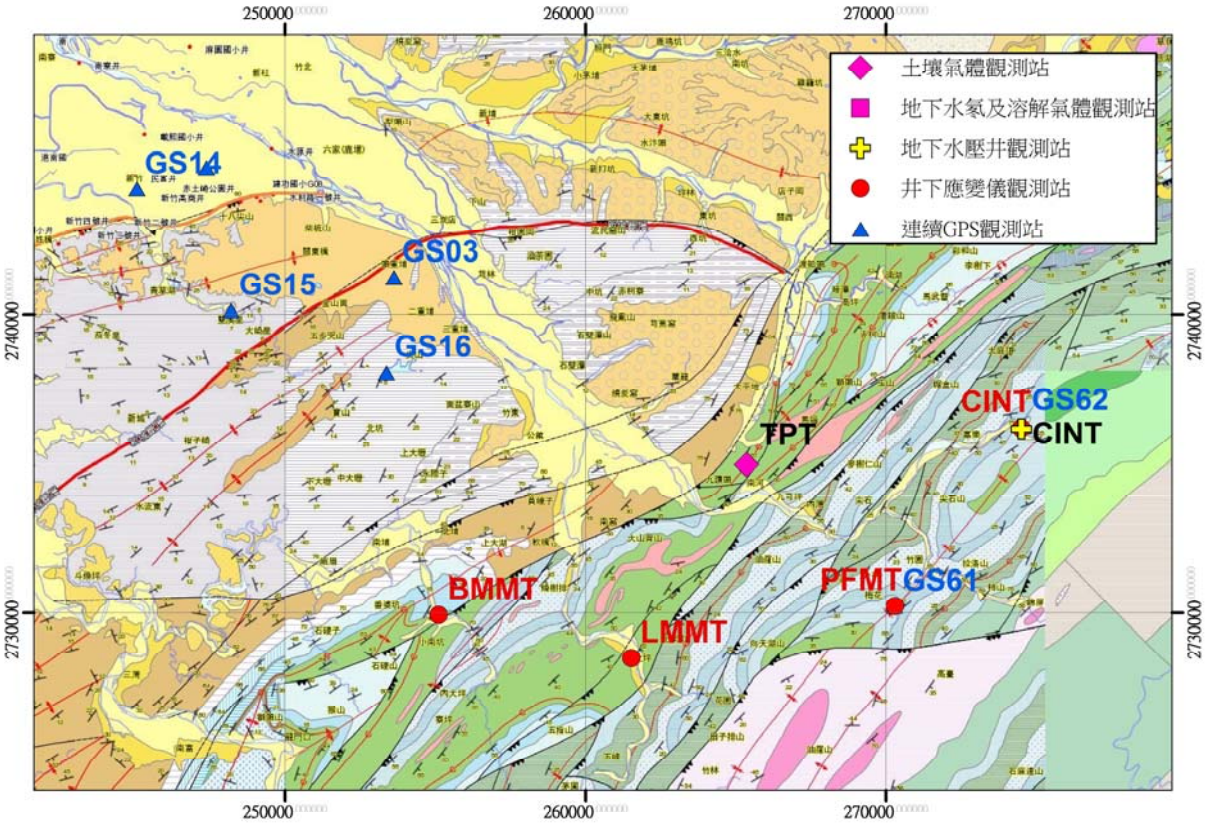
圖 1-1.2：台灣活動斷層分布圖與本計畫擬定之研究區域。



地層圖例說明_台北網

沖積層(6020) 第四紀	火成岩類(7030) 更新世	大寮層(1132) 中新世	南港層(1393) 中新世
階地堆積層(6060) 全新世	林口層(1371) 更新世	南莊層(1380) 中新世	木山層(1181) 中新世
桃園層(1440) 更新世	錦水頁岩(1680) 上新世	南港層(1390) 中新世	南莊層(1381) 中新世
中壢層(1150) 更新世	卓蘭層(1330) 上新世	木山層(1180) 中新世	南港層(1391) 中新世
大南灣層(1070) 更新世	桂竹林層(1430) 中新世－上新世	南港層(1395) 中新世	粗窟層(1920) 漸新世
林口層(1370) 更新世	桂竹林層大埔段(1433) 中新世—上新世	石底層(1271) 中新世	大桶山層(1110) 漸新世
紅土礫石層(6051) 更新世	大寮層(1130) 中新世	石底層(1270) 中新世	

圖 1-1.3：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站 - 台北網分布圖。



地層圖例說明_新竹網

- 沖積層(6020) 第四紀
- 階地堆積層(6060) 全新世
- 紅土台地堆積層(6050) 更新世
- 舁山層(1690) 更新世
- 大茅埔礫岩(1090) 更新世
- 店子湖層(1350) 更新世
- 楊梅層照鏡段(1562) 更新世
- 楊梅層照門段(1561) 更新世
- 二鬮層(1010) 上新世
- 錦水頁岩(1680) 上新世
- 卓蘭層(1330) 上新世
- 桂竹林層(1430) 中新世－上新世
- 桂竹林層關刀山砂岩段(1436) 中新世－上新世
- 桂竹林層大埔段(1433) 中新世－上新世
- 桂竹林層二鬮段(1431) 中新世－上新世
- 桂竹林層十六份頁岩段(1432) 中新世－上新世
- 桂竹林層魚藤坪砂岩段(1435) 中新世－上新世
- 澳底層(1660) 中新世
- 上福基砂岩(1050) 中新世
- 碧靈頁岩(1600) 中新世
- 南港層尖石山段(1398) 中新世
- 南港層七寮段(1396) 中新世
- 南港層牛肩頭段(1397) 中新世
- 大埔層(1100) 中新世
- 北寮層(1210) 中新世
- 打鹿頁岩(1250) 中新世
- 觀音山砂岩(1761) 中新世
- 木山層(1180) 中新世
- 南莊層(1381) 中新世
- 大寮層(1132) 中新世
- 南港層(1393) 中新世
- 南港層(1390) 中新世
- 石底層(1270) 中新世
- 南莊層(1380) 中新世
- 東坑層(1360) 中新世
- 大寮層(1130) 中新世
- 木山層(1181) 中新世
- 巴陵層(1170) 漸新世
- 巴陵層(1171) 漸新世

圖 1-1.4：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站 – 新竹網分布圖。

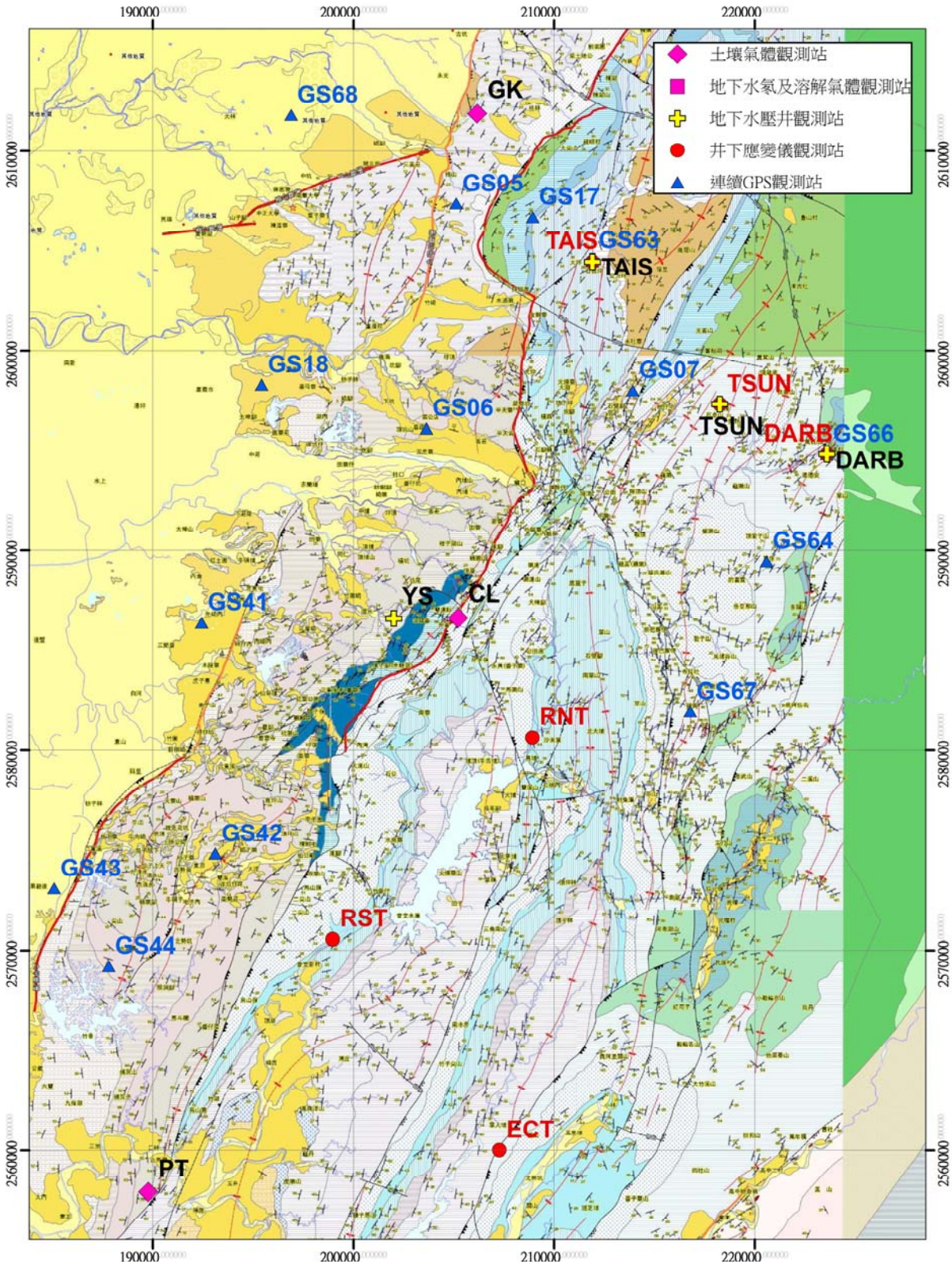


圖 1-1.5：中央地質調查所設置之連續 GPS、井下應變儀及地球化學觀測站 -嘉義網及甲仙網分布圖。

地層圖例說明_嘉義網及甲仙網

沖積層(6020)
第四紀

沖積層(6022)
全新世晚期至現代

沖積層(6023)
全新世晚期至現代

階地堆積層(6060)
全新世

頭嵙山層火炎山礫岩段(1693)
更新世

頭嵙山層香山段(1694)
更新世

紅土台地堆積層(6050)
更新世

頭嵙山層火炎山段(1691)
更新世

卓蘭層(1330)
上新世

錦水頁岩(1680)
上新世

桂竹林層大窩砂岩段(1434)
中新世－上新世

桂竹林層十六份頁岩段(1432)
中新世—上新世

桂竹林層關刀山砂岩段(1436)
中新世—上新世

南莊層(1380)
中新世

六雙層(2010)
更新世

二重溪層(2020)
更新世

崁下寮層(2030)
更新世

六重溪層(2040)
上新世—更新世

北寮頁岩(1212)
上新世－更新世

鹽水坑頁岩(1751)
上新世

竹頭崎層(1450)
上新世

濁水溪層(2050)
上新世

隘寮腳層(1640)
上新世

茅埔頁岩(1521)
上新世

糖恩山砂岩(1861)
中新世－上新世

長枝坑層(1870)
中新世

三民頁岩(1891)
中新世

紅花子層(1880)
中新世

糖恩山砂岩(1861)
中新世

圖 1-1.5：(續)

構造線圖例說明

斷層(B101)

掩覆或推測斷層(B102)

橫移斷層(B201)

平移斷層（箭頭示水平位移方向）(B202)

平移斷層(B211)

平移斷層(B212)

正斷層(短線示下降側)(B301)

逆斷層(鋸齒示上升側)(B401)

高角度逆斷層(B402)

斷層(虛線表示推測)(B411)

高角度逆斷層(B412)

地震斷層(箭頭示水平位移方向,短線示降側,虛線示推測或掩覆部份)(B901)

掩覆褶皺(C002)

中視褶皺(背斜)軸(C101)

背斜軸(虛線示推側或掩覆部份)(C102)

倒轉背斜(C121)

複背斜軸(C141)

褶皺(複背斜)軸(C142)

向斜軸(C301)

向斜(C302)

倒轉向斜(C321)

複向斜軸(C341)

區域褶皺(複向斜)軸(C342)

煤層(E101)

煤層(E102)

圖 1-1.6：圖 1-1.3~圖 1-1.5 構造線圖例說明。

表 1-1.1：中央地質調查所建置的 GPS 連續觀測站資料接收起始時間表。

測站代碼	測站名稱	接收起始時間	測站代碼	測站名稱	接收起始時間
GS01	地調所	2002/06/17	GS39	龍井國小	2006/10/21
GS02	新竹高工	2004/10/21	GS40	龍峰國小	2006/10/21
GS03	工研院	2004/10/19	GS41	竹門國小	2007/11/23
GS05	半天寮淨水廠	2004/10/21	GS42	東原國中	2007/11/23
GS06	民和國中	2004/10/21	GS43	果毅國小	2007/11/27
GS07	培英國小	2004/10/21	GS44	六甲國小湖東分校	2007/11/30
GS08	興華國小	2005/08/15	GS45	霧臺鄉公所	2008/12/20
GS09	大鵬國小	2005/08/16	GS46	來義國小	2008/12/20
GS10	竹圍國中	2005/09/06	GS47	臺電南展館	2008/12/20
GS11	北投國小	2005/08/15	GS51	杉林國小	2009/12/18
GS12	樂善國小	2005/09/06	GS52	新發國小	2009/12/18
GS13	國光國小	2005/08/16	GS53	星星兒的家	2009/12/19
GS14	西門國小	2005/09/13	GS54	大洲國中	2009/12/15
GS15	雙溪國小	2005/09/13	GS55	舊寮國小	2009/12/11
GS16	寶山水庫	2005/09/13	GS56	瑪家國中	2009/12/14
GS17	太平國小	2005/09/14	GS57	石門國小	2009/12/15
GS18	嘉義農試所	2005/09/14	GS58	高士國小	2009/12/14
GS20	龜山島	2006/08/04	GS59	車城國小射寮分校	2009/12/17
GS21	大嘉國小	2006/06/10	GS60	永港國小	2009/12/18
GS22	快官交流道	2006/06/10	GS61	梅花國小	2010/10/06
GS23	五光國小	2006/05/30	GS62	新樂國小	2010/09/20
GS24	文祥國小	2006/05/30	GS63	太興國小	2010/09/24
GS25	寶山國小	2006/05/31	GS64	里佳國小	2010/09/28
GS26	名崗國小	2006/05/31	GS66	達邦	2010/09/28
GS27	彰化農場	2006/05/31	GS67	新美國小	2010/09/28
GS28	中崙加壓站	2006/06/17	GS68	三和國小	2010/12/17
GS29	潭頂自來水廠	2006/06/16	GS69	樹林垃圾掩埋場	2011/09/22
GS30	大橋國小	2006/06/25	GS70	玉田國小	2011/09/23
GS31	西勢國小	2006/06/17	GS71	大隱國小	2011/09/22
GS32	虎頭埤	2006/06/23	GS72	利澤國中	2011/09/22
GS33	永華國小	2006/06/22	GS73	新光國小	2012/11/02
GS34	成大航太實驗場	2006/06/24	GS74	內門國小	2012/11/02
GS35	南沙崙農場	2006/06/24	GS75	旗美高中	2012/10/31
GS36	德化國小	2006/10/21	GS76	新興國小	2012/11/02
GS37	泰安休息站	2006/10/25	GS77	深水國小	2012/11/14
GS38	清水服務區	2006/10/21			

表 1-1.2：井下應變儀測站之經緯度與資料接收起迄時間表。

觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間
PFMT	梅花國小	2005/06/04
BMMT	大坪國小	2005/06/09
CINT	新樂國小	2006/11/15
TSUN	中興國小	2006/03/01
TAIS	太興國小	2006/03/04
RNT	曾文水庫北	2003/10/28
DARB	達邦	2006/11/19
JING	錦和	2007/11/20
SANS	明德中學	2007/11/12
SLIN	樹林焚化廠	2009/09/11
RST	曾文水庫南	2003/10/23

表 1-1.3：土壤氣體觀測站資料接收起始時間表。

觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間
CL	中崙站	2004.4.7
TPT	大平地站	2005.12.16
PT	屏科大站	2008.10.17
CS	池上站	2008.11.13
GK	古坑站	2011.12.22
DH	東華站	2012.10.25

表 1-1.4：地下水水氡觀測站資料接收起始時間表。

觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間
AT500	安通站	2011.9.16
KT	墾丁社頂站	2012.8.18

表 1-1.5：地下水位觀測站資料接收起始時間表。

原 觀測站代碼	新 觀測站代碼	站　名	資料接收起始時間
JH	JING	錦和站	2007.11.16
MD	SANS	明德站	2007.11.16
SLN	SLIN	樹林站	2009.11.1
SL	CINT	新樂站	2006.12.15
CS(2)	TSUN	中興站(2)	2012.12.19
TS(2)	TAIS	太興站(2)	2012.12.19
DB	DARB	達邦站	2006.12.5
YS	YS	沄水站	2009.5.8
		新竹的洗井復舊井	（計畫中）

未來的四年計畫當中，除了持續以連續及非連續觀測 GPS、精密水準測量、地球化學觀測、地下水位觀測和井下應變儀監控斷層的活動性以及分析高發震潛能地區構造之外，其中西部平原地殼運動的變化將會是需要關注的對象，平原地區的沉降除了是人為超抽地下水之外，也很有可能是區域性的盲斷層所引起，對於這些盲斷層位置的推測也有助於區域地震災害的評估。雖然目前連續及非連續觀測 GPS 測量、水準測線已有相當密集的測網與測線，但這些測站在空間分布上仍屬於點、線狀分布，近來合成孔徑雷達差分干涉(D-InSAR)技術發展迅速，尤其是利用地表人工結構體或天然岩石露頭當做持久性散射體的合成孔徑雷達差分干涉(PS-InSAR: Persistent Scatterers Interferometric SAR)之分析技術更能得到精確的成果。因此本計畫將可以藉由分析地表上穩定持久性散射體的相位，經由連續雷達影像或小基線技術得到面狀分布且為公釐級精度的地表變位的資料及其隨時間序列變化的資訊，經由連續及非連續觀測 GPS、精密水準測量、持久性散射體的合成孔徑雷達差分干涉將可使空間資訊更為密集，有助於釐清可能的孕震構造在不同時間與空間的應變異常。

對於原有的連續性觀測資料，如持續 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料、地球化學觀測資料及地下水觀測資料，以及間歇性的觀測如固定時段觀測的 GPS 及精密水準測量觀測，再加上新加入的間歇性的 PS-InSAR 觀測，這些資料詳細地記錄了地表或近地表的地殼變形活動，各有著不同的時空分布以及不同的精度。如何將這些資料更進一步的整合，作綜合性的解釋，將是未來四年的重要任務與使命。尤其是連續性的 GPS 觀測資料原來只使用每卅秒一次的觀測，但近年來許多測站已更換成每秒一次的觀測資料，因此與井下應變儀可以加強在極高頻(1 Hz)、高頻 (~0.01 Hz)、中頻(十分鐘一筆)與低頻(一天一筆)之橫向整合，再加上非連續性的觀測，如移動式 GPS 觀測、水準測量以及新加入的 PS-InSAR 等極低頻(數天、數月或一年一筆)的觀測量，將可以掌握地殼在時、空完整的分布的變化，期望能更精確估計斷層的現代活動性(圖 1-1.7)。

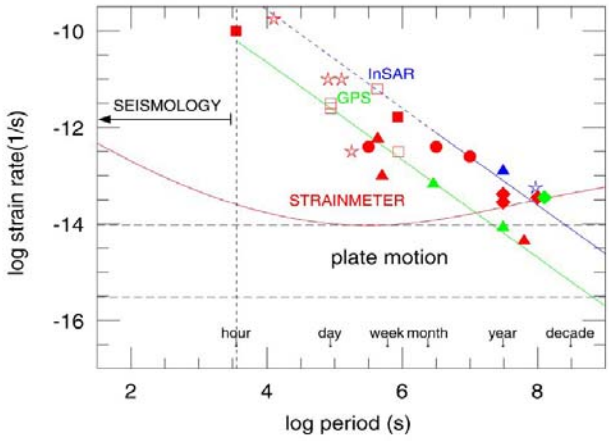


圖 1-1.7：地表變形、地震活動與現今大地測量觀測之相關性。

本階段之計畫架構主要針對斷層活動觀測統整為兩大研究區塊(圖 1-1.8)，一為斷層潛勢分析，側重於斷層活動性觀測，包括精密水準測量、移動式及連續式 GPS 資料分析和 PS-InSAR 分析，透過大地測量整合性觀測，研究活動斷層在間震期間之發震潛勢，提供地殼應變矩率之分析和斷層面滑移虧損率(slip deficit rate)評估。此觀測資料將結合活動斷層參數表，進行斷層潛勢之分析，估算活動斷層在未來 30 年、50 年和 100 年之發震潛勢。另一研究區塊則為整合資料分析，針對地球化學觀測資料分析、連續式 GPS 資料和井下應變儀資料分析所得之異常觀測資料，進一步整合，作綜合性的解釋，分析異常觀測資料之環境影響因子和地殼應變之關資，以期瞭解異常訊號之物理機制。預期進度甘梯圖請見表 1-1.6，並配合參考圖 1-1.1~圖 1-1.6。第一年選擇中部地區 7 條斷層，主要是考量 921 地震之後，中部車籠埔斷層有豐富的研究資料以及參數成果，本計畫可藉由蒐集車籠埔斷層參數的同時，建立完整的活動斷層潛勢評估標準化流程，以供後續活動斷層評估之參考；第二年選擇北部地

區 9 條斷層，主要是考量台灣北部幾個主要都會區和科技園區；第三年和第四年則分別是南部地區 9 條斷層及東部地區 8 條斷層，逐步完成全台灣活動斷層潛勢評估之工作。

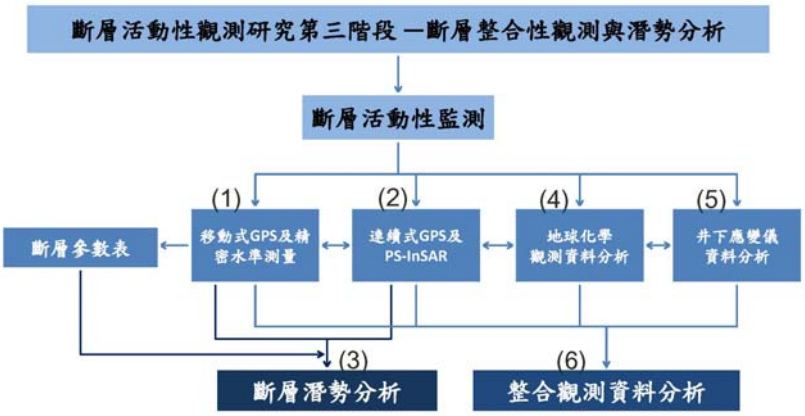


圖 1-1.8：斷層活動性觀測研究第三階段之架構。

表 1-1.6：全程計畫預期進度甘梯圖(Gantt Chart)。

<table>
<tr><td colspan="6">計畫名稱：斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析</td></tr>
<tr><td colspan="5">年 次
工 作 項 目</td><td>第 1 年
(102 年度)</td><td>第 2 年
(103 年度)</td><td>第 3 年
(104 年度)</td><td>第 4 年
(105 年度)</td></tr>
<tr><td colspan="5">GPS 移動站資料檢核及分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">GPS 及水準測量規劃、督導</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">GPS 連續站資料檢核、計算及時序分析解算</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4" rowspan="4">● 地殼矩率及大地測量矩率分析
● PSInSAR 與水準測線之垂直變形資料比較
● 建立活動特性參數表及三維幾何形貌並
● 每年召開 2 次參數邏輯樹專家諮詢會議
● 利用地表運動場來推測活動斷層之斷層面震間滑移速率、滑移虧損(slip deficit)及斷層活動潛勢評估</td><td>中部地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>北部地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>南部地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>東部地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">活動潛勢評估方法論及地震規模尺度研究</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="6">井下應變儀觀測站</td><td colspan="3">資料校正及計算分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">維護資料庫</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="4">時頻分析</td><td>嘉義網測站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>新竹網測站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>台北網測站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>所有測站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="9">地化觀測站</td><td colspan="3">既有氣體觀測站持續分析數據</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">既有水位觀測站持續分析數據</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">既有水氡觀測站持續分析數據</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">安通溫泉持續定期監測分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">墾丁公園地下水持續定期監測分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">未來設站地點評估並設置
(暫訂並配合地調所規劃)</td><td>苗栗台中地區</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>宜蘭地區
原蘇澳站遷站</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>北部山腳斷層帶</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">整合觀測資料分析</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">預定進度(累積數)</td><td>25%</td><td>50%</td><td>75%</td><td>100%</td></tr>
</table>

1-2 研究目的

本計畫目的在於整合連續 GPS 站觀測、測站式 GPS 觀測、精密水準資料、井下應變儀觀測、地球化學觀測及 PS-InSAR 資料，進行活動性斷層之觀測，並同時進行整合觀測資料之分析。除了持續監測斷層活動性之外，對於平原地區的地殼變動推測以及地表下盲斷層的分布欲有更透徹的瞭解。各項目工作目的如下：

1-2-1 移動式 GPS 及精密水準測量

自 96 年起，地調所在全臺已設置了 77 座 GPS 連續站(表 1-1.1)(藉由資料交換機制，可取得其它單位共 128 個連續觀測站資料)(圖 1-2.1)、870 座 GPS 移動站(圖 1-2.2)及 34 條精密水準路線(含 29 條長測線及 5 條短測線)(圖 1-2.2)。由觀測 GPS 連續站、GPS 移動站以及精密水準的時間序列可以得知地殼三維活動隨時間變化的情形。根據監測資料估算之地表水平(圖 1-2.3)與垂直位移向量(圖 1-2.4)，可推求斷層的短期滑移速率與近斷層區域的應變分布(圖 1-2.5)。由於地表速度場的變化可以反映出斷層活動的特徵，故分析 GPS 速度場及水準垂直速度場資料，可以協助我們判定活動斷層的位置，並闡明該斷層之活動特性。

由於 GPS 之水平誤差為 10 或數毫米(mm)，故可利用 GPS 測網進行水平變形之監測；另一方面連續 GPS 觀測已累積長時間之時間序列，過去對於連續 GPS 在垂直方向變化較少討論，但未來已可將長時間的連續 GPS 測站垂直變化加以分析討論並與精密水準測量相輔佐分析臺灣垂直升降變化與斷層活動之關聯性。此外，GPS 連續站的加密以及精密水準測線的延伸亦可以解析台灣斷層兩側的滑移速率，推斷高發震潛能構造之活動行為，並瞭解地殼變形與地震發生間之關係。

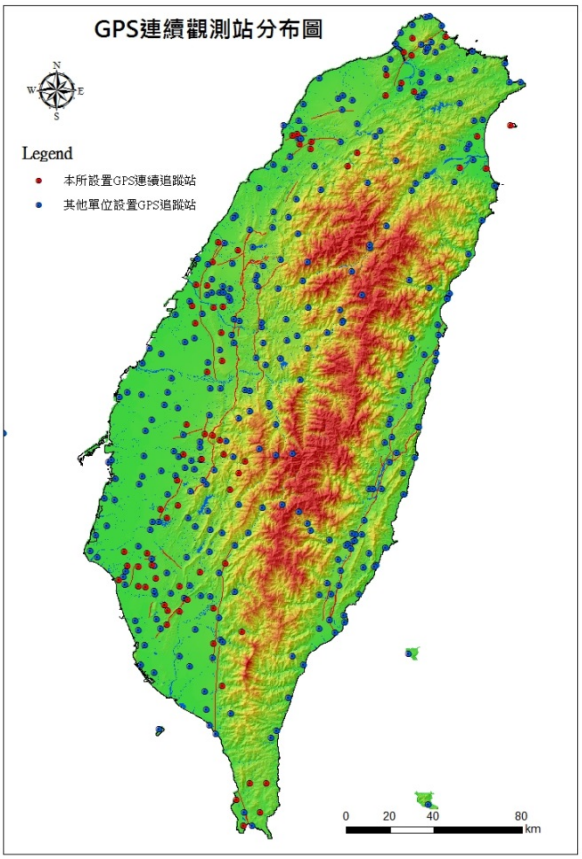


圖 1-2.1：GPS 連續觀測站分布圖（中央地質調查所）。

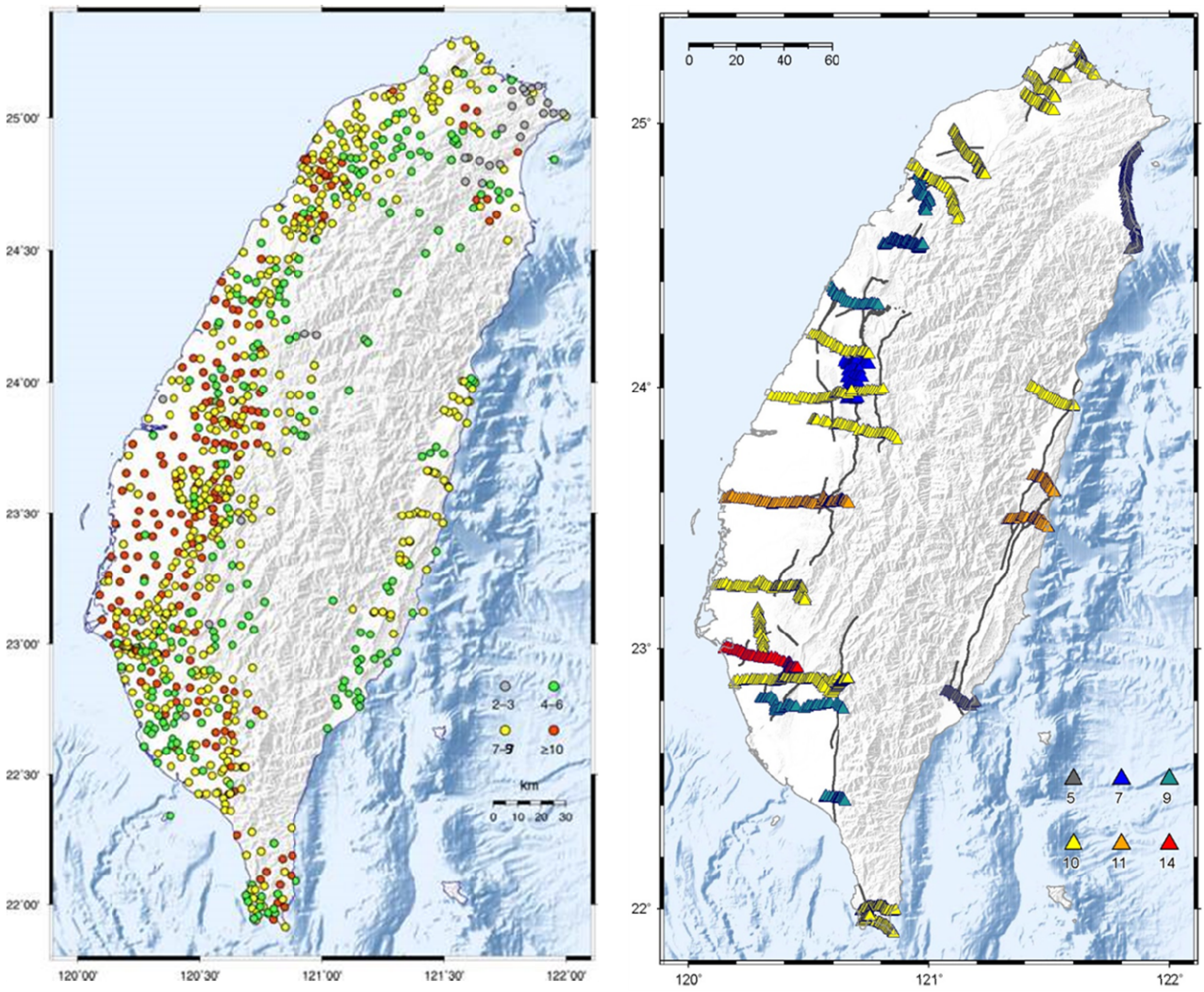


圖 1-2.2：GPS 與精密水準測量監測點位分布圖，共有 909 座 GPS 移動站以及 34 條精密水準測線。右圖點位之顏色表示該測線施測的次數。

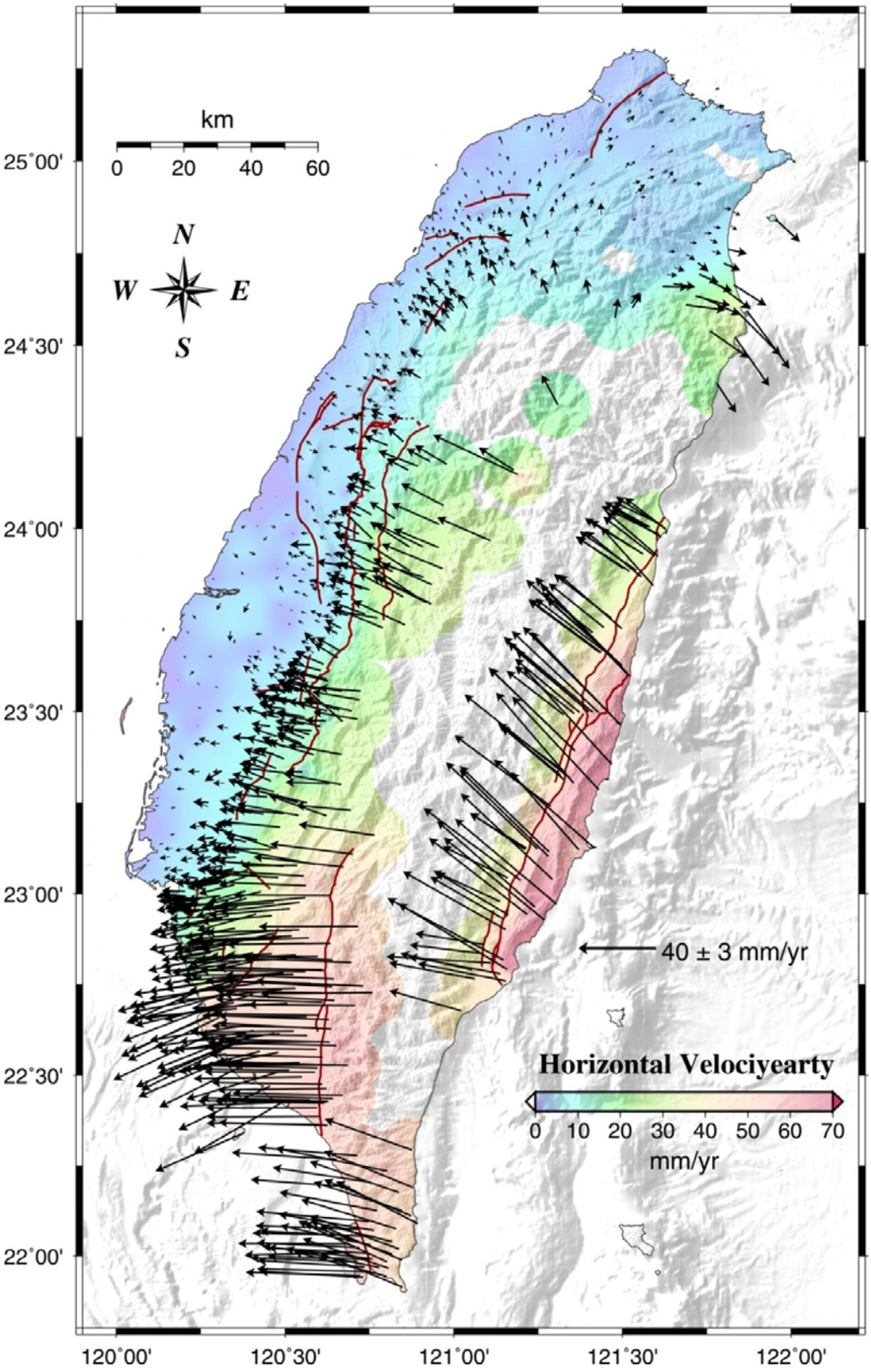


圖 1-2.3：全臺灣相對於澎湖白沙站(S01R)之 GPS 水平速度場（胡植慶等，2012）。

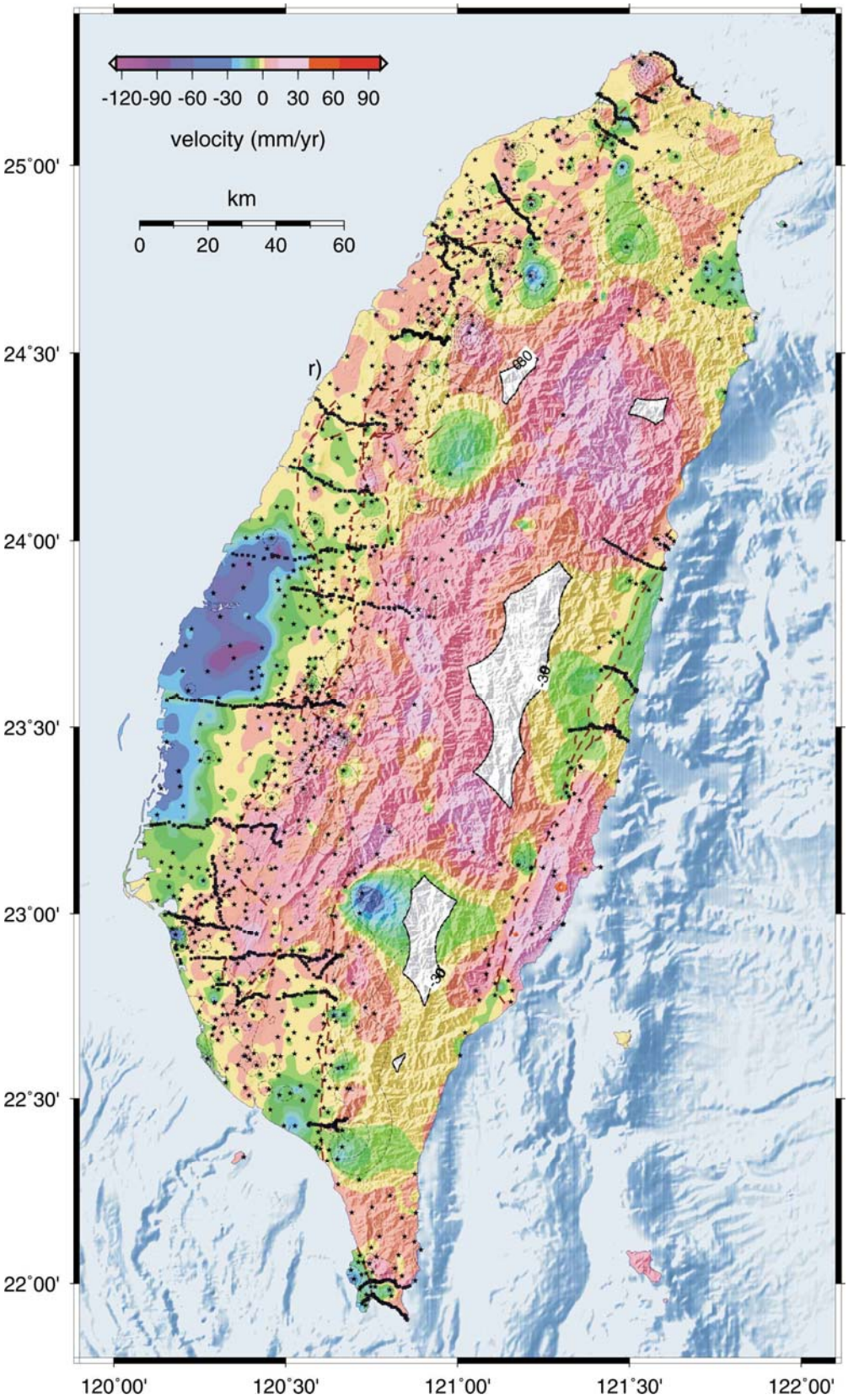


圖 1-2.4：全臺灣相對於澎湖白沙站(S01R)之垂直速度場（胡植慶等，2012）。

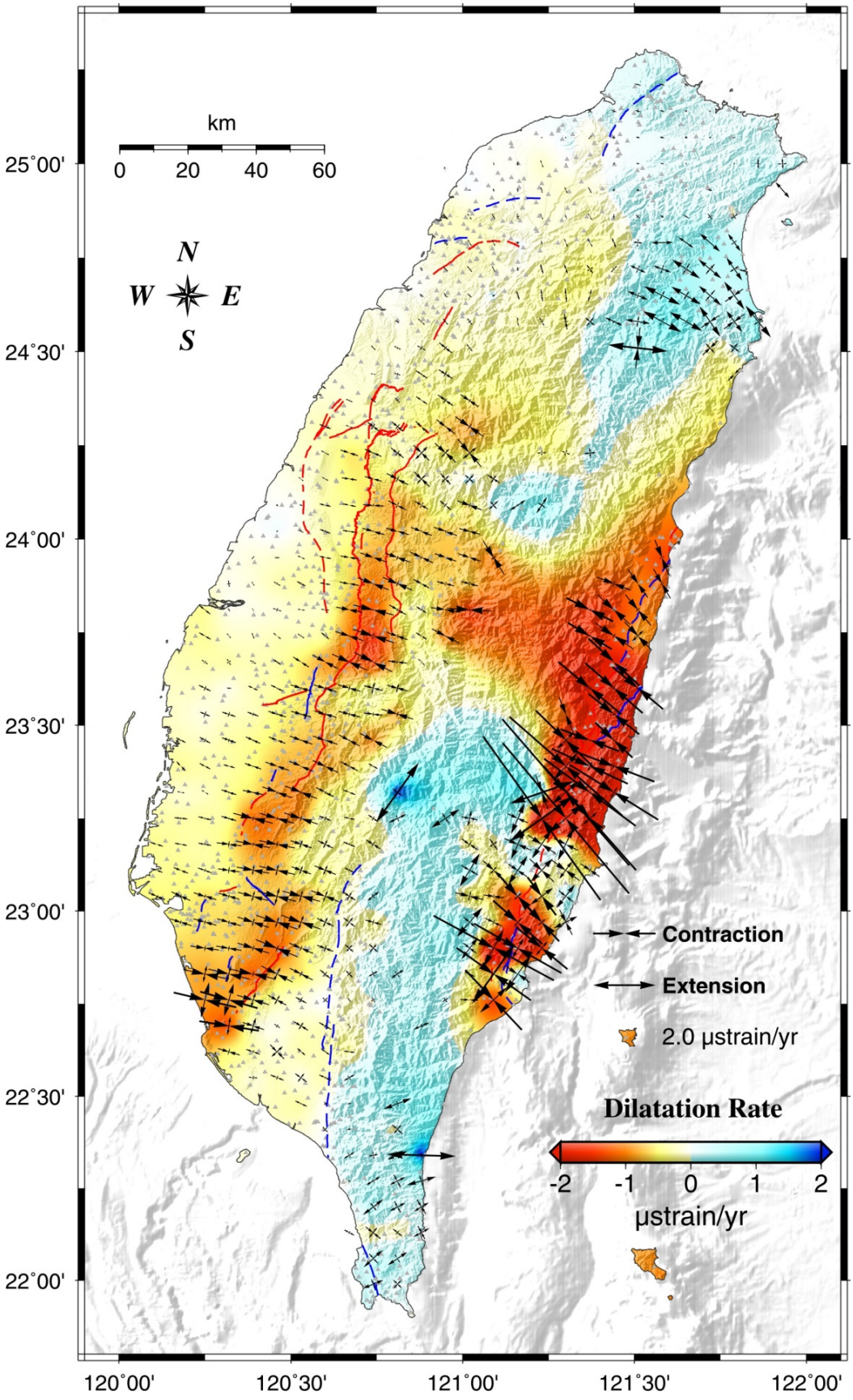


圖 1-2.5：全臺應變率場分布圖。

1-2-2 連續式 GPS

連續 GPS 觀測目前以每日解(Daily solution)為主，分析時間序列之變化，經由長時間資料累積，時間序列可提供年週期與半年週期的變化，Dong et al. (2002)利用全球 GPS 觀測站分析週期性變動，多以季節性變化為主，而造成這些變化的因子可歸納為：

a. 重力所引發的效應：極移動、固體地潮、海潮以及大氣潮。
b. 熱效應所引起的水氣變化：大氣壓力、非海潮的海洋表面的擺動、岩床受地下水變化及熱膨脹。
c. 誤差：衛星軌道模式、大氣模式、水氣分布模式、相位中心變化模式、天線盤受熱影響、當地多路徑效應以及天線盤上的雪量。
d. 構造變化：區域的斷層滑移以及應力變化。

以往研究中較少談論到此一因素所造成的時間序列變化，但在研究時間序列的過程中必須先釐清可能的影響因子，以達成設立連續站的目的。本研究將以台灣連續觀測站時間序列資料分析其季節性週期變化，並先整合各分區內測站是否含有相同的週期性特性。Lin et al. (2012)初步指出台灣沖積平原區(高屏，濁水溪以及宜蘭)測站在垂直方向受週期性影響相當明顯(圖 1-2.6)。唯先釐清影響因子後期望可以獲得構造影響所造成的變化，進而了解造成的機制。

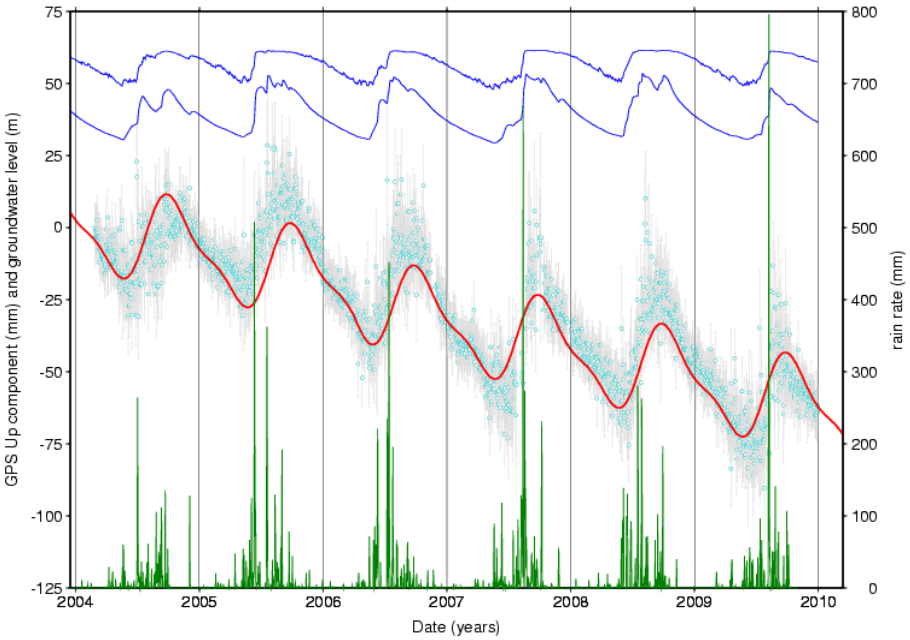


圖 1-2.6：屏東平原 NJOU 站高程向時間序列與地下水位、日雨量比較圖。圖中時間序列、地下水位以及日雨量分別以紅線、藍線及綠線表示（胡植慶等，2012）。

除了上述的每日解座標變化外，目前也進一步研究高頻 epoch by epoch 的可行性，過去研究中多以地震事件後處理該項資料，並試圖提高點位精度，圖 1-2.7 為 2003 年成功地震之 30 秒解，今日許多連續 GPS 觀測站所接收的資料可達 1 Hz，因此，未來可進一步提昇解析的時間精度與空間精度，以獲得較準確的時間序列並可進一步與井下應變儀的異常訊號互相分析，了解是否有相互關連。

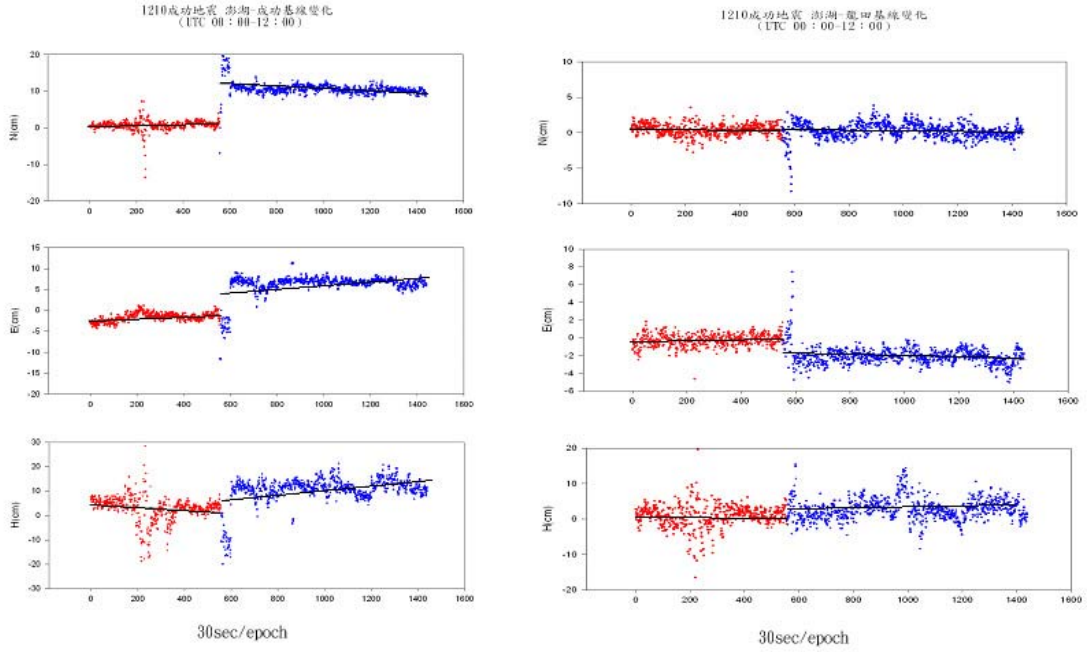


圖 1-2.7：2003 成功地震 CGPS 30 秒解。(a)成功站相對於澎湖之變化(b)龍田站相對於澎湖之變化。

1-2-3 持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術 (PS-InSAR)

水準測量固能夠得到高精度的地表垂直變化量，但由於實測需要大量的人力及物力，且獲得之資訊以線狀分布為主，對於大範圍的地表垂直變化不能夠做有效率的監測。目前臺灣利用 PS-InSAR 觀測地表變形已有不錯之成果 (Champenois et al., 2012; Tung and Hu, 2012; Wu et al., 2013)。因此本計畫欲結合 PS-InSAR 之技術，對於西部麓山帶做大範圍的地形變化監測。利用 C 波段 ERS-1/2 和 EnviSAT 影像、L 波段 ALOS 和 ALOS-2 影像及 x 波段 COSMOS-skyMED 或 TerraSAR 影像，並且配合 SAR 衛星與台灣地區影像涵蓋圖(圖 1-2.8)，用以得到北部地區、中部地區、南部地區以及東部地區(圖 1-1.2)間震時期的地殼運動變化情形，並以補佐 GPS 觀測資料分析斷層的活動性質。

持久性散射體合成孔徑雷達干涉技術(PS-InSAR)為 InSAR 技術之延伸，其基本概念為觀測不同時間之合成孔徑雷達干涉(SAR)影像，選出散射特性良好且穩定的散射點作為持久性散射點(Persistent Scatterers)，例如建物牆角、橋樑道路或裸露的岩石，可以提供較高的雷達回波訊號及較為可靠的相位值。利用這些持久性散射點的相位差來計算不同時間對衛星方向距離的變化量，獲得的變動速率精度為毫米(mm)等級。由於雷達影像是大範圍掃描(一幅雷達影像範圍為 100 km X100 km)，PS-InSAR 的運算結果在市區往往每平方公里可達數十個持久性散射點，是一種高空間密度、高精度且低成本的技術，由 PS-InSAR 所測量的結果配合大地測量監測可以得到地表變動，掌握震間變形速率，監測地表短期變形速率，了解斷層滑移趨勢並提供斷層出露在地表較明確的位置。

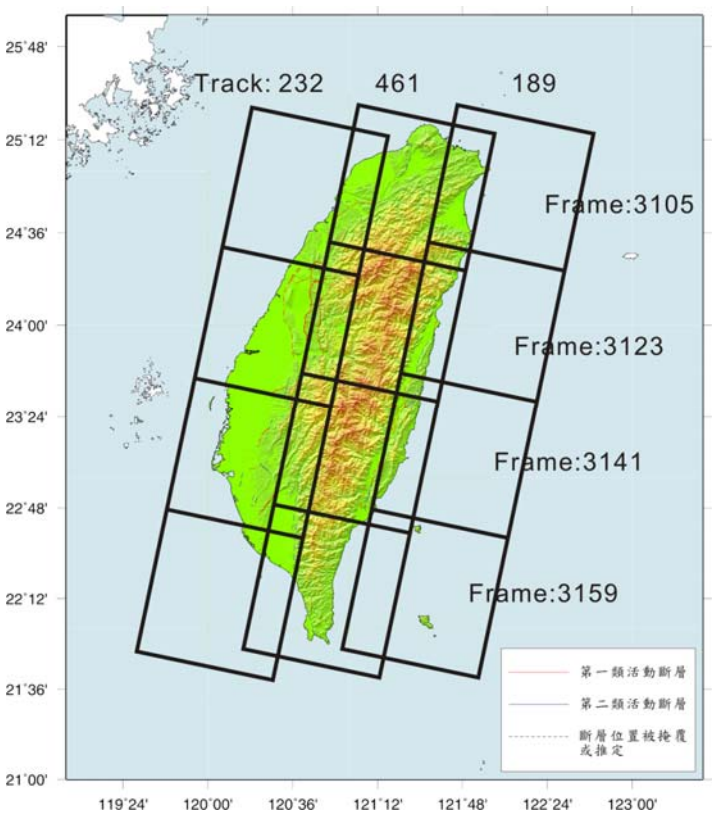


圖 1-2.8：ERS-1/2、EnviSAT C 波段影像降軌之框架 (frame) 與軌道 (track) 圖。每一張影像之涵蓋面積約為 110 km×110 km。

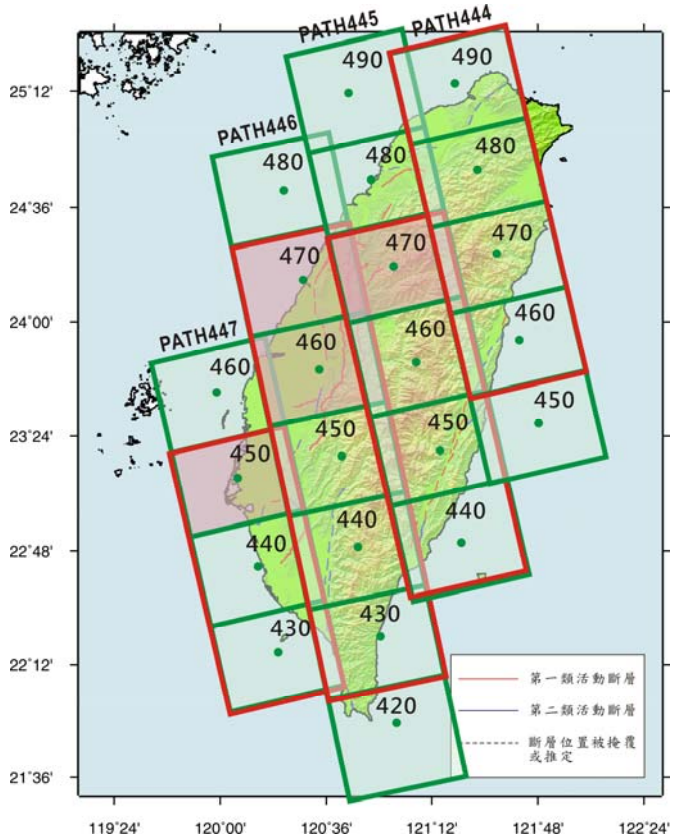


圖 1-2.9：ALOS 衛星影像於台灣之升軌軌道涵蓋圖。

1-2-4 井下應變儀資料分析

應變儀不僅在精度上可量測到小至 10-8Hz 的地潮訊號(可感測 10-9~10-12Hz 之微細應變)，且其週期變化可觀測到短中長期甚至數十年以上的構造變化。井下應變儀不僅深入地下深處，可有效降低干擾雜訊，又可緊密接觸地下厚實且未經風化之堅硬岩盤，理論上可觀測到 100 Hz 的微細應變，恰可填補地震儀與 GPS 觀測不到的頻率範圍。井下應變儀若能結合連續 GPS 觀測，對於數個月至數十個 Hz 的範圍內的微細地殼應變研究，提供另一有力的工具，有助於台灣活動斷層的活動度及其地震潛勢之評估。然而井下應變儀的資料處理、分析、與解釋之技術的確來源不易取得；由於應變儀觀測資料預計需時三年才能達穩定狀態。第一年前半年觀測資料會明顯有呈指數衰減之水泥漿固放熱之熱應變訊號。此外，地層因鑽井擾動的應力狀態亦須要兩、三年才能恢復。同時也容易受到環境因素所影響，其中影響較大的幾種因素包括每日的地體潮汐變化、空氣壓力變化、降雨、地下水文變化以及岸邊海水潮汐負載所造成的地殼變形等。首先，在各測站建立起正確的應變異常修正模式，並藉此盡量移除各種環境效應後，地殼變動的訊號就較能突顯在最後較乾淨的訊號中，其次藉由與地震相關的變化，試圖從這乾淨的訊號中，找出與地震斷層活動相關的應變資訊。藉由高精度 GPS 與井下應變儀資料處理與分析，可研究地表變形、區域應變並進一步瞭解斷層活動的狀況，分析斷層的滑移速率，瞭解間震、同震與震後斷層活動的型態。

在過去的經驗之中，仍然可發現許多明顯的應變訊號與地震活動卻未能有明顯的相關性，這會妨礙我們在做異常地殼應變的分析與判斷。有鑒於此，在新一階段的分析中，我們將引入希爾伯-黃轉換 (Hibert-Hung Transform, HHT)的 “時頻分析法”，將應變的時間序列轉入頻率的領域，但能保留相當的時間序列資訊，使得我們在各事件時間上可以觀察所記錄到的應變資料的頻率特性，如此可以較明確的分析所觀測到的應變異常與斷層活動或其它因素的相關性，因為同樣的事件在不同的儀器記錄上大多仍然保留著相同的頻率特性。

1-2-5 地球化學及地下水觀測

源自於地殼深處之天然逸氣常有高於地表空氣之組成，而氡氣、氦氣、氫氣與二氧化碳等揮發性氣體易沿著活斷層逸散至地表而顯示出異常高濃度值；此特性除了可用於觀測斷層活動以外，亦常被用來協助確認地表斷層構造之位態與分布。位於活斷層上的一些有利測站，則有較敏感的成份變化，且經常與地震活動有明顯關連；這些“敏感”的測站通常沿著活斷層，特別是在二條斷層的交會或彎曲的地方，或一些構造上處於應變(strain)集中之處。

氡-222 是鈾-238 蛻變系列中的一個放射性核種，為地層中自然存在之放射性示蹤劑，近年來已有相當多研究顯示出地下水水氡濃度異常變化可做為捕捉地震前兆示蹤劑，地殼中所含天然放射性物質(鈾)在衰變過程中會產生放射性核種氡-222，氡氣溶解進入地下水。地下水水氡濃度異常變化監測可用來做為地震前兆預測方法。長時間監測地下水水氡濃度監測，可由地下水水氡及其他溶解氣體變化來判斷地殼是否有異常活動產生，預警災害性地震來臨的前兆。

由許多成功的案例，顯示地球化學的異常變化，確實可做為斷層活動與地震的前兆。台灣島上具有從事這些研究的有利條件，如：地震與活斷層多，溫泉、自噴地下水井、受壓含水層、泥火山多等。因此經由野外調查研究，朝自動化採樣、自動化分析、觀測的方向發展，選定適當的地點設立地震地球化學觀測站，進而建立站網，是地質與地球物理方法之外，從事台灣之活斷層及地震防災基礎及應用研究重要的一環。因此，本計畫選擇位於斷層帶附近的適當位置，設置氣體與水氡地球化學與水位遠端傳輸觀測站，配合鄰近地區之地殼活動觀測資料，將有助於吾人瞭解該地區之斷層、地震活動與觀測結果之關聯，並進一步觀測其活動可能之前兆訊息與可能機制。

1-2-6 整合觀測資料分析

在本計畫中利用多種大地測量的方法來對斷層活動作不同時空分布的觀測，其中包括持續 GPS 連續站資料、井下應變儀觀測資料及地下水觀測資料，固定時段觀測的 GPS 及精密水準測量觀測，與間歇性的 PS-InSAR 觀測，這些資料詳細地記錄了地表或近地表的地殼變形活動，各有著不同的時空分布，例如 GPS 連續站資料每天計算一個精密座標的解，其空間分布遍及全台灣，平均約每 10 km x10 km 有一個測站，井下應變儀及地下水觀測則只有十多站，是連續的觀測資料，固定時段觀測的 GPS 及精密水準測量的測站沿斷層分布，每年觀測 1~2 次，PS-InSAR 則依賴衛星通過時對台灣地區的雷達掃瞄，空間涵蓋相當大，資料點則是看地面是否有可當做雷達波散射體的地表人工結構體或天然岩石露頭，通常呈散彈狀的區域分布，因此這些資料的綜合分析解釋則要利用各個的基本特性，通常以井下應變儀資料為中心，因其精度最高，頻率響應最廣，可在 10 Hz 至無窮大，但因敏感度太高，雜訊較大，所以長期的觀測骨架還是以 GPS 連續站資料為主，由於 GPS 連續站具有全球參考網的穩定性，可當作長期穩定的地殼變動參考觀測網。在高程變動方面還是以精密水準測量為主，測量精度通常是 mm 等級，可惜其觀測耗時，在本計畫中僅能沿每一斷層作十多點的觀測，因此這資料需與 PS-InSAR 的觀測資料結合，可將高程變動的成果，從點-線狀的高精度高程變動觀測擴展成面狀的變動，並增加其觀測的頻率。除了這些大地測量的資料必須綜合解釋之外，另外還需要結合地震儀的資料與地下水觀測的資料，地震儀的資料與井下應變儀有相同的觀測精度，只是一個記錄地表變動的時間變化，另一個記錄的是空間變化，而且各種地震儀分別設置遍及全台灣，期望能從兩種資料的綜合解釋得到更明確的成果。

1-2-7 活動斷層發生潛勢圖建置

根據美國 WG07(2008)針對加州地區之活動斷層及孕震構造所做的地震潛勢評估經驗，可將孕震構造活動潛勢評估工作可分為四大流程：斷層幾何形貌(Fault Models)、斷層變形模式(Deformation Models)、地震發生率模型(Earthquake-Rate Models)及總體機率模型(Probability Models)，如圖 1-2.10 所示。

a. 斷層幾何形貌：即為活動斷層之空間三維幾何形貌，如圖 1-2.1 所示為加州地區建立之斷層幾何模型。整段的活動斷層需依據分段準則或分段特性進行分段，而各段破裂模式之權重及比例分配則由專家會議評估給定。
b. 斷層變形模式：結合斷層滑移速率及 GPS 地殼變形測量以估算地震矩釋放，此滑移速率係指斷層之長期滑移速率。
c. 地震發生率模型：為長期可能造成災害性地震之發生率，即推估各地震規模之年發生次數。
d. 總體機率模型：主要是藉由各種機率密度函數評估活動斷層未來特定時間內之發生地震機率。

在進行活動斷層地震潛勢評估時，需考慮斷層資料的不確定性，包含資料本身的隨機性及離散性，以及目前科學知識尚未克服之問題。對於活動斷層資料之不確定性，可建構專家意見交換與討論機制，邀請各專家進行最新研究現況(state of the art)模式之討論，將各種斷層參數及專家模式給予合理的邏輯樹(logic tree)權重以進行評估。圖 1-2.12 為美國加州地區地震評估所採用之邏輯樹，可明確地將斷層幾何形貌、斷層變形模式、地震發生率模型及總體機率模型四大流程之不確定性予以合理地掌握。

參考美、日兩國活動斷層地震潛勢之展示方式，美國 WG07(2008)同時考慮了活動斷層與孕震構造，建立了如圖 1-2.13 之網格式機率分布圖。另外日本活動斷層的潛勢分析成果圖(摘自日本全國地震動預測地圖，2010)如圖 1-2.14 所示，圖中包含了各活動斷層之位置分布、發生機率及可能引致之地震規模，各活動斷層潛勢以不同顏色表示。本計畫之目的乃產製如

圖 1-2.13、圖 1-2.14 之活動斷層地震潛勢成果，以供我國地震防災相關分析所需之基礎應用資料。

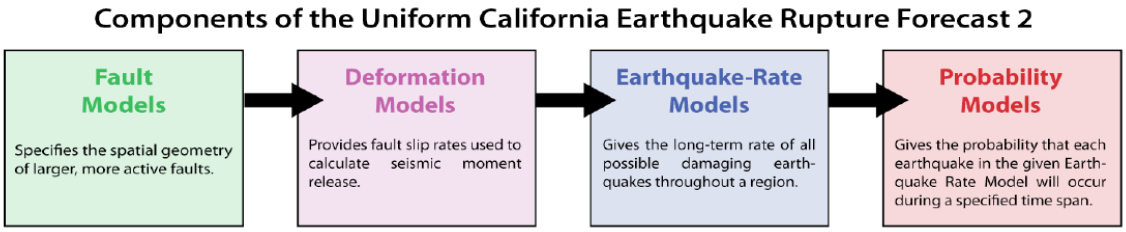


圖 1-2.10：美國加州地區活動斷層與孕震構造潛勢評估之四大流程 (摘錄自 WG07, 2008)。

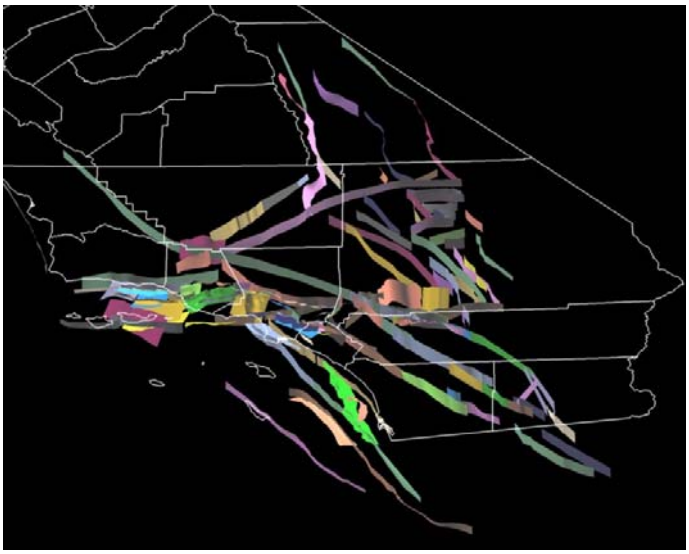


圖 1-2.11：加州地區孕震構造之三維幾何形貌 (WG07, 2008)。

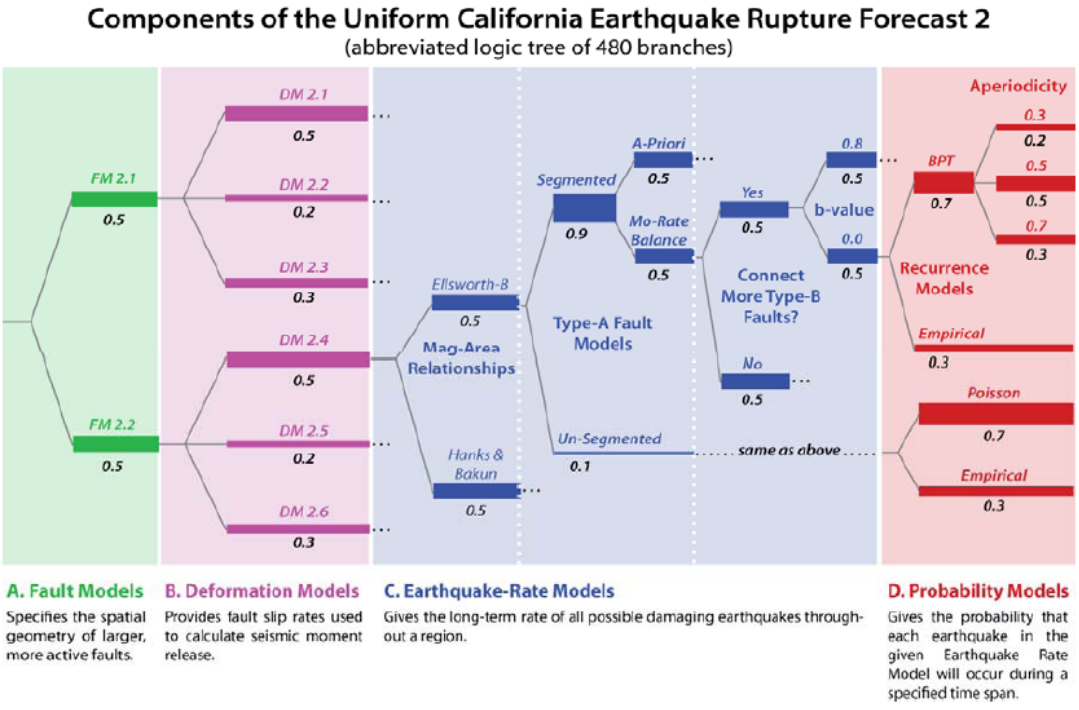


圖 1-2.12：加州地區地震潛勢評估之專家討論成果邏輯樹 (摘錄自 WG07, 2008)。

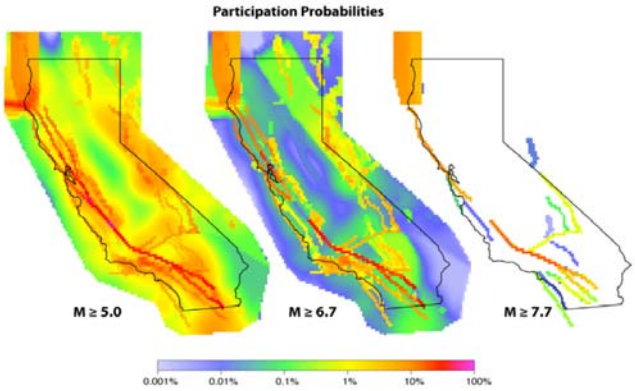


圖 1-2.13：加州地區未來 30 年發生地震規模為 5、6.7、7.7 以上之機率分布圖。網格為 0.1×0.1 度，此圖為整合各類型之孕震構造(區域震源+活動斷層)所呈現之機率分布圖 (WG07, 2008)。



圖 1-2.14：日本主要孕震構造未來 30 年之活動潛勢評估成果 (日本全國地震動預測圖，2010)。

1-3 工作內容概述

(1) 移動式 GPS 及精密水準測量 （成功大學工作團隊負責）

a. 當年度新設監測樁位之規劃與施工督導，與當年度外業施測作業督導、抽測與成果檢核。

b. 由連續 GPS 座標時間序列判斷地震同震變形、震後變形及其他擾動所造成地表變形之時間，確認各時期之 GPS 移動站速度場及水準測量是否受相同影響並加以修正之。接著，利用速度場推求中部地區應變速率之空間分布情形。

c. 透過所得之應變速率在空間中的變化，推算其在彈性地殼內對應之能量累積，同時也估計並比較同時期由地震所釋放之能量，藉以探討中部地區內能量蘊含之盈虧空間分布。

(2) 連續式 GPS 及 PS-InSAR （臺灣大學工作團隊負責）

a. 規劃當年度新設連續 GPS 觀測站位置。

b. 整合並處理地調所設置及與其它單位交換之連續 GPS 觀測站資料，進行資料檢核及坐標與高程差解算，獲得地表水平與垂直方向的位移量及速度場之初解。

c. 經由連續 GPS 站提供時間序列中是否受到地震影響所造成之同震變形與震後變形及其他擾動所造成地表變化，確認不同時期連續 GPS 速度場是否受相同影響而改變並加以修正之。GPS 連續站資料分析包含各測站的雜訊特性、週期性效應與自然界影響因子分析。

d. 利用連續 GPS 之高頻 1 秒或 1/10 秒瞬時 GPS 座標(epoch by epoch)，比較井下應變儀所觀測到之應變異常時段，嘗試搜尋是否有相同之訊號異常並且解釋可能的變形機制。

e. 蒐集中部地區 C 波段與 L 波段之雷達影像，利用 PS-InSAR 技術分析活動斷層活動度及鄰近地殼變形資訊，了解震間變形速率及應變積累，同時利用 GPS 連續站之資料與 PS-InSAR 所得之視衛星方向(LOS)位移，求得區域性三維變形資訊，解析潛在的活動構造。

f. 利用 PS-InSAR 與連續 GPS 時間序列，研究活動斷層隨時間變化之地殼應變累積及斷層活動度。

g. 利用中油構造平衡剖面資料及重定位地震位置，建構活動斷層鄰近地區三維幾何形貌。並將測地學(GPS、水準及 PS-InSAR)所得之變形反演斷層面震間滑移分布及滑移虧損(slip deficit)。

(3) 井下應變儀資料分析 （臺灣大學工作團隊負責）

a. 進行所有觀測站之資料收集及編修，進行氣壓計、潮汐影響及井孔溫度校正，估計因自然環境對應變資料的影響量，井孔回復與水泥膨脹效應的影響趨勢，計算地潮的影響量，移除不正常的突出資料，分析應變累積與地震之關係；並進行面應變、剪應變分析。

b. 持續接收井下應變儀之資料，並運用多變量回歸方式及地潮模式理論分析解算。並經由分析解算結果，解釋應變累積與地震之關係。

c. 針對嘉義網測站進行時頻分析，利用時頻分析技術尋找應變儀測站之特徵頻率、分析颱風或地震整事件是否有異常頻率的發生，進而探討可能的產生原因。

d. 維護井下應變儀資料庫，持續更新，並維護更新網頁資訊。

(4) 地球化學及地下水觀測 （臺灣大學工作團隊負責）

a. 維護既有 6 座地球化學土壤氣體觀測站、2 座水氡觀測站、與 2 座水位觀測站(含新竹地區觀測井洗井復舊)，使能夠連續運轉接收資料。

b. 分析上述既有地球化學土壤氣體觀測與水位變化資料，評估氣體成分及水位變化與斷層活動之關聯性。
c. 持續於苗栗台中三義斷層帶進行調查與人工連續監測，評估適合設置連續觀測站之位置。
d. 比較不同時序分析方法對於異常值辨識的差異。
e. 收集鄰近地殼、地震活動觀測資料，分析土壤、地下水水氡含量、地下水位異常變化的情形與當地斷層、地震活動之關聯性。
f. 於 2 座水氡觀測站進行地下水水氡採樣分析。

(5) 整合觀測資料分析 （臺灣大學工作團隊負責）

a. 建立資料綜合解釋的方法，例如找出共同的特徵頻率、將 GPS 資料轉換成地表應變的觀測、異常資料的時間領域或頻率領域的比對。
b. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料及井下應變儀觀測資料，分析應變異常事件。
c. 彙整地球化學觀測站及地下水資料加以比較，利用時間序列比對，分析各觀測資料異常之時間的相關性。

(6) 活動斷層發生潛勢圖建置 （中興工程顧問社工作團隊負責）

a. 召開 2 次活動斷層參數表及邏輯樹專家討論會議，針對斷層分段特性、三維幾何形貌、最近一次活動時間、長期滑移速率、可能引致地震規模等參數不確定性，進行邏輯樹架構與參數權重之合理性探討。
b. 利用台灣陸域構造平衡剖面資料以及重定位地震資料建立活動斷層三維幾何形貌、並研究活動斷層之活動特性與地震規模尺度，建立活動斷層特性之參數表。包含：斷層名稱、分段資訊、斷層長度與破裂深度、面積、斷層機制、傾角、錯動量及分布、長短期滑移速率、再現週期、最近一次活動時間、可能最大地震規模。可將參數表之資訊以及野外調查成果彙整為 GIS 圖層。
c. 蒐集包含槽溝，地形或是地球化學定年之相關研究成果，推估活動斷層之長期滑移速率資料；並利用 GPS 地表速度場及活動斷層地下幾何形貌，推估斷層面上短期滑移速率，進一步推算斷層的能量累積率與發生特徵地震規模間的關係。
d. 利用 GPS 連續觀測站以其他測地學的觀測資料所記錄的地表運動場(速度及應變率)來推測斷層面的震間滑移速率；並與背景地震度比較，探討各活動斷層的滑移虧損(slip deficit)；分析短期及長期滑移速率及其在活動斷層潛勢分析上的意義。
e. 完成中部地區 7 條活動斷層(彰化斷層、車籠埔斷層、大茅埔－雙冬斷層、九芎坑斷層、梅山斷層、大尖山斷層、觸口斷層)之錯動機率評估。其項目包括：(a)建立活動斷層之特徵地震模式、(b)評估活動斷層未來發生機率、(c)製作活動斷層發生機率潛勢圖。

1-4 第二階段工作成果

從 98 年至 101 年的「斷層活動性觀測研究第二階段-斷層監測與潛勢分析研究」階段性計畫的主要執行重點為：（1）分析地調所架設的 72 個連續 GPS 測站及 13 站(扣除瑞峰國小測站及甲仙十八灣測站)井下應變儀之時間序列；（2）藉由移動式 GPS 測站、精密水準測線和連續 GPS 觀測網的觀測，分析主軸應變率、剪應變率和旋轉率，以了解地殼變形之型態並利用數值摸式，反演斷層面上的鎖定率、滑移虧損(slip deficit)和滑移率；（3）比較井下應變儀和連續 GPS 觀測站的長期應變率，分析應變速率改變的因素；（4）由地球化學觀測的異常事件資料，配合連續 GPS 觀測和井下應變儀，評估地震發生前的應變異常現象；(5) 斷層活動潛勢分析方面則是評估地震機率模型應用在臺灣的可行性，藉由美國和日本發展地震機率模型經驗，分析特定斷層的活動潛勢；(6) 維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性。因此本計畫的執行，旨在結合 GPS 測量與井下應變儀觀測，結合地質構造、地震活動觀測、數值模擬和斷層活動度的研究，期能提供近斷層活動性及其潛勢、發震構造、斷層力學和可能地震前兆的重要資訊。

1-4-1 GPS 觀測及精密水準測量

過去研究將臺灣地區 2002-2012 年所測量之 GPS 移動站與連續站觀測資料作時序分析，藉由各站的座標時間序列可知各點之位移變化情形並求得各地區速度場分布。以臺北地區、宜蘭地區、桃苗竹苗地區、中部地區、嘉南地區、高屏地區、恆春地區及花東地區 8 個測網，解算 909 座移動站之水平方向速度場(圖 1-2.3)及 72 個中央地質調查所 GPS 連續站與其他單位交換約 128 個 GPS 連續觀測站之水平方向速度場(圖 1-4.1)；並由移動站及連續站平面速度場(圖 1-2.3 及圖 1-4.1)計算得平面應變速率場(圖 1-2.5)。

臺灣現今的垂直速度場在臺灣中間區帶以及海岸山脈南段有較高的抬升速率，其大致呈現一圓頂狀的圖案(圖 1-4.2)。而沉陷速率較大的則發生在平原和盆地區，以及臺灣島周圍沿海地帶(圖 1-4.2)。臺灣的地表抬升(圖 1-4.2 中的暖色系)速率在雪山山脈、中央山脈與西部麓山帶南段為 0.2-18.5 mm/yr，其中該範圍內最大速率 22.9 mm/yr 發生於中央山脈中北段。從最大抬升速率的位置向北和向南其值迅速下降。大於 5.0 mm/yr 抬升速率的 70%發生在雪山山脈與中央山脈的範圍內。此外，海岸山脈南段有 1.3-25.4 mm/yr 的抬升速率且具有臺灣最大的抬升速率 25.8 mm/yr。而臺灣地區的地表沉陷(圖 1-4.2 中的冷色系)可區分為四個主要的區域。第一為臺灣西南部的海岸平原區，其沉陷速率通常大於 15.0 mm/yr，且臺灣最大的沉陷速率-113.0 mm/yr 也位於該地區內。第二個位於屏東平原的最南端角落，在該區域內，沉陷速率有較大的 10.0 mm/yr 以及-33.2 mm/yr 的最大值。海岸山脈北段是第三個主要的沉陷地區，其沉陷速率為 5.0-20.0 mm/yr，該區最大值為-23.5 mm/yr。最後一個主要的沉陷區域在臺灣東北部的宜蘭平原。通常在平原南部的側面的沉陷速率和從海岸線向西往宜蘭平原的沉陷速率之減少比在北部的側面稍大；一般而言，該區的沉陷速率在 2.0-18.0 mm/yr 之間，而宜蘭平原的最大沉陷速率為-23.9 mm/yr。在臺灣北部及恆春半島的垂直速度分別是-3.5 ± 3.9 mm/yr 及-1.7 ± 3.6 mm/yr(圖 1-4.2)，此外西南部泥岩區之主要變形帶位於小崗山斷層與旗山斷層之間，此區域具有顯著之抬升速率，最大約為 18.0 mm/yr，出現在小崗山和旗山斷層之間，但水平速度場中相對應之位置卻無梯度變化之記錄。而在小崗山斷層與旗山斷層之間，可觀察到右移與擠壓之變形分量向東逐漸增加，速度差異量分別可達 8.0 mm/yr 與 10.0 mm/yr。隨著兩斷層間水平速度分量之增加，垂直速度場之量值也跟著增加。跨越旗山斷層北段，則有約 12.0 mm/yr 之縮短量。

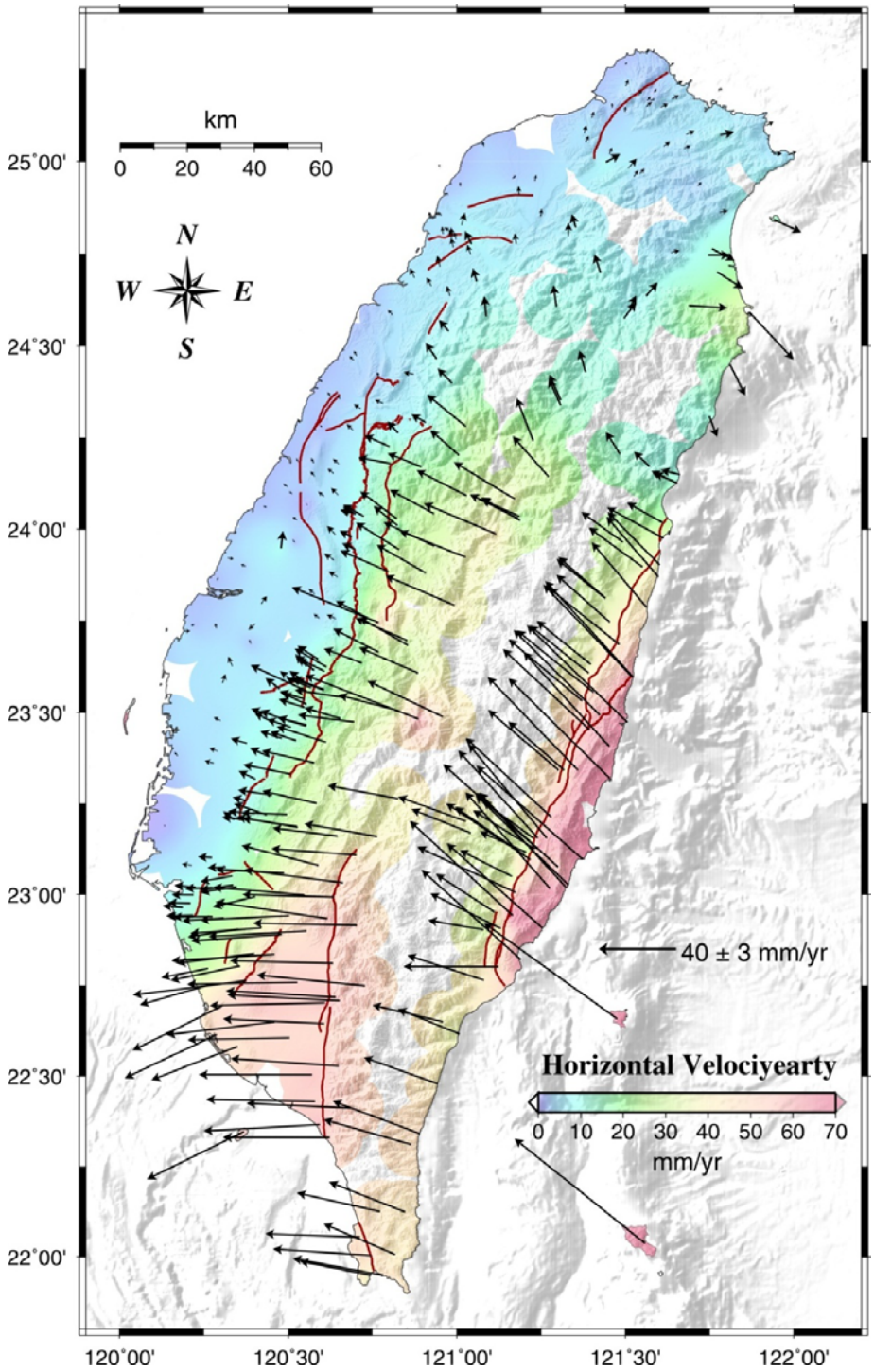


圖 1-4.1：全臺灣相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 連續站水平方向速度場，彩色色階反映 2002-2012 年測量資料所求得之速度場量值大小，黑色箭頭表示 2002-2012 年速度場方向及大小之分布情形。

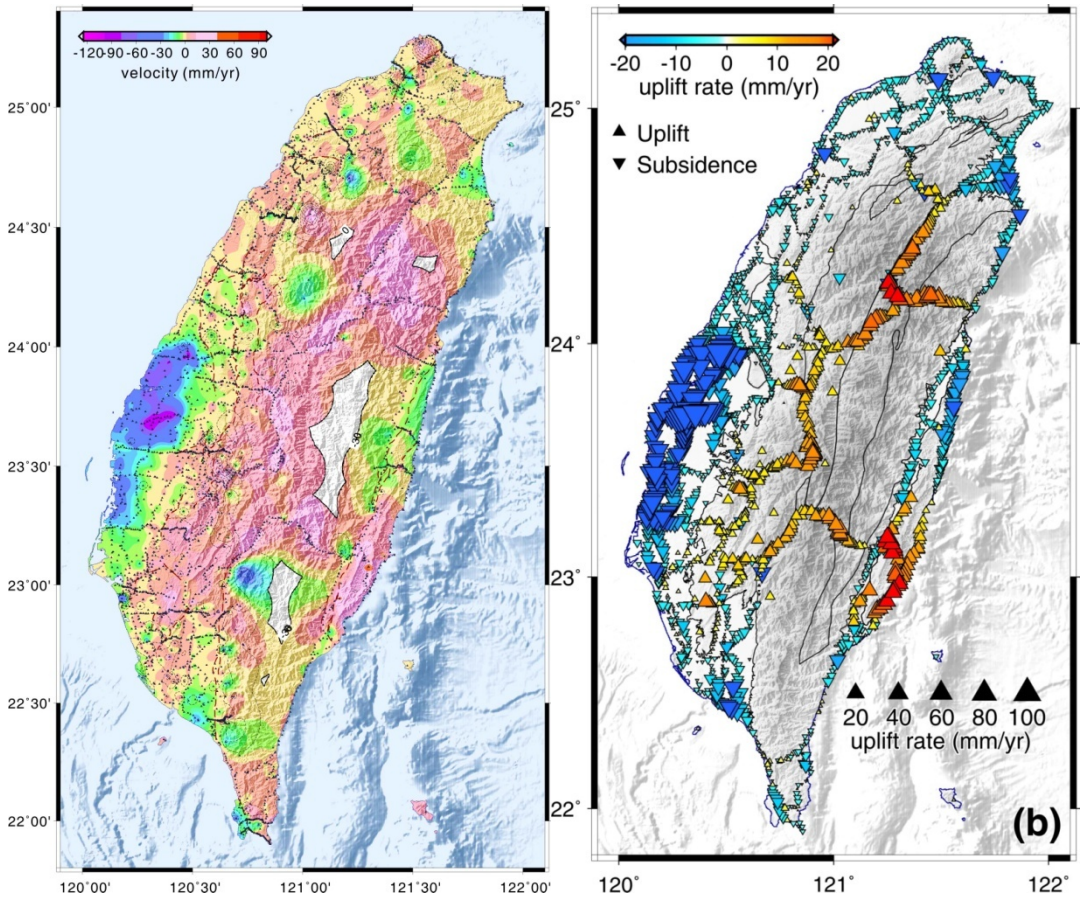


圖 1-4.2：由 GPS 及水準測量所得臺灣現今垂直速度場。經擬合後之資料均以大陸邊緣穩定站（S01R）為參考點。左圖之色階變化顯示速度量值的大小，其結果是採用最小曲率法之內插所求得。左圖彩色色階反映測量資料所求得之速度場量值大小。右圖黑色點為點位位置，黑色虛線表示各點之誤差值分布情形，其誤差值介於 10-40 mm/yr 之間。 右圖的色彩變化及三角形大小反映速度量值，三角形為計算點位位置；正三角表示地表抬升，倒三角表示地表沉陷。

1-4-2 井下應變儀觀測資料分析

過去研究除了處理台北網、新竹網及嘉義網共十三個測站外，並持續維護井下應變儀資料庫並提升資料庫安全性之外，以利未來時間序列分析之用。唯其中瑞峰國小測站(LMMT)及甲仙十八灣測站(ECT)不再觀測及維護，曾文水庫南測站(RST) CH1 永久損壞；新樂國小測站(CINT) CH0 於 2012 年 7 月之後有資料中斷與數值不正常跳階的情況，尚待進一步的維護與保養；除此之外，所有測站資料均轉成應變分量。另外本計畫也利用幾年來多次比較大氣壓變化時的資料試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式，並作修正，以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與地震相關的應變"異常"。

在本計畫中初次嘗試定義井下應變儀的地震前兆訊號，其搜尋原則如下：

a. 因為尚未修正潮汐與降雨的效應，本計畫僅搜尋台灣地區規模大於 5.0 的地震前後各 15 天可能的異常，對於變化小於潮汐變化(約 0.2 μstrain)的現象先不考慮。對於間隔太長的前兆也先不予考慮。這是因為台灣地區規模大於 5.0 的地震，過去四年來總共 112 個，考慮太長的期間會牽扯到太多的地震，往往無法分辨何者與何者相關。

b. "異常"的定義是假設地殼的應力累積除了受地體構造力的穩定作用外，就是受環境變化因素的影響與斷層活動力的作用。在除去了各種環境因素的影響後，理論上在數十天之內，應變的累積大致上該是固定斜率平滑線(意指忽略每日潮汐的變化後)。因此，明顯的斜率改變或應變突跳都可以考慮為"異常"。

c. "異常"前兆的判斷：要判斷一個異常現象是否與某一地震相關有三個主要的條件，其一是

在該地震發生的適當時間內，必須要有同震的應變變化，這變化可能是應變突跳(徒升或突降)，也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，就表示這測站並不在該地震的應力影響範圍內，任何半個月前或一個月前的地殼應變應該與地震不相關。其二是在附近幾個井下應變儀觀測站中至少有兩個以上的測站在接近的時期中都有呈現"異常"，若只有一站的明顯"異常"僅能存疑。其三是對於所看到的"異常"要再回過來看看該時間的環境變化是否也有奇怪的變化。由於環境因子的觀測儀器與觀測程序往往較不嚴謹，資料突跳與資料缺失是經常發生的，適當的資料補遺與篩選是必要的程序，"異常"資料的再確認也是必須的。

根據以上的思考與原則，我們主要測試兩個井下應變儀網，即嘉義網，包括達邦(DARB)、太興國小(TAIS)與中興國小(TSUN)三站；以及新竹網，包括大坪國小(BMMT)、新樂國小(CINT)與梅花國小(PFMT)三站，並在 2012 年度加入台北網，包括樹林站(SLIN)、明德中學站(SANS)與錦和國小站(JING)。為了避免因為環境因子的資料缺失或不同採樣率，而在做環境因子的模式修正時損失了部份的觀測量，所以原來地下水每分鐘一筆的資料下降到每十分鐘一筆，氣壓資料量原為每卅分鐘一筆，而且多有缺失，先將同一地區的氣壓資料互相補遺，也就是假設同一地區氣壓在短時期的變化大致相同，若其中某一站氣壓資料缺失一小段時期，則可以用另外一站的氣壓變化值補遺。如此各網的三個站互相補遺，可以得到完整的資料。然後再用適當的內插法，將每卅分鐘一筆的資料內插成每十分鐘一筆，如此所有的井下應變儀、氣壓、地下水位資料都有相同的取樣率，依照上面的原則建立環境因子模式，並做修正，最後再估算資料中的地潮訊號，進而扣除地潮的訊號，然後再依上述原則判斷所有規模大於五的地震（依氣象局公告）是否有同震以及震前的異常應變。在修正的資料中，由於新竹網的大坪國小地下水觀測記錄損壞，一直都無資料，考慮該地區短時期的地下水變化不大，所以先停止該地區的地下水影響量修正。另外台北地區的地下水水位與井下應變儀面應變的關係還不明確，也暫不做台北地區的地下水影響量修正。

2009 年 1 月至 2012 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，應變異常事件較明顯的有 19 個事件(圖 1-4.3)，嘉義測網記錄到 10 個應變異常、新竹測網記錄到 9 個應變異常，而台北測網記錄目前並沒有可判斷為地震相關的應變異常。其中共同應變異常事件共有 5 個。

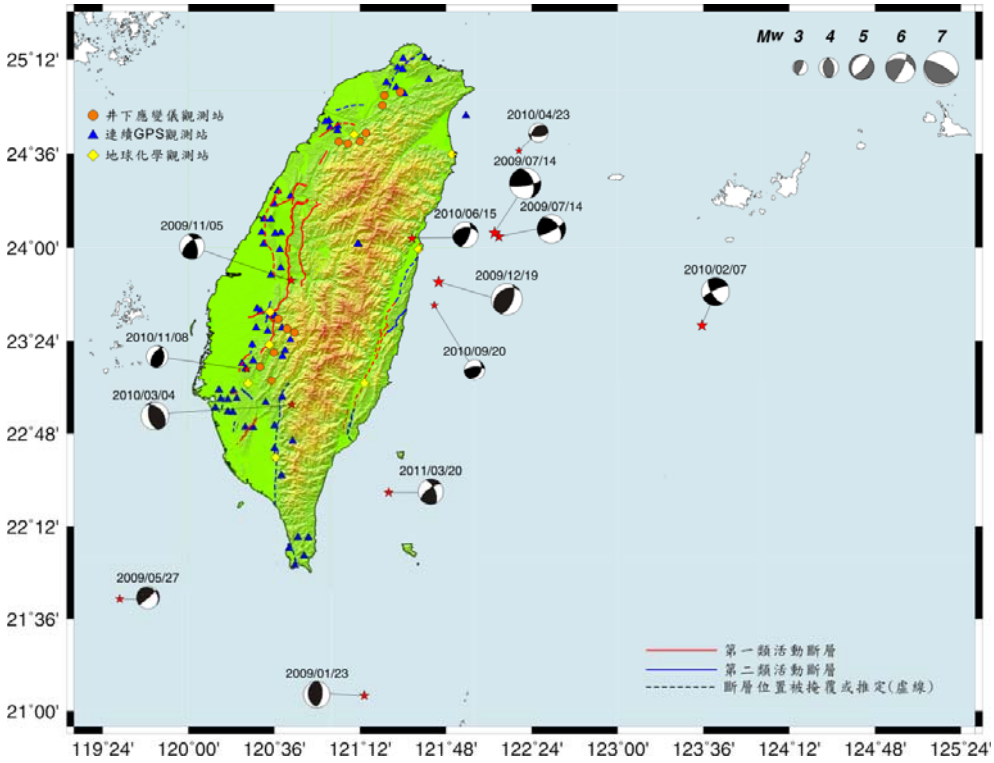


圖 1-4.3：2009 年至 2012 年 11 月井下應變儀地震前兆相關之地震。

井下應變資料在移除地下水與氣壓的影響之後，每日的潮汐訊號就更為明顯，因此開始撰寫程式來估計各站的潮汐，在無太大的異常資料干擾（如同震應變或颱風應變）時，已可有效得移除潮汐，然而如何在有異常訊號時仍能正確的估計潮汐，尚待進一步的測試。另外發現相同地區中井下應變儀對於地潮反應的振幅不一致，與相位不對齊的現象，建議未來須進一步探討井下應變儀資料的絕對值。

本研究挑選科羅莎颱風、甲仙地震兩個事件，並選取可能記錄到該次事件的測站，針對面應變的時間序列進行時頻分析，初步成果如下，各站有其特徵頻率及特殊事件(颱風、地震)，後續仍須分析更長時間之記錄，觀察特殊頻率是否僅在颱風或地震事件前後出現，並可定義出各站之特徵頻率。

a. 科羅莎颱風：有兩個站記錄到科羅莎颱風的訊號，分別為 DARB、TSUN，面應變的時間序列如圖 1-4.4，進行時頻分析後如圖 1-4.5，有 0.08 Hz 的特徵頻率，10/6 前後，在 0.1~0.5 Hz 間之頻率有明顯的強度變化，圖 1-4.6 也有類似的時頻圖特徵，但特徵頻率不同，顯示各站的基頻可能各有不同。

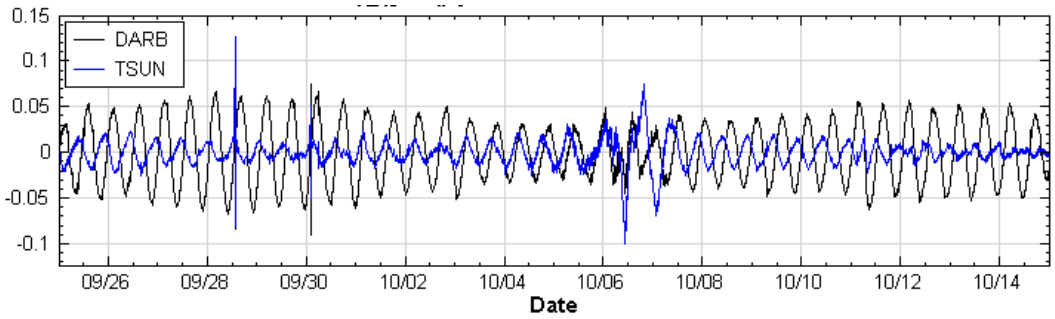


圖 1-4.4：科羅莎颱風前後面應變的時間序列。

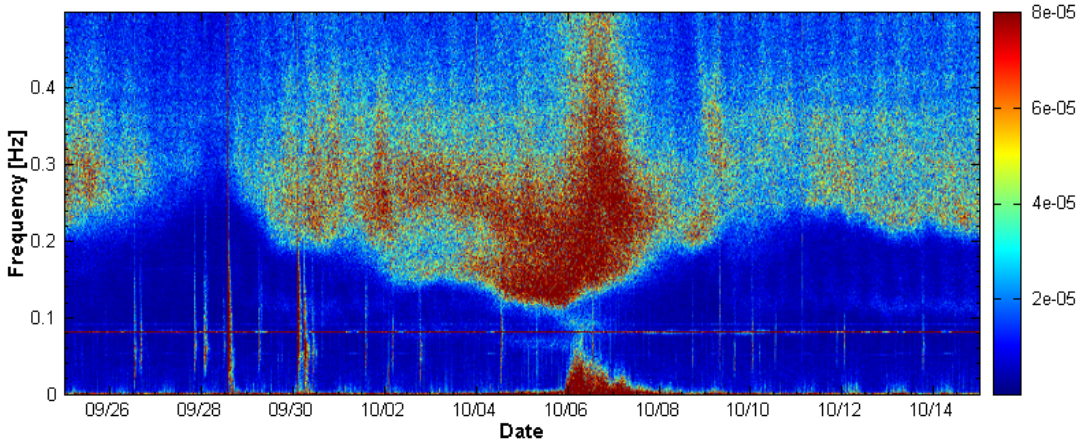


圖 1-4.5：TSUN 科羅莎颱風前後面應變時頻圖。

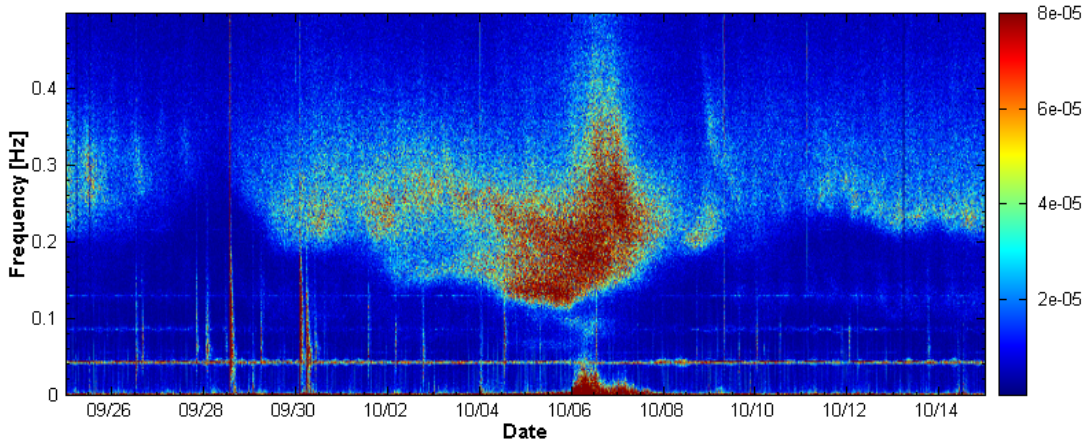


圖 1-4.6：DARB 科羅莎颱風前後面應變時頻圖。

b. 甲仙地震：有三個站記錄到甲仙地震的訊號，分別為 DARB、TSUN、TAIS。面應變的時間序列如圖 1-4.7，進行時頻分析後如圖 1-4.8，有 0.04、0.06 Hz 的特徵頻率，3/8 前後，在 0.1~0.5 Hz 間之頻率有明顯的強度變化，圖 1-4.9、圖 1-4.10 也有類似的時頻圖特徵，但特徵頻率不同，顯示各站的基頻可能各有不同。

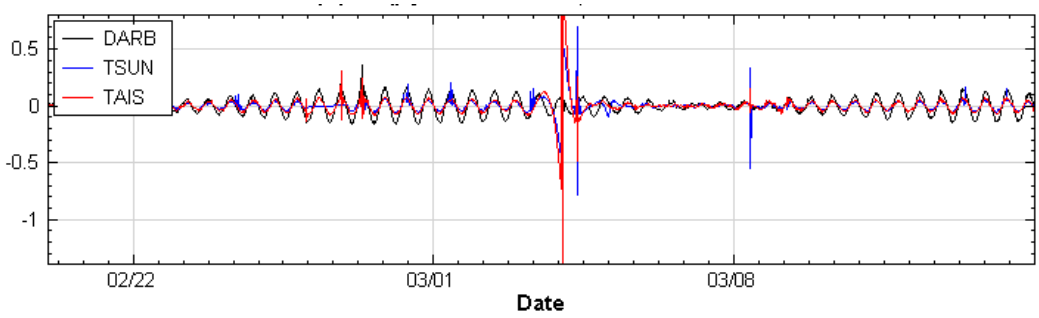


圖 1-4.7：甲仙地震前後面應變的時間序列。

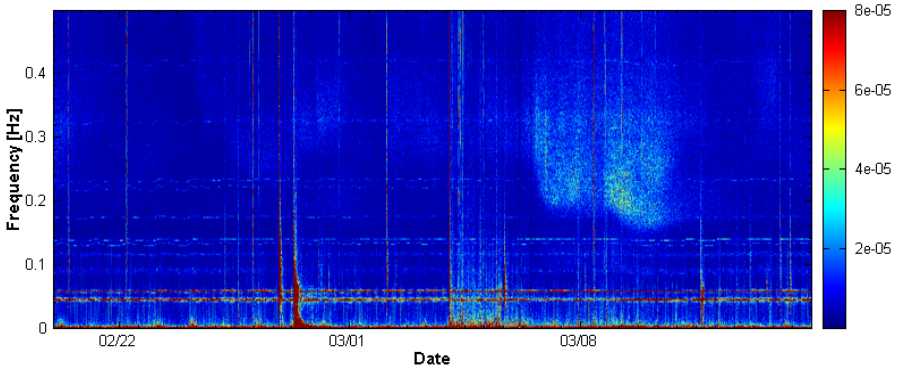


圖 1-4.8：甲仙地震前後 DARB 面應變時頻圖。

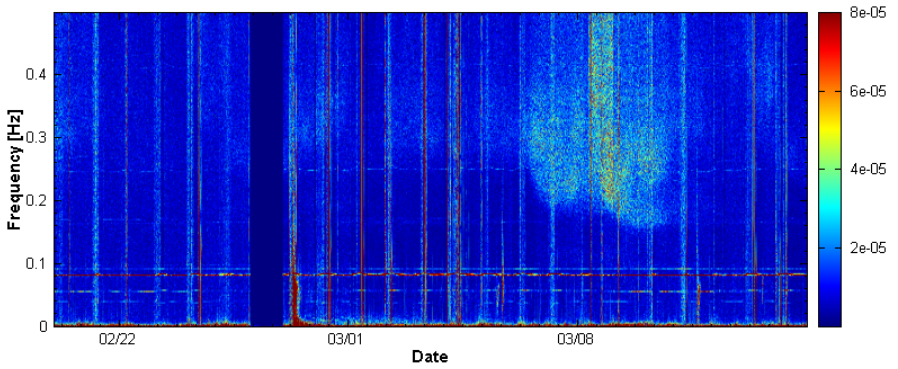


圖 1-4.9：甲仙地震前後 TSUN 面應變時頻圖。

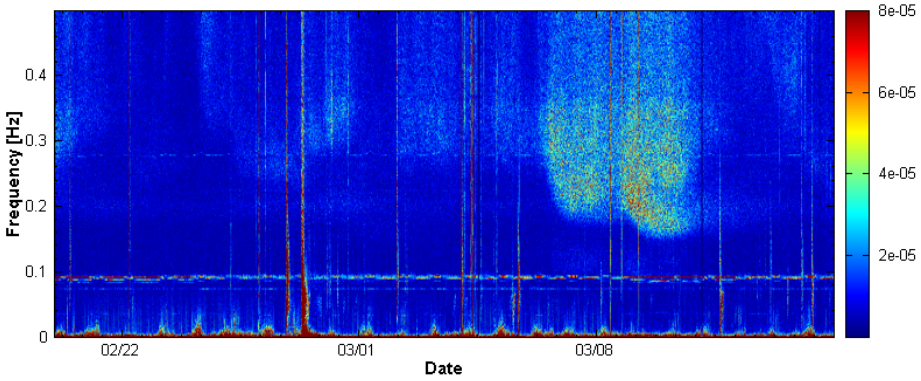


圖 1-4.10：甲仙地震前後 TAIS 面應變時頻圖。

1-4-3 地球化學與地下水觀測資料分析

本計畫前兩階段之觀測計畫中（2005-2012 年）主要著重於區域之土壤氣體調查與氣體連續觀測站之設置、水壓觀測站之設置，逐年於各地區鄰近斷層之敏感地區分別設置土壤氣體觀測站、水位觀測井與地下水氡觀測站（表 1-4.1 與圖 1-4.11），進行氣體成份與水位之觀測，成為一個初步的觀測網，配合鄰近地殼變形與地震觀測資料，探討各研究區域內斷層、地震活動與觀測結果之關聯，並進一步觀測可能之前兆訊息、及其活動可能機制。

表 1-4.1：第二階段已設置之連續觀測站配置儀器及分析項目。

站位	配置儀器	分析樣品	分析成份
中崙濁水潭站 (CL)	四極桿質譜儀、氡氣分析儀、不斷電系統、數據專線	土壤氣體	N_2, O_2, Ar, H_2O, CO_2, CH_4, Rn
新竹大平地站 (TPT)	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
雲林古坑站 (GK)	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
屏東屏科大站 (PT)	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
台東池上站 (CS)	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
花蓮東華站 (DH)	氡氣分析儀、二氧化碳分析儀、不斷電系統、數據專線、氣象控制系統	土壤氣體	Rn, CO_2
雙溪水位站 (SS)	水壓計、不斷電系統、數據專線，資料記錄器	水壓變化	-
沄水水位站 (YS)	水壓計、不斷電系統、數據專線，資料記錄器	水壓變化	-
安通水氡站 (AT)	氡氣分析儀、不斷電系統、數據專線，資料記錄器	溶解氣體	Rn
社頂水氡站 (ST)	氡氣分析儀、不斷電系統、數據專線，資料記錄器	溶解氣體	Rn, CO_2

過去的主要研究成果包含土壤逸氣調查與當地構造關連之探討、氣體成份變化之連續觀測與斷層地震活動之關連、以及斷層帶土壤逸氣量之測量與其應用。根據已經設立之各個觀測站之觀測結果，顯示各觀測站之氣體成份皆有顯著的變化，可能與地震活動有關，適合予以持續觀測。其中嘉義中崙濁水潭站對於發生於南部與東南部地區的地震活動有較為敏感的反應（圖 1-4.12）；而新竹大平地站則對於北部與東北部地區的地震較為敏感（圖 1-4.13）。南部的水位觀測結果亦顯示對於南部之地震活動有敏感反應（圖 1-4.14），非常適合持續觀測。唯嘉義梅山氣體觀測站，因為颱風大雨破壞地基，而明顯影響觀測結果，已於 2009 年計畫中於鄰近雲林古坑地區選擇適合位置，予以遷建後持續觀測。

土壤氣體觀測結果顯示，新竹大平地測站對於台灣北部的地震活動較為敏感，尤其是宜蘭地區一帶；雲林古坑和嘉義中崙溪觀測站則對於台灣西南部地區的地震活動較為敏感；屏東屏科大站對於台灣南部地區的地震活動比較有關聯；而台東池上站之土壤氡氣氣體成份則與台東及花蓮南部附近的地震活動有很顯著的關聯性。尤其新竹大平地、嘉義中崙與台東池上站之觀測結果與地震活動有明顯關聯、且有幾次規模較大的地震活動皆有異常的前兆變化，非常值得進一步持續觀測。

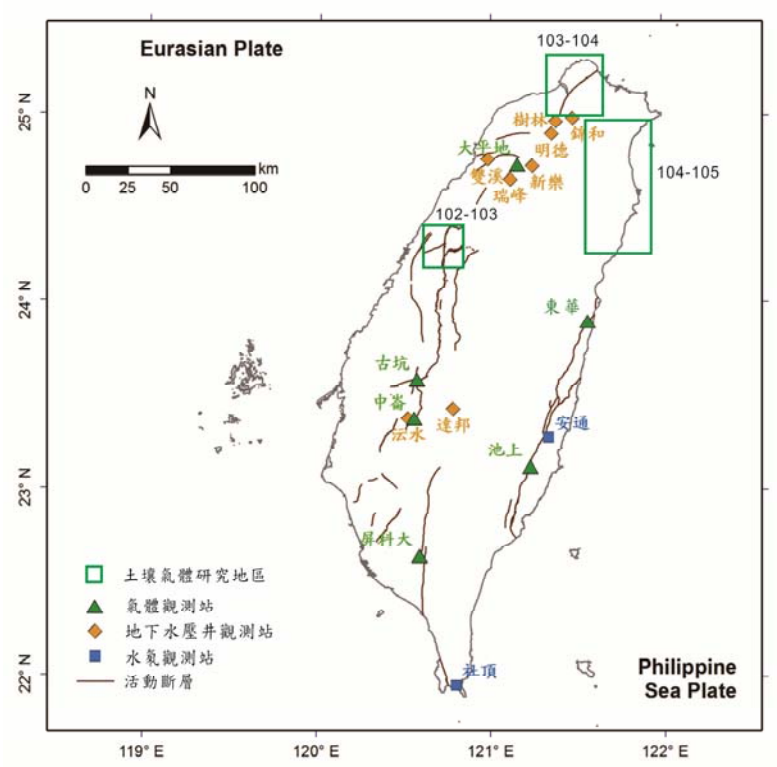


圖 1-4.11：本計畫已設置之觀測站與未來 4 年預定設置觀測站之區域。方框為下一階段（102-105 年度）預計設置觀測站之區域；方框所標示之數字代表計畫年份。

表 1-4.2：主要地震活動發生前於多個測站皆有異常氡氣反應。

地震資料				大平地站			古坑站			中崙站			屏科大站			池上站		
西元時間	規模	深度 (km)	震央位置	震度	gal	氡氣異常	震度	gal	氡氣異常	震度	gal	氡氣異常	震度	gal	氡氣異常	震度	gal	氡氣異常
2009/11/5 17:32	6.2	24.1	南投名間	2	6.2	●				5	175.8	●				2		●
2009/12/19 21:02	6.9	43.8	花蓮市	4	29.4	●				5	131.5	●				4		●
2010/1/19 14:09	5.6	41	花蓮市							3	22.5	●				2	5.0	●
2010/2/12 10:41	5.2	14	南投埔里	1	1.0	●	2	4.6	●	4	27.2	●				2	2.9	●
2010/3/4 08:18	6.4	22.6	高雄甲仙				4	36.0	●	6	377.5	●	5	99.5	●	4		●
2010/11/21 20:31	6.1	40.7	花蓮市	2	4.8	●										4	28.1	●
2010/12/06 10:14	5.2	25	花蓮西林	2		●				4		●				2		●
2011/03/20 16:00	5.8	16	台東外海									●			●	4	28.1	●

● 表示氡氣濃度有震前異常

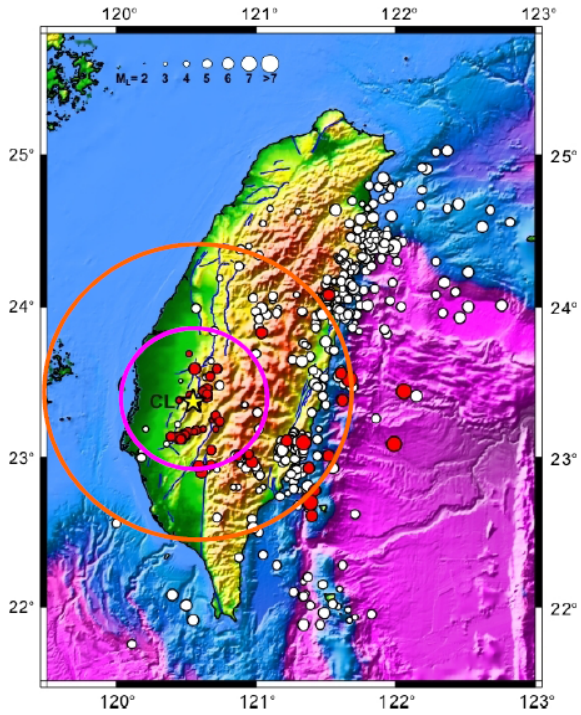
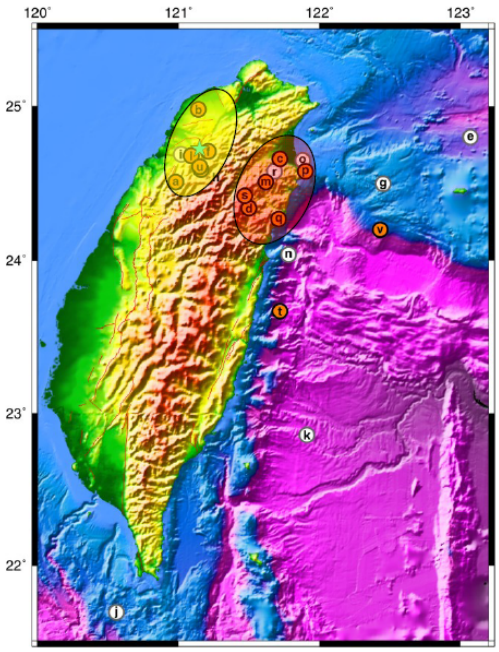


圖 1-4.12：嘉義中崙濁水潭觀測站對於發生於台灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應（2003/1/1~2004/7/31），非常適合持續長期觀測。其中星形符號位置為觀測站；圓形符號為地震發生之位置（符號大小代表不同規模），其中紅色圓形符號為觀測站有反應的地震。初步結果看來，發生於觀測站 60 公里內且地震規模大於 4.5 者，本觀測站皆有很好的感應；而發生於 60-120 公里之地震則對於較大之地震活動（規模大於 5.0）才有反應。



No.[1]	Depth (km)	Mag. (M_L)	Int. (M_I)	Distance (km)	$\triangle t$ [2] (day)
a	5.6	3.2	2	29.4	1.5
b	14.7	3.6	1	28.3	0.2
c	9.7	3.1	1	58	3.4
d	5.3	3.5	1	55.5	3.5
e	135.3	6	2	193.9	-
f	8.3	3.7	2	6.3	0.7
g	88.4	4.9	1	133.7	-
h	6.4	4	2	15	0.6
i	10.1	3.9	2	13.7	x[3]
J	44.1	7	2	342.6	-
k	5	6.2	2	221.2	-
l	8.6	3.5	2	7.8	10.5
m	41	4.2	2	53.2	14.6
n	25.4	4.7	2	99.3	-
o	85.5	4.6	1	74.2	-
p	68.7	5.2	2	77.5	2.6
q	11.6	4.2	2	75.9	4.5
r	40.9	4.9	2	55.9	-
s	7.3	3.5	1	46.9	7.4
t	29.6	6	2	130.7	17.4
u	8.4	3.8	1	12.8	7.5
v	27	6.6	3	142	11.5

圖 1-4.13：新竹大平地觀測站對於發生於台灣北部與東北部地區的地震活動有敏感的反應（2006/6/14-2007/9/9），非常適合持續長期觀測。其中星形符號位置為觀測站；圓形符號為地震發生之位置，實心圓形符號為觀測站有反應的地震。初步看來，發生於觀測站附近 30 公里內且淺源（<15 公里）之地震，本觀測站皆有很好的感應；而發生於 40-80 公里之地震亦有不錯之反應。

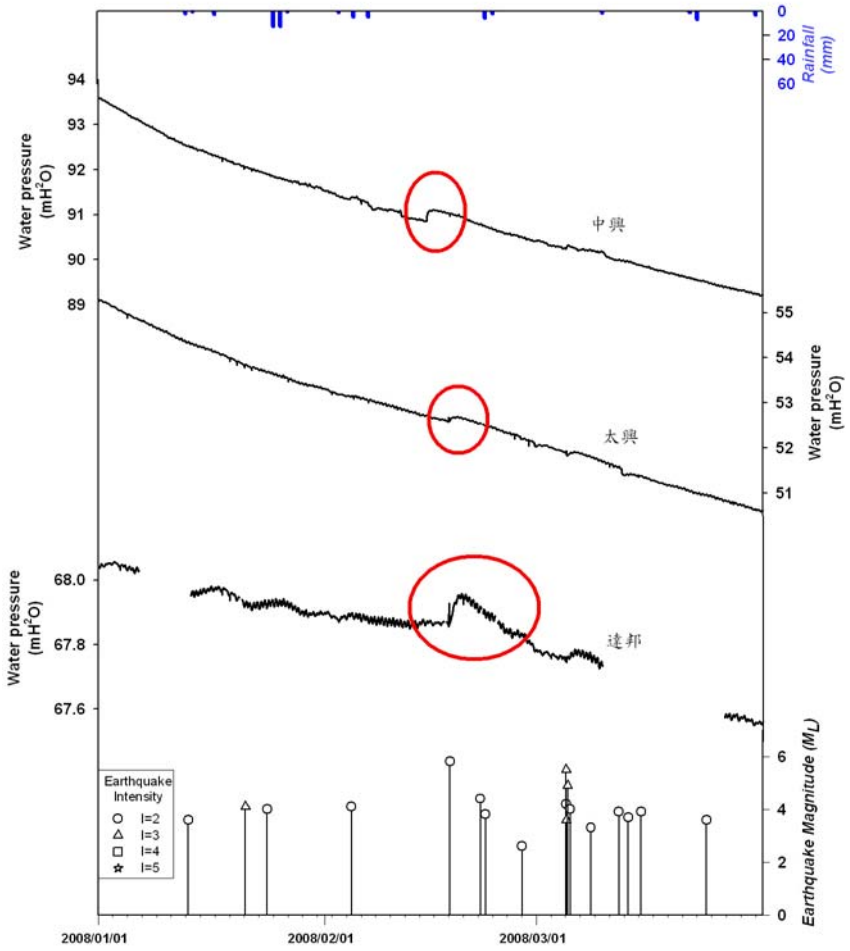


圖 1-4.14：嘉南地區的中興、太興、達邦水位觀測站(2008/1/1-2008/3/31)對於發生於台灣南部與東南部地區的地震活動有敏感的反應。於 2009 年與 2010 年執行計畫期間，亦多次於地震發生前有異常水位之變化，顯示這些水位觀測井，適合持續長期觀測。

本計畫第二階段，除了承續前一階段已設置氣體與水壓觀測站維護與資料分析外，也加入地下水氡與溶解氣體之調查與研究工作（圖 1-4.11），以期於全島能夠完成較為完整之觀測網。

根據過去的土壤氣體與水位觀測結果顯示，許多觀測站在主要的大地震發生前幾天都有異常的變化，可以視為震前反應。目前我們正持續累積更多的經驗，以評估不同站位對於不同地震（不同規模、發生位置、與地震發生機制等）的異常反應範圍。

經由地震活動所造成的異常變化而可以初步劃分出各觀測站的異常反應範圍，如圖 1-4.15 所示，當各測站的反應區間出現交集處，則地震可能將發生在這個區域。例如：當北部的大平地觀測站出現異常且嘉義的中崙測站也出現異常變化時，此時兩個測站的反應區間交集處則可能為地震即將發生的位置；如果東部的池上觀測站也出現異常變化，那則可更提高準確度。

2010 年度水壓觀測結果顯示，台北、新竹及嘉義地區之地下水壓觀測井記錄到多次地震前兆反應。譬如台北地區三站觀測井記錄了 2009 年 12 月 25 日、2010 年 2 月 12 日、3 月 18 日、10 月 1 日以及 10 月 4 日之地震前兆反應。明德與樹林地下水壓觀測井於 2010 年 6 月 23 日以後均記錄到在降雨期水壓異常下降，應為接下來數起地震（6 月 25 日宜蘭外海規模 4.7，6 月 27 日宜蘭縣規模 5.2 以及 6 月 28 日基隆外海規模 5.1 等三起地震）之前兆反應。另外，明德站也反應 9 月 12 日宜蘭南澳之地震。台北地區觀測站在過去也出現數次之震前反應，將 2008 年 11 月至 2011 年 11 月有震前地下水壓異常升降之地震震央空間分布圖繪製

於圖 1-4.16。對於台北觀測井群，有前兆反應的地震震央，大多數分布在菲律賓海板塊隱沒帶上方的弧後拉張區（包括台灣北部地區）。與台北群相距大於 100 公里且具有前兆反應的地震規模皆大於 5。

過去研究初步觀測結果顯示，土壤氡氣之變化經常與鄰近水位站之變化可以對比，且土壤氡氣之變化經常發生於水位之變化（圖 1-4.17），有助於我們往後對於異常前兆之判定。

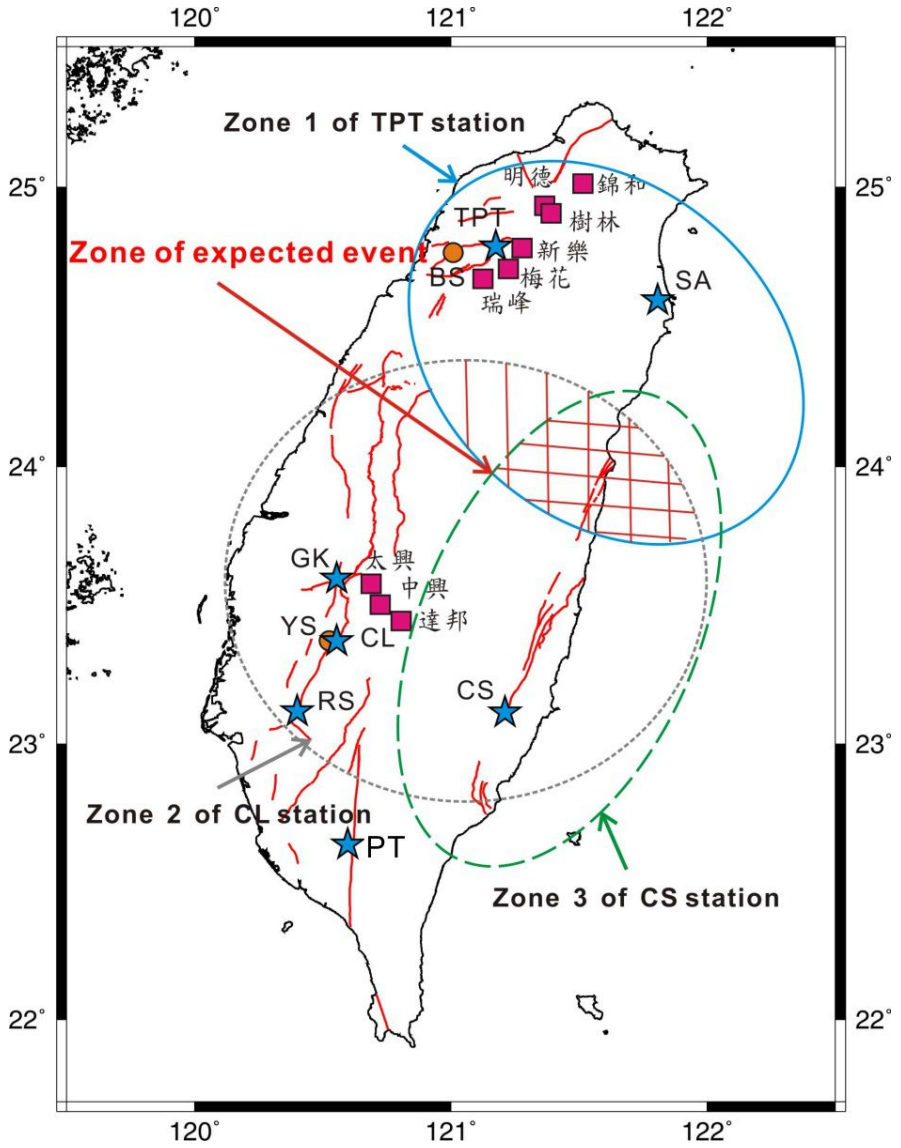


圖 1-4.15：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖，藍圈、灰圈和綠圈分別代表大平地測站、中崙測站和池上測站的可能地震反應區間範圍，其交集處代表地震可能發生的地點。

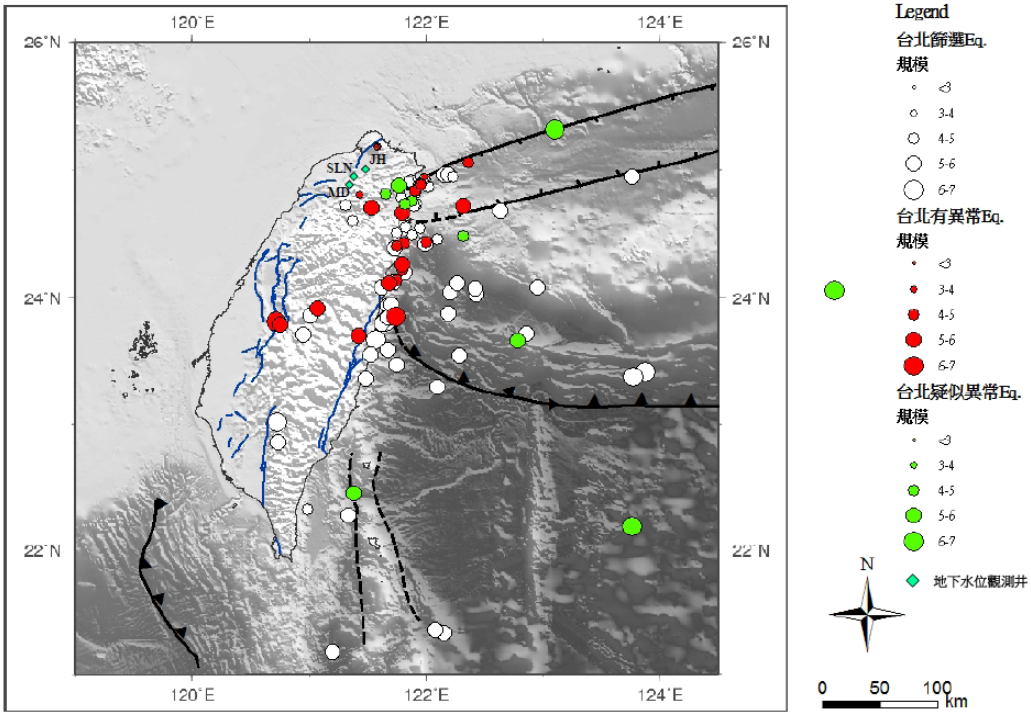


圖 1-4.16：台灣島與鄰近地區的板塊構造架構以及台北地區觀測井（JH：錦和站、SLN：樹林站、MD：明德站）有前兆反應的地震震央分布圖（2008 年 11 月至 2011 年 11 月）。

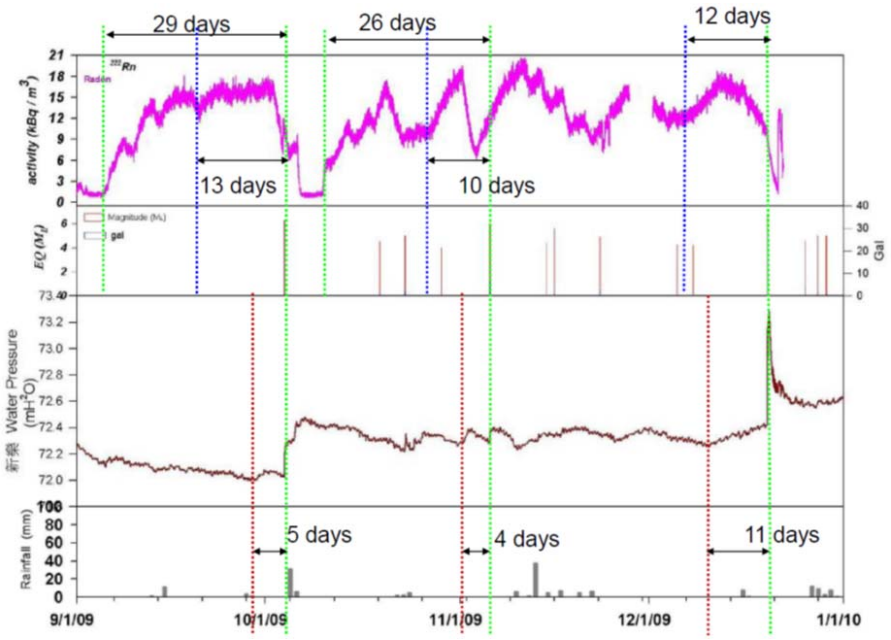


圖 1-4.17：大平地氣體觀測站與新樂水位觀測站之比較（2009/9/1-2009/12/31）。氣體之前兆異常變化經常比水位之異常變化要早數天發生。

本計畫在花東縱谷南段附近安通溫泉安通站監測井定期採集水樣，分析地下水水氡。同時，現地連續監測地下水溫度及水位。如圖 1-4.18 所示，2009 年 3 月至 2013 年 10 月未發現地下水水氡異常下降之變化，花東縱谷南段也未發生強震 （MW＞6.0），在這期間，安通溫泉飯店監測井（安通站）中地下水水氡濃度亦未觀測到異常之變化。雖然在執行本計畫期間安通溫泉安通站未發現地下水水氡異常下降之變化，但安通站在 2008 年 2 月 17 日發生地震矩規模 MW 5.4 安通地震前，能捕捉到地下水水氡異常下降之地震前兆，顯示安通溫泉具

適當地質條件成為理想地下水水氡地震前兆觀測站 ，建議持續長時間監測安通站地下水水氡濃度，預期捕捉下次在花東縱谷南段發生災害性地震（大約 MW＞6.0）之前兆。

本計畫於 2010 年在恆春半島墾丁社頂監測站執行地下水水氡之定期採樣及實驗室分析，並且於 2010 年 3 月 4 日 ML = 6.4 高雄甲仙地震、2012 年 2 月 26 日 ML = 6.4 屏東霧台地震及 2012 年 10 月 25 日 ML = 5.5 高雄地震前，觀測到地下水水氡異常下降之前兆行為（圖 1-4.19），此結果支持安通溫泉地震前兆地下水水氡逸散機制（Kuo et al., 2006a, b；2009； 2010a, b, c; 2011）。本計畫並於 2011 年分別在安通溫泉和墾丁公園社頂新設置地下水水氡和溶解氣體連續監測站，以期即時的連續監測資料，能有助於釐清溶解氣體與地震活動的關聯性，使全島能夠完成較為完整之地球化學觀測網。

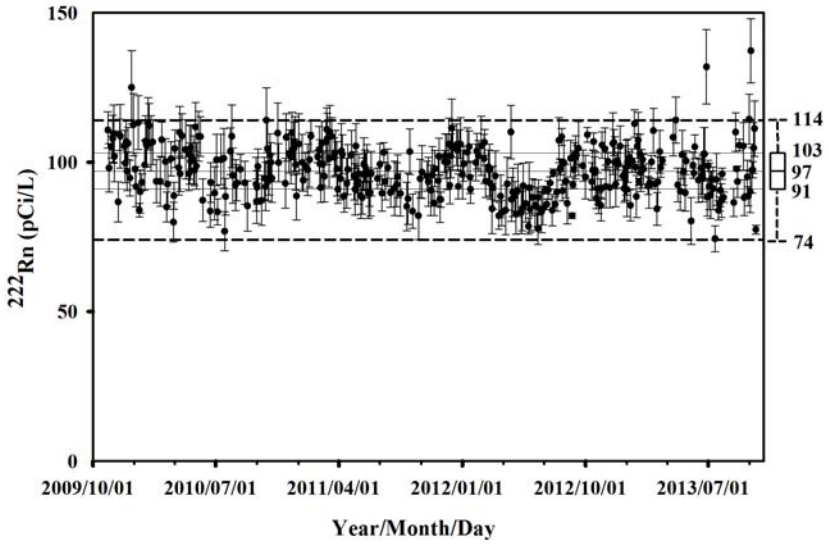


圖 1-4.18：利用四分位數統計分析安通站地下水水氡濃度。

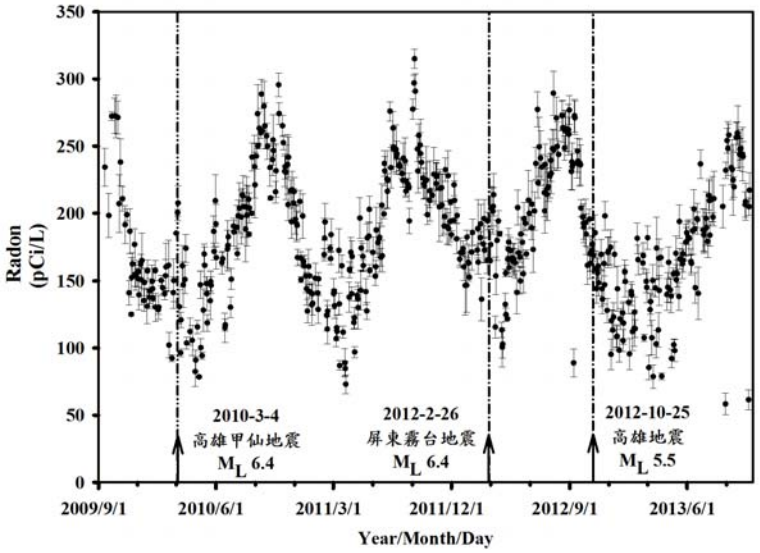


圖 1-4.19：社頂站地下水水氡濃度變化，及監測到地下水水氡濃度異常下降前兆之地震。

1-4-4 斷層活動潛勢分析

過去本計畫參考美國 WG02 (2003)、日本全國地震動預測地圖（2008）等之研究方法及結果，初步建立台灣地區評估活動斷層潛勢之方法論，共分為三種情形之分析流程。第一種已知古地震發生次數有 2 次以上之斷層（如車籠埔斷層）；第二種僅知道古地震最後一次發生的時間(如：新城斷層）；第三種為古地震最後一次事件未知斷層(如：小崗山斷層)進行評估。對於活動斷層潛勢分析參數之不確定性，可建構專家意見交換與討論之機制，邀請各專家進行最新參數研究現況(state of the art)模式之討論，並採用邏輯樹(logic tree)將各種斷層參數及模式給予合理的權重以利潛勢評估。活動斷層之專家諮詢會議，可針對斷層分段特性、三維幾何形貌（傾角、深度）、長期滑移速率、可能引致地震規模等參數不確定性，進行邏輯樹架構與參數權重之合理性探討。

斷層潛勢評估的目的是建立台灣活動斷層潛勢評估流程，以台灣現有 33 條活動斷層之其中八條為例進行評估，此八條分別為車籠埔斷層、瑞穗斷層、山腳斷層、新城斷層、六甲斷層、木屐寮斷層、池上斷層及小崗山斷層。首先建立活動斷層需求之參數表，透過本計畫建立之活動斷層潛勢評估方法論，了解斷層的重複間隔相關資訊後，以機率法評估活動斷層未來 30、50、100 年特徵地震規模之發生機率，評估結果如下表 1-4.3。圖 1-4.20~圖 1-4.22 除了展示台灣活動斷層之分布外，同時標示了以西元 2012 年為基準之活動斷層未來 30 年、50 年、100 年發生地震之機率。

表 1-4.3：活動斷層潛勢分析評估結果。

斷層名稱	地震矩規模（M_w）	再現週期（年）	機率密度函數統計模式	30 年機率	50 年機率	100 年機率
山腳斷層	6.4~7.2	北段 242~1025 南段 82~696 整段 249~1057	Poisson	8.8%	13.5%	22.5%
			BPT	12.6%	19.1%	30.9%
新城斷層	6.6~6.8	434~1980	BPT	3.0%	5.2%	11.0%
車籠埔斷層	6.8~7.6	北段 56~330 南段 265~886 整段 268~894	BPT	1.6%	3.7%	9.5%
六甲斷層+木屐寮斷層	6.6~6.9	113~366	Poisson	13.8%	21.7%	37.7%
			BPT	13.2%	21.4%	38.6%
小崗山斷層	6.7~6.8	322~750	Poisson	6.0%	9.8%	18.5%
瑞穗斷層	6.7~7.1	38~193	BPT	39.2%	52.1%	72.5%
池上斷層	6.7~7.4	北段 22~152 南段 21~147 整段 43~211	BPT	36.3%	46.3%	61.5%

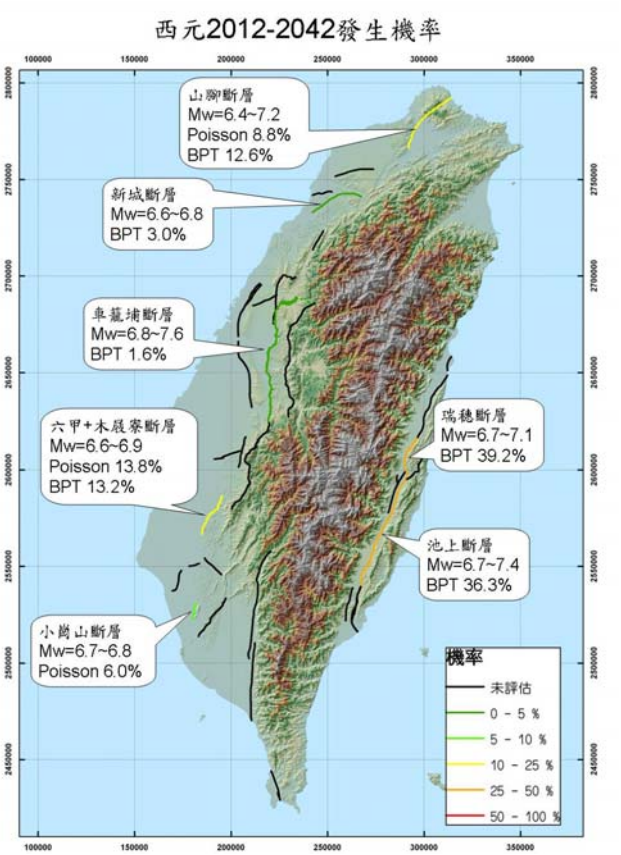


圖 1-4.20：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震發生機率。

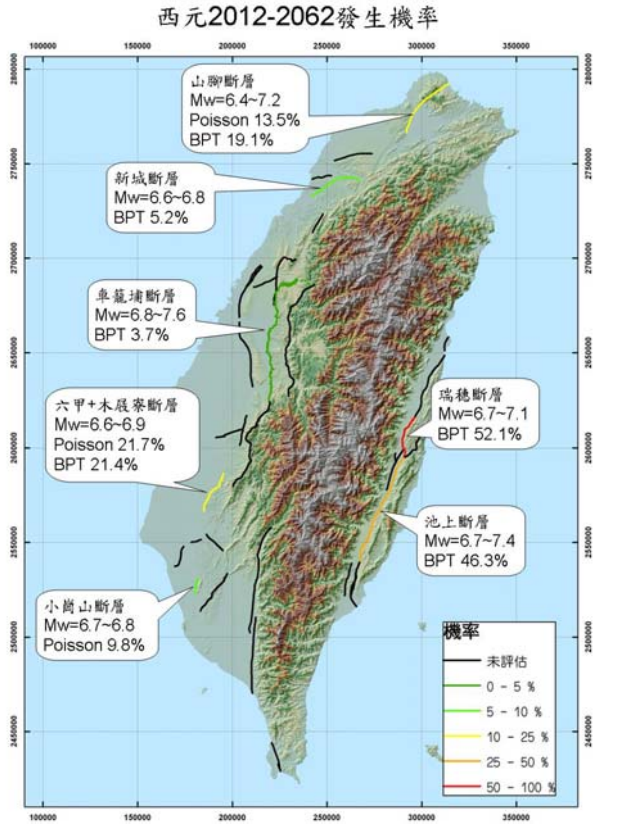


圖 1-4.21：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震發生機率。

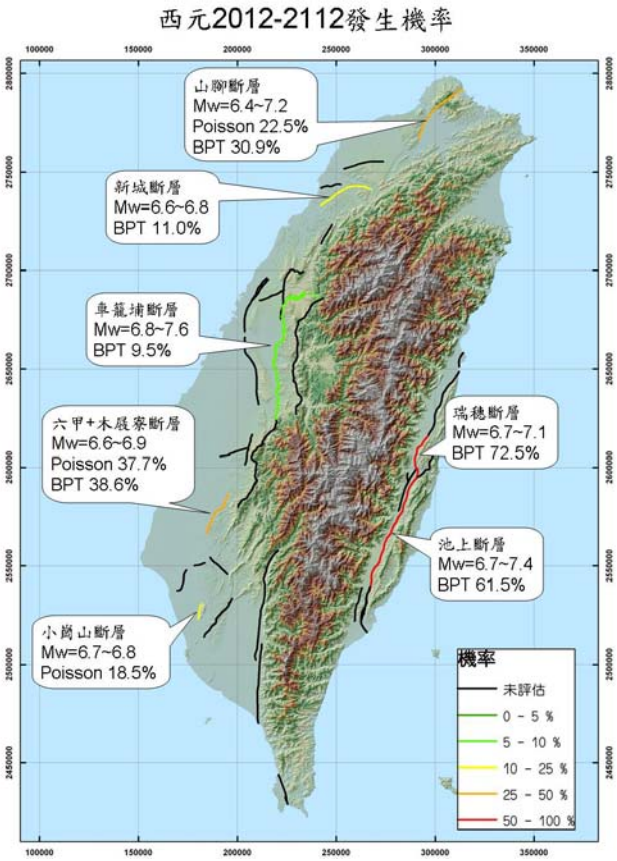


圖 1-4.22：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震發生機率。

1-4-5 整合資料分析

過去研究成果包括(1)地下水位異常(2)地球化學異常(3)井下應變儀異常(4)地震訊號異常之整合，整合期間含跨 2009 年整年到 2012 年 11 月間 112 個地震事件。分析針對井下應變儀應變異常、地下水及地化異常、利用時間分布列表以尋找共同事件，並同時在這些地震事件當天尋找是否伴隨長微震(tremor)事件。在被檢驗的 112 個規模大於五事件中(圖 1-4.23)，2009/12/19 M6.9 的花蓮地震和 2011/3/20 M5.8 的台東外海地震顯現了地下水位、井下應變儀、地化氣體的同步異常。異常記錄統計圖如圖 1-4.24 所示，這兩個地震在嘉義網的觀測具有地下水位、氣體觀測、和井下應變儀三種同步異常訊號，同天並伴隨著長微震(tremor)事件，顯示異常觀測和長微震(tremor)可能具有相同機制。這兩個地震的異常記錄在嘉義網和新竹網被觀察到，而地震皆為東部外海、非鄰近嘉義、新竹網，並且規模小於六的地震亦對應到異常，說明異常記錄的空間分布和地震規模、離地震的距離可能不相關，或者是我們沒有足夠的同步異常統計資料來說明異常觀測和地震參數的關係。

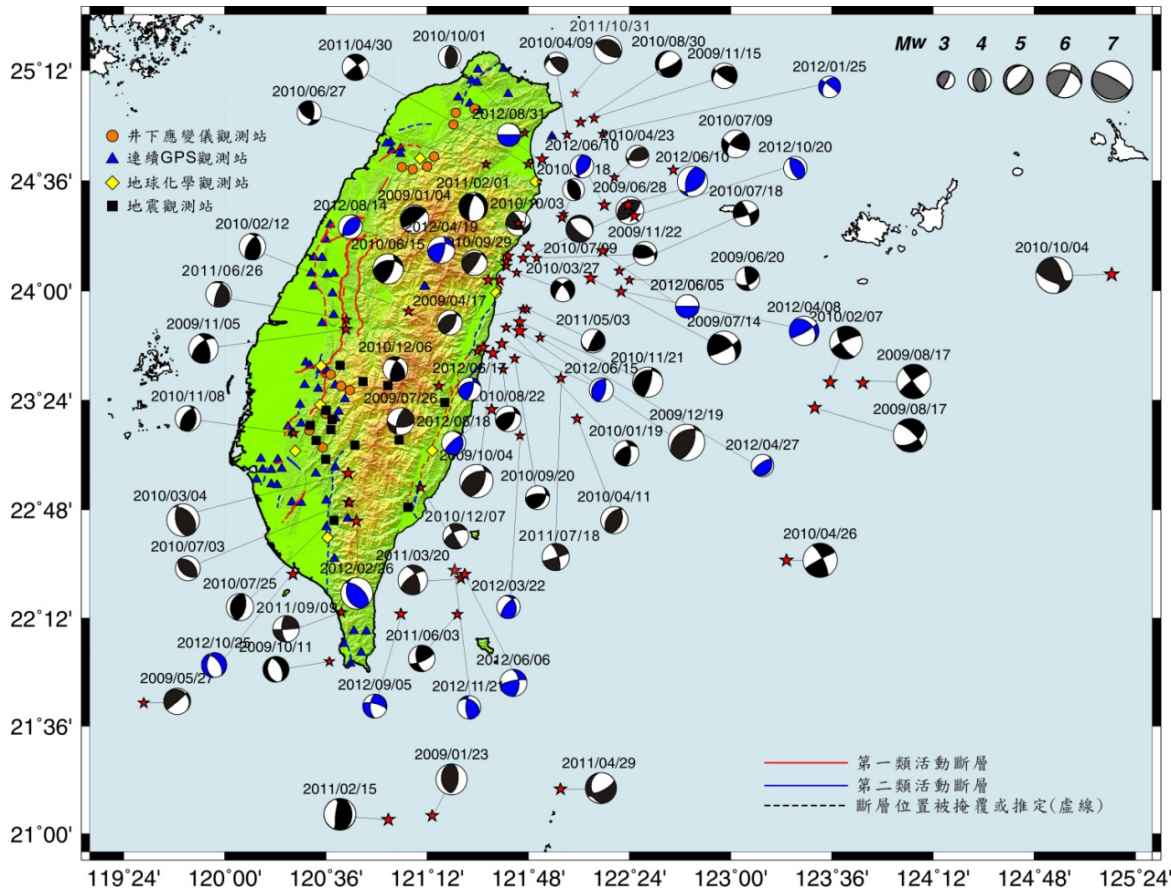


圖 1-4.23：2009 年至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。橘色圓圈、藍色三角形、黃色菱形、和黑色方形分別代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、GPS、地化觀測(氣體和水位)及地震觀測站。藍色海灘球為 2011 年 11 月至 2012 年 11 月規模大於五之地震事件。

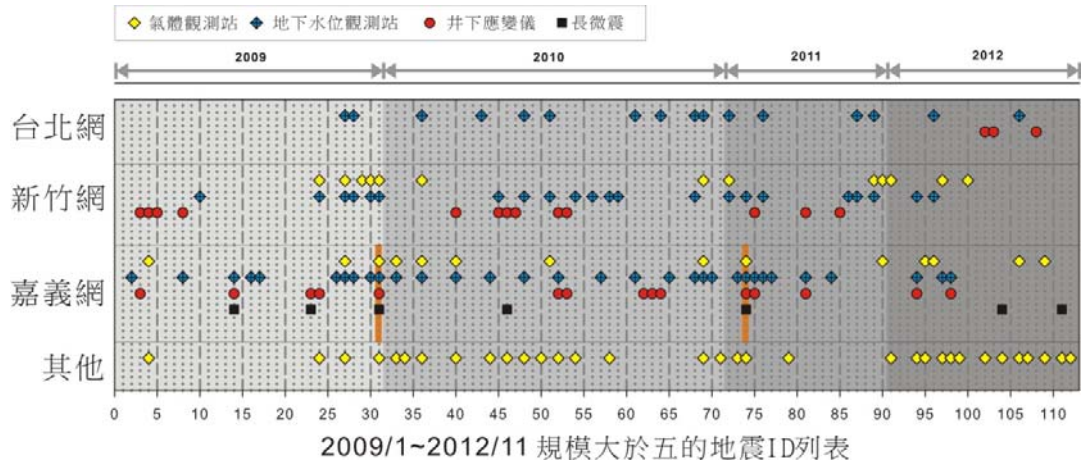


圖 1-4.24：2009 年至 2012 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID，黃色菱形、藍色菱形、紅色圈圈、和黑色方塊分別代表氣體觀測、地下水位、井下應變儀和地震訊號異常，而垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測。

第二章、移動式 GPS 及精密水準測量

2-1 2013 GPS 測量資料檢核

在 GPS 資料處理方面，本計畫主要以移動站之觀測資料為主，再配合部分連續站的觀測資料，進行臺灣地區斷層活動之監測。本研究 GPS 觀測資料之解算與網形平差，是採用 Bernese 5.0(Dach et al., 2007)解算軟體進行。

2-1-1 GPS 座標計算穩定度分析

在資料計算方面，由於存在許多因素而導致計算結果不穩定，並在座標時間序列上呈現離散的現象，因此我們藉由統計的方式來查核資料計算的穩定性。在本計畫中，我們採用座標殘差及均方根誤差分析兩種方式來檢視資料計算的穩定性。座標殘差分析是將各站每次測量所獲得之座標觀測值與擬合曲線上之座標計算值相減，將所獲得之座標殘差值（residual）進行統計。在理想狀況下，如果資料之計算成果是穩定的，此殘差值會等於零；另一方面，均方根誤差分析為針對各測站每次解算時所產生的均方根誤差量（RMS error）進行統計。

2-1-2 座標殘差分析

由圖 2-1.1 可知 2002 - 2012 年及 2013 年 GPS 觀測資料之座標殘差分布情形。2002-2012 年資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為-0.2 ± 4.2 mm（2 倍標準差）、E 方向為 0.2 ± 5.9 mm 及 H 方向為 0.5 ± 14.8 mm。在 2013 年的資料中，N 方向之殘差值 95%信賴區間為-0.2 ± 3.8 mm、E 方向為 0.4 ± 3.6 mm 及 H 方向為-0.2 ± 11.8 mm。

2-1-3 均方根誤差分析

均方根誤差分析為針對測站每次解算時，所產生的均方根誤差量（RMS error）做其統計。本計畫採用水平及垂直兩分量來分析。由統計結果（圖 2-1.2）可看出 2002-2012 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.6 mm，在垂直方向的平均值為 23.5 mm，及 2013 年水平方向之均方根誤差平均值為 8.4 mm，垂直方向的平均值為 22.1 mm。

2-1-4 嘉南地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之嘉南地區觀測資料進行分析，嘉南地區各觀測點位之速度值如圖 2-1.3 所示，黑色箭號表示 2002 年至 2012 年之速度場，速度量值 0.1 - 34.5 mm/yr，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2013 年之速度場，速度量值 0.4 - 36.9 mm/yr，結果顯示加入今年解算結果後，與去年成果大致吻合，其中點位 GB13（阿里山青年活動中心）速度值為 79.3 mm/yr 且朝向西北，與本區速度場趨勢明顯不相符，推測為山區邊坡滑移造成。

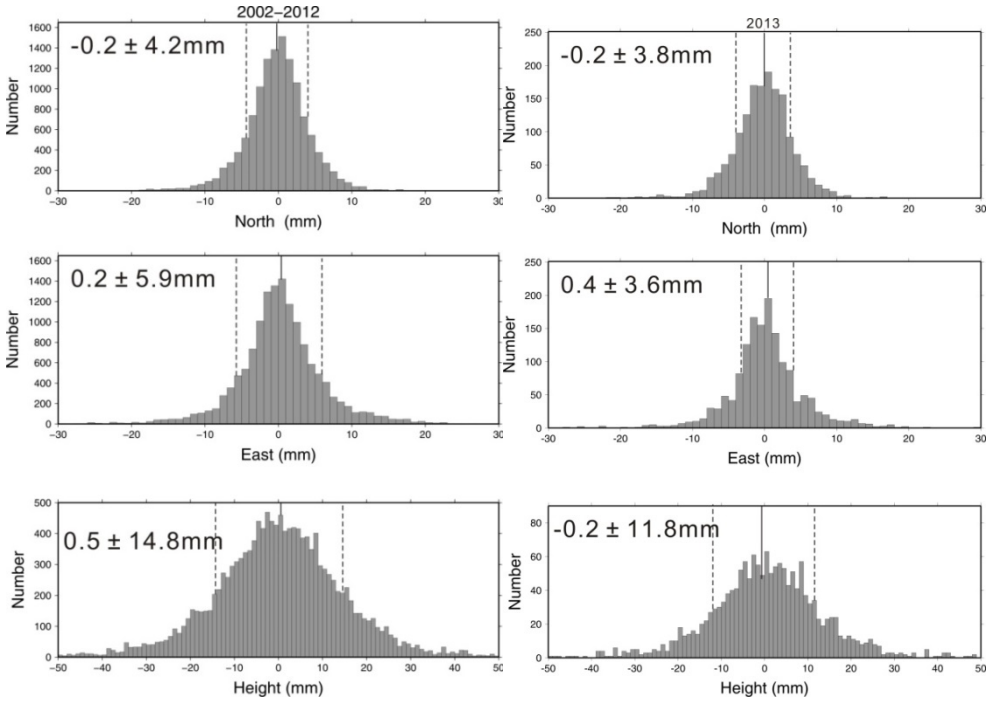


圖 2-1.1：2002 - 2012 年及 2013 年 GPS 點位座標殘差分布圖，實線為資料算數平均數，虛線表示 95% 信賴區間（2 倍標準差）資料分布情形。

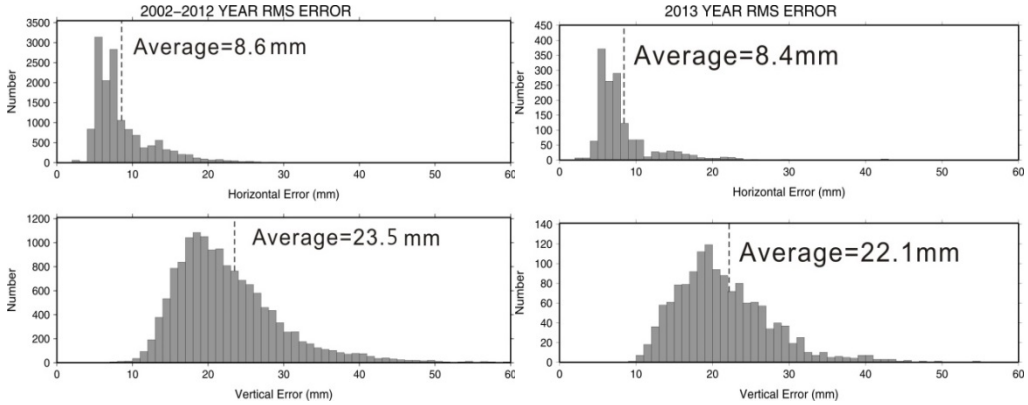


圖 2-1.2：2002 - 2012 年及 2013 年 GPS 點位均方根誤差分布圖。

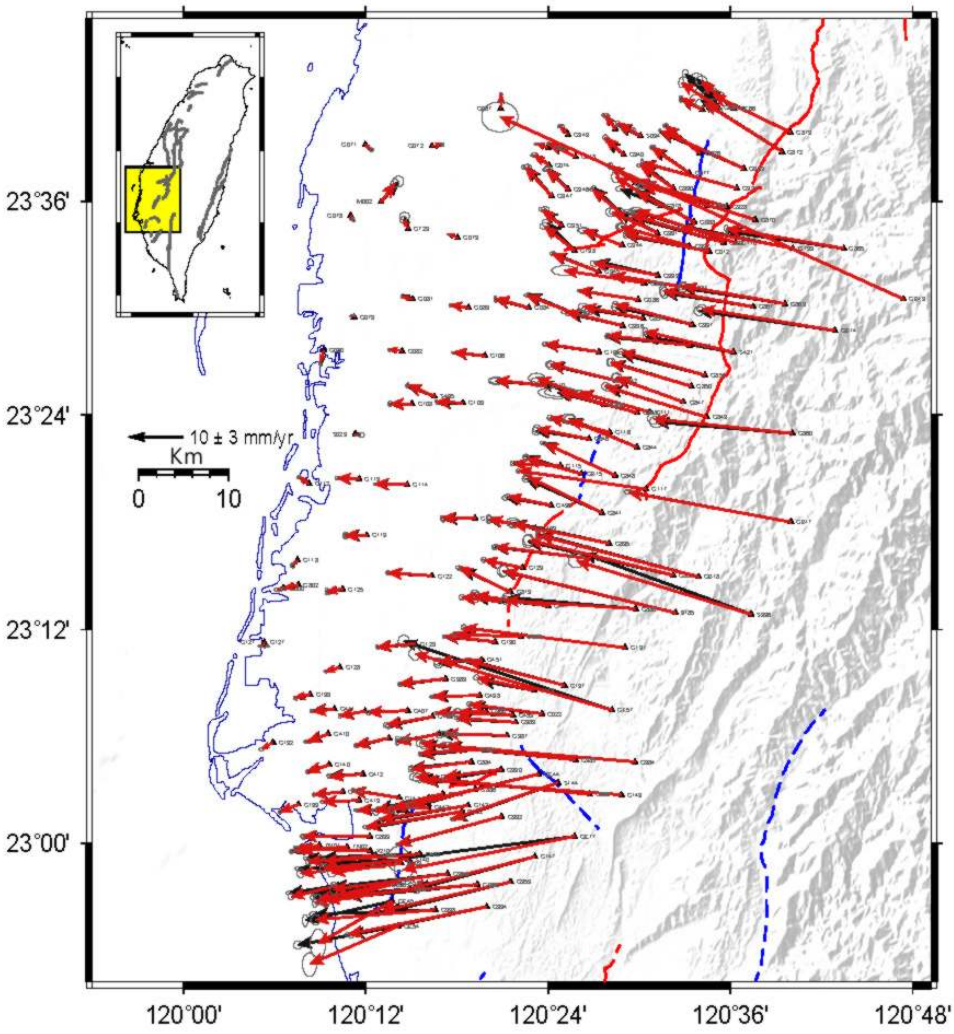


圖 2-1.3：嘉南地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002 - 2013），黑色箭頭表示 2002 – 2012 年速度場解算結果。

2-1-5 高屏地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之高屏地區觀測資料進行分析，高屏地區各觀測點位之速度值如圖 2-1.4 所示，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2013 年之速度場，速度量值 12.9 - 97.5 mm/yr，黑色箭號表示 2002 年至 2012 年之速度場，速度量值 11.8 - 96.9 mm/yr，結果顯示加入今年解算結果後，速度場與去年成果大致相符，但其中 G457（寶山國小）、S036（虻蟬）及 GC66（南漢幹 136）該地區速度場分布趨勢不同。

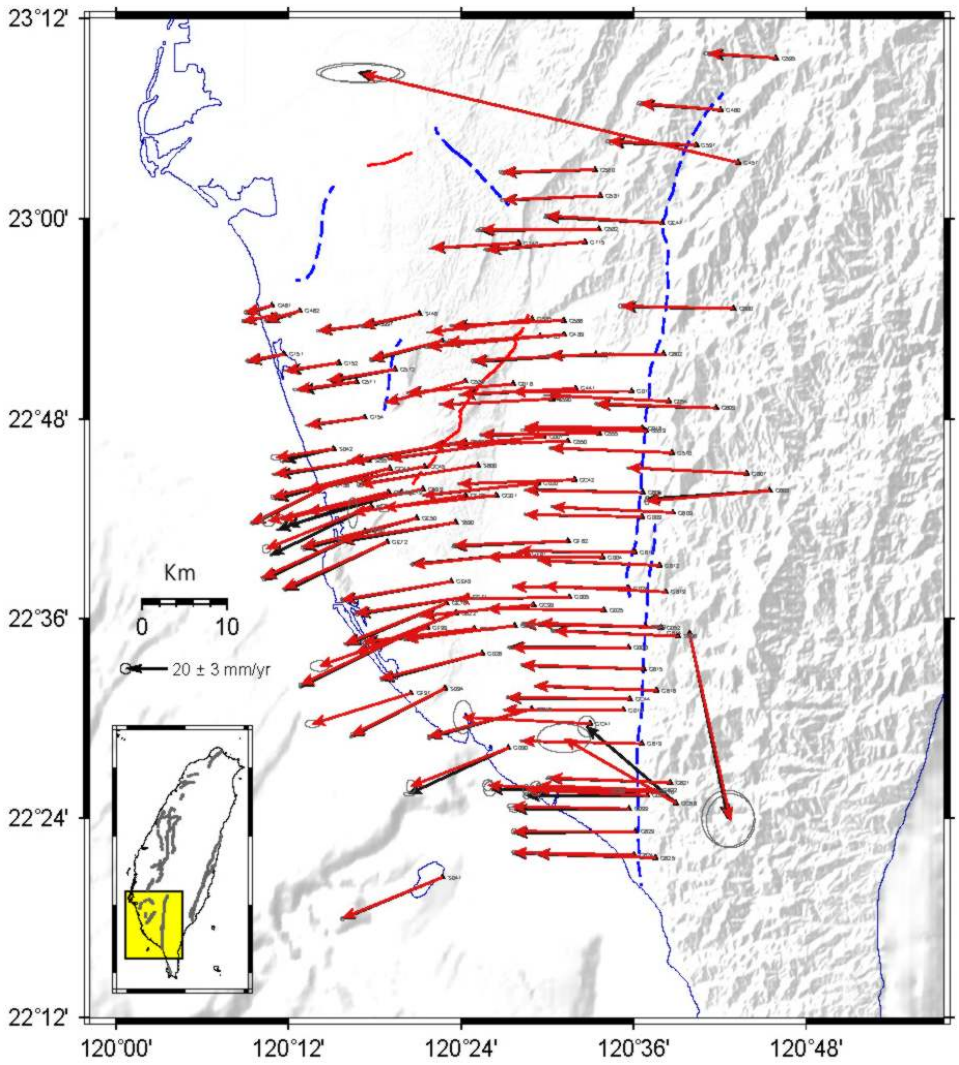


圖 2-1.4：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002 - 2013），黑色箭頭表示 2002 – 2012 年速度場解算結果。

2-1-6 中部地區 GPS 觀測成果分析

本節針對今年已完成測量之中部地區觀測資料進行分析，中部地區各觀測點位之速度值如圖 2-1.5 所示，紅色箭號表示觀測時間為 2002 年至 2013 年之速度場，速度量值 1.1 - 44.9 mm/yr，黑色箭號表示 2002 年至 2012 年之速度場，速度量值 1.3 - 46.7 mm/yr，結果顯示加入今年解算結果後，速度場與去年成果大致相符。

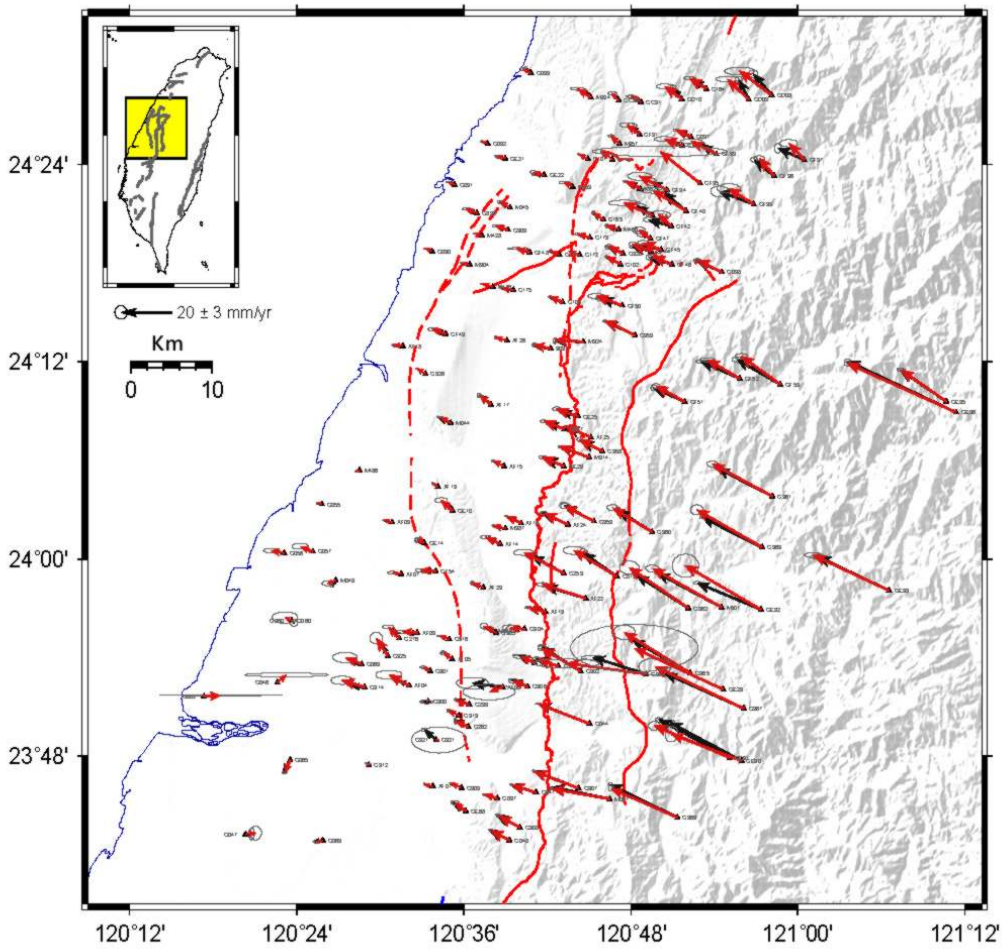


圖 2-1.5：中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場，紅色箭頭表示加計今年觀測資料解算結果（2002 - 2013），黑色箭頭表示 2002 – 2012 年速度場解算結果。

2-1-7 GPS 移動站速度場檢核

藉由高時間解析之 GPS 連續站每日解算成果可以顯示測站周圍區域之地表運動型態，亦即透過 GPS 連續站資料之分析，能獲得最可靠之速度場。移動站監測網之設置資料在完成解算後，於進行速度場分析前，為檢核速度解算成果之可靠度，本計畫挑選距離最近的移動站與連續站進行比較。本計畫以相隔距離小於 2 公里為原則，比較移動站與該地區連續站解算結果之座標時間序列。嘉南地區（圖 3.5）可比之對座標時間序列組合為 41 組，除了 PKGM-G073 以及 CHYI-G080 之座標時間序列比對有差異，其餘各組比對結果之移動站與連續站座標時間序列型態皆相符（圖 2-1.6 至圖 2-1.11）。

其中 PKGM（北港）與 G073（南陽國小）、CHYI（嘉義）與 G080（東石國小）在水平方向速度大致吻合，但在高程方向速度皆有顯著差異（圖 2-1.7），由於兩地皆位於西部沿岸地下水超抽地區，推測可能和地下水造成的高程沉陷有關。

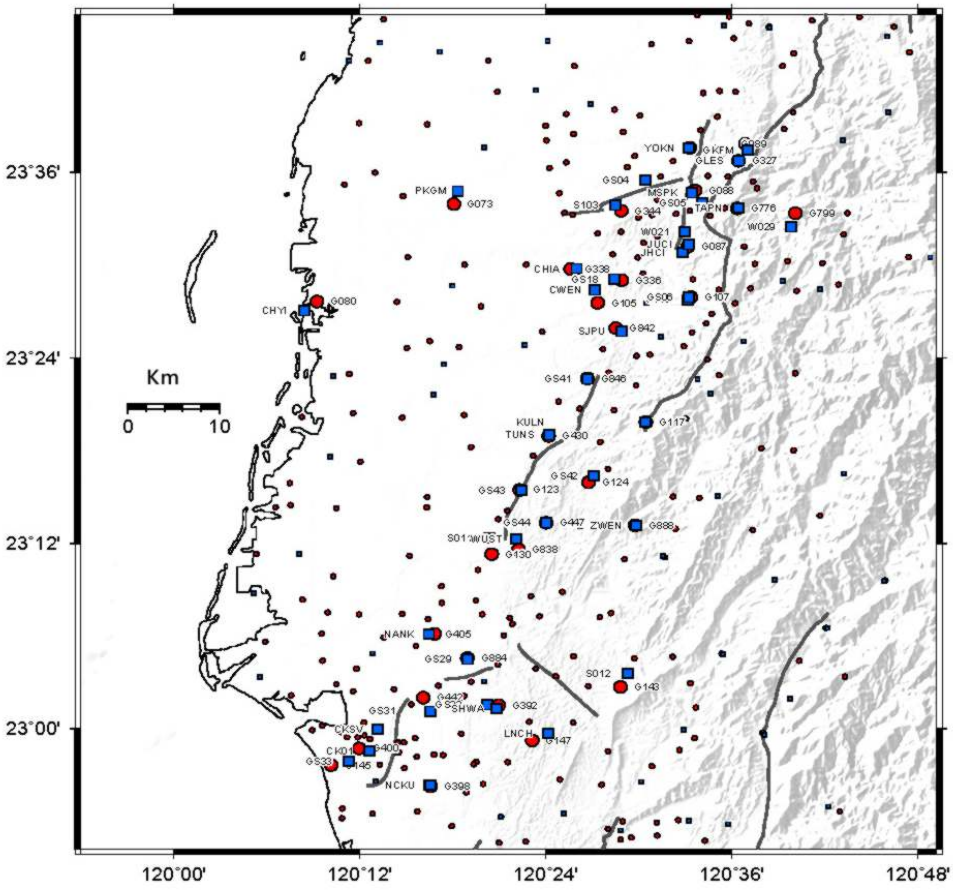


圖 2-1.6：嘉南地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

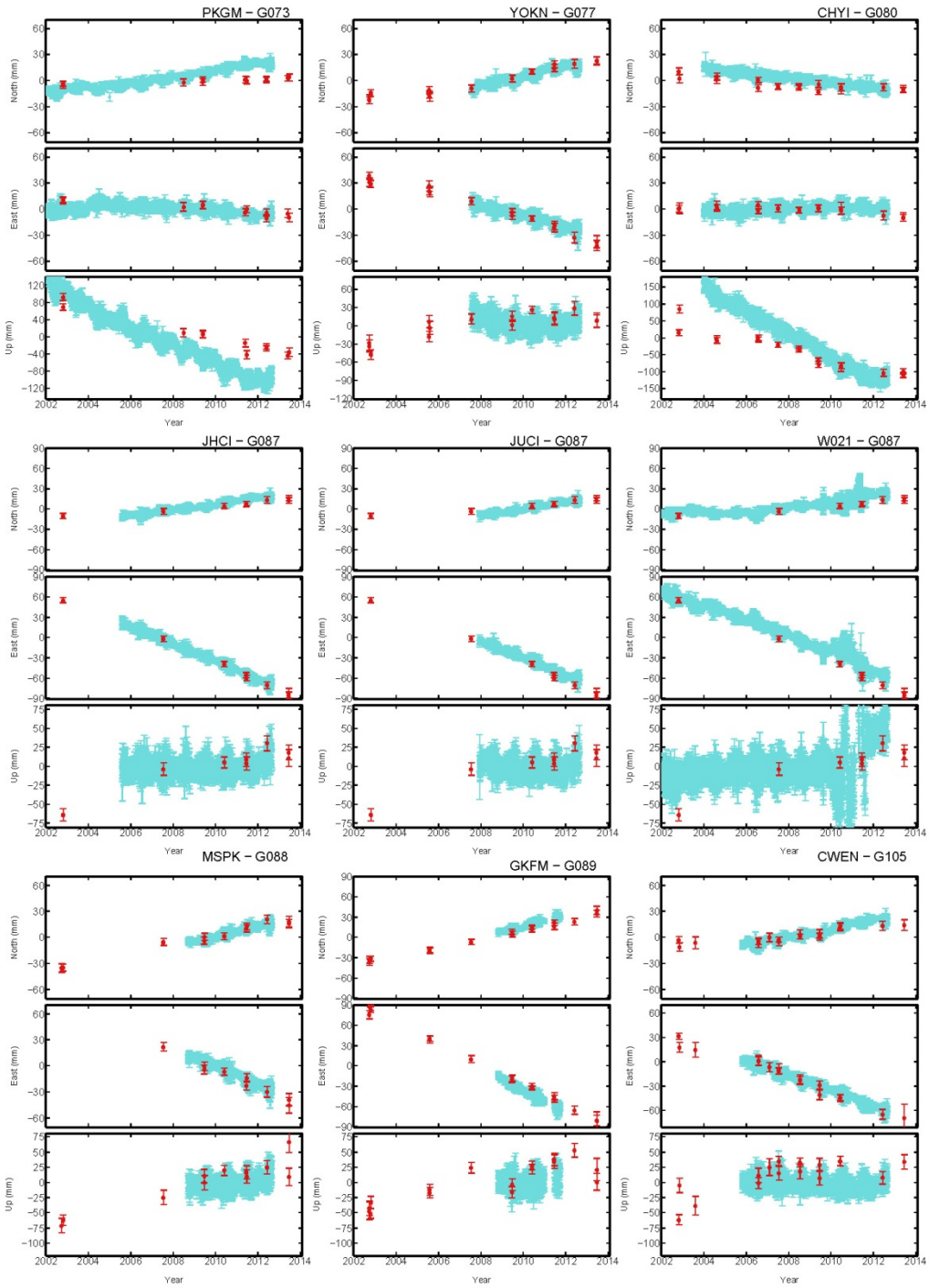


圖 2-1.7：2002 - 2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

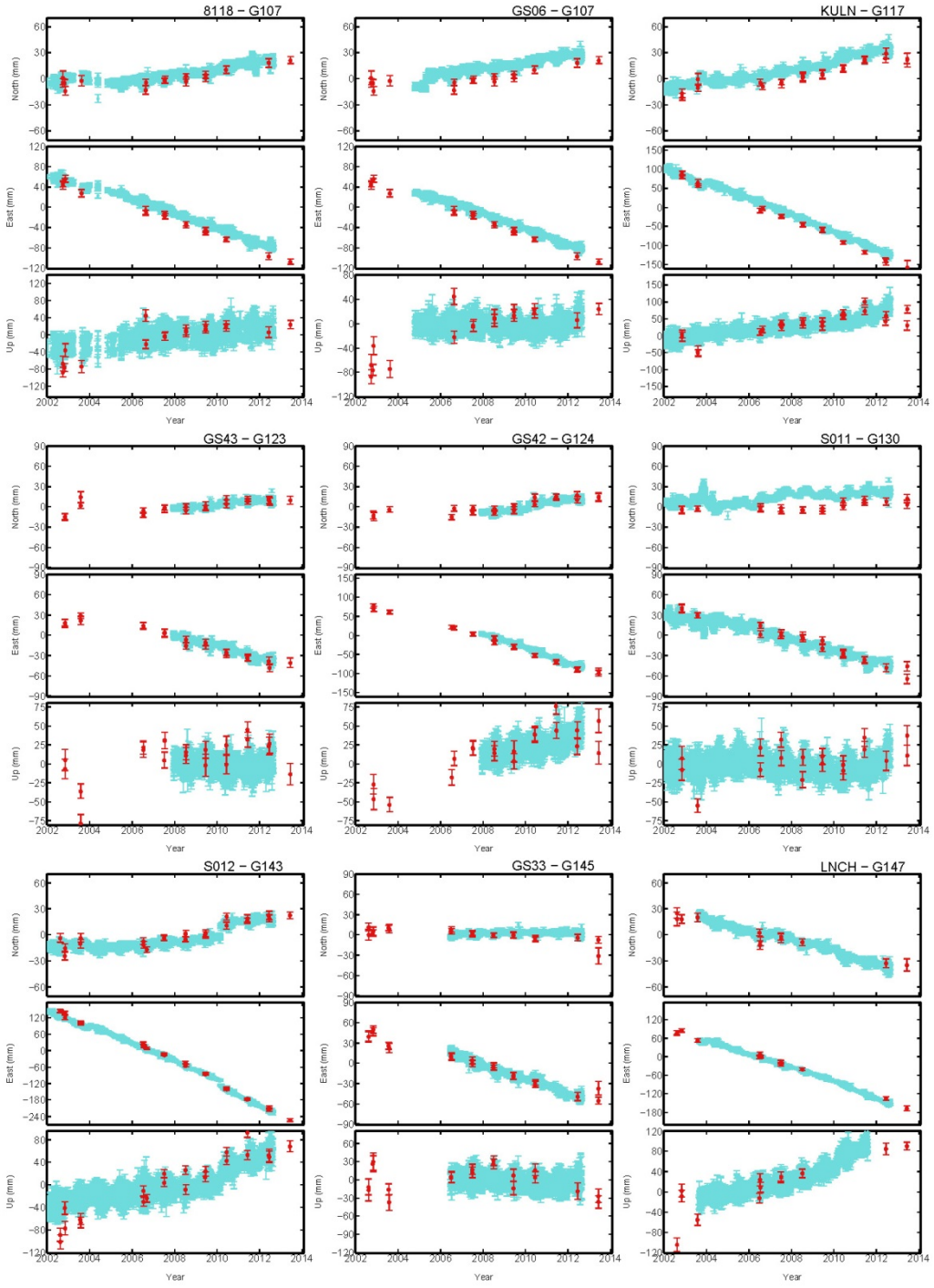


圖 2-1.8：2002 - 2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

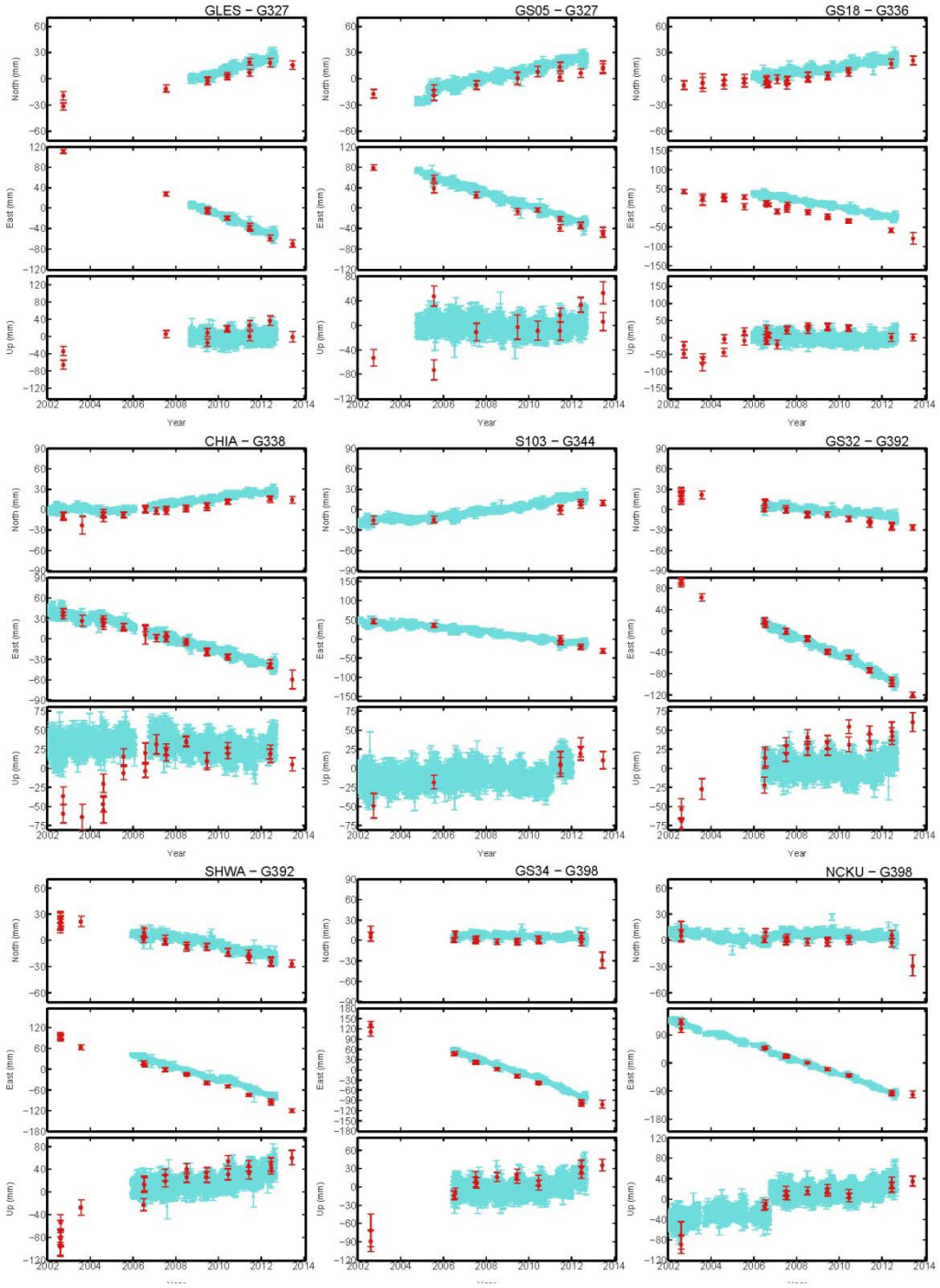


圖 2-1.9：2002 - 2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

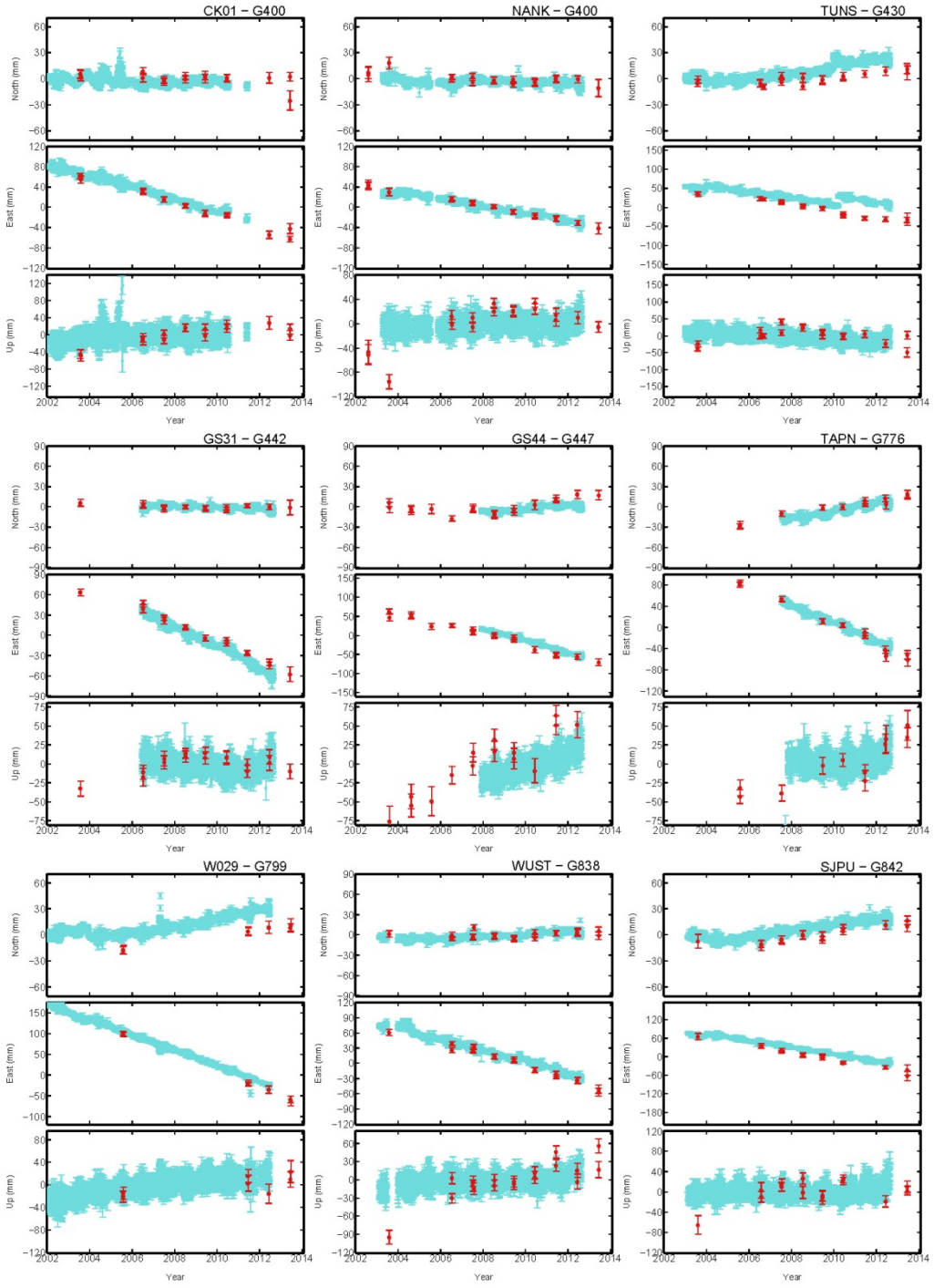


圖 2-1.10：2002 - 2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

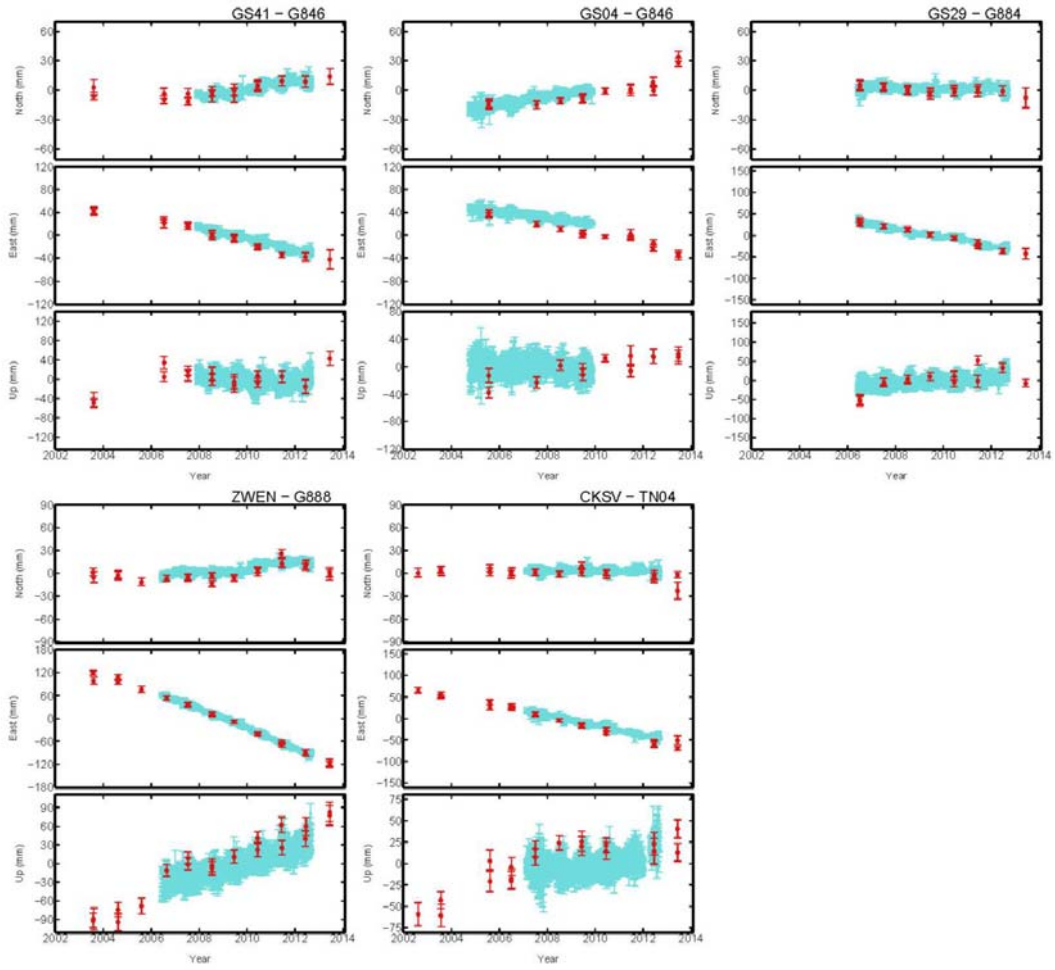


圖 2-1.11：2002 - 2013 年嘉南地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表 HENC 連續站，紅色點位為移動站 G669 之位移-時間序列分布情形。

高屏地區（圖 2-1.12）可比之對座標時間序列組合為 14 組，各組比對結果之移動站與連續站座標時間序列型態皆相符（圖 2-1.13 至圖 2-1.14）。

移動站 S036（虻蟬）及 GC66（南漢幹 136）與該區速度場有顯著差異（圖 2-1.13），經現場勘查 S036 為山頂三角點周圍道路路面有明顯破裂修補情形，顯示此觀測點所處之坡面有顯著朝向西南方崩滑情形（圖 2-1.15）；而由邊坡護牆可知 GC66 亦位處崩塌地，滑動方向朝西北方（圖 2-1.16）。

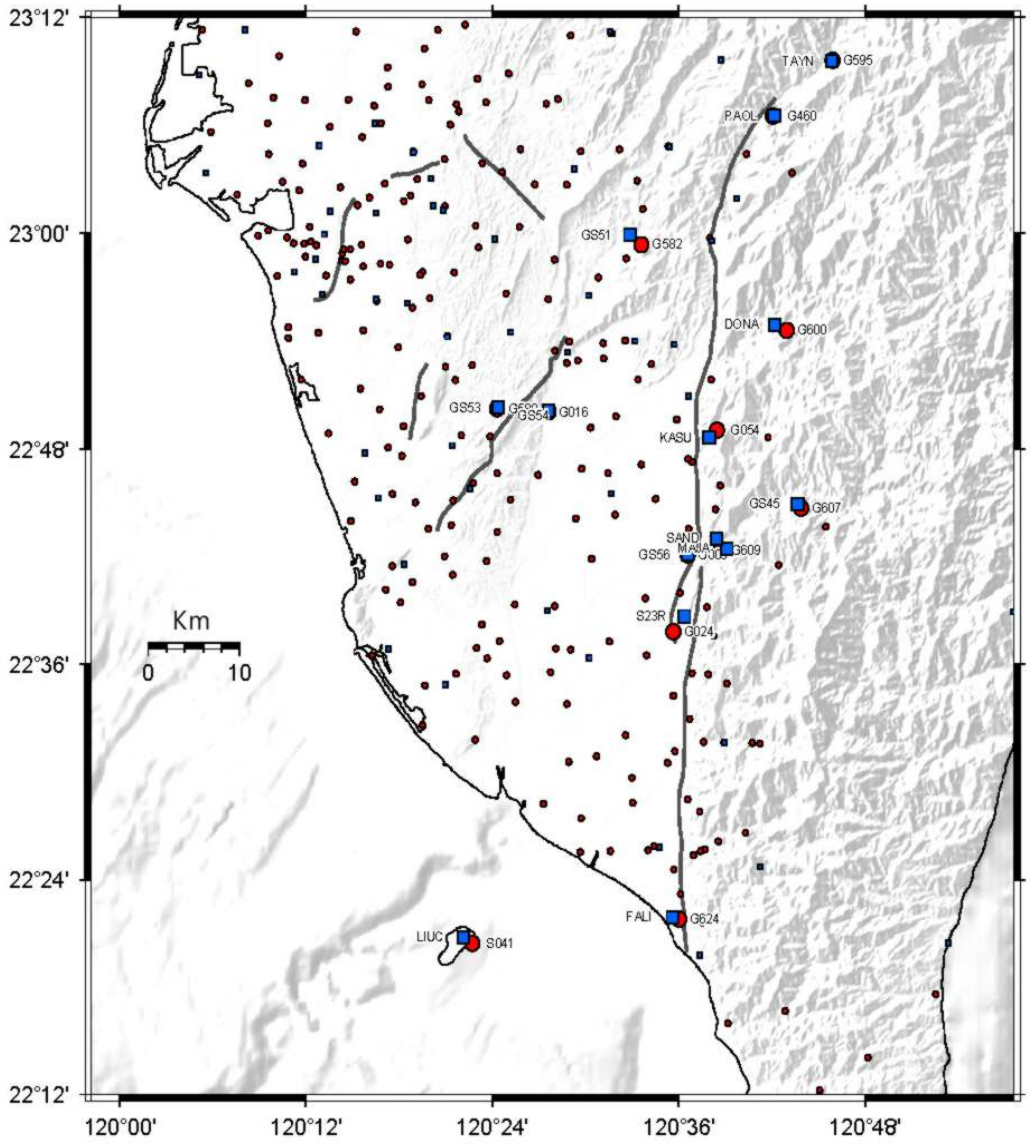


圖 2-1.12：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

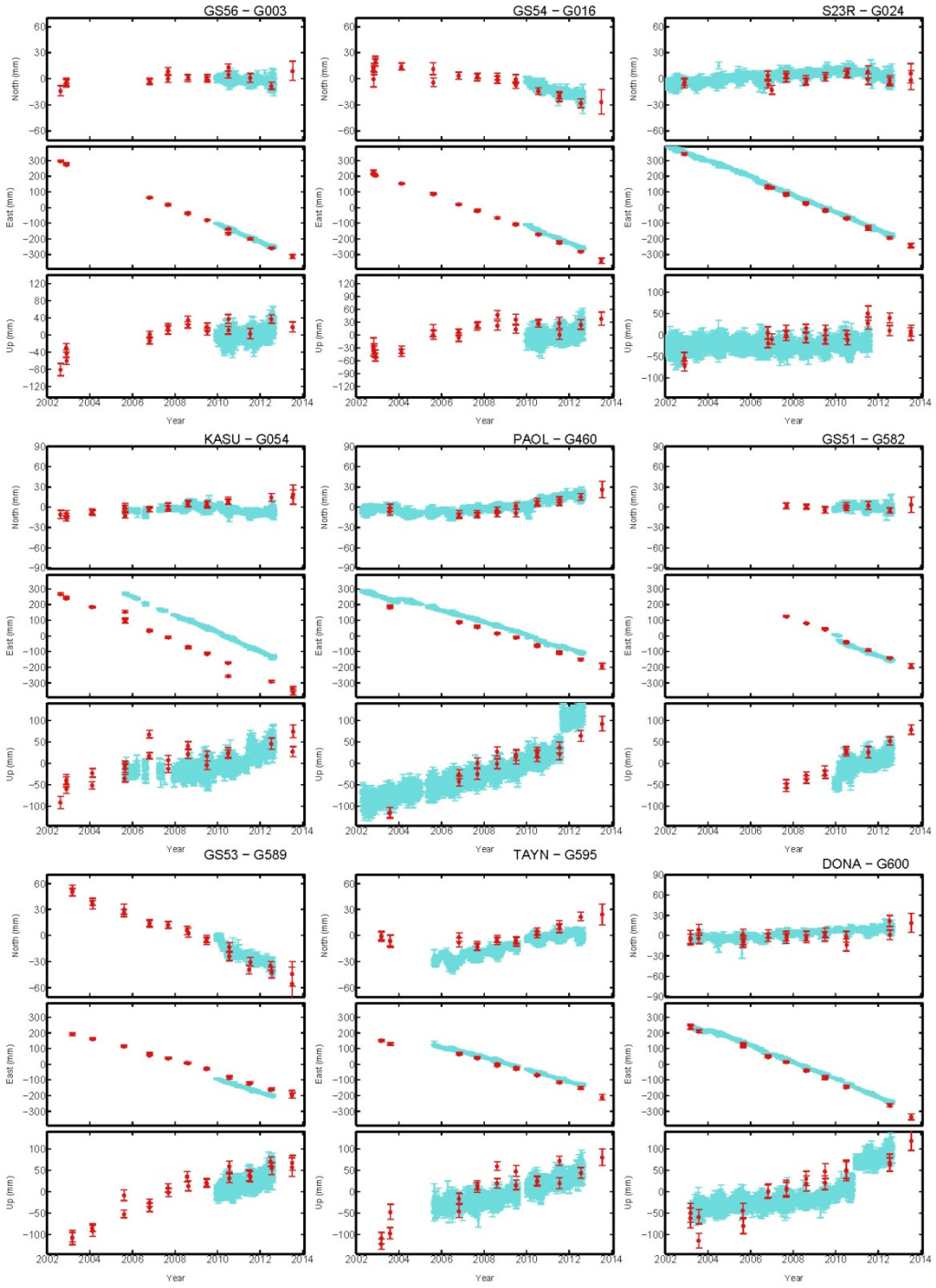


圖 2-1.13：2002 - 2013 年高屏地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

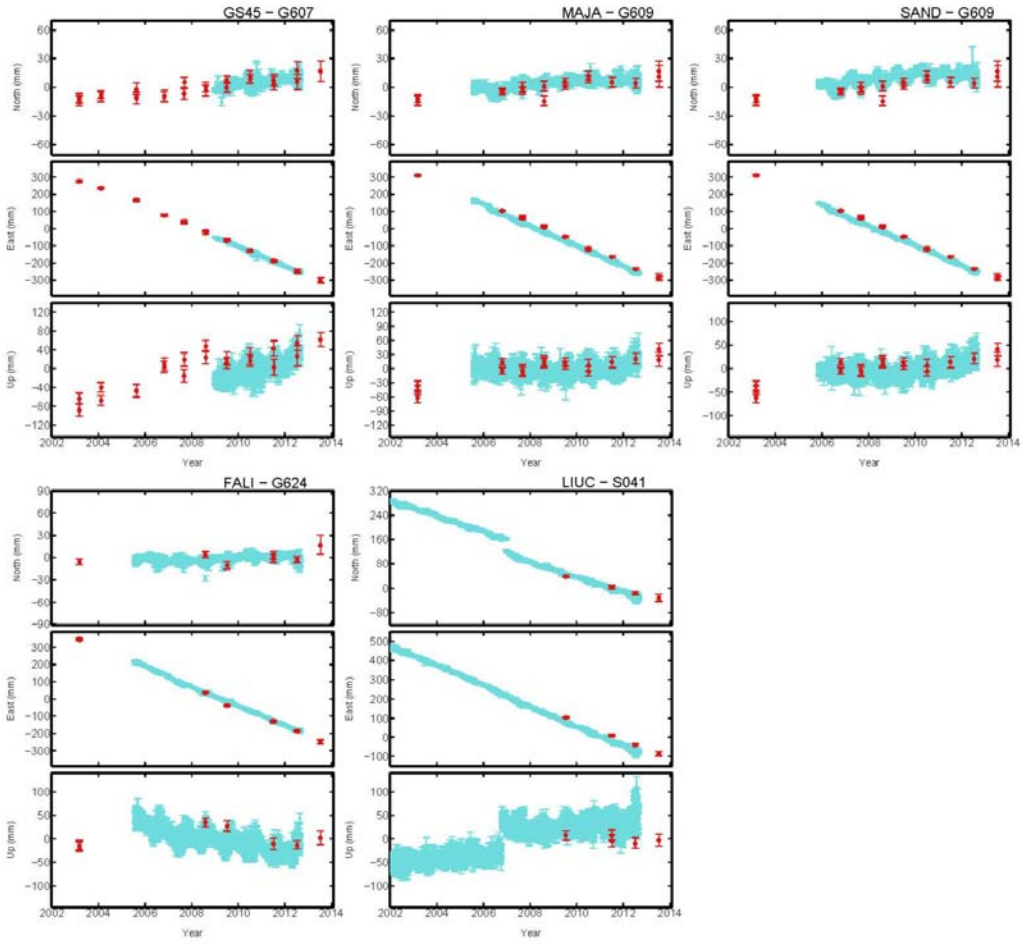


圖 2-1.14：2002 - 2013 年高屏地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。



圖 2-1.15：高屏地區 GPS 移動站 S036 周圍環境全景圖。



圖 2-1.16：高屏地區 GPS 移動站 GC66 周圍環境全景圖。

中部地區（圖 2-1.17）可比之對座標時間序列組合為 18 組，除了 S170-M007 之座標時間序列比對有差異，其餘各組比對結果之移動站與連續站座標時間序列型態皆相符（圖 2-1.18 至圖 2-1.19）。

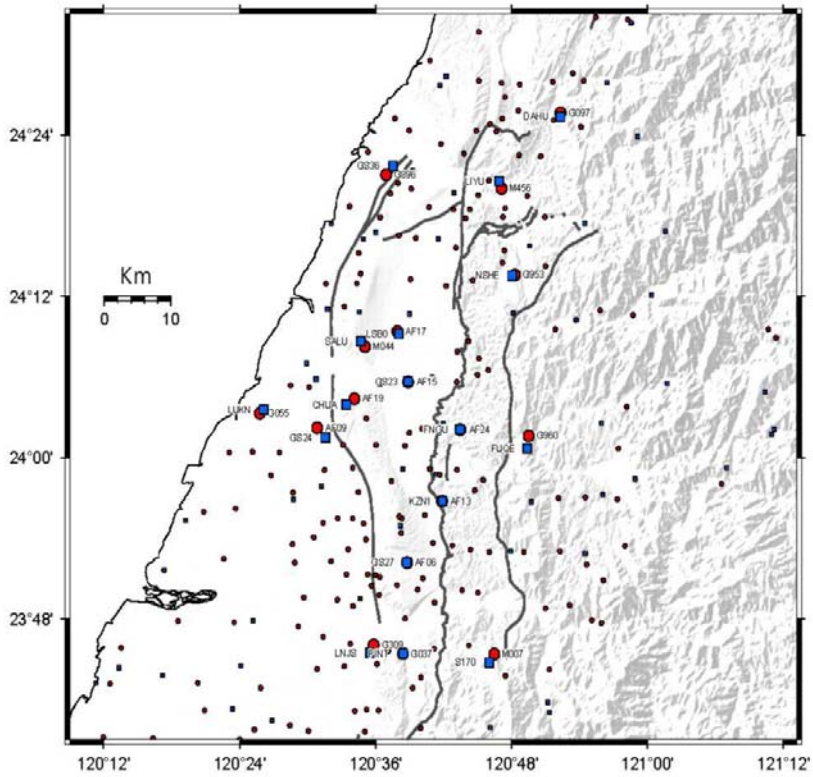


圖 2-1.17：高屏地區 GPS 連續及移動測站分布情形，藍色正方形為連續站，紅色圓形則為移動站。

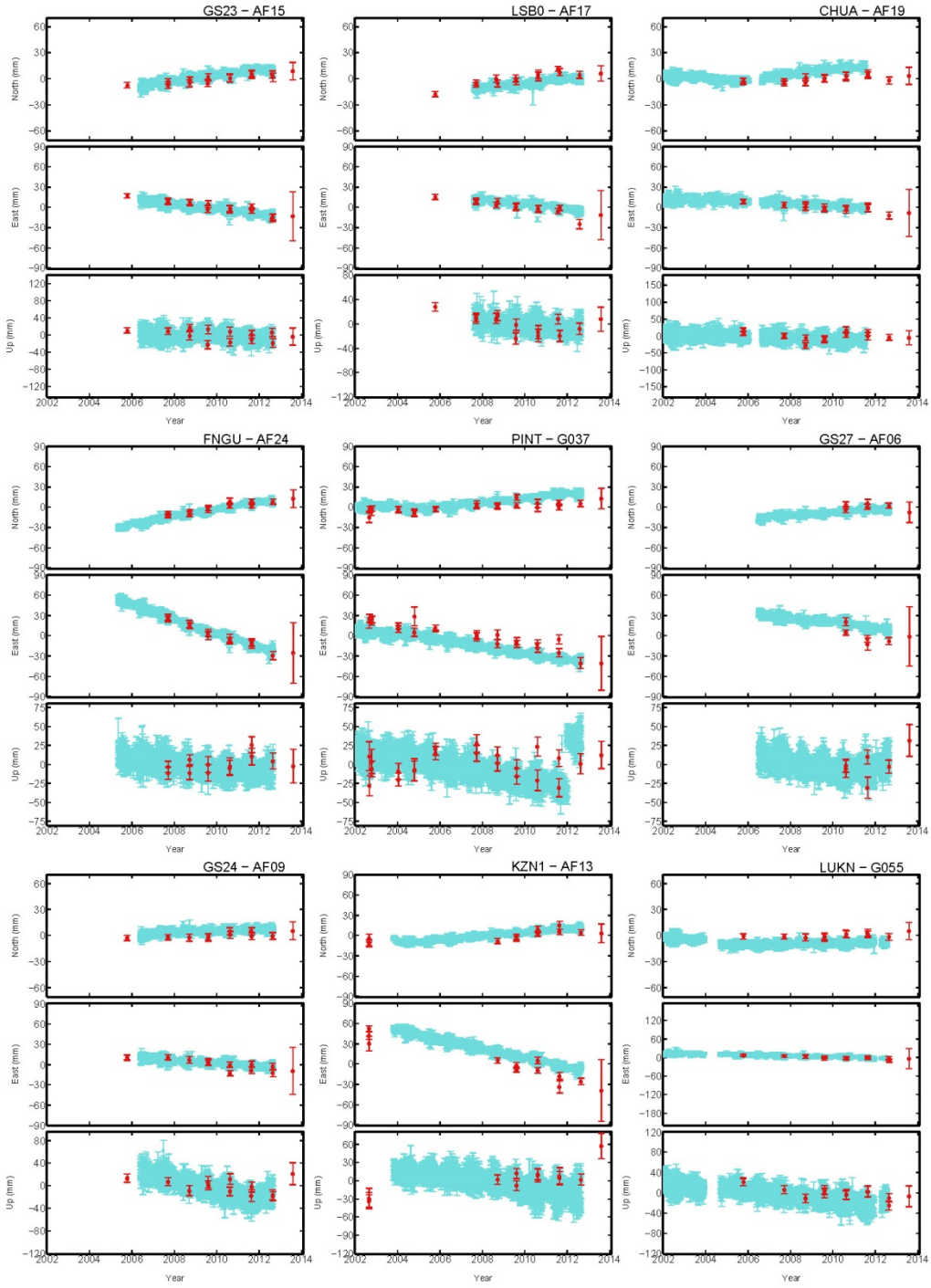


圖 2-1.18：2002 - 2013 年中部地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

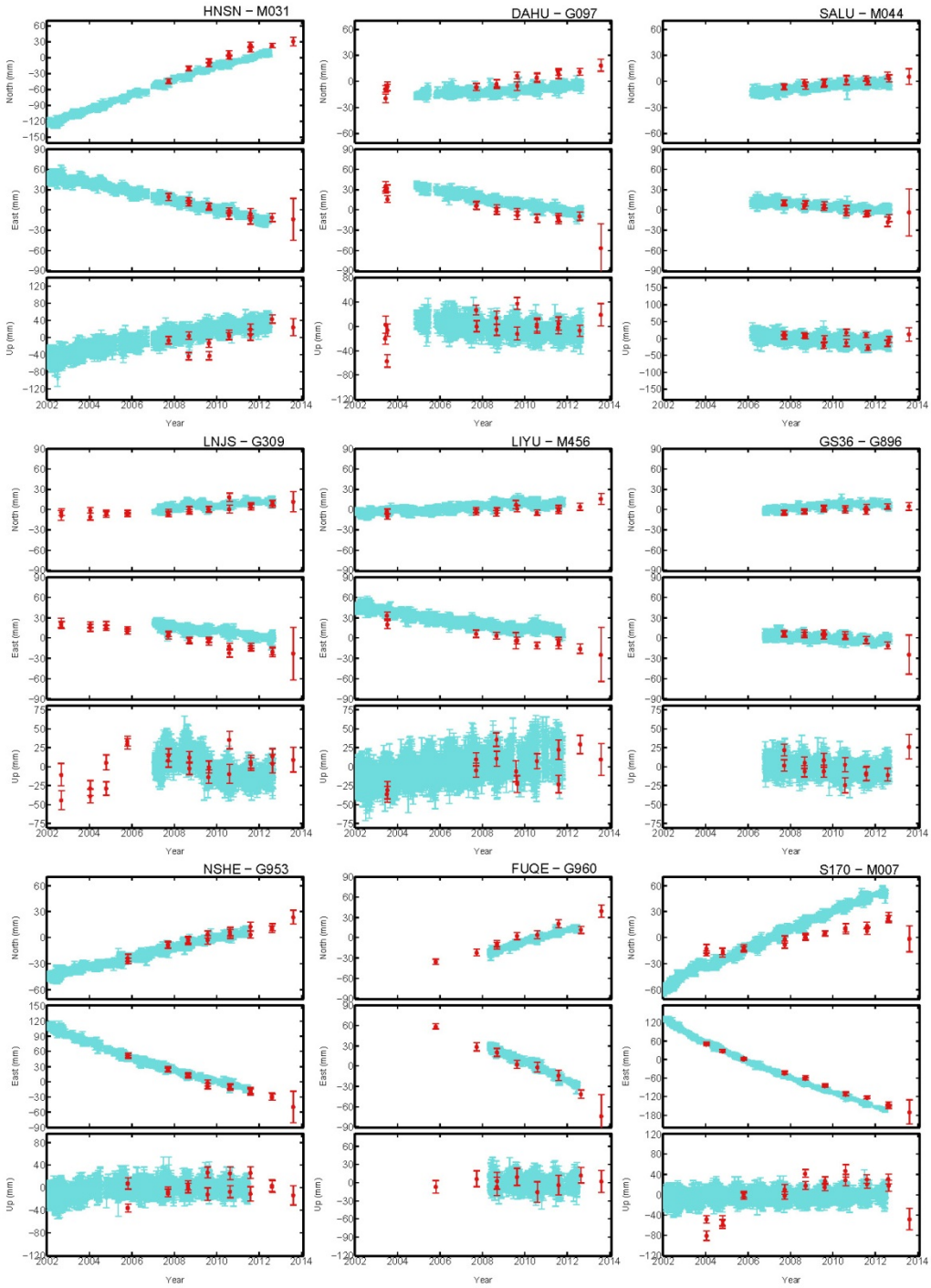


圖 2-1.19：2002 - 2013 年中部地區 GPS 連續及移動測站相對於澎湖白沙站(S01R)之位移-時間序列圖，藍色點位代表連續站，紅色點位為移動站之位移-時間序列分布情形。

2-2 精密水準測量精度分析

截至 2013 年 10 月 31 日前所獲得之精密水準測量資料包含「台 2_石門至萬里測線」、「士林至三芝測線」、「淡水至士林測線」、「五股至臺北測線」、「縣 115_新屋至童話世界測線」、「縣 122_新竹至五峰測線」、「縣 117_新竹至峨眉測線」、「苗栗至南庄測線」、「縣 132_大安至東勢」、「縣 136_龍井至太平測線」、「縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里測段」、、「縣 150-台 16_北斗至水里」、「縣 164_金湖至瑞峰測線」、「縣 174_北門至楠西」、「縣 182_安平至龍崎」、「縣 184_路竹至茂林主、副線」、「台 22_岡山至安坡」、「佳冬至七佳測線」、「恆春西台地至佳樂水」、「台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線」、「嶺頂至瀧澗測線」、「光復至豐濱測線」、「紅葉至靜浦測線」、「東成至富岡測線」、「梗枋至東澳測線」等 28 條測線，以及「五光至黃竹測線」、「曾厝至霧峰測線」、「北勢至峰谷測線」、「烏溪南岸測線」、「中興新村測線」等 5 條跨車籠埔斷層之短測線。

2013 年 10 月底前所獲得共計 1147 個測段，其往返閉合差均合乎內政部九十年度編印之「一等水準測量作業規範」。其中，測段往返閉合差絕對值小於 2.0 mm 以下者，有 1067 個測段（圖 2-2.1a），佔所有測段比例之 93.%。測段往返閉合差精度小於 $1.5\sqrt{k}$ 者，佔所有測段比例為 82.7%（949 個測段）；測段往返閉合差精度小於 $2.0\sqrt{k}$ 者，則佔所有測段比例為 96.9 %（1112 個測段）。考慮與測段距離的關係後(Bomford, 1985)，每公里觀測精度小於 2.0 mm 者有 1070 個測段達測段達 93.2%（圖 2-2.1b）顯示外業觀測品質相當穩定可靠。

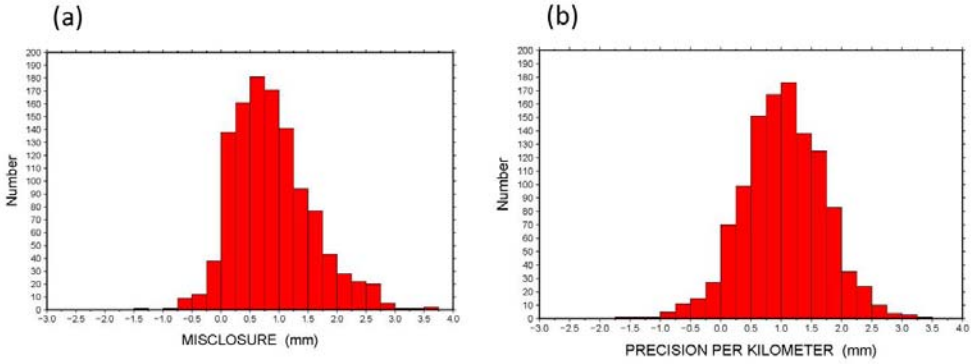


圖 2-2.1：精密水準測量結果分析圖。紅色柱狀為 0.25 mm 數字間隔之數量統計值。(a)為測段往返閉合差之統計結果，最大值在 0.75 mm 上。(b)為考慮與測段距離的關係後之每公里觀測精度，最大值在 1.25 mm 上。

2-2-1 垂直速度場之推求

由於 GPS 與水準垂直速度的參考點與座標框架不同，欲得到完整的臺灣地區垂直速度場，本研究將水準結果修正為相對 S01R（澎湖白沙），以利後續討論臺灣地區的垂直變形。由於 GPS 連續站之速度場是相對 S01R 所求得，因此，合理地假設如果 GPS 站和水準測量點位距離越接近，則兩者的垂直速度將越一致。因此，先尋找距離水準測量點位相對較近且資料品質較穩定的 GPS 連續站，並以該站作為約制條件，來進行下一步驟的計算。

2-2-2 台 2_石門至萬里測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 30 公里，本水準測線於此測線於 2004 至 2013 年間共施測 10 次，分別於 2004-2005 及 2007-2013 年間的 9 月份、2006 年 8 月間進行。本測線以 GPS 連續站 GS09 之垂直速率（0.33 mm/yr），作為控制點 2027 之垂直速率。由垂直速度變化顯示，本測線跨斷層並未有大於±3 mm/yr 的明顯高程差變化量（圖 2-2.2），此結果顯示 2004-2013 年間，山腳斷層在該區域並未有明顯之活動性，然該測線點位在由西 7-10 km 處有下陷~3 mm/yr、17-18 km 處有下陷~2 mm/yr 的變化，與地調所公佈之山腳斷層地表位置相關，可能屬於山腳斷層及其分支斷層的活動現象。

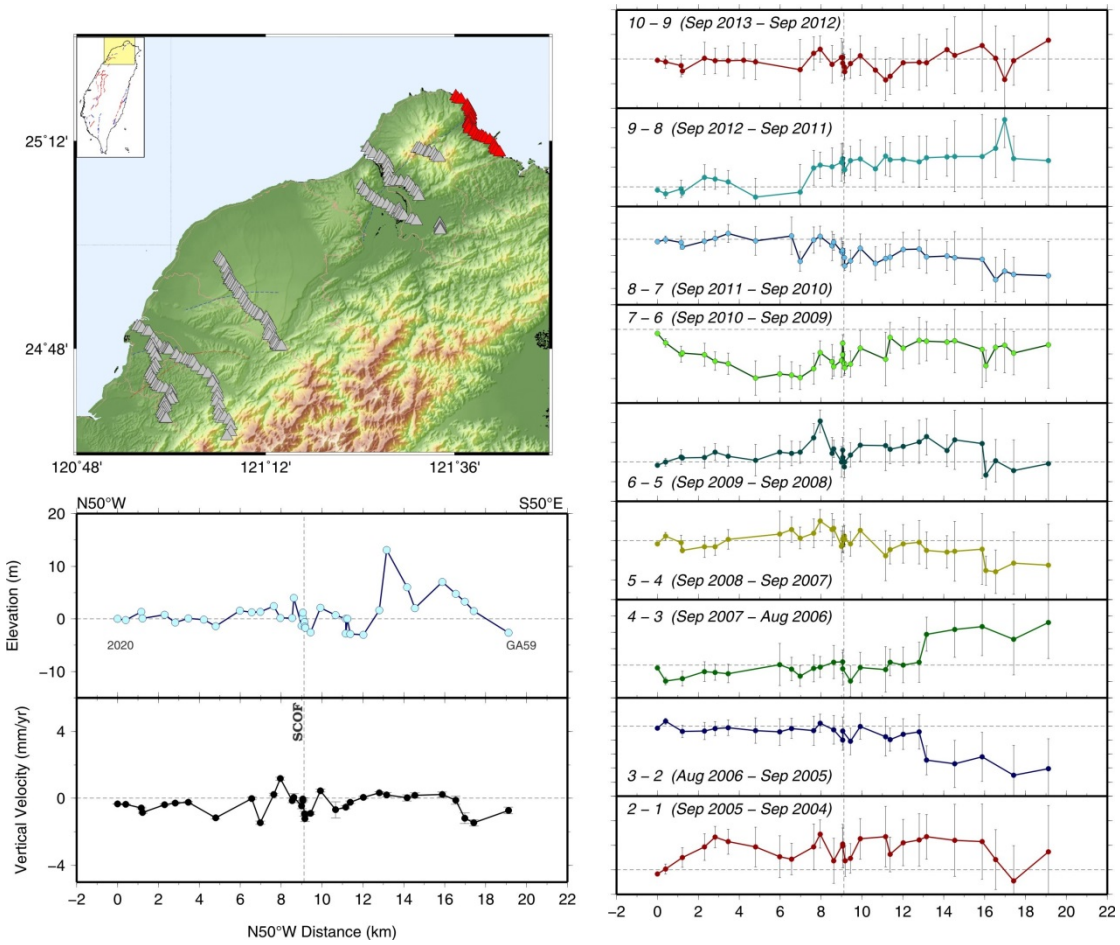


圖 2-2.2：台 2_石門至萬里測線水準高程變化圖。左側上欄為固定西側點位高程為 0 m 之地形變化，左側下欄為水準平均抬升速率。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-2-3 三芝至士林測線

本測線亦跨越山腳斷層，測線長約 9 公里。該測線 2004 至 2013 年間之 10 次測量分別於 2004-2005 及 2007-2013 年的 9 月、2006 年 8 月間進行。本測線以 GPS 連續站 YM01 之垂直速率（0.16 mm/yr），作為控制點 GF66 之垂直速率。此水準路線僅有二個測站位於山腳斷層西側（GB11 及 GB12），由垂直速度之結果顯示，本區域跨斷層之水準垂直速度變化並未有大於 5 mm/yr 的明顯高程差變化量（圖 2-2.3），然而與台 2_石門至萬里測線相較之下，由西約 0.2 km 處垂直速度大於 5 mm/yr，向東至 4 km 處逐漸遞減至約 2 mm/yr，而後又向東繼續抬升至約 10 mm/yr，測線的垂直速度有較大之變化，據此測量結果可以判定大屯山區的地表活動程度可能較為顯著，然其屬於山腳斷層的活動亦或是大屯火山的再活動，需要長時間的監測以及與其他資料的佐證。同時，該測線之點位時間序列斜率亦沒有明顯之變化，此點可供垂直速度變化之佐證。

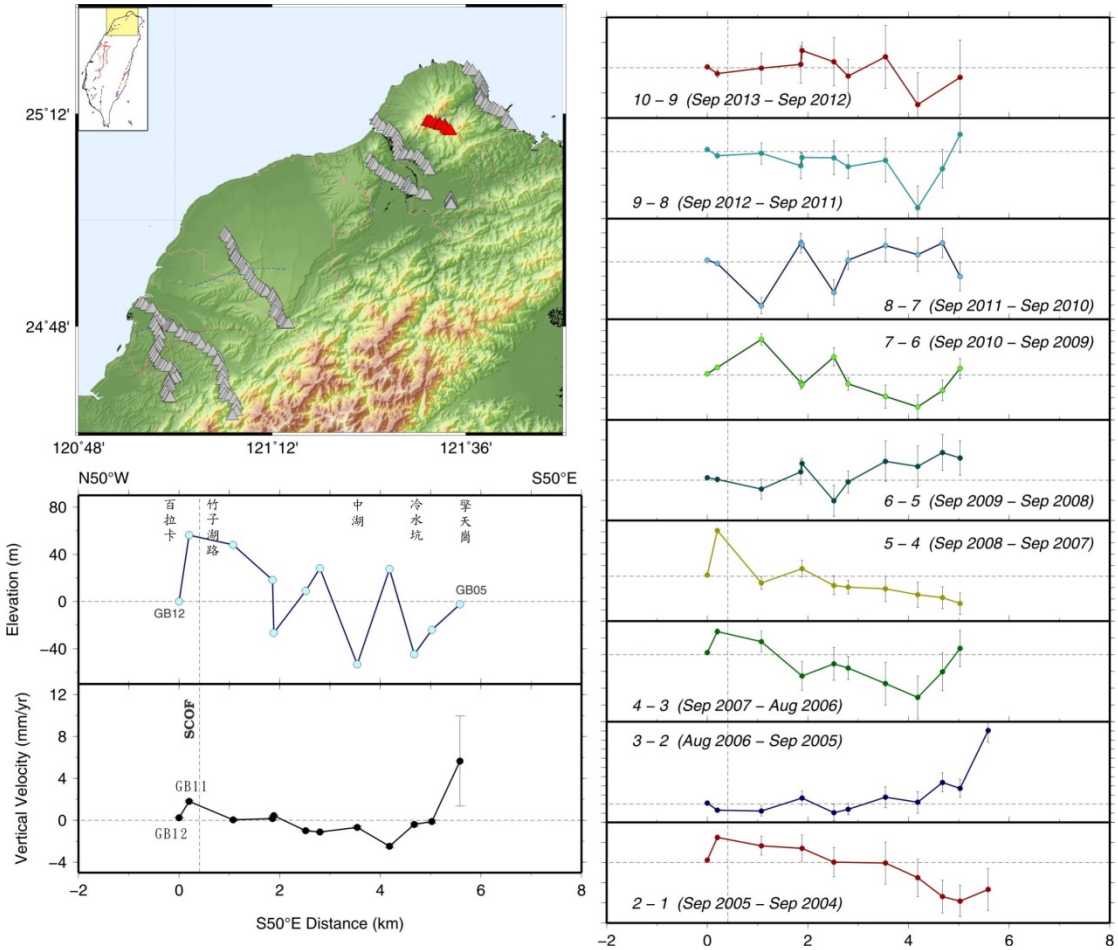


圖 2-2.3：三芝至士林測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-2-4 淡水至士林測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 21 公里，在 2004 年 9 月進行第一次施測之後，又分別於 2005 年 10 月、2006 年 8 月、2007-2013 年的 9 月間進行第 2 至第 10 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS10 之垂直速率（-5.11 mm/yr），作為控制點 GA69 之垂直速率。由圖 2-2.4 中得知，山腳斷層東側 3.5 公里內的垂直速度皆顯示顯著的沉陷（0959 至 B229，臺北市大度路知行路口至大度路中央北路二段 257 巷路口），其最大沉陷量為-25.9 mm/yr；而點位時間序列亦在此區段間呈現下陷的趨勢。觀察 2004-2006 及 2007-2013 之高程變化數值，山腳斷層東側的沉陷由-30 mm 至-10 mm，顯示跨山腳斷層之沉陷有逐年減少的趨勢。由於該區位於基隆河與淡水河的匯流處，屬於河流下游沙洲的一部分，此明顯的變化應與該區域因地表未固結岩體之壓密與固結岩層之排水結合高密度人為活動，以及部分斷層活動而產生的地表沉陷有關。

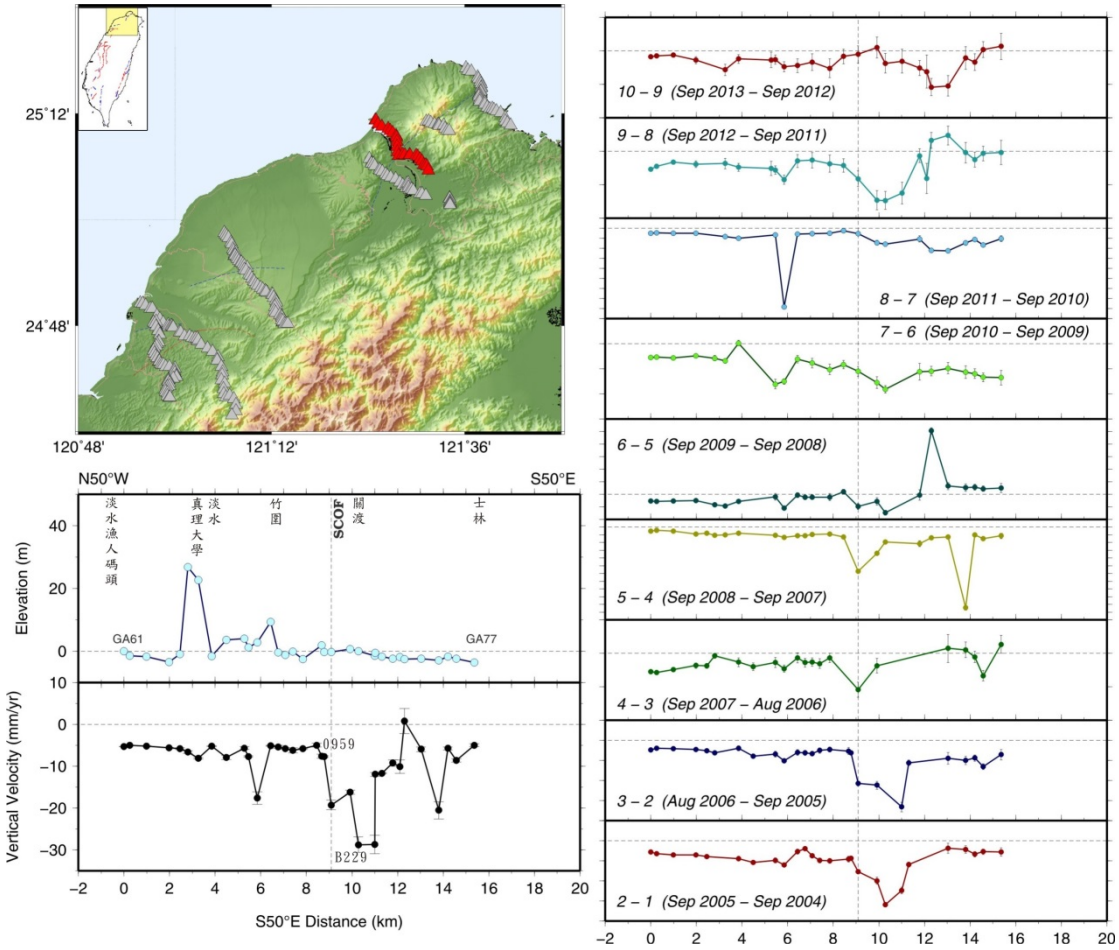


圖 2-2.4：淡水至士林測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-2-5 五股至台北測線

本測線橫跨山腳斷層，測線長約 19 公里。此水準測線於 2004 及 2006 年的 8 月、2005 及 2007-2013 年的 9 月間進行 10 次的施測。本測線以 GPS 連續站 WUKU 之垂直速率(-2.08 mm/yr)，作為控制點 B225 之垂直速率。由水準垂直速度的變化說明，點位五股至五股濕地公園間（1153 至 GA85）有最大垂直速度變化約-11 mm/yr（圖 2-2.5），此結果可說明該地區有局部性的沉陷發生。斷層東側之地表活動可分為沉陷與抬升兩類。依據經濟部水利署於 2007 年 9 月 17 日所發佈之新聞稿，台北局部地區（台北縣三重市、蘆洲鄉、新莊市、台北市中山區）於 2004-2006 年間出現較明顯地層下陷徵兆，最大年平均下陷速率約 26 mm/yr，與本研究之垂直速度相較，說明 2007 年至 2009 年間地表下陷情形雖有略微緩減，但該地區仍為地表沉陷。

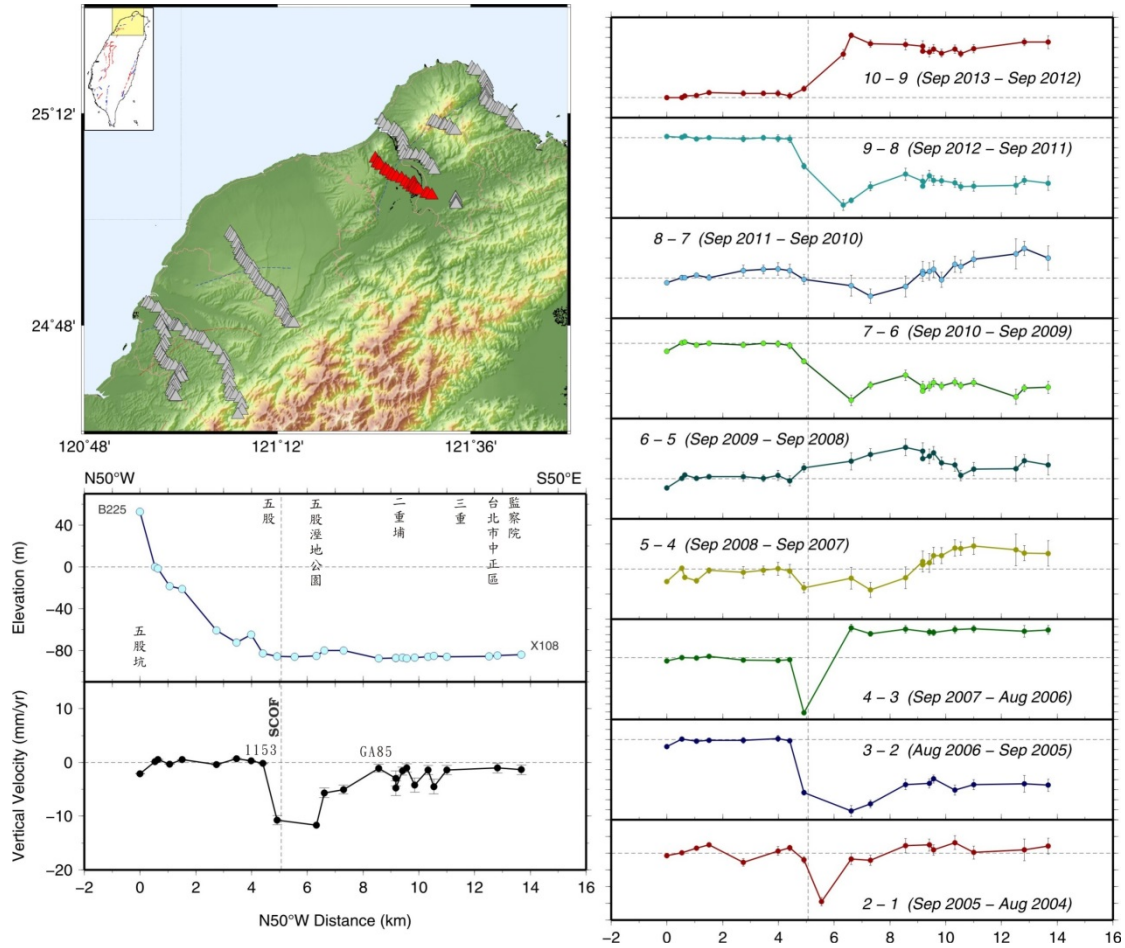


圖 2-2.5：五股至台北測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SCOF 為山腳斷層。

2-2-6 縣 115_新屋至童話世界測線

本測線橫跨湖口斷層與大平地斷層，測線長 34 公里，水準測線於 2004 年 6 月與 2005 - 2013 年的 7 月間進行 10 次的施測作業。本測線以 GPS 連續站 YAME 之垂直速率（0.81 mm/yr），作為控制點 GG03 之垂直速率。整條水準測線之垂直速度均落在-6 – 4 mm/yr 之內（圖 2-2.6）。由垂直速度的變化顯示近 6 年來雙連坡斷層的活動性並不顯著（跨斷層變化< 1 mm/yr）；而大平地斷層則有較大之垂直速度變化（~4 mm/yr）。

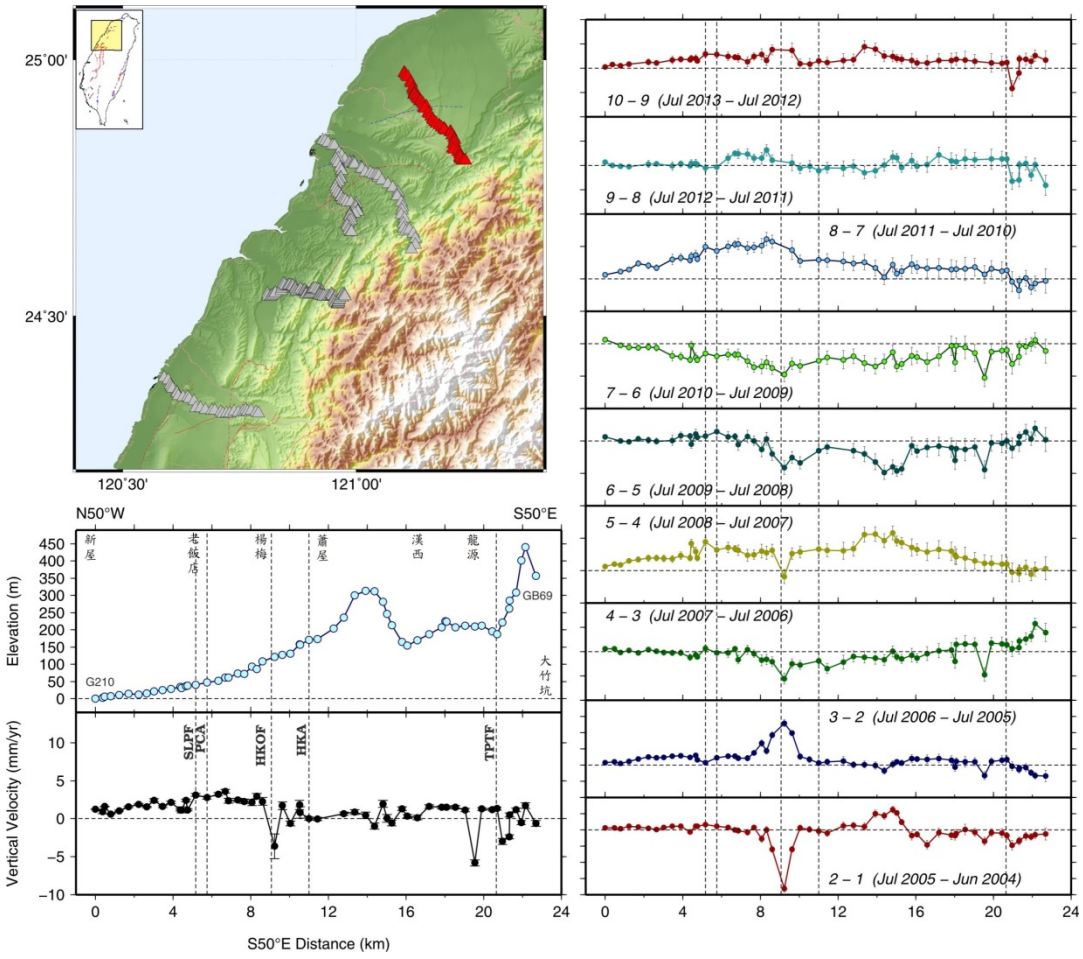


圖 2-2.6：縣 115_新屋至童話世界測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。SLPF 為雙連坡斷層、PCA 為平鎮背斜、HKOF 為湖口斷層、HKA 湖口背斜、TPTF 為大平地斷層。

2-2-7 縣 122_新竹至五峰測線

本測線橫跨新竹斷層、新城斷層及大平地斷層，測線長 46 公里。分別於 2002 年 10 月、2004 年 3 月、2005 年 6 月、2006 年 4 月、2008-2013 年的 6 月間進行共 10 次的施測。本測線以連續 GPS 站 TCMS 之垂直速率（-0.29 mm/yr），作為控制點 HCCA 之垂直速率。由 10 次的結果顯示整條水準測線之垂直方向速度幾乎均落在-6 - 0 mm/yr 之內（圖 2-2.7），最大速度變化為跨越新城斷層的 6 mm/yr。藉由時間序列的趨勢線斜率均大致相同，顯示於 2002-2013 年間，該區域斷層活動並不明顯。

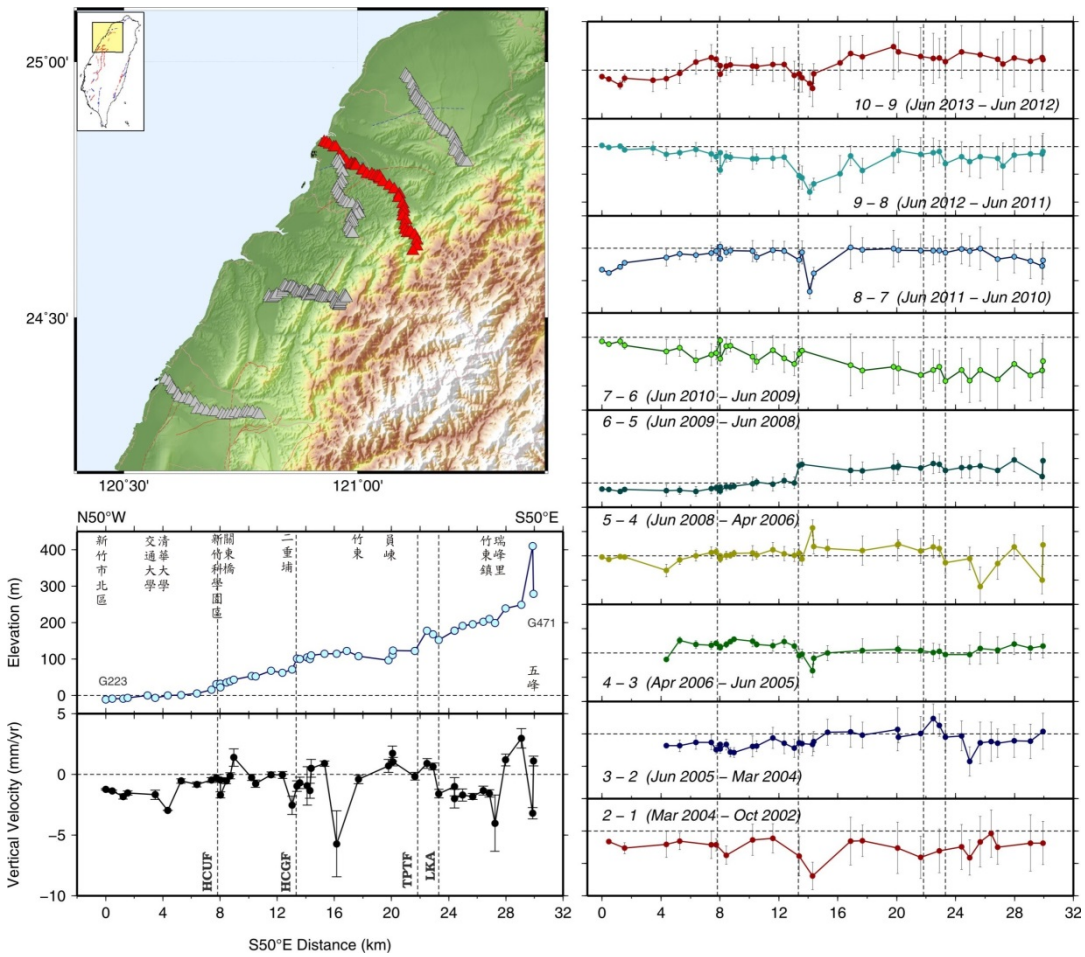


圖 2-2.7：縣 122_新竹至五峰測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、HCGF 為新城斷層、TPTF 為大平地斷層、LKA 為鹿廚坑背斜。

2-2-8 縣 117_新竹至峨眉測線

本測線橫跨新竹斷層、新城斷層及斗煥坪斷層，測線長 31 公里。此測線於 2004-2005 的 6 月、2006 年 7 月及 2008-2013 年的 6 月間進行共 9 次的施測。本測線以 GPS 連續站 GS14 之垂直速率（-1.89 mm/yr），作為控制點 GB75 之垂直速率。整條測線的垂直速度（圖 2-2.8）及時間序列並未有明顯的變化，由垂直速度指出新竹斷層、新城斷層及斗煥坪斷層並無產生顯著垂直變形之趨勢。另 2005-2006 年間之高程變化與其他時段（2004-2005、2006-2010）不同，疑與 2006 年 7 月凱米颱風（KAEMI）之降雨有關（警報期間：7/23-7/26；水準測量期間：7/10-8/01）。

此外，水準點位 GB90 自 2006 年起呈現下陷趨勢。經過現場勘驗，發現點位設置於水溝旁之泥土地，可排除是地質活動所造成，建議停止測量或重新埋設此點位。（圖 2-2.9）

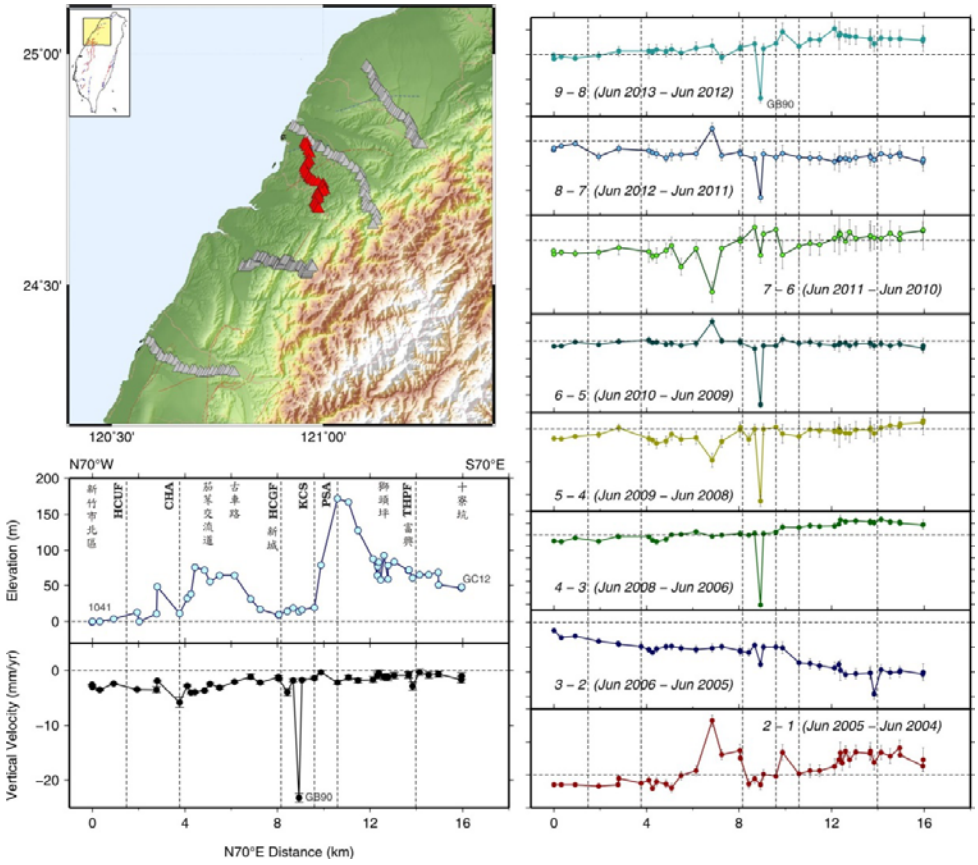


圖 2-2.8：縣 177_新竹至峨眉測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCUF 為新竹斷層、CHA 為青草湖背斜、HCGF 為新城斷層、KCS 為柑子崎向斜、PSA 為寶山背斜、THPF 為斗煥坪斷層。



圖 2-2.9：水準點位 GB90 現地情形。

2-2-9 苗栗至南庄測線

本測線橫跨獅潭斷層，測線長 43 公里，此測線於 2005 年及 2007-2013 年的 8 月、2006 年的 9 月間共進行 9 次的施測。本測線以 GPS 連續站 PENL 之垂直速率（-6.98 mm/yr），作為控制點 GD97 之垂直速率。整條測線的水準垂直速度在-10 至-4 mm/yr 之間(圖 2-2.10)，除 2009-2010 年間之高程變化接近地形變化外，2005-2009 年間之高程變化呈現年週期性的地表沉陷與抬升之變化。此結果可能暗示此地區之斷層滑移量主要是集中在滑脫面上。

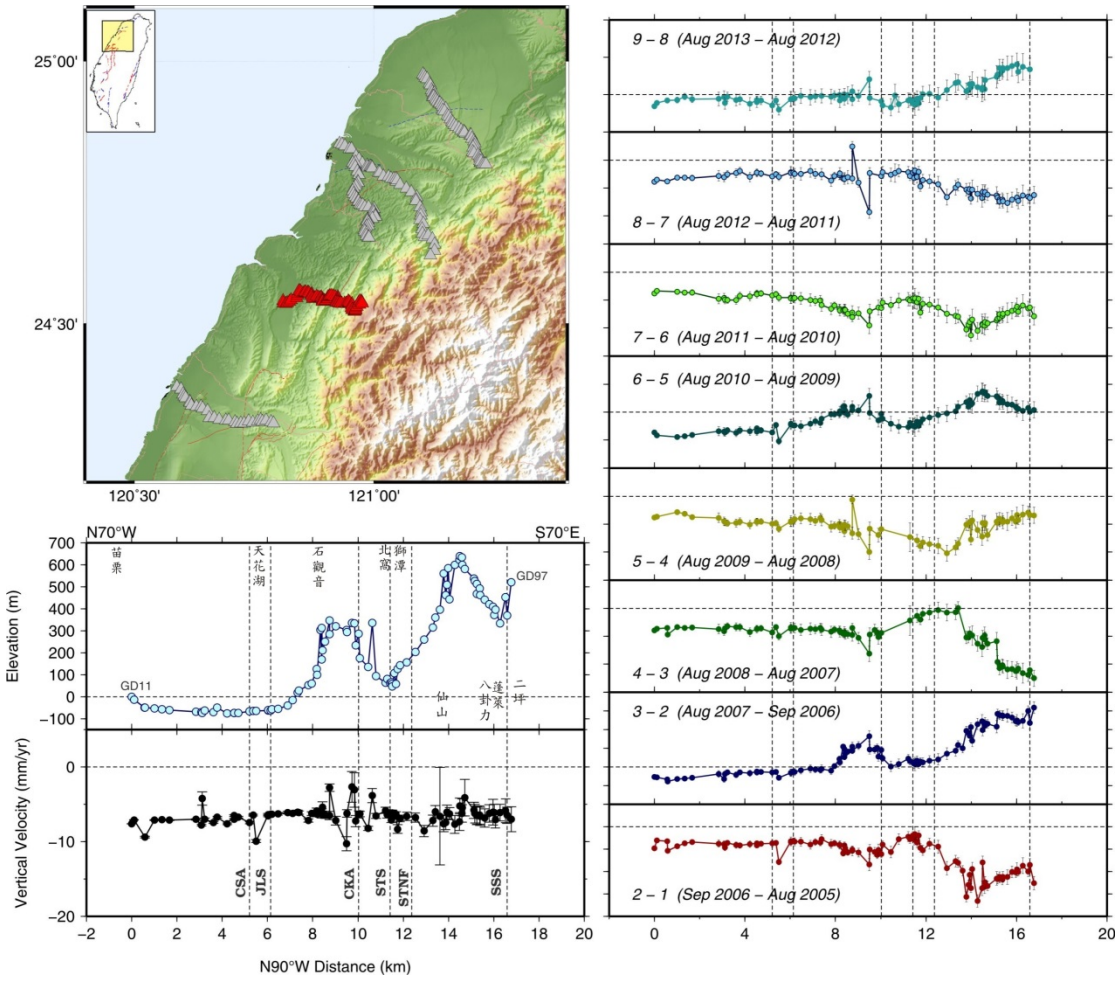


圖 2-2.10：苗栗至南庄測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CSA 為錦水背斜、JLS 為仁隆向斜、CKA 為出磺坑背斜、STS 為獅潭向斜、STNF 為獅潭斷層、SSS 為神社向斜。

2-2-10 縣 132_大安至東勢測線

本測線橫跨大甲斷層、鐵砧山斷層、屯子腳斷層與三義斷層，測線長約 31 公里。本測線以 GPS 連續站 GS36 之垂直速率（-1.9 mm/yr），作為控制點 G896 之垂直速率。就水準垂直速度之變化而言，各處之垂直速度多在-4 - 0 mm/yr 之間，且自外埔（G905）至后里（G912）間的垂直速度呈現下滑的趨勢，通過三義斷層後又上揚至測線末端顯示屯子腳斷層北側有略微下陷的現象，而三義斷層的上盤正持續抬升。另海墘（G091）至大甲東（G901）之間的高程變化於 2004 至 2012 年呈現規律之起伏，說明該段區域有以年為週期的變化。（圖 2-2.11）

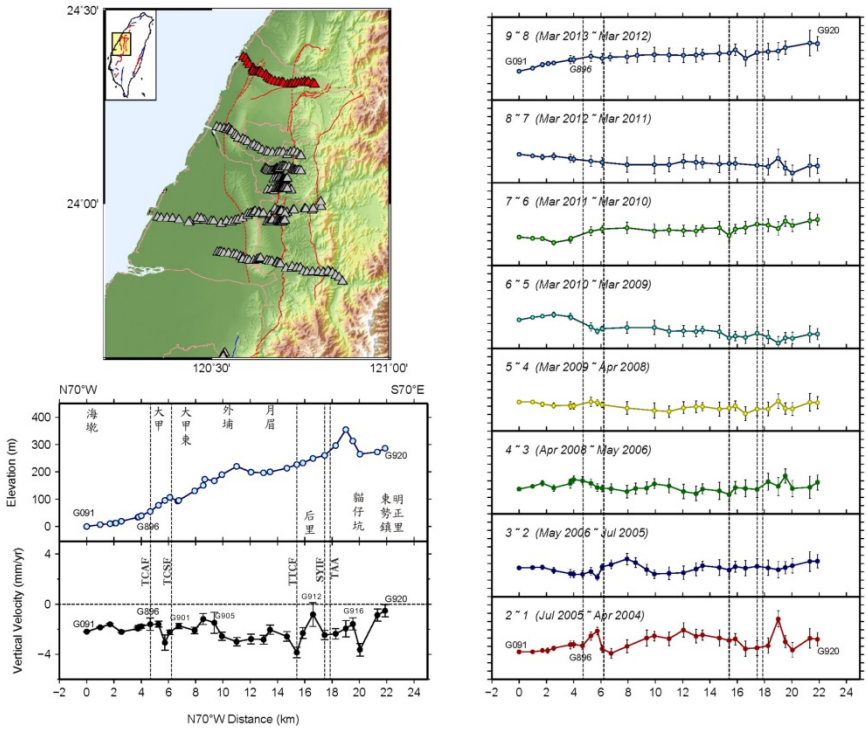


圖 2-2.11：縣 132_大安至東勢測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為高程變化曲線，每個刻度代表 4 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。TCAF 為大甲斷層、TCSF 為鐵砧山斷層、TTCF 為屯子腳斷層、SYIF 三義斷層、TAA 為大安背斜。

2-2-11 縣 136_龍井至太平測線

本測線橫跨彰化斷層，測線長約 35 公里，於 2004 年 6 月、2005 年 7 月、2006 年 11 月及 2007-2013 年的 7 月間，共進行共 10 次的施測。本測線以 GPS 連續站 LSB0 之垂直速率（-2.57 mm/yr），作為控制點 G937 之垂直速率。根據圖 2-2.12 整條水準測線之垂直速度除 25 km 附近有顯著抬升外，其餘大多在-5-0 mm/yr 之內。橫跨清水斷層區域（G924 至 G930）的水準抬升速率有~3 mm/yr 的變化；而在跨越車籠埔斷層區域（GE87 至 AF25）的水準抬升速率亦有 4.1 mm/yr 的最大變化量，兩者均可說明此兩斷層有持續性的活動現象。

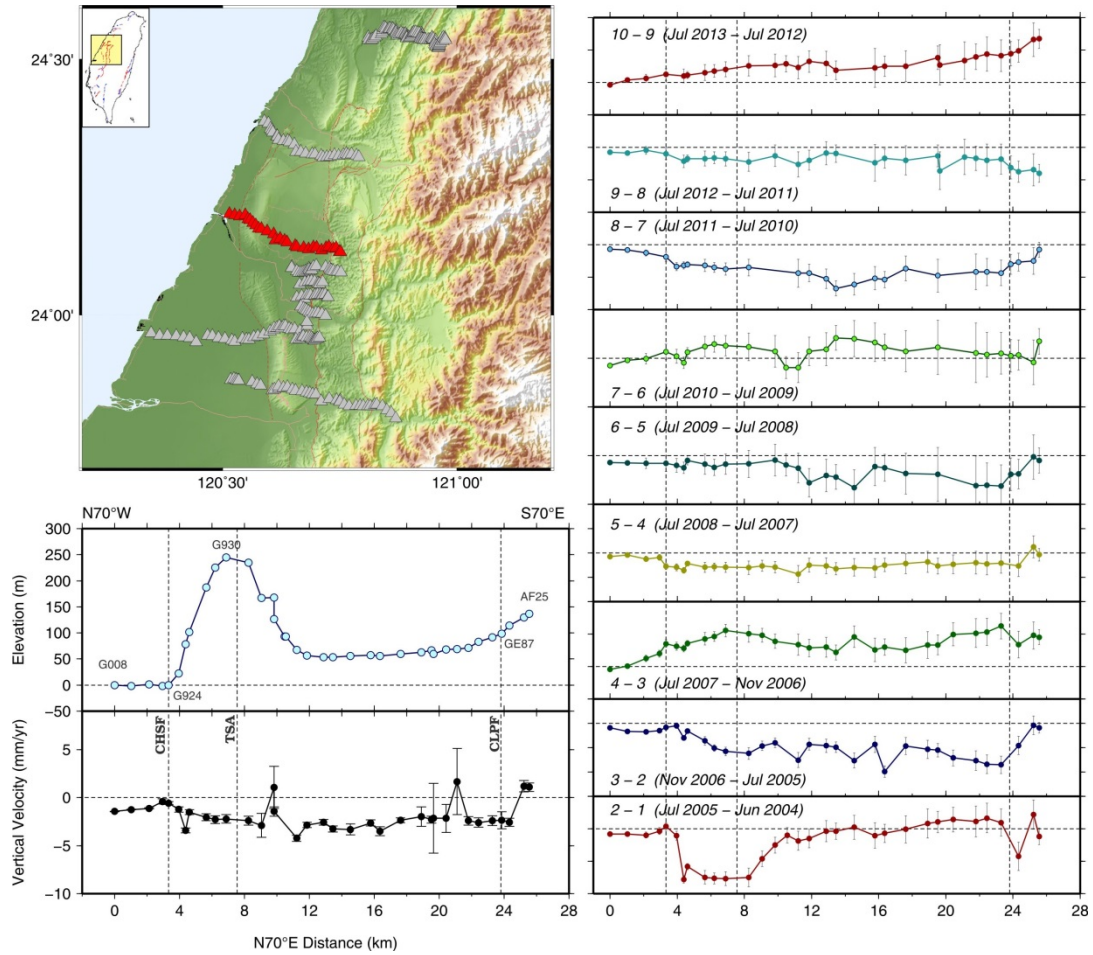


圖 2-2.12：縣 136_龍井至太平測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHSF 為清水斷層、TSA 為大肚山背斜、CLPF 為車籠埔斷層。

2-2-12 縣 148-台 14_王公至草屯測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，長約 63 公里。本測線以 GPS 連續站 CAOT 之垂直速率（-4.6 mm/yr），作為控制點 T075 之垂直速率。員林（X112）以西一帶可見明顯之地層下陷現象，其沉陷速度最大可達-80 mm/yr（圖 2-2.13）。自彰化斷層以東區域之垂直速度均在-10 - 0 mm/yr 之間，然通過車籠埔斷層區域（X115 至 T057，草屯至富功國小）有 0 至-10 mm/yr 之垂直速度變化，相對於大茅埔－雙冬斷層地區（C014 至 C015，雙冬國小至粗坑橋）之變化在-8 至-10 mm/yr 之間，橫跨車籠埔斷層之改變較為顯著。此結果顯示大茅埔-雙冬斷層在此地區的活動性較不明顯。整體而言，本測線除西半部地層下陷區域之外，點位 X112 以東之地表垂直變化相對而言較不顯著。

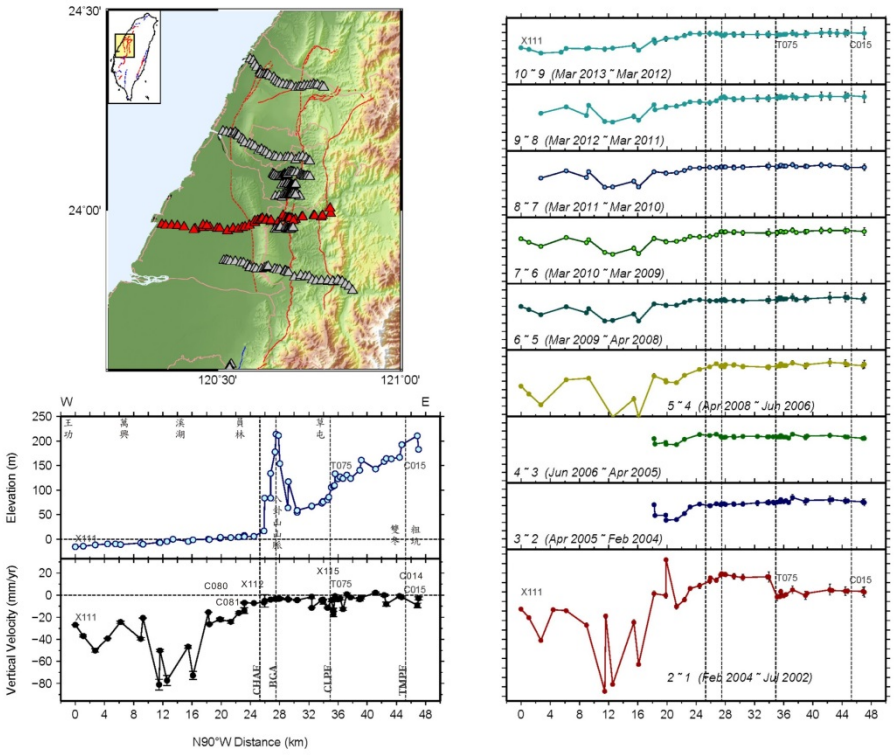


圖 2-2.13：縣 148-台 14_王功至草屯測線水準高程變化圖。圖例說明如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 20 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 為八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層。

2-2-13 縣 150-台 16_北斗至水里測線

本測線橫跨彰化斷層、車籠埔斷層及大茅埔-雙冬斷層，測線長 45 公里。本測線以 GPS 連續站 GS26 之垂直速率（-3.1 mm/yr），作為控制點 G296 之垂直速率。本測線彰化斷層以西(點位 1107，北斗)之垂直速度不似縣 148 台 14 測線可見明顯的地層下陷現象(圖 2-2.14)。而自彰化斷層以東地表有顯著的抬升趨勢，通過車籠埔斷層後至大茅埔－雙冬斷層以西的 12 km 區段，該地表抬升的狀況更為明顯（由-6 mm/yr 至 12 mm/yr），然而於通過大茅埔－雙冬斷層地區（G279 至 X118，水里隧道至頂崁）轉為下陷之趨勢（由 12 mm/yr 至 6 mm/yr），此結果可能顯示斷層滑移量於集集地震過後約 10 年仍然集中於車籠埔斷層以東之滑脫面。比較於本測線北方之縣 148 台 14 測線，不論是西側的地層下陷情形，與通過車籠埔斷層以東地區的地表抬升趨勢，兩者有明顯的差異存在，此結果說明車籠埔斷層在中興新村南北兩段的運動模式有所不同。

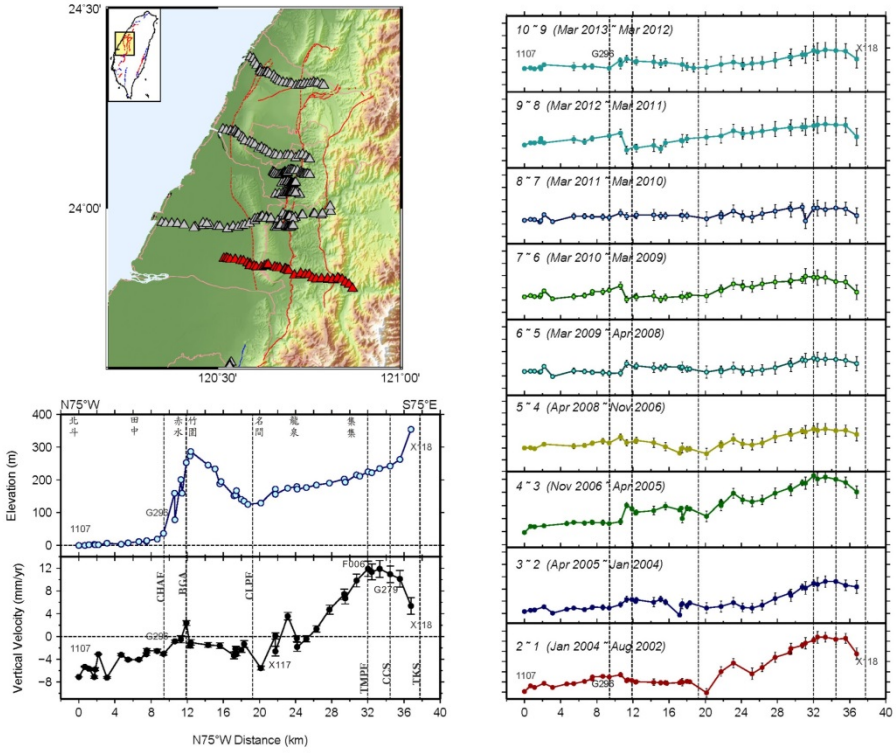


圖 2-2.14：縣 150 台 16_北斗至水里測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CHAF 為彰化斷層、BGA 八卦山背斜、CLPF 為車籠埔斷層、TMPF 為大茅埔－雙冬斷層、CCS 集集大山向斜、TKS 為頂崁向斜。

2-2-14 縣 164_金湖至瑞峰測線

橫跨梅山斷層、九芎坑斷層及大尖山斷層長 61 km 之縣 164_金湖至瑞峰水準測線有 11 次水準測量結果，分別於 2003 年 8 月、2004 年 7 月、2005-2013 年的 9 月間完成。本測線以 GPS 連續站 GS17 之垂直速率（2.01 mm/yr），作為控制點 G776 之垂直速率。在重複測量之結果中，G256 以東之垂直速度變化並不明顯（圖 2-2.15），2003-2004、2007-2012 年間之高程變化在土厝以東有相似之變化。0-4 km 間有明顯之垂直速度變化，且內政部 2002-2007 年之台 17 線該測段水準測量資料亦符合此結果，參考中油公司地質圖幅顯示，金湖至口湖地區有 B 構造貫穿其間。通過大尖山斷層至 G799，垂直速度則略微增加（最大 12.6 mm/yr），顯示大尖山斷層或九芎坑斷層處於活動狀態。此外，水準點位 G757 逐年下陷，確切原因須待現場勘驗。

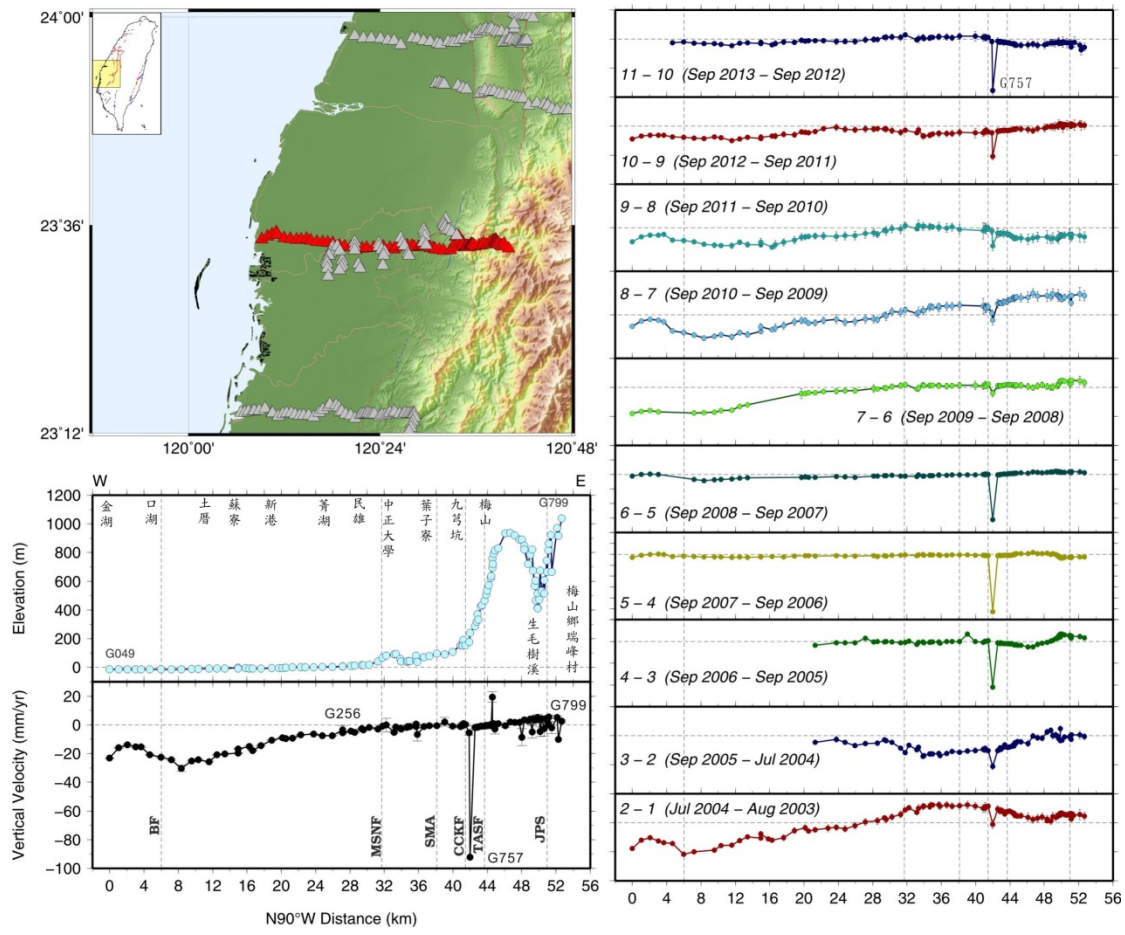


圖 2-2.15：縣 164_金湖至瑞峰測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 50 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。BF 為 B 斷層、MSNF 梅山斷層、SMA 為小梅背斜、CCKF 為觸口斷層、TASF 大尖山斷層、JPS 為九芎坪斷層。

2-2-15 縣 174_北門至楠西測線

本測線橫跨六甲斷層及觸口斷層，測線長約 66 公里。本測線以 GPS 連續站 HOKN 之垂直速率（6.6 mm/yr），作為控制點 X204 之垂直速率。因與內政部一等二級水準路線重複，故有 31 個點位（46%）和內政部一等二級水準點位重複。在通過六甲斷層之地區（I086）至觸口斷層以西之間的 5 公里內有達 10 mm/yr 以上的垂直抬升速度（圖 2-2.16），此結果若非反應六甲斷層在此 8 年內均保持著活動性，即表示六甲斷層與觸口斷層間存在的北勢坑斷層（張憲卿，2008）為一活動構造。本測線自 G816（水庫管理局）起，點位的高程時間變化趨勢線變得較陡，顯示自進入山區地段（即六甲斷層以東），地表高程活動性增加。

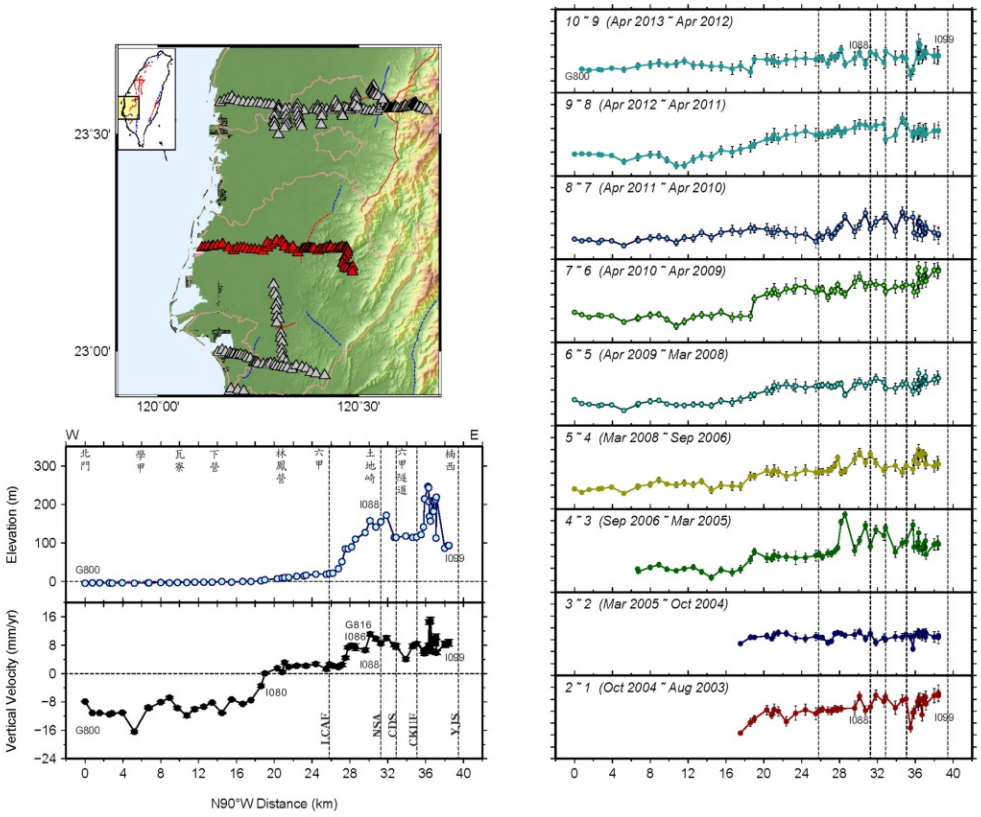


圖 2-2.16：縣 174_北門至楠西測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LCAF 為六甲斷層、NSA 為牛山背斜、CDS 為前大埔向斜、CKUF 為觸口斷層、YJS 為玉井向斜。

2-2-16 台 19 甲_善化至關廟測線

橫跨新化斷層的台 19 甲_善化至關廟水準測線，測線長度約為 29 公里。此測線共有 9 次水準測量，分別於 2002 年 11 月、2005 年 11 月、2006 年 11 月、2007-2013 年的 10 月進行。本測線以 GPS 連續站 GS29 之垂直速率（3.95 mm/yr），作為控制點 1157 之垂直速率。在跨新化斷層（G372 至 G370，新市鄉遠東技術學院至新化）有較顯著的水準抬升速率及 GPS 垂直速度場變化（各約 10 mm/yr），表示新化斷層帶有傾向滑移之趨勢（圖 2-2.17）。

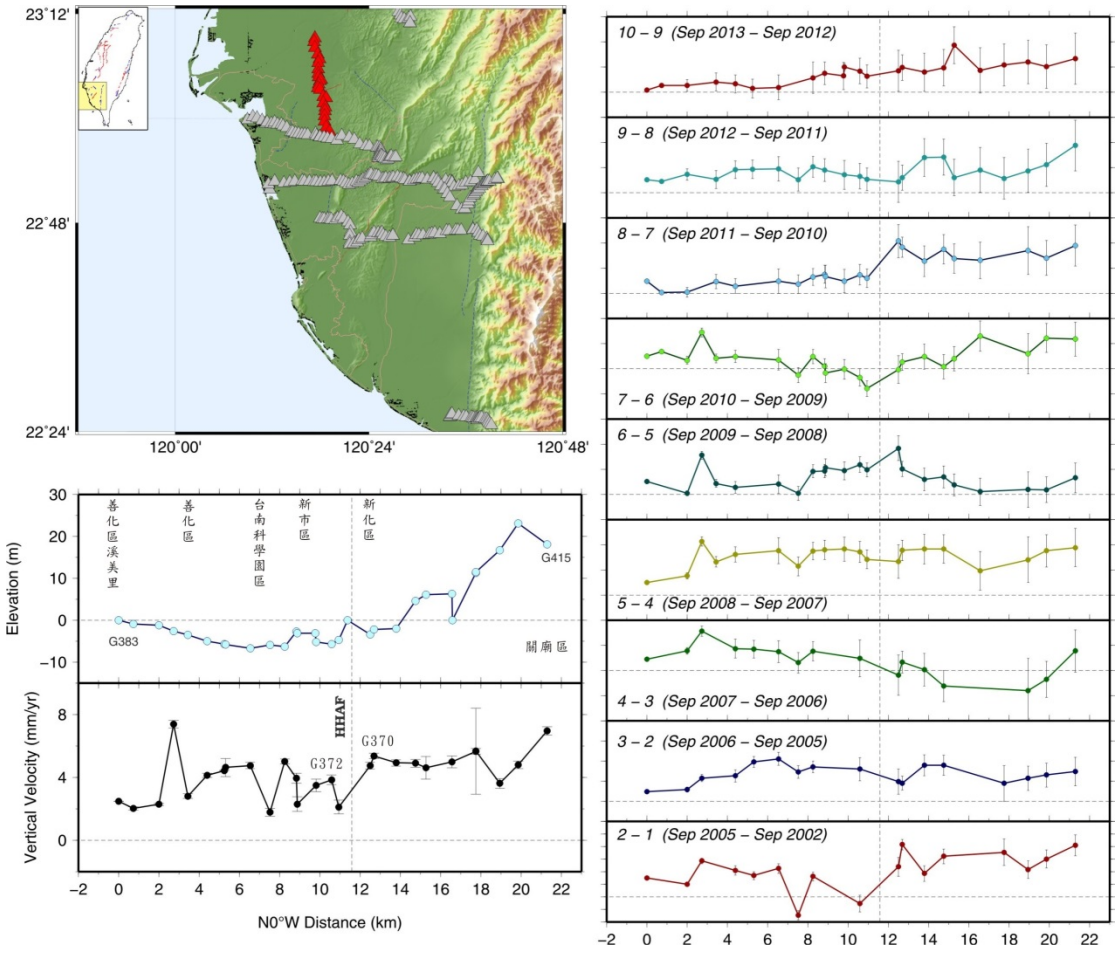


圖 2-2.17：台 19 甲_善化至關廟測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HHAF 為新化斷層。

2-2-17 縣 182_安平至龍崎測線

本測線橫跨台南台地與後甲里斷層，從台南安平至龍崎，全長約 42 公里。此測線共有 14 次水準測量，分別於 2001 年 6 月、10 月、2002 年 5 月、10 月、2003 年 6 月、11 月、2005 年 3 月、2006 年 7 月、2008-2013 年間的 5 月完成。本測線以 GPS 連續站 CKSV 之垂直速率（2.59 mm/yr），作為控制點 G435 之垂直速率。不論由地形剖面、高程相鄰兩次變化及垂直抬升速率圖上均可明顯見到台南台地之存在（台南市中西區至仁德一帶），且台地之東緣隨時間而有往東延伸之趨勢；在台南台地的西緣（台南市中西區）開始，至台地的東緣（虎尾寮、仁德）止，由水準高程變化可發現該區域有穩定的 3-5 mm/yr 之地表抬升速率趨勢，但整體的地表垂直變化量並不明顯；另外在虎尾寮地區跨過後甲里斷層的兩個點之抬升速率每年均有抬升的趨勢，平均抬升速率變化約為 6 mm/yr，且通過斷層後（仁德）立即有下陷的變化，最大差異量達 7 mm/yr（圖 2-2.18），此現象或可說明後甲里斷層為一活躍之活動構造，然因垂直速度變化量均在 1 cm/yr 以下，故在最近 10 年內該斷層之垂直方向的活動性並不顯著。

此外，水準點位 G435（勝利國小）在 2012 - 2013 年間抬升約 60 mm，主要原因為該校於 2013 年初進行操場整建工程，造成水準點位移動及外露，建議暫停測量或重新埋設此點位。（圖 2-2.19）

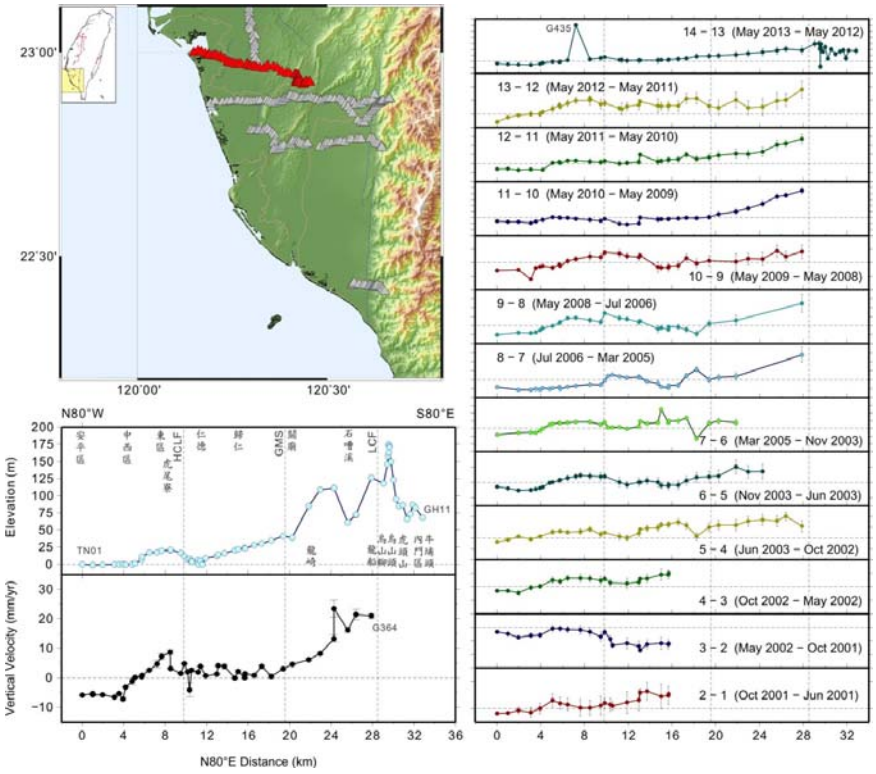


圖 2-2.18：縣 182_安平至龍崎測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCLF 為後甲里斷層、GMS 為關廟向斜、LCF 為龍船斷層。



圖 2-2.19：水準點位 G435 現地情形。

2-2-18 台 28_路竹至茂林測線

本測線橫跨小崗山、旗山斷層及潮州斷層，路線長約 90 公里。本測線以 GPS 連續站 GS53 之垂直速率（-3.1 mm/yr），作為控制點 G474 之垂直速率。縣 184_路竹至茂林測線於中壇（B232）分成北（縣 184_路竹至茂林主線）與南（台 27_路竹至茂林副線）兩條水準測線。由圖 2-2.20 顯示，縣 184_路竹至茂林主線於 G471 至 G474（阿蓮至田寮鄉崇德國小）垂直速度場及水準高程變化均持續增加（垂直速度最大達 23 mm/yr），與地形剖面比較，垂直抬升速率增加之處與地形高區並不吻合，此地表抬升現象可能與小崗山斷層的活動有關。台 27_路竹至茂林副線顯示跨越潮州斷層區域（R013 以東，高樹鄉大津至茂林國小一帶）略有地表沉陷速率變化（由約 4 mm/yr 降至-2 mm/yr），此變化與地形起伏並不相符，可能與該測段位於濁口溪曲流攻擊坡上，造成邊坡滑動有關。另由水準高程時間序列分析，自旗山至竹子門地區，歷年來均呈現沉陷的趨勢，而稍南邊的副線卻未有相同的表現，此現象可能反映旗山斷層下盤區域的地表沉陷情形。

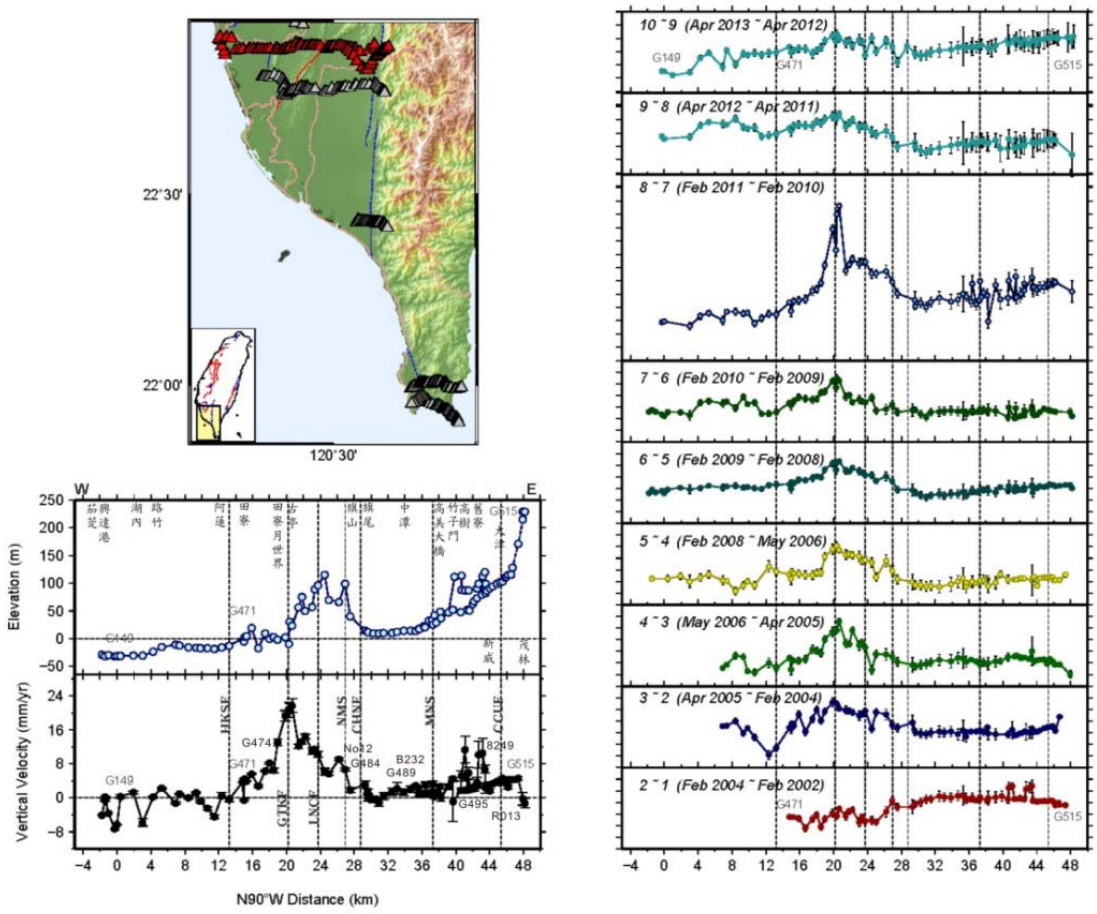


圖 2-2.20：縣 184_路竹至茂林主、副線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小岡山斷層、GTKF 為古亭坑斷層、LNCF 為龍船斷層、NMS 為內門向斜、CHNF 為旗山斷層、MNS 為美濃向斜、CCUE 為潮州斷層。

2-2-19 台 22_岡山至安坡測線

本測線橫跨小崗山斷層、旗山斷層及潮州斷層，測線長約 50 公里，分別於 2004 年 3 月、2005 至 2006 年 5 月、2008 至 2013 年間的 5 月進行共 9 次施測。本測線以 GPS 連續站 YENC 之垂直速率（4.81 mm/yr），作為控制點 G525 之垂直速率。在橫跨旗山斷層及潮州斷層區域（G533 至 G536；G560 至 G568），水準高程變化並未有明顯之變化量（分別為 1.1 mm/yr 及 0.5 mm/yr），或可說明旗山斷層及潮州斷層在本區域中並未有明顯之活動發生（圖 2-2.21）。

另由各相鄰兩次之高程差變化圖可看出，在嶺口至泰山之間有與地形剖面不同之地表下陷趨勢，並在載興至新南勢之間有最大的下陷量（-9.3 mm/yr）；該地為跨越紅橋溪之高樹大橋，由測量資料可發現高樹大橋有逐年下陷的現象。由高程時間序列上，G530 至 G533（義守大學醫學院至橫山國小）及 G544（里嶺大橋）以東均為地表高程逐年下陷之趨勢，然在跨過潮州斷層以東（泰山國小，R020），其下陷趨勢減緩。

此外，水準點位 G533（橫山國小）在 2010 年至 2011 年間下陷約 100 mm，但之後幾年趨於穩定。其主要因為該校於 2011 年初進行操場周邊整建工程，造成該點下陷及位移。（圖 2-2.22）

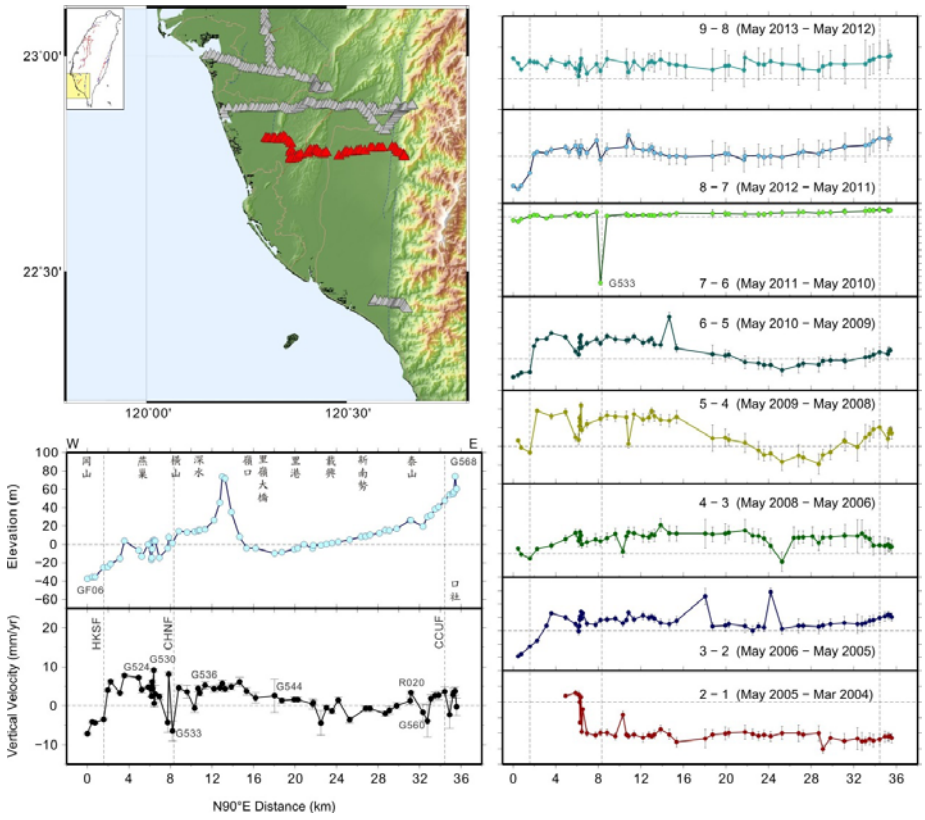


圖 2-2.21：台 22_岡山至安坡測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HKSF 為小崗山斷層、CHNF 為旗山斷層、CCUF 為潮州斷層。



圖 2-2.22：水準點位 G533 現地情形。

2-2-20 佳冬至七佳測線

本測線橫跨潮洲斷層，長約 21 公里，於 2005-2013 年的 9 月間共進行了 9 次的施測，本測線主要為觀察潮州斷層東側的中央山脈內部地表變形。本測線以 GPS 連續站 CLON 之垂直速率（-11.48 mm/yr），作為控制點 GC85 之垂直速率。該測線於 2007-2008 年間之高程變化與其他時段（2005-2007、2008-2010）不同，疑與 2008 年 8 月如麗颱風（NURI）之降雨有關（警報期間：8/19-8/21；水準測量期間：9/04-9/09；圖 2-2.23）。在通過大響營農場處至 GC81，仍存在 7.6 mm/yr 的垂直速度變化，整體的時間序列趨勢仍是處於抬升的狀態，透露潮州斷層西側有新期的活動產生。

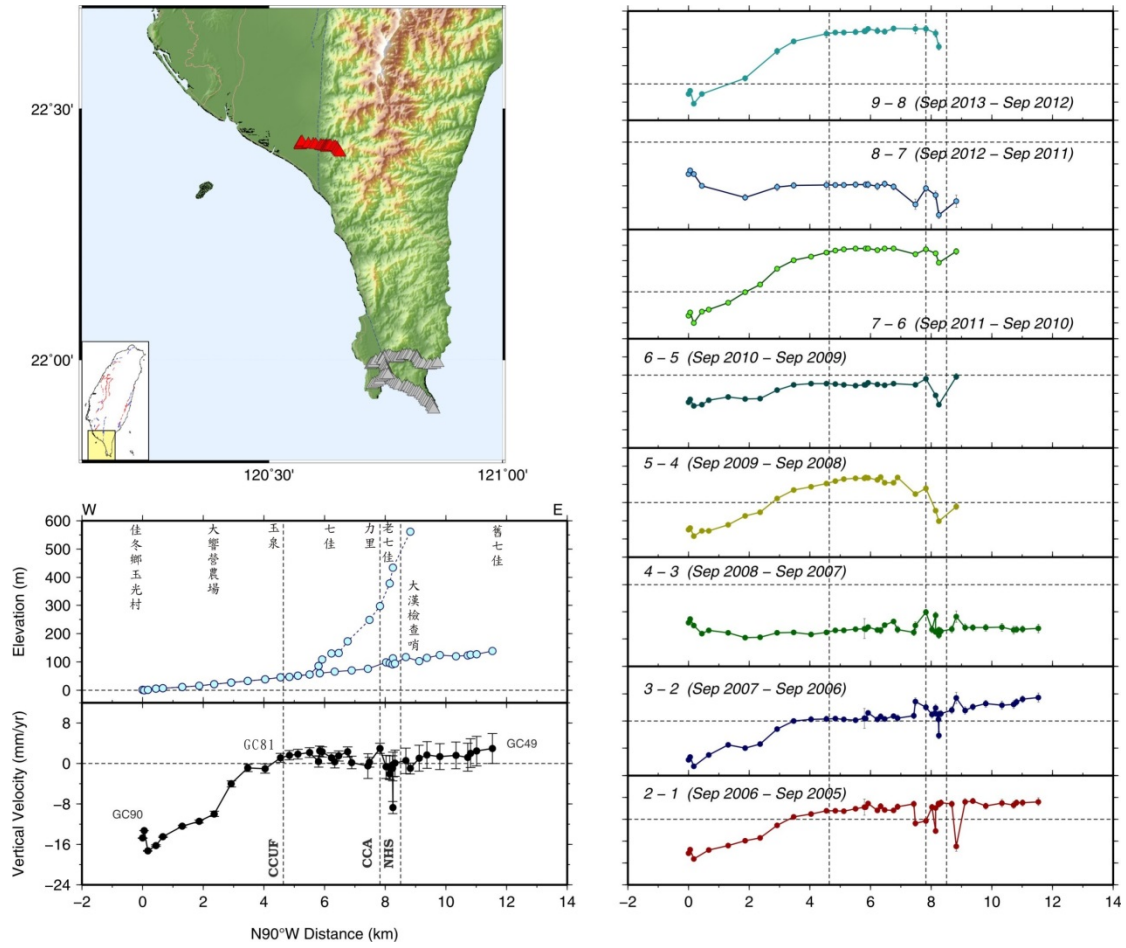


圖 2-2.23：佳冬至七佳測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CCUF 為潮州斷層、CCA 為七佳背斜、NHS 為南和向斜。

2-2-21 瀧澗至嶺頂測線

本測線橫跨嶺頂斷層，測線長約 25 公里，分別於 2004 年 11 月、2005 年 11 月、2007-2012 年 11 月、2006 與 2013 年 10 月進行共 10 次的施測。本測線以 GPS 連續站 TUNM 之垂直速率（5.25 mm/yr），作為控制點 N670 之垂直速率。該測段之每 2 年高程變化與垂直速度場均與地形變化相似（圖 2-2.24），然在嶺頂斷層東側之垂直速度與地形並不一致，呈現下陷的趨勢。

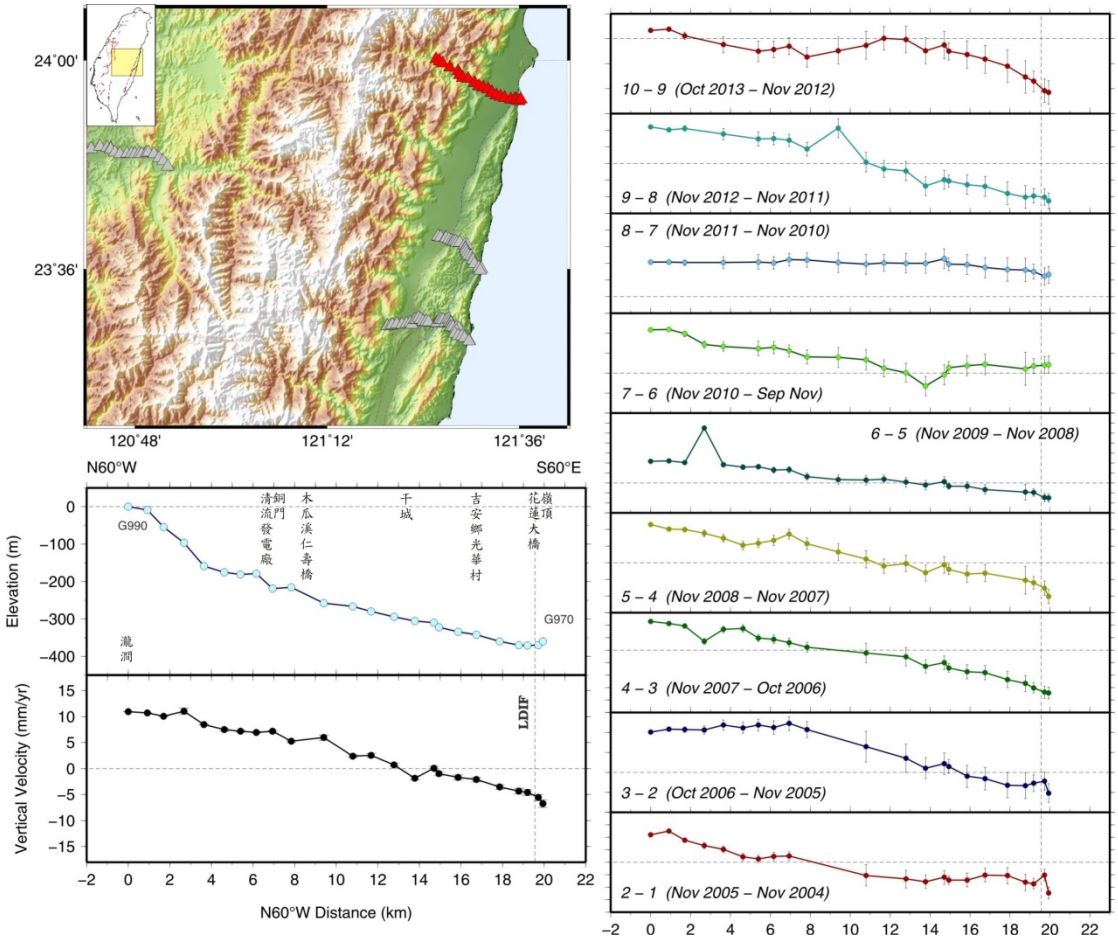


圖 2-2.24：瀧澗至嶺頂測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LDIF 為嶺頂斷層。

2-2-22 光復至豐濱測線

本測線位於奇美斷層的西側，測線長約 22 公里，分別於 2004 年 11 月、2005 年 11 月、2007-2012 年的 11 月、2006 與 2013 年 10 月進行共 10 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FENP 之垂直速率(-7.58 mm/yr)，作為控制點 G991 之垂直速率。於圖 2-2.25 顯示，在 G996 至 A105（泰來至豐富）有-11.25 mm/yr 的水準抬升速率變化。此結果說明奇美斷層以西之海岸山脈內有活動構造之發育，或說明海岸山脈確實持續在抬升中。

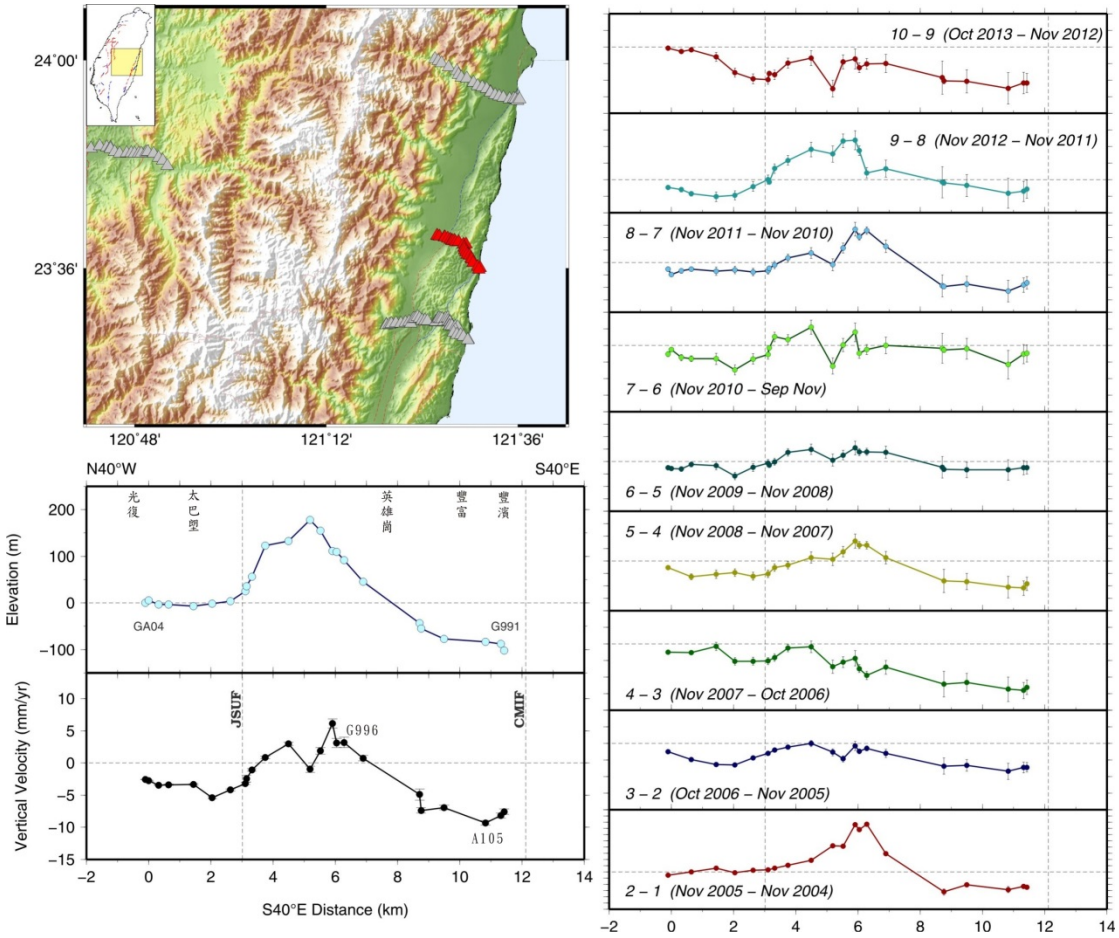


圖 2-2.25：光復至豐濱測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。JSUF 為瑞穗斷層、CMIF 為奇美斷層。

2-2-23 紅葉至靜浦測線

本測線橫跨奇美斷層、瑞穗斷層及玉里斷層，測線長 33 公里，分別於 2005-2012 年的 11 月、2004 與 2013 年 10 月、進行共 10 次的施測。本測線以 GPS 連續站 JSUI 之垂直速率（1.29 mm/yr），作為控制點 GA22 之垂直速率。在 GA34 至 GA22（瑞穗牧場至瑞穗鄉猴仔山）之間，水準抬升速率的變化（7.7 mm/yr）可說明瑞穗斷層與玉里斷層之活動（圖 2-2.26）。同時，跨越奇美斷層之區域（GA14 至 GA08，阿魯鷲至亂石）由水準抬升速率變化有明顯之下陷區（-12.8 mm/yr）。

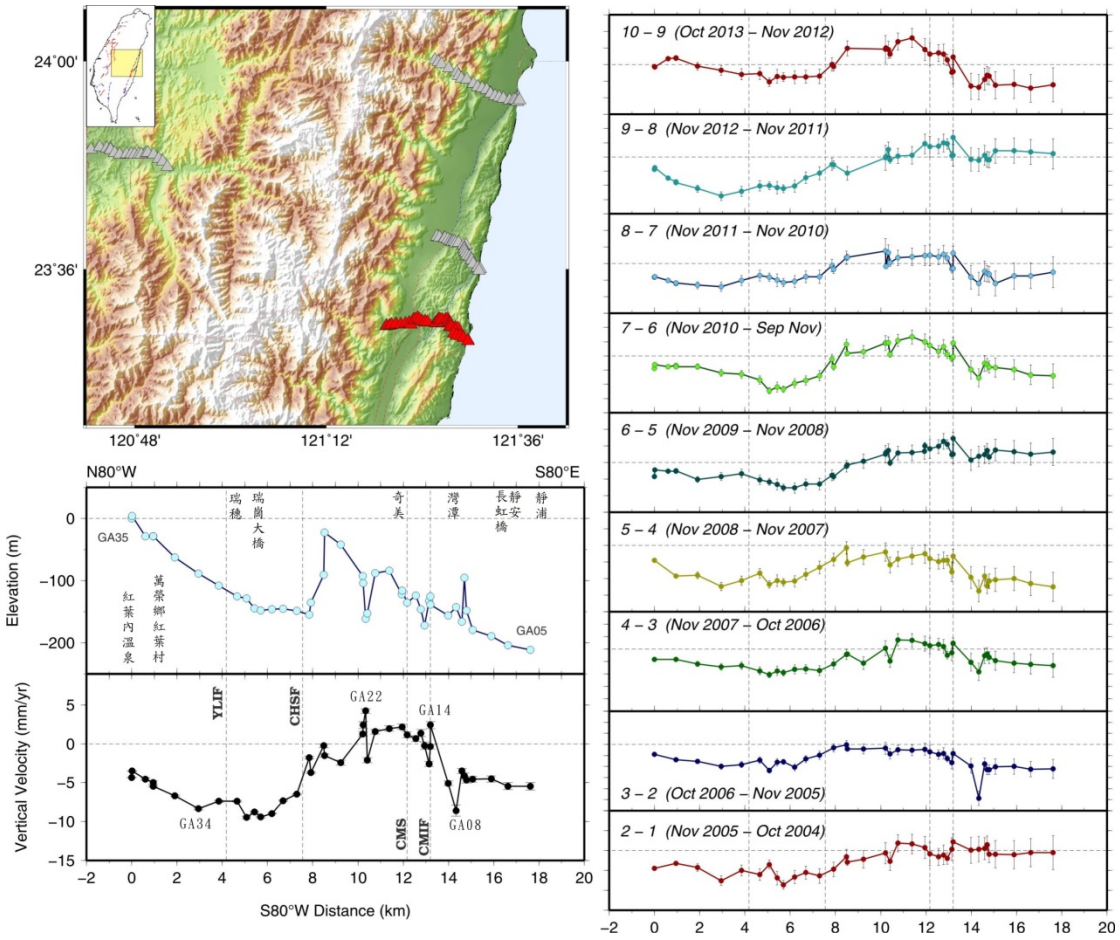


圖 2-2.26：紅葉至靜浦測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 5 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。YLIF 為玉里斷層、CHSF 為池上斷層、CMS 為奇美向斜、CMIF 為奇美斷層。

2-2-24 東成至富岡測線

本測線橫跨利吉斷層及鹿野斷層，測線長 25 公里，分別於 2009-2012 年的 11 月、2013 年 10 月進行共 5 次的施測。本測線以 GPS 連續站 FUGN 之垂直速率（-2.14 mm/yr），作為控制點 A086 之垂直速率。該測線之每 2 年高程變化與垂直速度場均與地形變化相似（圖 2-2.27），然在岩灣至臺東大橋段之垂直速度變化較地形高度改變大，呈現較明顯之沉陷（速度變化約-12 mm/yr），且鹿野斷層以西之垂直速度呈現下降的趨勢，亦與地形變化不一致。

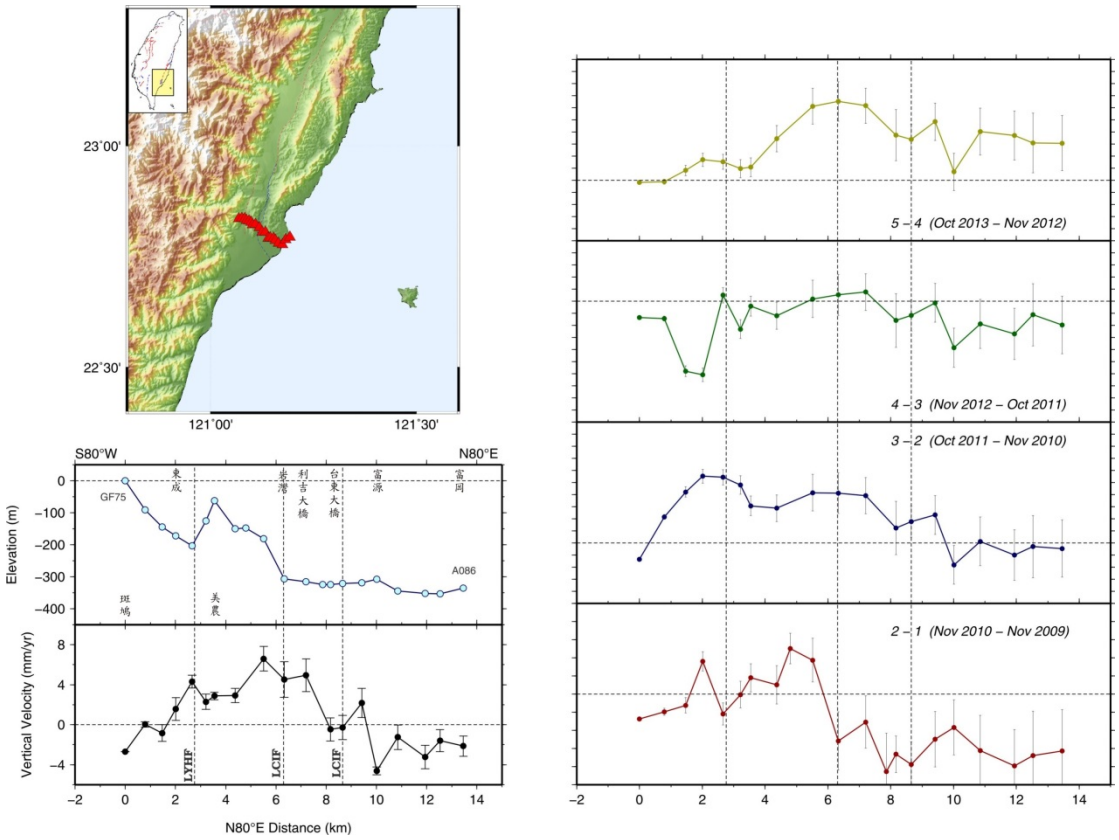


圖 2-2.27：東成至富岡測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 2 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。LYHF 為鹿野斷層、LCIF 為利吉斷層。

2-2-25 台 2_梗枋至東澳測線

本測線橫跨宜蘭斷層、濁水－梨山斷層及小帽山斷層，測線長 61 公里，於 2001 與 2007 年 7 月、2011-2013 年的 10 月進行共 5 次的施測。本測線以 GPS 連續站 SUAO 之垂直速率（-5.37 mm/yr），作為控制點 GG83 之垂直速率。該測線之地形受沖繩海槽弧後塌陷的影響，呈現較明顯之沉陷（圖 2-2.28）。

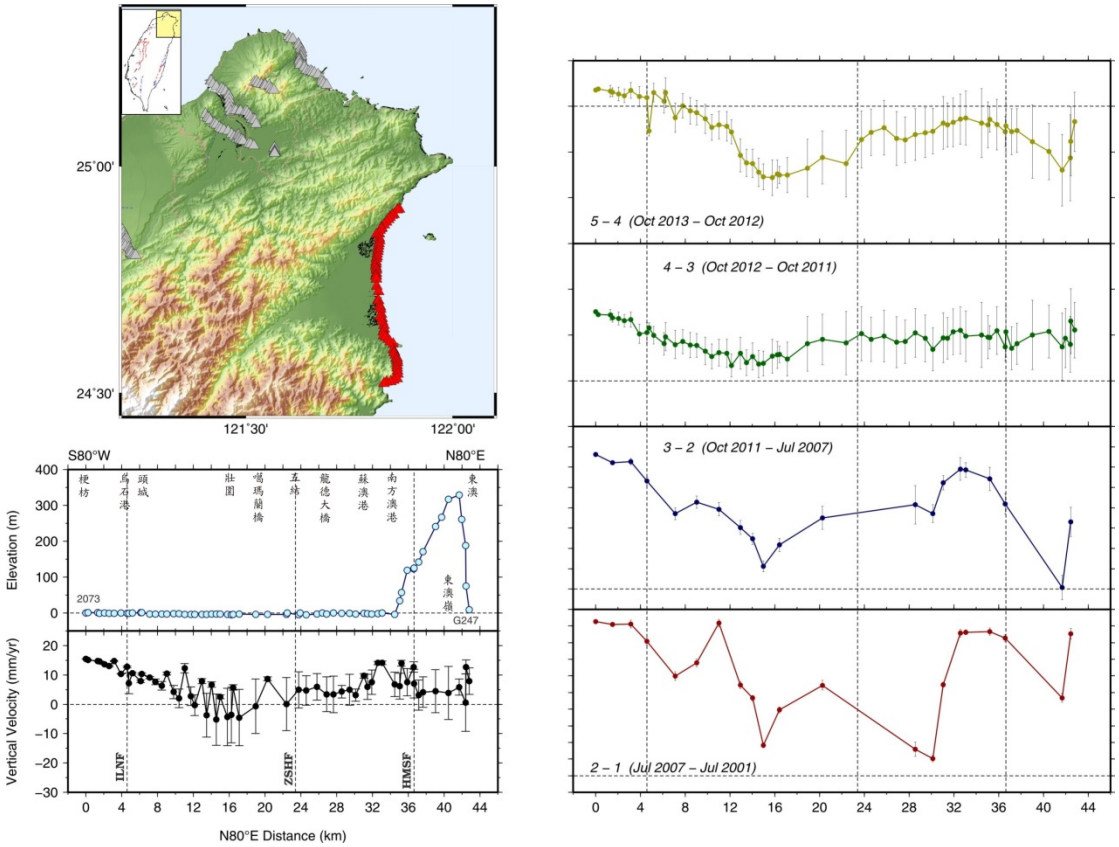


圖 2-2.28：梗枋至東澳測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。ILNF 為宜蘭斷層、ZSHF 為濁水-梨山斷層、HMSF 為小帽山斷層。

2-2-26 恆春半島地區測線測線

恆春半島地區精密水準測量共規劃有 2 條長度大於 10 公里的長測線，以及 1 條台 26_恆春至鵝鑾鼻測線的副線，為主測線向西的延伸。至 2013 年 5 月 31 日止，共計施測並檢核恆春西台地至佳樂水及台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線等 3 條水準測線的測量資料。恆春西台地至佳樂水測線以 GPS 連續站 HENC 之 2006 年地震前垂直速率（-2.5 mm/yr）及震後垂直速率（-1.4 mm/yr），作為控制點 G670 之垂直速率；台 26_恆春至鵝鑾鼻則以 GPS 連續站 KDNM 之 2006 年地震前垂直速率（4.2 mm/yr）及震後垂直速率（8.2 mm/yr），作為控制點 Q014 之垂直速率。

恆春西台地至佳樂水（長約 19 公里）、台 26_恆春至鵝鑾鼻主線（長約 19 公里）及恆春至鵝鑾鼻副線（長約 5 公里）等三條測線 2006 年以前在橫跨恆春斷層時水準高程變化並無明顯之改變（圖 2-2.29 至圖 2-2.30），顯示 2006 年以前恆春斷層並無顯著之活動性。但在 2006 年 12 月 26 日發生兩起震央位置均位於恆春西方外海之 M_w 7.0 的災害性地震（中央氣象局地震報告編號第 95106 號及第 95107 號），造成恆春斷層西側於 2006 年 8 月至 2008 年 3 月期間，在德和至恆春一帶有最大約 80 mm 的沉陷現象，而在南灣以西地區也有約 60 mm 的沉陷；相對斷層東側無明顯的高程變化，在西側有相對的下陷發生（南樹林至馬鞍山一帶），說明在 2006 年的地震後，恆春斷層的活動範圍僅限於恆春谷地（德和至恆春、馬鞍山至南灣一帶），而恆春地區主要的震後變形為恆春斷層西側的沉陷。此外，2010 至 2013 年的高程變化量之變化型態已與 2006 至 2010 年間不同，可能說明自 2010 年起恆春半島的地表垂直變形已脫離同震位移的影響。

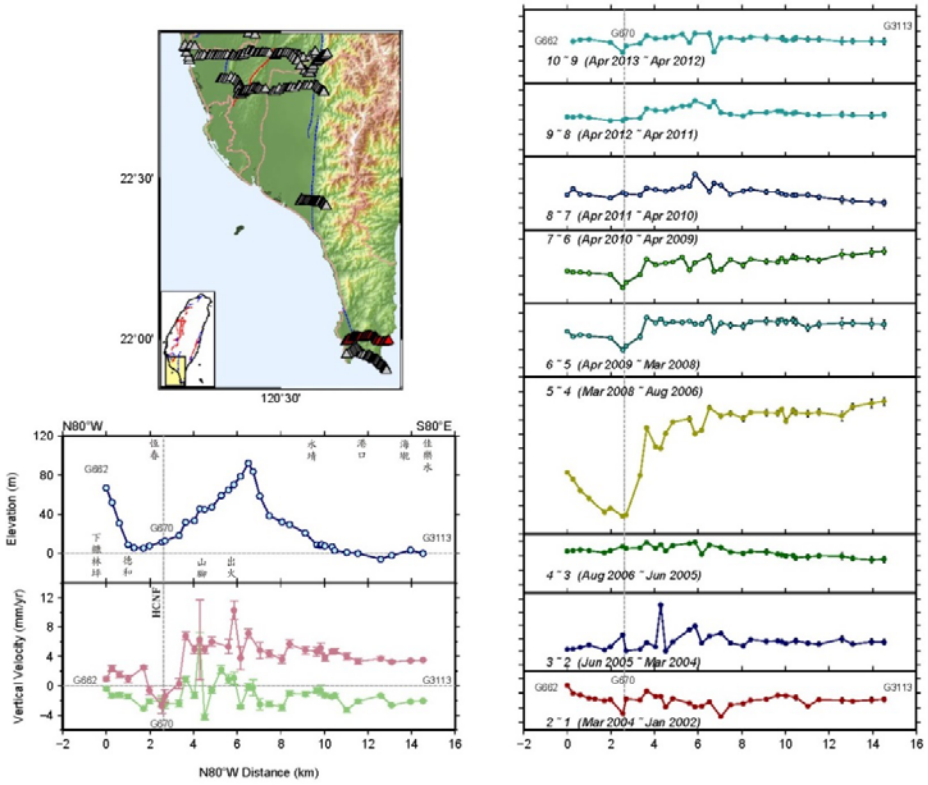


圖 2-2.29：恆春西台地至佳樂水測線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。左下欄中之淡綠色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度，淡紅色為 2006 - 2012 年恆春地震震後垂直速度。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HCNF 為恆春斷層。

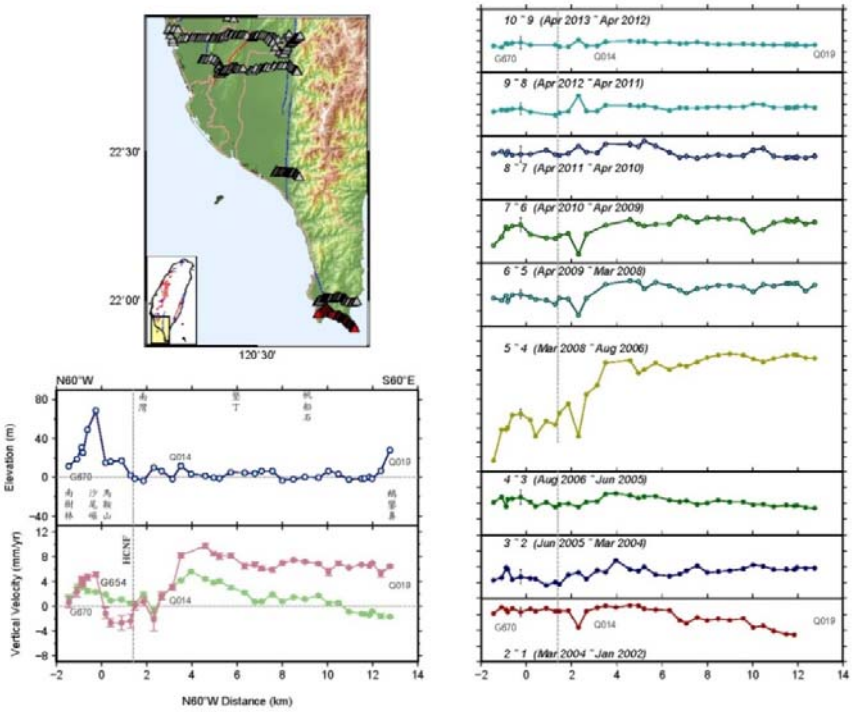


圖 2-2.30：台 26_恆春至鵝鑾鼻主、副線水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。左下欄中之淡綠色為 2002 - 2006 年恆春地震震前垂直速度，淡紅色為 2006 - 2012 年恆春地震震後垂直速度。右側欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。HNCF 為恆春斷層。

2-2-27 跨車籠埔斷層之測線

經濟部中央地質調查所在車籠埔斷層沿線，設置了 5 條橫跨斷層之水準測線，分別為五光至黃竹、曾厝至霧峰、北勢至峰谷、烏溪南岸及中興新村。自 2007 至 2013 年止，其間共計施測 7 次。水準測量施測後的高程差變化投影至東西剖面如圖 2-2.31 至圖 2-2.35。

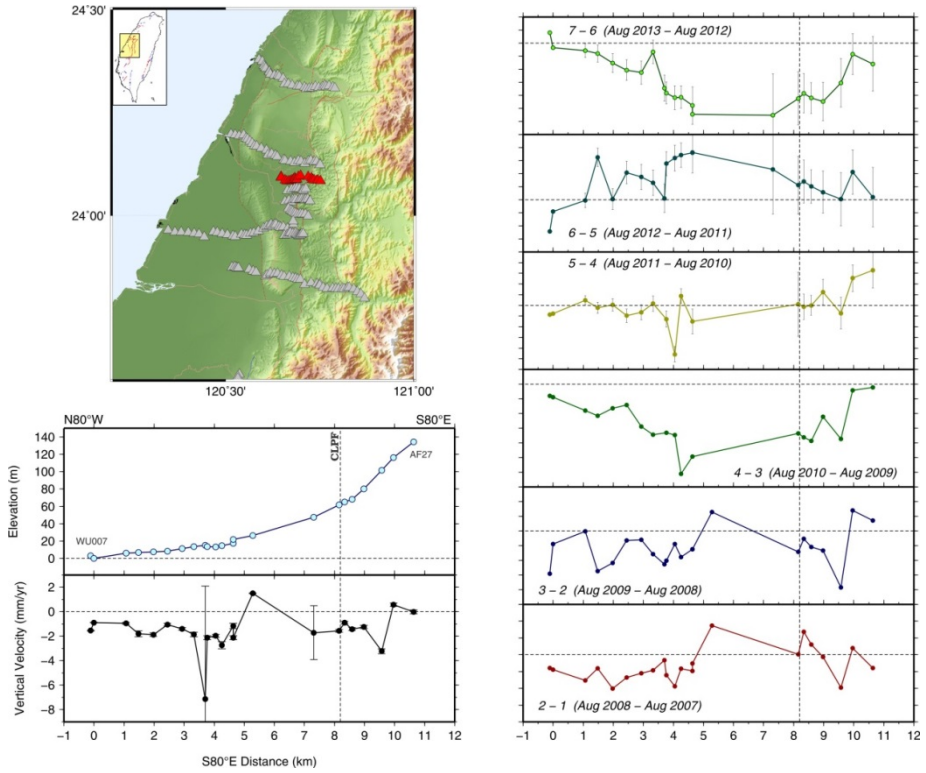


圖 2-2.31：五光至黃竹水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 1 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

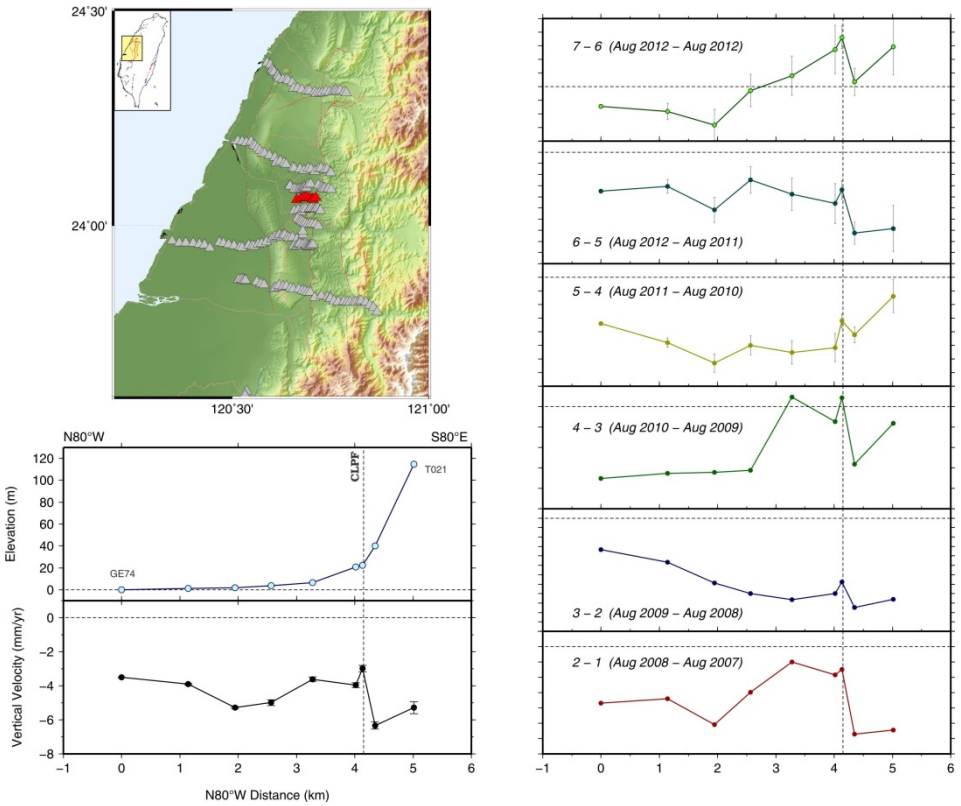


圖 2-2.32：曾厝至霧峰水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 1 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

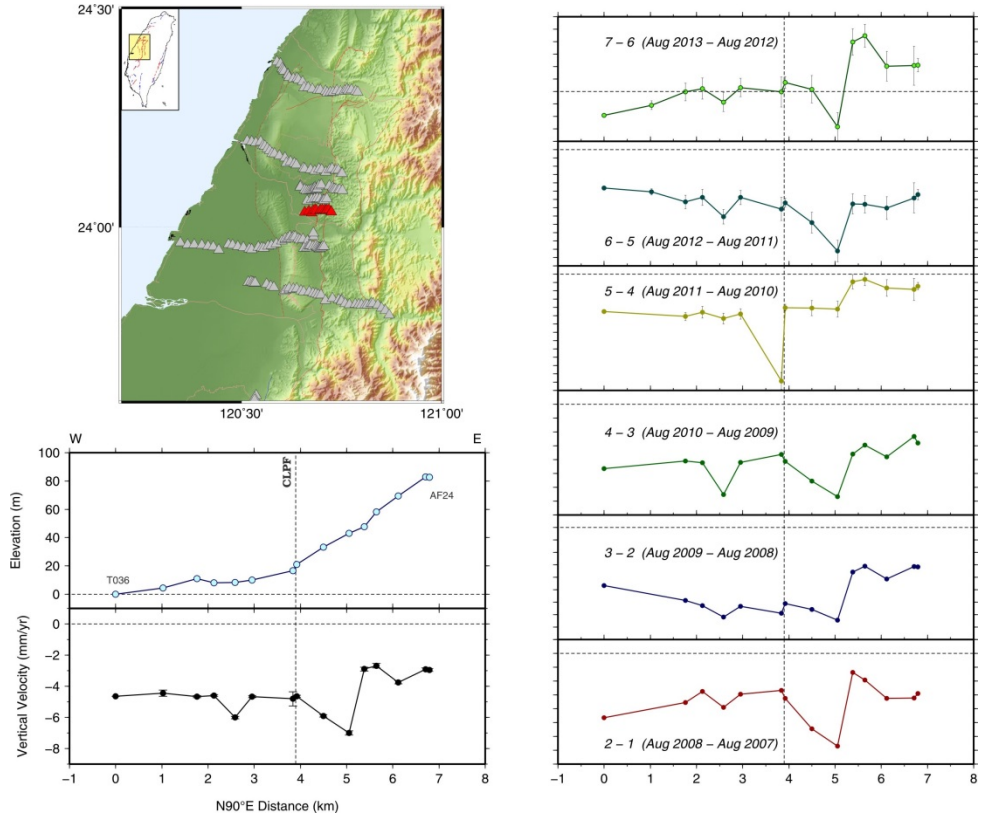


圖 2-2.33：北勢至峰谷水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 1 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

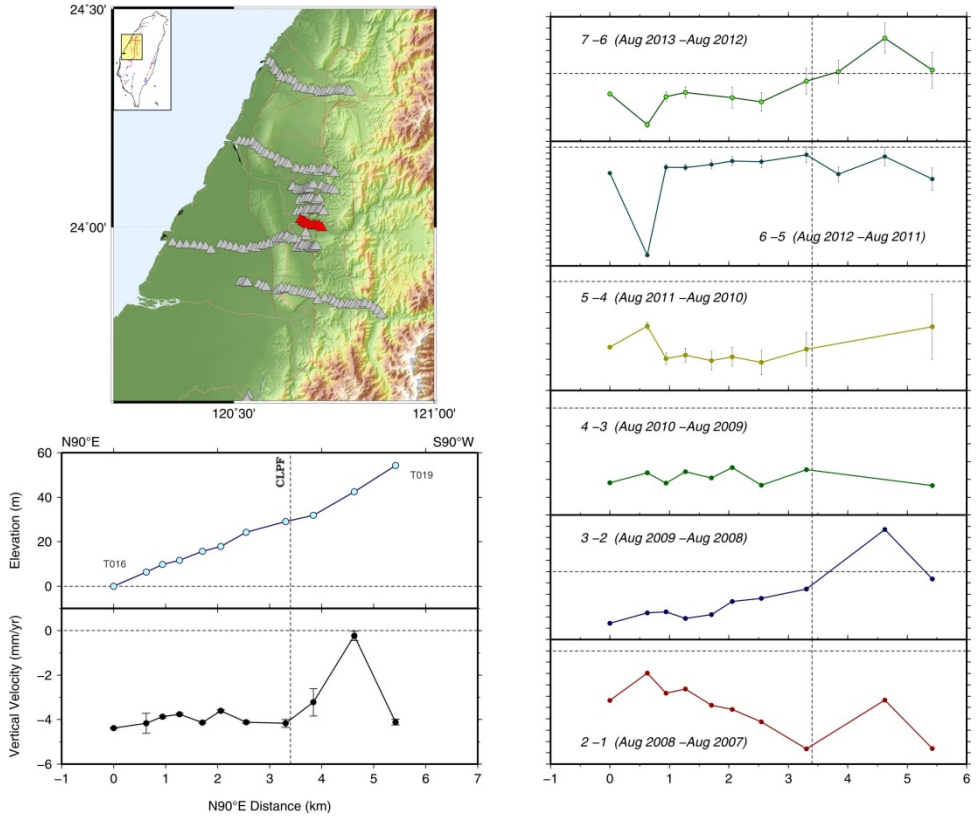


圖 2-2.34：烏溪南岸水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 1 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

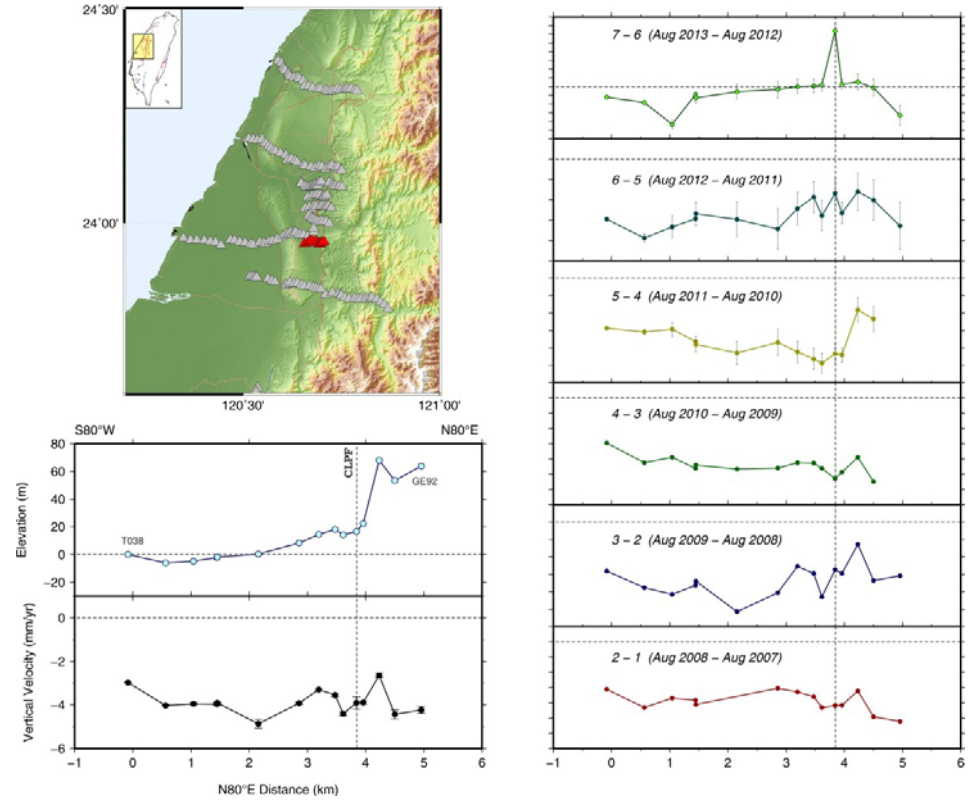


圖 2-2.35：中興新村水準高程變化圖。圖例如圖 2-2.2 所示。右側欄中各線條為歷年高程變化曲線，每個刻度代表 1 mm 的變化量。垂直虛線標示活動斷層之地表出露位置。橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離。CLPF 為車籠埔斷層。

2-2-28 精密水準速度場檢核

精密水準測線之速度場以各條精密水準測線上之距離最近且資料品質較穩定之 GPS 連續站速率作為約制條件，以檢核各精密水準測線與 GPS 連續站速度趨勢符合程度，來確認水準資料可信度。測線段及其配對 GPS 連續站點位名稱及距離如表 2-2.1。

由圖 2-2.36 至圖 2-2.38 顯示，所有連續站與精密水準點位之時間續序列走向均一致，證明了精密水準資料的可靠性。

表 2-2.1：測線段及其配對 GPS 連續站點位名稱、距離及圖例。

項次	測線名稱	GPS 連續站名	水準點位名	兩者距離（km）	圖例
1	台 2_石門至萬里	GS09	2027	0.01	2-2.37(a)
2	士林至三芝	YM01	GF66	0.2	2-2.37(b)
3	淡水至士林	GS10	GA69	0.2	2-2.37(c)
4	五股至台北	WUKU	G225	0.3	2-2.37(d)
5	縣 115_新屋至童話世界	FCWS	3026	4.0	2-2.37(e)
6	縣 122_新竹至五峰	TCMS	HCCA	0.6	2-2.37(f)
7	縣 117_新竹至峨眉	GS14	GB72	0.1	2-2.37(g)
8	苗栗至南庄	MIAO	GD20	4.1	2-2.37(h)
9	縣 132_大安至東勢	GS36	G896	1.6	2-2.37(i)
10	縣 136_龍井至太平	LSB0	G937	0.9	2-2.38(j)
11	縣 148-台 14_王功至草屯及草屯至埔里段	CAOT	T075	0.3	2-2.38(k)
12	縣 150-台 16_北斗至水里	GS26	G296	4.1	2-2.38(l)
13	縣 164_金湖至瑞峰	GS05	G758	0.4	2-2.38(m)
14	縣 174_北門至楠西	H0KN	X204	5.9	2-2.38(n)
15	台 19 甲_善化至關廟	GS29	1157	1.5	2-2.38(o)
16	縣 182_安平至龍崎	CKSV	G435	1.1	2-2.38(p)
17	台 28_路竹至茂林	GS53	G474	5.2	2-2.38(q)
18	台 22_岡山至安坡	AKND	G525	0.2	2-2.38(r)
19	佳冬至七佳	CLON	GC85	0.5	2-2.39(s)
20	恆春西台地至佳樂水	HENC	G670	0.1	2-2.39(t)
21	台 26_恆春至鵝鑾鼻	KDNM	Q014	0.2	2-2.39(u)
22	嶺頂至瀧澗	TUNM	N670	0.002	2-2.39(v)
23	豐濱至光復	FENP	G991	0.006	2-2.39(w)
24	靜浦至紅葉	JSUI	GA22	0.7	2-2.39(x)
25	富岡至東成	FUGN	A086	0.4	2-2.39(y)
26	台 2_梗枋至東澳	SUAO	GG83	0.9	2-2.39(z)

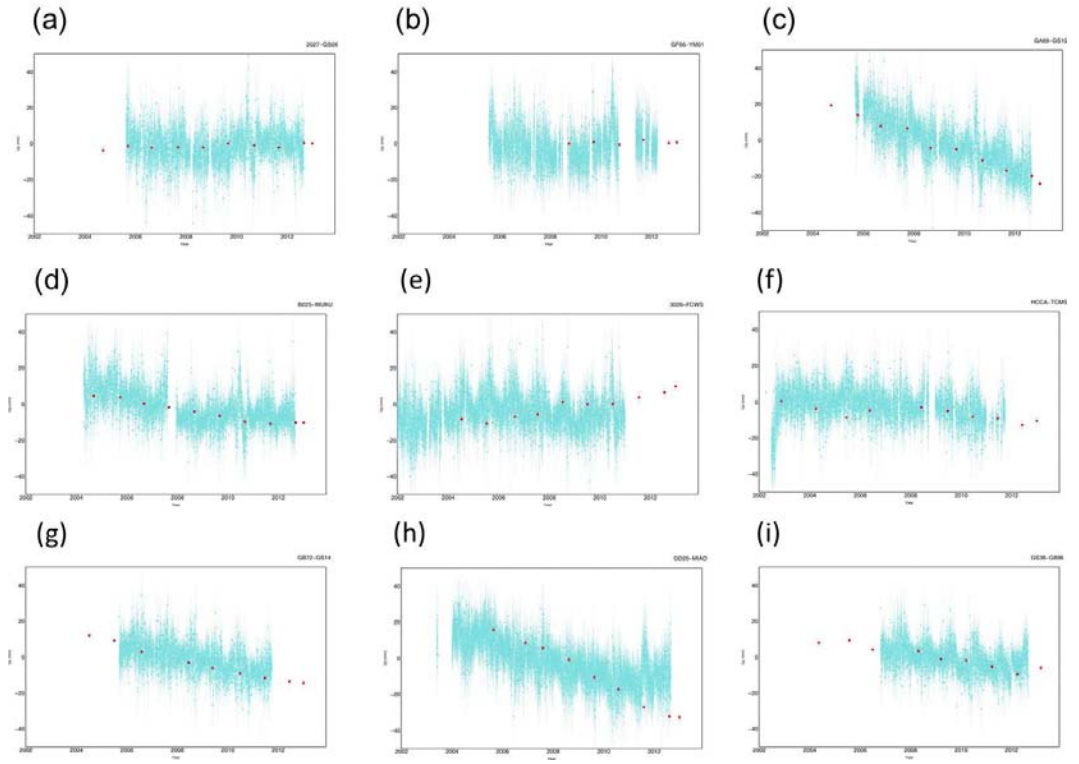


圖 2-2.36：精密水準測線與 GPS 連續站之位移-時間序列圖，藍色點位代表 GPS 連續站，紅色點代表精密水準點位。

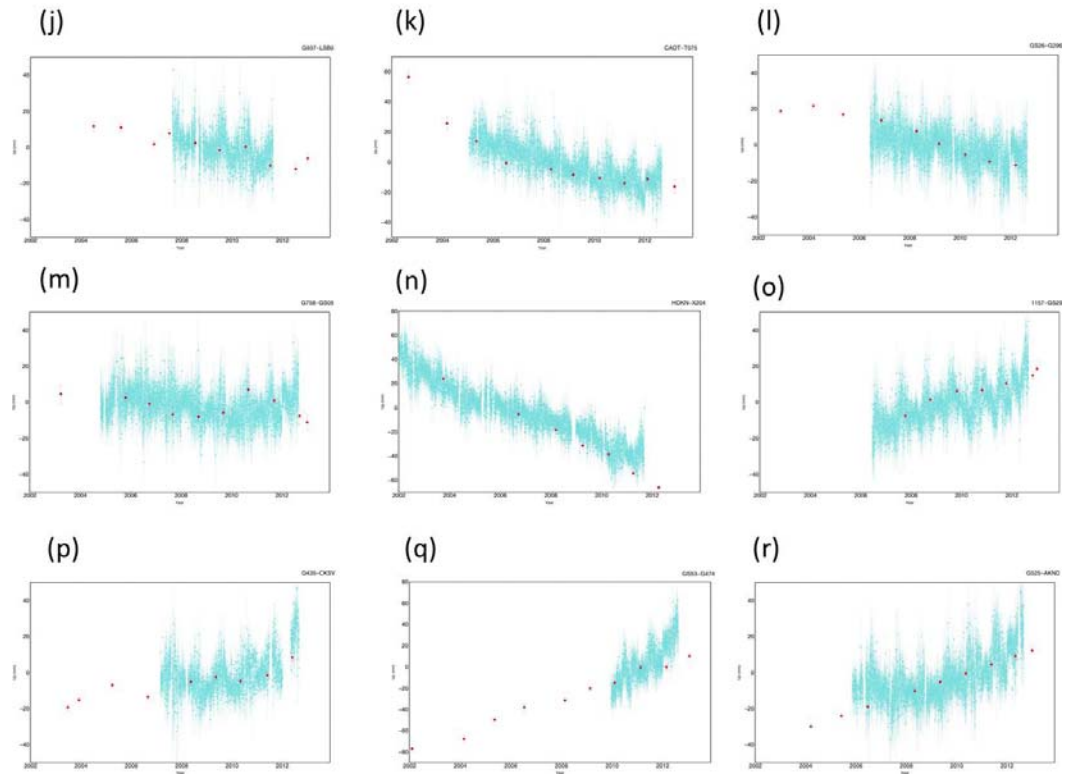


圖 2-2.37：精密水準測線與 GPS 連續站之位移-時間序列圖，圖例如圖 2-2.36 所示。

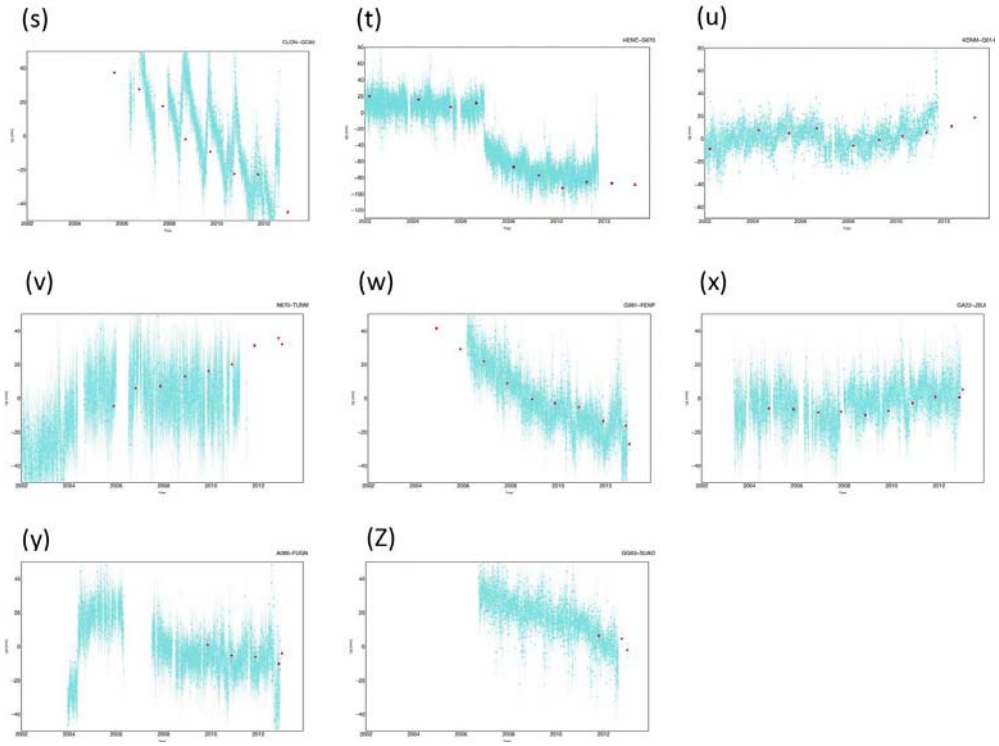


圖 2-2.38：精密水準測線與 GPS 連續站之位移-時間序列圖，圖例如圖 2-2.36 所示。

2-3 地表變形研究回顧

2-3-1 地殼矩率研究

隨著板塊運動，彈性地殼重複進行著受力變形儲存能量、破裂釋放能量造成地震之循環。如圖 2-3.1 所示，斷層在地殼某深度之上為鎖定狀態，隨著受力應變、地表近斷層處位移量漸小，斷層所在位置應變量最大、且累積能量（圖 2-3.1 左）；當地殼應變量超過其岩石彈性限度（elastic limit），則鎖定之斷層錯動，造成地表破裂、位移與地震（圖 2-3.1 中）；兩狀態之差異量可視為斷層錯動之同震位移（圖 2-3.1 右）。Kostrov 在 1974 年依據地殼受力變形以及能量藉由發震釋放之特性，提出地殼體積應變率（strain volume rate）與地震矩率（seismic moment rate）之關係方程式。接著 Savage and Simpson〔1997〕以大地測量之平面應變率（surface strain rate）代替體積應變率，以求得最小大地測量矩率（minimum geodetic moment rate），視為地殼受壓後所承載之能量保守值（圖 2-3.2），其中包含能量經由發震釋放、無震釋放以及累存於地殼之綜合訊息。因此，許多學者在各地進行矩率之研究，期望藉由檢測大地測量矩率以及地震矩率之相關性，來探討地殼之發震特性與能量累積與否。

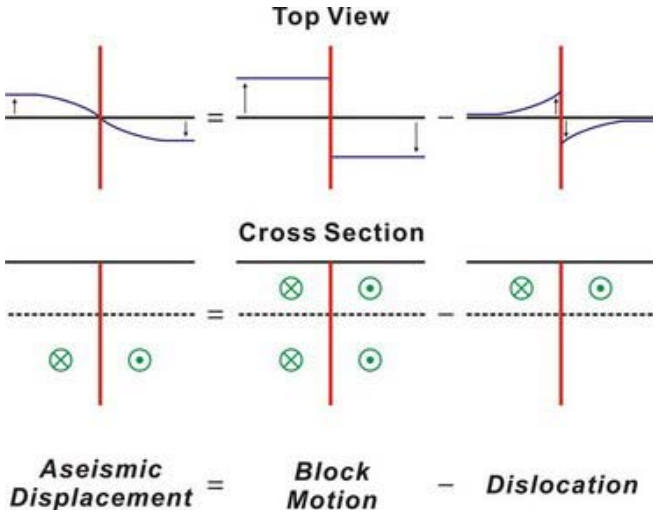


圖 2-3.1：斷層錯位理論示意圖〔修改自 Matsu'ura et al.，1986〕。上三圖為斷層俯視圖、下三圖為斷層截面側視圖。紅線代表斷層線，紫線代表位移之變化，虛線為地殼鎖定深度，綠色符號表示地殼運動方向為穿出紙面（⊙）或進入紙面（⊗）。

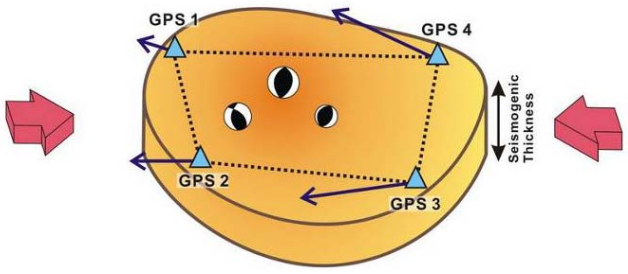


圖 2-3.2：地殼應變示意圖〔修改自 Kostrov，1974〕。紅色箭頭代表地殼受壓方向，雙箭頭顯示地殼之發震深度（Seismogenic Thickness），震源機制解為受壓期間發生之地震事件。藍色三角形代表 GPS 監測站，虛線圈示監測網涵蓋範圍，紫色箭頭為速度場。

Ward〔1998a〕利用 174 個 GPS 與長基線觀測站求得北美洲速度場以及應變率場，再轉換為大地測量矩率。並蒐集北美洲兩百年來之地震目錄，計算地震矩率。在地震矩率除以

大地測量矩率之矩率比值分布中顯示，具有較高地殼應變率（～30 × 10^{-8} yr^{-1}）之加州地區其矩率比值介於 0.70 - 0.80，地震矩率略小於大地測量矩率；其餘各處應變率低（～0.03 × 10^{-8} yr^{-1}），矩率比值也較低（0.02 - 0.50）。歐洲方面，Ward〔1998b〕藉由 100 個 GPS、長基線和短基線觀測站推算歐洲各地之應變率（0.09 × 10^{-8} – 9 × 10^{-8} yr^{-1}）以及大地測量矩率，並利用近百年來之地震目錄求得地震矩率。

其矩率比值顯示，歐洲內陸地區比值在 0.50 - 0.71，地震矩率略小於大地測量矩率；土耳其之矩率比值最低（0.22），地震矩率普遍小於大地測量矩率。在地中海沿岸之矩率比值研究〔Jenny et al.，2004；Sue et al.，2007〕，同樣發現地震矩率小於大地測量矩率。同時，Jenny et al.〔2004〕利用地震震源機制解之矩率張量（moment tensor）推求地震應變（seismic strain），並與大地測量應變之方位相比，研究顯示兩種應變之應變軸向在內陸地區極為相似。而 Masson et al.〔2005〕在伊朗之研究同樣顯示，地震應變與大地測量應變之軸向方位相近。因此結合地震資料與 GPS 大地測量將有助於探討現今地殼變形型態及方位。在上述學者之研究中〔Ward，1998a；1998b；Jenny et al.，2004；Mason et al.，2005；Sue et al.，2007〕，美加地區、歐洲內陸、地中海沿岸地區、土耳其以及伊朗，其地震矩率普遍小於大地測量矩率 1 - 2 個數量級（十倍至百倍）。造成矩率差異之可能因素有三：1）地震目錄歷時不夠長久，未能完整記錄區域內之地震事件，致使地震矩率低估；2）地殼藉由無震塑性變形，釋放一部份所承載之能量；3）已發生之區域地震數量（或規模）相較於理論統計過少（或過小），代表該區域地殼能量正逐漸累積，可能在未來釀成大規模地震事件。

2-3-2 大地測量矩率計算

Kostrov〔1974〕提出地殼彈性體積應變（elastic volume strain）與地震活躍程度之關係式（2-3-1 式）。認為隨著板塊推移、地殼受力變形，在一定的發震深度（seismogenic thickness）之上，地殼所承載的應變率張量 $\dot{\varepsilon}_{ij}$（strain rate tensor）與隨之衍生的地震矩張量 M_{ij}（seismic moment tensor）之總和具有線性關係。

$$2\mu H_s A\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{T}\sum M_{ij} \qquad (2\text{-}3\text{-}1)$$

其中 μ 為岩體之剛性係數（rigidity）；H_s 為發震深度，其定義為：在區域地層的某一個平均深度之上，活動斷層以彈性應變方式儲存能量，再藉由地震釋放之（圖2-3.2）；A 為受力之地殼表面積，T 為受力時間長度。

Savage and Simpson〔1997〕以平面應變（surface strain）來代替體積應變，改寫 Kostrov 方程式而得（2-3-2）式，方程式中代入 GPS 資料所計算之最大平面應變率，可求得最小大地測量矩率 $M_0^{(\min)}$（minimum geodetic moment rate），代表 GPS 觀測期間地殼所承載之彈性能保守估計值。

$$M_0^{(\min)} = 2\mu H_s A\, MAX\left(|\dot{\varepsilon}_1|, |\dot{\varepsilon}_2|, |\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2|\right) \qquad (2\text{-}3\text{-}2)$$

使用參數：剛性係數 μ = 3 × 10^{10} N/m^2、受力塊體面積 A = 10 × 10 km^2（以配合應變率取樣間距）。發震深度 H_s = 30 km。

2-3-3 結果展示及分析

將分三部份，依序展示速度場、應變率場以及大地測量矩率分布圖。

2-3-3-1 中部地區 GPS 速度場

中部地區 GPS 分析資料觀測時間自 2002 至 2012 年。由圖 2-3.3 可知在大茅埔斷層以東速度場約 24 - 40 mm/yr，方向朝西北西，大茅埔斷層及車籠埔斷層間速度場值約 8 - 24 mm/yr，方向朝西北西，往西彰化斷層及車籠埔斷層間值逐漸縮小到 8 mm/yr 以下，方向轉為朝西或西南西，往西至沿海地區速度場值小於 5 mm/yr，大尖山斷層－觸口斷層系統間有明顯的速度梯度存在。由東向西，跨越觸口斷層，其水平位移速率由約 30 mm/yr 降至約 16 mm/yr；跨越木屐寮斷層－六甲斷層系統以及車籠埔斷層北端，其水平位移速率均由約 16 mm/yr 降至約 8 mm/yr。

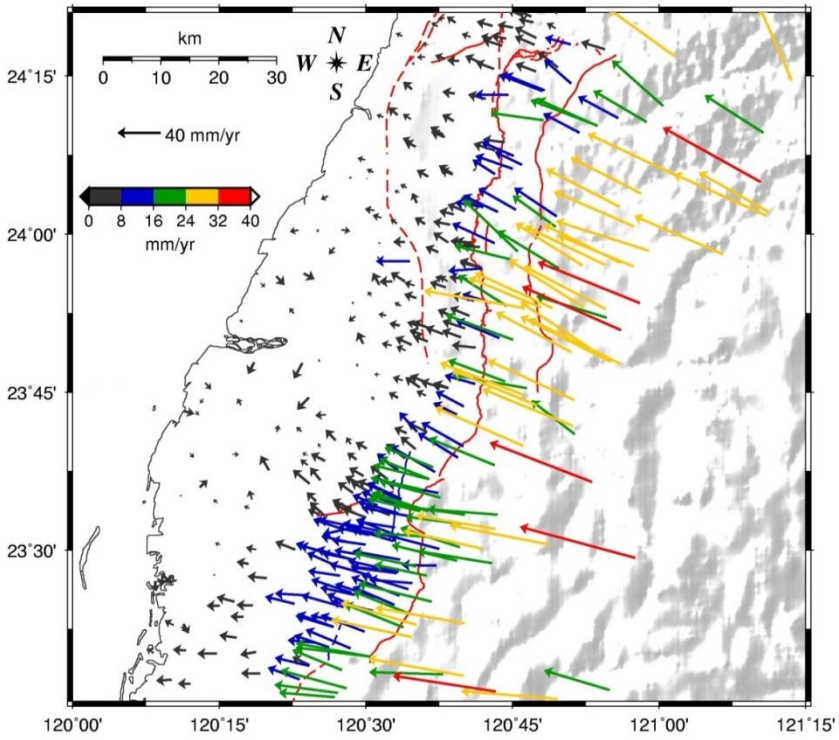


圖 2-3.3：2002 – 2013 年中部地區相對於澎湖白沙站（S01R）之 GPS 水平方向速度場。

2-3-3-2 中部地區 GPS 應變率場

大茅埔斷層以及大尖山斷層－觸口斷層以東壓縮應變率的量值大小，約-1.0 至-1.8 μstrain/yr，車籠埔斷層-大茅埔斷層之間壓縮應變率的量值大小，約-0.8 至-1.4 μstrain/yr，壓縮軸方向大致為 E-W;其餘各處如彰化斷層以西以及大茅埔斷層北側應變速率介於-0.5 至 0.5 μstrain/yr，變形型態介於壓縮與伸張之間，大尖山斷層－觸口斷層以西應變率的量值大小，約-0.5 至-1.0 μstrain/yr（圖 2-3.4）。

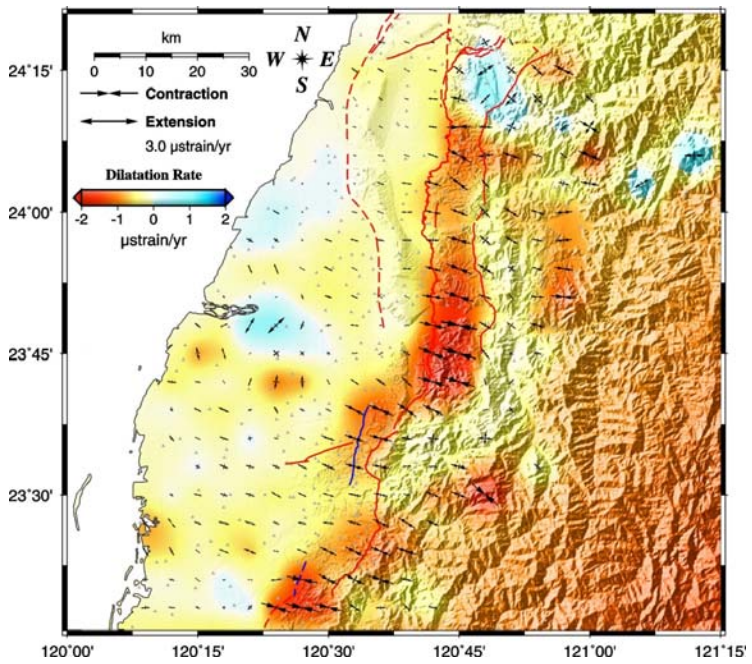


圖 2-3.4：中部地區應變率場分布圖。黑色箭頭顯示地表為壓縮或是伸張變形模式，色階反映地表變形情形，暖色系為壓縮、冷色系為伸張。

2-3-3-3 大地測量矩率分布圖

最小大地測量矩率（minimum geodetic moment rate）如圖 2-3.5 所示，研究區域中其矩率值集中在 1×10^{16} - 9×10^{16} Nm/yr 之間，最大量值（1×10^{17} Nm/yr）主要顯示在車籠埔斷層－大尖山斷層－觸口斷層沿線地區。海岸平原一帶之矩率值較低，介於 4×10^{15} - 9×10^{15} Nm/yr 之間。圖中取樣格點間距為 5 km，內插搜尋半徑為 10 km。

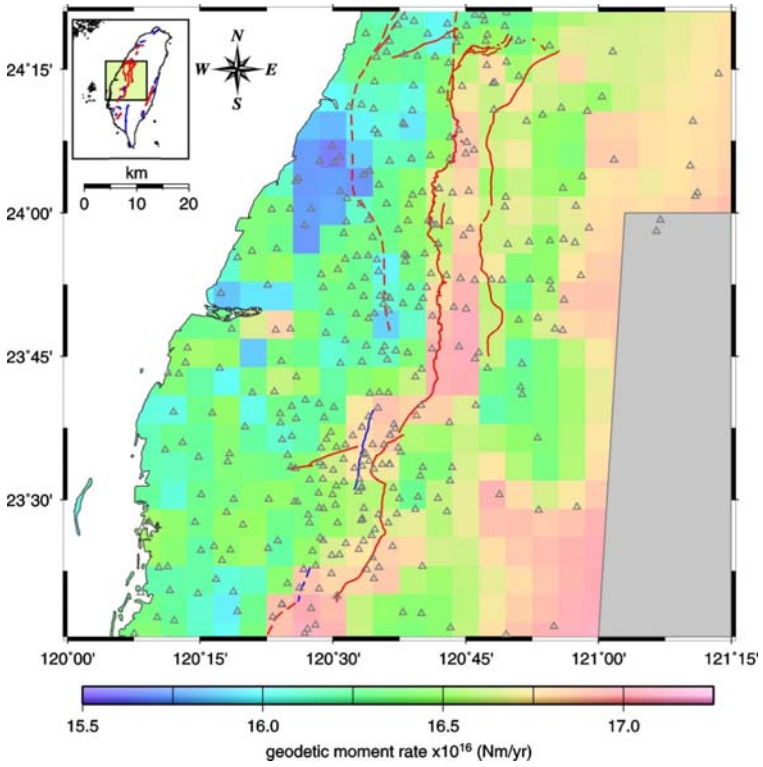


圖 2-3.5：最小大地測量矩率分布圖。三角形顯示 GPS 測點之分布。由於矩率量值係以對數形式遞增，為了觀察之易讀性，故求其指數值以色階表示。

2-4 地震資料處理

台灣位於板塊交界，菲律賓海板塊每年以穩定速率向歐亞板塊聚合，造成地殼變形以及地殼中能量一再的累積與釋放，累積的能量可能以地震（seismic）或無震（aseismic）的形式釋放。地殼發震是由於所承受之應力大於自身岩石強度（yield strength），於是地殼破裂、釋放能量並產生地震波（seismic waves），一旦地震波傳達至地表，被地震觀測站接收，則可留下地震記錄。

2-4-1 資料來源及品質

本研究蒐集台灣地區自有儀器觀測以來約百年（1900-2013）之地震資料，資料來源自1900 至 2013 年台灣地區偵測有感地震事件一共是 553,297 筆。

在 CWBSN 地震目錄原始資料中，根據中央氣象局地震品質分類，若該筆地震資料品質為 D（接收測站數目 Ns＜6，或者兩相鄰測站之最大方位角 GAP＞180°，或者地震震央距離最近之接收測站 DM＞50 km），將予以篩除；此外，地震震央以及深度之定位標準差（ERH、ERZ）大於 5 km 之地震事件，亦將予以篩除。

經過以上篩選條件，台灣中部地區自 1900 至 2013 年之地震事件一共是 159,874 筆。圖 2-4.1 展示所偵測之地震在深度與數量上的變化，以及各深度所累積之地震矩率量值。圖中顯示，地殼藉由地震所釋放之能量主要集中在深度 0-30 km，意即，在深度 30 km 以上之地殼，進行著彈性應變能累積（elastic strains accumulate）、再藉由發震釋放〔Kostrov，1974〕，因此本研究據此定義台灣中部地區之地殼發震深度為 30 km。將 15,862 筆地震事件，再以條件：深度＜30 km、Mw≧3 篩選，剩下 15,862 筆地震，視為台灣中部地區發震深度內之主要發震事件。

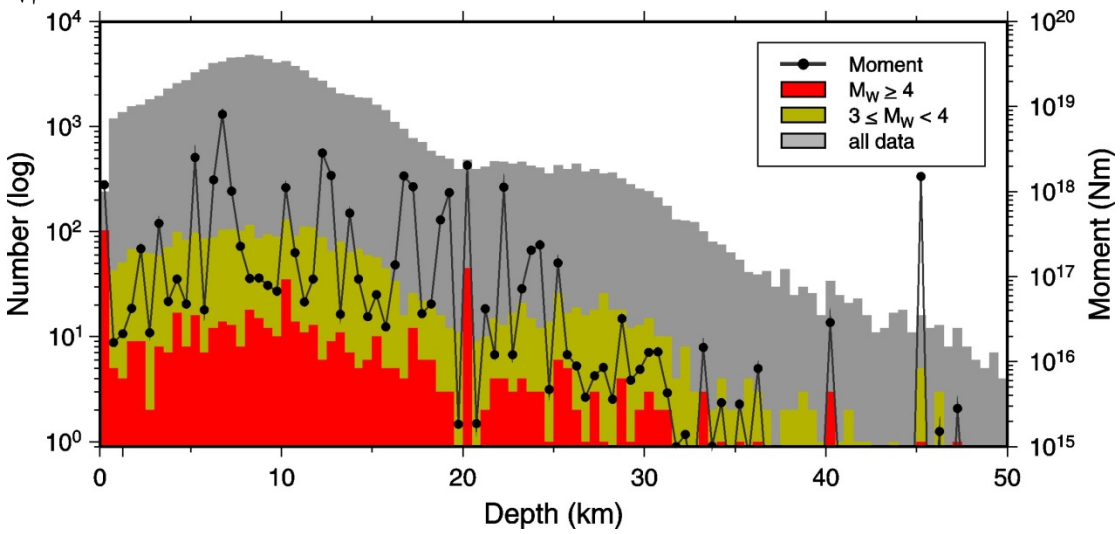


圖 2-4.1：1900 年至 2013 年之地震資料品質展示。長條圖顯示。地震數量在深度之分布情形；折線圖反映地震矩率在各個深度區間累積之情形。

2-4-2 地震矩率計算

圖 2-4.2 所示為台灣災害性地震分布圖。其地震目錄記錄 1900 至 2013 年間，中部地區共 15,862 筆地震，其中 1900-2013 年期間僅記錄有 9 筆災害性歷史地震（表 2-4.1）。

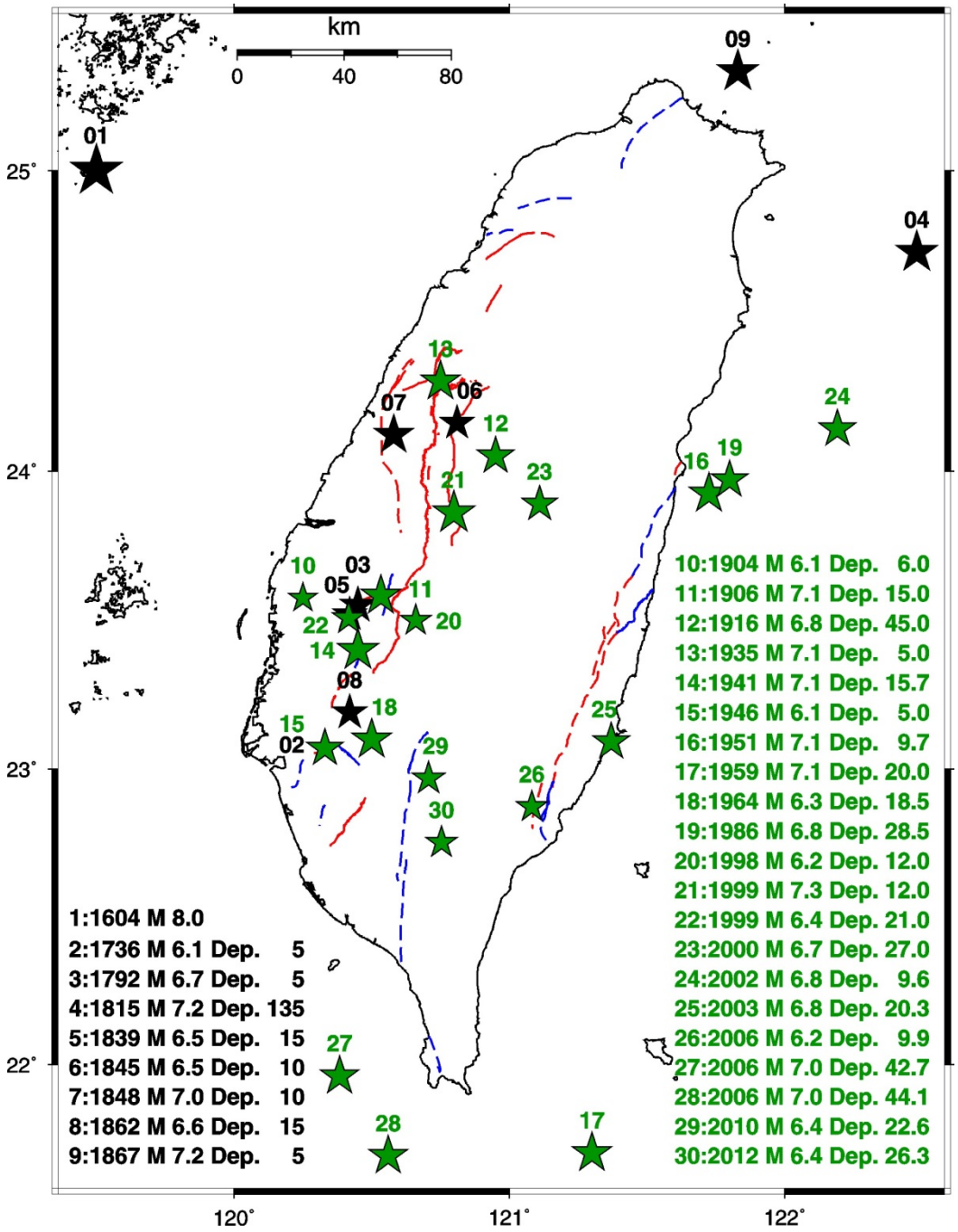


圖 2-4.2：台灣地區 1604-2012 年災害性地震分布圖。星號為災害性歷史地震，數字可對應其年代、規模和深度（黑色為 1604-1867 年，綠色為 1904-2012 年，以 1900 年分界）。

表 2-4.1：台灣中部地區-災害性地震列表〔資料來源自中央氣象局網頁－災害地震彙總報告〕。

編號	年份	深度（km）	規模（M）	備註
10	1904	6.0	6.1	斗六地震。新港附近發生地裂及噴砂
11	1906	15.0	7.1	梅山地震。梅仔坑北方至民雄長 13 公里斷層
12	1916	45.0	6.8	南投地震系列
13	1935	5.0	7.1	新竹-臺中烈震
14	1941	15.7	7.1	嘉義地方（中埔）烈震。草嶺山崩
20	1998	12.0	6.2	嘉義瑞里地震。瑞里飯店嚴重受損，阿里山區多處公路、鐵路坍方中斷，嘉南地區多處房屋毀損。
21	1999	12.0	7.3	二十世紀臺灣島內規模最大地震，車籠埔斷層活動,錯動長達 80 公里。南投、臺中縣災情慘重。
22	1999	21.0	6.4	嘉義地震。
23	2000	27.0	6.7	中橫公路、埔霧公路落石坍方。

使用公式如下：

$$M_W = (0.931 \pm 0.017) M_L - (0.107 \pm 0.081) \quad (2\text{-}4\text{-}1)$$

$$M_W = 2/3 \times \log_{10} M_0 - 6.0 \quad (2\text{-}4\text{-}2)$$

$$\dot{M}_0 = \sum M_0 / \Delta t \quad (2\text{-}4\text{-}3)$$

由於 CWBSN 所記錄之地震規模為芮氏地震規模 M_L（local magnitude scale），經由中央研究院地球科學研究所提出的經驗關係式（2-4-1），可將每筆地震之 M_L 轉換為地震矩規模 M_W（moment magnitude scale），M_W 再經由 Kanamori〔1977〕之經驗式（2-4-2）換算為地震矩 M_0（seismic moment），代表每筆地震所釋放之能量量值。為了計算地震矩率 $\dot{M}_0$（seismic moment rate），以等間距位移之移動空間視窗（moving window）方式進行取樣，如此可消除取樣格點之間的邊界效應，相關參數如下：在研究區域以每 5 km 為格點間距位移、將 10×10 km^2 格子範圍內之所有地震矩 M_0 累加，代入（2-4-3）式即可求得地震矩率，Δt = 113 年為地震目錄時間長度（1900-2013 年）。

2-4-3 地殼矩率分布圖

為了計算地震矩率 $\dot{M}_0$（seismic moment rate），以等間距地震矩率（seismic moment rate）如圖 2-4.3 所示，研究區域中其矩率值在 1×10^{11} - 7×10^{16} Nm/yr 之間。研究區域中，最大量值之分布與大地震（圖 2-4.3）所在位置息息相關，如 1999 年嘉義地震以及 1999 年集集地震之震央，地震矩率最大高達 9×10^{16} Nm/yr。圖中取樣格點間距為 5 km，內插搜尋半徑 10 km。

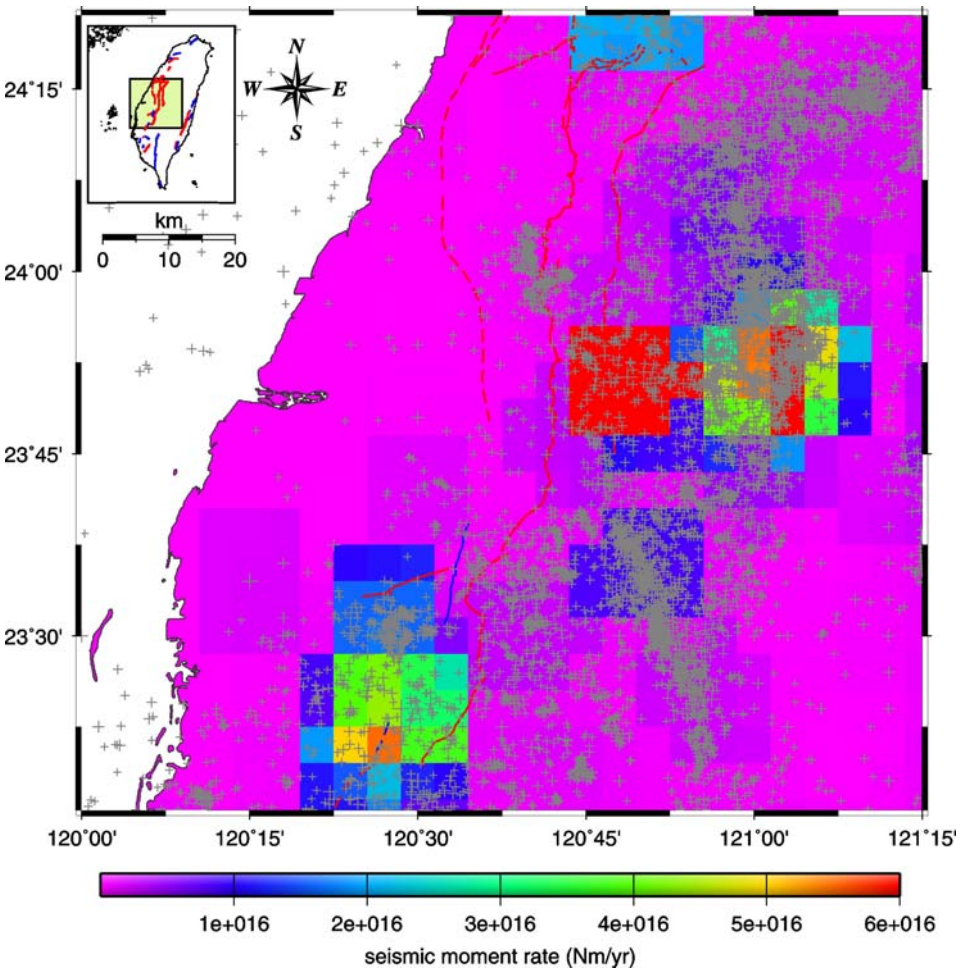


圖 2-4.3：地震矩率分布圖。十字顯示地震之分布。由於矩率量值係以對數形式遞增，為了觀察的易讀性，故求其指數值以色階表示之。

2-4-4 矩率分布

以觀測期長短而言，相較於長週期（long-term）之地震循環，GPS 大地測量以及地震目錄之歷時僅僅是一瞬間，然而地殼所累積之彈性應變能（elastic strain），終將轉換為地震在斷層釋放，因此，縱使任意時間點任意處之大地測量應變非等同於地震應變，求取年平均值後之應變率（strain rate）－大地測量應變率將等同於地震應變率。同理，與應變率呈線性關係之矩率（moment rate, 2-3-1 式）－大地測量矩率亦等同於地震矩率。最小大地測量矩率代表 2002 年至 2013 年期間，地殼受板塊推移而承載之年平均能量，其中包含地震變形以及無震變形之貢獻；地震矩率代表地震目錄記錄期間（1900-2013 年），深度 30 km 以上之地殼藉由發震（seismogenic）行為所釋放之年平均能量。

兩種矩率依照取樣格點統計，如圖 2-4.4 所示，最小大地測量矩率之量值主要集中於 1×10^{16} - 9×10^{16} Nm/yr，地震矩率則介於 1×10^{11} - 7×10^{16} Nm/yr，兩者相差逾百倍，而最小大地測量矩率遠高於地震矩率，意味著，台灣中部地區在觀測期間，地殼所承載之能量多數並非藉由地震釋放，或者，尚未藉由地震釋放。將兩種矩率相減（最小大地測量矩率扣除地震矩率），可求得矩率虧損值（deficit of oment rate），代表能量在地殼中所承載與發震釋放之差距，差距之能量可能在未來以地震（seismic）形式來釋放－能量累積於彈性地殼中，瞬間爆發成地震釋放；或者，自觀測紀錄以來，持續以無震（aseismic）形式釋放－能量隨著塑性地殼之形變逐漸釋放。圖 2-4.5A 即為矩率虧損圖，其分布形態與最小大地測量矩率圖（圖 2-3.5）極為相似，矩率虧損之最大量值主要仍沿著活動斷層線（車籠埔斷層－大尖山斷層－

觸口斷層）分布。將兩種矩率相除（最小大地測量矩率除以地震矩率），可求得矩率比值（ratio of moment rate），矩率比值圖（圖 2-4.5B）之分布形態近似於地震矩率圖（圖 2-4.3）。若把矩率虧損視為最小大地測量矩率與地震矩率之絕對相差量，則矩率比值可視為相對之相差量。在章節 2-3-1 中得知，美國加州、歐亞交界土耳其以及地中海沿岸等地，其地震矩率普遍小於大地測量矩率 1-2 個數量級（十倍至百倍），然而台灣中部之差距卻多達 2-5 個數量級（百倍至十萬倍）。可能造成矩率差異之因素，歸納有點：1）地震目錄歷時過短，未能完整記錄地震循環中所有地震事件；2）地殼進行無震變形，釋放所承載之能量；3）已發生之地震數量（或規模）相較於理論統計過少（或過小），代表該區域地殼之能量正逐漸累積，未來釀成大地震。

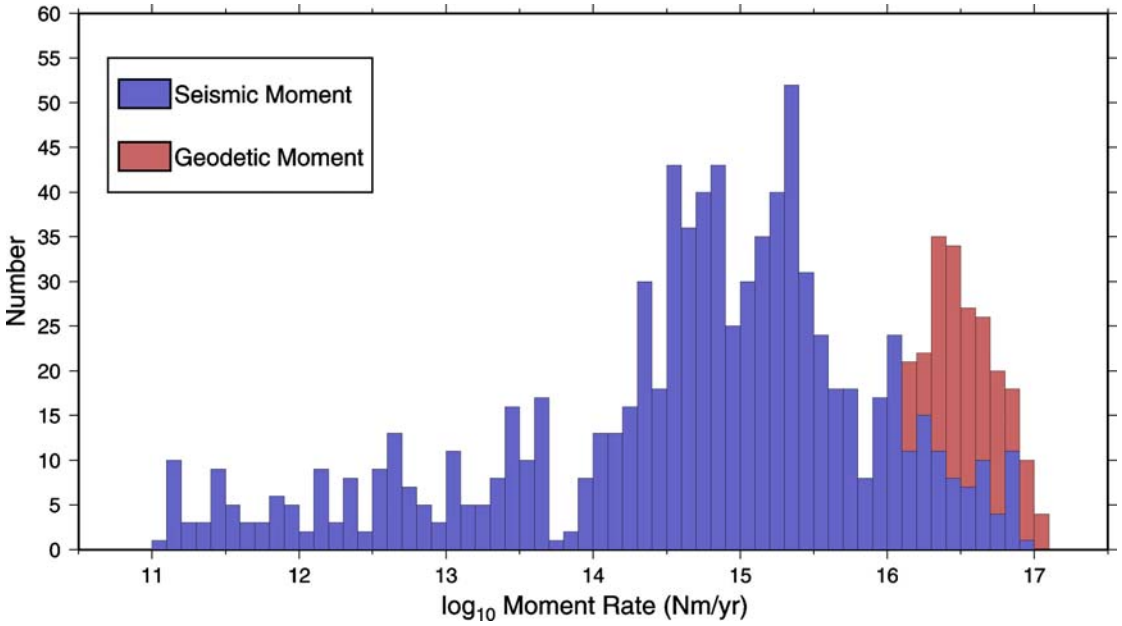


圖 2-4.4：台灣中部地區取樣格點之矩率在矩率區間與個數關係圖。

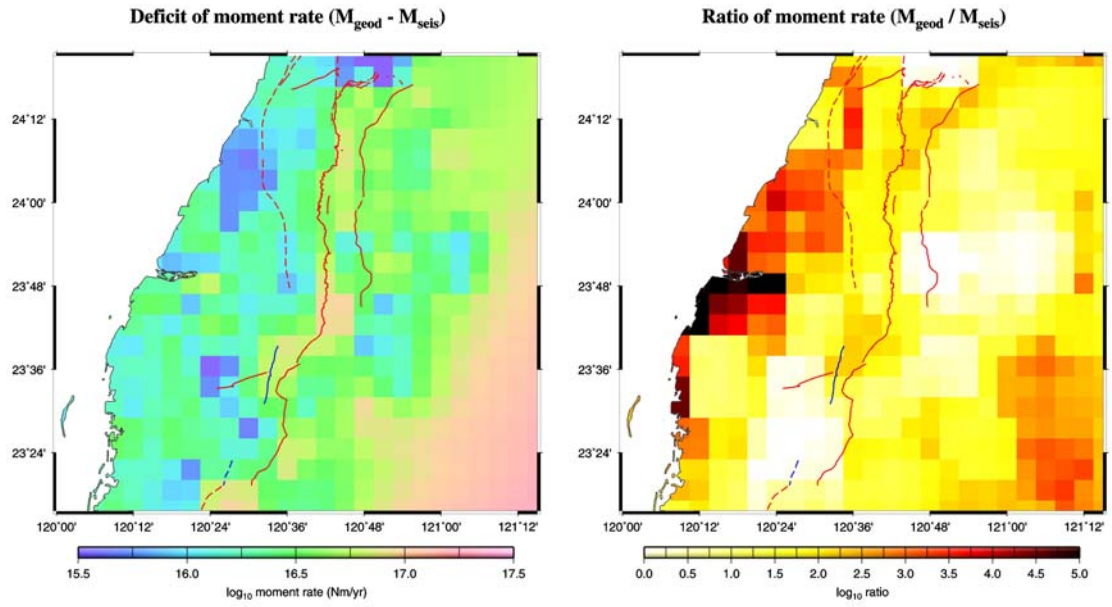


圖 2-4.5：台灣中部地區矩率綜合分析圖：（圖 A）矩率虧損圖，由最小大地測量矩率扣除地震矩率而得。（圖 B）矩率比值圖，由最小大地測量矩率除以地震矩率而得。

第三章、全球衛星定位系統連續觀測站(CGPS)

本年度期末報告利用 GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2006)軟體計算求解精密之測站座標。GAMIT/GLOBK 其主要功能為估計 GPS 站之座標與速度場、同震與震後效應、大氣層遲延量、衛星軌道估計與地球軌道參數(EOP)估計。GAMIT/GLOBK 利用 Bock et al. (1986)與 Schaffrin and Bock（1988）所建立之演算法來分析二次差分觀測量，此法有助於衛星軌道之決定與週波未定值之求解。此外，為了偵測與修復週波脫落之影響，GAMIT/GLOBK 對二次差分觀測量再進行時間差分工作，也稱三次差分觀測量。座標定位工作主要是以使用相位觀測量 (Phase observation)為主，但虛擬距離觀測量（pseudo-range observation）仍在 GAMIT/GLOBK 中處理合理之先驗衛星座標與地面站座標值之提取，也幫助接收機鐘偏差之決定。為了有效處理電離層誤差之影響，GAMIT/GLOBK 利用 L1 與 L2 頻之不同的線性組合來解決不同基線長度所造成電離層之影響。

計算流程為選取台灣連續 CGPS 約制站分別為： 金門連續站（KMNM）、馬祖（MZUM）、白沙連續站（S01R）、澎湖（PANG）、陽明山連續站（YMSM）、板橋連續站（BANC）、新竹連續站（HSIN）、三義連續站（SANI）、北港連續站（PKGM） 、小琉球連續站（LIUC） 、墾丁連續站（KDNM）、鳳林連續站（FLNM）、花蓮連續站（HUAL）、太麻里連續站（TMAM）、以及 S106（圖 3.1）。這些約制站座標及速度場之計算是藉由參與國際導航服務(International GNSS Service (IGS))的全球站中，觀測資料穩定且鄰近臺灣的測站如：DAEJ、USUD、TSKB、WUHN、KUNM、IISC、COCO、PERT、ALIC、TIDB、KOKB、PIMO、GUAM、TAIW、TWTF、TCMS、TNML（圖 3.1）聯合解算求得。由於軟體運算效率之限制，我們將所有以站數、網型幾何及台灣地區斷層分布為原則切割成 8 個子網分別計算，其網型分布如圖 3.2。每個子網之計算均包含 16 個已估計座標與速度場之核心站，並於最後整體網型平差時提供一致之約制。

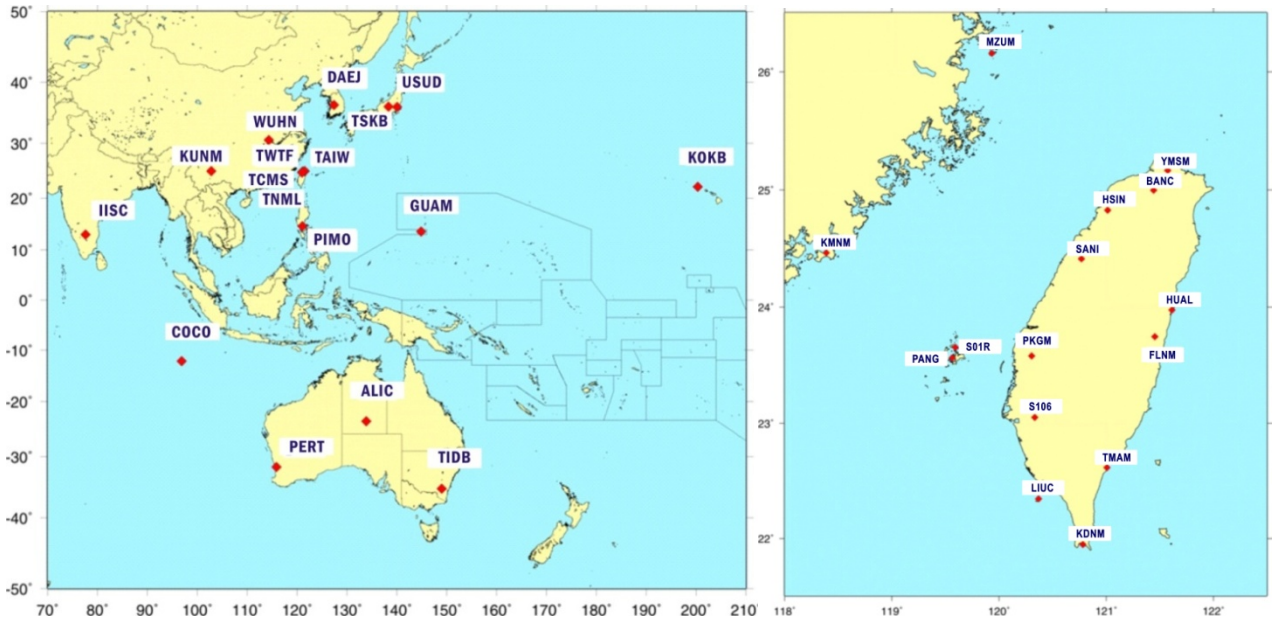


圖 3.1：本計畫約制之國際連續站與國內連續站分布圖。

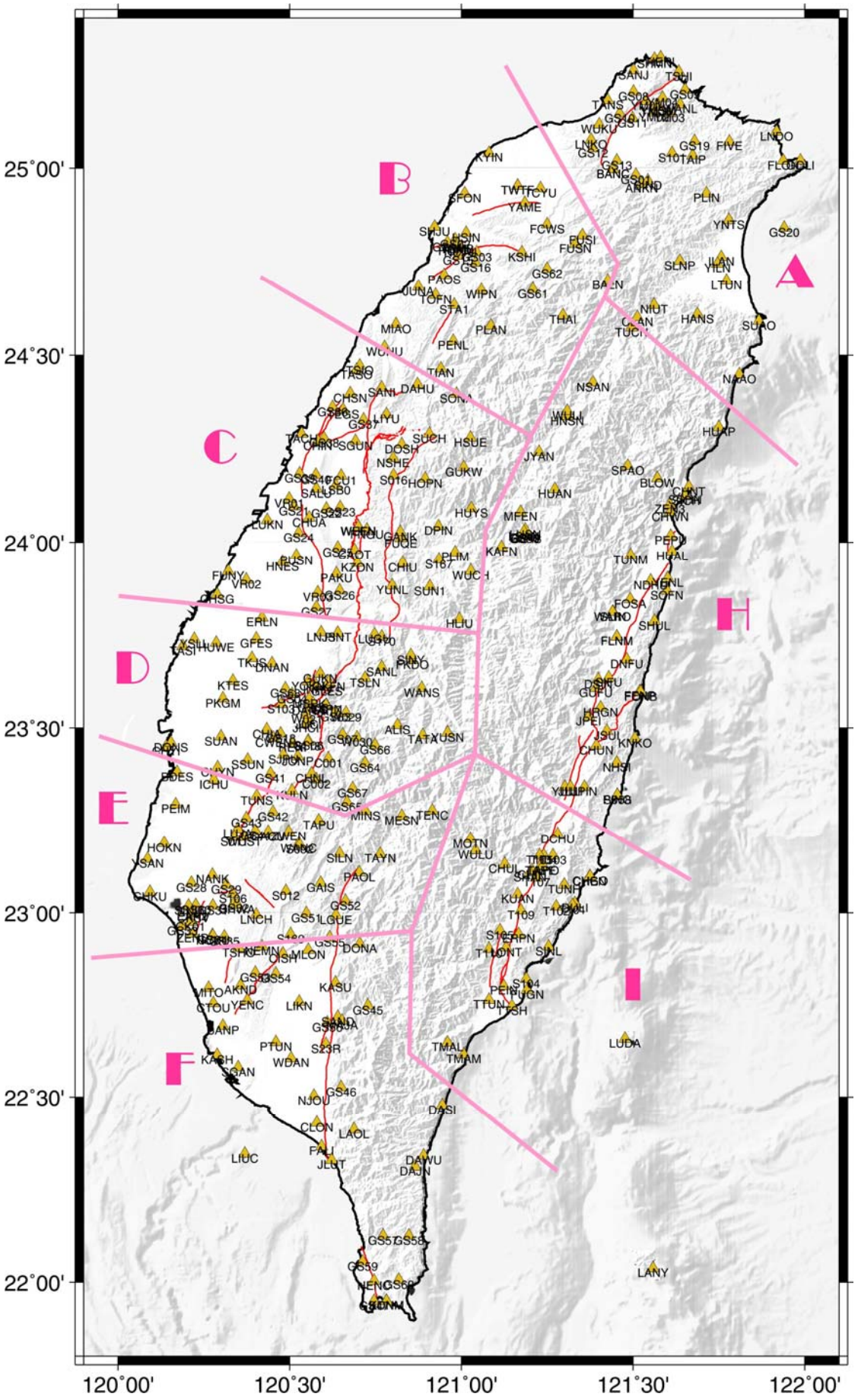


圖 3.2：地調所連續站和與其它單位所交換之連續站分布圖，共 246 站。圖中的各分網乃先行分別計算後再合併所有網進行網型平差，最後取得每站在一致之框架下之時間序列。

3-1 連續 GPS 站解算成果分析

本次期末報告所使用之 GPS 連續站資料係由經濟部中央地質調查所所提供，連續站所屬機構包括中央地質調查所、中央氣象局、中央研究院、內政部、國土測繪中心、中正大學等單位，設置之全台連續全球定位系統(Continuous Global Positioning System, CGPS)測站的 2013 年資料，共 256 站。由於各測站設置背景不同，在首次利用 GAMIT 計算時所需提供資基本資料各有差異，由於某些測站資料的精度不佳將會造成解算時誤差過大而遭剔除，因此之前期中報告主要瞭解各測站之狀況，並彙整時間序列（附錄 3-1 及附錄 3-2），其中座標跳變動過大與誤差過大的點位將與測站管理員做比對，以瞭解發生的原因。期末報告時將以長時間資料解算並將觀測資料蒐集完整以利測站移動速度場分析並將資料跳階或地震影響加以探討。圖 3-1.1 為利用 2013 年 1 月至 9 月結果初估年速度場之結果。

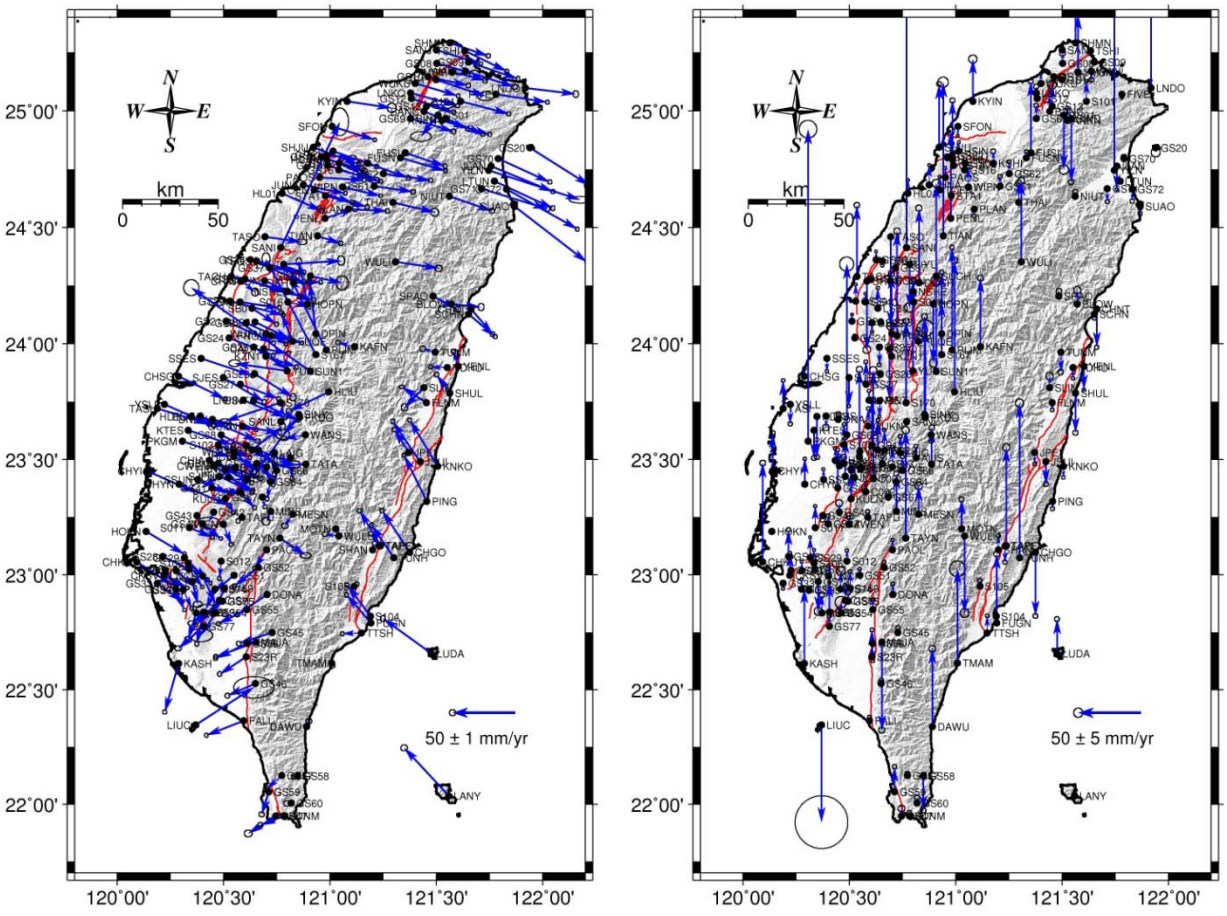


圖 3-1.1：2013 年 1 月至 9 月結果初估年速度場。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

由解算結果顯示水平速度場在 ITRF2008 框架下在台南以北測站多為西北往東南移動，以南地區多呈現東北往西南移動。此外，結果顯示中部地區近中央山脈區域之測站多為向西移動，且移動量相對偏大。對比中央氣象局地震資料庫，2013 年 3 月 27 日以及 2013 年 6 月 2 日分別在南投縣仁愛鄉發生兩次規模 6 以上地震，推測是造成此區域位移量大的原因。另外，以垂直速度場來看，解算結果顯示許多測站在本年度速度都偏大。此原因初步推估為測站更換天線而為更新資料庫所致解算錯誤。因此，本研究再針對兩次南投區域地震，以及測站更換天線為更新資料庫作進一步的分析。

3-2 GPS 連續記錄資料分析

2013 年 6 月南投地震（亦稱為 602 南投地震）發生於 2013 年 6 月 2 日台灣時間下午 13 時 43 分 3.2 秒，震央位於台灣南投縣政府東方 29.3 公里處（南投縣仁愛鄉境內），深度 14.5 公里，芮氏規模 6.5 的逆斷層型地震。震央位置與 2013 年 3 月南投地震的震央位置相當接近。分析兩次地震附近測站時間序列，受到較大同震影響的測站為 DPIN、PLIM、S167、S170、SINY 以及位移量最大的 SUN1。其最大水平位移量為 0602 地震時的同震變形，向北向西各為 32.6mm 以及 33.0mm (圖 3-2.1)。將其同震變形修正後，可得到 2013 年震間位移速率三個方向分別為：向北 3.0±1.0mm/yr、向西 7.0±1.0mm/yr 以及垂直向上 28.8±1.8mm/yr(圖 3-2.2)。整合全台歷史資料與 2013 年修正後速度場，結果如圖 3-2.4。

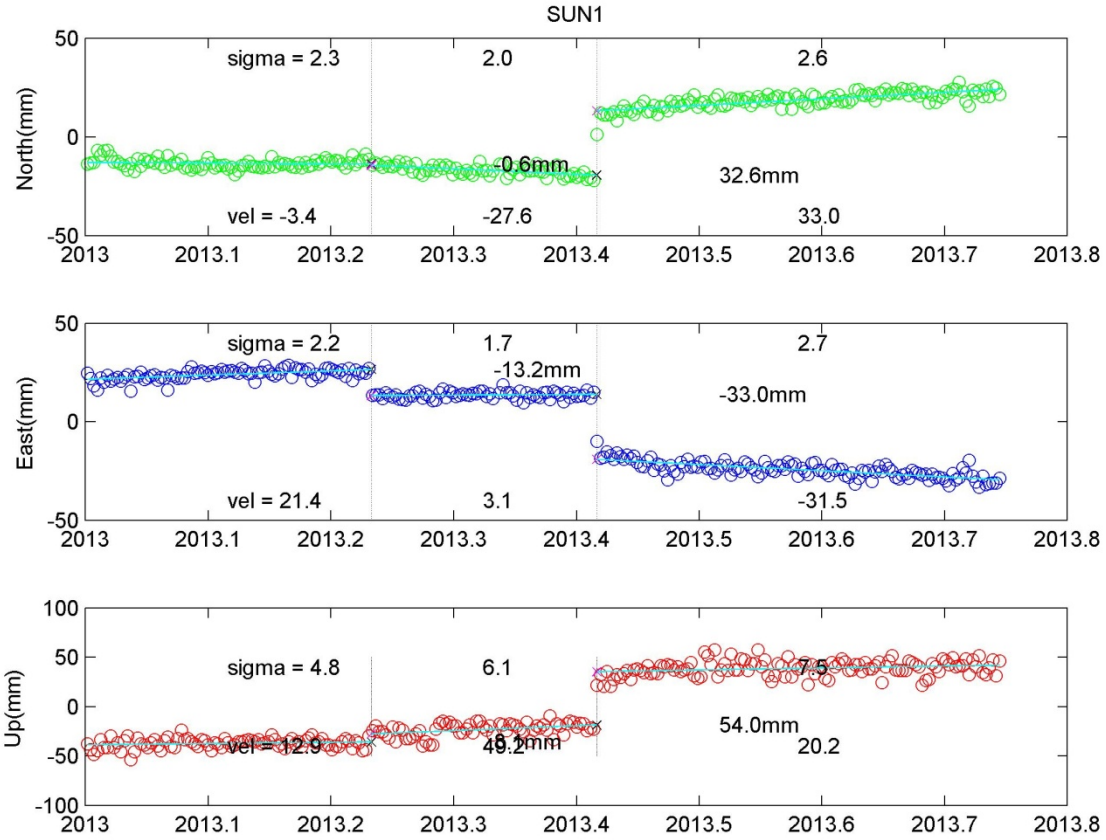


圖 3-2.1：測站 SUN1 每日解時間序列。圖中黑線為 2013 年 3 月以及 2013 年 6 月南投地震發震時間。

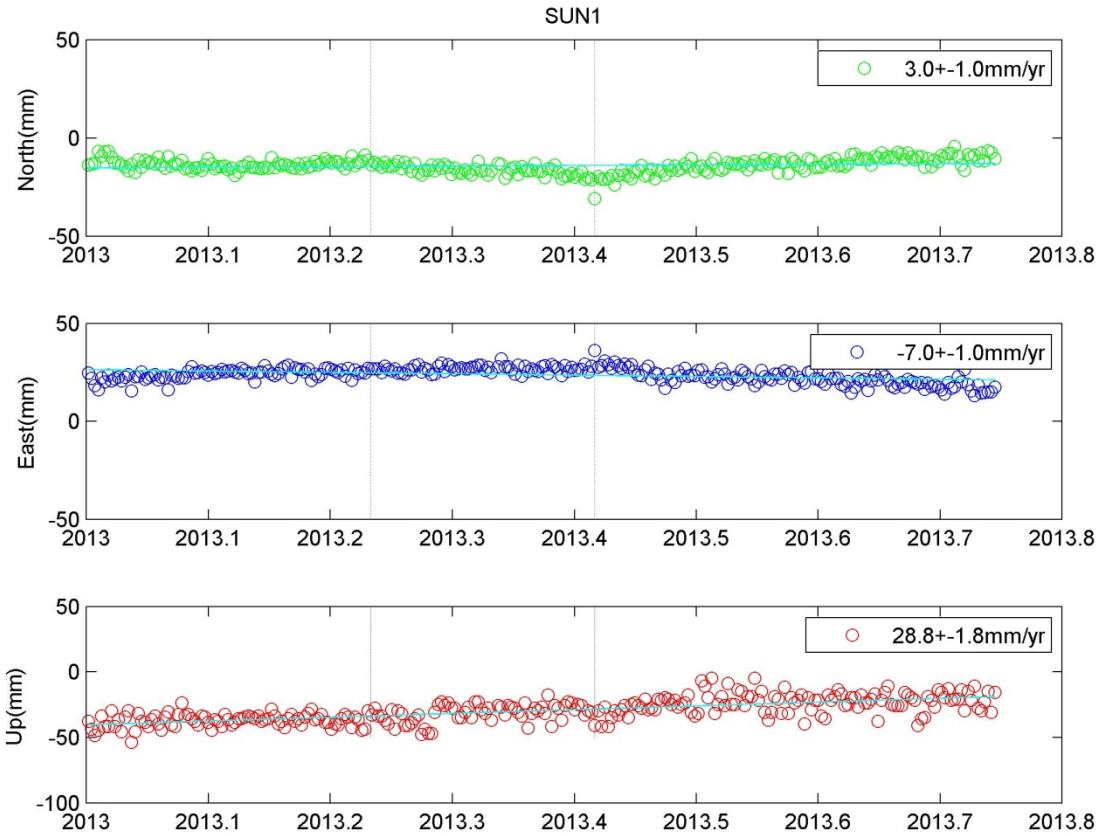


圖 3-2.2：測站 SUN1 單日解時間序列(扣除 2013 年 3 月以及 2013 年 6 月南投地震所造成地表同震位移。

除了地震發生造成的地表位移外，本研究團隊根據 GPS 解算之時間序列分析，分別觀察到在 2013 年 4 月中、6 月底以及 7 月初三個時期，由國土測繪中心、內政部、中央研究院以及地調所所架設之測站，都出現高程方向上的座標不連續。由於這些測站前後兩天之間高程變化大約為 20-40mm (圖 3-2.3，以國土測繪局測站 DOSH 為例)，推測為單位更新天線後造成與資料庫天線高度不一致所形成的位移量。目前已確定中央研究院確實在該段期間內有更換該單位之測站天線，各測站修正量詳見表 3-2.1。將其高程方向上位移修正後，並與歷史資料連結整合，得到一較準確之垂直速度場，如圖 3-2.4 及附錄 3-2。

另外，為了能詳細了解台灣地區的構造變形狀況，將上述計算出來的速度場相對位於被動大陸邊緣的 S01R 測站速度值，換算為相對 S01R 座標系統，如圖 3-2.5。在此座標系統下，能夠清楚的看到台灣地區最大變形量還是位於東部地區，即為歐亞大陸板塊與呂宋島弧聚合碰撞區域，而跨過縱谷斷層系統位移量隨即減少。同樣的情況也在台灣地區西部展現，較大的位移量都集中在中央山脈西側，跨過斷層進入西部麓山帶位移量也逐漸遞減。另一方面，南北方向上的變化則是由南向北遞減，只在宜蘭地區有少量由西北往東南的位移旋轉量。

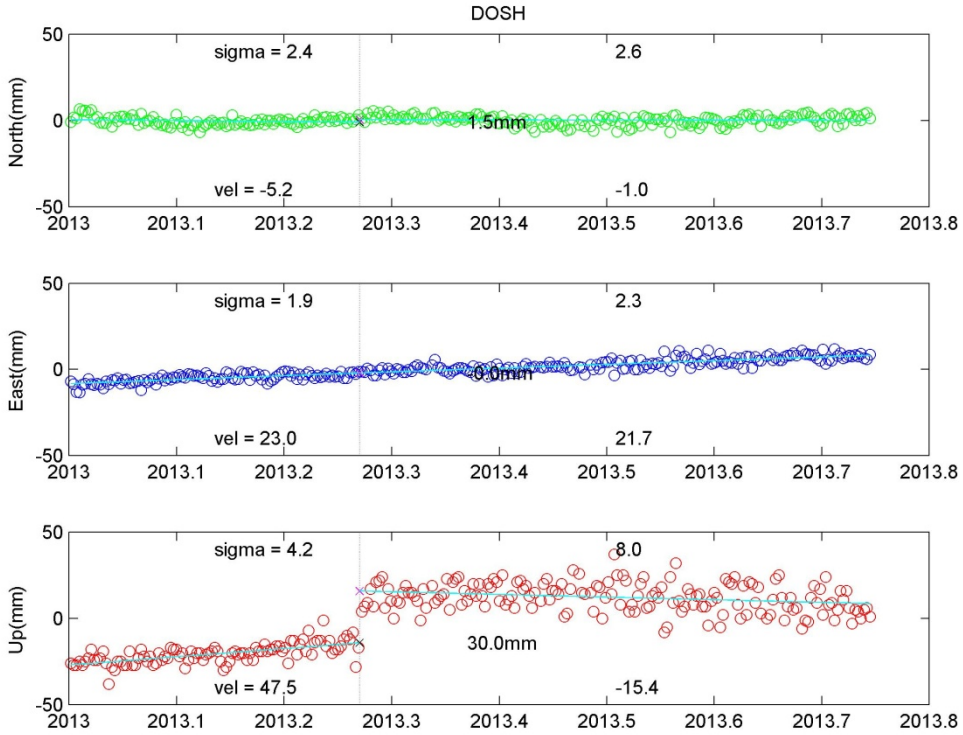


圖 3-2.3：測站 DOSH 每日解時間序列。黑線為 2013 年 4 月推估其更換天線日。

表 3-2.1：GPS 高程方向修正量。

測站名稱	單位	位移量(mm)	測站名稱	單位	位移量(mm)
2013 年 4 月					
CAOT	NLSC	-22.6	PKGM	MOI	132.8
CHGO	NLSC	-24.4	SIND	NLSC	-28.7
CHYI	MOI	29.6	TACH	MOI	33.0
DOSH	NLSC	30.0	TAYN	NLSC	43.6
JHCI	NLSC	34.2	TIAN	NLSC	-65.9
KAFN	NLSC	25.3	WULI	NLSC	30.5
KASH	MOI	32.7	YMSM	MOI	18.2
MAJA	NLSC	-35.7			
2013 年 6 月					
C001	IES	48.3	GS58	CGS	-19.4
CHKU	IES	38.4	TAPO	IES	38.0
FNGU	IES	45.3	TASO	NLSC	-44.1
FUSI	NLSC	29.8	TUNH	IES	55.7
GS01	CGS	-37.5	WULU	NLSC	-41.8
2013 年 7 月					
FUGN	MOI	32.8	SHJU	MOI	29.0
KZN1	IES	36.4	SHMN	NLSC	33.9
LNDO	MOI	35.9	YILN	NLSC	148.3

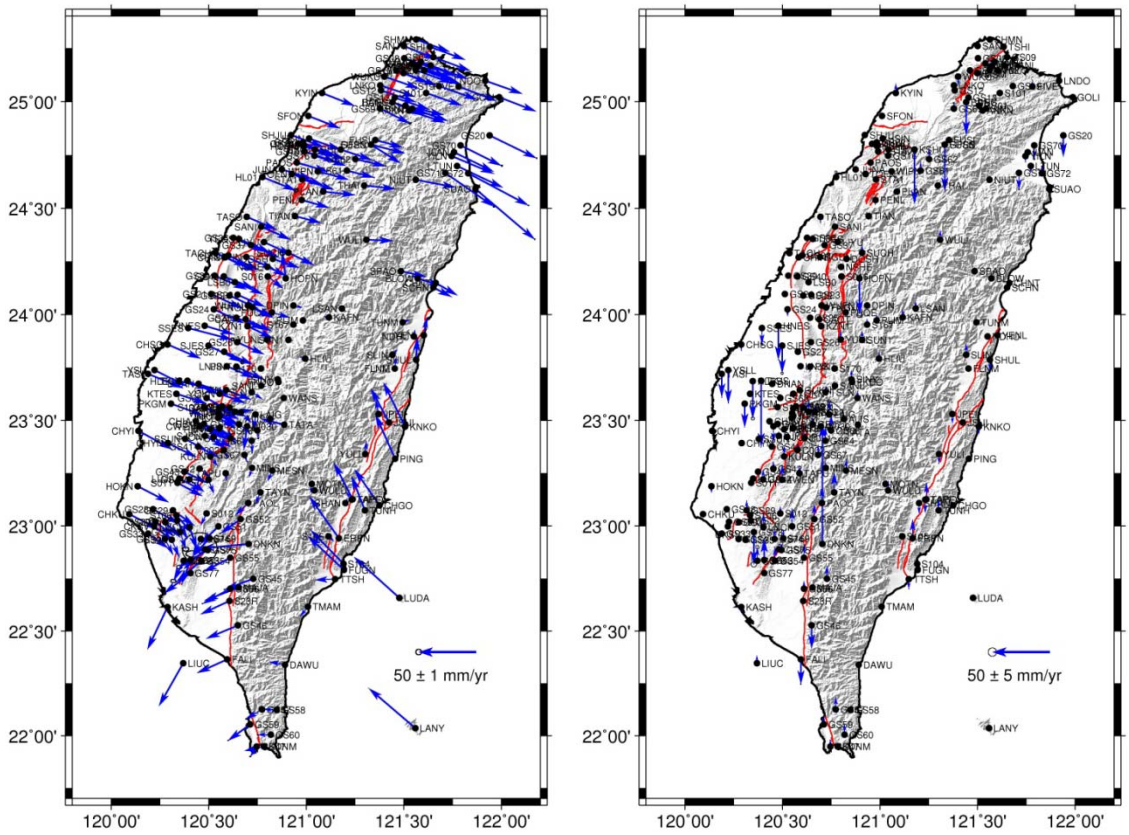


圖 3-2.4：整合歷史資料至 2013 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場(相對 ITRF2008 全球座標系)。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

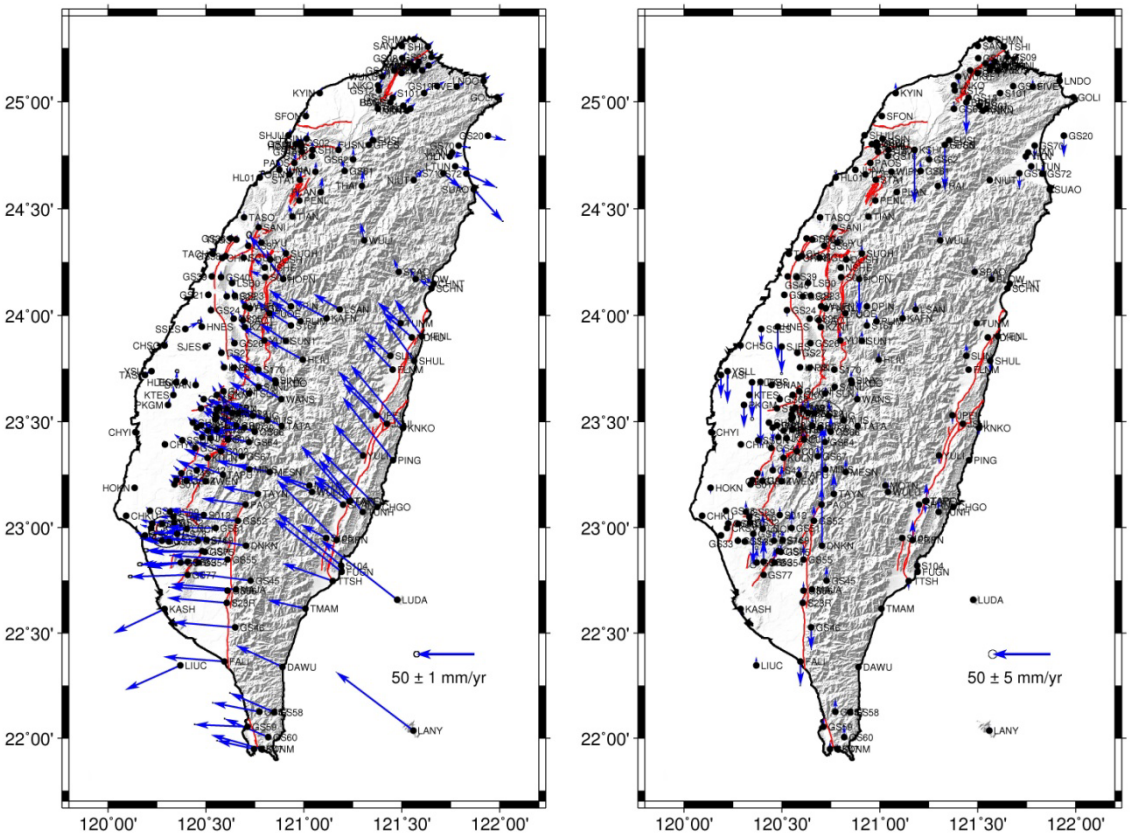


圖 3-2.5：整合歷史資料至 2013 年 11 月，並修正同震位移及測站異常之年速度場(相對 S01R 澎湖白沙)。左圖為水平方向速度場，右圖為垂直方向速度場。

3-3 南投地震同震變形資料分析

本研究團隊另外針對 2013 年 6 月南投地震，利用美國推進噴射實驗室(Jet propulsion laboratory, JPL)所研發的 GIPSY 軟體，計算高頻(1Hz)的資料，以期望得到地震發生前後，地震震央附近地表動態變形過程。與其他單位(GPSLAB、CWB、成功大學)公布的解算結果相似(圖 3-3.1)，南投地震同震位移都以水平方向上較為明顯，最大變形為位於日月潭的 SUN1 測站，其他周圍距離約 50km 的測站以內也能觀測到明顯的同震地表變形。

由於其他單位解算之同震變形皆為一天一筆之 GPS 資料，其必須等到震後數天才能計算，震後變形勢必也會貢獻一定的位移量。而本研究團隊利用動態解算高頻 GPS 資料，雖然其精確度較一般靜態 GPS 解算差，但可於地震發生後立即解算地震發生當下前後數分鐘地表變形的動態位移。當有大地震發生時，更可精確量測震前、同震與震後變形，提供孕震與發震過程及斷層力學研究的重要素材。日後也將持續分析利用連續 GPS 站和井下應變儀觀測資料，計算各地區的 GPS 應變時間序列，並比對井下應變儀資料，可以用來探討地震與地殼應變間的關係。

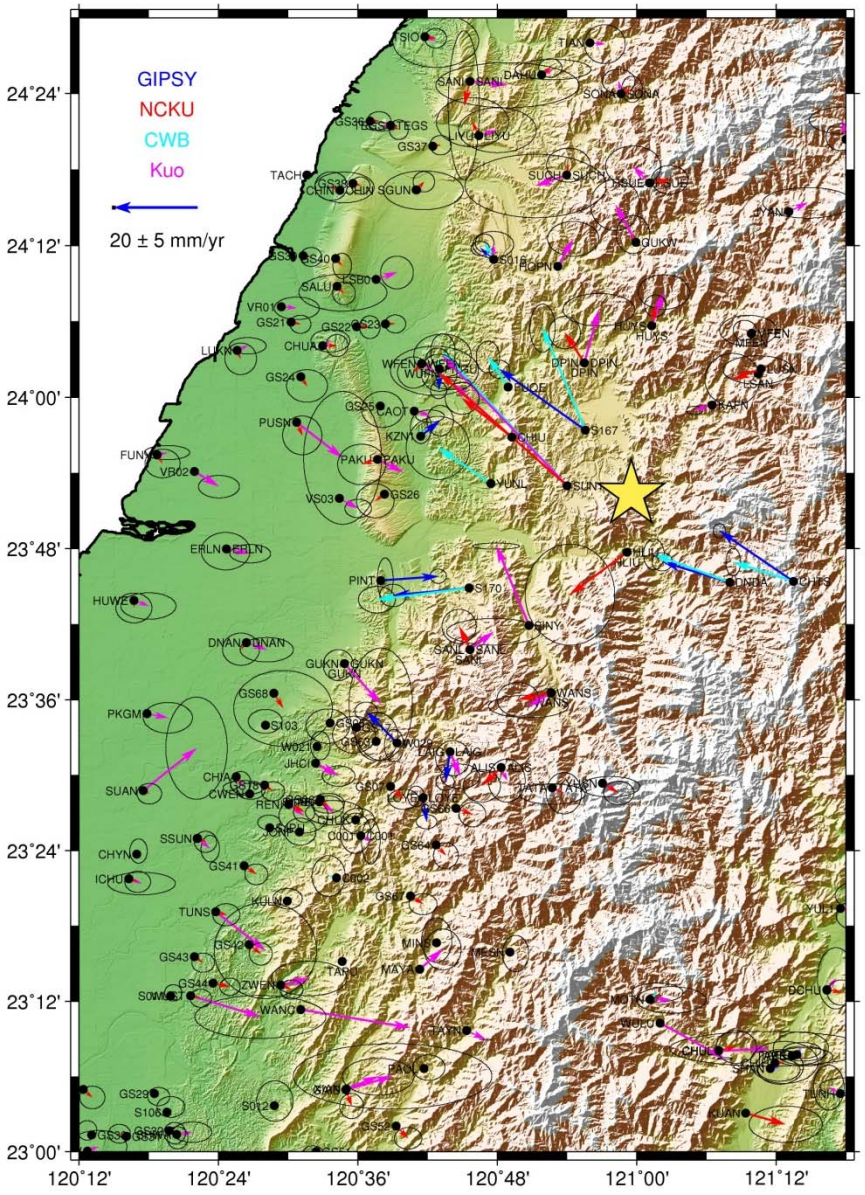


圖 3-3.1：20130602 南投地震同震變形圖(星星為地震震央位置)。

3-4 瑞穗地震同震變形資料分析

台灣時間 2013 年 10 月 31 日 20 時 02 分花蓮瑞穗地區發生一芮氏規模 6.3 的地震，其震央位於花蓮縣政府南偏西 52.9 公里處(花蓮縣瑞穗鄉)，深度 19.5 公里。本研究團隊同樣針對此地震進行高頻 GPS 動態解算，並整合其他單位 GPS 單日解同震位移速度場。取其地震前後 10 小時動態解，與單日解結果相似(圖 3-4.1)。但若細看地震前後 1 小時，可發現地表位移都較大，且約在 10 分鐘後，數站都出現一振幅明顯的變形量(圖 3-4.2)。此部分本團隊還將持續分析是否與餘震發生或是其他環境效應有關。另圖 3-4.3 是使用瑞士波昂大學(University of Bern)所研發的後處理計算程式，以池上牧野渡假村 SHAN 為參考站，計算震央附近 DSIN, GUFU, JPEI 及 JSUI 連續固定站一秒採樣率的地震前後一分鐘的動態結果，圖中紅色線為地震發生的時刻，而橫座標為時間，成果顯示一秒採樣率可詳細記錄測站的地形變化，可作為後續動態變形模式的參考。

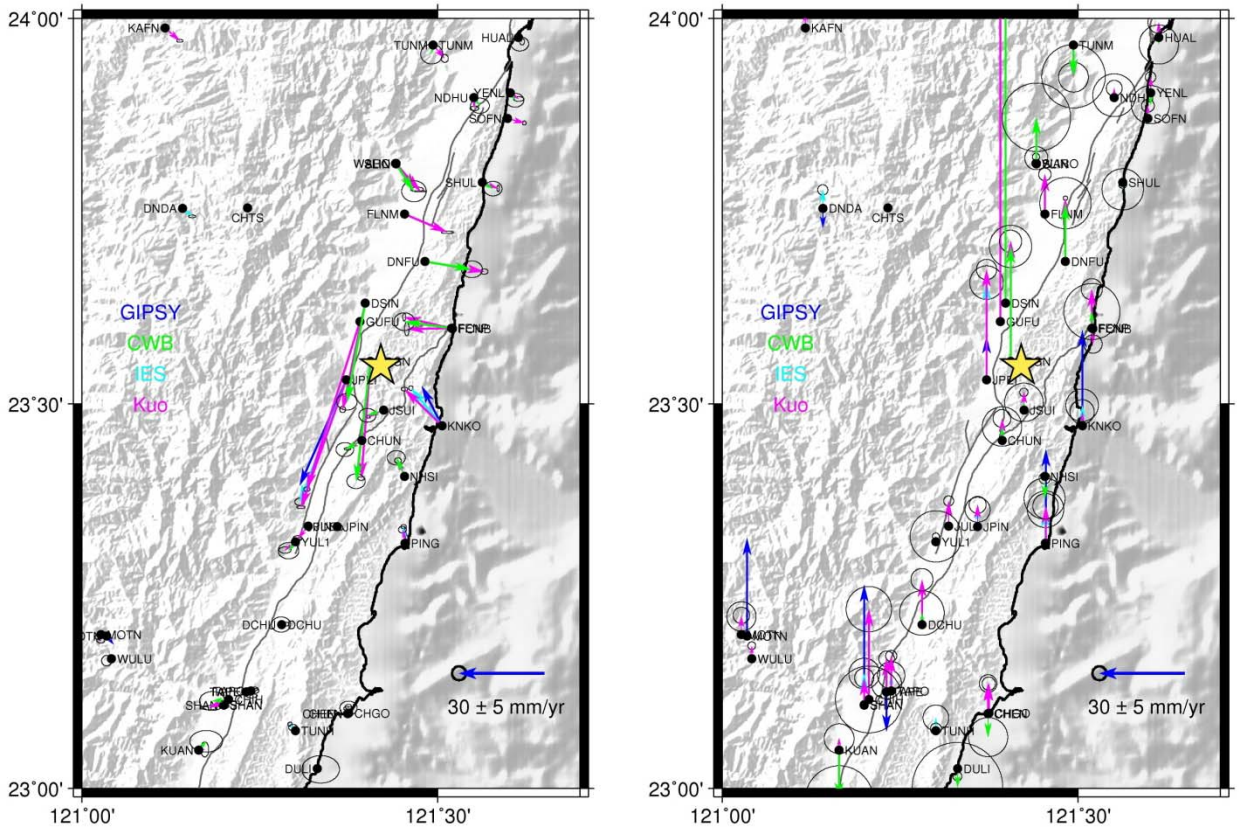


圖 3-4.1：20131031 瑞穗地震同震變形圖(星星為地震震央位置)。

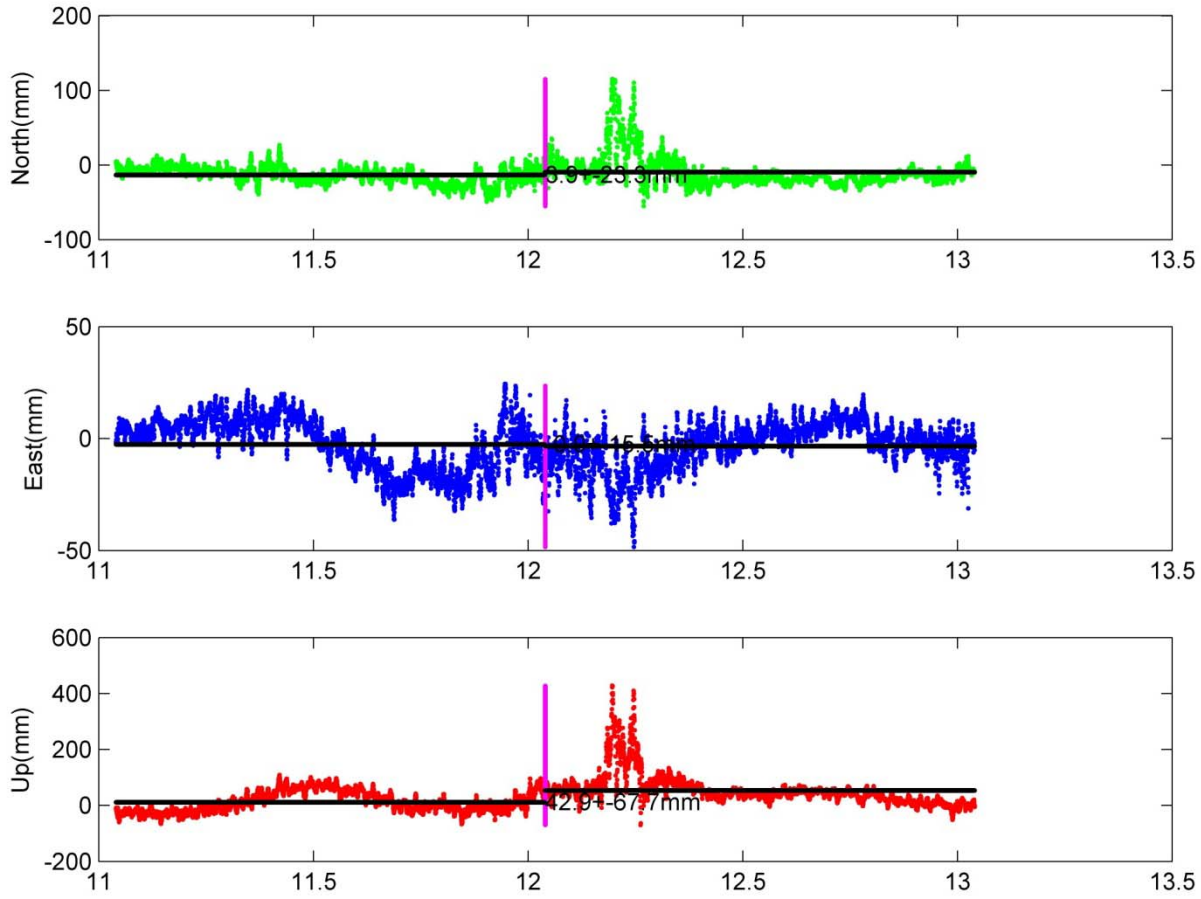


圖 3-4.2：測站 PING 高頻動態解地震前後 1 小時時間序列。粉紅線為 20131031 地震發震時間。可觀察到地震發生後約 10 分鐘有一明顯振幅異常，此原因尚待釐清。

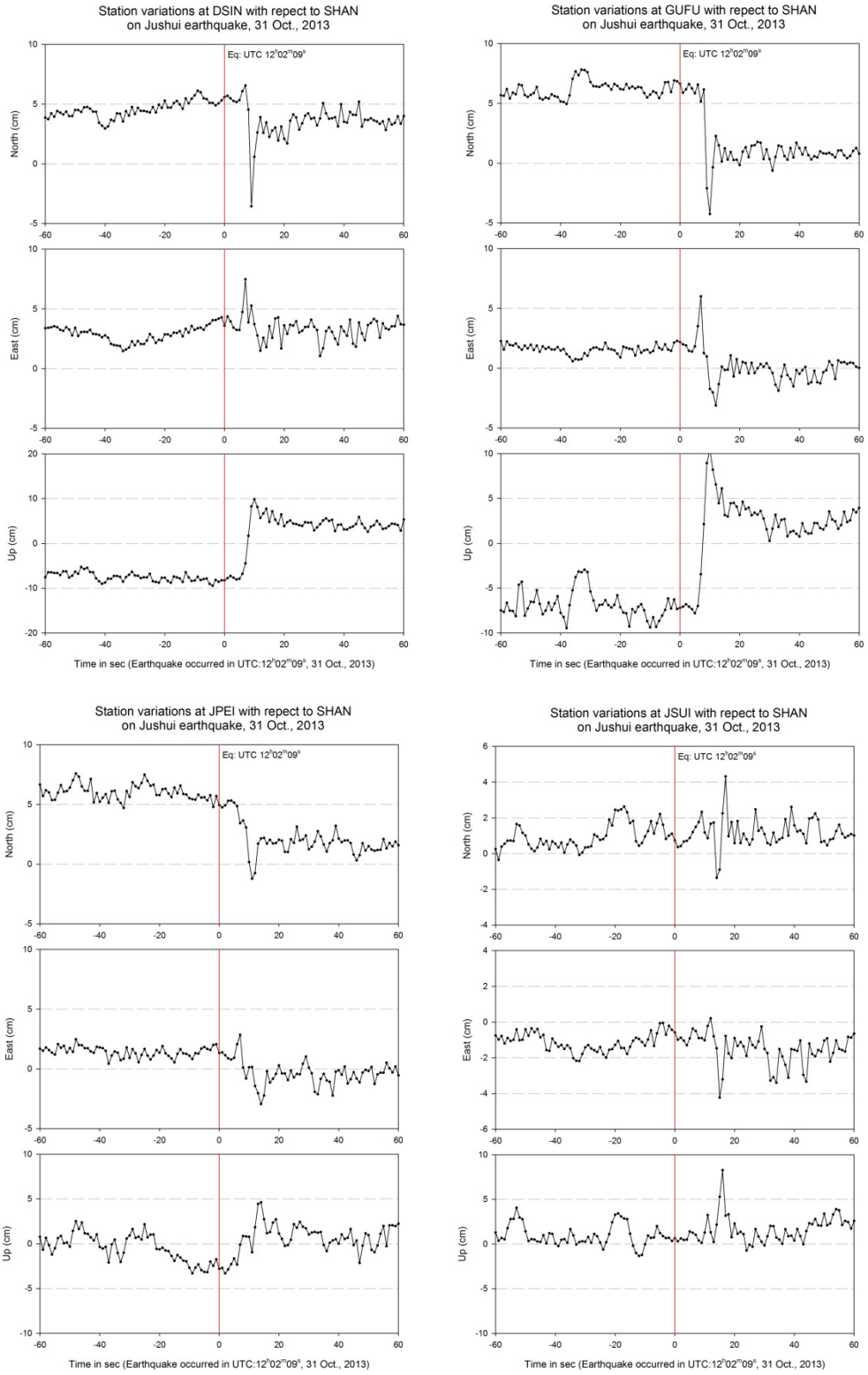


圖 3-4.3：測站 DSIN、GUFU、JPEI、JSUI 高頻動態解地震前後 1 分時間序列。紅線為 20131031 地震發震時間。

3-5 小結

本次期末報告除了解算地調所所設置及其交換之全台連續全球定位系統測站的 2013 年資料外，也分析比較 6 月南投地震及 10 月 31 日瑞穗地震同震變形，由於各測站設置背景不同，在期中報告時發現 GS05 及 GS13 解算誤差甚大，探討原因發現，此兩測站分別移動約 2 及 10 公尺，推究可能通視或其它原因而重設新站，一般會另用新站名，以減少計算或後續分析的錯誤；由計算資料也發現 4-6 月有部份測站在時間序列分析時，測站位置有些微更動，尤其在高程向，經比對中央氣象局地震目錄，該時段測站附近亦無地震，對照中研院地球所維修記錄發現，測站的接收天線更換，因此與其它單位交換長期資料的同時，亦應一併要求測站維修記錄，以利後續分析。

於估算同震變形方面 2013 年 6 月 2 日南投規模 6.5 的地震，其他單位解算之同震變形皆為一天一筆之 GPS 資料，其必須等到震後數天才能計算，震後變形勢必也會貢獻一定的位移量。而本研究團隊利用動態解算高頻 GPS 資料，雖然其精確度較一般靜態 GPS 解算差，但可於地震發生後立即解算地震發生當下前後數分鐘地表變形的動態位移。當有大地震發生時，更可精確量測震前、同震與震後變形，提供孕震與發震過程及斷層力學研究的重要素材；而 2013 年 10 月 31 日 20 時 02 分花蓮瑞穗地區發生一芮氏規模 6.3 的地震，其震央位於花蓮縣政府南偏西 52.9 公里處(花蓮縣瑞穗鄉)，深度 19.5 公里。本研究團隊同樣針對此地震進行高頻 GPS 動態解算，並整合其他單位 GPS 單日解同震位移速度場。取其地震前後 10 小時動態解，與單日解結果相似，更利用瑞士波昂大學所研發的後處理計算程式，以池上牧野渡假村 SHAN 為參考站，計算震央附近 DSIN, GUFU, JPEI 及 JSUI 連續固定站一秒採樣率的地震前後一分鐘的動態結果，成果顯示一秒採樣率可詳細記錄測站的地形變化，可作為後續動態變形模式的參考。

因此本年度報告除瞭解各測站之狀況，並彙整歷史時間序列，由解算結果顯示水平速度場在 ITRF2008 框架下在台南以北測站多為西北往東南移動，以南地區多呈現東北往西南移動，此結果與過去長期解算結果約略相同。對於同震研究方面，本研究團隊不僅整合各研究單位的成果，亦利用動態解算高頻 GPS 資料，解算地震發生時的瞬時地形變化，以供後續研究。

第四章、PS-InSAR 技術

PS-InSAR 觀測結果是沿著衛星方向(Line of Sight, LOS，或是所謂 Slant Range Direction, SRD)，而 GPS 或精密水準測量結果卻是沿著垂直方向，嚴謹來說，兩者是無法直接拿來作比較。如何解決這問題，成為本計畫第 1 年期末報告中首要的工作。在本期期末報告中，我們應用黃孟涵(2006)方法，將 GPS 的垂直與水平速度場轉換成 LOS 方向的向量，並與 PS-InSAR 結果做比較。由於水準測站上缺少水平的速度場資料 (即 GPS 與水準測站不共站)，因此直接比較 PS-InSAR 之 LOS 速度場與水準的垂直速度場。

根據 GPS 水平分量來獲得 PS-InSAR 垂直分量，在此我們呈現比較 PS-InSAR 與四條中部地區精密水準測線之垂直變形資料的結果。水準測線編號?10、11、17 和 19 (圖 4.1)，測線橫跨中部地區主要斷層，如車籠埔斷層和大茅埔－雙冬斷層。PS-InSAR 工作部份，由 ALOS (Advanced Land Observing Satellite)、ERS (European Remote Sensing Satellite)-1/2 以及 ENVISAT 等衛星所拍攝的 SAR 影像，詳細資料已在第四章(PS-InSAR 技術)說明。

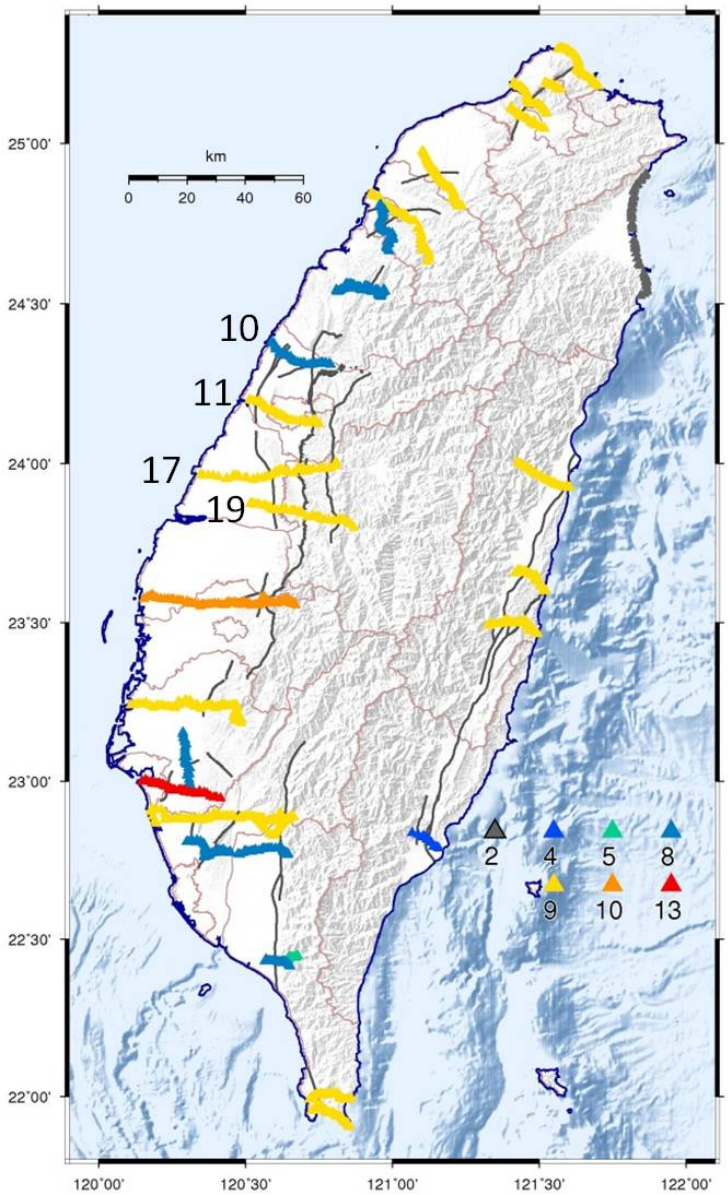


圖 4.1：精密水準測線位置。PS-InSAR 工作部份應用了水準測線編號 10、11、17 和 19。

4-1 結果檢驗方法簡介：GPS向量轉換法

修正黃孟涵(2006)方法，根據 GPS 水平分量來獲得 PS-InSAR 垂直分量，以下是簡述其原理：衛星是分別以 Azimuth 和 Range 來描述軌道和掃瞄方向(如圖 4-1.1, 兩個粉紅色箭頭所示)。首先，要轉換成與正北平行的一般直角座標系(Cartesian coordinate system) (圖 4-1.1, XY 指示箭頭)。假設位移向量爲 **V=(**a, b, c**)** (如圖 4-1.1, 粗紫色箭頭所示)，需投射/轉換到衛星方向，標示爲(a',b', c')，從以下公式可求得兩者關係：

$$\mathbf{V}=\begin{bmatrix}a'\\b'\\c'\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\phi & \sin\phi & 0\\-\sin\phi & \cos\phi & 0\\0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\b\\c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a\cos\phi+b\sin\phi\\-a\sin\phi+b\cos\phi\\c\end{bmatrix}$$

其中，ψ 爲平行正北(Y 箭頭)與衛星軌道方向之間夾角(Azimuth 箭頭); a、b 爲 GPS 沿著東方、北方位移的投射; a'、b'爲位移向量 **V** 投射到衛星方向。之後，應用下列公式投射/轉換位移到衛星方向：

$$\Delta r = h\cos\theta - (a\cos\psi + b\sin\psi)\sin\theta$$

其中，Δr 爲沿著衛星方向或是所謂斜距距離(Slant Range Direction, SRD)位移，θ 爲衛星視角，h 是垂直位移量，以上公式可被改寫爲下列公式：

$$h = \Delta r \sec\theta + (a\cos\psi + b\sin\psi)\tan\theta$$

從以上兩個公式，我們可知道衛星方向和直角座標系之間關係，PS-InSAR 垂直分量可從 GPS 水平分量獲得。需特別注意的是，黃孟涵(2006)所舉例為左視系統，以上公式已修正為本計畫所需之右視衛星系統。

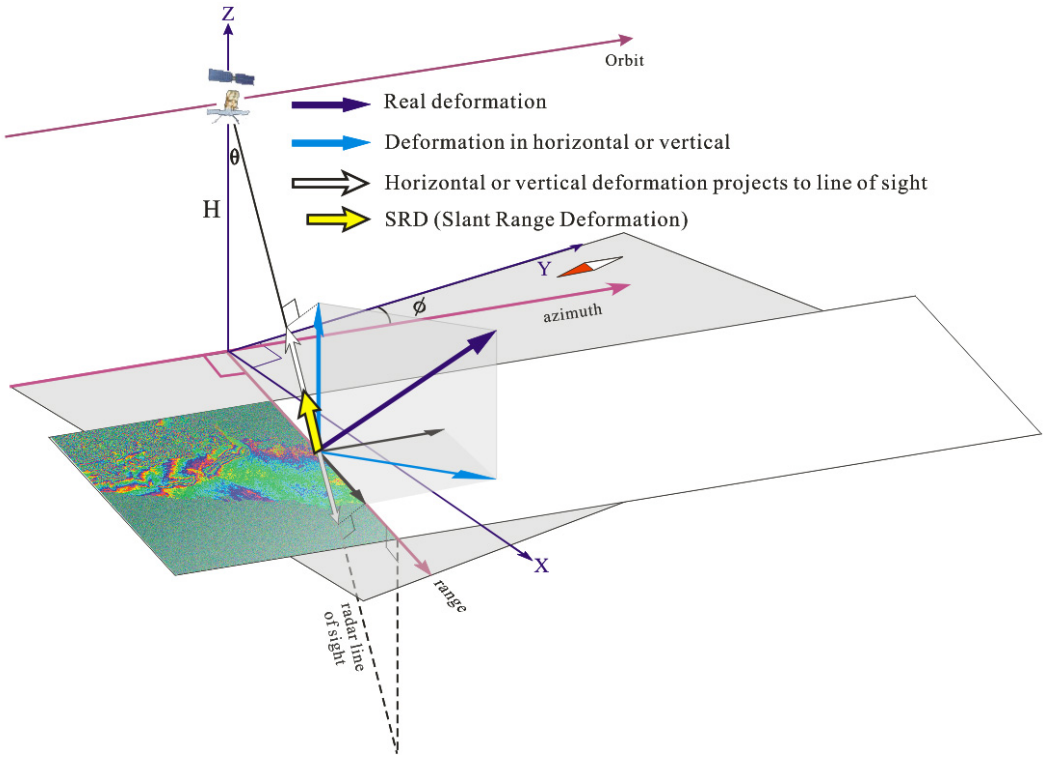


圖 4-1.1：運用方法幾何關係說明圖(摘自黃孟涵, 2006)。

4-2 PS-INSAR成果

ENVISAT、ERS 以及 ALOS 衛星影像及干涉結果請參閱附錄 4-1。

4-2-1 ENVISAT、GPS 與精密水準測量

此影像為降軌右視模式，投射/轉換 GPS 水平分量到 LOS 方向，並以 GS36 作?參考站，將對所有 PS 點做校正，從而可比較 GPS 和 ENVISAT 沿著衛星方向的測量。從圖 4-2.1 中，濁水溪以北、以南地區有明顯下陷地區，下陷率大約 40 mm/yr 左右。 另外，在雲林麥寮台塑六輕位置同樣有明顯下陷地區，可惜地，在這些明顯下陷地區內沒有 GPS 站可作參考比較。不過，其他抬高地方卻符合比對。

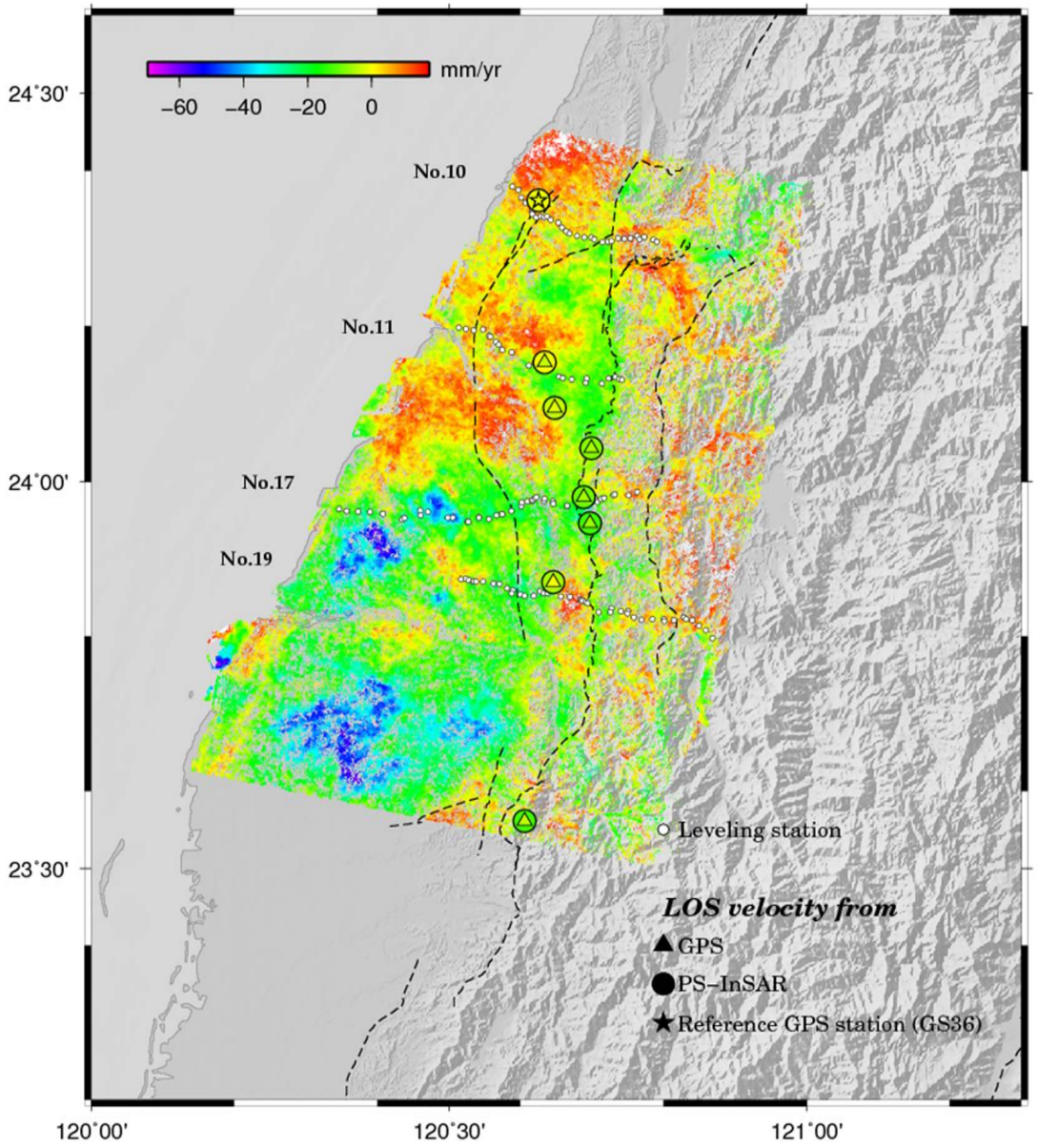


圖 4-2.1：ENVISAT 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。

4-2-1-1 LOS 速度場與水準測線編號 10 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS36 為參考真值，ENVISAT 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。GS36 的垂直速率為 -1.9 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是-0.92 mm/yr。整體而言，ENVISAT 之平均 LOS 速度場與水準測線編號 10 的垂直速度場(圖 4-2.2) PS 值的變動幅度比水準的垂直速率值高出許多，PS 值界於-10 到 20 mm/yr 之間，而水準則界於 0 到 -5 mm/yr 之間；然而，兩者間的相對變動差值仍有雷同之處。例如大甲和鐵砧山斷層以西，PS 與水準的速度值皆出現由東向西遞增的趨勢，分別為 0 到 7 mm/yr 以及-3 到 -2 mm/yr。而屯子腳斷層與三義斷層東西兩側的水準資料趨勢較不明顯，接近水平狀態，與 PS 值相差甚遠，水準於三義斷層以東出現遞減，但 PS 值為遞增。另外，鐵砧山與屯子腳斷層中間的區域，PS 值在 8 與 11 km 呈現兩處高峰值，但水準卻無可見得。整體而言，本剖面兩資料的趨勢吻合度並不大。

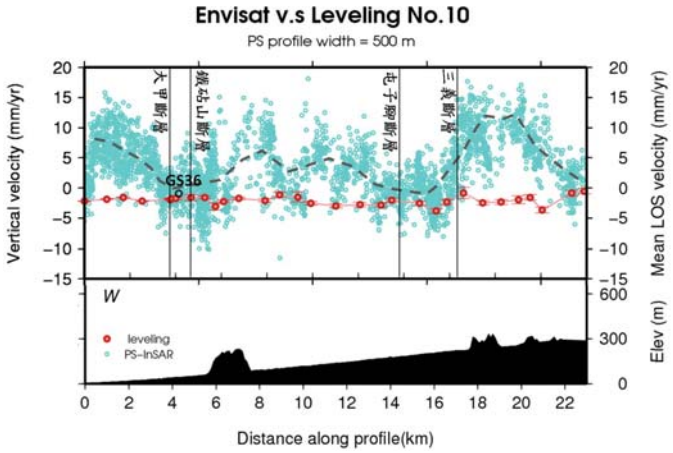


圖 4-2.2：比較 ENVISAT 與編號 10 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-1-2 LOS 速度場與水準測線編號 11 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 LSB0 為參考真值，ENVISAT 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。LSB0 的垂直速率為 -2.57 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是-3.62 mm/yr。整體而言，比較 ENVISAT 之平均 LOS 速度場與水準測線編號 11 的垂直速度場 (圖 4-2.3)，PS 值的變動幅度比水準的垂直速率值高出許多，PS 值界於 -20 到 10 mm/yr 之間，且明顯呈現上下波動的情形。而水準則界於 0 到-5 mm/yr 之間，變動相對極小，較明顯變動的區域位於彰化斷層以東，此處兩種速度值都有由西向東遞減的情形。而在 14 km 以東，PS 值沉降速度增加，但水準資料卻幾乎無變動。

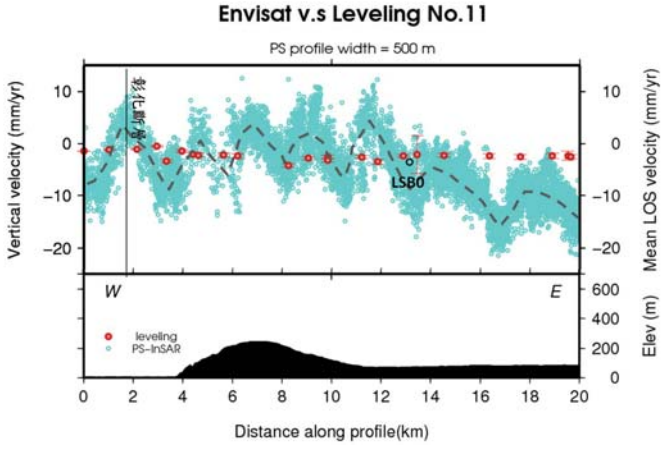


圖 4-2.3：比較 ENVISAT 與編號 11 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-1-3 LOS 速度場與水準測線編號 17 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 CAOT 為參考真值，ENVISAT 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。CAOT 的垂直速率為 -4.6 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是 -6.06 mm/yr。整體而言，ENVISAT 之平均 LOS 速度場與水準測線編號 17 的垂直速度場(圖 4-2.4) 趨勢相當吻合，由其自 11 km 開始以東，兩者趨勢一致，可能代表本處的垂直變形供給 LOS 方向變形極多。彰化斷層及車籠埔斷層之間的速度值變動不大，界於 0 到-20 mm/yr 之間；但往東鄰近大茅埔-雙冬斷層，速度值皆出現遞增的的情形，界於 -10 到 20 mm/yr 之間。彰化斷層以西的平原地區 15 km 處，PS 出現-50 mm /yr 的極低值，雖然該處沒有水準點資料相輔，但極低值的兩翼皆出現與 PS 值相吻合的水準垂直速率。

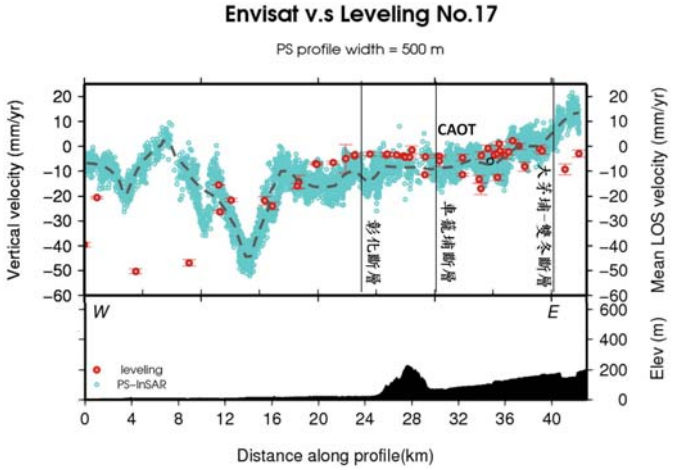


圖 4-2.4：ENVISAT 與編號 17 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-1-4 LOS 速度場與水準測線編號 19 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS26 為參考真值，ENVISAT 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。GS26 的垂直速率為 -3.1 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是-0.24 mm/yr。整體來說，ENVISAT 之 LOS 速度場與水準測線編號 19 的垂直速度場(圖 4-2.5)於車籠埔斷層以西區相當不符；16 km 處出現 PS 極高值，但在水準中未能見得。然而，車籠埔斷層以東卻頗為吻合，21 到 23 km 處兩速度皆出現遞增，趨勢一致；但到了 23 到 25 km 處，水準資料出現遞減，但 PS 值卻是平穩無變動。一直到 27 km 處兩速度才又一致的遞增，至大茅埔-雙冬斷層東側開始遞減。

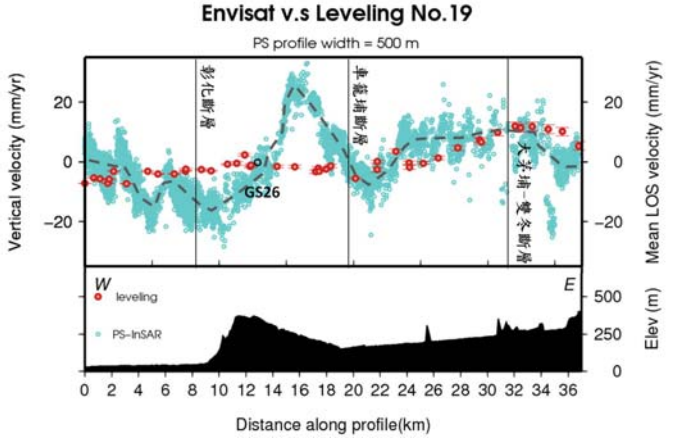


圖 4-2.5：比較 ENVISAT 與編號 19 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-2 ERS、GPS 與精密水準測量

此影像為降軌右視模式，投射及轉換 GPS 水平分量到衛星方向，並以 GS36 作爲參考站，從而可比較 GPS 和 ERS 沿著衛星方向的測量。從圖 4-2.6 中，濁水溪以北，八卦山南段以西地區有明顯下陷，下陷率大約 40 mm/yr 左右，與 ENVISAT 結果雷同。大部分 GPS 站速率值較 PS 值低。

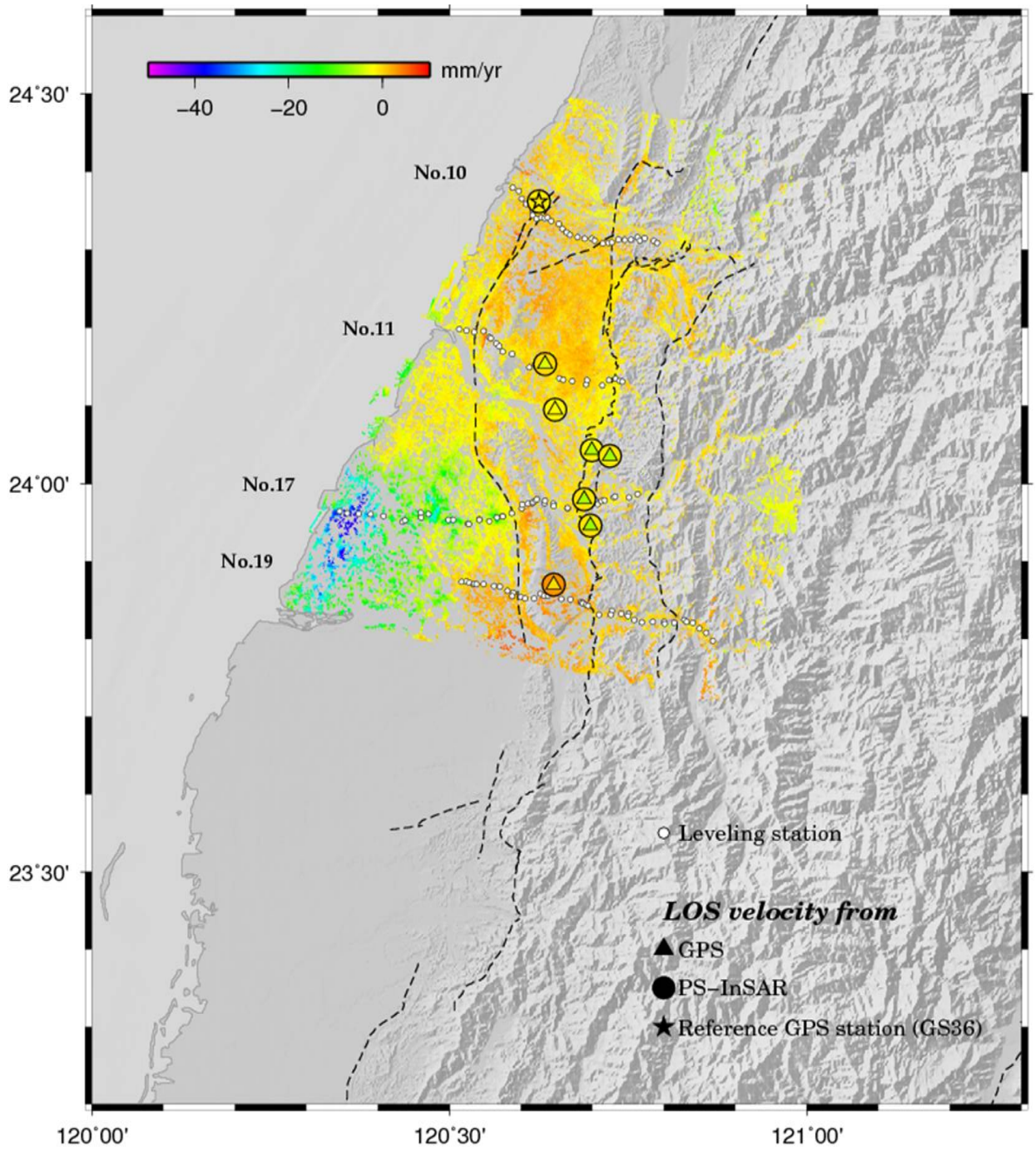


圖 4-2.6：ERS 與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。

4-2-2-1 LOS 速度場與水準測線編號 10 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS36 為參考真值，ERS 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。GS36 的垂直速率為 -1.9 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是-0.92 mm/yr。整體而言，ERS 的 LOS 平均速率與水準編號 10 的趨勢頗為一致，PS 值較水準值高出約平均 2 mm/yr。鐵砧山以東處，兩速率皆出現低峰值約 -2 到 -4 mm/yr；在屯子腳斷層以東也出現類似的情形 PS，值位於 0 到 -2 mm/yr 之間，水準值為 -4 mm/yr。一直到三義斷層以西，兩速率值皆遞增至 -1 到 2 mm/yr 之間，斷層以東則又遞減至 0 到 -2 mm/yr 左右。

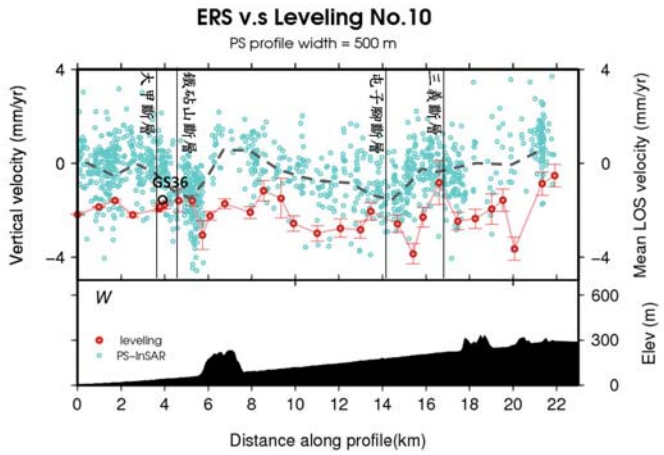


圖 4-2.7：比較 ERS 與編號 10 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-2-2 LOS 速度場與水準測線編號 11 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 LSB0 為參考真值，ERS 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。LSB0 的垂直速率為 -2.57 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是-3.62 mm/yr。ERS 之 LOS 速度場與水準測線編號 11 的垂直速度場在彰化斷層東西兩側皆出現明顯的速度場變化。斷層以東處，LOS 速度場出現明顯的高峰值約 4.5 mm/yr，爾後又急速降低至-4 mm/yr 左右；水準的垂直速度場也在斷層以東處出現明顯落差，由-2 到 0 降至 -5 到-2.5 mm/yr 左右。

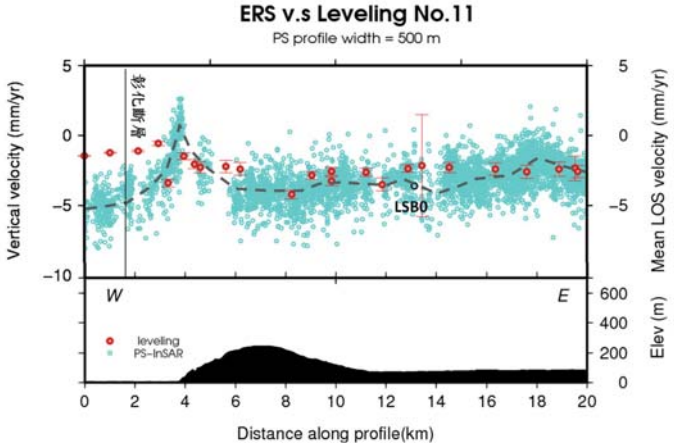


圖 4-2.8：比較 ERS 與編號 11 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-2-3 LOS 速度場與水準測線編號 17 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 CAOT 為參考真值，ERS 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。CAOT 的垂直速率為 -4.6 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是 -6.06 mm/yr。彰化斷層以西處(約第 20 km)，ERS 之 LOS 速度場與水準測線編號 17 的垂直速度場都顯示該區域處於不同程度的下陷; 跟 ENVISAT 結果雷同，在 11-16 公里西部地勢平坦地方，兩種測量方法都清楚顯示下陷嚴重。接著，ERS 之 LOS 速度場與水準測線編號 17 的垂直速度場變化吻合度尚好。

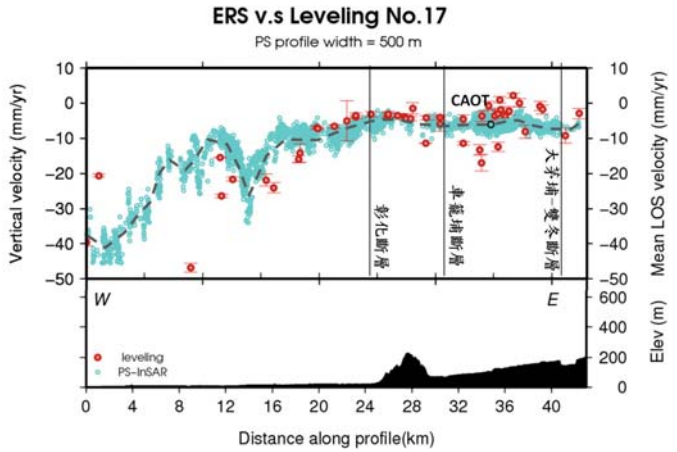


圖 4-2.9：比較 ERS 與編號 17 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-2-4 LOS 速度場與水準測線編號 19 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS26 為參考真值，ERS 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。GS26 的垂直速率為 -3.1 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是-0.24 mm/yr。大約第 25 km 處，ERS 之 LOS 速度場與水準測線編號 19 的垂直速度場變化吻合度尚好；再往東，水準的垂直速度場結果呈遞增，經過大茅埔－雙冬斷層後再遞減，但 LOS 速度場卻無此趨勢。

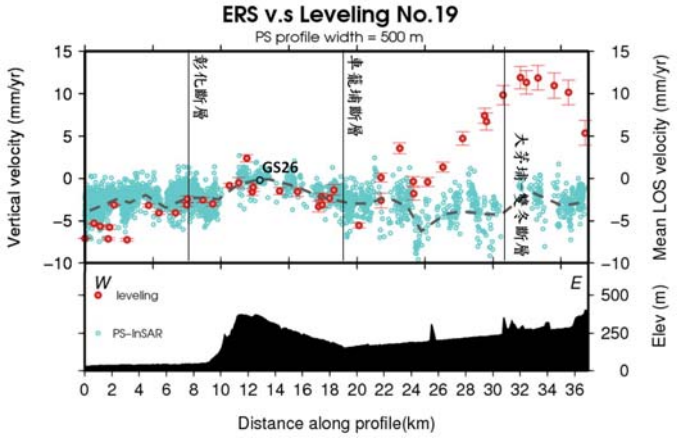


圖 4-2.10：比較 ERS 與編號 19 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-3 ALOS (Path 446 Frames 460 & 470)、GPS 與精密水準測量

此影像為升軌右視模式，投射/轉換 GPS 水平分量到衛星方向，並以 GS36 作爲參考站，從而可比較 GPS 和 ALOS (Path 446 Frames 460 & 470) 沿著衛星方向的測量。從圖 4-2.11 中，濁水溪以北、以南地區有明顯下陷地區，下陷率大約 25 mm/yr 左右，較 Envisat 及 ERS 衛星來的低。大多數 GPS 站速率值較 PS 值為低。

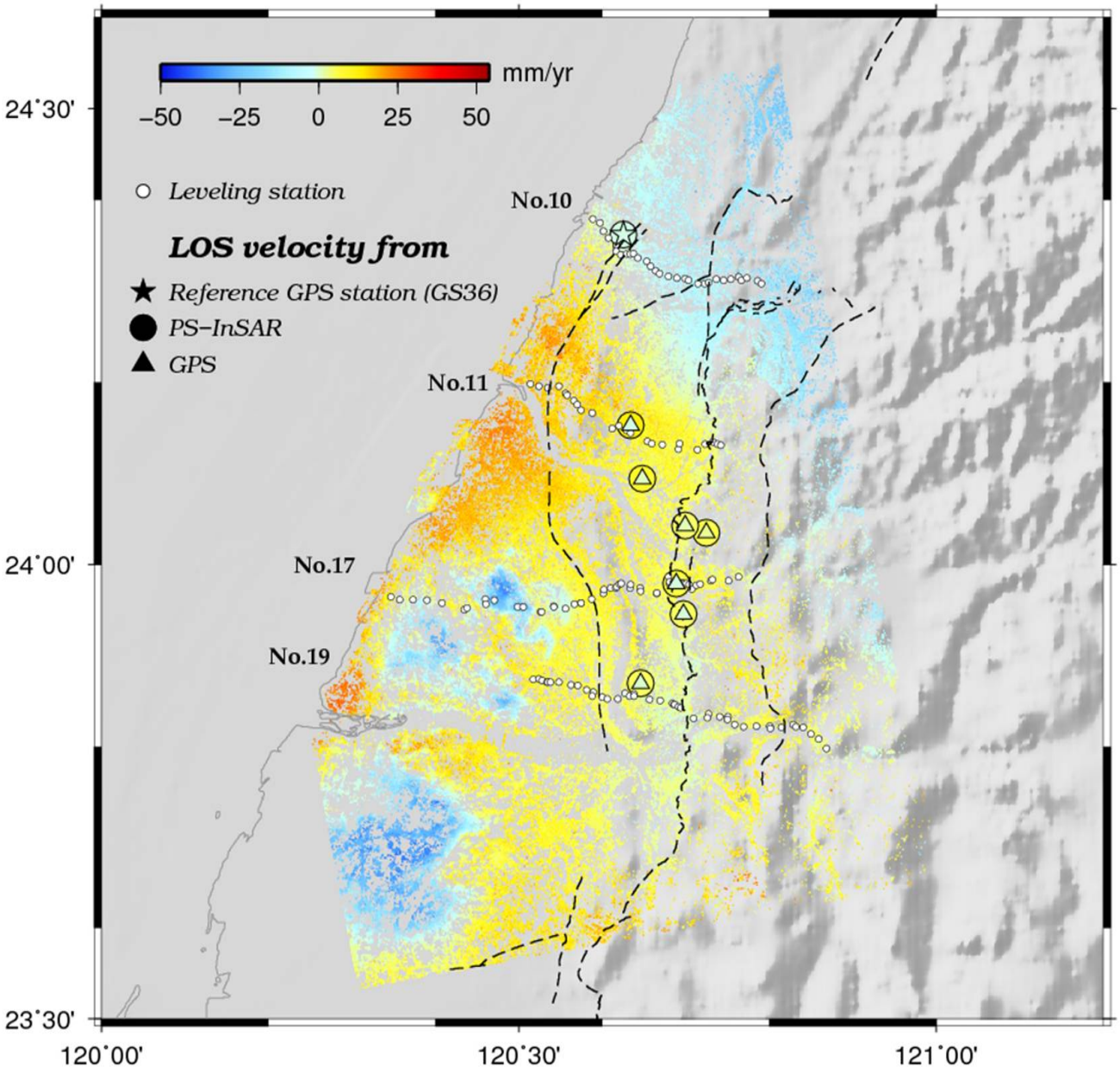


圖 4-2.11：ALOS(Path 446 Frames 460 & 470)與 GPS 視衛星方向速率比對，GPS 參考站爲 GS36。

4-2-3-1 LOS 速度場與水準測線編號 10 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS36 為參考真值，ALOS 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。GS36 的垂直速率為 -1.9 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是-0.9 mm/yr。ALOS (Path 446 Frames 460 & 470) 之 LOS 速度場大致從西往東呈緩和遞減，沉降速率增加，而水準測量垂直變形速率則無此趨勢，只有在零星 (6km, 16km 和 20 km) 地方有明顯下陷。

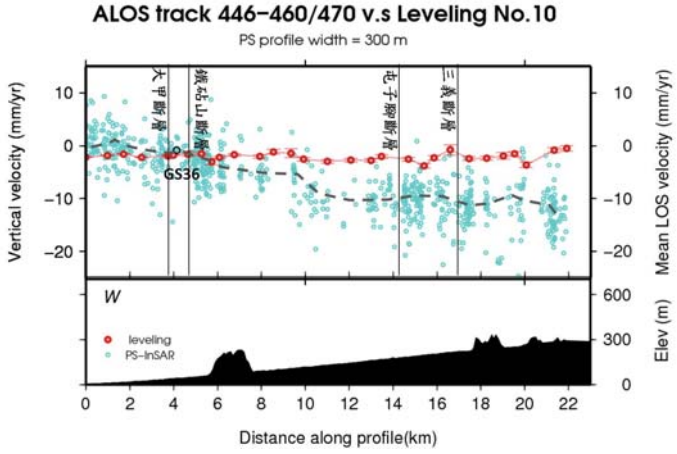


圖 4-2.12：比較 ALOS(Path 446 Frames 460 & 470)與編號 10 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-3-2 LOS 速度場與水準測線編號 11 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 LSB0 為參考真值，ALOS 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。LSB0 的垂直速率為 -1.9 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是-0.85 mm/yr。ALOS(Path 446 Frames460 & 470)之 LOS 速度場大致從西往東呈很緩和的沉降，而水準測量垂直變形速率則無此趨勢，只有在零星 (3km 和 9km) 地方有明顯下降。

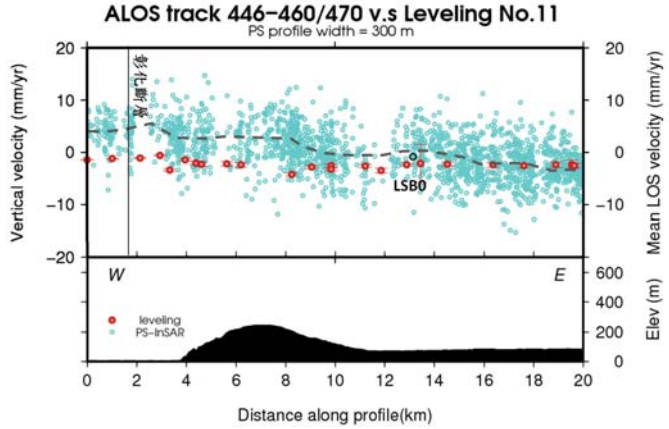


圖 4-2.13：比較 ALOS(Path 446 Frames 460 & 470)與編號 11 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-3-3 LOS 速度場與水準測線編號 17 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 CAOT 為參考真值，ALOS 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。CAOT 的垂直速率為 -1.9 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是-0.66 mm/yr。ALOS (Path 446 Frames460 & 470)之 LOS 速度場與水準測線編號 17 的垂直速度場變化不但吻合度高，而且跟 ENVISAT 和 ERS 結果十分雷同，有明顯的下陷區域(12-16 公里)。

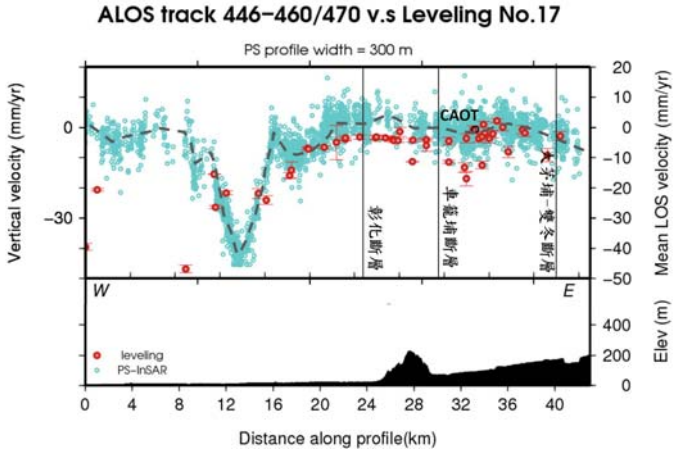


圖 4-2.14：比較 ALOS(Path 446 Frames 460 & 470)與編號 17 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-2-3-4 LOS 速度場與水準測線編號 19 的垂直速度場之比較

本剖面以連續 GPS 站 GS26 為參考真值，ALOS 的 LOS 速率以及水準資料的垂直速率皆對其做校正。GS26 的垂直速率為 -1.9 mm/yr，轉換為 LOS 速率則是 0.18 mm/yr。ALOS (Path 446 Frames460 & 470) 之 LOS 速度場與水準測線編號 17 的垂直速度場變化在第 12 km 以西較不吻合，LOS 為往西遞增但水準卻是遞減；但在車籠埔斷層東西側，趨勢頗為一致，兩種速度場皆在第 20 km 處呈現低值；再往東至大茅埔-雙冬斷層，兩種結果皆出現高峰值，但是數值略有落差，LOS 呈現 10 mm/yr，而水準則是約 2.5 mm/yr。

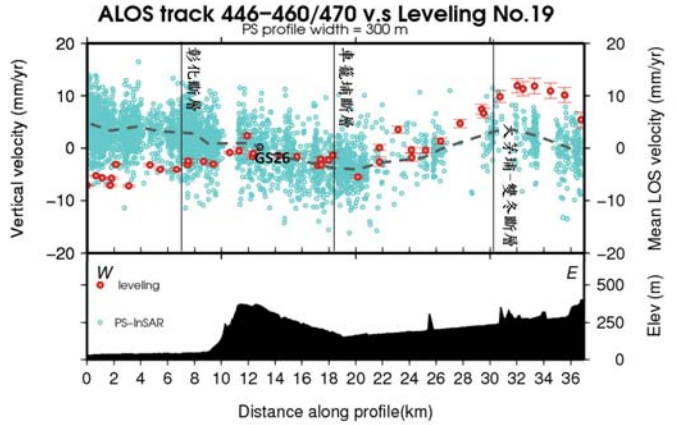


圖 4-2.15：比較 ALOS(Path 446 Frames 460 & 470)與編號 19 精密水準測量垂直變形速率和平均衛星方向變形速率。

4-3 小結

在本期期末報告中，本研究修正黃孟涵(2006)方法，將 GPS 的垂直與水平速度場轉換成 LOS 方向的向量，並與 PS-InSAR 結果做比較(圖 4-2.1、圖 4-2.6、和圖 4-2.11)。最後顯示，ENVISAT 之 LOS 速度場和 GPS 的吻合度較高。

由於水準測站上缺少水平的速度場資料 (即 GPS 與水準測站不共站)，因此直接比較 PS-InSAR 之 LOS 速度場與水準的垂直速度場。首先，對比 ENVISAT、ERS 和編號 10、11 精密水準測量垂直變形速率(圖 4-2.2 和圖 4-2.7; 圖 4-2.3 和圖 4-2.8)，雖然 ENVISAT 為 ERS 後續繼承任務的衛星，同樣為 C 波段，在不同觀測時間對同一地點施測，ENVISAT PS 點分布(圖 4-2.2 和圖 4-2.3)都比 ERS PS 點分布來的波動(圖 4-2.7 和圖 4-2.8)；ERS 觀測時間涵蓋從 1996 年 1 月至 1999 年 6 月，而 ENVISAT 則從 2004 年 4 月至 2008 年 6 月。觀測結果的不同是單純因觀測時間不同而剛好在這段時間上地形上有變動而造成?或是 ENVISAT 比 ERS 精密靈敏?抑或是大氣效應?

縱觀對比 ENVISAT、ERS、和 ALOS (Path 446 Frames 460 & 470)之 LOS 速度場與水準測線編號 17 的垂直速度場變化(圖 4-2.4、圖 4-2.9、圖 4-2.14)，確實証明在彰化斷層以西的西部平原地方(大約 14、15 公里)一直長期下陷(至少從 1996 至 2011 年)。

縱觀對比 ENVISAT、ERS、和 ALOS (Path 446 Frames 460 & 470)之 LOS 速度場與水準測線編號 19 的垂直速度場變化(圖 4-2.5、圖 4-2.10、圖 4-2.15)，ENVISAT 在大約 15、16 公里有一清楚明顯抬高(位於車籠埔斷層以西不遠處)的地方，可 ERS 和 ALOS (Path 446 Frames 460 & 470)之 LOS 速度場結果則無此趨勢，雖然如此，但不可因此假設無變形，因爲觀測時間不同，從 2004 年 4 月至 2006 年 12 月前，只有 ERS 和 ENVISAT 觀測結果。

總結在本期期末報告 PS-INSAR 分析部分，我們主要的兩項工作：1)把 GPS 的垂直與水平速度場轉換成 LOS 方向的向量，並與 PS-InSAR 結果做比較; 2)直接比較 PS-InSAR 之 LOS 速度場與水準的垂直速度場。

第五章、活動斷層發生潛勢圖建置

5-1 車籠埔斷層

5-1-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：本計畫依據車籠埔斷層的分段，建立了 8 種可能之破裂模式，其中 A 為整段破裂，B 為整段破裂，但南端未延伸至大尖山斷層，C 為整段破裂，但北端未延伸到東北段，D 屬於整段破裂，但南端未延伸至大尖山斷層，且北端未延伸到東北段，E 屬於北段破裂，F 屬於北段破裂，但北端未延伸到東北段，G 屬於南段破裂，H 屬於南段破裂，但南端未延伸至大尖山斷層，如圖 5-1.1 所示，其權重分配將於下節詳述。

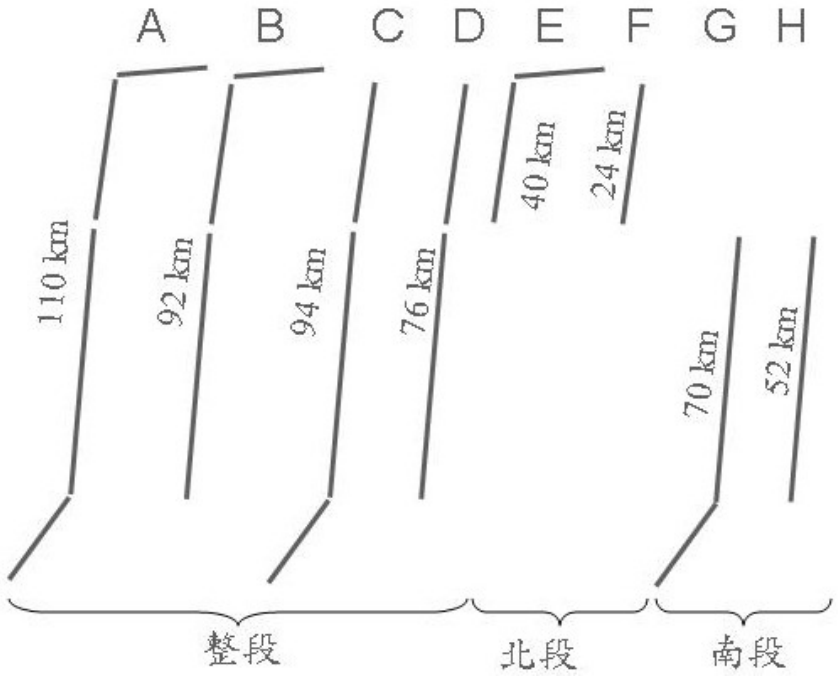


圖 5-1.1：本計畫車籠埔斷層 8 種破裂模式。

2. 斷層幾何形貌（傾角、深度）：將主要的地質觀察及探勘之結果彙整如表 5-1.1。此外，由於 1999 年 921 集集地震的發生，由大地測量資料中蒐集到完整的同震變形及震後變形的資料，藉由建立斷層簡化幾何之模型，可幫助了解斷層面上之同震或是震後變形分布情形，同時可藉由順推到地表面與實際之大地測量變形比較，不斷修正斷層面幾何以達到最佳解，目前已有多位專家嘗試建立車籠埔斷層幾何面模型進行變形量反演，將以上主要的幾個斷層簡化幾何之參數結果彙整如表 5-1.2。彙整以上之參數，本計畫提出車籠埔斷層之幾何參數，在傾角上，北段約為 25 度左右，南段約 35 度左右；深度上，北段約 6.5 公里深，南段約 10 公里深，詳細的權重分配將於下一節中詳述之。

表 5-1.1：車籠埔斷層幾何面各調查方法及斷層參數。

作者	方法	分段	傾角	深度
Yue L. F. et al. (2005)	地表地層位態搭配淺部震測及鑽井資料	北車籠埔錦水滑脫面 三義-車籠埔逆斷層		5.5- 6 km
Suppe (1987)	平衡剖面		上部斷坡傾角約 25 度，下部則變為約 5 度	6 km
Yang et al. (2007)	平衡剖面		斷坡傾角 30~40 度	7 km
Wang et al. (2002) Lee et al. (2010)	震測剖面			10 km
Dominguez et al. (2003)	流變學與地震震源分布		斷坡傾角 30~35 度，滑脫面傾角 6~7 度	7~ 8 km（滑脫面可達 12 km）

表 5-1.2：車籠埔斷層模型簡化幾何各模式比較及斷層參數。

作者	模式	分段	走向	傾角	深度（公里）	參考文獻
Y. J. Hsu et al. (2002)	震後反演			24 度	11–12	Johnson et al., 2001; Loevenbruck et al., 2001; Dominguez et al., 2001
	同震反演	Fault 1 (70 km)	N3E	23 度	寬 30 深 12	Johnson et al., 2001
		Fault 2 (8 km)	N35E	23 度		
		Fault 3 (25 km)	N88E	21 度		
Chen Ji (2003)	同震反演	Fault 1	N3E	30 度	17	Johnson et al., 2001; Ji et al., 2001
		Fault 2	N80E			
		Fault 3	N45E			
K. M. Johnson (2004)	同震反演	Fault 1		26 度	7.7	Suppe, 1987; Wang et al., 2000; Johnson et al., 2001
		Fault 2		23 度		
		Fault 3	N90E	23 度		
		Fault 4		0 度		
S. J. Lee et al. (2006)	3D			30 度	30 (同震滑移分布在 12 公里以內)	Lee et al., 2000

3. 斷層機制屬於逆移斷層。
4. 短期滑移速率參照參數表表 5-1.3。
5. 長期滑移速率參照參數表表 5-1.3。
6. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有

Wells and Coppersmith(1994)及 Yen and Ma(2011)等列於參數表中以供參考，對於車籠埔斷層斷坡之形貌，已有較為清楚的了解，因此以車籠埔斷層之面積來計算其規模。本文提到之規模均為地震矩規模。

7. 最近一次活動時間：為 1999 年 9 月 21 日。

彙整前人對於車籠埔斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 5-1.3 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 5-1.3：車籠埔斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
車籠埔斷層	斷層分段	整段（A, B, C, D）		地形、航照判釋、集集地震地表破裂判釋	李錫堤等，2000； Yue et al., 2005: Chen et al., 2007；Lee et al., 2007；林啟文等，2008
		北段（E, F）			
		南段（G, H）			
	長度(km)	整段 110			
		北段 40（含東北段 16 公里）			
		南段 70（含大尖山 18 公里）			
	寬度(km)	北段 15.4 公里		深度 6.5 km/sin25°	
		南段 17.4 公里		深度 10 km/sin35°	
	破裂深度（km）	北段約 6.5 公里		跨斷層地質剖面、平衡剖面、流變學與地震震源分布、同震變形斷層面反演、深部震測剖面	Suppe, 1987；Yue et al., 2005；Wang et al., 2002；Dominguez et al., 2003；Lee et al., 2010
		南段約 10 公里			
	面積(km^2)	整段 1836		長度×寬度	
		北段 616			
		南段 1220			
	走向	約呈南北走向		地形、航照判釋、地震地表破裂判釋	林啟文等，2008
	傾斜角度(度)	平均 25°		921 集集地震重定位及震源機制	Kao and Chen, 2000
		北段約 25°		震測、重力、地面調查建立之平衡剖面	Suppe, 1987；Wang et al., 2002; Yang et al., 2007; Chen et al., 2007; Lee et al., 2010
		南段約 35°			
	斷層機制	具左移分量的逆斷層		集集地震震源機制解	Kao, H., and Chen, W.P., 2000；林啟文等，2008
	短期滑移速率（mm/yr）	1996-1999（震前）	平行斷層走向 1.1~6.1 垂直斷層走向 0.4~8.9 抬升率 0.5~19.1	GPS1996~2006 之速度場分析	饒瑞鈞等，2006
			平行斷層走向 1.1 垂直斷層走向 0.4 抬升率 0.5		

			平行斷層走向4~6.1 垂直斷層走向3.5~8.9 抬升率1~19.1		
		2000-2006（震後）	平行斷層走向7.6~8.6 垂直斷層走向6.9~9.7 抬升率1.2~10.1		
			平行斷層走向7.6 垂直斷層走向6.9 抬升率1.2		
			平行斷層走向8.2~8.6 垂直斷層走向9.1~9.7 抬升率9.1~10.1		
	長期滑移速率(mm/yr)	整段12.1~16.4		整段滑移速率採用槽溝之古地震事件抬升量及定年資料，各段滑移速率採用上盤階地高差及定年	Chen et al., 2003; Chen et al., 2007
		北段13.3~27.7			
		南段4.9~11.7			
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	整段6..5，σ=8.1		三維塊體模型，資料為台灣GPS觀測網在2002-2012所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
		北段6..9，σ=6.3			
		南段6..4，σ=9.2			
	單一事件變位量(m)	石岡段的同震抬升量平均可達3.6公尺，車籠埔則為平均1.5公尺，大尖山段為平均0.8公尺。		1999年921集集大地震同震變形量	Chen et al., 2007
	最大可能地震規模(Mw)	7.6			1999年921集集地震
		整段7.0~7.6		Mw=4.33+0.90 log A σ=0.25	Wells and Coppersmith, 1994（逆斷層）
		北段6.6~7.1			
		南段6.9~7.4			
		整段7.3	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1 + \max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$		Yen and Ma, 2011 Kanamori, 1977
		北段6.8			
		南段7.1			
	地震重複週期(年)	200-700		車籠埔斷層帶數個槽溝古地震事件定年	Chen et al., 2007
	最近一次活動時間	西元1999年		1999年921集集大地震	

5-1-2 車籠埔斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估車籠埔斷層之破裂，主要分為整段、北段及南段，圖 5-1.2 為陳文山等人（Chen et al., 2007）從槽溝開挖中所觀察到的古地震事件，位於北段的豐原槽溝前一次古地震事件為 1710~1900 年前，且此次破裂在車籠埔南段槽溝中都有觀察到，屬於整段破裂模式，也就是說從槽溝開挖中沒觀察到北段單獨破裂之情形，本計畫據此推測北段單獨破裂的機率，較南段和整段為小，權重設定為整段(0.4)、北段(0.2)、南段(0.4)，而由於北段北端及南段南端的延伸與否又可分為 8 種破裂事件來探討，ABCD 為整段破裂，其權重各給 0.25；EF 為北段破裂，其權重各給 0.5；GH 為南段破裂，其權重各給 0.5，如圖 5-1.4 之邏輯樹所示。

車籠埔斷層之邏輯樹建立如圖 5-1.4 所示，其不確定性的部份為斷層滑移速率及最大可能地震規模，滑移速率計算如表 5-1.4 所示，北段滑移速率為 13.3~27.7 mm/yr（Chen et al., 2003），南段滑移速率為 4.9~11.7 mm/yr（Chen et al., 2003），整段滑移速率為 12.1~16.4 mm/yr（Chen et al., 2007），在邏輯樹中為了計算之方便，假設北段滑移速率為 13.3(0.2)，20.5(0.6)，27.7(0.2)；南段滑移速率為 4.9(0.2)，8.3(0.6)，11.7(0.2)；整段滑移速率為 12.1(0.2)，14.3(0.6)，16.4(0.2)，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith (1994)及 Yen and Ma (2011)之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith (1994)之標準差作為上下之分支，如表 5-1.5 所示。

車籠埔斷層各節點權重的分配詳如圖 5-1.4 所示。

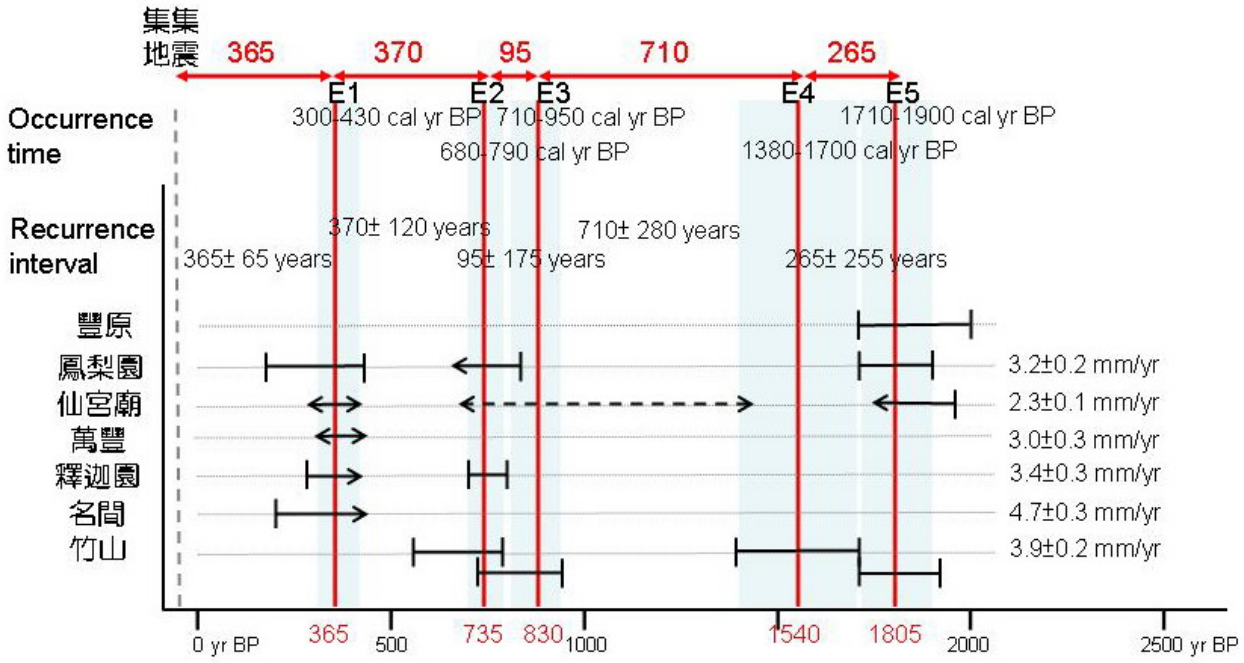


圖 5-1.2：車籠埔斷層各槽溝的古地震事件（Chen et al., 2007）。

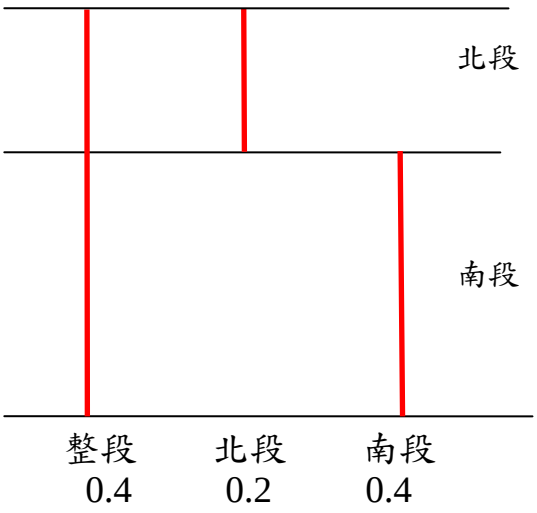


圖 5-1.3：車籠埔斷層之分段破裂及權重分配。

表 5-1.4：車籠埔斷層長期滑移速率彙整。

分段	垂直滑移速率 (mm/yr)	滑移速率 (傾角 25 度)(mm/yr)	資料	參考文獻
北段	8.6~11.7	20.3~27.7	石岡地區河階	Chen et al., 2003
	5.6~9.9	13.3~23.4	新社河階	Chen et al., 2003
分段	垂直滑移速率 (mm/yr)	滑移速率 (傾角 35 度)(mm/yr)	資料	參考文獻
南段	5.5~6.7	9.6~11.7	霧峰槽溝樣本	Chen et al., 2003
	4.1~5.0	7.1~8.7	霧峰槽溝樣本	Chen et al., 2003
	2.8~5.0	4.9~8.7	草屯河階地	Chen et al., 2003
	4.0~4.9	7.0~8.5	竹山階地	Chen et al., 2003
分段	垂直滑移速率 (mm/yr)	滑移速率 (傾角 25 度)及(傾角 35 度) (mm/yr)	資料	參考文獻
整段	6.94	12.1 及 16.4	採用槽溝之古地震事件抬升量及定年資料	Chen W. S. et al., 2007

表 5-1.5：車籠埔斷層各破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度(km)	深度(km)	寬度(km)	傾角(度)	面積(km2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式)(Mw)
							-σ	中值	+σ	
車籠埔斷層	A	110				1836	7.0	7.3	7.6	7.3
	B	92				1522	6.9	7.2	7.4	7.2
	C	94				1590	7.0	7.2	7.5	7.2
	D	76				1276	6.9	7.1	7.4	7.1
	E	40	6.5	15.4	25	615	6.6	6.8	7.1	6.8
	F	24	6.5	15.4	25	369	6.4	6.6	6.9	6.6
	G	70	10	17.4	35	1220	6.9	7.1	7.4	7.1
	H	52	10	17.4	35	907	6.7	7.0	7.2	7.0
權重							0.1	0.3	0.1	0.5

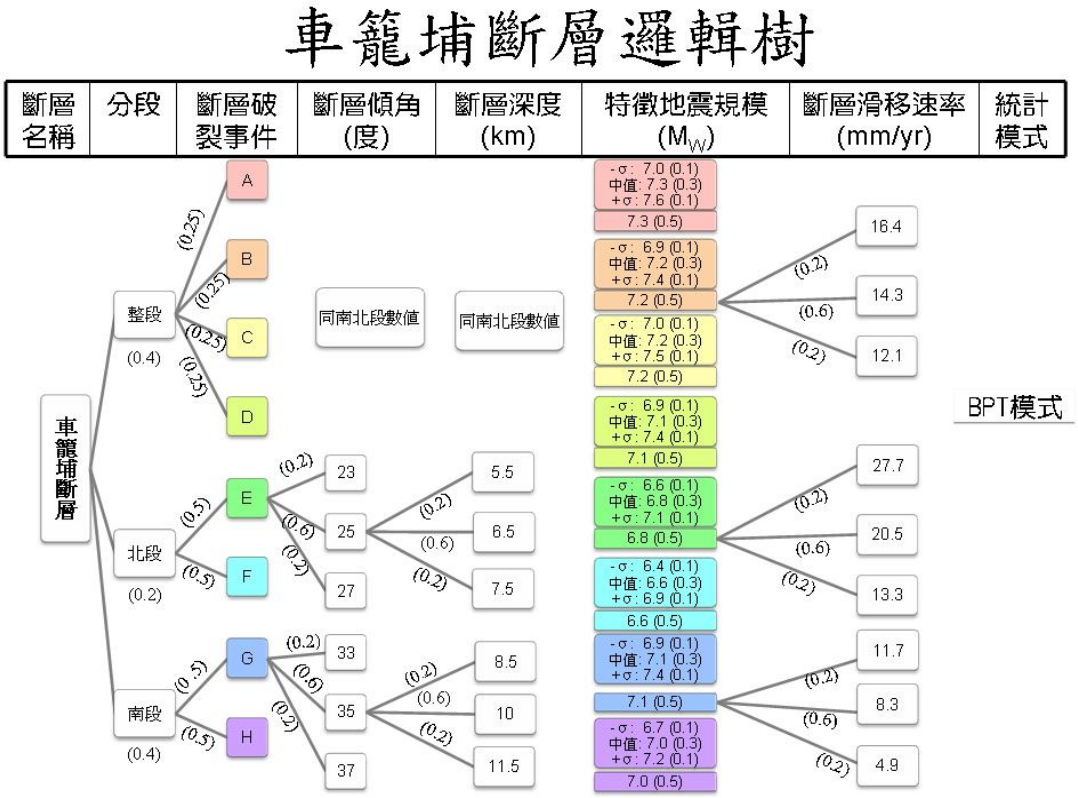


圖 5-1.4：車籠埔斷層邏輯樹。

5-1-3 車籠埔斷層特徵地震模式

車籠埔斷層各邏輯樹分支的參數均可由特徵地震模式得到一再現週期，圖 5-1.5~圖 5-1.7 為 3 個分段之特徵地震模式分布情形。

整段得到的地震矩規模 6.9~7.6；北段得到的地震矩規模 6.4~7.1；南段得到的地震矩規模 6.7~7.4。各分支週期及權重如表 5-1.6 所示。

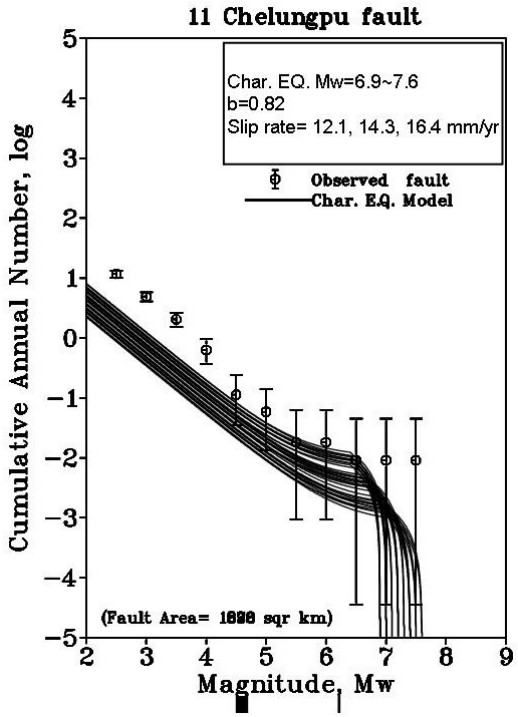


圖 5-1.5：整段之特徵地震模式。

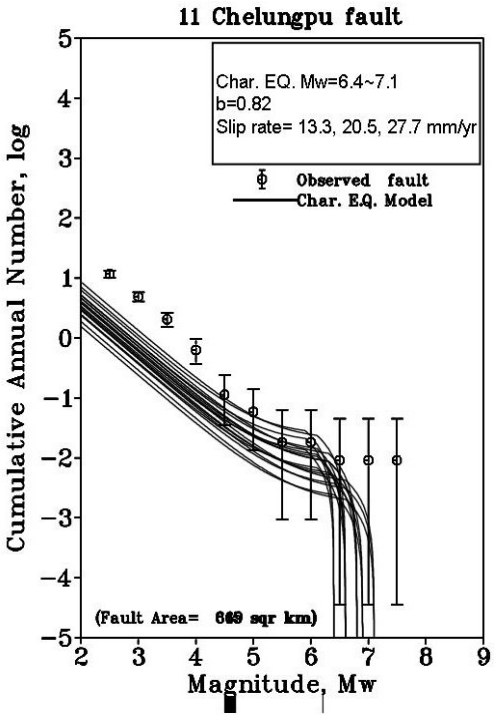


圖 5-1.6：北段之特徵地震模式。

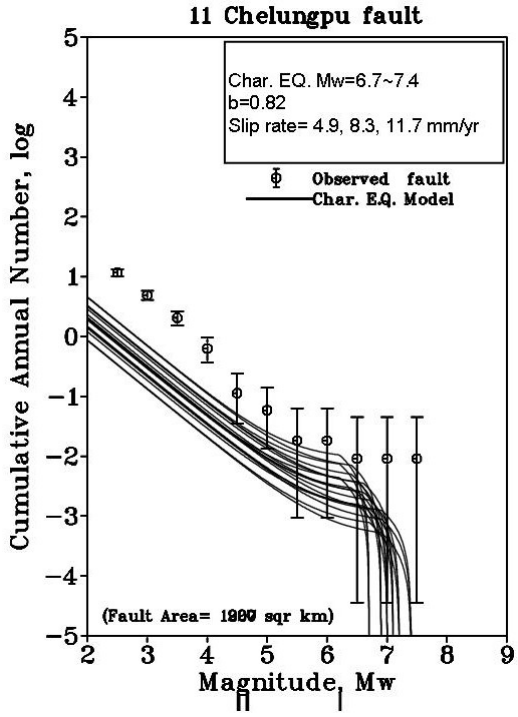


圖 5-1.7：南段之特徵地震模式。

表 5-1.6：車籠埔斷層各破裂事件邏輯樹分支週期及權重。

		週期(年)	權重			週期(年)	權重			週期(年)	權重
整段	A	94	0.002	北段	E	42	0.002	南段	G	140	0.004
		108	0.006			56	0.006			196	0.012
		127	0.002			87	0.002			335	0.004
		265	0.016			83	0.016			280	0.032
		303	0.048			112	0.048			394	0.096
		359	0.016			173	0.016			668	0.032
		746	0.002			234	0.002			788	0.004
		855	0.006			317	0.006			1111	0.012
		1011	0.002			488	0.002			1883	0.004
	B	80	0.002		F	35	0.002		H	95	0.004
		92	0.006			47	0.006			133	0.012
		109	0.002			73	0.002			226	0.004
		226	0.016			69	0.016			266	0.032
		259	0.048			94	0.048			376	0.096
		306	0.016			145	0.016			636	0.032
		451	0.002			196	0.002			532	0.004
		517	0.006			265	0.006			749	0.012
		611	0.002			408	0.002			1269	0.004
	C	108	0.002								
		124	0.006								
		147	0.002								
		216	0.016								
		248	0.048								
		293	0.016								
		610	0.002								
		699	0.006								
		826	0.002								
	D	96	0.002								
		110	0.006								
		130	0.002								
		191	0.016								
		219	0.048								
		259	0.016								
		538	0.002								
		617	0.006								
		729	0.002								

5-1-4 發震機率之推估

在獲得各破裂事件之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算車籠埔斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，車籠埔斷層最後一次發生時間為西元 1999 年。表 5-1.7~表 5-1.9 為使用 BPT 模式評估車籠埔斷層各段之發生機率。表 5-1.10 為車籠埔斷層 BPT 模式評估之結果，以西元 2013 年為基準，車籠埔斷層未來 30 年、50 年及 100 年地震矩規模 6.5 以上之機率為 2.2%、5.9%及 17.7%。

表 5-1.7：車籠埔斷層整段以 BPT 模式評估之發生機率。

整段（再現週期）（年）	地震矩規模(Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
94	7.0	1999	9.7%	30.1%	73.6%	0.002
108	7.0	1999	5.5%	21.1%	63.9%	0.006
127	7.0	1999	2.5%	12.7%	51.3%	0.002
265	7.3	1999	0.0%	0.2%	7.0%	0.016
303	7.3	1999	0.0%	0.1%	3.8%	0.048
359	7.3	1999	0.0%	0.0%	1.6%	0.016
746	7.6	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.002
855	7.6	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.006
1011	7.6	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.002
80	6.9	1999	16.9%	42.2%	82.9%	0.002
92	6.9	1999	10.6%	31.7%	75.0%	0.006
109	6.9	1999	5.3%	20.5%	63.2%	0.002
226	7.2	1999	0.0%	0.8%	12.8%	0.016
259	7.2	1999	0.0%	0.3%	7.7%	0.048
306	7.2	1999	0.0%	0.1%	3.6%	0.016
451	7.4	1999	0.0%	0.0%	0.3%	0.002
517	7.4	1999	0.0%	0.0%	0.1%	0.006
611	7.4	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.002
108	7.0	1999	5.5%	21.1%	63.9%	0.002
124	7.0	1999	2.9%	13.8%	53.2%	0.006
147	7.0	1999	1.1%	7.3%	39.8%	0.002
216	7.2	1999	0.1%	1.0%	14.8%	0.016
248	7.2	1999	0.0%	0.4%	9.1%	0.048
293	7.2	1999	0.0%	0.1%	4.5%	0.016
610	7.5	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.002
699	7.5	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.006
826	7.5	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.002
96	6.9	1999	9.0%	28.7%	72.2%	0.002
110	6.9	1999	5.1%	20.0%	62.5%	0.006
130	6.9	1999	2.2%	11.7%	49.5%	0.002
191	7.1	1999	0.2%	2.1%	21.5%	0.016
219	7.1	1999	0.1%	0.9%	14.2%	0.048
259	7.1	1999	0.0%	0.3%	7.7%	0.016
538	7.4	1999	0.0%	0.0%	0.1%	0.002
617	7.4	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.006
729	7.4	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.002
	6.9~7.6	權重後加總	0.3%	1.0%	5.4%	0.4

表 5-1.8：車籠埔斷層北段以 BPT 模式評估之發生機率。

北段（再現週期）（年）	地震矩規模(Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
42	6.6	1999	62.5%	85.9%	98.9%	0.002
56	6.6	1999	40.6%	69.5%	95.3%	0.006
87	6.6	1999	12.9%	35.8%	78.4%	0.002
83	6.8	1999	15.1%	39.4%	81.0%	0.016
112	6.8	1999	4.7%	19.0%	61.1%	0.048
173	6.8	1999	0.4%	3.5%	27.9%	0.016
234	7.1	1999	0.0%	0.6%	11.3%	0.002
317	7.1	1999	0.0%	0.1%	3.1%	0.006
488	7.1	1999	0.0%	0.0%	0.2%	0.002
35	6.4	1999	不考慮	不考慮	不考慮	0.002
47	6.4	1999	不考慮	不考慮	不考慮	0.006
73	6.4	1999	不考慮	不考慮	不考慮	0.002
69	6.6	1999	25.6%	53.9%	89.4%	0.016
94	6.6	1999	9.7%	30.1%	73.6%	0.048
145	6.6	1999	1.2%	7.8%	40.9%	0.016
196	6.9	1999	0.1%	1.8%	20.0%	0.002
265	6.9	1999	0.0%	0.2%	7.0%	0.006
408	6.9	1999	0.0%	0.0%	0.7%	0.002
	6.5~7.1	權重後加總	1.8%	4.7%	11.3%	0.2

表 5-1.9：車籠埔斷層南段以 BPT 模式評估之發生機率。

南段（再現週期）（年）	地震矩規模(Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
140	6.9	1999	1.5%	8.9%	43.6%	0.004
196	6.9	1999	0.1%	1.8%	20.0%	0.012
335	6.9	1999	0.0%	0.0%	2.3%	0.004
280	7.1	1999	0.0%	0.2%	5.5%	0.032
394	7.1	1999	0.0%	0.0%	0.9%	0.096
668	7.1	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.032
788	7.4	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.004
1111	7.4	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.012
1883	7.4	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.004
95	6.7	1999	9.4%	29.4%	72.9%	0.004
133	6.7	1999	2.0%	10.8%	47.7%	0.012
226	6.7	1999	0.0%	0.8%	12.8%	0.004
266	7.0	1999	0.0%	0.2%	6.9%	0.032
376	7.0	1999	0.0%	0.0%	1.2%	0.096
636	7.0	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.032
532	7.2	1999	0.0%	0.0%	0.1%	0.004
749	7.2	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.012
1269	7.2	1999	0.0%	0.0%	0.0%	0.004
	6.7~7.4	權重後加總	0.1%	0.3%	1.9%	0.4

表 5-1.10：車籠埔斷層發生機率評估。

	特徵地震矩規模（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
		BPT	BPT	BPT
$P_{整段}$	6.9~7.6	0.3%	1.0%	5.4%
$P_{北段}$	6.5~7.1	1.8%	4.7%	11.3%
$P_{南段}$	6.7~7.4	0.1%	0.3%	1.9%
P_{total}	6.5~7.6	2.2%	5.9%	17.7%

5-2 梅山斷層

5-2-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：由相關研究結果，推測梅山斷層向西延伸約 12 公里(圖 5-2.1 綠色點線所示)。但郭烈銘等(1985)則根據地電阻法探勘，於民雄以西之測線未見梅山斷層經過的跡象。工研院能礦所(1984)以航照判釋推斷，梅山斷層可能從尾莊再向東延伸約 10 公里(圖 5-2.1 藍色虛線部分)。本斷層除地表破裂外，自民雄向西可能以潛伏斷層形式延伸至新港附近，加上向東延伸的部分，總長推測約 35 公里。

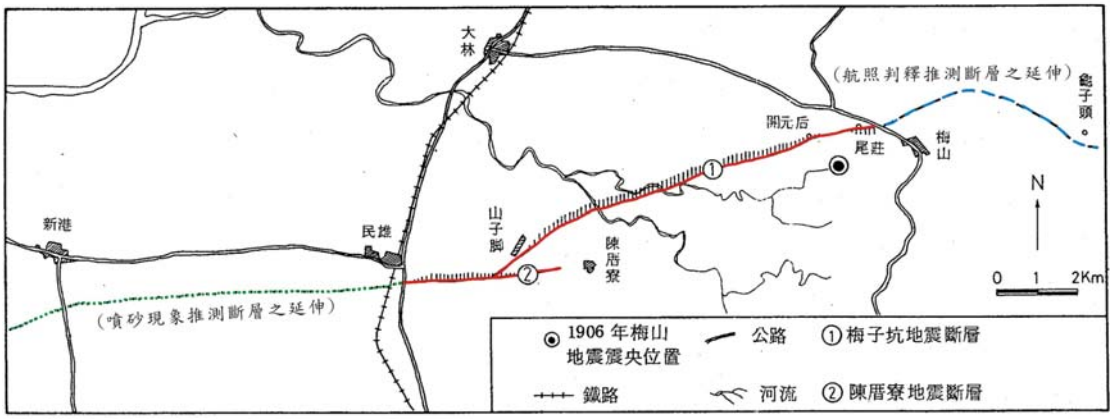


圖 5-2.1：梅山斷層地表破裂位置(紅色實線)，噴砂現象(綠色點線)與航照判釋(藍色虛線)所推測之斷層延伸位置圖。
(改自葉義雄等，1984)

2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度：本計畫推估梅山斷層傾角應在 70°S 到 80°S 左右，並假設梅山斷層破裂之最深可達 15 公里。
3. 斷層機制：梅山斷層是 1906 年嘉義地震產生的地表斷層，斷層呈東北東走向，為右移斷層（Omori, 1907）。
4. 短期滑移速率參閱參數表表 5-2.1。
5. 長期滑移速率參閱參數表表 5-2.1。
6. 單一事件變位量參閱參數表表 5-2.1。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith(1994)及 Yen and Ma(2011)等列於參數表中以供參考。
8. 最近一次活動時間：梅山斷層為 1906 年 3 月 17 日嘉義梅山規模 7.1 的大地震而發生之地震斷層(Omori, 1907)。

彙整前人對於梅山斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 5-2.1 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 5-2.1：梅山斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
梅山斷層	斷層分段	地表破裂+東、西部延伸	地形、航照判釋	Omori, 1907；工研院能礦所，1984；張徽正等，1998； 林啟文等，2000；陳文山等，2006
		地表破裂+西部延伸		
		僅地表破裂		
	長度(km)	(地表破裂+東、西部延伸)35		
		(地表破裂+西部延伸)25		
		(僅地表破裂)13		
	寬度(km) (以傾角 75°)	12.9	深度(中間值: 12.5km) / sin75°	
	破裂深度(km）	(約 10-16) 假設最深為 15 km	1999.10.22 嘉義地震餘震分布	Chen et al., 2008
	面積(km^2)	(地表破裂+東、西部延伸)453	長度×寬度	
		(地表破裂+西部延伸)324		
		(僅地表破裂)168		
	走向	東北東	地形、航照判釋、地震地表破裂判釋	張徽正等，1998； 林啟文等，2000
	傾斜角度(度)	70° ~ 80°	反射震測探勘	謝昭輝與辛在勤，1988； 謝昭輝，1989
	斷層機制	右移斷層	反射震測探勘	Omori, 1907；陳文山等人，2006；石瑞銓等，1998；2002；彭秋紋等，2004
	短期滑移速率 （mm/yr）	斷層之垂直速度並無顯著之變化	GPS 觀測 (2007-2010)	饒瑞鈞等，2010
	長期滑移速率(mm/yr)	5.3	利用塊體模型模擬所推估之長期滑移速率	饒瑞鈞等，2010
		2.6(以斷層傾角 75°計算)		Ching et al., 2011
		14.2，σ=10.7		本計畫推估
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	3.6，σ=5.9	三維塊體模型，資料為台灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量(m)	最大右移量 2.4，最大垂直位移量 1.8	1906 梅山地震地表破裂	Omori, 1907；游明聖、鄭世楠，1994

	最大可能地震規模 (M_W)	長度: 35 km	6.5~6.9	M_w =3.98+1.02 log A σ=0.24	Wells and Coppersmith, 1994（平移斷層）
		長度: 25 km	6.3~6.8		
		長度: 13 km	6.0~6.5		
		長度: 35 km	6.7	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$	Yen and Ma, 2011 Kanamori, 1977
		長度: 25 km	6.5		
		長度: 13 km	6.2		
	地震重複週期(年)				
	最近一次活動時間	西元 1792（？），西元 1906		歷史文獻記載，1906 梅山地震	歷史地震

5-2-2 梅山斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估梅山斷層之破裂，是以長度不確定性來區分破裂事件，如圖 5-2.2 所示為梅山斷層三種破裂事件，權重設定為 A(0.45)、B(0.45)、C(0.1)。

梅山斷層之邏輯樹建立如圖 5-2.3 所示，其不確定性的部份為斷層傾角、斷層深度、斷層滑移速率及特徵地震規模，滑移速率根據前節所述，暫時以饒瑞鈞等（2010）之 5.3 mm/yr，以及 Ching et al. (2011)換算得到的 2.6 mm/yr 給予各 0.5 之權重，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith (1994)及 Yen and Ma (2011)之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith (1994)之標準差作為上下之分支，如表 5-2.2 所示。梅山斷層各節點權重的分配詳如圖 5-2.3 所示。

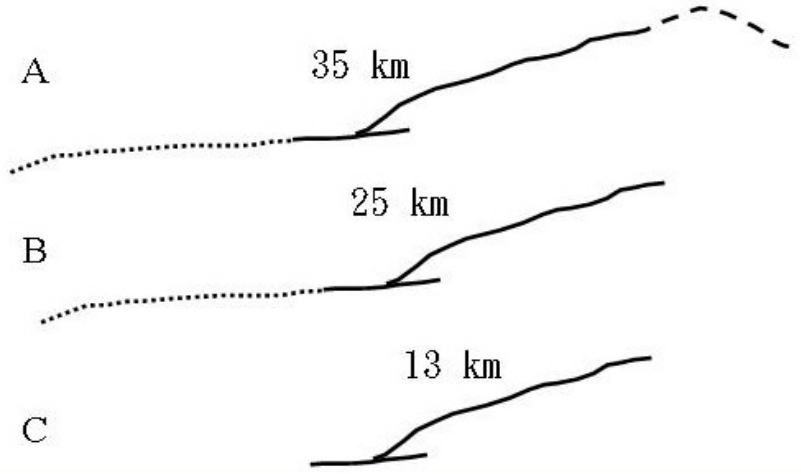


圖 5-2.2：梅山斷層三種可能破裂長度之模式。

表 5-2.2：梅山斷層各破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度(km)	深度(km)	寬度(km)	傾角(度)	面積(km2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式)(Mw)
							-σ	中值	+σ	
梅山斷層	A	35	12.5	12.9	75	453	6.5	6.7	6.9	6.7
	B	25	12.5	12.9	75	324	6.3	6.5	6.8	6.5
	C	13	12.5	12.9	75	168	6.0	6.3	6.5	6.2
權重							0.1	0.3	0.1	0.5

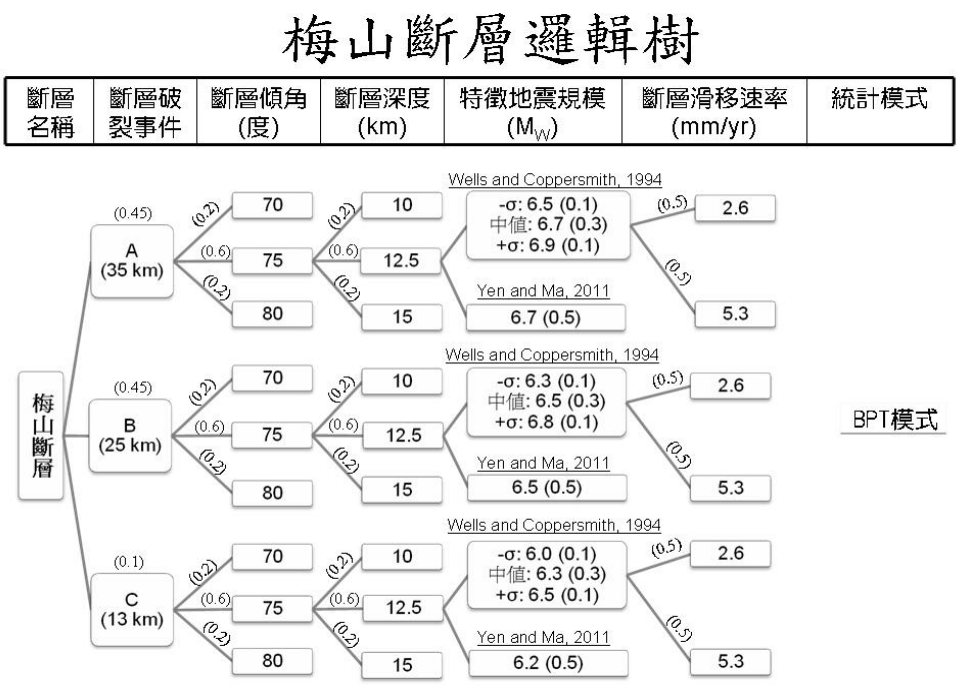


圖 5-2.3：梅山斷層邏輯樹。

5-2-3 梅山斷層特徵地震模式

梅山斷層各邏輯樹分支的參數均可由特徵地震模式得到一再現週期，圖 5-2.4 為特徵地震模式分布情形。得到的地震矩規模 6.0~6.9。各分支週期及權重為 51（0.0225），101（0.0675），202（0.0225），101（0.1125），104（0.0225），207（0.1125），412（0.0225），207（0.0675），36（0.0225），71（0.0675），200（0.0225），71（0.1125），73（0.0225），145（0.0675），408（0.0225），145（0.1125），24（0.005），69（0.015），137（0.005），49（0.025），50（0.005），140（0.015），279（0.005），99（0.025）。

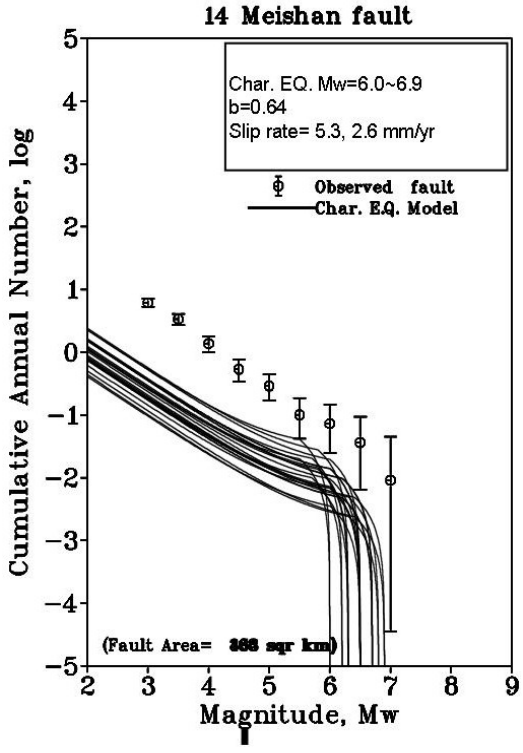


圖 5-2.4：梅山斷層之特徵地震模式。

5-2-4 發震機率之推估

在獲得邏輯樹分支之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算梅山斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，梅山斷層最後一次發生時間為西元 1906 年。表 5-2.3 為使用 BPT 模式評估梅山斷層之發生機率，以西元 2013 年為基準，得到梅山斷層未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 30.9%、44.1%及 63.4%，規模範圍為 Mw6.5~6.9。

表 5-2.3：梅山斷層以 BPT 模式評估之發生機率。

（再現週期）（年）	地震矩規模（M_w）	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
51	6.5	1906	71.7%	87.7%	98.4%	0.0225
101	6.7	1906	45.2%	63.8%	87.4%	0.0675
202	6.9	1906	17.5%	29.4%	54.9%	0.0225
101	6.7	1906	45.2%	63.8%	87.4%	0.1125
104	6.5	1906	44.0%	62.5%	86.5%	0.0225
207	6.7	1906	16.6%	28.1%	53.3%	0.0675
412	6.9	1906	1.6%	3.7%	12.2%	0.0225
207	6.7	1906	16.6%	28.1%	53.3%	0.1125
36	6.3	1906	不考慮	不考慮	不考慮	0.0225
71	6.5	1906	59.4%	77.8%	95.1%	0.0675
200	6.8	1906	17.8%	29.9%	55.5%	0.0225
71	6.5	1906	59.4%	77.8%	95.1%	0.1125
73	6.3	1906	不考慮	不考慮	不考慮	0.0225
145	6.5	1906	30.2%	46.4%	73.5%	0.0675
408	6.8	1906	1.7%	3.8%	12.6%	0.0225
145	6.5	1906	30.2%	46.4%	73.5%	0.1125
24	6.0	1906	不考慮	不考慮	不考慮	0.005
69	6.3	1906	不考慮	不考慮	不考慮	0.015
137	6.5	1906	32.6%	49.3%	76.1%	0.005
49	6.2	1906	不考慮	不考慮	不考慮	0.025
50	6.0	1906	不考慮	不考慮	不考慮	0.005
140	6.3	1906	不考慮	不考慮	不考慮	0.015
279	6.5	1906	7.7%	14.6%	33.6%	0.005
99	6.2	1906	不考慮	不考慮	不考慮	0.025
	6.5~6.9	權重後加總	30.9%	44.1%	63.4%	1

5-3 大茅埔-雙冬斷層

5-3-1 參數表之建立及說明

1. 斷層幾何形貌-斷層長度及分段：大茅埔—雙冬斷層以大甲溪為界，北段的大茅埔斷層總長約 14 公里，南段的雙冬斷層總長則約 55 公里。
2. 斷層幾何形貌-斷層傾角及破裂深度參閱參數表表 5-3.1。
3. 斷層機制：大茅埔—雙冬斷層為一逆移斷層。在 1999 年的集集地震中，雙冬斷層在雙冬南方馬鄰坑一帶的斷層下盤，其頭嵙山層中有兩處再活動移距約 10-20 公分，該露頭兩處皆含左移分量，為逆移斷層。
4. 短期滑移速率參閱參數表表 5-3.1。
5. 長期滑移速率參閱參數表表 5-3.1。
6. 單一事件變位量參閱參數表表 5-3.1。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith(1994)及 Yen and Ma(2011)等列於參數表中以供參考。
8. 最近一次活動時間：大茅埔—雙冬斷層在 1999 年 9 月 21 日的九二一地震，斷層沿線多處噴砂以及發現數個地點有約 10-30 公分的地表破裂，顯示大茅埔—雙冬斷層的再活動，也因此由存疑性活動斷層改列為第一類活動斷層。

彙整前人對於大茅埔—雙冬斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 5-3.1 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 5-3.1：大茅埔-雙冬斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
大茅埔雙冬斷層	斷層分段	整段		地形、走向、地層差異及斷層出露判釋	大江二郎，1938；何春蓀，1959；林啟文等，2000
		大茅埔斷層			
		雙冬斷層			
	長度 (km)	整段 69			
		大茅埔斷層 14			
		雙冬斷層 55			
	寬度(km)（以傾角 45 度計算）	17.0		深度(中間值: 12 km)/ sin45°	
	破裂深度 (km)	10-12 km		地震分佈	Rau, 2002
		6 km		平衡剖面	Suppe, 1987
		5.5-6 km		地質平衡剖面	Yue L. F. et al., 2005
		9-11 km		流變學	Dominguez et al., 2003
	面積 (km^2)	整段 1171		長度×寬度	
		大茅埔 238			
		雙冬 933			
	走向	大茅埔斷層呈東北走向		大甲溪為界、地形差異判釋	大江二郎，1938；何春蓀，1959；林啟文等，2000
		雙冬斷層南段呈南北走向			
	傾斜角度 (度)	35-55		地質調查、震測、鑽井及平衡剖面	邱華燈， 1972、1975；黃鑑水與陳勉銘，2000； 黃旭燦等，2004
	斷層機制	具左移分量的逆斷層		地質調查、地表破裂、GPS 資料	林啟文等，2000
	短期滑移速率（mm/yr）	1996-1999 (震前)	斷層下盤水平位移約 10-17，向西北西或西北	GPS 資料	侯進雄，2007
			斷層上盤水平位移約 15-28mm，向西北西或西北		
		2002-2006 (震後)	大茅埔—雙冬斷層以東 30-45，方向朝西北西		饒瑞鈞等，2010

			大茅埔—雙冬及車籠埔斷層之間 16-20，方向朝西北西		
	長期滑移速率 (mm/yr)	0.8±0.4			Cheng et al., 2007
		26.1，σ=5.5		三維塊體模型，資料為台灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	13.6，σ=13.9		三維塊體模型，資料為台灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量 (m)	0.1-0.3		地質調查	林啟文等，2000
	最大可能地震規模 (M_W)	整段(69 km)	7.1	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.24	Wells and Coppersmith, 1994（逆斷層）
		大茅埔段(14 km)	6.5		
		雙冬段(55 km)	7.0		
		整段(69 km)	7.2	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$	Yen and Ma, 2011
		大茅埔段(14 km)	6.2		
		雙冬段(55 km)	7.0		
	地震重複週期(年)				
	最近一次活動時間	1999 年 9 月 21 日		歷史地震	

5-3-2 大茅埔-雙冬斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估大茅埔-雙冬斷層之破裂，主要分為整段破裂、大茅埔斷層及雙冬斷層，如圖 5-3.1 所示為大茅埔-雙冬斷層三種破裂事件，權重設定為 A(0.45)、B(0.45)、C(0.1)。

大茅埔-雙冬斷層之邏輯樹建立如圖 5-3.2 所示，其不確定性的部份為斷層傾角、斷層深度、斷層滑移速率及特徵地震規模，滑移速率根據前節所述，暫時以 Cheng et al.（2007）之 0.4（0.2），0.8（0.6）及 1.2（0.2）來評估，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith (1994)及 Yen and Ma (2011)之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith (1994)之標準差作為上下之分支，如表 5-3.2 所示。大茅埔-雙冬斷層各節點權重的分配詳如圖 5-3.2 所示。

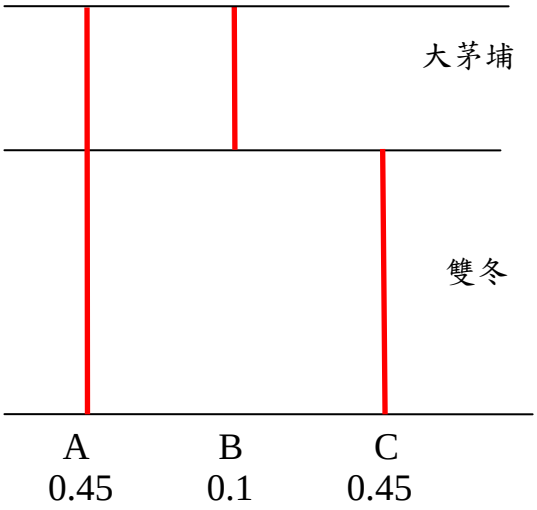


圖 5-3.1：大茅埔-雙冬斷層三種可能破裂長度事件之模式與權重。

表 5-3.2：大茅埔-雙冬斷層各破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
							-σ	中值	+σ	
大茅埔-雙冬斷層	A	69	12	17.0	45	1171	6.8	7.1	7.3	7.1
	B	14	12	17.0	45	238	6.2	6.5	6.7	6.4
	C	55	12	17.0	45	933	6.8	7.0	7.3	7.0
權重							0.1	0.3	0.1	0.5

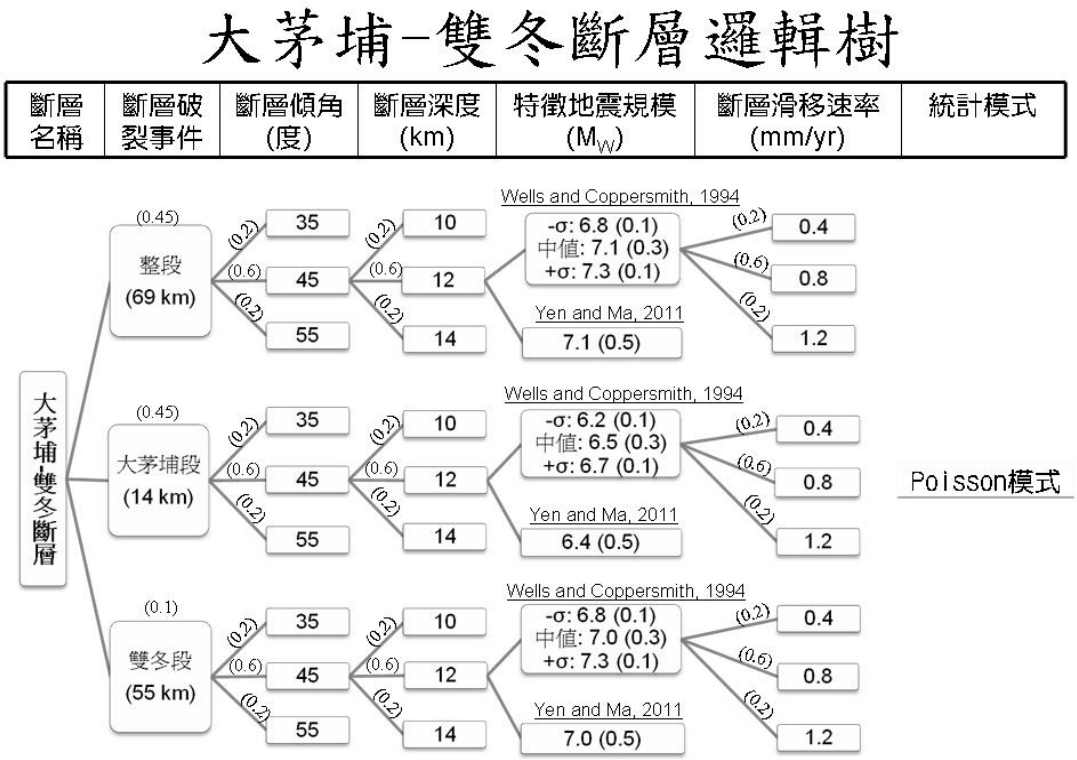


圖 5-3.2：大茅埔-雙冬斷層邏輯樹。

5-3-3 大茅埔-雙冬斷層特徵地震模式

大茅埔-雙冬斷層各邏輯樹分支的參數均可由特徵地震模式得到一再現週期，圖 5-3.3~圖 5-3.5 為 3 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

整段事件得到的地震矩規模 6.8~7.3；大茅埔段事件得到的地震矩規模 6.2~6.7；雙冬段事件得到的地震矩規模 6.8~7.3。各分支週期及權重如表 5-3.3 所示。

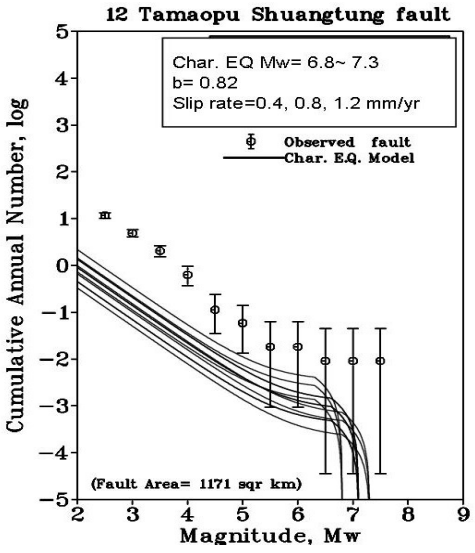


圖 5-3.3：整段之特徵地震模式。

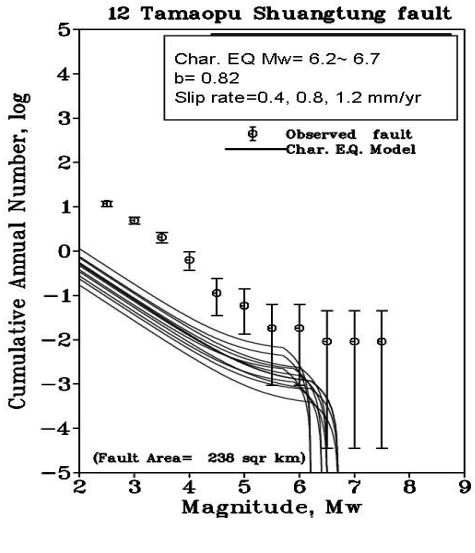


圖 5-3.4：大茅埔斷層之特徵地震模式。

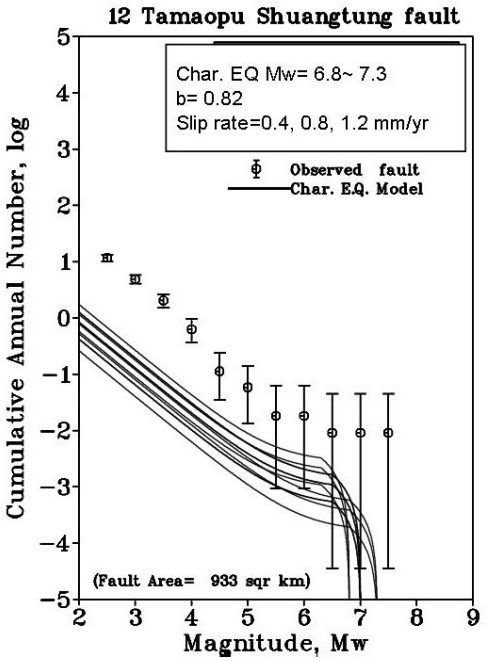


圖 5-3.5：雙冬斷層之特徵地震模式。

表 5-3.3：大茅埔-雙冬斷層各破裂事件分支週期及權重。

		週期	權重			週期	權重			週期	權重
整段	A	725	0.009	大茅埔斷層	B	449	0.002	雙冬斷層	C	910	0.009
		2043	0.027			1266	0.006			1816	0.027
		4077	0.009			2525	0.002			5117	0.009
		2043	0.045			896	0.01			1816	0.045
		362	0.027			225	0.006			455	0.027
		1022	0.081			633	0.018			908	0.081
		2038	0.027			1263	0.006			2558	0.027
		1022	0.135			448	0.03			908	0.135
		242	0.009			150	0.002			303	0.009
		681	0.027			422	0.006			605	0.027
		1359	0.009			842	0.002			1706	0.009
		681	0.045			299	0.01			605	0.045

5-3-4 發震機率之推估

在獲得各破裂事件之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算大茅埔-雙冬斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，大茅埔-雙冬斷層最後一次發生時間為未知，雖然西元 1999 年 921 集集地震時在地表有觀察到地表破裂，但斷層並未達到特徵地震規模之程度，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。表 5-3.4~表 5-3.6 為使用 Poisson 模式評估大茅埔-雙冬斷層各段之發生機率。表 5-3.7 為大茅埔-雙冬斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2013 年為基準，得到大茅埔-雙冬斷層未來 30 年、50 年及 100 年發生地震矩規模 6.5 以上之機率為 3.2%、5.1%及 9.6%。

表 5-3.4：大茅埔-雙冬斷層整段破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

整段破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模 (Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
725	6.8	-	4.1%	6.7%	12.9%	0.009
2043	7.1	-	1.5%	2.4%	4.8%	0.027
4077	7.3	-	0.7%	1.2%	2.4%	0.009
2043	7.1	-	1.5%	2.4%	4.8%	0.045
362	6.8	-	8.0%	12.9%	24.1%	0.027
1022	7.1	-	2.9%	4.8%	9.3%	0.081
2038	7.3	-	1.5%	2.4%	4.8%	0.027
1022	7.1	-	2.9%	4.8%	9.3%	0.135
242	6.8	-	11.7%	18.7%	33.8%	0.009
681	7.1	-	4.3%	7.1%	13.7%	0.027
1359	7.3	-	2.2%	3.6%	7.1%	0.009
681	7.1	-	4.3%	7.1%	13.7%	0.045
	6.8~7.3	權重後加總	1.5%	2.4%	4.6%	0.45

表 5-3.5：大茅埔斷層破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

大茅埔破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模 (Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
449	6.2	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.002
1266	6.5	-	2.3%	3.9%	7.6%	0.006
2525	6.7	-	1.2%	2.0%	3.9%	0.002
896	6.4	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.01
225	6.2	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.006
633	6.5	-	4.6%	7.6%	14.6%	0.018
1263	6.7	-	2.3%	3.9%	7.6%	0.006
448	6.4	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.03
150	6.2	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.002
422	6.5	-	6.9%	11.2%	21.1%	0.006
842	6.7	-	3.5%	5.8%	11.2%	0.002
299	6.4	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.01
權重後加總	6.5~6.7		0.2%	0.3%	0.5%	0.1

表 5-3.6：雙冬斷層破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

雙冬破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模 (Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
910	6.8	-	3.2%	5.3%	10.4%	0.009
1816	7.0	-	1.6%	2.7%	5.4%	0.027
5117	7.3	-	0.6%	1.0%	1.9%	0.009
1816	7.0	-	1.6%	2.7%	5.4%	0.045
455	6.8	-	6.4%	10.4%	19.7%	0.027
908	7.0	-	3.2%	5.4%	10.4%	0.081
2558	7.3	-	1.2%	1.9%	3.8%	0.027
908	7.0	-	3.2%	5.4%	10.4%	0.135
303	6.8	-	9.4%	15.2%	28.1%	0.009
605	7.0	-	4.8%	7.9%	15.2%	0.027
1706	7.3	-	1.7%	2.9%	5.7%	0.009
605	7.0	-	4.8%	7.9%	15.2%	0.045
	6.8~7.3	權重後加總	1.5%	2.5%	4.8%	0.45

表 5-3.7：大茅埔-雙冬斷層發生機率評估。

	特徵地震矩規模（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
		BPT	BPT	BPT
$P_{整段}$	6.8~7.3	1.5%	2.4%	4.6%
$P_{大茅埔}$	6.5~6.7	0.2%	0.3%	0.5%
$P_{雙冬}$	6.8~7.3	1.5%	2.5%	4.8%
P_{total}	6.5~7.3	3.2%	5.1%	9.6%

5-4 彰化斷層

5-4-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度與分段：彰化斷層全長約 36 公里，呈北北西轉南北走向，其北側可能與大甲斷層相連(圖 5-4.1)(林啟文等, 2008)。由地形觀察，八卦台地西坡較東坡陡且呈不對稱啞鈴形（圖 5-4.2），林朝榮(1957)研判西坡的北段為斷層崖，但由於斷層沿線多覆蓋現代沖積層或是山麓堆積物，並未發現有斷層出露的露頭，因此仍不確定。另由鑽探資料中，可發現斷層所造成岩層層序重複出現的現象。

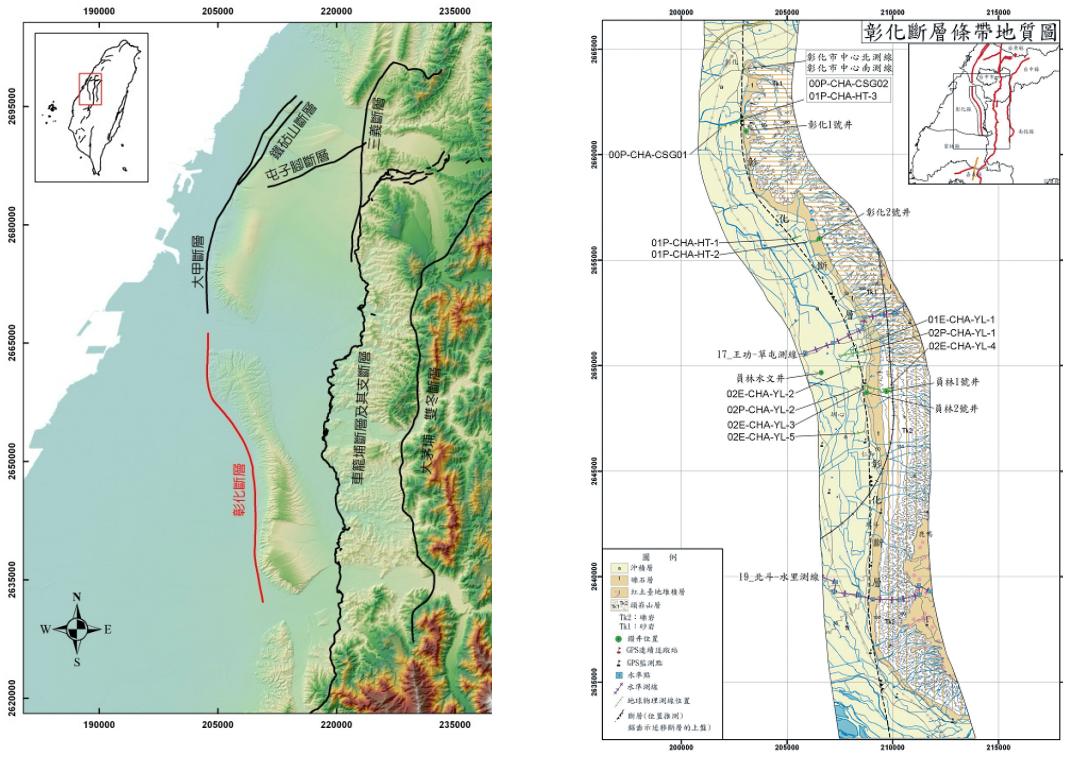


圖 5-4.1：左圖為彰化斷層地表分布圖，右圖為彰化斷層條帶地質圖。
(林啟文等, 2008)

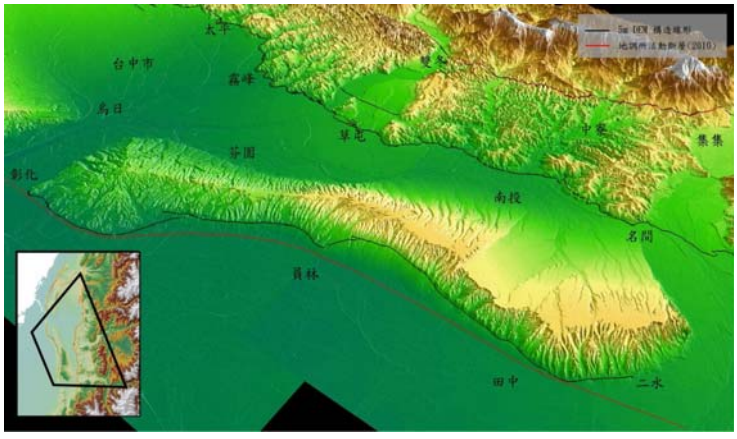


圖 5-4.2：彰化斷層沿線地形及構造線形套疊。
（國立台北科技大學，2011）

2. 斷層幾何形貌(傾角、深度):將主要的地質觀察及探勘之結果彙整如表 5-4.1 及表 5-4.2，本計畫提出彰化斷層之幾何參數，在傾角上約為 25 度左右；深度上約 10 公里深，詳細的權重分配將於下一節中詳述之。

表 5-4.1：彰化斷層傾角資料及文獻列表。

Ref.	Method	Dip	
Chen (1978)	震測資料	向東傾斜 18°~45°	
Suppe (1985)	地形、鑽井資料	剖面 AA’	地下 0.5 km 內約為 5°
			0.5 km-5.0 km 約為 20°
			地下 5.0 km 以下約為 5°
		剖面 BB’	約 30°-40°之間，近地表處以及 7.5 公里附近趨緩(約<5°)
吳榮章等(2002)	鑽井資料	約 13°(井深 370m 之資料)	

表 5-4.2：彰化斷層深度資料及文獻列表。

Ref.	Method	Depth	
Suppe (1985)	地形、鑽井資料	剖面 AA’	6km(和車籠埔斷層相接)
		剖面 BB’	7.5km(和車籠埔斷層相接)

3. 斷層機制：由於彰化斷層在地表沿線多覆蓋現代沖積層或是山麓堆積物，因此沒有發現出露的斷層露頭。但經由地球物理探勘的結果，彰化斷層可能是向東傾斜的逆移斷層。
4. 短期滑移速率參閱參數表表 5-4.3。
5. 長期滑移速率參閱參數表表 5-4.3。
6. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith(1994)及 Yen and Ma(2011)等列於參數表中以供參考。
7. 單一事件變位量：彰化斷層為逆移的盲斷層，在地表並沒有斷層露頭出露。雖有證據指出彰化斷層在北段已破裂至地表，但仍被山麓堆積物、沖積物等覆蓋。另外，透過鑽井、震測等地球物理探勘方式，僅可計算其長期滑移速率、斷層位置等，並未能推算其單一事件變位量。
8. 最近一次活動時間：陳華玟等(2007)將彰化斷層北段的彰化 1 號井和其西北側的東芳井地層層序作對比(圖 5-4.3)，對比的層序主要沉積環境分為河相、河口灣、上濱面、下濱面、上遠濱/前三角洲、三角洲前緣、三角洲平原及沖積扇等。彰化 1 號井和東芳井大部分層序都可以對比，但在由上而下第二個地層層序(圖 5-4.3SB2 位置)彰化 1 號井的岩層厚度較東芳井厚兩倍以上，又該沉積物泥岩比率約 40%，因此排除沉積速率太快導致厚度差異。另外，在更西北側的頂番井該沉積岩層厚度亦和東芳井差距不大，因此判斷該岩層因

斷層活動，在彰化 1 號井中重複出現，又以碳 14 定年結果，該岩層介於 29230 年至 34390 年間。1848 年發生之彰化大地震，造成彰化、鹿港地區居民嚴重傷亡，共計 1,030 人死亡，13,993 棟房屋倒塌（鄭世楠與葉永田，1989）。推測是由彰化斷層錯動而引起。

彙整前人對於彰化斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 5-4.3 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

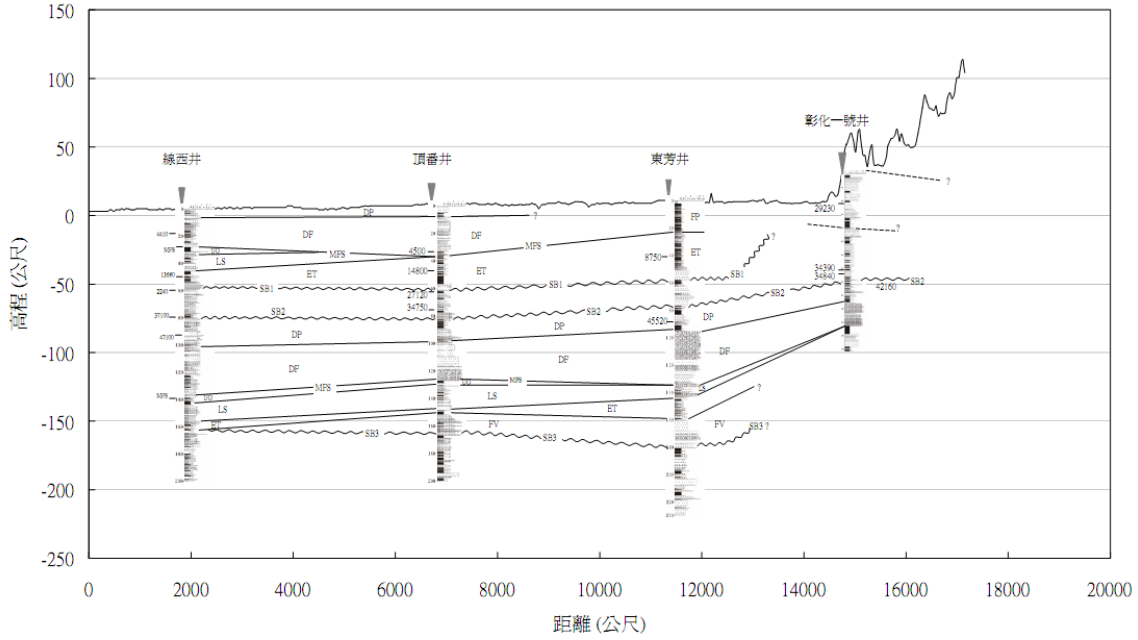


圖 5-4.3：彰化一號井、東芳井等層序地層對比。
SB:層序界限、FV:河流、ET:河口灣、LS:下濱面、UO:上遠濱、DF:三角洲前緣、DP:三角洲平原、8750:碳十四定年（單位年）(陳華玟等, 2007)

表 5-4.3：彰化斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
彰化斷層	斷層分段	A: 彰化斷層+大甲斷層		地形、鑽井及震測	林啟文等, 2008；林朝棨, 1957
		B: 彰化斷層			
	長度 (km)	A: 85 B: 36			
	寬度(km) （以傾角 45 度計算）	23.7		深度/sin 傾角（以深度 10 公里，傾角 25 度計算）	
	破裂深度 (km)	剖面 AA’	6 km(和車籠埔斷層相接)	地形、鑽井資料	Suppe, 1985
		剖面 BB’	7.5 km(和車籠埔斷層相接)		
	面積 (km^2)	A: 2011 B: 852		長度×寬度	
	走向	呈北北西轉南北走向		地形、鑽井及震測	
	傾斜角度	向東傾斜 18°~45°		震測資料	Chen, 1978
		剖面 AA’	地下 0.5 km 內約為 5	地形、鑽井資料	Suppe, 1985
			0.5 km-5.0 km 約為 20°		
			地下 5.0 km 以下約為 5°		
		剖面 BB’	約 30°-40°之間，近地表處以及 7.5 公里附近趨緩(約<5°)		
		約 13°(井深 370m 之資料)		鑽井資料	吳榮章等，2002
	斷層機制	逆移斷層		震測資料	
	短期滑移速率 （mm/yr）	1996-1999 (集集震前)	平行斷層走向分量 2.1 (右移)	GPS 資料	饒瑞鈞等, 2006
			垂直斷層走向分量 3.7 (壓縮)		
			高程方向為 8.4 (抬升)		
		2002-2006 (集集震後)	平行斷層走向分量 1.2 (左移)		
			垂直斷層走向分量 4.2(壓縮)		
			高程方向為 3.2 (抬升)		
	長期滑移速率(mm/yr)	北段	約 1.4-2.3 mm/yr(垂直抬升)	鑽井資料、碳 14 定年	陳文山等, 2008

		南段	約 0.4-0.8 mm/yr(垂直抬升)	(北段：國聖、彰化1號、南段：員林、員林2號井)		
		16.3±4.1 mm/yr		八卦山台地，調查變形之階地及地貌，並使用 OSL 及碳定年		Simoes et al. 2007
		6.18±0.1 mm/yr（抬升速率）		階地碳 14 定年，計算階地之抬升速率		Ota et al., 2002
		21 mm/yr		結合階地定年及 shear fault-bend folding 形貌		Yue et al., 2011
		4 mm/yr		PK1~PK4 階地定年	利用宇宙射線定年法及土壤發育指標，得到階地形成年代。利用階地面的傾斜角度與 shear fault- bend fold model 推估彰化斷層的縮短量	Siame et al., 2012
		6.5 mm/yr		PK5 階地定年		
		22.8 mm/yr		PK6 階地定年		
		A: 10.1，σ=9.7 B: 14.6，σ=13.4		三維塊體模型，資料為台灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場		本計畫推估
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	1.6，σ=1.8		三維塊體模型，資料為台灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場		本計畫推估
	單一事件變位量 (m)			尚未發現指準地層等確認一次事件變位量		
	最大可能地震規模 (M_W)	A: 7.3		Mw =4.33+0.90 log A σ=0.24		Wells and Coppersmith, 1994（逆斷層）
		B: 7.0				
		A: 7.4		$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$		Yen and Ma, 2011
		B: 6.9				
	地震重複週期(年)					
	最近一次活動時間	29230 年至 34390 年之間		鑽井岩層層序對比、碳 14 定年		陳華玟等, 2007
		西元 1845 年（？）		歷史地震文獻記載		鄭世楠與葉永田，1989; Lee and Lin, 2004

5-4-2 彰化斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估彰化斷層之破裂，主要分為 A：彰化斷層+大甲斷層、B：彰化斷層兩種破裂事件，圖 5-4.4 所示為此兩種破裂事件示意，權重設定為 A(0.5)、B(0.5)。

彰化斷層之邏輯樹建立如圖 5-4.5 所示，其不確定性的部份為斷層傾角、斷層深度、斷層滑移速率及特徵地震規模，滑移速率根據前節所蒐集到之資料，本計畫設定為 20（0.25），15（0.25），10（0.25）及 5（0.25）來評估，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith (1994)及 Yen and Ma (2011)之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith (1994)之標準差作為上下之分支，如表 5-4.4 所示。彰化斷層各節點權重的分配詳如圖 5-4.5 所示。

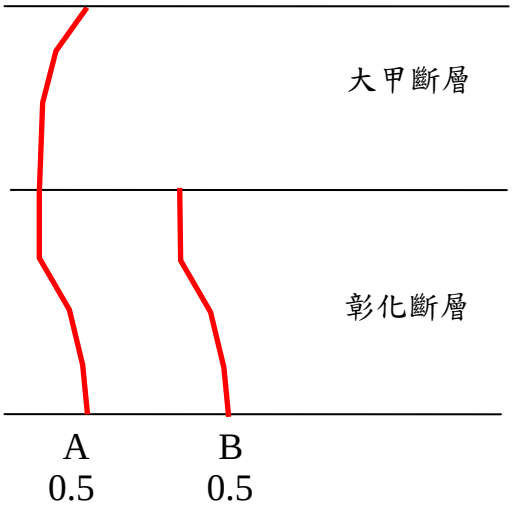


圖 5-4.4：彰化斷層兩種可能破裂長度之模式與權重。

表 5-4.4：彰化斷層各破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式)(Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式)(Mw)
							-σ	中值	+σ	
彰化斷層	A	85	10	23.7	25	2011	7.1	7.3	7.6	7.4
	B	36	10	23.7	25	852	6.7	7.0	7.2	6.9
權重							0.1	0.3	0.1	0.5

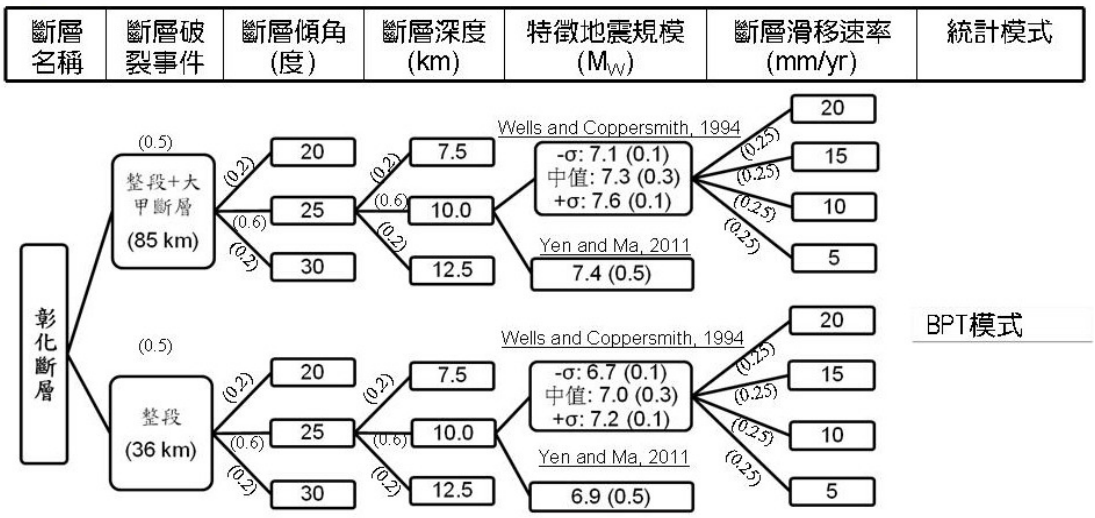


圖 5-4.5：彰化斷層邏輯樹權重分配。

5-4-3 彰化斷層特徵地震模式

彰化斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一再現週期，圖 5-4.6~圖 5-4.7 為 2 個分段事件之特徵地震模式分布情形。

A 破裂事件得到的地震矩規模 7.1~7.6；B 破裂事件得到的地震矩規模 6.7~7.2。各分支週期及權重如表 5-4.5 所示。

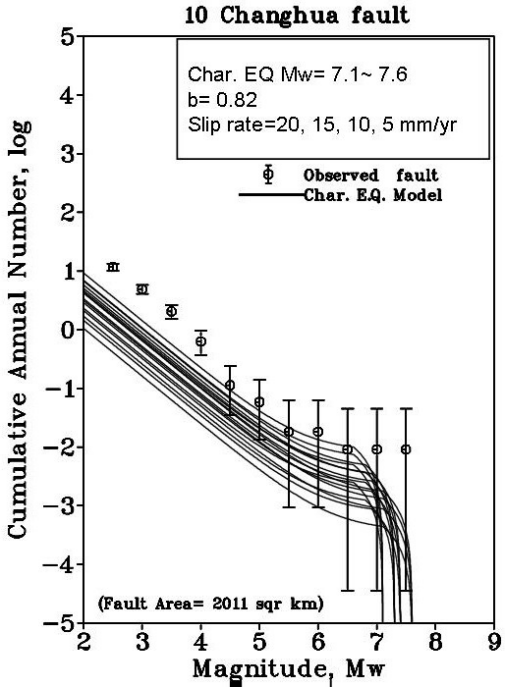


圖 5-4.6：整段+大甲斷層破裂事件之特徵地震模式。

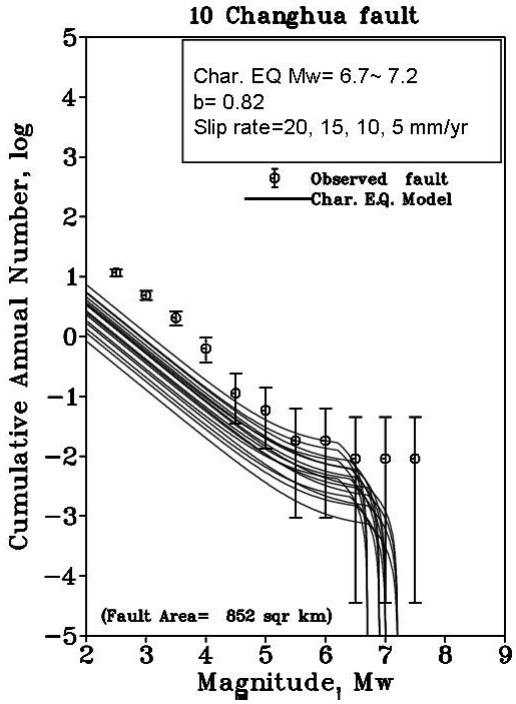


圖 5-4.7：整段破裂事件之特徵地震模式。

表 5-4.5：彰化斷層各破裂事件分支週期及權重。

		週期	權重			週期	權重
整段+大甲斷層破裂事件	A	99	0.0125	整段破裂事件	B	59	0.0125
		132	0.0125			78	0.0125
		199	0.0125			118	0.0125
		397	0.0125			235	0.0125
		198	0.0375			166	0.0375
		264	0.0375			221	0.0375
		396	0.0375			332	0.0375
		792	0.0375			664	0.0375
		558	0.0125			331	0.0125
		744	0.0125			441	0.0125
		1117	0.0125			662	0.0125
		2233	0.0125			1324	0.0125
		280	0.0625			117	0.0625
		373	0.0625			157	0.0625
		560	0.0625			235	0.0625
		1119	0.0625			470	0.0625

5-4-4 發震機率之推估

在獲得各破裂事件之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算彰化斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，假設彰化斷層最後一次發生時間為西元 1845 年，則採用 BPT 模式進行評估，表 5-4.6~表 5-4.7 為使用 BPT 模式評估彰化斷層各破裂事件之發生機率；假設彰化斷層最後一次發生時間為未知，則採用 Poisson 模式進行評估，表 5-4.8~表 5-4.9 為使用 Poisson 模式評估彰化斷層各破裂事件之發生機率。表 5-4.10 為彰化斷層評估之結果，以西元 2013 年為基準，得到彰化斷層 BPT 模式未來 30 年、50 年及 100 年發生規模 Mw= 6.7~7.6 之機率為 15.0%、22.4%及 35.5%；彰化斷層 Poisson 模式未來 30 年、50 年及 100 年發生規模 Mw= 6.7~7.6 之機率為 10.5%、16.4%及 27.9%。

表 5-4.6：彰化斷層（A）整段+大甲斷層破裂事件以 BPT 模式評估之發生機率。

整段+大甲斷層破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模(Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
99	7.1	1845	47.7%	66.1%	88.5%	0.0125
132	7.1	1845	37.7%	54.8%	79.9%	0.0125
199	7.1	1845	24.2%	37.6%	62.5%	0.0125
397	7.1	1845	6.2%	11.0%	24.6%	0.0125
198	7.3	1845	24.3%	37.8%	62.8%	0.0375
264	7.3	1845	15.7%	25.7%	47.5%	0.0375
396	7.3	1845	6.2%	11.1%	24.8%	0.0375
792	7.3	1845	0.2%	0.6%	2.1%	0.0375
558	7.6	1845	1.7%	3.5%	9.7%	0.0125
744	7.6	1845	0.4%	0.8%	2.9%	0.0125
1117	7.6	1845	0.0%	0.0%	0.2%	0.0125
2233	7.6	1845	0.0%	0.0%	0.0%	0.0125
280	7.4	1845	14.1%	23.4%	44.2%	0.0625
373	7.4	1845	7.3%	13.0%	28.0%	0.0625
560	7.4	1845	1.7%	3.4%	9.6%	0.0625
1119	7.4	1845	0.0%	0.0%	0.2%	0.0625
	7.1~7.6	權重後加總	4.7%	7.5%	13.6%	0.5

表 5-4.7：彰化斷層（B）整段破裂事件以 BPT 模式評估之發生機率。

整段破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模(Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
59	6.7	1845	66.0%	83.4%	99.3%	0.0125
78	6.7	1845	56.2%	74.7%	93.5%	0.0125
118	6.7	1845	41.6%	59.3%	83.6%	0.0125
235	6.7	1845	19.1%	30.6%	53.9%	0.0125
166	7.0	1845	30.0%	45.3%	70.9%	0.0375
221	7.0	1845	20.9%	33.1%	57.2%	0.0375
332	7.0	1845	9.8%	16.9%	34.5%	0.0375
664	7.0	1845	0.7%	1.5%	5.0%	0.0375
331	7.2	1845	9.9%	17.0%	34.7%	0.0125
441	7.2	1845	4.4%	8.2%	19.3%	0.0125
662	7.2	1845	0.7%	1.6%	5.0%	0.0125
1324	7.2	1845	0.0%	0.0%	0.1%	0.0125
117	6.9	1845	41.9%	59.7%	83.9%	0.0625
157	6.9	1845	31.8%	47.6%	73.3%	0.0625
235	6.9	1845	19.1%	30.6%	53.9%	0.0625
470	6.9	1845	3.5%	6.6%	16.4%	0.0625
	6.7~7.2	權重後加總	10.8%	16.1%	25.4%	0.5

表 5-4.8：彰化斷層（A）破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

整段+大甲斷層破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模(Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
99	7.1	未知	26.1%	39.7%	63.6%	0.0125
132	7.1	未知	20.3%	31.5%	53.1%	0.0125
199	7.1	未知	14.0%	22.2%	39.5%	0.0125
397	7.1	未知	7.3%	11.8%	22.3%	0.0125
198	7.3	未知	14.1%	22.3%	39.7%	0.0375
264	7.3	未知	10.7%	17.3%	31.5%	0.0375
396	7.3	未知	7.3%	11.9%	22.3%	0.0375
792	7.3	未知	3.7%	6.1%	11.9%	0.0375
558	7.6	未知	5.2%	8.6%	16.4%	0.0125
744	7.6	未知	4.0%	6.5%	12.6%	0.0125
1117	7.6	未知	2.7%	4.4%	8.6%	0.0125
2233	7.6	未知	1.3%	2.2%	4.4%	0.0125
280	7.4	未知	10.2%	16.4%	30.0%	0.0625
373	7.4	未知	7.7%	12.5%	23.5%	0.0625
560	7.4	未知	5.2%	8.5%	16.4%	0.0625
1119	7.4	未知	2.6%	4.4%	8.5%	0.0625
	7.1~7.6	權重後加總	4.0%	6.4%	11.6%	0.5

表 5-4.9：彰化斷層（B）破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

整段破裂事件(再現週期)（年）	地震矩規模(Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
59	6.7	未知	39.9%	57.1%	81.6%	0.0125
78	6.7	未知	31.9%	47.3%	72.3%	0.0125
118	6.7	未知	22.4%	34.5%	57.1%	0.0125
235	6.7	未知	12.0%	19.2%	34.7%	0.0125
166	7.0	未知	16.5%	26.0%	45.3%	0.0375
221	7.0	未知	12.7%	20.2%	36.4%	0.0375
332	7.0	未知	8.6%	14.0%	26.0%	0.0375
664	7.0	未知	4.4%	7.3%	14.0%	0.0375
331	7.2	未知	8.7%	14.0%	26.1%	0.0125
441	7.2	未知	6.6%	10.7%	20.3%	0.0125
662	7.2	未知	4.4%	7.3%	14.0%	0.0125
1324	7.2	未知	2.2%	3.7%	7.3%	0.0125
117	6.9	未知	22.6%	34.8%	57.5%	0.0625
157	6.9	未知	17.4%	27.3%	47.1%	0.0625
235	6.9	未知	12.0%	19.2%	34.7%	0.0625
470	6.9	未知	6.2%	10.1%	19.2%	0.0625
	6.7~7.2	權重後加總	6.8%	10.7%	18.4%	0.5

表 5-4.10：彰化斷層發生機率評估。

	特徵地震矩規模（M_w）	30 年機率		50 年機率		100 年機率	
		BPT	Poisson	BPT	Poisson	BPT	Poisson
P_A	7.1~7.6	4.7%	4.0%	7.5%	6.4%	13.6%	11.6%
P_B	6.7~7.2	10.8%	6.8%	16.1%	10.7%	25.4%	18.4%
P_{total}	6.7~7.6	15.0%	10.5%	22.4%	16.4%	35.5%	27.9%

5-5 九芎坑斷層

5-5-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：九芎坑斷層由中國石油公司（1986）首先提出，斷層位置如圖 5-5.1 所示，由雲林縣古坑向南延伸至嘉義縣竹崎附近，介於古坑斷層與竹崎斷層之間，全長約 17 公里(中國石油公司，1986；張徽正等，1998；林慶偉等，1999；林啟文等，2000；劉彥求等，2003)，可能與北側桐樹湖斷層相連。

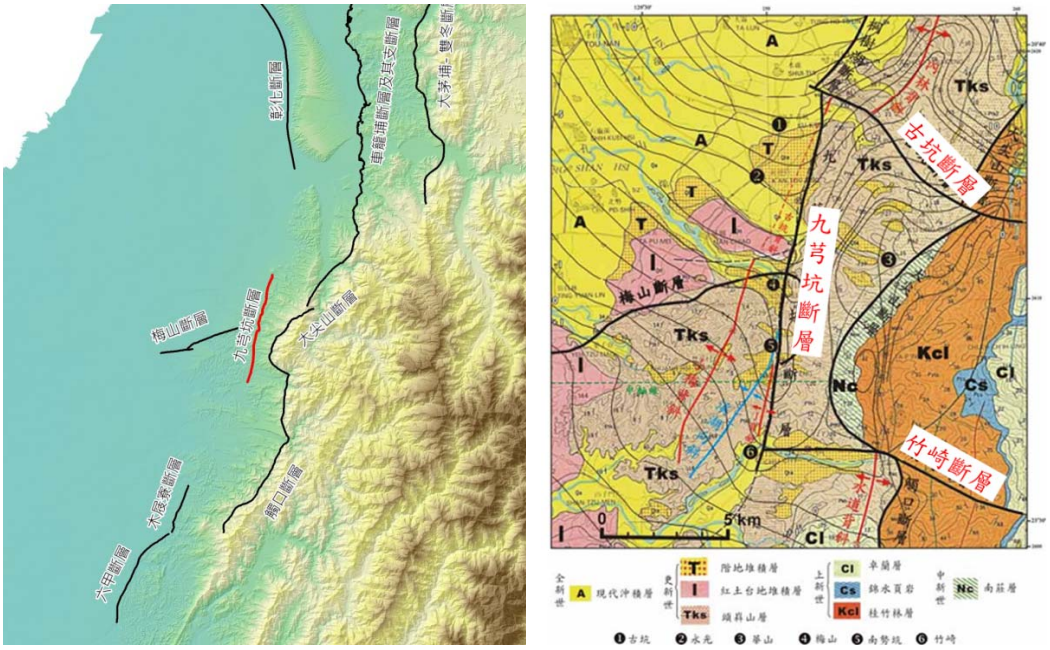


圖 5-5.1：左圖為九芎坑斷層地表分布圖，右圖為中油十萬分之一地質圖。
右圖標示布蓋重力曲線、地層、構造及鄉鎮(中油，1986)

2. 斷層幾何形貌 (傾角、深度)：將主要的地質觀察及探勘之傾角及深度結果彙整如表 5-5.1 及表 5-5.2。

表 5-5.1：九芎坑斷層傾角資料及文獻列表。

作者	方法	傾角	
林慶偉等(1999)	大湖口、梅山等地露頭	NE20°-25° /30°-35°E	
林煌棋(1996)	鑽井與震測資料	向東南傾斜 30°	
楊耿明等(2001)	震測、野外資料、井下資料	剖面六	約 30 度向東下傾，地下 2.2 公里處轉水平；
		剖面五	約 33-36 度，至深處更陡；
		剖面二	約 36 度。
石瑞銓等(2003)	地球物理 (震測與地電)	25 度向東傾	
翁子偉(2005)	反射震測線、震測剖面	東傾 30°-36°	

表 5-5.2：九芎坑斷層深度資料及文獻列表。

作者	方法	深度	
楊耿明等(2001)	震測、野外資料、井下資料	剖面五	7.5km(和鹿窟斷層相接)
		剖面二	3.5-4km(未和其他斷層相接)

3. 斷層機制：由九芎坑斷層沿線有數個剖面(石牛溪、劍湖山北側、大湖口溪、倒孔山溪、永興社區等露頭)，如在石牛溪露頭，斷層上盤的頭嵙山層逆衝到階地礫岩上，且在大湖口溪剖面，除卓蘭層截切階地礫岩外，斷層有右移分量 (林啟文等，2007)。陳文山等(2003)透過槽溝開挖，卓蘭層與晚更新世黃棕色砂層逆衝至礫石層之上，而為在兩側的礫石層形成撓曲(圖 5-5.2)。由野外露頭觀察以及槽溝開挖，九芎坑斷層為一向西逆衝斷層，含右移分量。

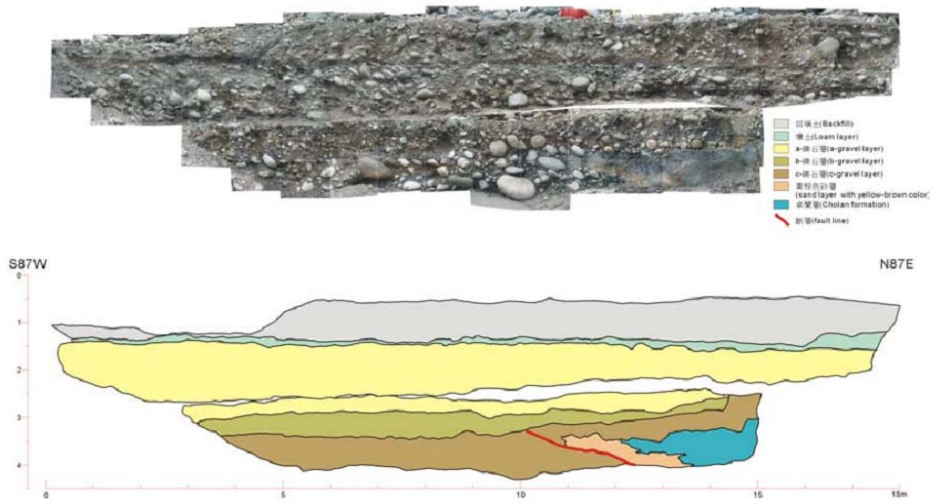


圖 5-5.2：九芎坑斷層槽溝開挖結果北側牆面。(陳文山，2003)

4. 短期滑移速率參閱參數表表 5-5.3。
5. 長期滑移速率參閱參數表表 5-5.3。
6. 單一事件變位量：由於野外的露頭只能看到河道礫石的位移，並且定年得到長期滑移速率結果。但沒有辦法斷定所能觀察的部分為完整單一事件，因此無法確定單一事件變位量。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith(1994)及 Yen and Ma(2011)等列於參數表中以供參考。本文提到之規模均為地震矩規模。
8. 最近一次活動時間：九芎坑斷層所截切的階地礫石定年結果為距今 47,100±1750 年至 18,540±130 年(許晉耀，2003)。而距今 18,540 年前以來也曾經活動過，且所定年的礫石採自低位河階，因此最近一次活動時間可能夠年輕。另外，陳文山等(2003)開挖位於大湖口溪北岸的九芎坑斷層槽溝(圖 5-5.2)，其中的卓蘭層截切下部的階地礫岩卻未切穿表層，顯示上部礫石層沉積之後斷層就沒有在活動，但是目前沒有定年資料，因此無法得知此次斷層活動年代。

彙整前人對於九芎坑斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 5-5.3 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 5-5.3：九芎坑斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據		研究方法	參考文獻
九芎坑斷層	斷層分段	A: 整段+桐樹湖斷層		地形、地層差異及斷層出露判釋	中國石油公司，1986；張徽正等，1998；林慶偉等，1999；林啟文等，2000；劉彥求等，2003
		B: 整段			
	長度 (km)	A: 28			
		B: 17			
	寬度(km)	14		深度/sin 傾角	
	破裂深度 (km)	剖面五	7.5km(和鹿窟斷層相接)	震測、野外資料、井下資料	楊耿明等，2001
		剖面二	3.5-4km(未和其他斷層相接)		
	面積 (km^2)	A: 392		長度×寬度	
		B: 238			
	走向	北北東		航空照片立體像對、數值地形模型	
	傾斜角度 (度)	25-36		野外測量、鑽井與震測資料、測線、地電阻	林慶偉等，1999；林煌棋，1996；楊耿明等，2001；石瑞銓等，2003；翁子偉，2005
	斷層機制	逆移斷層(含右移分量)		野外地質調查、槽溝開挖	林啟文等，2000；陳文山等，2003
	短期滑移速率（mm/yr）	1996-1999 (集集震前)	平行斷層走向分量 0.4 (左移)	GPS 資料	饒瑞鈞等，2006
			垂直斷層走向分量 0.2 (壓縮)		
			高程方向為 2.1 (抬升)		
		2002-2006 (集集震後)	平行斷層走向分量 0.8 (左移)		
			垂直斷層走向分量 9.7(壓縮)		
			高程方向為 2.3 (抬升)		
	長期滑移速率 (mm/yr)	0.28-0.55		地貌、航照、DTM 以及碳 14 定年	Lin et al., 2007
		1.55		鑽井、野外露頭剖面以及螢光定年	Chen et al., 2009
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	3.9，σ=4.3		三維塊體模型，資料為台灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量 (m)			尚未發現指準地層等確認一次事件變位量	

	最大可能地震規模 (M_W)	A: 6.7	Mw =4.33+0.90 log A σ=0.24	Wells and Coppersmith, 1994（逆斷層）
		B: 6.5		
		A:6.6	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$	Yen and Ma, 2011
		B: 6.4		
	地震重複週期(年)			
	最近一次活動時間	<18,540 年	斷層截切階地礫岩定年	許晉耀，2003；陳文山，2003

5-5-2 九芎坑斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估九芎坑斷層之破裂，主要分為 A：桐樹湖斷層+九芎坑斷層、B：九芎坑斷層兩種破裂事件，桐樹湖斷層和九芎坑斷層分布關係如圖 5-5.3 所示，圖 5-5.4 所示為此兩種破裂事件示意，權重設定為 A(0.5)、B(0.5)。

九芎坑之邏輯樹建立如圖 5-5.5 所示，其不確定性的部份為斷層傾角、斷層深度、斷層滑移速率及特徵地震規模，滑移速率根據前節所蒐集到之資料，本計畫設定為 0.3（0.5），1.5（0.5）來評估，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith (1994)及 Yen and Ma (2011)之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith (1994)之標準差作為上下之分支，如表 5-5.4 所示。九芎坑斷層各節點權重的分配詳如圖 5-5.5 所示。

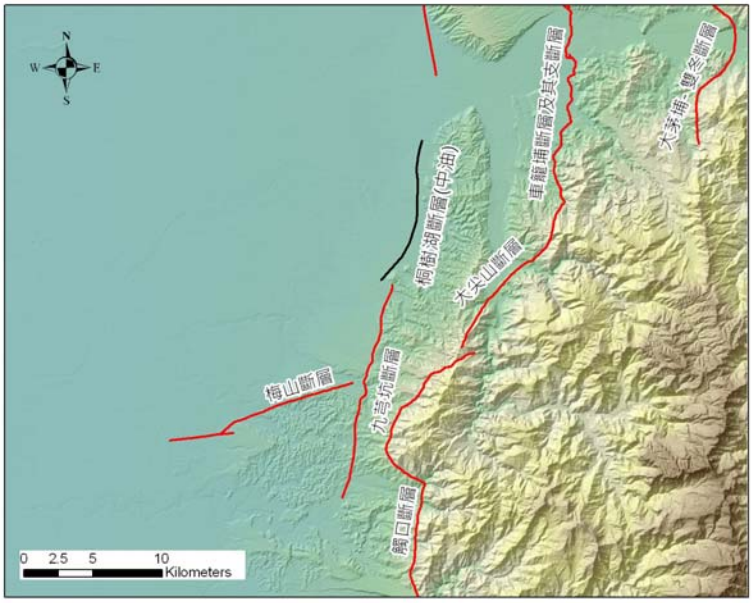


圖 5-5.3：桐樹湖斷層和九芎坑斷層之分布關係。

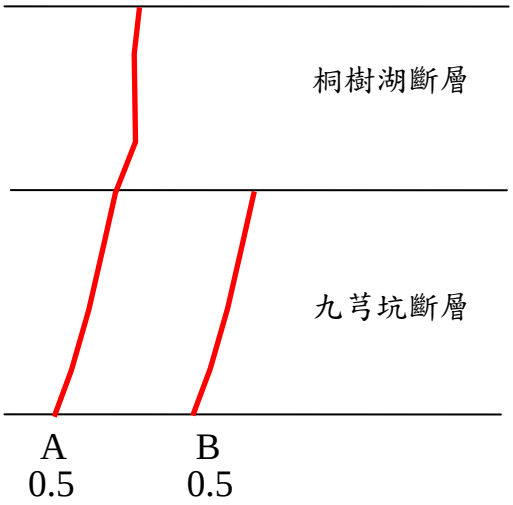


圖 5-5.4：九芎坑斷層兩種可能破裂事件之模式與權重。

表 5-5.4：九芎坑斷層各破裂事件規模及權重。

	破裂事件		長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
								-σ	中值	+σ	
九芎坑斷層	加桐樹湖斷層	A	28	7.0	14	30	392	6.4	6.7	6.9	6.6
	九芎坑斷層	B	17	7.0	14	30	238	6.2	6.5	6.7	6.4
權重								0.1	0.3	0.1	0.5

斷層名稱	斷層破裂事件	斷層傾角 (度)	斷層深度 (km)	特徵地震規模 (M_W)	斷層滑移速率 (mm/yr)	統計模式

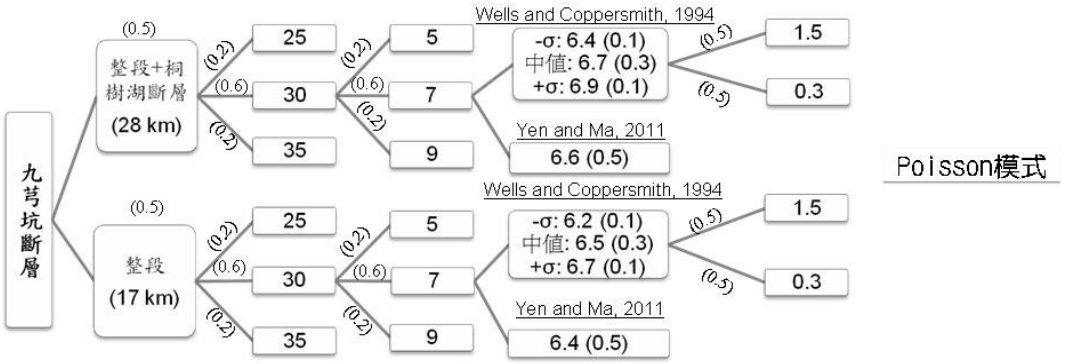


圖 5-5.5：九芎坑斷層邏輯樹權重分配。

5-5-3 九芎坑斷層特徵地震模式

九芎坑斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一再現週期，圖 5-5.6~圖 5-5.7 為 2 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

A 破裂事件得到的地震矩規模 6.4~6.9；B 破裂事件得到的地震矩規模 6.2~6.7。各分支週期及權重如圖 5-5.5 所示。

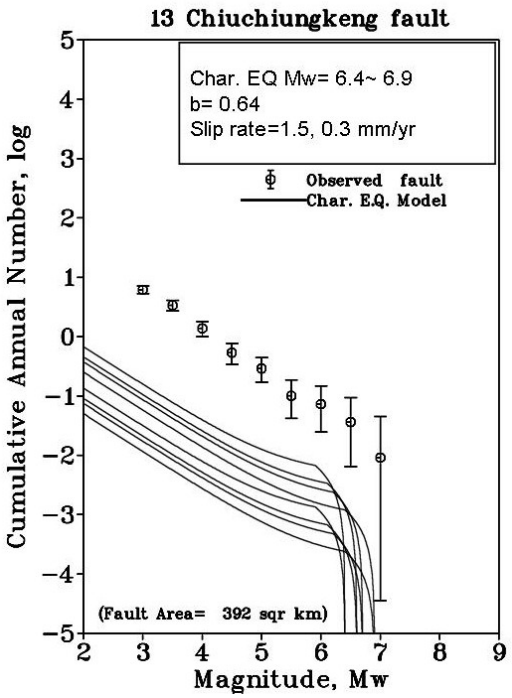


圖 5-5.6：A 破裂事件九芎坑斷層+桐樹湖斷層之特徵地震模式。

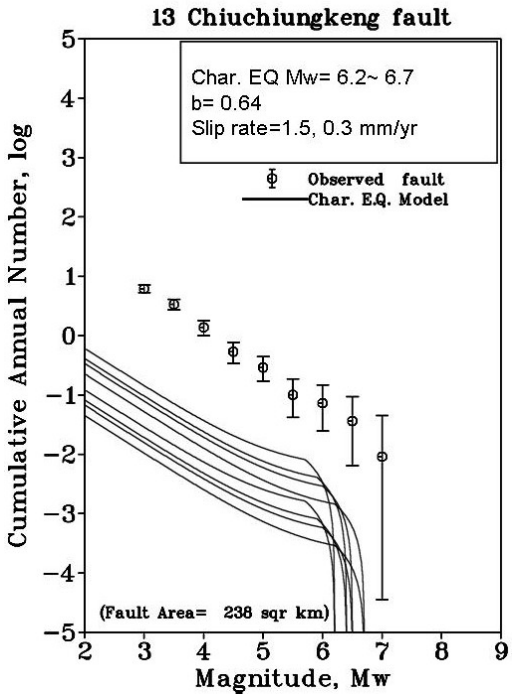


圖 5-5.7：B 破裂事件九芎坑斷層之特徵地震模式。

表 5-5.5：九芎坑斷層各破裂事件分支週期及權重。

		週期	權重			週期	權重
九芎坑斷層+桐樹湖斷層	A 破裂事件	147	0.025	九芎坑斷層	B 破裂事件	121	0.025
		735	0.025			606	0.025
		414	0.075			342	0.075
		2070	0.075			1709	0.075
		826	0.025			682	0.025
		4131	0.025			3410	0.025
		293	0.125			242	0.125
		1466	0.125			1210	0.125

5-5-4 發震機率之推估

在獲得各破裂事件之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算九芎坑斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，九芎坑斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。表 5-5.6~表 5-5.7 為使用 Poisson 模式評估九芎坑斷層各段之發生機率。表 5-5.8 為九芎坑斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2013 年為基準，得到九芎坑斷層未來 30 年、50 年及 100 年發生規模 Mw=6.5~6.9 之機率為 3.1%、5.0%及 9.2%。

表 5-5.6：九芎坑斷層（A）破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

A （再現週期）（年）	地震矩 規模(Mw)	最後一次 事件	30 年 機率	50 年 機率	100 年 機率	權重
147	6.4	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.025
735	6.4	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.025
414	6.7	-	7.0%	11.4%	21.5%	0.075
2070	6.7	-	1.4%	2.4%	4.7%	0.075
826	6.9	-	3.6%	5.9%	11.4%	0.025
4131	6.9	-	0.7%	1.2%	2.4%	0.025
293	6.6	-	9.7%	15.7%	28.9%	0.125
1466	6.6	-	2.0%	3.4%	6.6%	0.125
	6.5~6.9	權重後加總	2.2%	3.6%	6.7%	0.5

表 5-5.7：九芎坑斷層（B）破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

B （再現週期）（年）	地震矩 規模(Mw)	最後一次 事件	30 年 機率	50 年 機率	100 年 機率	權重
121	6.2	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.025
606	6.2	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.025
342	6.5	-	8.4%	13.6%	25.4%	0.075
1709	6.5	-	1.7%	2.9%	5.7%	0.075
682	6.7	-	4.3%	7.1%	13.6%	0.025
3410	6.7	-	0.9%	1.5%	2.9%	0.025
242	6.4	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.125
1210	6.4	-	不考慮	不考慮	不考慮	0.125
	6.5~6.7	權重後加總	0.9%	1.5%	2.7%	0.5

表 5-5.8：九芎坑斷層發生機率評估。

	特徵地震矩 規模（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
		Poisson	Poisson	Poisson
P_A	6.5~6.9	2.2%	3.6%	6.7%
P_B	6.5~6.7	0.9%	1.5%	2.7%
P_{total}	6.5~6.9	3.1%	5.0%	9.2%

5-6 大尖山斷層

5-6-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：大尖山斷層，依斷層的特性可以分為 2 段（圖 5-6.1）(林啟文等, 2007)：北段，為逆移斷層兼具右移性質，約呈東北走向，由南投縣竹山鎮嶺腳附近向西南方向延伸至雲林縣古坑鄉樟湖附近，為內磅斷層（又稱樟湖山斷層或古坑斷層）所截，北段在 1999 年集集地震時曾活動(經濟部中央地質調查所, 1999a, 1999b；林啟文等, 2000a)；南段，為逆移斷層，由東北走向轉東南走向，由古坑鄉樟湖延伸至嘉義縣竹崎鄉金獅寮；總長約 25 公里(中國石油公司, 1986; 黃鑑水等, 1994; 劉桓吉與李錦發, 1998; 張徽正等, 1998; 林啟文等, 2000a)。斷層北端在竹山鎮嶺腳附近與鹿寮斷層連接，南端在金獅寮附近與水社寮斷層及觸口斷層連接。

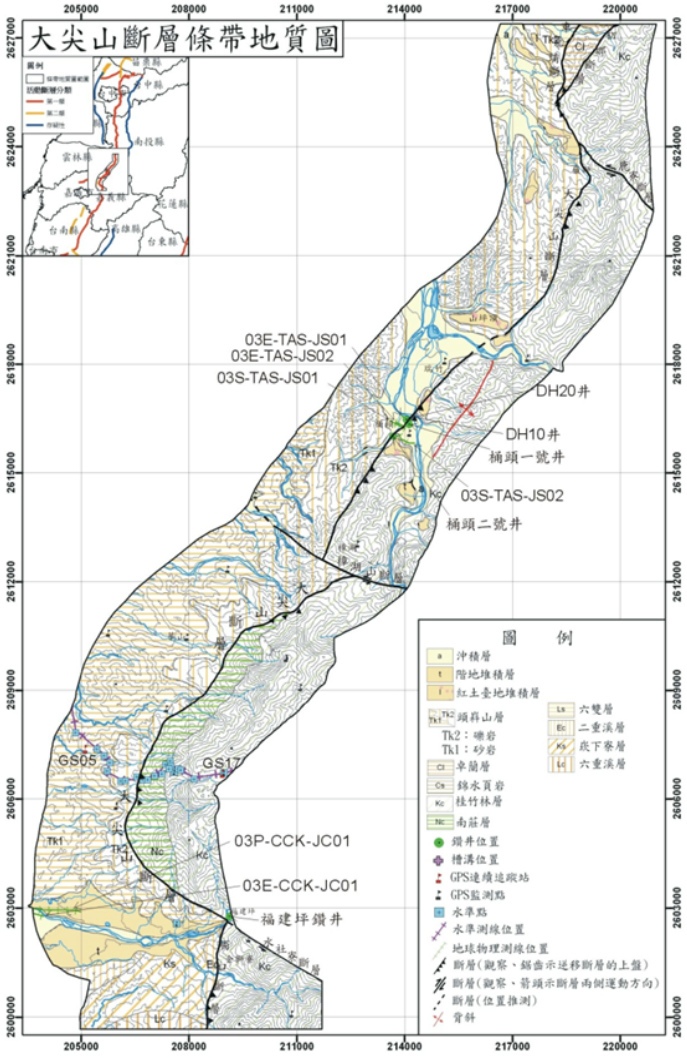


圖 5-6.1：大尖山斷層地質圖。
圖中顯示地球物理測線及鑽探位置。(座標系統 TWD67)(摘至林啟文等, 2007)

2. 斷層幾何形貌(傾角、深度)：綜合野外調查結果，大尖山斷層的北段為一高角度向東南傾斜的逆移斷層，南段則為低傾角的逆移斷層(林啟文等, 2007)。

3. 斷層機制：大尖山斷層北段在 1999 年集集地震時有活動，但主要為右移形式(以走向滑移形式的擦痕為主)，兼逆移性質。斷層南段則為低傾角的逆移斷層(林啟文等, 2007)。
4. 短期滑移速率參閱參數表表 5-6.2。
5. 長期滑移速率參閱參數表表 5-6.2。
6. 單一事件變位量：DH-10 井（深 50 公尺）與 DH-20 井（深 60 公尺）均位於桶頭橋西南側階面，兩者相距約 30 公尺，分別位於集集地震地表破裂的上下盤，地震當時水平位移約 40 公分，垂直位移約 10 公分(林啟文等, 2007)。集集地震地表破裂帶所造成的地表抬升現象多數伴隨有視右移，且右移量明顯大於抬升量(林啟文等, 2000b)，如在投 45 號道往林頂沿地表破裂的崖兩側高差約 30 公分（右移量為 2.3 公尺），在桶頭兩側高差約 40 公分（右移量為 2.0 公尺），各地詳細位移量如表 5-6.1 所示。

表 5-6.1：集集地震大尖山斷層兩側變位量及地表破裂地點(林啟文等, 2000a)。

地表破裂地點	破裂帶兩側高差(m)	破裂帶兩側右移量(m)
嶺腳 3 號橋	1.5	
瑞竹	0.2	1.4
乾芹崙溪	0.4	2.0
小河溝北岸	0.13	0.08
瑞竹林業合作社	0.4	
合作社西南方	0.2	0.1
向西南	0.05	-0.2
林頂台地	0.25	
投 45 號道	0.3	2.3
台地下方茶園	0.3	1.7
桶頭	0.4	2.0
清水溪南岸	0.4	1.1
桶頭尾安溪橋北方	0.3	0.1
河堤路面	0.4	
安溪橋西側	0.3	0.1
安溪橋西南方雜林	0.15	

7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith(1994)及 Yen and Ma(2011)等列於參數表中以供參考。
8. 最近一次活動時間:1999 年集集地震,是由車籠埔斷層與大尖山斷層北段再活動所引起(林啟文 等, 2000a)，大尖山斷層的變形帶從嶺腳至桶頭的安溪橋，長約 11 公里，但南段沒有發現近期活動的記錄(林啟文等, 2007)。

彙整前人對於大尖山斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 5-6.2 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 5-6.2：大尖山斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
大尖山斷層	斷層分段	北段	地質特性	中國石油公司, 1986; 黃鑑水等, 1994; 劉桓吉與李錦發, 1998; 張徽正等, 1998; 林啟文等, 2000a;林啟文等, 2007
		南段		
	長度(km)	(北段+南段) 25		
	寬度(km)	14.1	深度/ sin 傾角	
	破裂深度(km）	(約 5-12km) 假設最深為 12km	平衡剖面、地層剖面圖	楊耿明等, 2000; 黃旭燦,2003; Hung et al., 1999
	面積(km^2)	354	長度×寬度	
	走向	北段: 東北	地形、地表地質調查	林啟文等, 2007
		南段: 東南		
	傾斜角度(度)	北段: 大於 72 度	岩心資料、地電阻、反射震測探勘	楊耿明等, 2000; 劉彥求等, 2004; 林啟文等, 2007; 石瑞銓等, 2003
		南段: 40-45		
	斷層機制	北段: 右移形式兼逆移性質 南段: 逆移斷層	地質調查、震測資料	石瑞銓等, 2003; 林啟文等, 2007
	短期滑移速率（mm/yr）	平行斷層走向: -3.2 公厘/年 (右移) 垂直斷層走向: 4.0 公厘/年 (壓縮) 高程方向: 5.2 公厘/年 (抬升)	GPS 觀測 (2000-2006)	饒瑞鈞等，2006
	長期滑移速率(mm/yr)	4.375 mm/yr (以斷層傾角 60°計算)	利用地層層位落差所推估之長期滑移速率	黃鑑水，1994
		14.0 mm/yr		Hung et al., 1999
	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	19.4，σ=12.1	三維塊體模型，資料為台灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量(m)	最大右移量 2.3 公尺	1999 集集地震	林啟文等, 2000b; 林啟文等, 2007

	最大可能地震規模 (M_W)	6.6	M_w =4.33+0.90 log A σ=0.24	Wells and Coppersmith, 1994（逆斷層）
		6.5	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$	Yen and Ma, 2011
	地震重複週期(年)			
	最近一次活動時間	大尖山斷層北段：1999.9.21	歷史地震	林啟文等, 2000a；林啟文等, 2007

5-6-2 大尖山斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估大尖山斷層之破裂事件，已將大尖山斷層北段及南段分別合併至車籠埔斷層以及觸口斷層之破裂事件進行評估，為避免重複計算的問題，本節將不針對大尖山斷層本身進行評估，詳細說明參照 5-1 及 5-7 節內文之敘述。

大尖山斷層之邏輯樹建立如圖 5-6.2 所示，其不確定性的部份為斷層傾角、斷層深度、斷層滑移速率及特徵地震規模，滑移速率根據前節所蒐集到之資料，本計畫設定為 5（0.2），10（0.6），15（0.2）來評估，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。

大尖山斷層之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith (1994)及 Yen and Ma (2011)之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith (1994)之標準差作為上下之分支，如表 5-6.3 所示。大尖山斷層各節點權重的分配詳如圖 5-6.2 所示。

表 5-6.3：大尖山斷層破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
							-σ	中值	+σ	
大尖山斷層	整段	25	10	14.1	45	354	6.4	6.6	6.9	6.5
權重							0.1	0.3	0.1	0.5



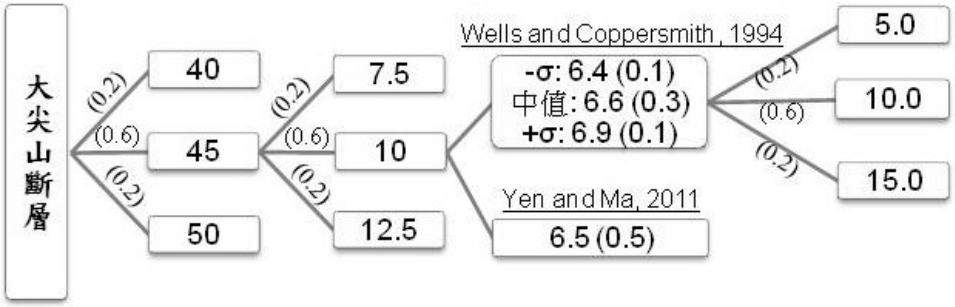


圖 5-6.2：大尖山斷層邏輯樹權重分配。

5-6-3 發震機率之推估

為避免重複計算之問題，將大尖山斷層北段之發震機率與車籠埔斷層一起評估，發震機率詳如 5-1 節所述，大尖山斷層南段之發震機率與觸口斷層一起評估，發震機率詳如 5-7 節所述。

5-7 觸口斷層

5-7-1 參數表之建立及說明

1. 斷層長度及分段：觸口斷層，依地質特性分為 2 段(圖 5-7.1)：北段呈南北走向，由嘉義縣竹崎鄉金獅村向南延伸至番路鄉觸口村；南段約呈北北東走向，由觸口村向南延伸至台南縣白河鎮關嶺里(吉田要, 1931)；兩段長度合計約 28 公里(林啟文等, 2007) 。斷層北端在福建坪附近與大尖山斷層以水社寮斷層連接，斷層南端在關子嶺附近與崙後斷層連接。一般認為崙後斷層是觸口斷層的南向延伸(中國石油公司, 1986; 林啟文等, 2000; 張徽正等, 1998)，又稱烏山頭斷層(何信昌等, 2005)。崙後斷層亦為逆移斷層，呈東北走向，由嘉義觸口東方向西南延伸至台南縣左鎮鄉榮和村，長約 48 公里(中國石油公司, 1986)。藉由兩萬五千分之一條帶地質圖計算，觸口-崙後斷層全長約 58 公里。

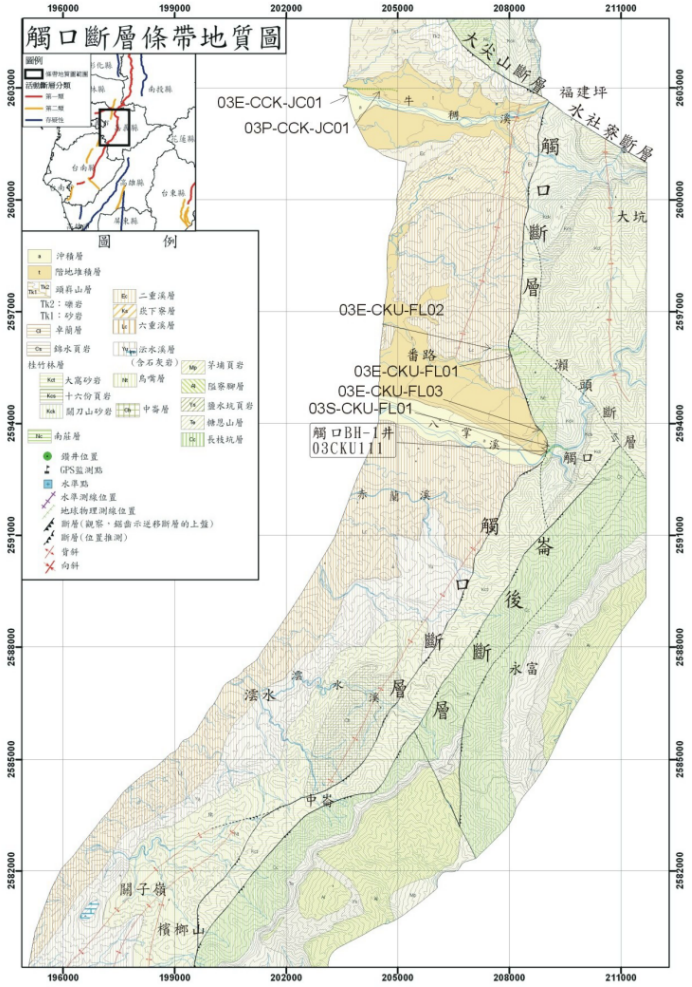


圖 5-7.1：觸口斷層地質圖。
圖中指示鑽井位置與地球物理測線。(林啟文等, 2007)

2. 斷層幾何形貌(傾角、深度)：地調所在觸口地區靈隱寺旁有 1 口鑽井，井深 8~142 公尺普遍具剪切現象，以 90~100 公尺間的剪切現象較明顯；井深 147 公尺再次出現剪切現象；配合地表地形特徵與岩芯中斷層帶的深度，研判該處觸口斷層的傾角約 51 度(林啟文

等, 2007)。楊耿明等人(2001)的研究報告中(圖 5-7.2、圖 5-7.3)，在 Line 2'剖面上，觸口斷層於淺處的傾角為 30°，至海水面下 1.7 公里深處轉成 55°的斷層，故斷層面呈一向下凹的形貌，推測在該剖面上觸口斷層於地下也應轉成水平的層間滑移斷層。剖面 Line 2 可看到觸口斷層具有高傾角(約 50°)的直面特性，下傾至海水面下約 7.5 公里始轉成水平的層間滑移斷層。從 Line 4 可看到在麓山區一段，觸口斷層以 40°的傾角自地表下傾至約海水面下三公里深處轉成位於大窩細砂岩內水平層間滑移斷層。Line 1 中顯示了崙後斷層以 30°的傾角向東下傾，並於海水面下 4 公里以及 5.5 公里深處分則轉成兩段水平滑移斷層。地調所在觸口斷層的地球物理探勘測線(石瑞銓, 2003)，位於觸口附近八掌溪河床上（天長地久橋下），反射震測剖面（03S-CKU-FL01；圖 5-7.4）顯示，破裂帶傾角由西向東有增加趨勢。由地電阻的探勘結果（測線 03E-CKU-FL03；圖 5-7.4），研判觸口斷層面向東傾斜，近地表的斷層面約 60 度，向下傾角漸緩約 30~40 度。陳郁文(2006)使用淺層反射震測法探討觸口斷層及其附近地下構造，結果如圖 5-7.5 所示，C 測線剖面（八掌溪剖面）。可看到地層大多平緩(嘉義平緩區)到了觸口斷層逆衝而上的位置，可看到斷層傾角為 35 度沿著一滑脫面低角度薄皮逆衝。Dp 測線剖面（石磌剖面），觸口斷層在南段的表現傾角逐漸增加，由 35 度增至 40 度。E 測線剖面（中崙剖面），到了觸口斷層南段末端，可看到觸口斷層傾角再增至 42 度。饒瑞鈞(2003)針對嘉南地區進行雙差分地震重新定位、三維地震重新定位、震源機制解推求（ML≧3.5，共 283 個）及應力反演等分析，協助確認嘉南地區發震構造之幾何形貌及位置，結果得觸口斷層深 10 公里，傾向朝東，傾角 40°之逆衝斷層，最大可能地震規模約為 Mw 6.4(圖 5-7.6)。嘉義瑞里地區臨時地震觀測站(以三角形表示)所收集的餘震(以圓圈表示)之震央分布圖(上圖)，和深度剖面圖(下圖)(圖 5-7.7a)。餘震主要分布在主震的北方，且集中在一很小範圍內。由餘震深度剖面圖，可看出餘震深度多淺於 10 km。而後使用聯合地震定位方法重新定位後的餘震分布與深度剖面，餘震分部主要集中在深度 2-8 公里(圖 5-7.7b) (陳國誠等, 1999)。

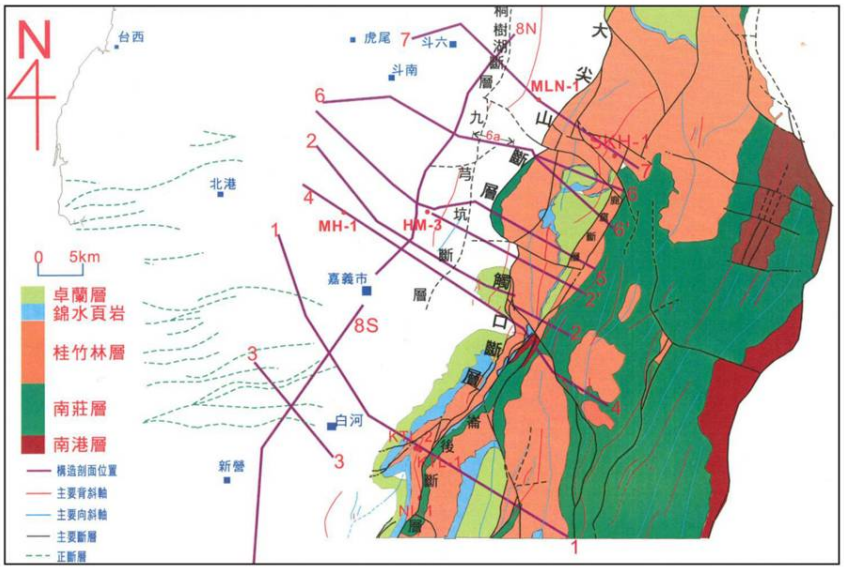


圖 5-7.2：深部構造剖面地理位置圖。
其中 Line 2'、Line 2、Line 4、Line 1 構造剖面通過觸口與崙後斷層(摘自楊耿明等，2001)。

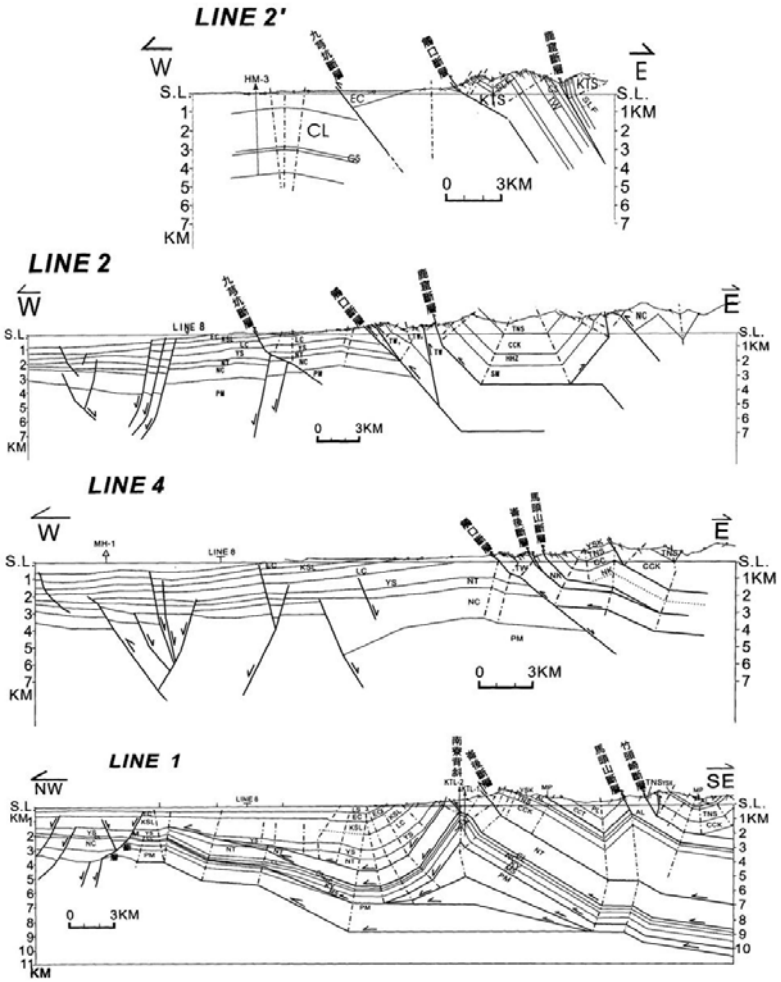


圖 5-7.3：觸口斷層與崙後斷層之深度構造剖面圖。
平原區為利用震測剖面之結果，將時間剖面換算成深度剖面而得。麓山區則利用鑽井之地下地層層位及傾角，以及地表地質圖幅(摘自楊耿明等，2001)。

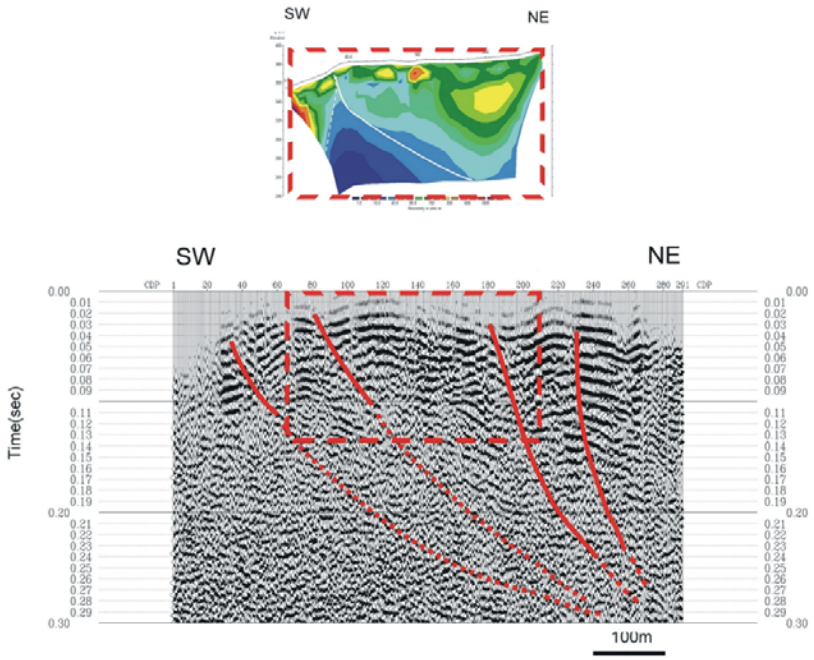


圖 5-7.4：觸口斷層的地球物理探勘結果。
上圖為地電阻剖面（03E-CKU-FL03 測線），下圖為反射震測剖面（03S-CKU-FL01 測線）。

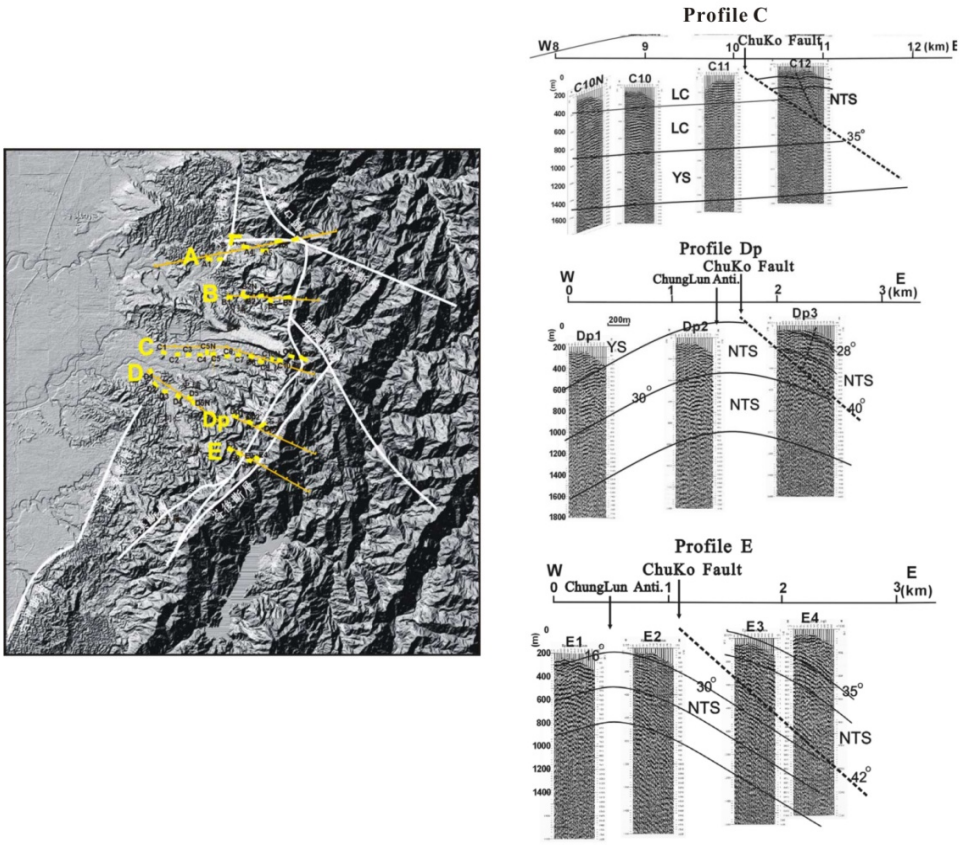


圖 5-7.5：陳郁文(2006) 使用淺層反射震測法探討觸口斷層及其附近地下構造。

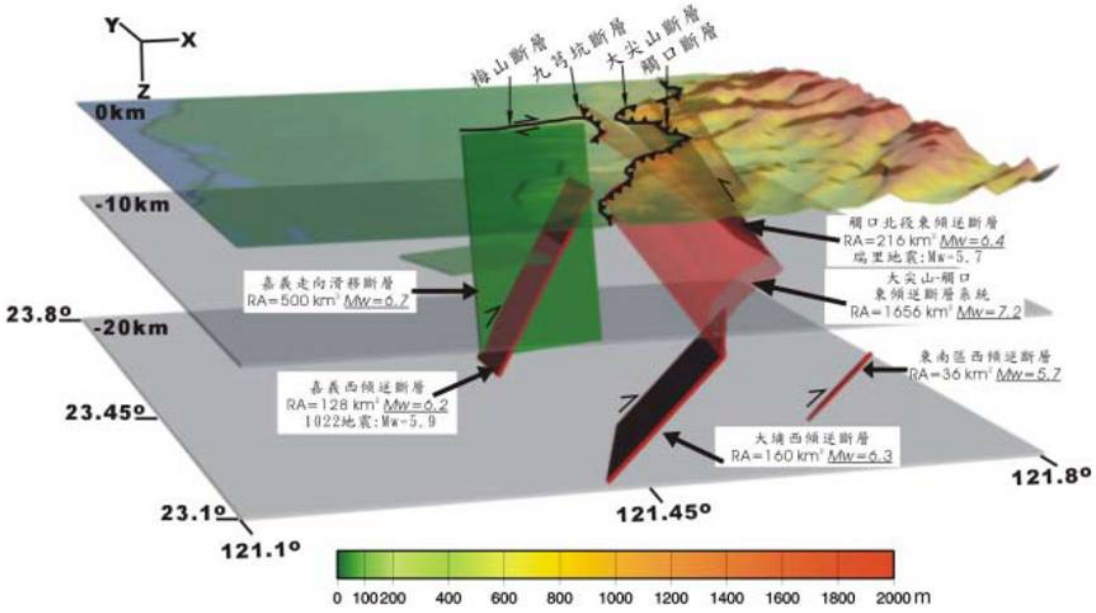


圖 5-7.6：台灣西南部發震構造與最大地震潛能評估圖。
其中 RA 為破裂面積。(摘自饒瑞鈞, 2003)

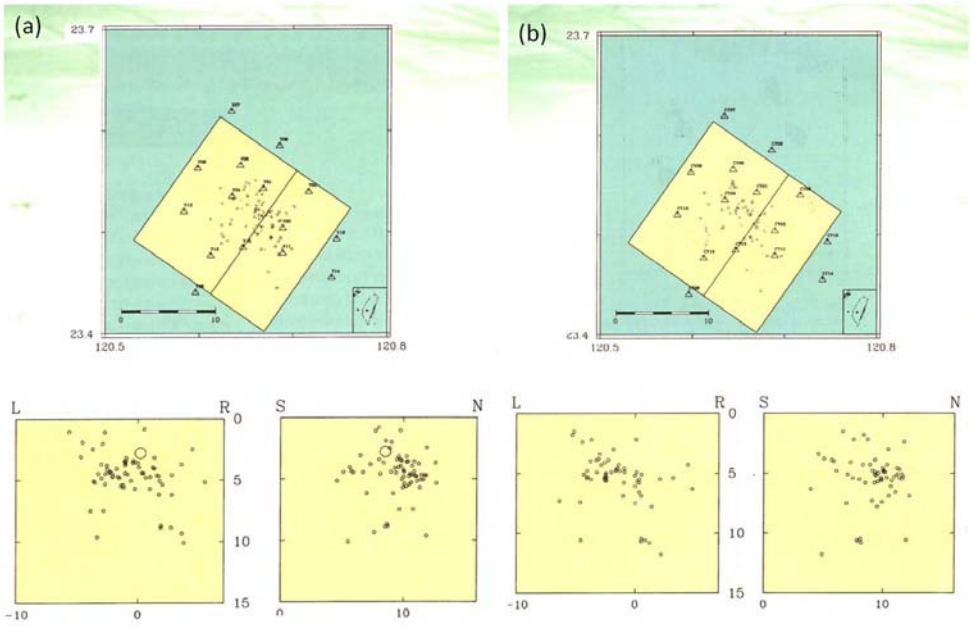


圖 5-7.7：瑞里地震所收集之餘震之震央分布圖，和深度剖面圖。
(a) 臨時地震觀測站以三角形表示，所收集的餘震以圓圈表示，圓圈為中央氣象局提供的主震震央位置。(b) 使用聯合地震定位方法重新定位後的餘震分布與深度剖面

3. 斷層機制：觸口斷層，為逆移斷層，洪日豪等(Hung et al., 1999)由平衡剖面的建立，研判在關仔嶺地區觸口斷層可能在地下淺部即併入崙後斷層，觸口斷層的南端，在中崙背斜與關仔嶺背斜中消失。而崙後斷層上下盤的層位落差相當大，他們研判主要的逆移量已由觸口斷層轉至崙後斷層，由於此種位移轉換，他們建議崙後斷層也應列入活動斷層。根據黃鑑水等(1992)對於觸口斷層的調查結果顯示，觸口斷層為一層位落差極大的逆斷層，在北段（竹崎以北）地層層位落差在兩千公尺，但愈往南層位落差逐漸變小，可是到觸口以南，在其東側平行之崙後斷層的地層層位落差卻是逐漸增加，此二斷層往南則合而為一。
4. 短期滑移速率參閱參數表表 5-7.1 所示。
5. 長期滑移速率參閱參數表表 5-7.1 所示。
6. 單一事件變位量：觸口斷層無直接證據可量測其單一事件變位量。
7. 斷層最大可能地震規模：藉由斷層尺度與地震規模之經驗公式可求得，此處經驗公式有 Wells and Coppersmith(1994)及 Yen and Ma(2011)等列於參數表中以供參考。
8. 最近一次活動時間：斗六丘陵上分布許多向西緩傾斜的階地，這些階地構成丘陵的最頂面，其形成環境屬於觸口斷層前緣的沖積扇(陳文山 et al., 2004)。黃鑑水等(1994) 在斗六東方華山(大尖山)附近、嘉義凍腳(觸口)，曾挖掘槽溝，發現斷層帶寬約 60 公尺，且由斷層泥逆衝向上衝入年代極新的崩積層中的現象，顯示最近年代仍有活動現象。斷層兩側上下盤由晚中新世之南莊層與晚更新世之頭嵙山層上部礫岩所接觸，因此斷層最早活動必須是在頭嵙山層礫岩沉積完成以後，也就是在距今 80 萬年前(假設此為頭嵙山層礫岩沉積年代)以後觸口斷層才開始活動，以至截切過頭嵙山層礫岩。而由三階古沖積扇階地，由最低一階的碳 14 定年結果，研判觸口斷層曾在 38,000 年前活動過，推測觸口斷層至少活動過 3 次。

彙整前人對於觸口斷層的相關調查與研究，斷層參數資訊整合如表 5-7.1 所示，若斷層可能有分段的特性也應在參數表中展現，並詳細列出各參數的研究方法及參考文獻資料來源。

表 5-7.1：觸口斷層參數表。

	斷層參數	斷層參數數據	研究方法	參考文獻
觸口斷層	斷層分段	大尖山南段	地質特性	吉田要, 1931; 林啟文等, 2007 中國石油公司, 1986; 林啟文等, 2000; 張徽正等, 1998
		觸口斷層段		
		崙後斷層		
	長度(km)	A(觸口斷層)：28		
		B(觸口斷層+大尖山南段)：42		
		C(觸口斷層+崙後斷層)：58		
		D(大尖山南段+觸口斷層+崙後斷層)：72		
	寬度(km)	15.6	深度/sin 傾角	
	破裂深度(km）	(約 3-10) 假設最深為 10 km	震測剖面、鉆井之地下地層層位及傾角、地表地質圖幅、雙差分地震重新定位、三維地震重新定位、震源機制解推求及應力反演等分析	楊耿明等，2001 饒瑞鈞，2003
	面積(km^2)	A：436, B：653, C：902, D：1120	長度×寬度	
	走向	觸口斷層北段: 南北	地形、地表地質調查	吉田要, 1931; 林啟文等, 2007
		觸口斷層南段: 北北東		
		崙後斷層: 東北		
	傾斜角度(度)	30°～60°	反射震測探勘、地電阻、鑽井資料、地震重新定位	林啟文等，2007; 楊耿明等，2001; 陳郁文，2006; 石瑞銓，2003; 饒瑞鈞，2003; 陳朝輝等，1999
	斷層機制	逆移斷層	平橫剖面、地質調查	黃鑑水等，1992; Hung et al., 1999
	短期滑移速率（mm/yr）	垂直斷層走向: 8.8 公厘/年 (壓縮) 高程方向: 3.9 公厘/年 (抬升)	GPS 觀測 (1999-2006)	饒瑞鈞等，2006
	長期滑移速率(mm/yr)	4.375 mm/yr (以斷層傾角 60°計算)	利用地層層位落差所推估之長期滑移速率	黃鑑水，1994
		14.0 mm/yr		Hung et al., 1999

	滑移虧損率(slip deficit rate)(mm/yr)	11.6，σ=12.4	三維塊體模型，資料為台灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場	本計畫推估
	單一事件變位量(m)			
	最大可能地震規模(M_w)	A：6.7, B：6.9, C：7.0, D：7.1	M_w =4.33+0.90 log A σ=0.24	Wells and Coppersmith, 1994（逆斷層）
		A：6.6, B：6.8, C：7.0, D：7.0	$M = \log A + \frac{2}{3}\log\frac{\max(1, \sqrt{\frac{A}{H^2}})}{[1+\max(1, \frac{A}{H^2\beta})]/2} + \text{const.},$	Yen and Ma, 2011
	地震重複週期(年)			
	最近一次活動時間	38,000 年前	定年結果	黃鑑水等，1994

5-7-2 觸口斷層破裂模式及邏輯樹權重分配

本計畫在評估觸口斷層之破裂，主要分為 A：觸口斷層 (28 公里)、B：大尖山斷層南段+觸口斷層(14+28=42 公里)、C：觸口斷層+崙後斷層(58 公里)、D：大尖山斷層南段+觸口斷層+崙後斷層(14+58=72 公里)四種破裂事件，斷層分布關係及破裂事件示意如圖 5-7.8 所示，權重設定為 A(0.4)、B(0.2)、C(0.3)、D(0.1)。

觸口斷層之邏輯樹建立如圖 5-7.9 所示，其不確定性的部份為斷層傾角、斷層深度、斷層滑移速率及特徵地震規模，滑移速率根據前節所蒐集到之資料，本計畫設定為 5（0.2），10（0.6），15（0.2）來評估，此為暫時之分支與權重設定，將來則有賴專家提供更合邏輯之建議。

各破裂事件之特徵地震規模則代入 Wells and Coppersmith (1994)及 Yen and Ma (2011)之斷層幾何面積對地震矩規模之經驗公式，其中將 Wells and Coppersmith (1994)之標準差作為上下之分支，如表 5-7.2 所示。觸口斷層各節點權重的分配詳如圖 5-7.9 所示。

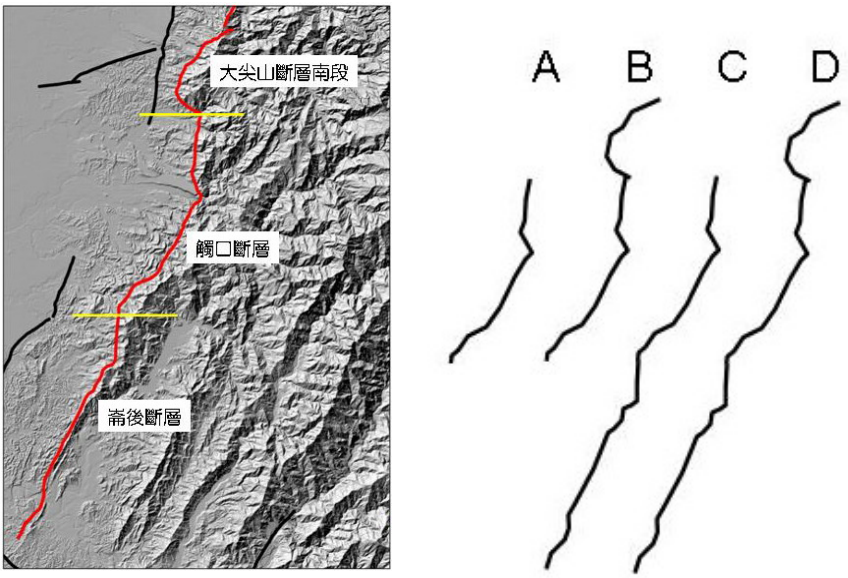


圖 5-7.8：觸口斷層各分段之分布關係及四種可能破裂之模式。

表 5-7.2：觸口斷層各破裂事件規模及權重。

	破裂事件	長度 (km)	深度 (km)	寬度 (km)	傾角 (度)	面積 (km2)	Wells and Coopersmith, 1994(破裂面積-規模關係式) (Mw)			Yen and Ma, 2011(破裂面積-規模關係式) (Mw)
							-σ	中值	+σ	
觸口斷層	A	28	10	15.6	40	436	6.5	6.7	7.0	6.6
	B	42	10	15.6	40	653	6.6	6.9	7.1	6.8
	C	58	10	15.6	40	902	6.7	7.0	7.2	7.0
	D	72	10	15.6	40	1120	6.8	7.1	7.3	7.0
權重							0.1	0.3	0.1	0.5

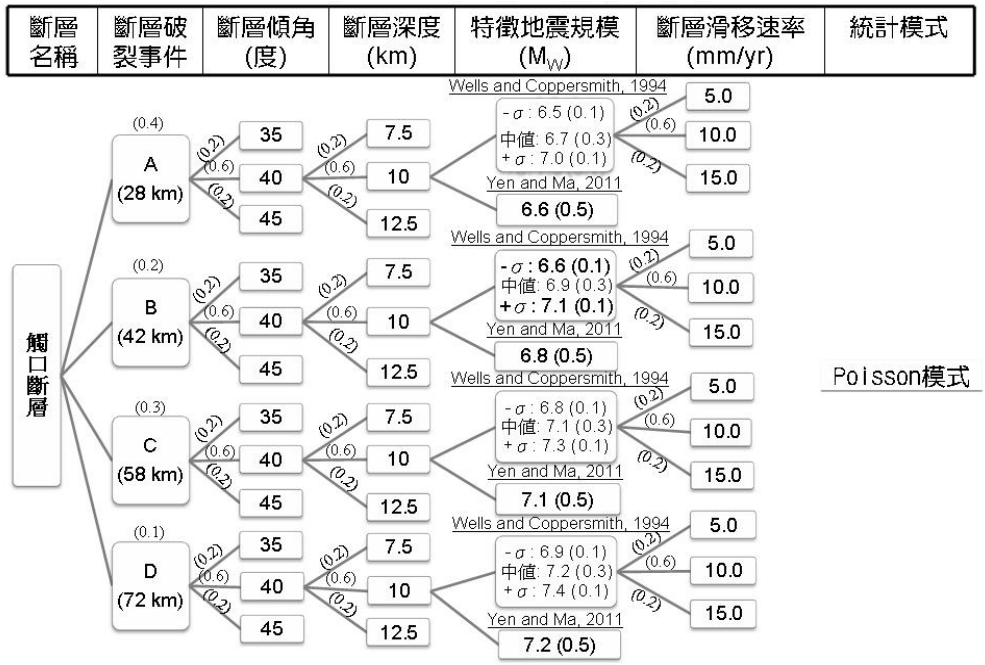


圖 5-7.9：觸口斷層邏輯樹權重分配。

5-7-3 觸口斷層特徵地震模式

觸口斷層各破裂事件的參數均可由特徵地震模式得到一再現週期，圖 5-7.10~圖 5-7.13 為 4 個破裂事件之特徵地震模式分布情形。

A 破裂事件得到的地震矩規模 6.5~7.0；B 破裂事件得到的地震矩規模 6.6~7.1；C 破裂事件得到的地震矩規模 6.7~7.2；D 破裂事件得到的地震矩規模 6.8~7.3。各分支週期及權重如表 5-7.3 所示。

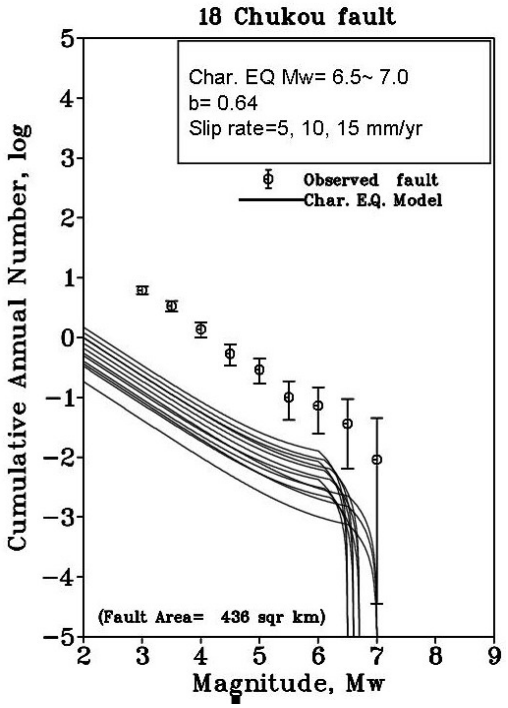


圖 5-7.10：A 破裂事件之特徵地震模式。

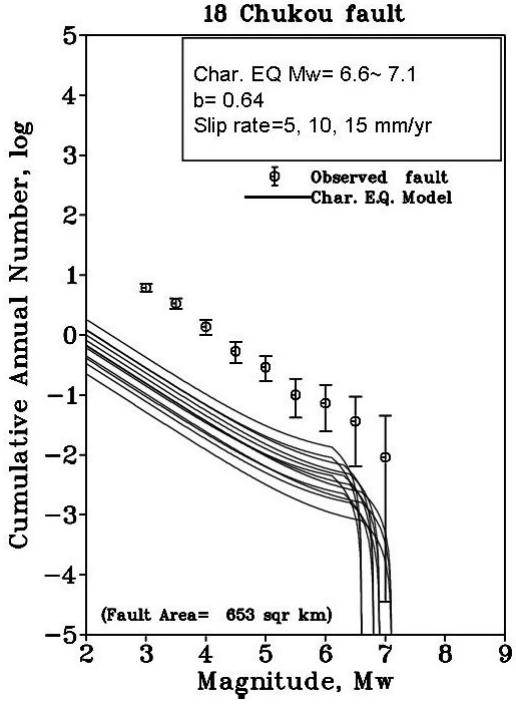


圖 5-7.11：B 破裂事件之特徵地震模式。

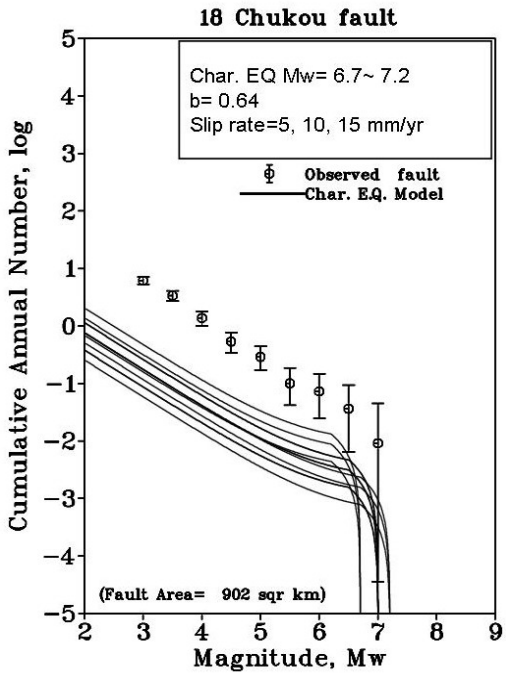


圖 5-7.12：C 破裂事件之特徵地震模式。

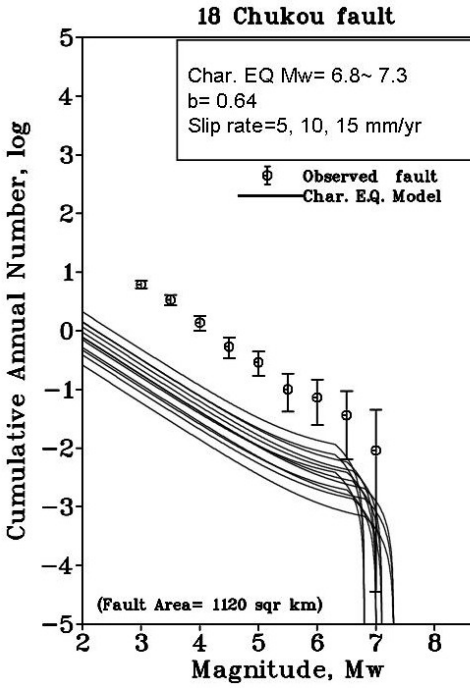


圖 5-7.13：D 破裂事件之特徵地震模式。

表 5-7.3：觸口斷層各破裂事件分支週期及權重。

		週期	權重			週期	權重
觸口斷層	A 破裂事件	234	0.008	大尖山斷層南段+觸口斷層	B 破裂事件	220	0.004
		117	0.024			110	0.012
		78	0.008			73	0.004
		466	0.024			621	0.012
		233	0.072			310	0.036
		155	0.024			207	0.012
		1313	0.008			1239	0.004
		657	0.024			619	0.012
		438	0.008			413	0.004
		330	0.04			439	0.02
		165	0.12			220	0.06
		110	0.04			146	0.02
		週期	權重			週期	權重
觸口斷層+崙後斷層	C 破裂事件	225	0.006	大尖山斷層南段+觸口斷層+崙後斷層	D 破裂事件	256	0.002
		113	0.018			128	0.006
		75	0.006			85	0.002
		635	0.018			722	0.006
		317	0.054			361	0.018
		212	0.018			241	0.006
		1267	0.006			1441	0.002
		633	0.018			720	0.006
		422	0.006			480	0.002
		635	0.03			511	0.01
		317	0.09			256	0.03
		212	0.03			170	0.01

5-7-4 發震機率之推估

在獲得各破裂事件之再現週期後，還需要最後一次地震發生之時間，才能以 BPT 模式估算觸口斷層未來 30、50 及 100 年的發生機率，觸口斷層最後一次發生時間為未知，因此本計畫採用 Poisson 模式進行評估。表 5-7.4~表 5-7.7 為使用 Poisson 模式評估觸口斷層各段之發生機率。表 5-7.8 為觸口斷層 Poisson 模式評估之結果，以西元 2013 年為基準，得到觸口斷層未來 30 年、50 年及 100 年發生規模 Mw=6.5~7.3 之機率為 11.7%、18.2%及 30.3%。

表 5-7.4：觸口斷層（A）破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

A 破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模 (Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
234	6.5	-	12.0%	19.2%	34.8%	0.008
117	6.5	-	22.6%	34.8%	57.5%	0.024
78	6.5	-	31.9%	47.3%	72.3%	0.008
466	6.7	-	6.2%	10.2%	19.3%	0.024
233	6.7	-	12.1%	19.3%	34.9%	0.072
155	6.7	-	17.6%	27.6%	47.5%	0.024
1313	7.0	-	2.3%	3.7%	7.3%	0.008
657	7.0	-	4.5%	7.3%	14.1%	0.024
438	7.0	-	6.6%	10.8%	20.4%	0.008
330	6.6	-	8.7%	14.1%	26.1%	0.04
165	6.6	-	16.6%	26.1%	45.5%	0.12
110	6.6	-	23.9%	36.5%	59.7%	0.04
	6.5~7.0	權重後加總	5.8%	9.1%	15.8%	0.4

表 5-7.5：觸口斷層（B）破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

B 破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模 (Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
220	6.6	-	12.7%	20.3%	36.5%	0.004
110	6.6	-	23.9%	36.5%	59.7%	0.012
73	6.6	-	33.7%	49.6%	74.6%	0.004
621	6.9	-	4.7%	7.7%	14.9%	0.012
310	6.9	-	9.2%	14.9%	27.6%	0.036
207	6.9	-	13.5%	21.5%	38.3%	0.012
1239	7.1	-	2.4%	4.0%	7.8%	0.004
619	7.1	-	4.7%	7.8%	14.9%	0.012
413	7.1	-	7.0%	11.4%	21.5%	0.004
439	6.8	-	6.6%	10.8%	20.4%	0.02
220	6.8	-	12.7%	20.3%	36.5%	0.06
146	6.8	-	18.6%	29.0%	49.6%	0.02
	6.6~7.1	權重後加總	2.4%	3.8%	6.7%	0.2

表 5-7.6：觸口斷層（C）破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

C 破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模 (Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
225	6.7	-	12.5%	19.9%	35.9%	0.006
113	6.7	-	23.3%	35.8%	58.7%	0.018
75	6.7	-	33.0%	48.7%	73.6%	0.006
635	7.0	-	4.6%	7.6%	14.6%	0.018
317	7.0	-	9.0%	14.6%	27.1%	0.054
212	7.0	-	13.2%	21.0%	37.6%	0.018
1267	7.2	-	2.3%	3.9%	7.6%	0.006
633	7.2	-	4.6%	7.6%	14.6%	0.018
422	7.2	-	6.9%	11.2%	21.1%	0.006
635	7.0	-	4.6%	7.6%	14.6%	0.03
317	7.0	-	9.0%	14.6%	27.1%	0.09
212	7.0	-	13.2%	21.0%	37.6%	0.03
	6.7~7.2	權重後加總	3.0%	4.8%	8.5%	0.3

表 5-7.7：觸口斷層（D）破裂事件以 Poisson 模式評估之發生機率。

D 破裂事件（再現週期）（年）	地震矩規模 (Mw)	最後一次事件	30 年機率	50 年機率	100 年機率	權重
256	6.8	-	11.1%	17.7%	32.3%	0.002
128	6.8	-	20.9%	32.3%	54.2%	0.006
85	6.8	-	29.7%	44.5%	69.2%	0.002
722	7.1	-	4.1%	6.7%	12.9%	0.006
361	7.1	-	8.0%	12.9%	24.2%	0.018
241	7.1	-	11.7%	18.7%	34.0%	0.006
1441	7.3	-	2.1%	3.4%	6.7%	0.002
720	7.3	-	4.1%	6.7%	13.0%	0.006
480	7.3	-	6.1%	9.9%	18.8%	0.002
511	7.0	-	5.7%	9.3%	17.8%	0.01
256	7.0	-	11.1%	17.7%	32.3%	0.03
170	7.0	-	16.2%	25.5%	44.5%	0.01
	6.8~7.3	權重後加總	1.0%	1.7%	3.0%	0.1

表 5-7.8：觸口斷層發生機率評估。

	特徵地震矩規模（M_w）	30 年機率	50 年機率	100 年機率
		Poisson	Poisson	Poisson
P_A	6.5~7.0	5.8%	9.1%	15.8%
P_B	6.6~7.1	2.4%	3.8%	6.7%
P_C	6.7~7.2	3.0%	4.8%	8.5%
P_D	6.8~7.3	1.0%	1.7%	3.0%
P_{total}	6.5~7.3	11.7%	18.2%	30.3%

5-8 斷層面滑移虧損率評估

5-8-1 中部 7 條活動斷層幾何參數及塊體模型設定

依彈性回彈理論指出，板塊之間的相對運動，使得應變能在局部斷層系統中累積，累積的應變能可分配到板塊地殼聚合變形和剪力應變，其中以剪力應變形式的應變能累積為主。能量釋放比例可藉由各種地殼變形測量結果獲得，其中短期的斷層滑移速率可藉由大地測量的方式，如 GPS 及水準測量，量測斷層上下盤之地表變形而得。

本研究藉由 Rob McCaffrey 提出的三維塊體模型 DEFNODE (McCaffrey, 2005)來進行斷層現今滑移率及虧損率的估算。DEFNODE 首先假設每個斷層都位於兩個轉動塊體(block)的邊界上。Ching et al. (2011)曾將台灣地區幾個重要的斷層視為塊體邊界，並提出一個塊體模型來探討台灣現今的地殼運動情形。因此本研究針對地質調查所於 2012 年公佈的台灣中部活斷層位置，並參考本研究所收集的斷層參數資料(表 5-8.1)，建構了本地區的塊體邊界模型(圖 5-8.1)。為了符合地調所公布的活動斷層資料，我們修正了 Ching et al. (2011)的模型；除另外加入 TAST、CYMT、HSS1 等塊體外，並修改 SHSS、CHYI、EKSH 等塊體幾何，分別以對應的大茅埔雙冬斷層、大尖山斷層及觸口斷層南段為其邊界(圖 5-8.1)。在我們的模型中，除了本研究計畫所針對的 7 條斷層外，另向南延伸加入了六甲、木屐寮、義竹等三條斷層作為塊體邊界，以消除因模型邊界效應所造成的誤差。其中義竹斷層雖然不是地調所所公佈的活斷層，但由於此構造代表了台灣海峽中生代基盤的南緣，預期會影響現今台灣西部的地殼變形，因此也將此構造納入塊體模型的邊界。

由圖 5-8.1 可看出，各塊體的邊界幾乎都和地表的斷層線一致，而有些延伸的斷層邊界主要是為了符合塊體在幾何上的連續性，以供數值模型所需。圖中邊界上的小圓圈代表節點，塊體模型即是用來計算斷層面在各節點上的滑移速率值。

為了求取各斷層面上的震間滑移速率及滑移虧損率(slip deficit rate)，必須先得到斷層的地下幾何形貌。本研究經由研讀中部活斷層的各種地質及地球物理文獻及證據，建立了本文研究範圍內的斷層幾何參數表（表 5-8.1）。注意節點的位置除了如圖 5-8.1 中所示外（深度為 0 處），沿著斷層傾角也分別在一半斷層深度及斷層底部各設一個節點。本文下一節圖中斷層面上的滑移量分佈皆是由這些節點上的值進行內插所得。

本研究使用 EURA 做為參考塊體(圖 5-8.1)，並假設參考塊體是不旋轉的，因此其餘塊體的剛體運動皆是相對於 EURA 的運動。DEFNODE 以此計算各塊體的剛體轉動速度場及斷層面(塊體邊界)上的節點的滑移速率，再透過內插方式得到斷層面上的滑移速率及虧損率分布(如圖 5-8.5)。除此之外，由於斷層潛勢評估需要知道表 5-8.1 上所列各斷層段的長期滑移速率、震間期滑移速率及滑移虧損率(slip deficit rate)，因此我們將每個斷層段所有節點上的值做平均，可以得到各個速率的平均值及標準差。由此可知，若沿斷層面的滑移速率分布較不平均 ，則所得的速率標準差也會相對較大(表 5-8.3)。

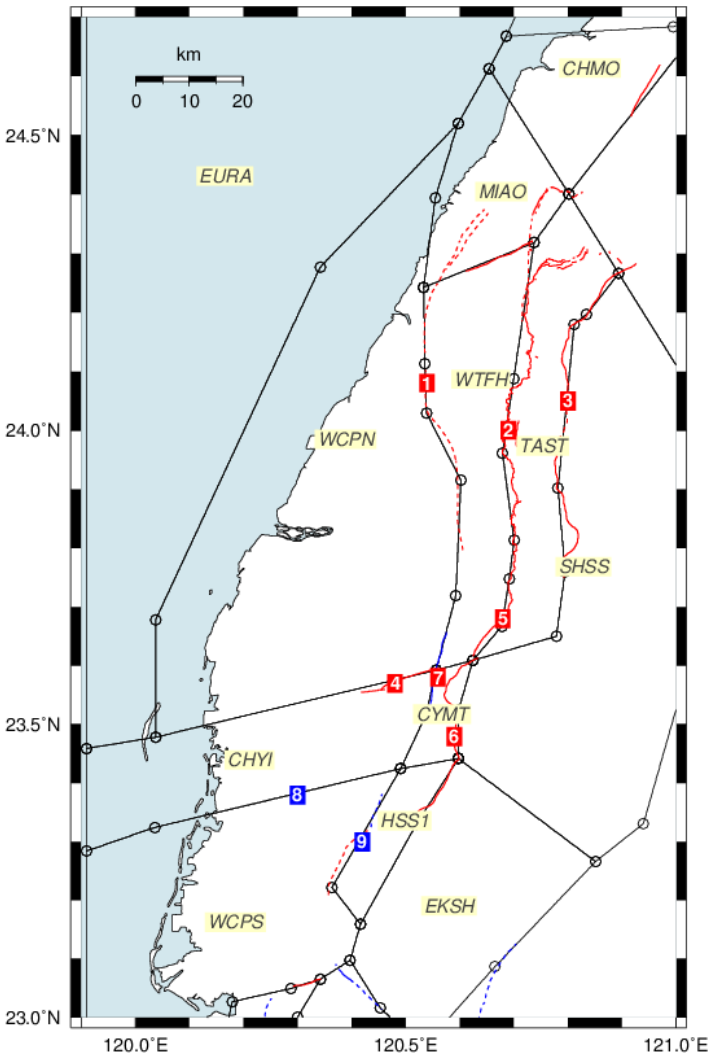


圖 5-8.1：本文所用的台灣中部三維塊體模型。
四位英文字母表示各塊體名稱。黑線代表塊體邊界，黑圈代表節點位置。實線表示地調所 2012 公布之活動斷層，虛線表示推測或隱伏斷層。數字代表之斷層分別為：1. 彰化斷層；2. 車籠埔斷層；3. 大茅埔－雙冬斷層；4. 梅山斷層；5. 大尖山斷層；6. 觸口斷層；7. 九芎坑斷層；8. 義竹斷層；9. 木屐寮－六甲斷層。

表 5-8.1：圖 5-8.1 中所示九條斷層之幾何參數

	斷層名稱	傾角(degree)	斷層底部深度(km)
1	車籠埔	北段：25，南段：35	10.0
2	梅山	75	12.5
3	大茅埔－雙冬	45	12.0
4	彰化	25	7.5
5	九芎坑	30	7.0
6	大尖山	45	10.0
7	觸口	40	10.0
8	義竹	10	7.0
9	木屐寮－六甲	30	5.0

5-8-2 中部 7 條活動斷層長期滑移速率及虧損率

本研究所使用的台灣中部地表運動資料為台灣 GPS 觀測網在 2002-2012 所觀測而得的平均水平速度場，包含了 155 個連續測站及 449 個 campaign 測站資料（圖 5-8.2）。將這些速度場及各斷層參數輸入 DEFNODE 後，即可求出最符合 GPS 觀測資料的塊體旋轉率，斷層震間長期滑移速率以及滑移虧損率(slip deficit rate)等值。結果分別陳述如下。

圖 5-8.3 表示最佳的塊體旋轉模型中，各塊體 Euler's pole 所在的位置。圖 5-8.4a 則顯示此模型中各塊體的旋轉角速度，及因這些塊體旋轉而在各 GPS 觀測站所造成的水平速度場。注意塊體 EKSH 有相對小的角速度值，但其內的 GPS 測站卻有著相對高的西北西向水平速度（多位於車籠埔—大尖山—觸口斷層以東），因此此塊體需要遙遠的 Euler's poles 才可以提供這樣的組合，也因此會引入較大的位置誤差（見表 5-8.2）。另外在 WTFH、CYMT、CHYI 及 HSS1 的 Euler's poles 誤差橢圓成細長型，是因為其角速度誤差相對角速度較大，因此在垂直這些塊體速度場的方向有較大的誤差（見圖 5-8.4a），在這個範圍內皆能符合角速度誤差值內的所造成的速度場。除此之外，其他塊體的旋轉軸及角速度值都在合理範圍。

圖 5-8.4b 顯示因塊體旋轉而在各 GPS 測站所造成的水平速度場。這樣的旋轉量同時也會在本研究區域內的九條斷層面上（圖 5-8.1）引起長期的滑移速率（圖 5-8.5a）。要強調的是，這裡的「長期滑移速率」是由最多數十年期間的測地資料所估算，再外插到一般地震週期的時間尺度上（約數百到數千年）。這和一般由地質方法如槽溝開挖或階地定年所計算出的數百至數萬年的平均斷層「長期」滑移速率有著不同的時間尺度。除此之外，由測地資料即塊體模型演算出的「長期滑移速率」比較接近 fault loading 的概念，而地質資料所得的長期滑移速率則反應了斷層面破裂量的累積。

圖 5-8.5b 顯示由 fault coupling 效應所計算出來的斷層震間滑移率。若斷層面完全自由滑動，coupling coefficient 為 0，則地表觀測到的水平運動應像圖 5-8.4b 所示。反之，若斷層面完全被鎖住，coupling coefficient 為 1，則靠近斷層的地表運動應接近零，然後在遠離斷層處才回到如圖 5-8.4b 所示。所以若將圖 5-8.5a 的長期滑移速率減掉圖 5-8.5b 的震間滑移率，剩下來的就是斷層面上「該滑而未滑」的滑移虧損率(slip deficit rate)（圖 5-8.5c）。由這些圖可看出，較大的滑移虧損率(slip deficit rate)出現在大茅埔—雙冬斷層的淺部，大尖山斷層，以及觸口斷層淺部。各斷層或斷層段上的平均滑移量及其誤差值（由節點所算的值內插平均而得）分別列在表 5-8.3 中。

圖 5-8.6b 為結合塊體旋轉及 fault coupling 效應所模擬求得的地表水平速度場，而圖 5-8.6c 則是 GPS 觀測值與此模擬速度場的差值，其對應之 reduced $\chi 2$ 為 118。由圖 5-8.6c 可看到除了因為塊體內部速度場的差異所造成的殘差值較大外，其餘部分的殘差都已達到可接受的標準。除此之外，由於塊體實際上並不是一個剛性物體，其內部可能會存在內部應變（internal strain），因此實際觀測到每個塊體上的速度及方向都不是有系統的繞著一個 Euler's pole 旋轉，而導致 reduced $\chi 2$ 變大。未來研究將考慮加入塊體內部的應變進行計算，以獲得更好的模擬結果。

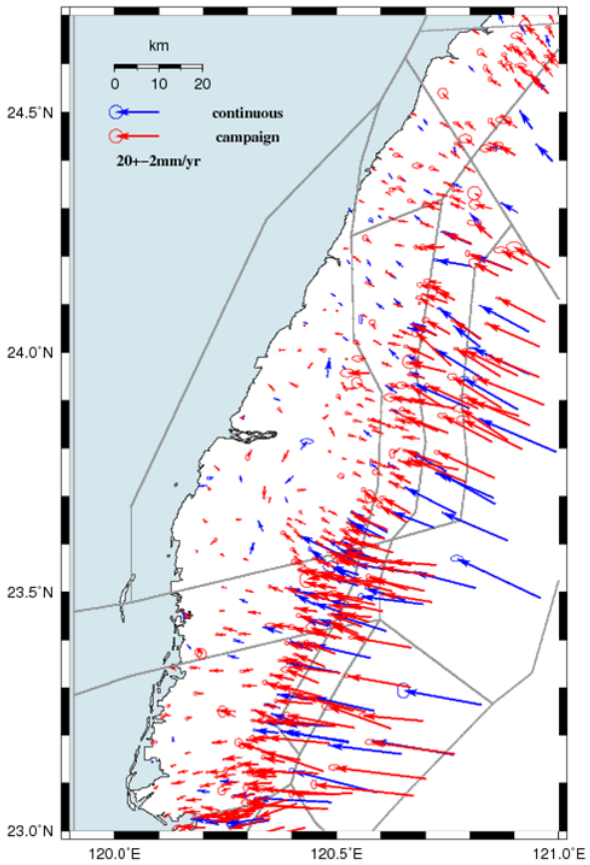


圖 5-8.2：在 2002-2012 期間利用連續 GPS（藍色箭頭）及 campaign GPS（紅色箭頭）資料所觀測的水平地表速度場（相對於澎湖白沙站）

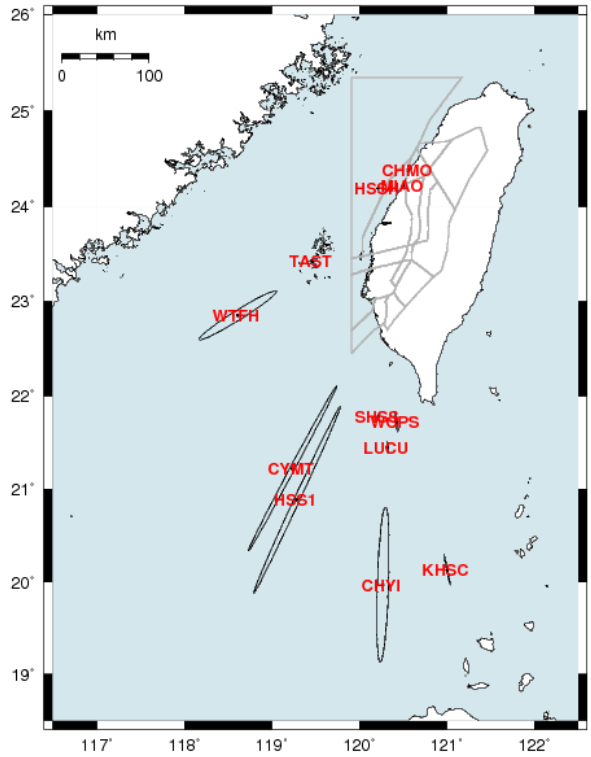


圖 5-8.3：最佳塊體旋轉模型中，各塊體 Euler's pole 所在的位置(黑點)及誤差範圍(黑色橢圓)。紅色英文字母代表 poles 所對應的塊體(見圖 5-8.1)

表 5-8.2：圖 5-8.1 中所示 Euler's pole 所在的位置及誤差範圍值

塊體	經度	緯度	誤差橢圓長軸(度)	誤差橢圓短軸(度)	誤差橢圓長軸方位角
EURA	180.0000	-0.0000	0.00	0.00	90.00
CHYI	120.2711	19.9691	1.68	0.12	1.91
WCPS	120.4258	21.7240	0.22	0.02	352.25
EKSH	123.6088	38.7173	10.19	0.10	190.19
LUCU	120.3239	21.4480	0.13	0.01	357.06
KHSC	121.0050	20.1300	0.34	0.01	348.42
WCPN	119.5630	26.6344	0.78	0.06	342.75
WTFH	118.6134	22.8558	0.96	0.10	57.77
MIAO	120.5056	24.2235	0.03	0.01	46.79
SHSS	120.2207	21.7783	0.09	0.01	19.73
CHMO	120.5644	24.3884	0.04	0.01	50.84
HSSH	120.2204	24.1970	0.03	0.01	59.13
TAST	119.4638	23.4294	0.12	0.03	65.56
CYMT	119.2363	21.2219	2.01	0.05	27.99
HSS1	119.2865	20.8863	2.21	0.06	24.70

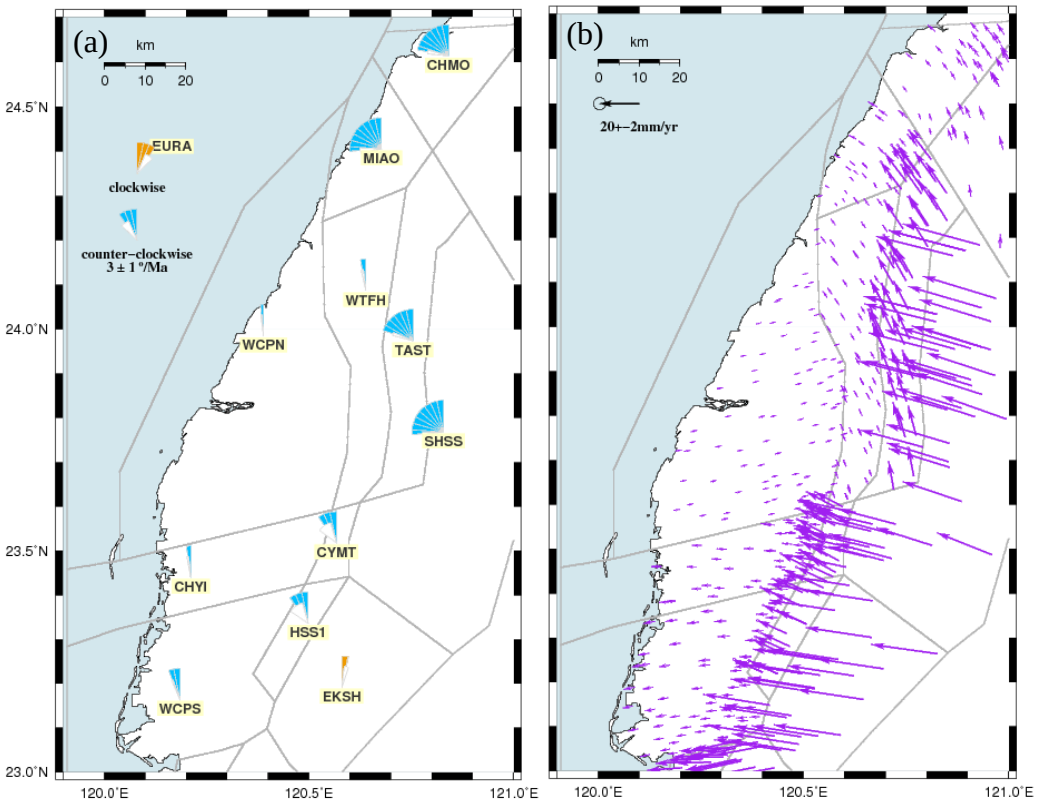


圖 5-8.4：(a) 最佳塊體旋轉模型中，各塊體以其 Euler's pole 為軸的旋轉角速度。藍色扇形表示逆時針旋轉，橘色扇形表示順時針旋轉。扇形每格代表 1°/My 的角速度。(b) 以(a)中的塊體角速度所推求各 GPS 測站相對應的水平速度。

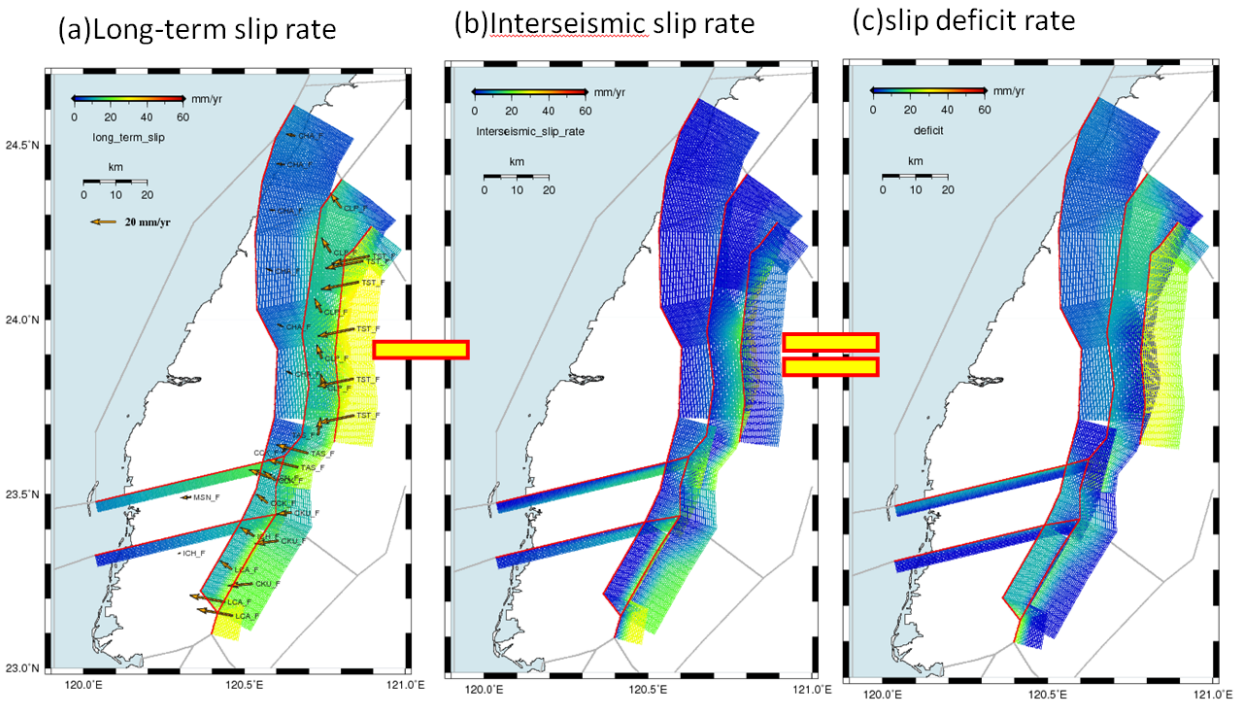


圖 5-8.5：(a) 由圖 5-8.4b 所推求的斷層長期滑移速率。橘色箭頭代表各斷層面上的滑移方向。暖色代表較高的速率值，冷色則表示較低值。(b) 各斷層面的震間滑移速率。 (c)由(a)圖減去(b)圖，得到斷層面上的滑移虧損率(slip deficit rate)。

$$\chi^2_{\text{red}} = \frac{\chi^2}{\nu} = \frac{1}{\nu}\sum \frac{(O-E)^2}{\sigma^2}$$

Reduce $\chi^2 = 119.526$

Dof = 1115

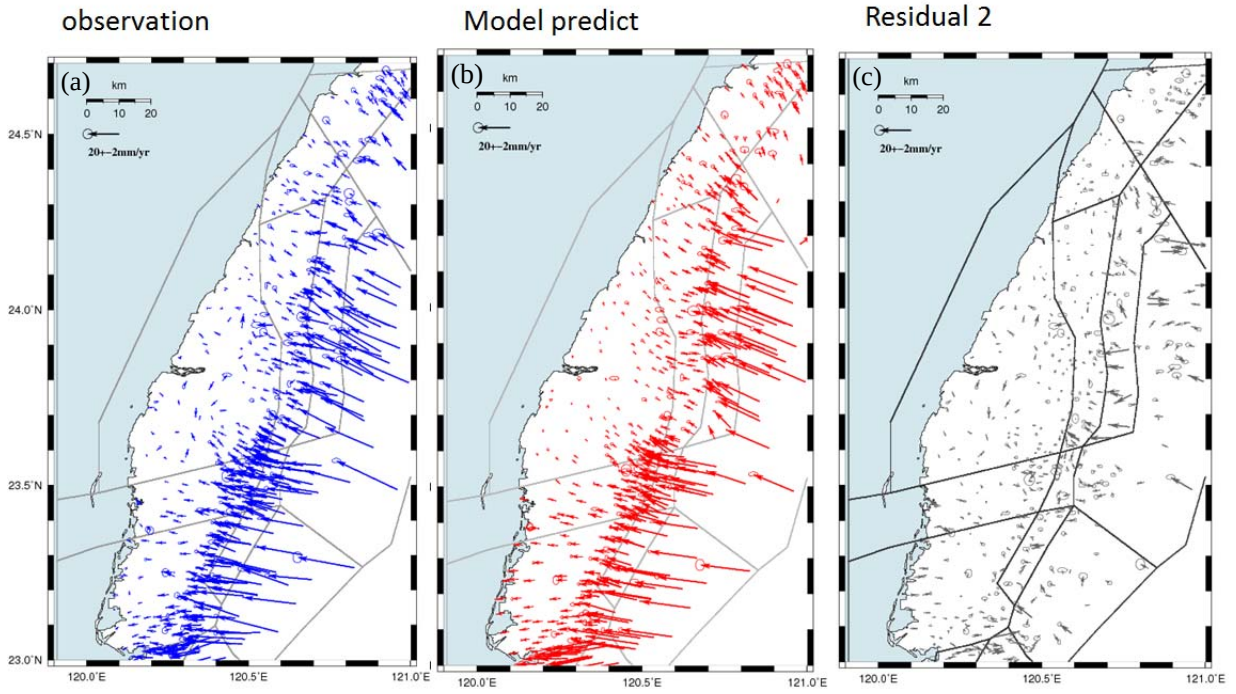


圖 5-8.6：比較 GPS 觀測速度場（藍色箭頭）以及本研究所得之最佳塊體模型（圖 5-8.5）所預估的地表運動（紅色箭頭）。黑色箭頭表示模型預估的殘差值，其對應之 reduced χ2 為 118（υ= Dof= degree of freedom）。

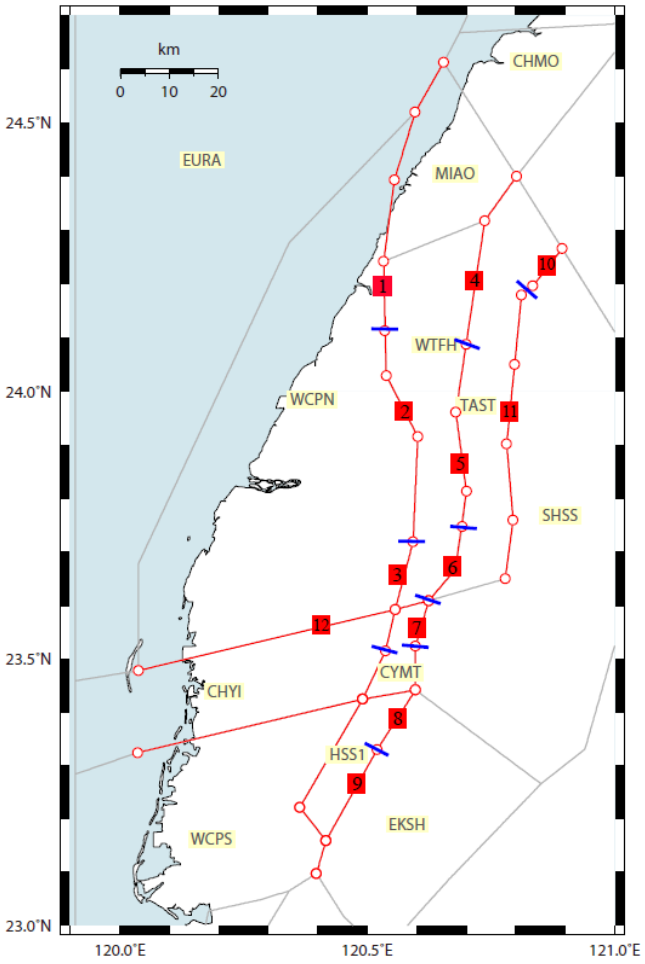


圖 5-8.7：計算平均滑移速率及滑移虧損率(slip deficit rate)的斷層(斷層段)分段點，藍線表示分段位置，紅色圓圈表示節點位置，平均值是計算各分節點上的平均值。

表 5-8.3：由最佳塊體模型所得之斷層滑移速率及滑移虧損率(slip deficit rate)。

斷層或斷層分段	長期平均滑移速率(mm/yr)	標準差	震間期平均滑移速率(mm/yr)	標準差	平均滑移虧損率(mm/yr)	標準差	編號
九芎坑整段	13.9	7.8	10.5	10.4	3.4	5.1	3
彰化	15.4	13.0	6.3	7.2	9.1	6.0	2
彰化+大甲	10.2	9.8	3.4	5.5	6.8	4.6	1+2
觸口	15.8	4.1	10.8	8.6	5.1	6.9	8
觸口+大尖山南段+崙後	17.3	5.1	8.1	8.8	9.2	9.7	7+8+9
觸口+大尖山南段	17.4	5.8	7.8	8.8	9.5	10.3	7+8
車籠埔整段	15.3	10.4	9.6	13.5	5.7	6.4	4+5+6
車籠埔北段	8.7	6.1	1.1	1.8	7.5	7.4	4
車籠埔南段	18.7	10.6	13.9	14.9	4.8	5.9	5+6
梅山	17.8	9.6	10.6	12.0	7.2	6.6	12
大尖山	27.9	6.9	4.7	10.3	19.4	12.1	6+7
大茅埔-雙冬	21.3	6.0	9.6	12.3	11.7	10.9	10+11
雙冬段	29.2	0.8	2.7	3.0	26.5	2.9	11

5-9 小結

1. 圖5-9.1至圖5-9.3除展示台灣活動斷層分布外，同時標示以西元2013年為基準的活動斷層在未來30年、50年、100年發生地震之機率。其中若已知上一次斷層錯動與大規模地震之發生時間得採用BPT模式，且假設發生率會隨時間變化；若未知上一次斷層錯動與大規模地震之發生時間得採用Poisson模式，假設發生率固定，不隨時間變化。活動斷層再現週期是根據斷層滑移速率之研究與調查成果所推估，進一步再計算活動斷層發生大地震之機率。
2. 車籠埔斷層可分為北段與南段（南段70公里，北段40公里），在斷層分段中根據南北兩端的延伸與否建立8種可能破裂事件。車籠埔斷層以BPT模式評估未來30年、50年及100年發生地震之機率，地震矩規模(Mw)介於6.5~7.6之間，機率各為2.2%、5.9%及17.7%。
3. 梅山斷層則根據長度不確定性分為三種可能之破裂事件，將梅山斷層以BPT模式評估未來30年、50年及100年發生地震之機率，地震矩規模(Mw)介於6.5~6.9之間，機率各為30.9%、44.1%及63.4%。
4. 大茅埔-雙冬斷層可分為整段、大茅埔斷層與雙冬斷層（大茅埔斷層14公里，雙冬斷層55公里）三個可能破裂事件，將大茅埔-雙冬斷層以Poisson模式評估未來30年、50年及100年發生地震之機率，地震矩規模(Mw)介於6.5~7.3之間，機率各為3.2%、5.1%及9.6%。
5. 彰化斷層之破裂，主要分為(A)彰化斷層+大甲斷層、(B)彰化斷層兩種破裂事件，採用BPT模式評估未來30年、50年及100年發生地震矩規模(Mw)介於6.7~7.6之間的機率各為15.0%、22.4%及35.5%；若採用Poisson模式未來30年、50年及100年發生地震矩規模(Mw)介於6.7~7.6之間的機率各為10.5%、16.4%及27.9%。
6. 評估九芎坑斷層之破裂，主要分為(A)桐樹湖斷層+九芎坑斷層、(B)九芎坑斷層兩種破裂事件，採用Poisson模式評估未來30年、50年及100年發生地震矩規模(Mw)介於6.5~6.9之間的機率分別為3.1%、5.0%及9.2%。
7. 評估大尖山斷層時，為避免重複計算之問題，將北段之發震機率與車籠埔斷層一起考量，南段之發震機率則與觸口斷層一起評估。
8. 評估觸口斷層之破裂，主要分為(A)觸口斷層(28公里)、(B)大尖山斷層南段+觸口斷層(14+28=42公里)、(C)觸口斷層+崙後斷層(58公里)、(D)大尖山斷層南段+觸口斷層+崙後斷層(14+58=72公里)四種破裂事件，採用Poisson模式評估觸口斷層未來30年、50年及100年發生地震矩規模(Mw)介於6.5~7.3之間的機率分別為11.7%、18.2%及30.3%。

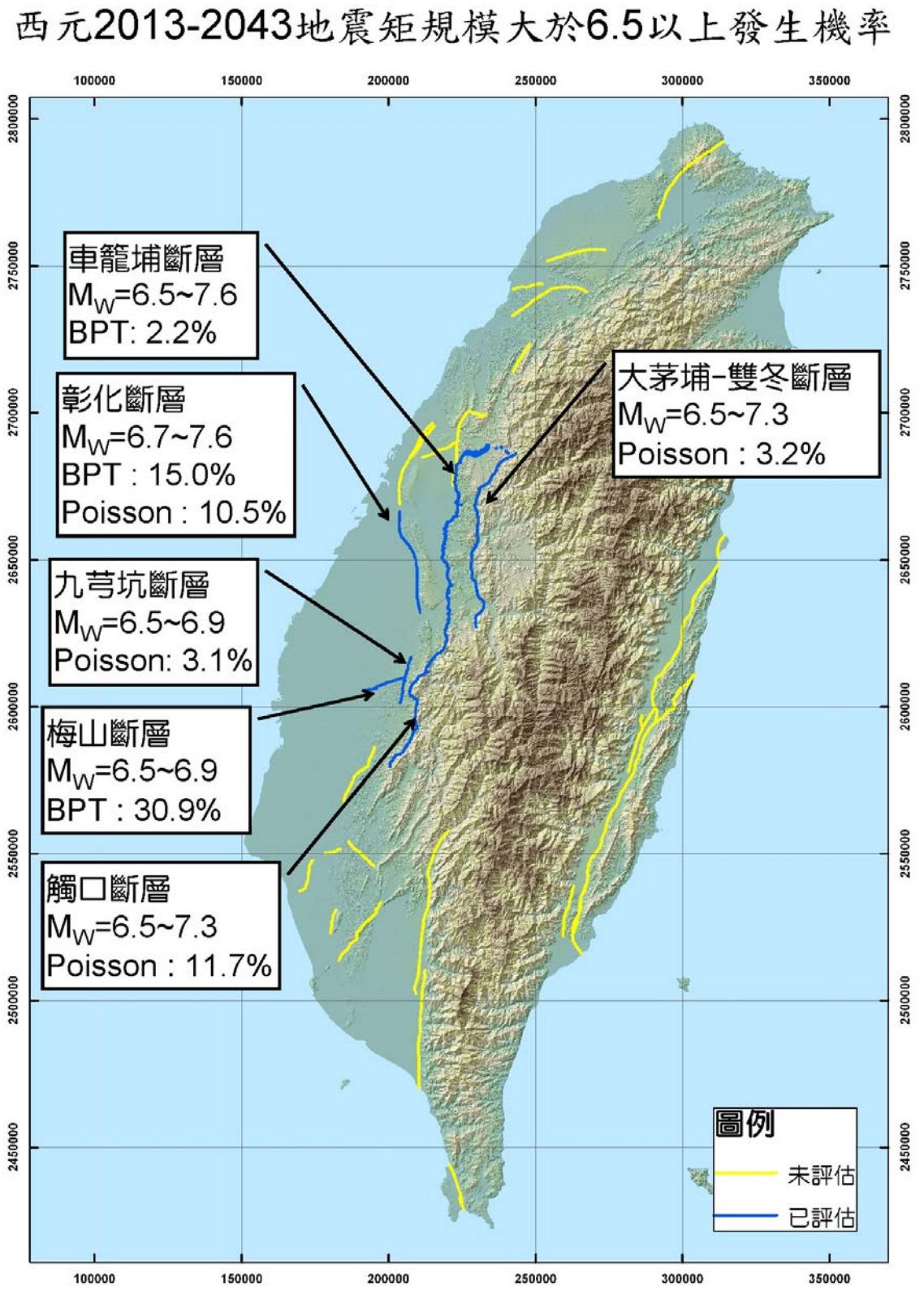


圖 5-9.1：本計畫活動斷層分布及未來 30 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估之說明如下：

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析(seismic hazard analysis)始能獲得。

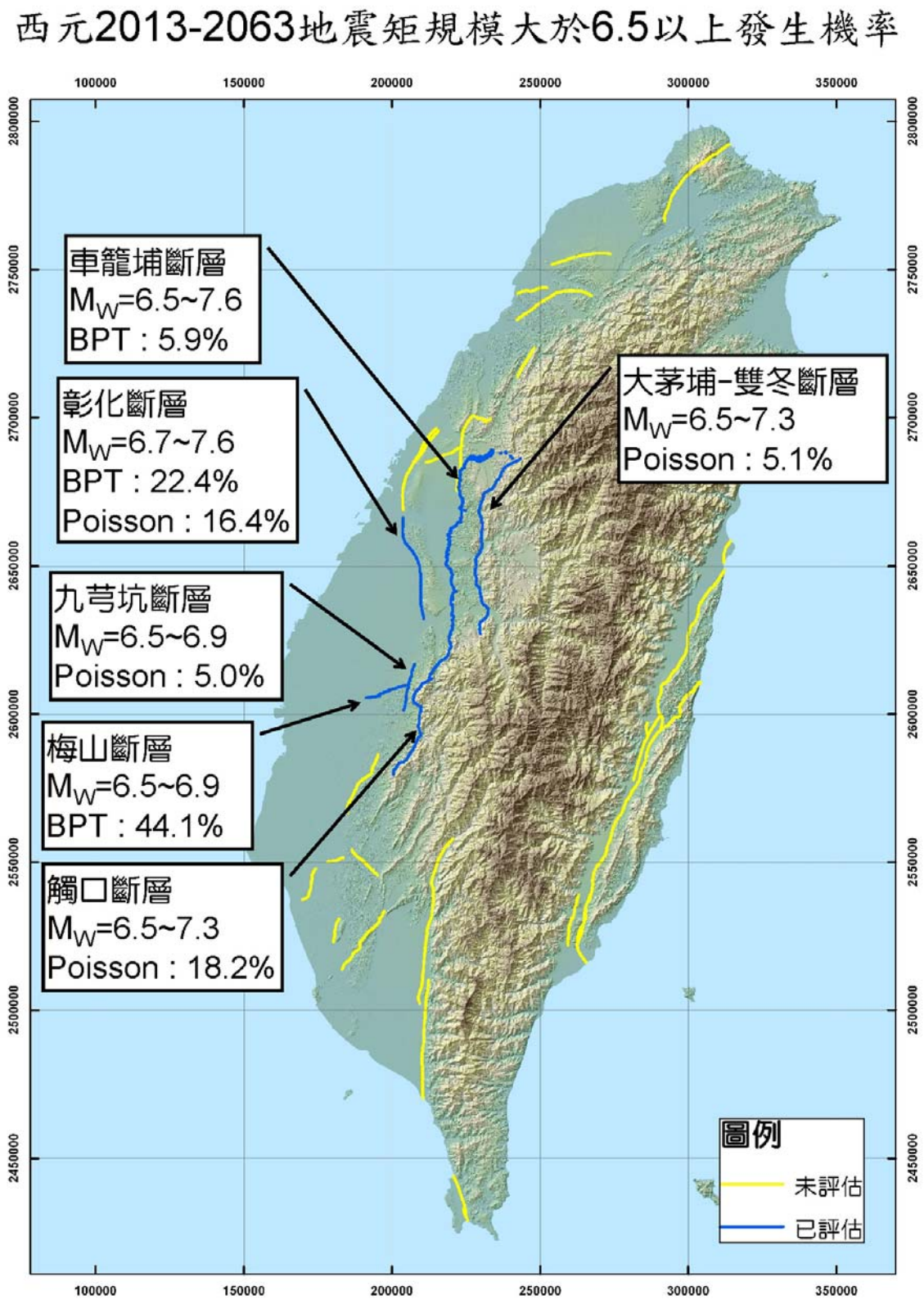


圖 5-9.2：本計畫活動斷層分布及未來 50 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估之說明如下：

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析(seismic hazard analysis)始能獲得。

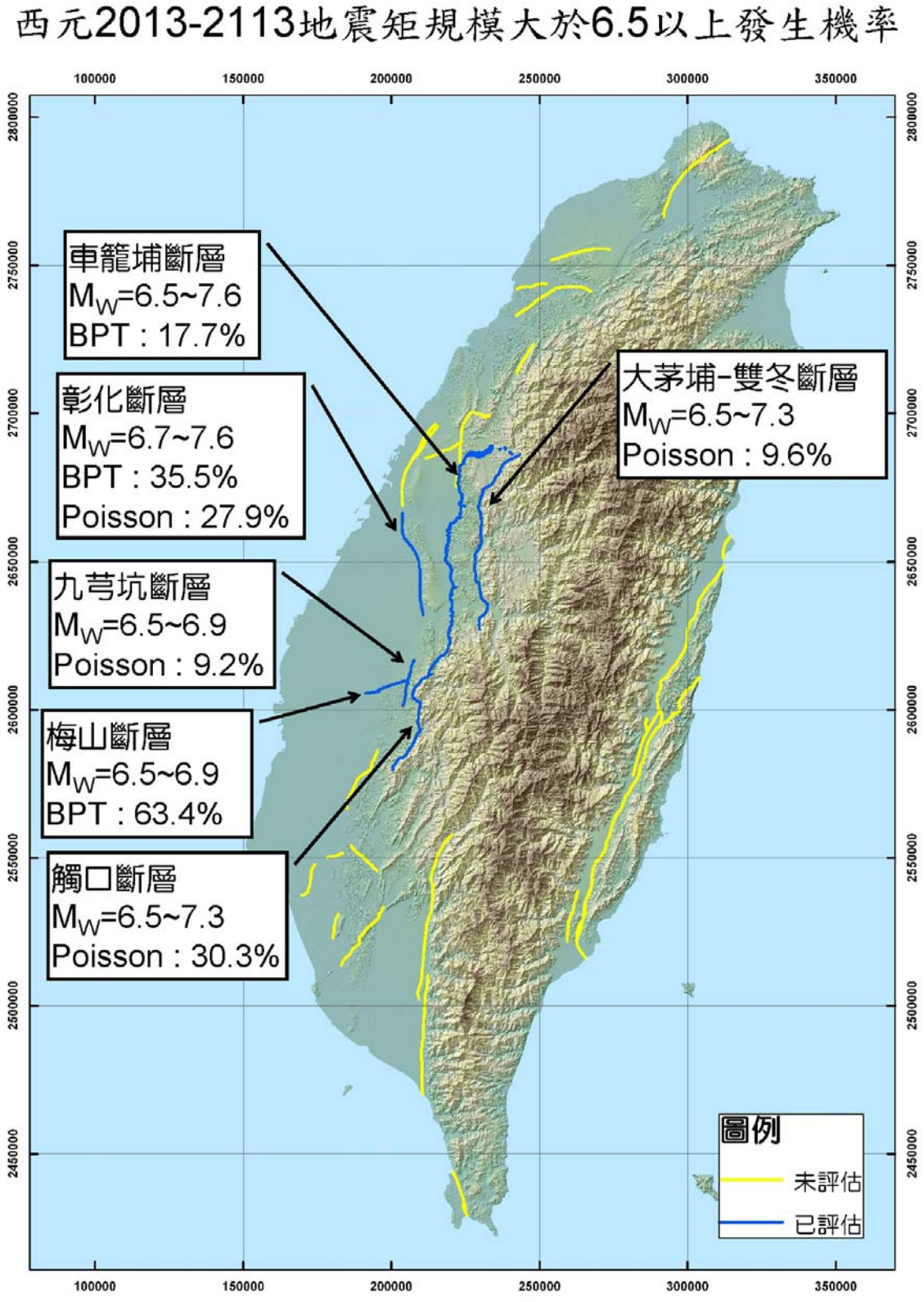


圖 5-9.3：本計畫活動斷層分布及未來 100 年地震發生機率。此大地震發生潛勢評估之說明如下：

(1) 斷層滑移速率之推估誤差仍大，故發生機率需謹慎參考使用。

(2) 活動斷層之地震規模大小是由斷層破裂面積所決定，因活動斷層分段與模式有所差異，故斷層規模有不確定之區間。

(3) 活動斷層錯動與大規模地震時間仍無法準確預測，本機率圖不宜作為地震預測之用途。

(4) 本機率圖只推估各活動斷層錯動之特徵地震規模區間，有關地震動之評估必須進一步進行地震危害度分析(seismic hazard analysis)始能獲得。

第六章、井下應變儀資料分析

6-1 井下應變儀觀測資料之異常應變搜尋與判斷

6-1-1 影響應變儀資料變化的因素

井下應變儀是一種相當敏感的地殼變形監測儀器，通常需要埋設於地底下一至二百公尺深度以下，以減少溫度變化或其它環境或地表活動所產生的地殼變形。然而，縱使如此細心的設計，仍然無法排除所有的環境變化因素，其中影響較大的幾種因素包括每日的地體潮汐變化、地表空氣壓地變化、地下水文變化以及岸邊海水潮汐負載所造成的地殼變形...等。

但估計各種因素對井下應變儀的影響，不可僅有單一種因素來估計，也無法由幾個單一時間多種因素來做回歸分析，畢竟在這階段還無法把所有會影響井下應變儀的所有因素都放在多變數回歸模式中，不完整的回歸模式會因為各種變數間的高相關而產生錯誤的回歸模式，例如颱風來時的低氣壓往往伴隨著很大的降雨量，氣壓、氣溫、潮汐與地下水都有很明顯的年週期，各變數間的高相關性很容易產生偏差的模式，因此，本計畫將依各測站各變數一步一步的試圖建立起正確的修正模式，希望能將可以移除的各種效應盡量移除，然後才在剩餘的資料中，試圖找出可能的地震前兆訊號，或是由地震相關的變化找出斷層在地震前、後或同震的活動狀況。

在過去對資料分析的成果中(胡植慶等，2012)，已能正確的建立各測站的井孔恢復效應、估算大氣壓力影響分量(圖 6-1.1)與初步計算面應變中地潮的影響分量(圖 6-1.2)，且地下水的處理狀況如下：

- 嘉義地區的地下水資料中可看出此區域的地下水變化相當大，可高達 20 公尺(圖 6-1.3)，而每公尺地下水變化可能相對於岩層中的孔隙水壓的變化，對岩層會產生約 0.56 ~ 9.05 μstrain /meter 的應變影響，因此這一地區的資料一定要先移除地下水效應(或孔隙水壓效應)的影響，否則無法估計其它的效應。但今年於嘉義地區重新裝設地下水觀測井，由於井位深度不同，地下水對應變的反應也需重新評估，未來待資料長度足夠將會重新再估算新裝水井中地下水與應變儀的反應。
- 新竹地區的地下水資料則較不完全(圖 6-1.4)，大坪國小測站(BMMT)無地下水的觀測資料，瑞峰國小測站(LMMT)的地下水資料與其井下應變儀資料一樣，不太完全，新樂國小測站(CINT)的地下水資料變化不大，約在 61~64 公尺之間，其對井下應變儀的效應則約為 4.0 μstrain/meter，梅花國小測站(PFMT)的地下水變化約在 115~132 公尺之間，於 2005 年至今持續的下降，水位的年變化不大，看不出週期性，但這一測站的井下應變儀資料並看不出持續下降的變化，這也有可能是在移除井孔效應時，這長期的線性變化也一併的被移除了。所以對新竹地區的應變資料無法先移除地下水的影響量。
- 台北地區的地下水資料較新竹測網的地下水資料完整(圖 6-1.5)，各測站水位長期趨勢大致不變，水位變化與井下應變儀資料並沒有像嘉義地區那麼高相關(圖 6-1.6)，是否可以直接移除地下水的影響量需要進一步的研究。

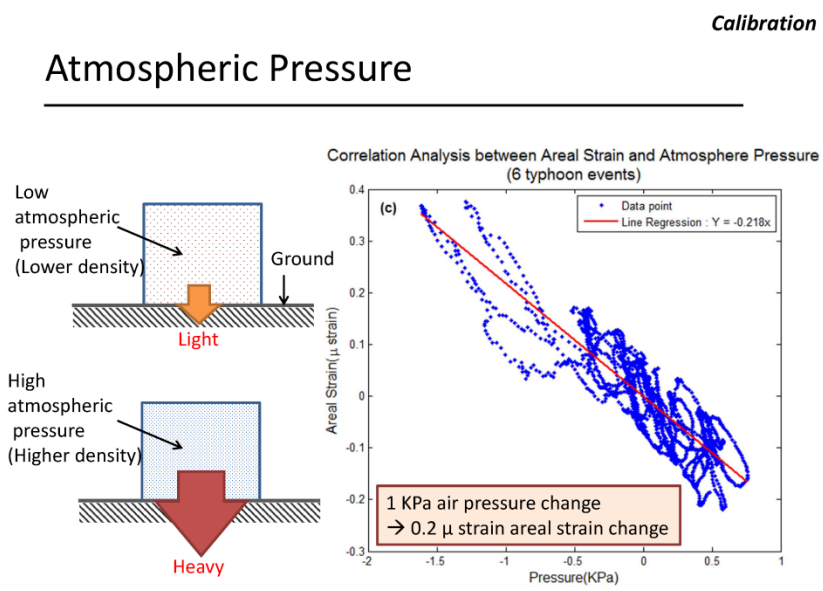
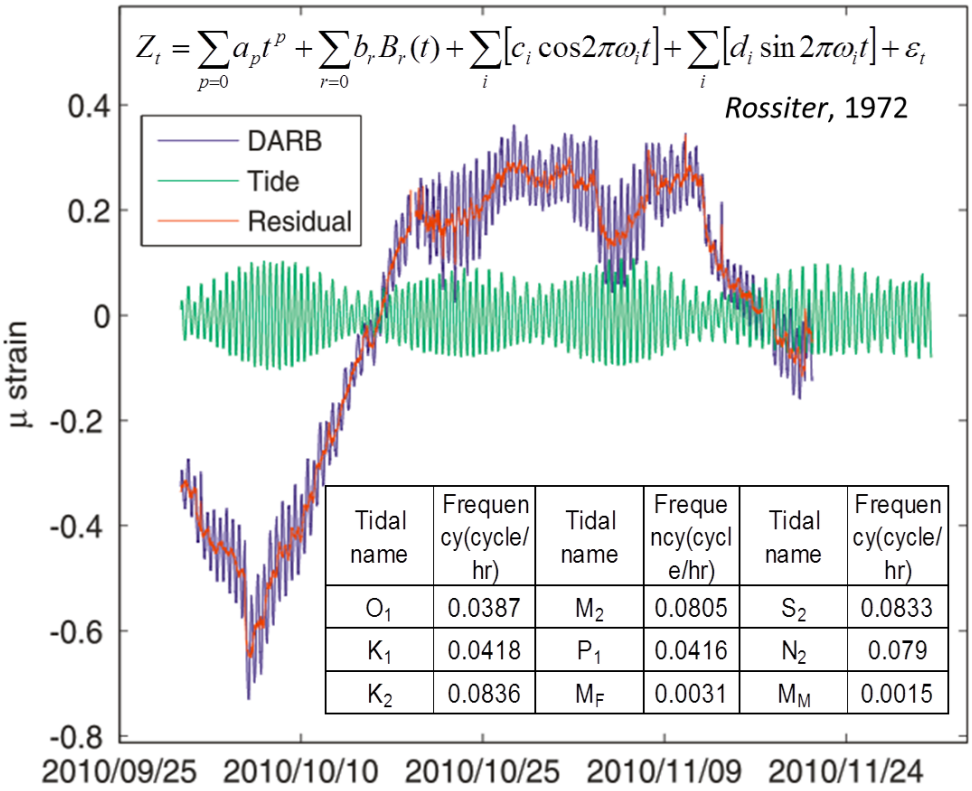


圖 6-1.1：大氣壓力對井下應變儀面應變的影響。氣壓的上升對應變儀面應變造成重荷而產生壓縮，因此氣壓的變化與面應變的變化是負相關。



Tidal name	Frequency(cycle/hr)	Tidal name	Frequency(cycle/hr)	Tidal name	Frequency(cycle/hr)
O_1	0.0387	M_2	0.0805	S_2	0.0833
K_1	0.0418	P_1	0.0416	N_2	0.079
K_2	0.0836	M_F	0.0031	M_M	0.0015

圖 6-1.2：井下應變儀中地潮分量的評估。利用固定幾個主要得起潮頻率的正弦函數與餘弦函數所組成的時間序列，再加上氣壓的時間序列，用多變數迴歸法估計每一個時間序列對潮位資料時間序列的響應，詳細理論請參考附錄 1-3。藍色線段是原始面應變資料、綠色線段為所評估出來的地潮分量，而紅色線段為原始面應變扣掉地潮分量後的殘差。

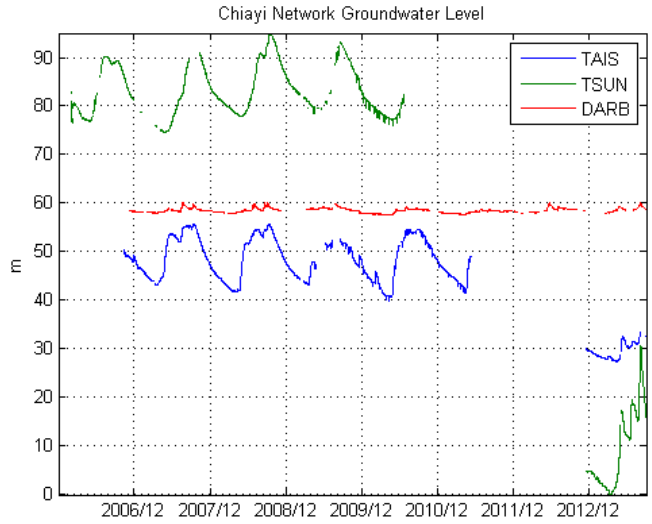


圖 6-1.3：嘉義地區地下水變化相當大，可高達 20 公尺。

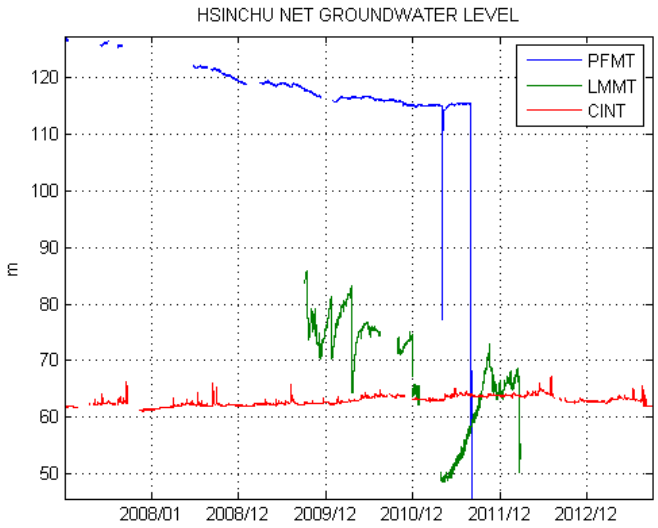


圖 6-1.4：新竹地區地下水各測站不同，變化不大，但梅花國小測站(PFMT)地下水位持續下降。

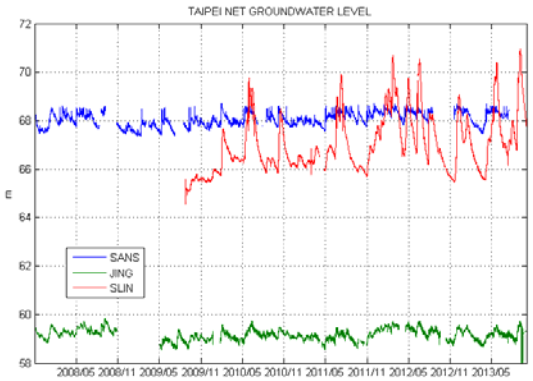


圖 6-1.5：台北地區地下水各測站水位資料。

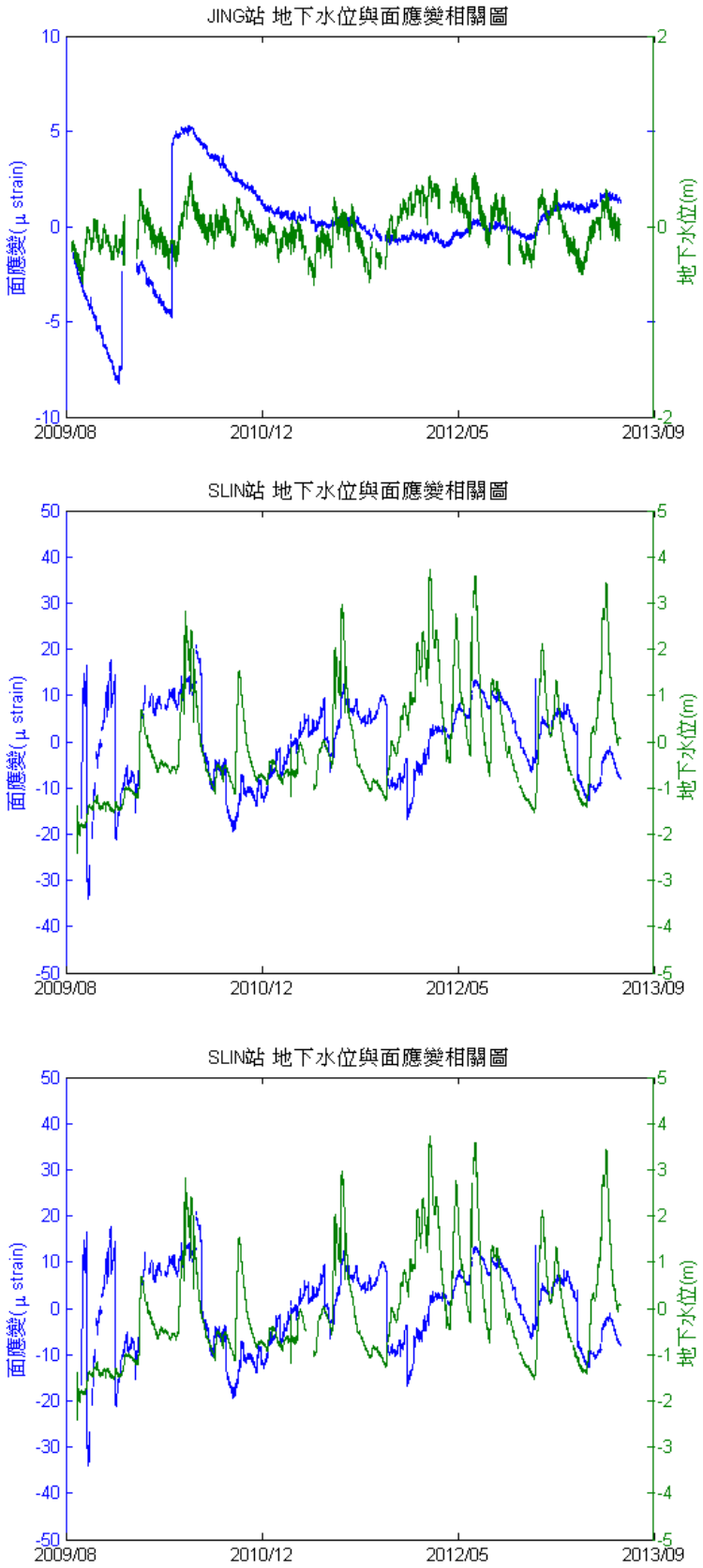


圖 6-1.6：台北地區地下水各測站水位資料與井下應變儀面應變。

在建立各種修正模式之前，必須先對各效應做物理性的探討，簡單敘述如：

1.地下水效應

由於地下水儀器並非與井下應變儀設置在同一深度，也非同一井孔，所以地下水資料一般是代表儀器周遭岩層的孔隙水壓，以及代表儀器上方地下水的多寡量，前者孔隙水壓增大時，可抵消岩層外來的應力，減少岩層的擠壓應變(或增加其膨脹應變)，但後者所代表的物理效應是增加儀器上方的垂直負載，其效應與氣壓變化相同，與孔隙水壓效應相反。由於地下水壓代表這兩種相反的效應，各測站會因為地下水壓計所設置的含水層的位置、水層分布範圍的大小以及水層與地表水的相通程度而有很大的不同反應，當然儀器附近岩層的孔隙率與透水性也是主要的因素。若地下水壓計是設置在封閉的含水層，則其四周岩層的體積應變也會改變水層中的水壓，因此這水壓變化會與井下應變儀同步，如此去除地下水效應也可能移除了真正的岩層應變資訊。不過，應該沒有完全封閉的地下水層，水層本身的體積應變僅能短期的增加其中的水壓，並不會有長期的效應。所以移除地下水壓變化對井下應變儀資料的效應，應該還是可以保留地殼的長期應變。依照現在所分析的幾個測站來看，以嘉義網長期地下水的影響較為明顯，量約在 0.56 ~ 9.05 μstrain/meter 之間。嘉義網達邦(DARB)、中興國小(TSUN)與太興國小(TAIS)三測站的地下水影響係數分別為:7.33、0.73 與 8.99(圖 6-1.7 至圖 6-1.9)。

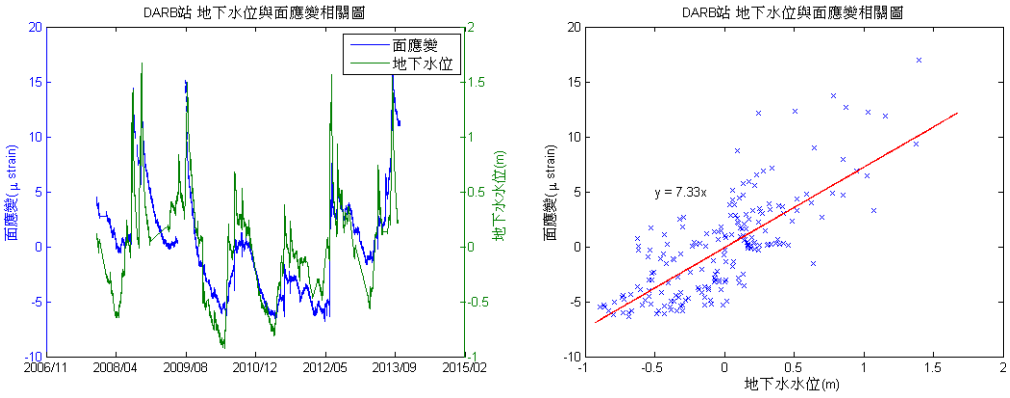


圖 6-1.7：嘉義網達邦測站(DARB)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

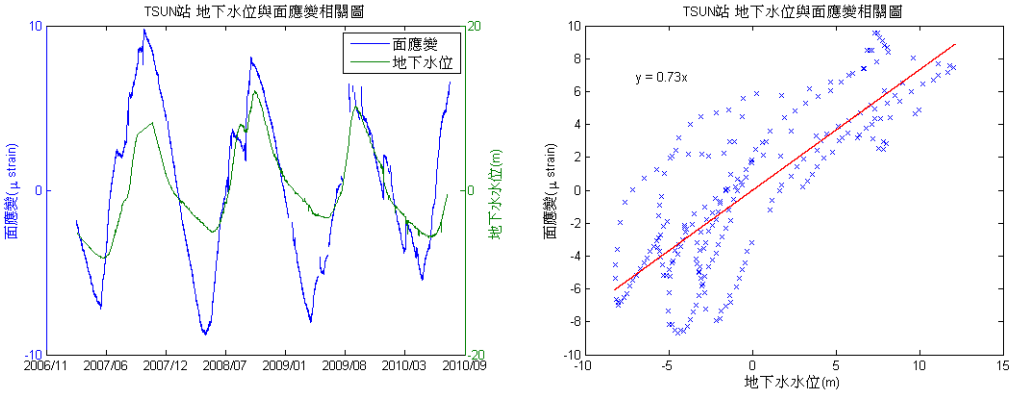


圖 6-1.8：嘉義網中興國小測站(TSUN)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

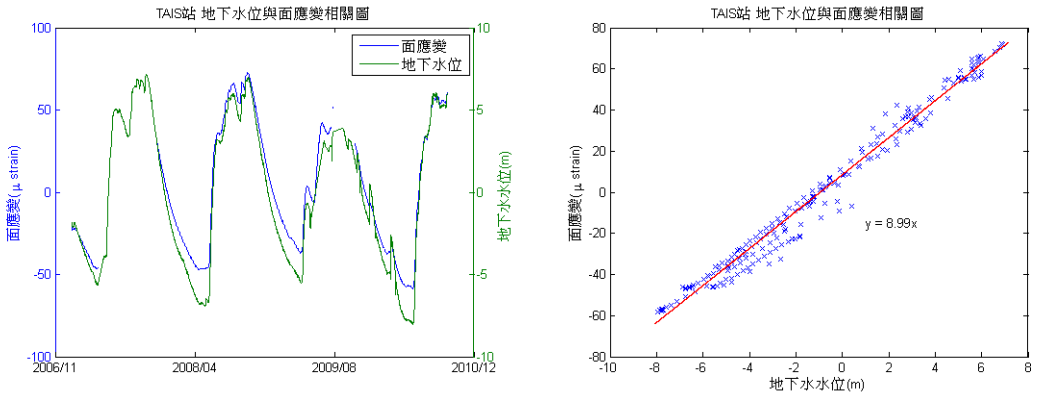


圖 6-1.9：嘉義網太興國小測站(TAIS)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

之前提到新竹網的地下水資料較不完全，且地下水位變動與面應變之關係並不明顯，因此暫時無法做地下水的影響效應評估。另外在觀察台北測網的應變儀資料與地下水位之關係時，長時間的資料與地下水的相關性並沒有很好(圖 6-1.6)，但當觀察較短時間(大約一年)，井下應變儀的面應變資料與地下水水位的變化有較好的線性相關(圖 6-1.10 至圖 6-1.12)。但相較於嘉義網，它們之間的線性關係有比較大的誤差，可能來自於其他環境因子影響，因此所求得的參數只是初步的測試，錦和(JING)、明德中學(SANS)與樹林(SLIN)三測站的地下水影響係數分別為：2.32、6.14 與 3.40(圖 6-1.10 至圖 6-1.12)。

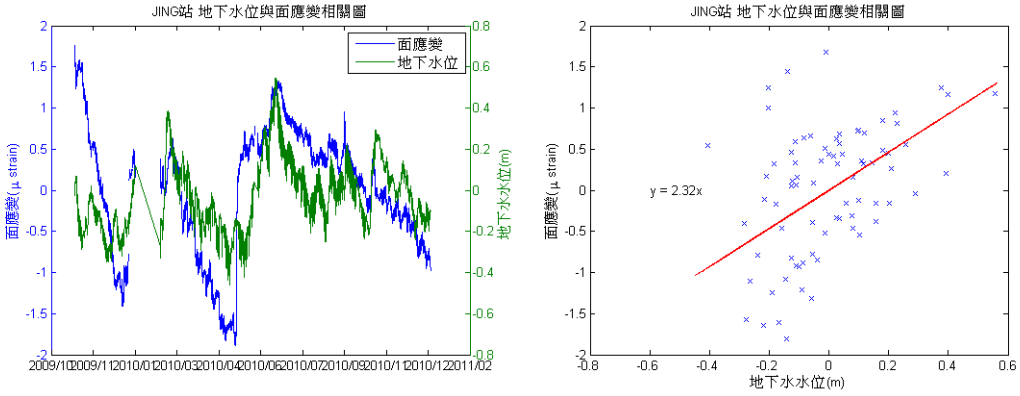


圖 6-1.10：台北網錦和國小測站(JING)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

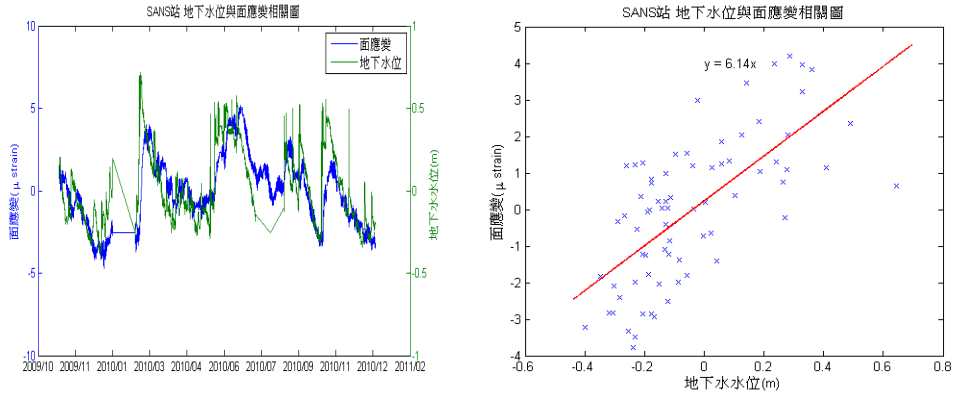


圖 6-1.11：台北網明德中學測站(SANS)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

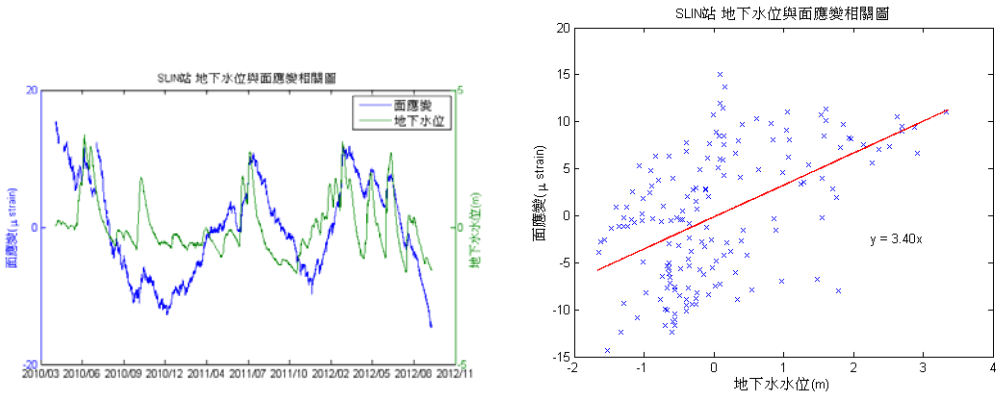


圖 6-1.12：台北網樹林測站(SLIN)地下水水位變化與應變儀面應變之關係。

2.氣壓的影響量

大氣壓力的變化，通常是較大區域的，除了在鋒面邊緣，否則氣壓是均勻的平面垂直壓力，其對井下應變儀的影響應該只受岩層彈性係數的變化以及岩層與儀器的偶合係數不同而有所差異，因此，對於同一測站的儀器其單位氣壓變化對井下應變儀記錄的影響應該是長期不變的，而且這影響量在大範圍氣壓變化中應該是一致的，也就是這兩者間的關係是線性的。因此，尋找這關係式的原則是先在資料中搜尋較大氣壓變化的記錄，特別是幾個較大的颱風，或者是高氣壓或低氣壓時的記錄，然後再從其中挑選井下應變儀記錄比較單純的，依此來估計一個關係係數(表 6-1.1)。然後依此係數做氣壓變化的修正，若是正確的修正模式，會使井下應變儀資料有下面的特性：

a. 應變的變化與氣壓的變化比較不相關。
b. 在大多數的氣壓變化時期，井下應變儀的變化仍然是平坦的。
c. 在地震前後時期，若有同震的應變變化，應該是應變的跳動與應變累積率（即其斜率）的改變兩種，一般而言，大部份的應變斜率都是直線的，而不當的氣壓修正或未作氣壓修正前，很多都是與氣壓變化一般的成峰或成谷狀的變化。

依照這樣的原則，可以適當的刪去正確的氣壓修正模式。

表 6-1.1：井下應變儀面應變中氣壓的影響係數。

測站	氣壓影響係數	測站	氣壓影響係數
RST	-0.083	PFMT	-0.196
RNT	-0.080	CINT	-0.245
DARB	-0.398	SLIN	-1.642
TAIS	-0.663	SANS	-0.820
TSUN	-0.430	JING	-0.245
BMMT	-0.215		

6-1-2 檢視井下應變儀資料中異常事件

由於現今對地震前後地殼應變是否會有什麼前兆會出現？多久前會出現？其大小會有多大？哪些地震（多大的或多遠的）會在某一測站出現異常前兆？這些都是我們所關切的，但至今仍無確切的答案。因此，在本計畫中嘗試定義井下應變儀的地震前兆訊號，其搜尋原則如下：

a. 因為尚未修正降雨的效應，本計畫僅搜尋台灣地區規模大於 5.0 的地震前後各 15 天可能的異常，對於降雨期間應變變化的現象先不考慮。對於間隔太長的前兆也先不與考慮。這是因為台灣地區規模大於 5.0 的地震並不少，考慮太長的期間會牽扯到太多的地震，往往無法分辨何者與何者相關。在沒有地震事件的影響下才可考慮觀察較長時段的應變資料是否有異常。
b. 對於"異常"的定義，是假設地殼的應力累積除了受地體構造力的穩定作用外，就是受環境變化因素的影響與斷層活動力的作用。在除去了各種環境因素的影響後，理論上在數十天之內，應變的累積大致上該是固定斜率平滑線(意指忽略每日潮汐的變化後)。因此，明顯的斜率改變或應變突跳都可以考慮為"異常"。
c. "異常"前兆的判斷：要判斷一個異常現象是否與某一地震相關有三個主要的條件：
    - 在該地震發生的適當時間內，必須要有同震的應變變化，這變化可能是應變突跳(徒升或突降)，也可能是斜率的改變。若無相對應的同震應變，就表示這測站並不在該地震的應力影響範圍內，任何半個月前或一個月前的地殼應變應該與地震不相關。
    - 在附近幾個井下應變儀觀測站中至少有兩個以上的測站在接近的時期中都有呈現"異常"，若只有一個測站的明顯"異常"僅能存疑。
    - 對於所看到的"異常"要再回過來看看該時間的環境變化是否也有奇怪的變化。由於環境因子的觀測儀器與觀測程序往往較不嚴謹，資料突跳與資料缺失是經常發生的，適當的資料補遺與篩選是必要的程序，"異常"資料的再確認也是必須的。

根據以上的思考與原則，我們主要測試三個井下應變儀網，即嘉義網，包括達邦(DARB)、太興國小(TAIS)與中興國小(TSUN)三測站；以及新竹網，包括大坪國小(BMMT)、新樂國小(CINT)與梅花國小(PFMT)三測站，並在 2012 年度加入台北網，包括樹林(SLIN)、明德中學(SANS)與錦和國小(JING)三測站。

為了避免因為環境因子的資料缺失或不同採樣率，而在做環境因子的模式修正時損失了部份的觀測量，所以原來地下水每分鐘一筆的資料下降到每十分鐘一筆，氣壓資料量原為每卅分鐘一筆，而且多有缺失，先將同一地區的氣壓資料互相補遺，也就是假設同一地區氣壓在短時期的變化大致相同，若其中某一測站氣壓資料缺失一小段時期，則可以用另外一測站的氣壓變化值補遺。如此各網的三個測站互相補遺，可以得到完整的資料。然後再用適當的內差法，將每卅分鐘一筆的資料內插成每十分鐘一筆，如此所有的井下應變儀、氣壓、地下水位資料都有相同的取樣率，依照上面的原則建立環境因子模式，並做修正，最後再估算資料中的地潮訊號，進而扣除地潮的訊號，然後再依上述原則判斷所有規模大於五的地震（依氣象局公告）是否有同震以及震前的異常應變。

在修正的資料中，由於新竹網的大坪國小測站(BMMT)地下水觀測紀錄損壞，一直都無資料，考慮該地區短時期的地下水變化不大，所以先停止該地區的地下水影響量修正。另外台北地區的地下水水位與井下應變儀面應變的關係還不明確，也暫不做台北地區的地下水影響量修正。

2012 年 12 月至 2013 年 11 月期間，針對規模 5 以上的地震，應變異常事件較明顯的有

3 個事件，嘉義網記錄到 3 個應變異常。如圖 6-1.13 為 2012 年 12 月至 2013 年 11 月所有規模大於 5 之地震事件，以下針對有應變前兆反應的地震事件做說明。

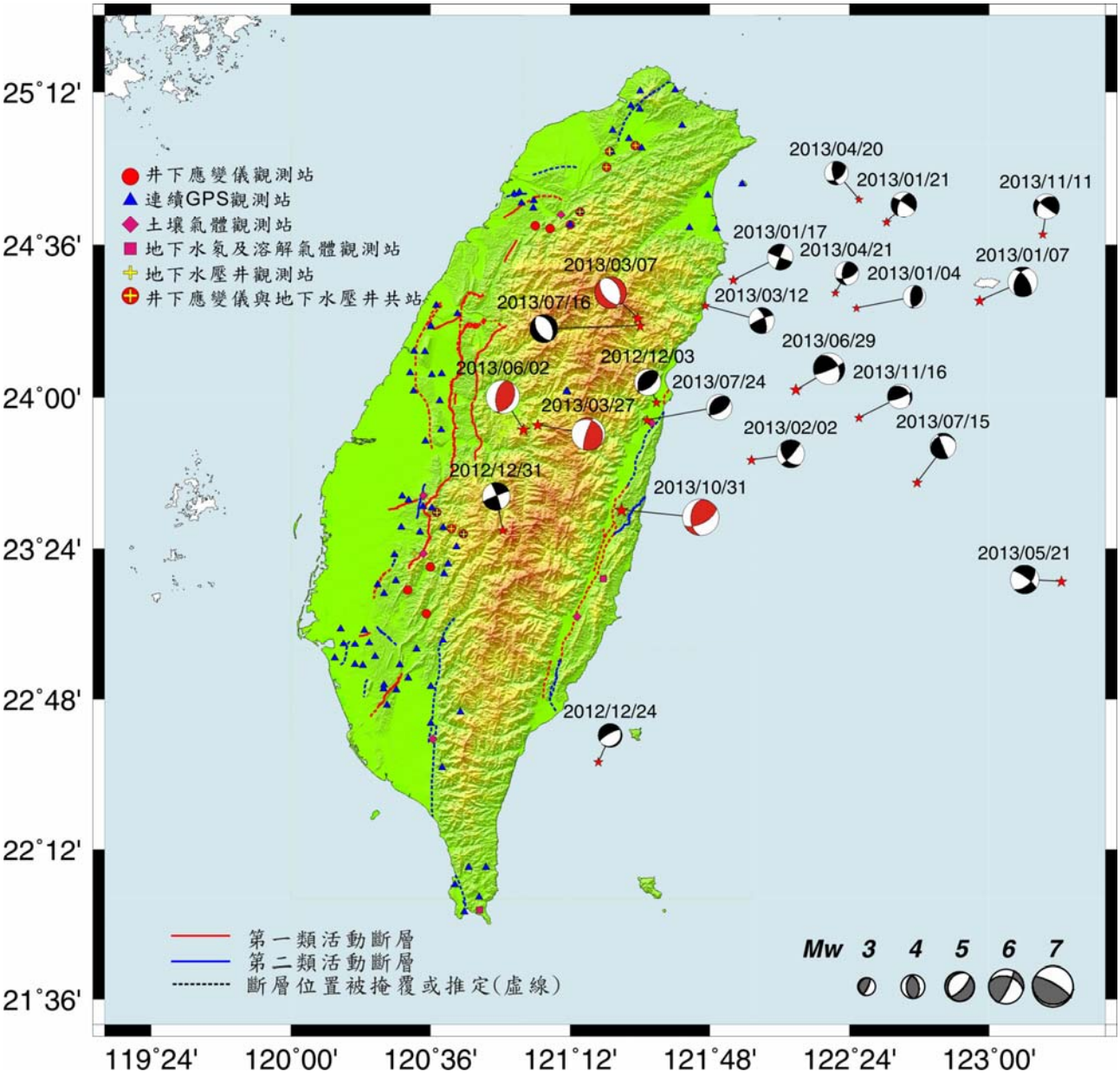


圖 6-1.13：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。紅色海灘球為井下應變儀地震前兆相關之地震。

(1) 2013 年 3 月 7 日芮氏規模 5.9 地震與 3 月 27 日芮氏規模 6.2 地震

3/27 南投地震之前，還有另外發生於花蓮地區的兩起地震，分別為 3/7 規模 5.9 的地震，深度較淺為 5.6 公里；3/12 規模 5.0 的地震，深度較深為 51.9 公里。

達邦測站(DARB)原始工程應變(圖 6-1.14 上)，排除電力異常、降雨、氣壓與地震後的應變變化之後，其中可能與地震相關的應變異常開始時間大約發生於 3/2 左右(圖 6-1.14 中)。3/2 之前的應變率非常穩定，從移除 3/2 之前資料趨勢與地潮訊號的圖可以明顯看出應變率開始變化，面應變相對伸張、GM1 與 GM2 都相較於之前的訊號往負值變化，3/7 的花蓮地震於 5 天後發生。3/7 地震後約 2 天應變率趨於平穩，一直到 3/27 地震前除了一點點氣壓與降雨所造成的波動之外，沒有明顯應變異常被發現。

中興國小測站(TSUN)原始資料有較大的應變趨勢，需去除此趨勢才得以分析較細微的變

化。去除整體趨勢後的資料顯示如圖 6-1.15 上圖。其中藍色的面應變有日周期的應變起伏，可以比對為氣壓變化的影響，觀察軸差應變 GM1(綠線)與剪切應變 GM2(紅線)可避開此效應。在除去地潮訊號與 2/14 之前資料趨勢之後，明顯在 2/14 開始有應變異常的訊號出現，除了原來面應變變得相對壓縮、GM1 與 GM2 的數值在突然降低之後改變了應變率，3/7 的地震於 21 天後發生。中興國小測站(TSUN)於 3/17 號之後沒有資料，但判釋 3/7 之後至 3/17 間的應變資料可以發現其應變率相對穩定，沒有特別的異常訊號出現。

太興國小測站(TAIS)原始資料有較大的應變趨勢，需去除此趨勢才得以分析較細微的變化。去除整體趨勢後的資料顯示如圖 6-1.16 上圖。其中藍色的面應變有日周期的應變起伏，可以比對為氣壓變化的影響，觀察軸差應變 GM1(綠線)與剪切應變 GM2(紅線)可避開此效應。在除去地潮訊號與 2/10 之前資料趨勢，可能的應變異常大約在 2/10 開始，面應變沒有特別明顯的變化，但 GM1 與 GM2 的應變率大約可由 2/10 做一區別，3/7 的地震於 25 天後發生。中興國小測站(TSUN)於 3/7 之後至 3/27 間的應變資料應變率相對穩定，沒有特別的異常訊號出現。

嘉義網三個測站在地震前都有應變異常出現，且地震當時都有應變的數值永久變化，表示地震對該測站有影響，因此是有明顯地震前的應變異常。但這三起地震發生在一個月內，對於判識地震間應變資料是否有異常會有困難度，因每次地震後的應變行為多少會有些微改變，如果在短時間內又發生地震，在判斷該應變訊號的變化是地震前的應變異常亦或只是前次地震後的應變改變是有一定難度存在的。因此，目前並無法區分該異常是屬於哪一起地震相關的前兆現象。

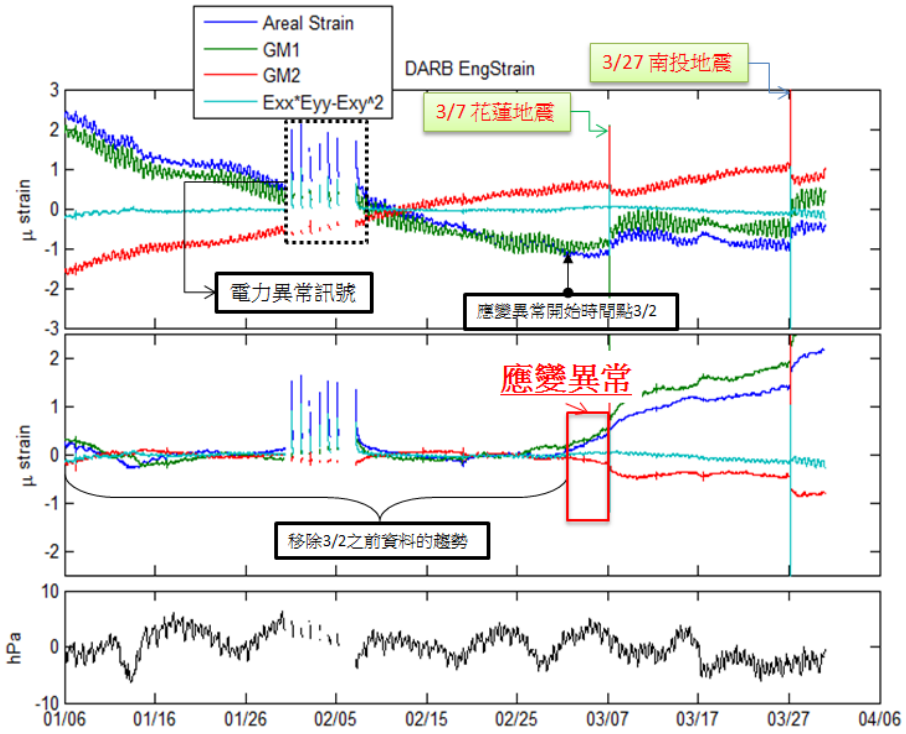


圖 6-1.14：嘉義網達邦測站(DARB)應變資料。最上圖為原始應變資料；中圖為資料移除氣壓、地潮與趨勢；最下圖則是該時間段內的氣壓資料。

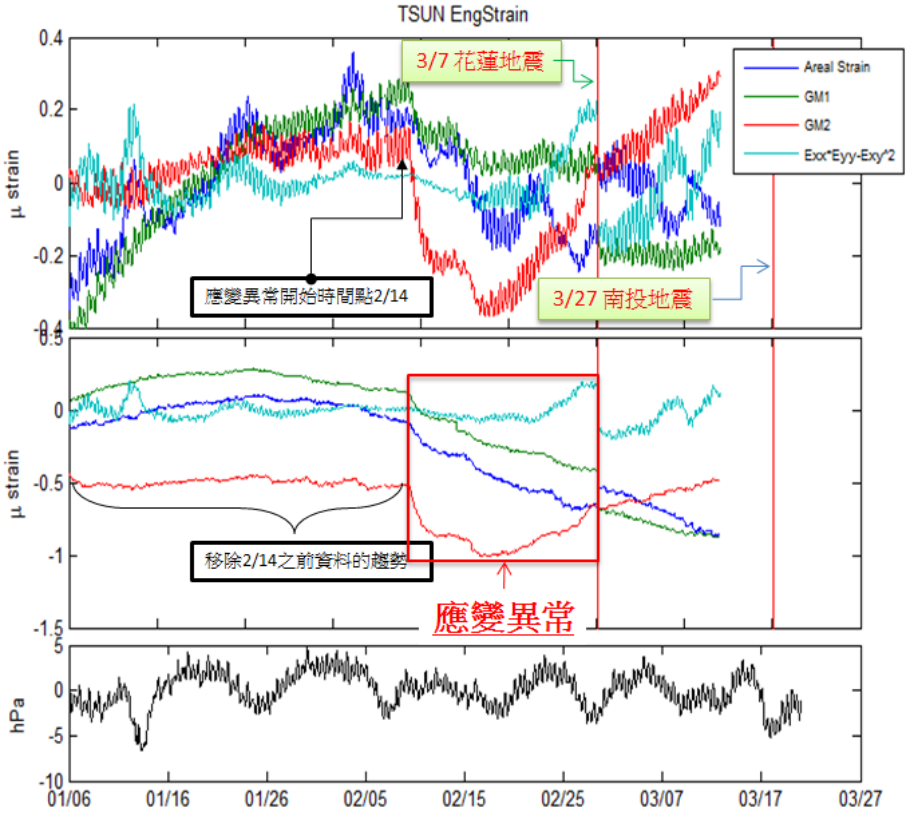


圖 6-1.15：嘉義網中興國小測站(TSUN)應變資料。最上圖為原始應變資料；中圖為資料移除氣壓、地潮與趨勢；最下圖則是該時間段內的氣壓資料。

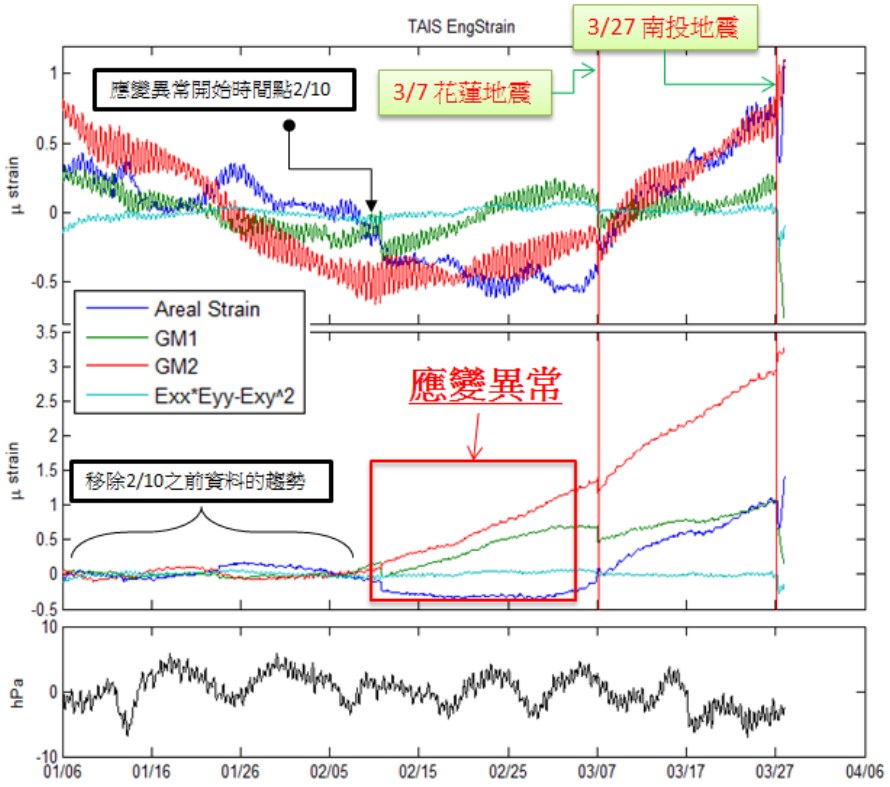


圖 6-1.16：嘉義網太興國小測站(TAIS)應變資料。最上圖為原始應變資料；中圖為資料移除氣壓、地潮與趨勢；最下圖則是該時間段內的氣壓資料。

(2) 2013 年 6 月 2 日芮氏規模 6.5 地震

如果不考慮 3/27 地震後短時間內的變化與 5 月下旬降雨對應變的影響，嘉義網的達邦測站(DARB)在 5 月 1 日左右有明顯應變率的變化，這個轉折可能是地震相關的應變異常。

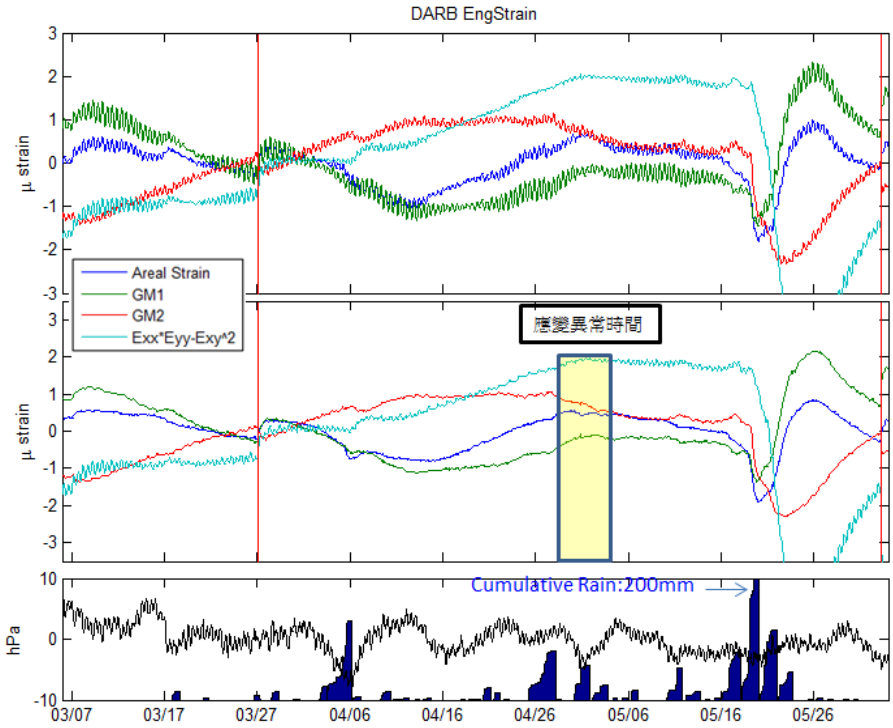


圖 6-1.17：嘉義網達邦測站(DARB)應變資料。最上圖為原始應變資料；中圖為資料移除氣壓、地潮與趨勢；最下圖則是該時間段內的氣壓資料。

(3) 2013 年 10 月 31 日芮氏規模 6.3 地震

嘉義網的資料在扣除氣壓影響與地潮影響之後，於 9/18~9/23 之間應變的趨勢明顯有轉折，轉變為相對伸張，在嘉義網這個現象通常與降雨與地下水位的變化相關，但這段期間沒有明顯降雨，且 10/1 至 10/17 的地下水資料也顯示地下水位變化趨勢一致，沒有明顯降雨所造成的地下水位上升，因此這一應變異常排除環境因子的影響，可能為 10/31 花蓮地震相關的應變異常。

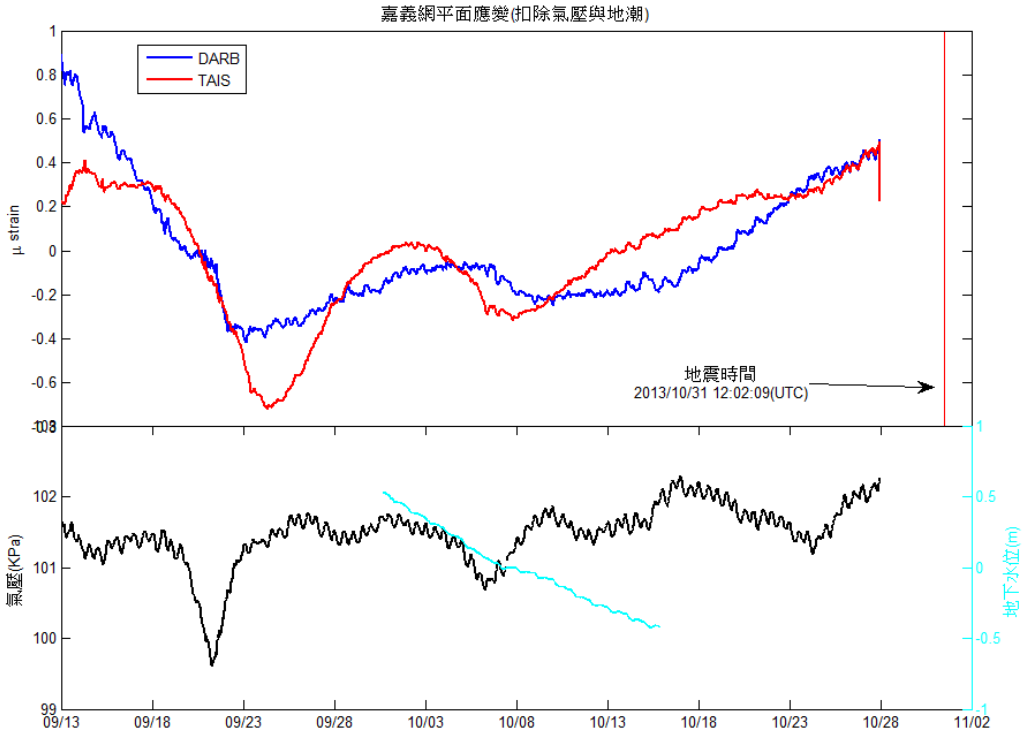


圖 6-1.18：嘉義網達邦測站(DARB)與太興國小測站(TAIS)應變資料。上圖為扣除氣壓與地潮的平面應變資料；下圖則是該時間段內的氣壓資料與地下水資料。

6-2 時頻圖分析案例

6-2-1 2013 年井下應變儀資料時頻分析

本章節針對 2013 年 1~9 月的井下應變儀面應變資料進行時頻分析，以嘉義網：達邦(DARB)、太興國小(TAIS)、中興國小(TSUN)三測站為研究對象，了解各個測站面應變資料之不同月份頻譜圖變化，詳細分析結果於附錄 6-4 呈現。而分析流程則是先去除面應變資料的趨勢變化，並進行短時距傅立業轉換時頻圖的繪製，頻率範圍分別是全頻(0.0~0.5Hz)、高頻(0.15~0.5Hz)、中頻(0.07~0.15Hz)以及低頻(0.0~0.07Hz)，再對各個頻段之面應變資料的時間積分(Marginal Time)，其結果顯示該頻段之能量隨時間變化的情形。頻率範圍分類分方式除了全頻之外，其他頻段分類皆是利用有限脈衝響應 (Finite Impulse Response) 濾波器進行資料前處理，濾出特定頻段之面應變資料，透過頻譜圖呈現各個頻率與時間點中較細節的能量變化。

時頻圖分析之結果中，各站均有在低頻 0.03~0.06Hz 與中頻 0.1Hz 附近的橫線出現，依不同測站有一至五條不等，此橫線代表各站之特徵頻率，此特徵頻率係因震動觸發，由於材質及岩性等材料條件，每個測站各有其基本的自然頻率，當受到任何震盪觸發，便會在時頻圖上以橫線表現。這裡提到自然頻率的概念，簡單說明如下，舉例來說，由於材質的不同，木板、塑膠板各有其自然頻率，當給予敲擊時，不論用什麼東西敲、敲得或快或慢，聽到的聲響都相同，其發出的聲音頻率便是其自然頻率，等同於在井下應變儀資料中看到 0.03~0.06Hz 與 0.1Hz 附近的橫線，因此，若將一個站井視為一個系統，此自然頻率即為該站之特徵頻率。而太興國小(TAIS 測站)與中興小(TUSN)測站主要能量分布於中頻 0.1Hz 附近，達邦(DARB)測站主要頻率則分布於低頻 0.03~0.06Hz 之間。

高頻(0.15~0.5Hz)頻段之中於 1~4 月及 7~9 月有雲狀頻率變化，1~4 月雲狀頻率變化發生原因，目前資料不足尚無法確定；而 7~9 月部分雲狀頻率變化出現之時間點相似，分別為 7 月 11~13 日蘇力颱風、8 月 20~22 日潭美颱風、8 月 27~29 日康芮颱風與 9 月 19~22 日天兔颱風，此時除了高頻(0.15~0.5Hz)頻段有雲狀頻率變化外，於低頻(0.0~0.07Hz)處有山狀的頻率變化，兩者頻率變化於颱風影響台灣時期出現，可能是受到颱風氣壓變化所致，如圖 6-2.1 與圖 6-2.2。

將各頻段進行時間積分之分析結果顯示全頻與低頻有一天 4 次的能量變化，而高頻(0.15~0.5Hz)能量變化則會隨著時頻圖中雲狀頻率分布有山巒起伏的波形，有時則會出現 spike，中頻(0.07~0.15)能量變化中則有較多的 spike 出現，spike 的出現原因目前尚待進一步分析確定。中興國小(TSUN)測站面應變資料於 3/21 開始資料異常的現象，如圖 6-2.3，於 6/4 停止記錄，因此中興國小(TSUN)測站 7 月之後的分析結果不予以呈現。

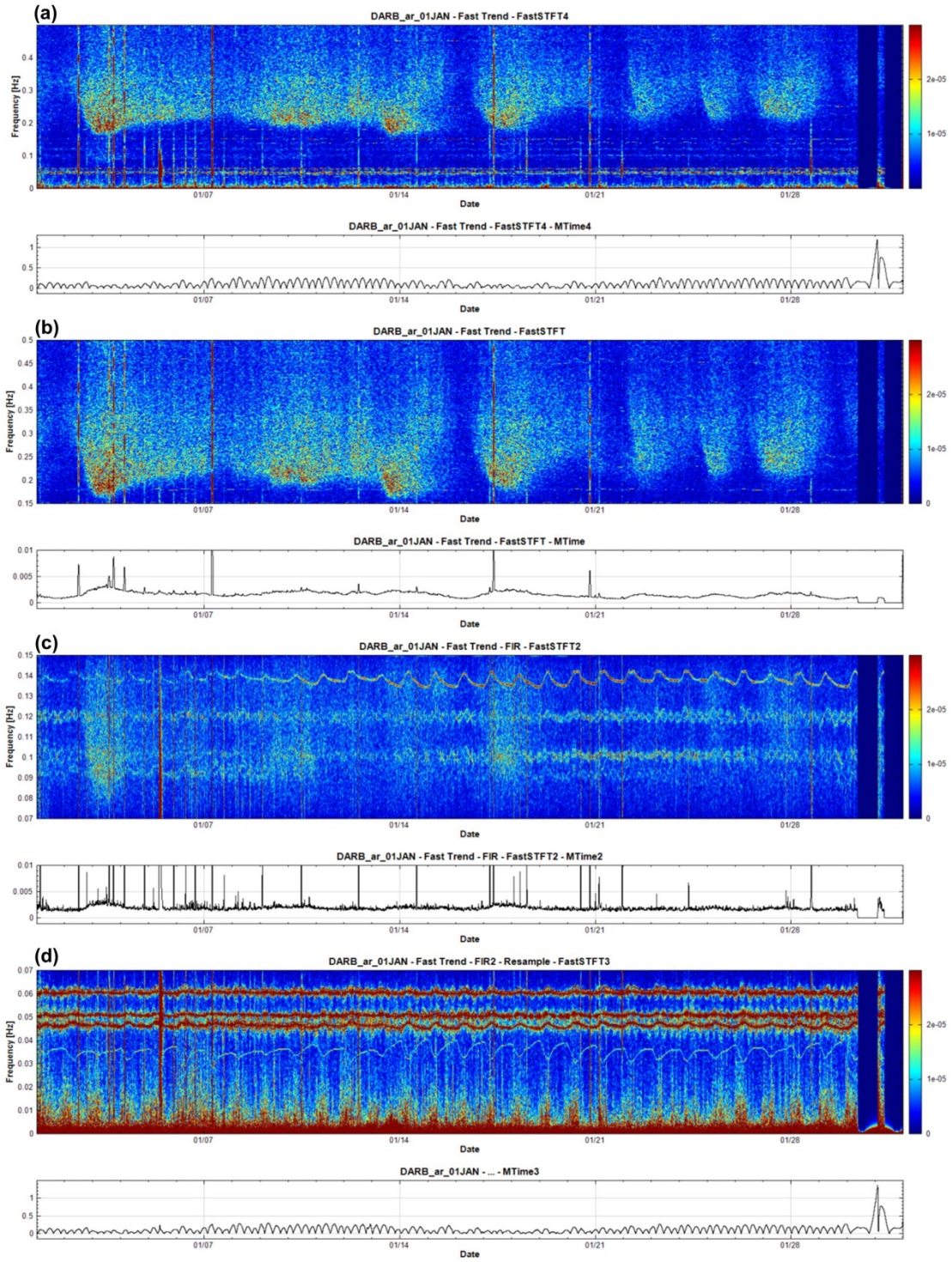


圖 6-2.1：2013 年 1 月達邦測站(DARB)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)全頻(0.0~0.5Hz)、(b)高頻(0.15~0.5Hz)、(c)中頻(0.07~0.15 Hz)、(d)低頻(0.0~0.07Hz)。

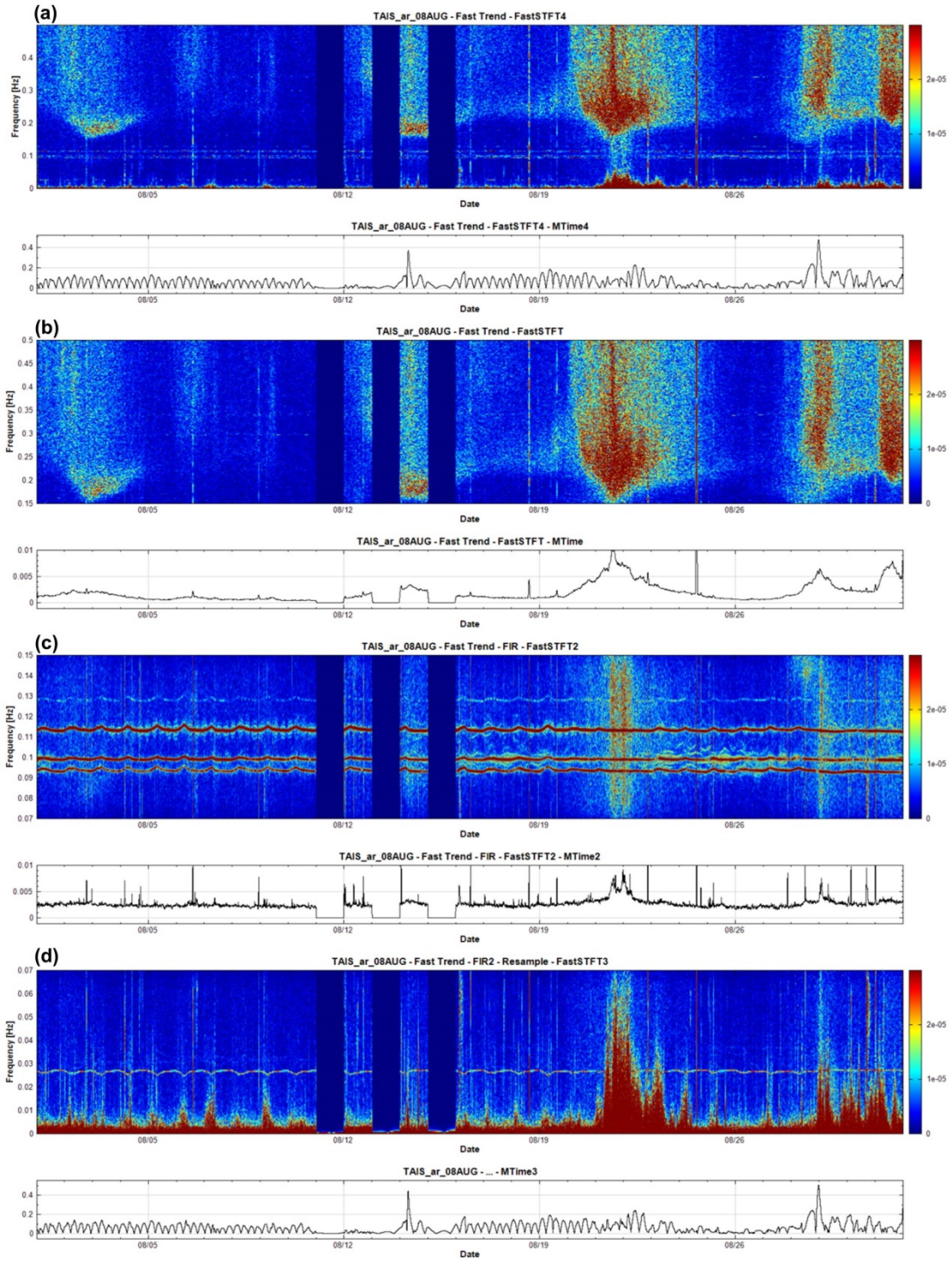


圖 6-2.2：2013 年 8 月太興國小測站(TAIS)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)全頻 0.0~0.5Hz)、(b)高頻(0.15~0.5Hz)、(c)中頻(0.07~0.15 Hz)、(d)低頻(0.0~0.07Hz)。

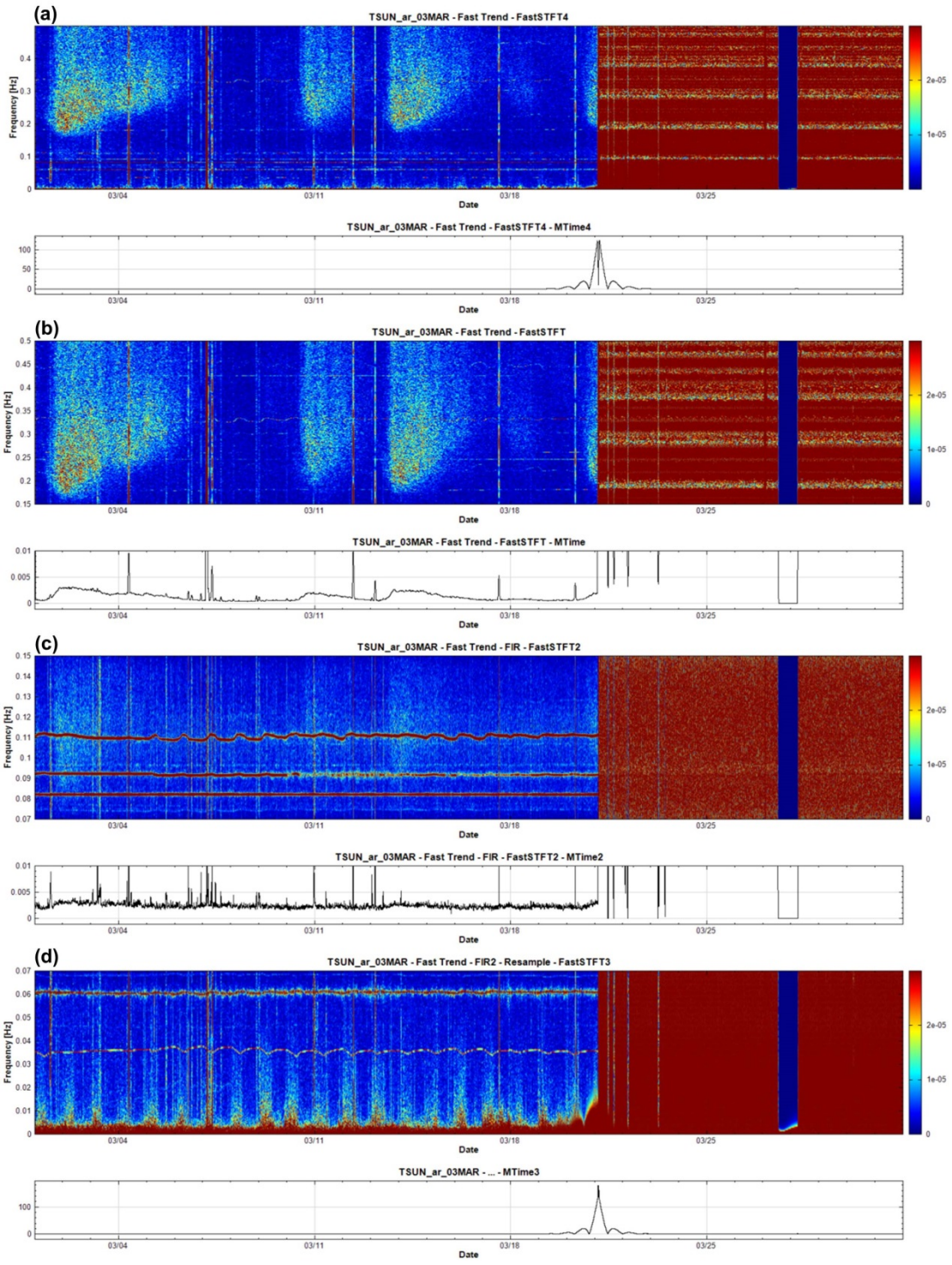


圖 6-2.3：2013 年 3 月中興國小測站(TSUN)面應變資料時頻圖與能量變化。(a)全頻 0.0~0.5Hz)、(b)高頻(0.15~0.5Hz)、(c)中頻(0.07~0.15 Hz)、(d)低頻(0.0~0.07Hz)。

6-2-2 自然事件案例分析

本研究挑選 2007 年科羅莎颱風、2010 年甲仙地震、2011 年南瑪督颱風、2011 年日本東北 311 地震、2013 年 3 月地震、2013 年 6 月 2 日南投地震、2013 年蘇力颱風、2013 年潭美颱風及 2013 年天兔颱風等九個事件，並選取可能記錄到該次事件的測站，針對面應變的時間序列進行時頻分析，成果如下，各站有其特徵頻率及特殊事件產生之異常頻率(如颱風、地震)，後續仍須分析更長時間之紀錄，觀察特殊頻率是否僅在颱風或地震事件前後出現，並可定義出各站之特徵頻率。

分析計算過程中，若面應變資料具有異常跳動值，將會對其組成 ch0、ch1、ch2、ch3 以上四個分量進行修正，去除異常跳動值後，重新計算面應變資料，再去除趨勢變化，進行短時傅立葉分析，得到時頻圖。下列討論中包含面應變原始應變量時間序列、時頻圖、30 分鐘累積雨量資料、地下水水位變化與氣壓時間序列，而以時頻圖為主，進行雨量、地下水水位與氣壓變化間的相關討論，而部分測站地下水水位數值，於事件發生時無相關記錄，故無法呈現數值變化。

不同事件之頻譜圖中，中興國小(TSUN)測站與太興國小(TAIS)測站於 0.1Hz 及達邦(DARB)測站的 0.5Hz 附近均有出現持續不斷的能量分布，根據上一節自然頻率相關說明，此頻率即為 TSUN 測站、TAIS 測站與 DARB 測站之特徵頻率。

在 0.1~0.5Hz 之間有時會出現雲狀的頻率變化，該特徵可能由氣壓的改變造成，特別是在颱風出現的前後，均能觀察到此雲狀的變化，且最低點通常指向颱風對該站影響最劇烈的時間點，其他的氣壓變化如寒流等高氣壓影響，仍須後續的研究驗證。而有些資料分析結果，在 0.0～0.1Hz 的區間，有局部如山狀的頻率變化，該變化可能與慢地震(slow earthquake)有關(Liu, 2009)。在 2010 年甲仙地震、2013 年 3 月地震與 2013 年 6 月 2 日南投地震中，發現地震發生前後，其地下水水位會有顯著的上升或下降的現象發生。後面將以各個事件為區分，一一描述時頻分析之結果。

(1) 科羅莎颱風

台灣中央氣象局於 10 月 4 日 17 時 30 分，對台灣東部海域發布海上颱風警報第 1 報，在 10 月 5 日 5 時 30 分的第 5 報中，對台灣海上陸上皆發出警報。10 月 7 日 17 點 30 分，台灣中央氣象局解除台灣本島的陸上颱風警報，23 時 30 分解除海上颱風警報。井下應變儀中有兩個站紀錄到科羅莎颱風的訊號，分別為達邦(DARB)、中興國小(TSUN)，進行時頻分析後如圖 6-2.4，中興國小測站有 0.08Hz 的特徵頻率，10/6 前後，在 0.1~0.5Hz 間之頻率有明顯的強度變化，颱風前後一週均有 0.2~0.4Hz 的頻率變化，10/6 為氣壓最低與累積雨量達最大值之時，於時頻圖中 0.1Hz 以下有山形的強度變化，當 30 分鐘累積雨量達最大值約 38.0mm 及氣壓下降 2.0hPa 之時間點接近;達邦測站也有類似的時頻圖特徵，如圖 6-2.5 所示，但特徵頻率不同，顯示各站的基頻可能各有不同，且於 10/6 氣壓最低點時 0.1Hz 以下也有一山形的強度變化。中興國小測站地下水位記錄數值變化與降雨量相比並不合理，故於此不以討論。

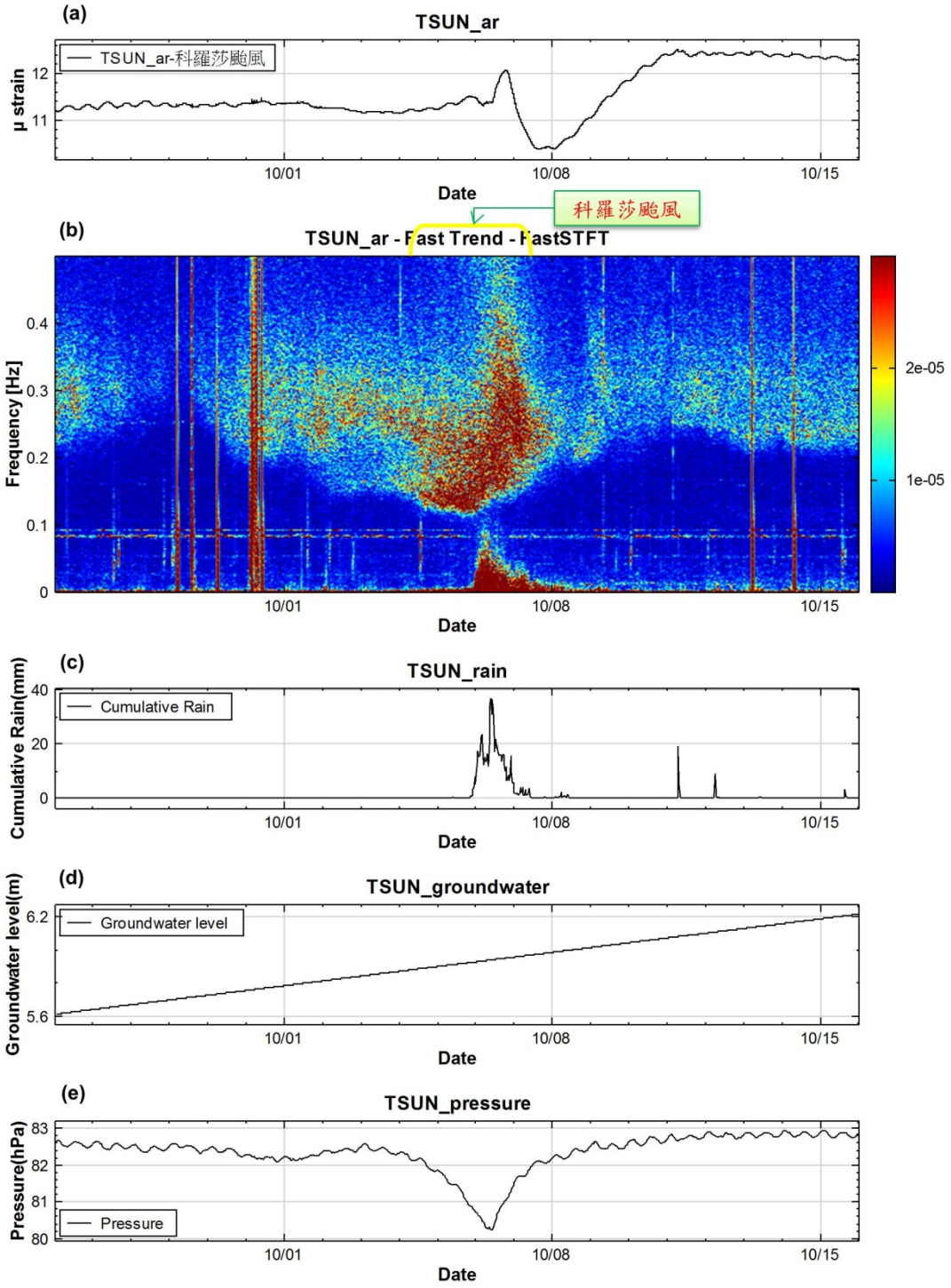


圖 6-2.4：中興國小(TSUN)測站科羅莎颱風前後面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

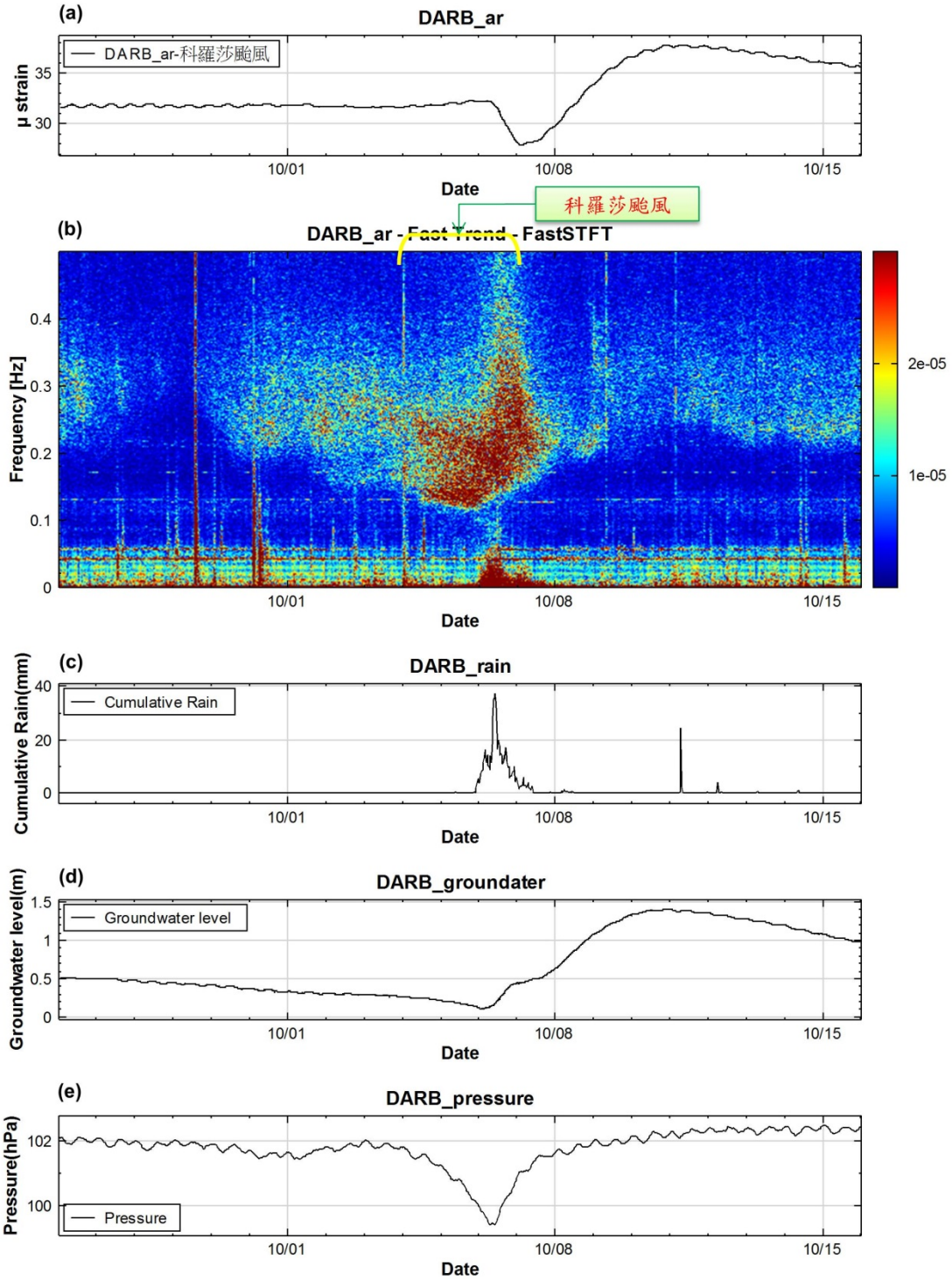


圖 6-2.5：達邦(DARB)測站科羅莎颱風前後面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

(2) 甲仙地震

地震發生時間為 2010 年 3 月 4 日 8 時 18 分，震央在高雄縣桃源鄉和茂林鄉的交界處，芮氏規模 6.4，地震深度 22.64 公里，有三個站紀錄到甲仙地震的訊號，分別為達邦 DARB、中興 TSUN、太興 TAIS。進行時頻分析後可見各站之特徵頻率不同，分別為中興如圖 6-2.6，為 0.06Hz、0.08Hz，太興如圖 6-2.7，為 0.09Hz、達邦測站如圖 6-2.8 也有類似的時頻圖特徵，有 0.04、0.06Hz 的特徵頻率。3/8 前後，在 0.1~0.5Hz 間之頻率有明顯的強度變化，3/9

則有降雨的現象，該頻率變化之成因與降雨是否有關仍待討論。3 月 4 日地震發生時，中興國小(TSUN)測站的地下水位有逐漸下降約 1.0m 左右，而太興國小(TAIS)與達邦(DARB)測站地下水位則有上升 1.5 與 0.1m 的情形。

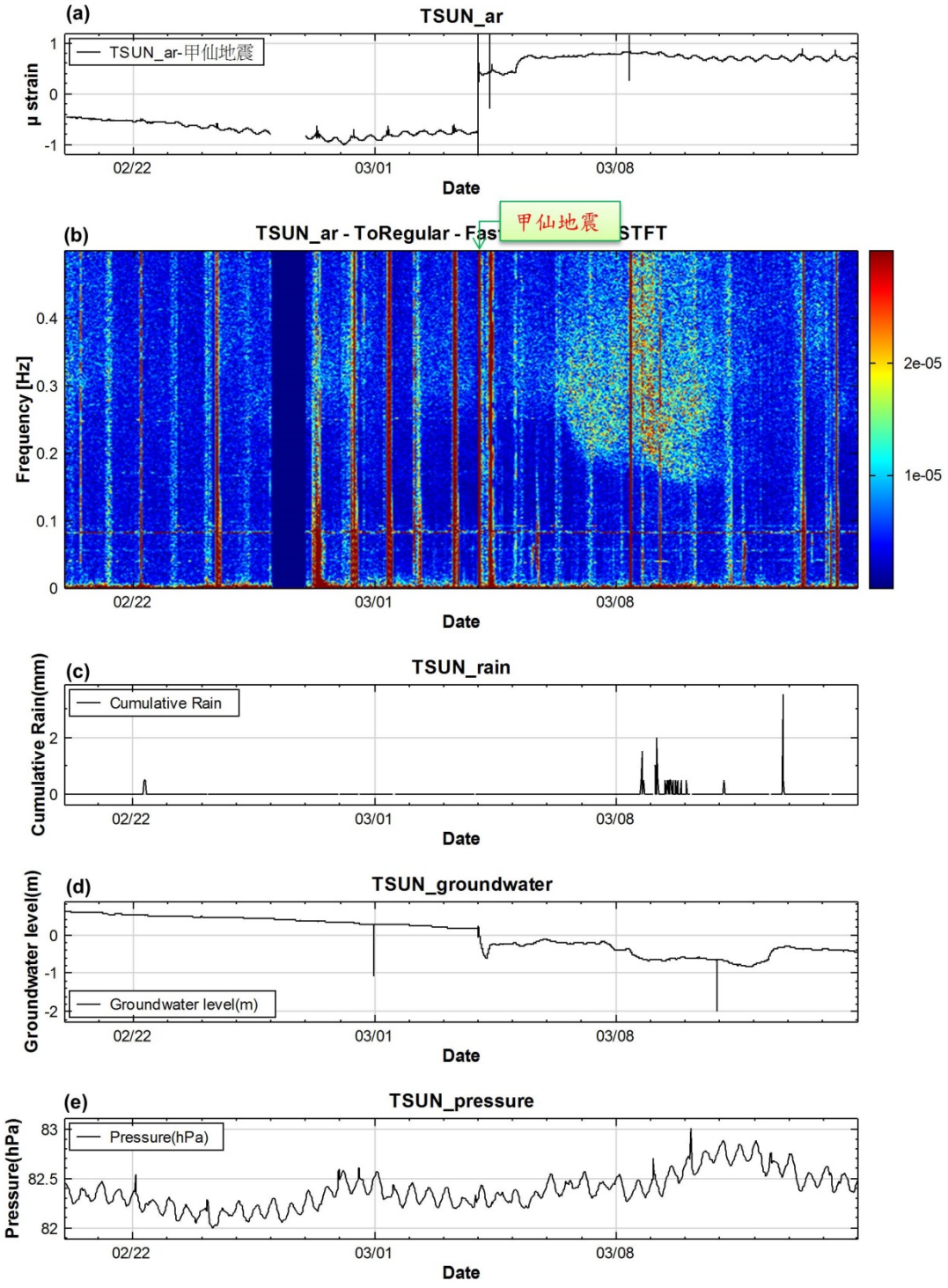


圖 6-2.6：甲仙地震前後中興國小(TSUN)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

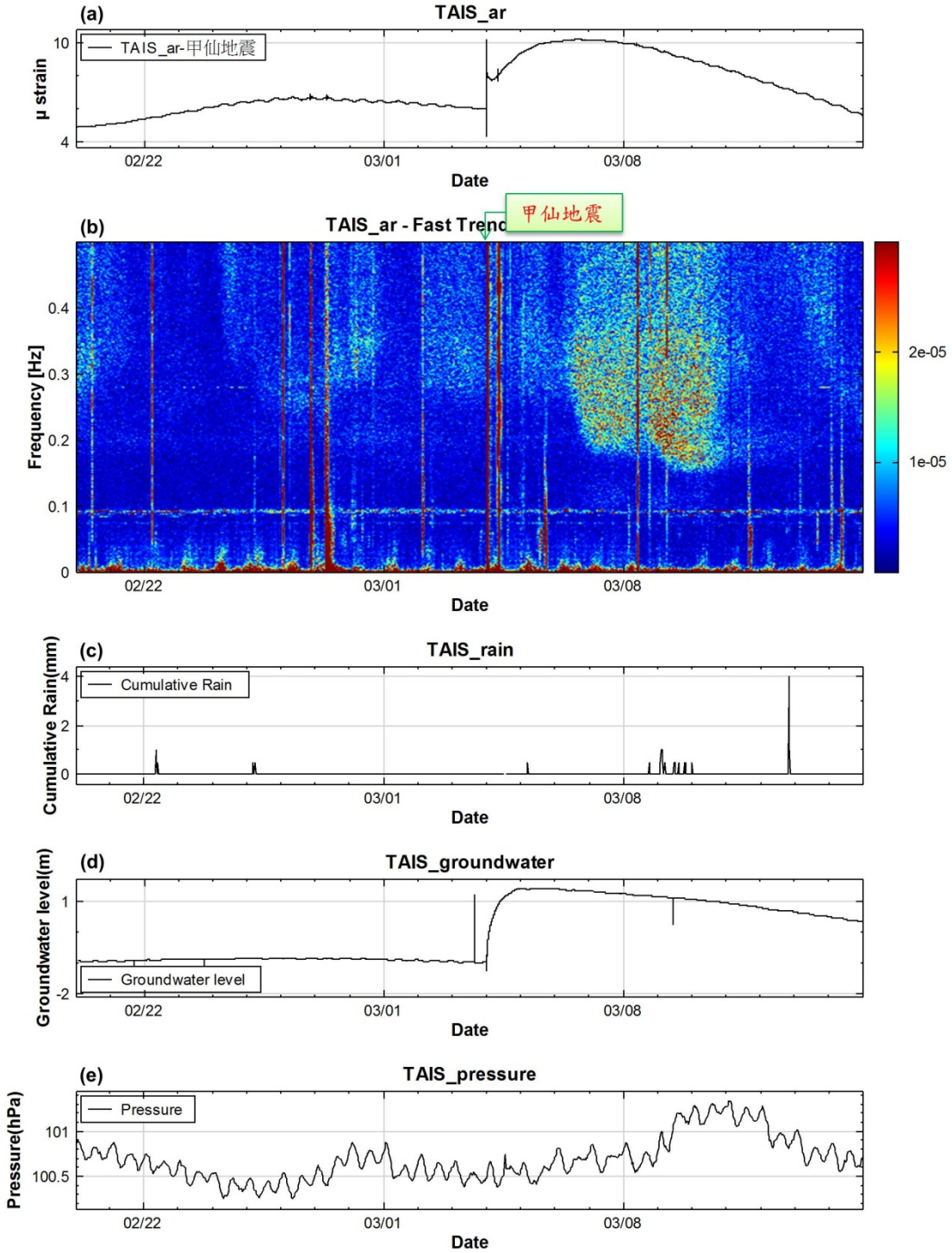


圖 6-2.7：甲仙地震前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

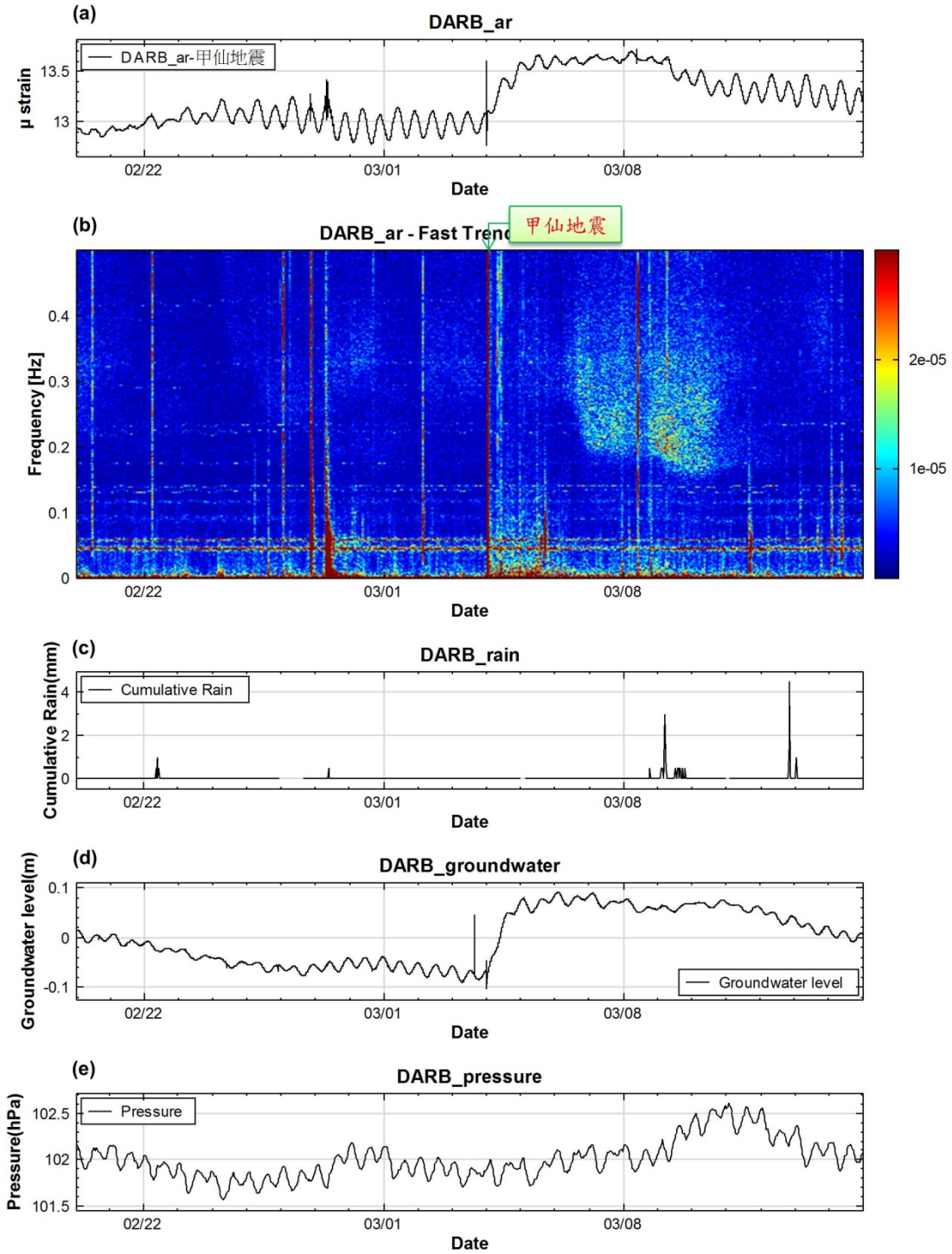


圖 6-2.8：甲仙地震前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

(3) 南瑪督颱風

中央氣象局於 8 月 27 日 5 時 30 分發布海上颱風警報。隨著颱風接近臺灣，並於 8 時 30 分配合海上颱風警報發布豪雨特報，晚間 20 時 30 分發布海上陸上颱風警報，並持續發布豪雨特報。8 月 31 日解除海上颱風警報，發布豪雨特報。研究區域內有三個站紀錄到南瑪督颱風影響的訊號，分別為達邦 DARB、中興 TSUN、太興 TAIS。其中資料品質有過大跳動之異常值，在時頻分析前已人工移除，重新計算面應變資料，並進行線性補遺，補遺後沒有任何頻率分布，因此在時頻圖上將呈現深藍色。進行時頻分析後中興測站如圖 6-2.9，有 0.04、

0.05、0.08、0.09、0.11Hz 的特徵頻率，太興如圖 6-2.10，有 0.09、0.11、0.12Hz 的特徵頻率、達邦如圖 6-2.11 有 0.04、0.06Hz 的特徵頻率。8.29~8/31 前後，在 0.1~0.5Hz 之間具有強度變化，這段時間內也是氣壓降低幅度最大時，約 1.0~2.0hPa、有降雨現象之時，該頻率變化之成因仍待討論。南瑪督颱風影響台灣時間太興過小(TAIS)測站與中興國小(TSUN)測站之地下水水位沒有紀錄，因此無法加入兩站地下水水位進行討論；達邦(DARB)測站地下水水位於颱風來前有些微下降的趨勢，於颱風降雨之後上升約 0.4m。

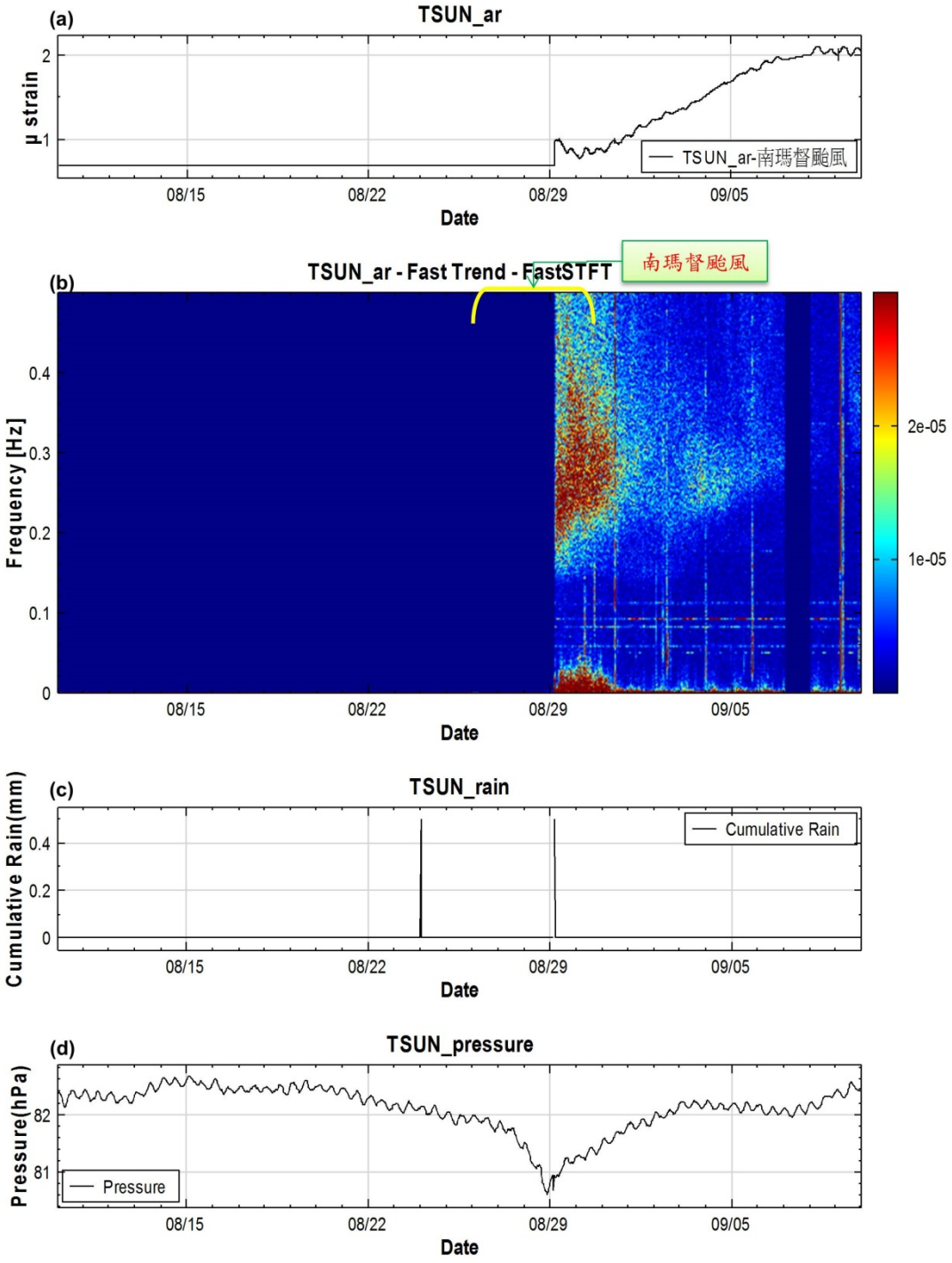


圖 6-2.9：南瑪督颱風前後中興國小(TSUN)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)大氣壓力時序變化。

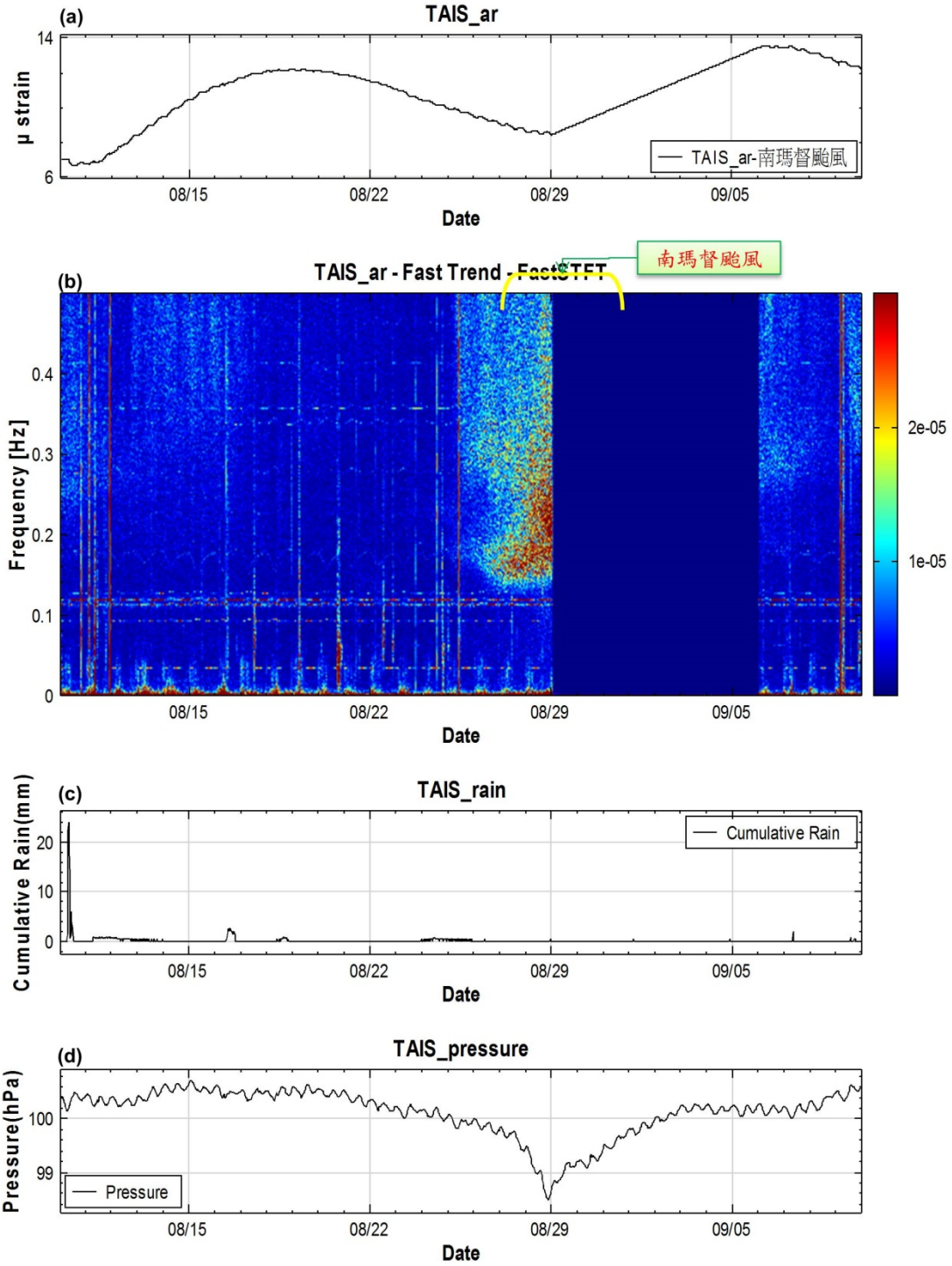


圖 6-2.10：南瑪督颱風前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)大氣壓力時序變化。

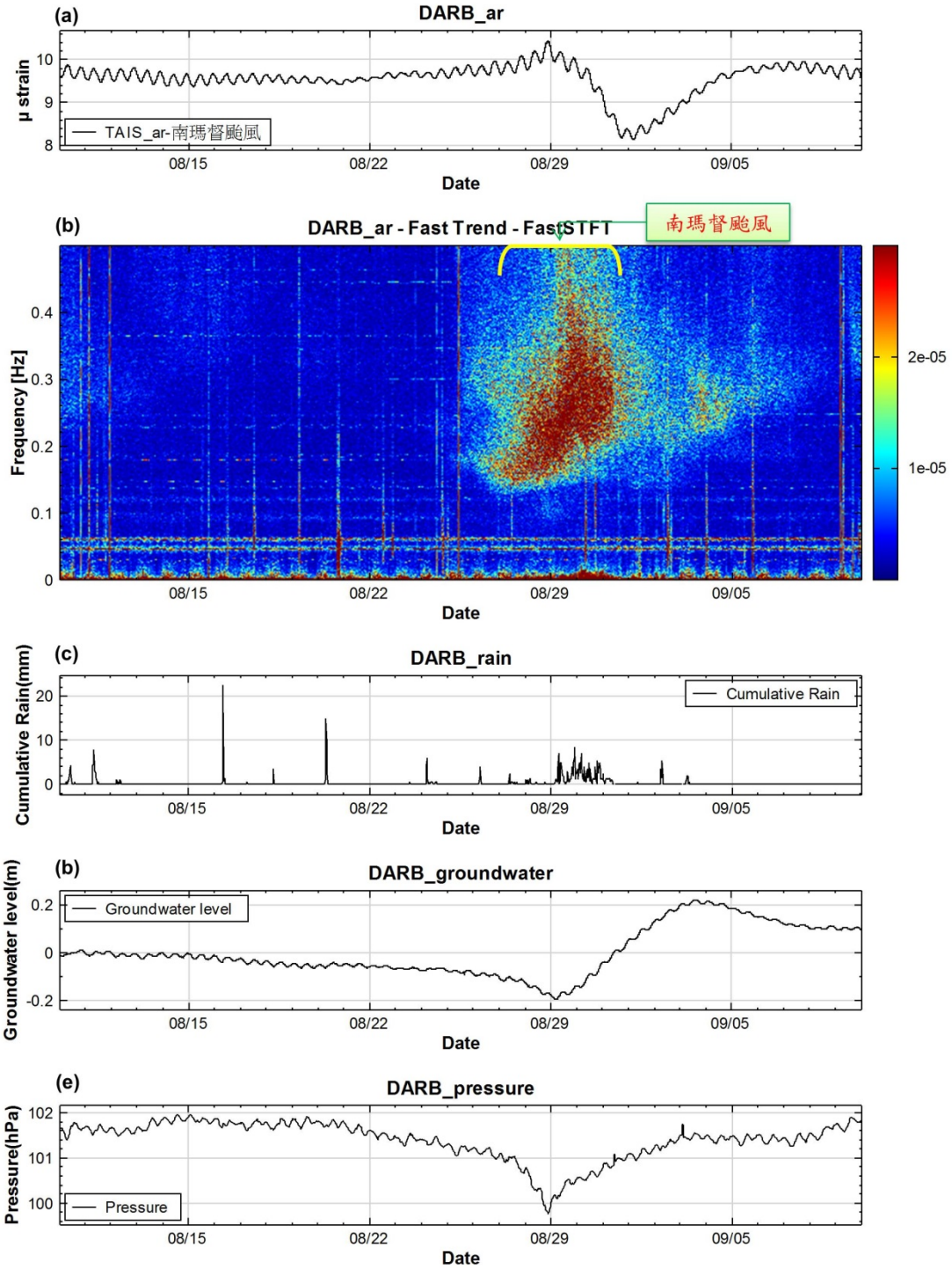


圖 6-2.11：南瑪督颱風前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

(4) 日本東北地震

日本東北地震之震央位於日本宮城縣首府仙台市以東的太平洋海域，地震矩震級規模 9.0，為一大型逆衝區地震，地震發生時間為當地時間 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分，即台灣時間 13 時 46 分，震源深度為 24.4 公里，並引發最高 40.1 公尺的海嘯。研究區域內紀錄到 311 地震的訊號，分別為達邦 DARB、中興 TSUN、太興 TAIS。進行時頻分析後，中興測站如圖 6-2.12，有 0.11、0.122、0.126Hz 的特徵頻率，太興如圖 6-2.13，有 0.07、0.09Hz 的特徵頻率、達邦如圖 6-2.14，有 0.04、0.06Hz 的特徵頻率，3/11 前後，在 0.1~0.5Hz 間

之頻率有明顯的強度變化，該頻率變化之成因仍待討論，在 0.1Hz 以下則有較多頻段較廣的垂直線段分布，本研究討論的其他地震事件中並無此現象，日本東北地震之震源與測站之距離較遠，而地震矩震級規模遠大於其他地震事件，同時引發海嘯，推估此原因為地震發生時板塊破裂與餘震引起之頻譜反應。

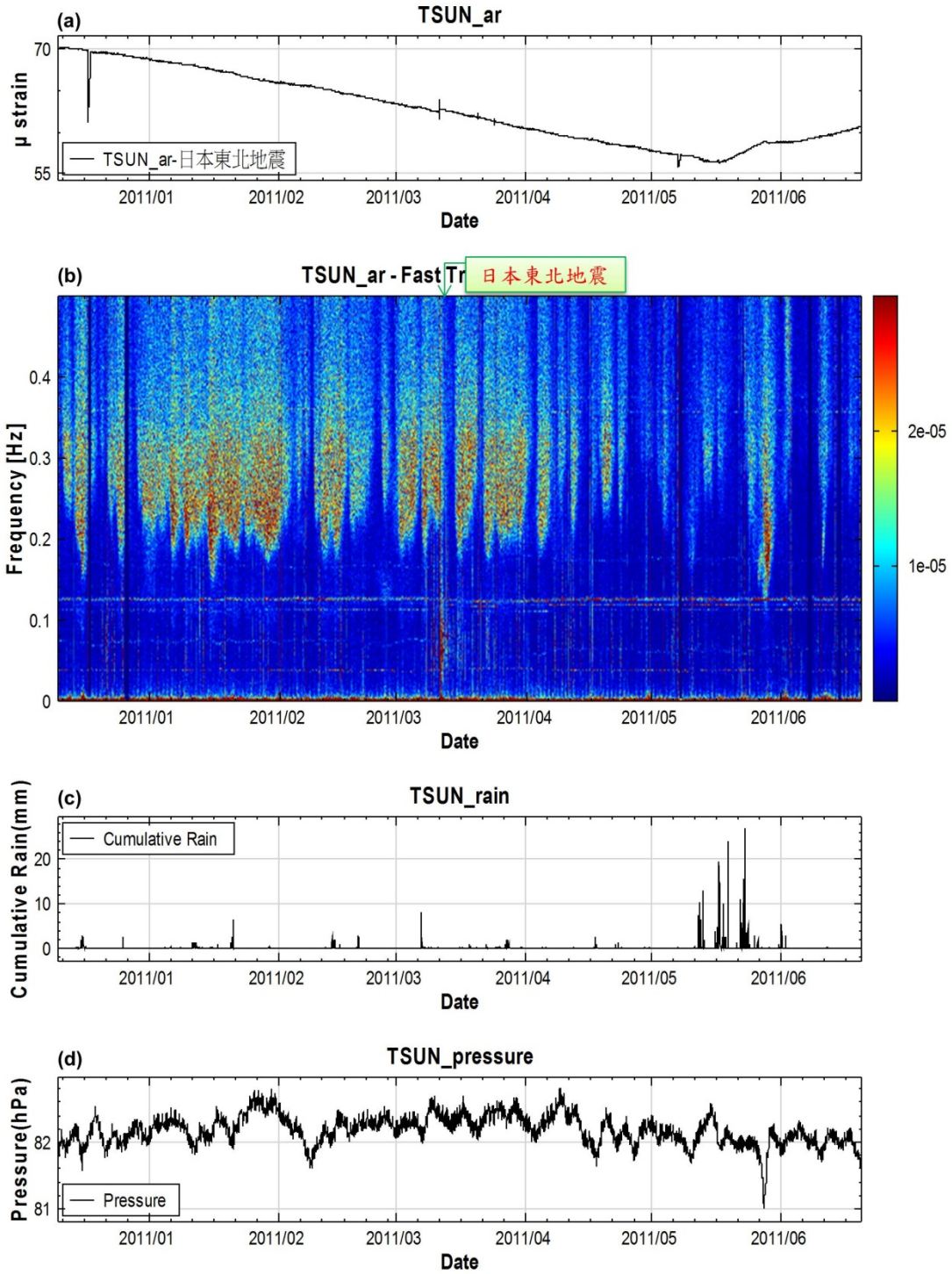


圖 6-2.12：日本東北地震前後中興國小(TSUN)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

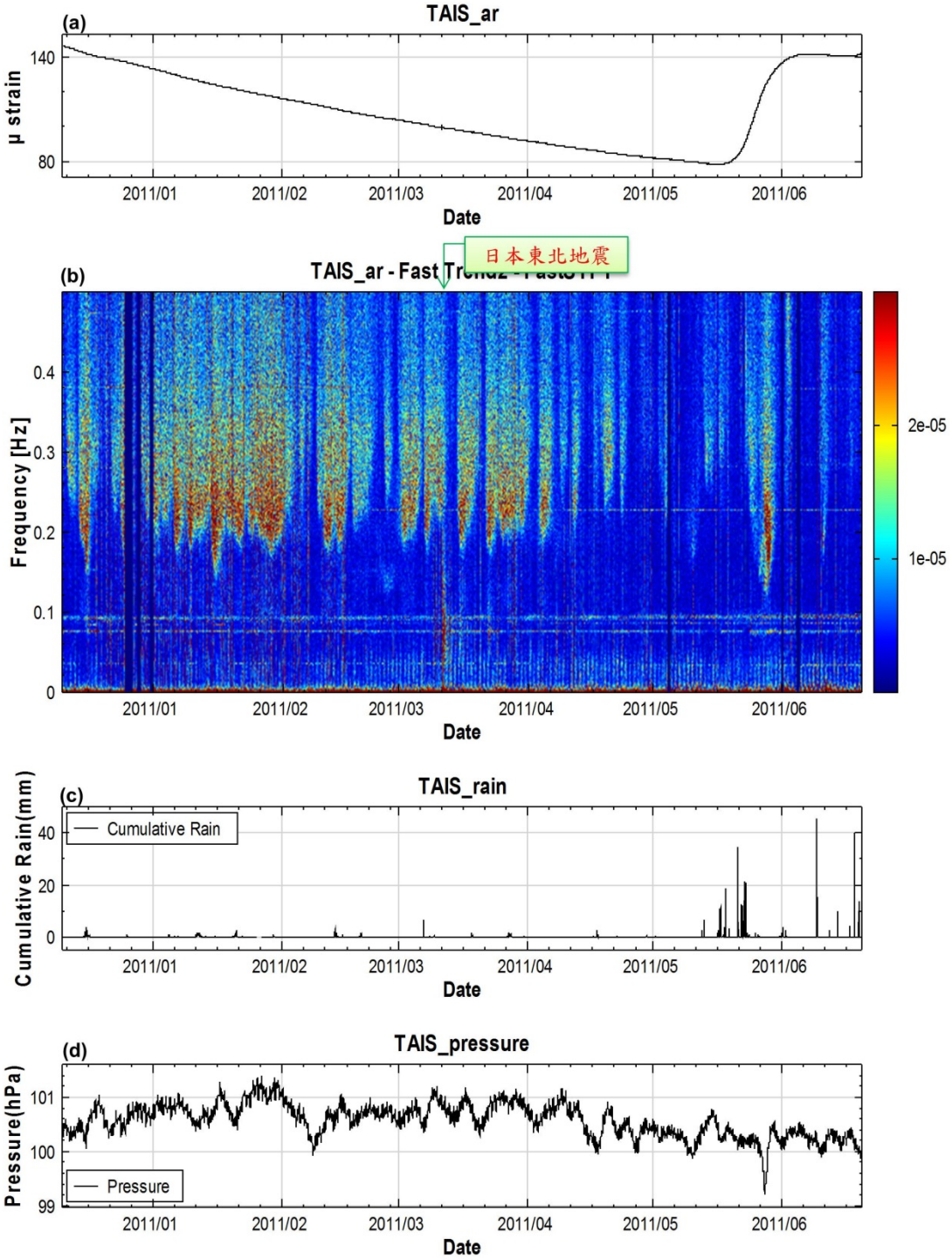


圖 6-2.13：日本東北地震前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)大氣壓力時序變化。

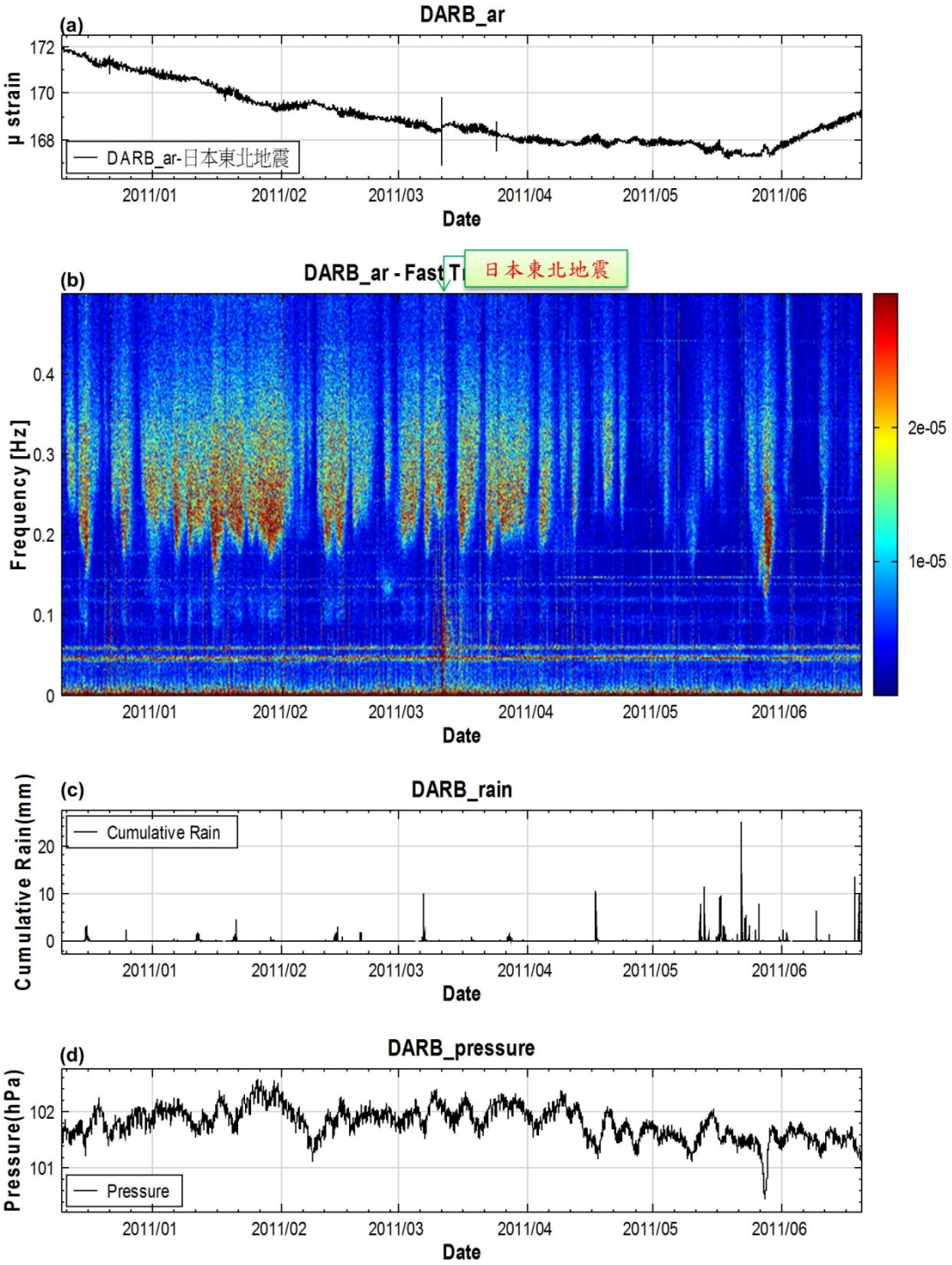


圖 6-2.14：日本東北地震前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

(5) 2013 年 3 月地震

2013 年 3 月總共有兩起震央位於台灣陸地，且規模大於 5 的地震事件，分別為台灣時間 3 月 7 日 11 時 36 分，芮氏規模 5.9，地震深度 5.6 公里，震央於花蓮縣秀林鄉及 3 月 27 日 10 時 3 分，芮氏規模 6.2，地震深度 19.4 公里，震央於南投縣仁愛鄉。研究區域內有兩個站紀錄到 3 月兩起地震影響的訊號，分別為太興國小(TAIS)測站與達邦(DARB)測站。進行時頻分析後，太興國小(TAIS)測站如圖 6-2.15，有 0.095，0.1，0.18Hz 的特徵頻率，達邦(DARB)測站如圖 6-2.16，主要為 0.5、0.6Hz 的特徵頻率。於兩起地震事件前後，在 0.1~0.5Hz 中皆

有能強度變化，成因目前尚未明確。在 3/27 南投地震後，於 TAIS、DARB 測站之地下水時序變化中，都有水位上升約 0.1~0.3m 的現象發生；在 2010 年 3 月 4 日甲仙地震發生時，地下水水位也出現顯著的水位變化，而地下水水位與地震之間的關係，仍需更多事件來佐證與確立。

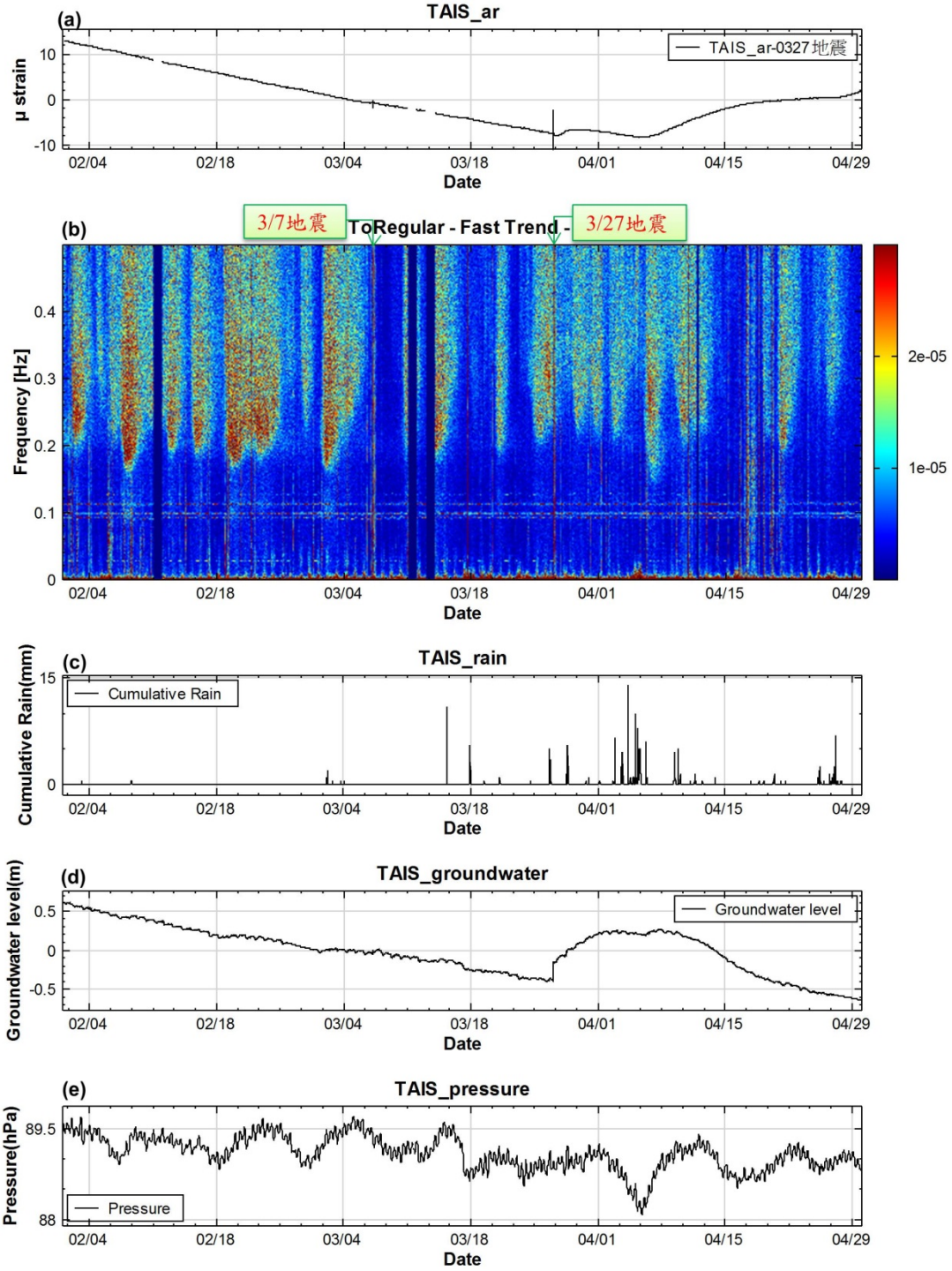


圖 6-2.15：2013 年 3 月地震前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

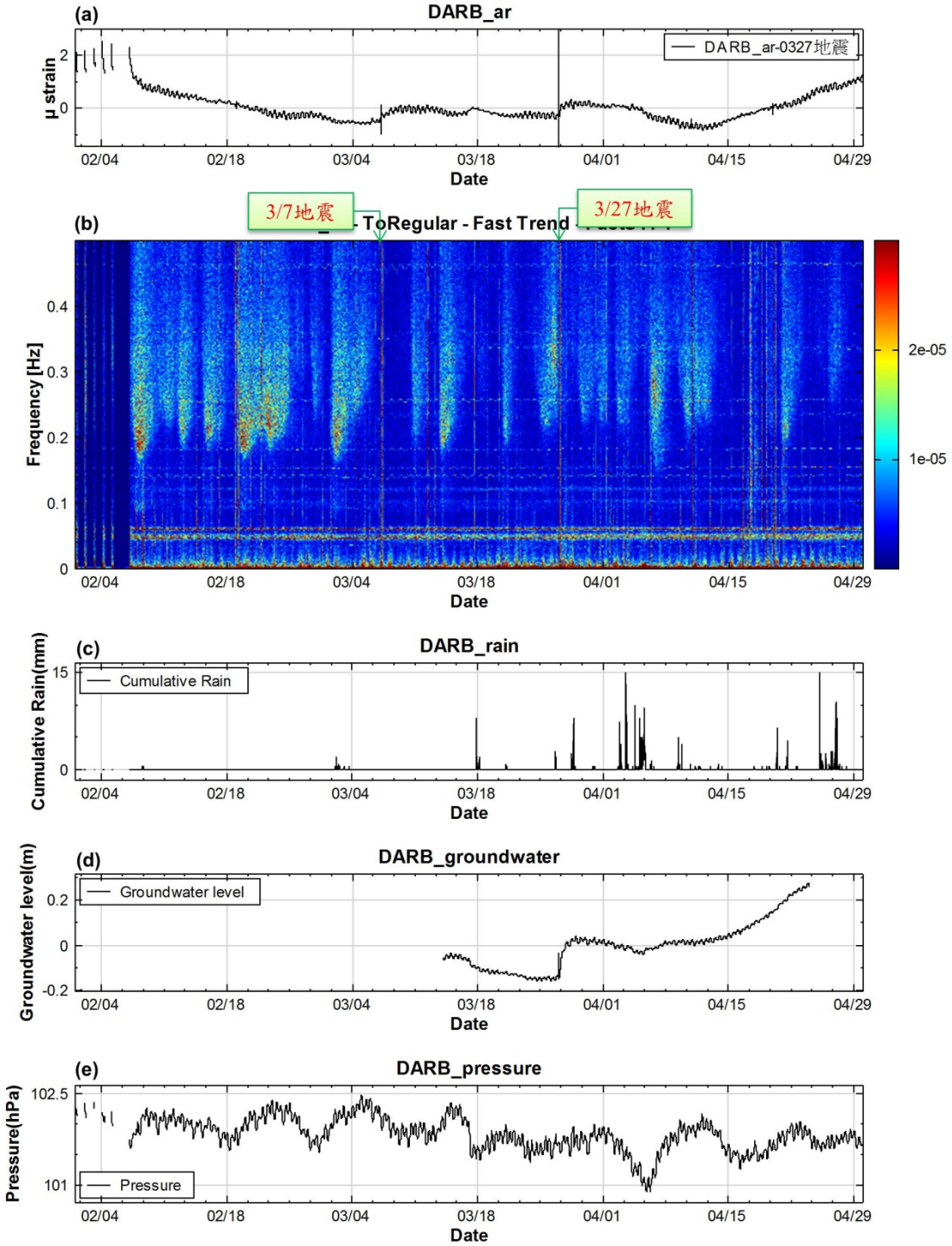


圖 6-2.16：2013 年 3 月地震前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

(6) 2013 年 6 月 2 日南投地震

地震發生時間為台灣時間 2013 年 6 月 2 日 13 時 43 分，芮氏規模 6.5，地震深度 14.5 公里，研究區域內有兩個站紀錄到 3 月兩起地震影響的訊號，分別為太興國小(TAIS)測站與達邦(DARB)測站。進行時頻分析後，太興國小(TAIS)測站如圖 6-2.17，有 0.095、0.1、0.18Hz 的特徵頻率，達邦(DARB)測站如圖 6-2.18，主要為 0.5、0.6Hz 的特徵頻率。於兩起地震事件前後，在 0.1~0.5Hz 中皆有能強度變化，成因目前尚待討論。在 6/2 南投地震後，於 TAIS、DARB 測站之地下水時序變化中，都有水位上升約 0.1~0.2m 的現象發生；在 2010 年 3 月 4

日甲仙地震與 2013 年 3 月 27 日南投地震發生時，地下水水位也出現顯著的水位變化，而地下水水位與地震之間的關係，仍需更多事件來佐證與確立。

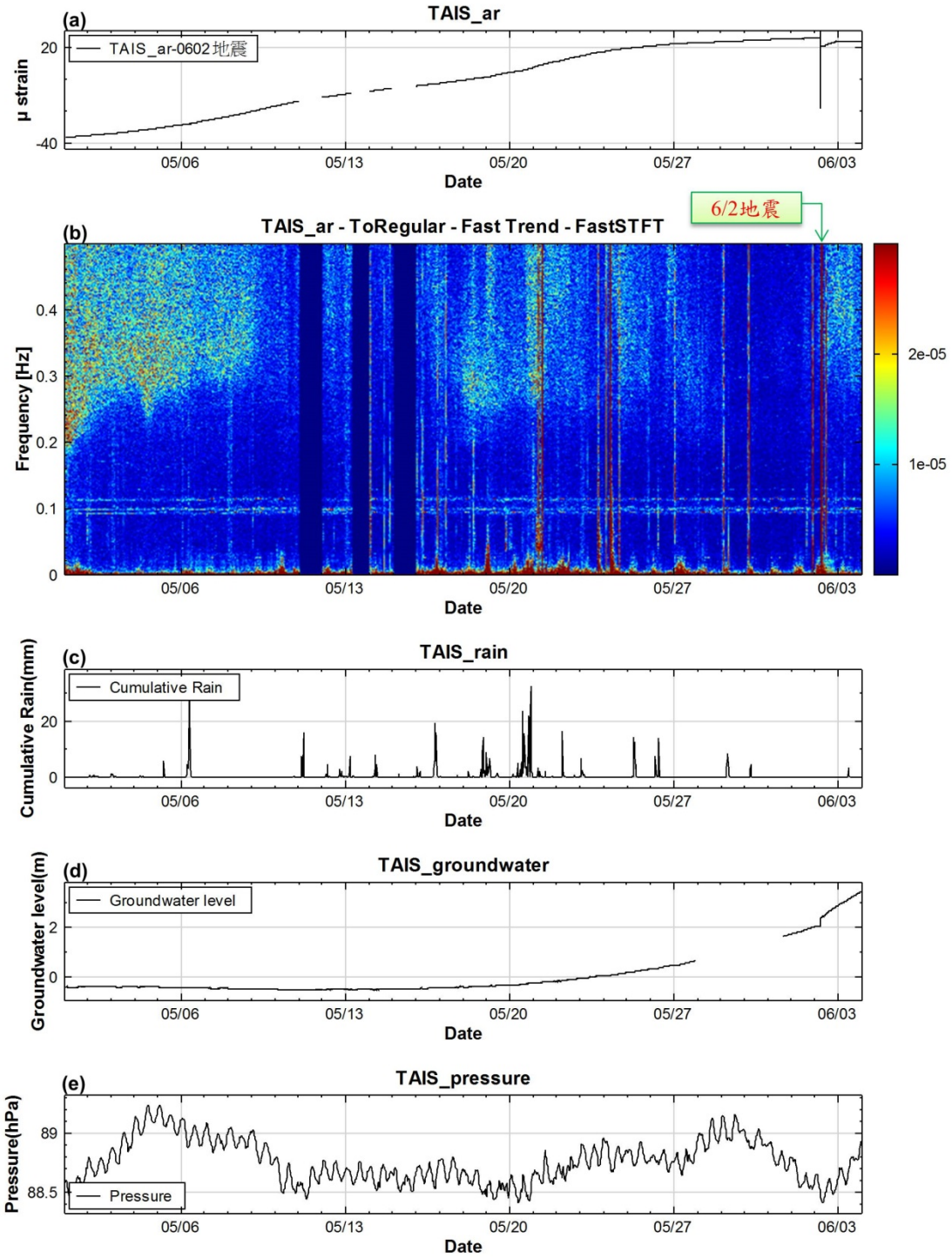


圖 6-2.17：2013 年 6 月 2 地日地震前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

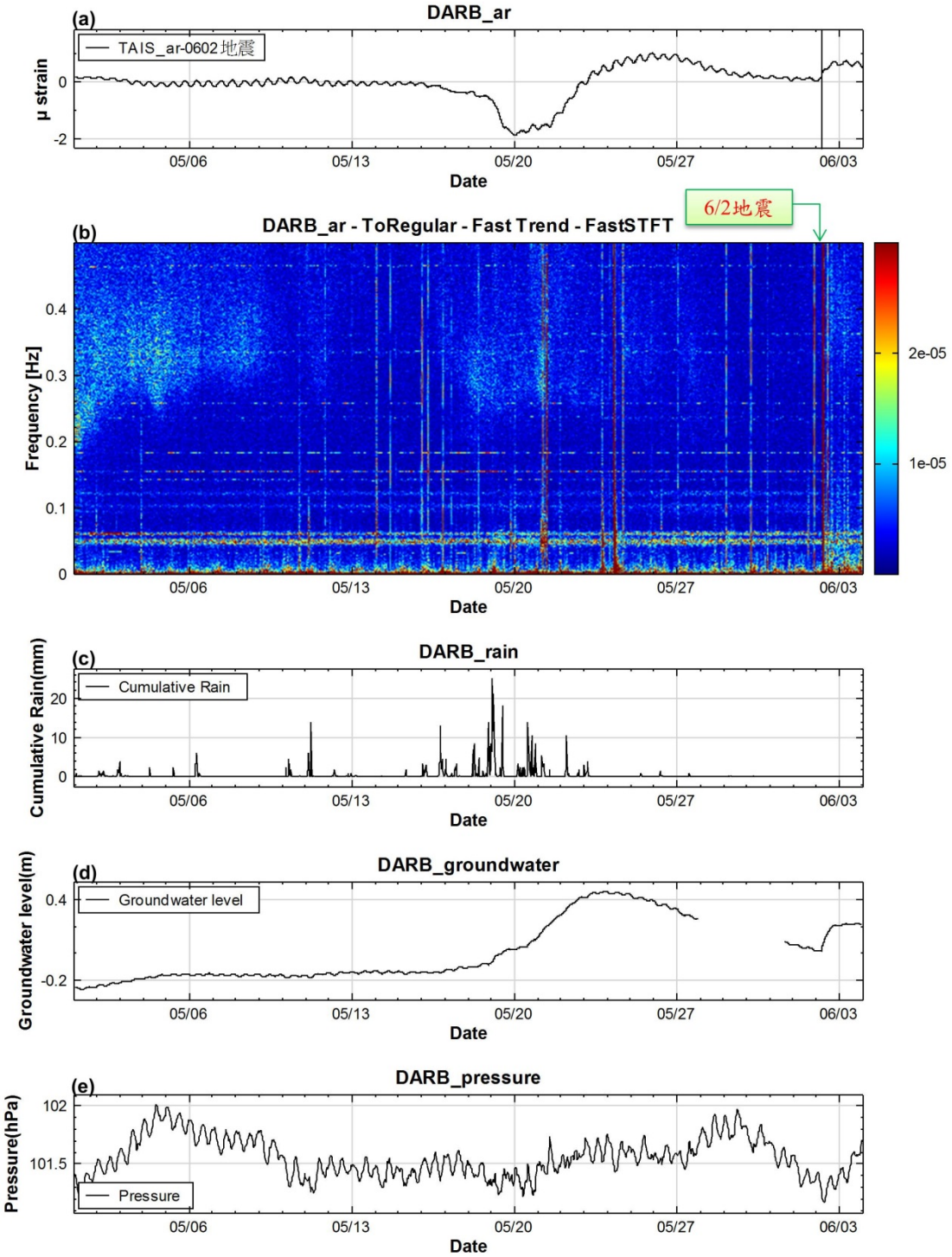


圖 6-2.18：2013 年 6 月 2 地日地震前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

(7) 2013 年蘇力颱風

台灣中央氣象局於 7 月 11 日 8 時 30 分，對台灣海域發布海上颱風警報，在 7 月 11 日 20 時 30 分對台灣陸上發出警報。7 月 13 日 23 點 30 分，台灣中央氣象局解除台灣本島陸上及海上颱風警報。井下應變儀中有兩個站紀錄到蘇力颱風的訊號，分別為達邦(DARB)測站與太興國小(TAIS)測站。太興國小(TAIS)測站面應變資料進行時頻分析之後，其結果如圖 6-2.19 有 0.1、0.12Hz 的特徵頻率；達邦(DARB)測站之結果如圖 6-2.20，有 0.5、0.6Hz 的特徵頻率。在 7/11~7/14 前後，於 0.1~0.5Hz 處有強度變化，該時段內則為氣壓與地下水為最低點，並具有顯著累

積雨量之時，氣壓比一般狀態約低 2.0hPa，30 分鐘累積雨量約達 22.0mm，而 0.05Hz 以下則有一山形的強度變化，以上頻率變化成因尚待討論。達邦(DARB)測站之地下水水位變化無反應颱風降雨情形，尚無資料能夠說明此為儀器故障亦或是真實現象。

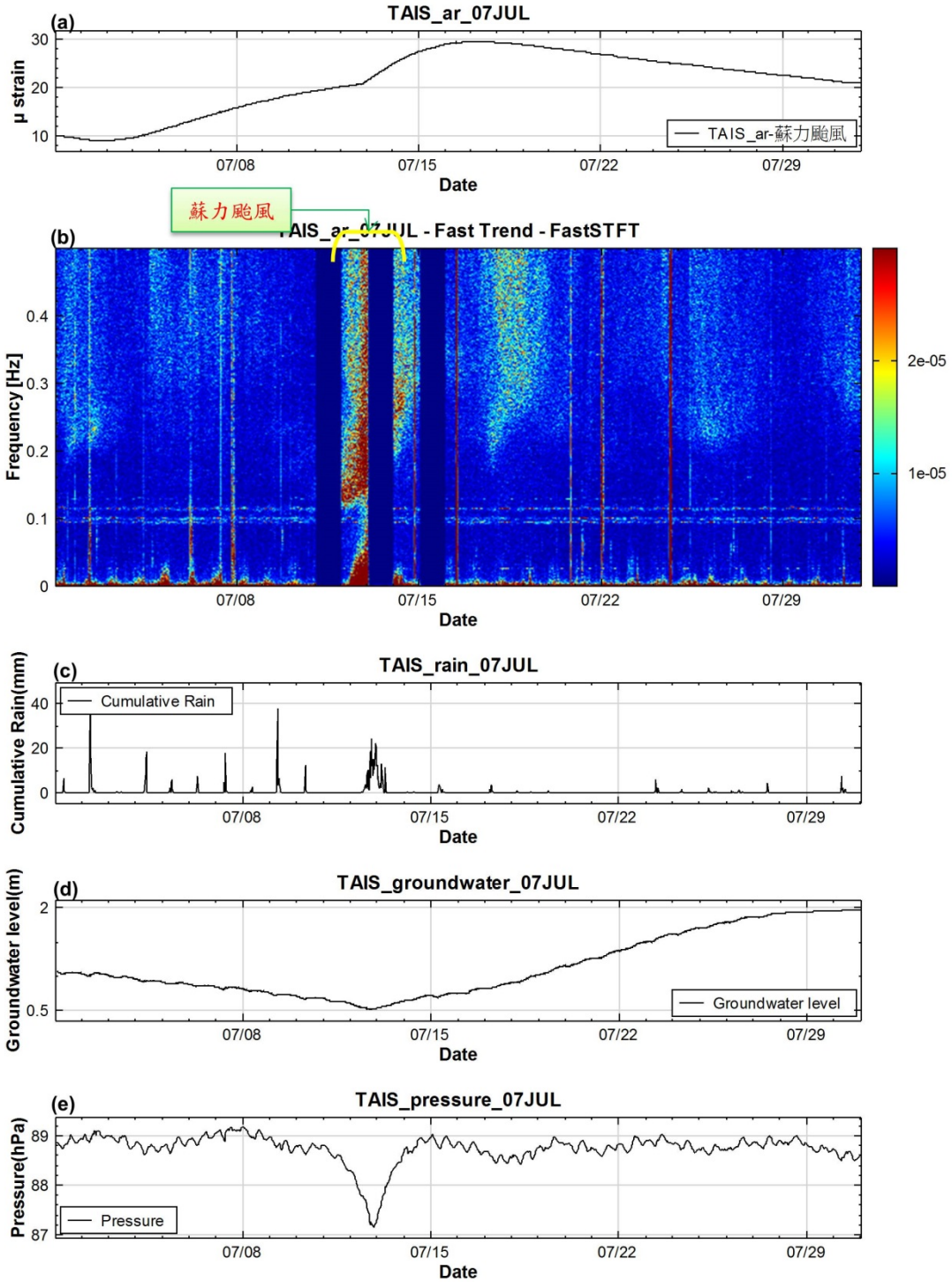


圖 6-2.19：2013 年蘇力颱風前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

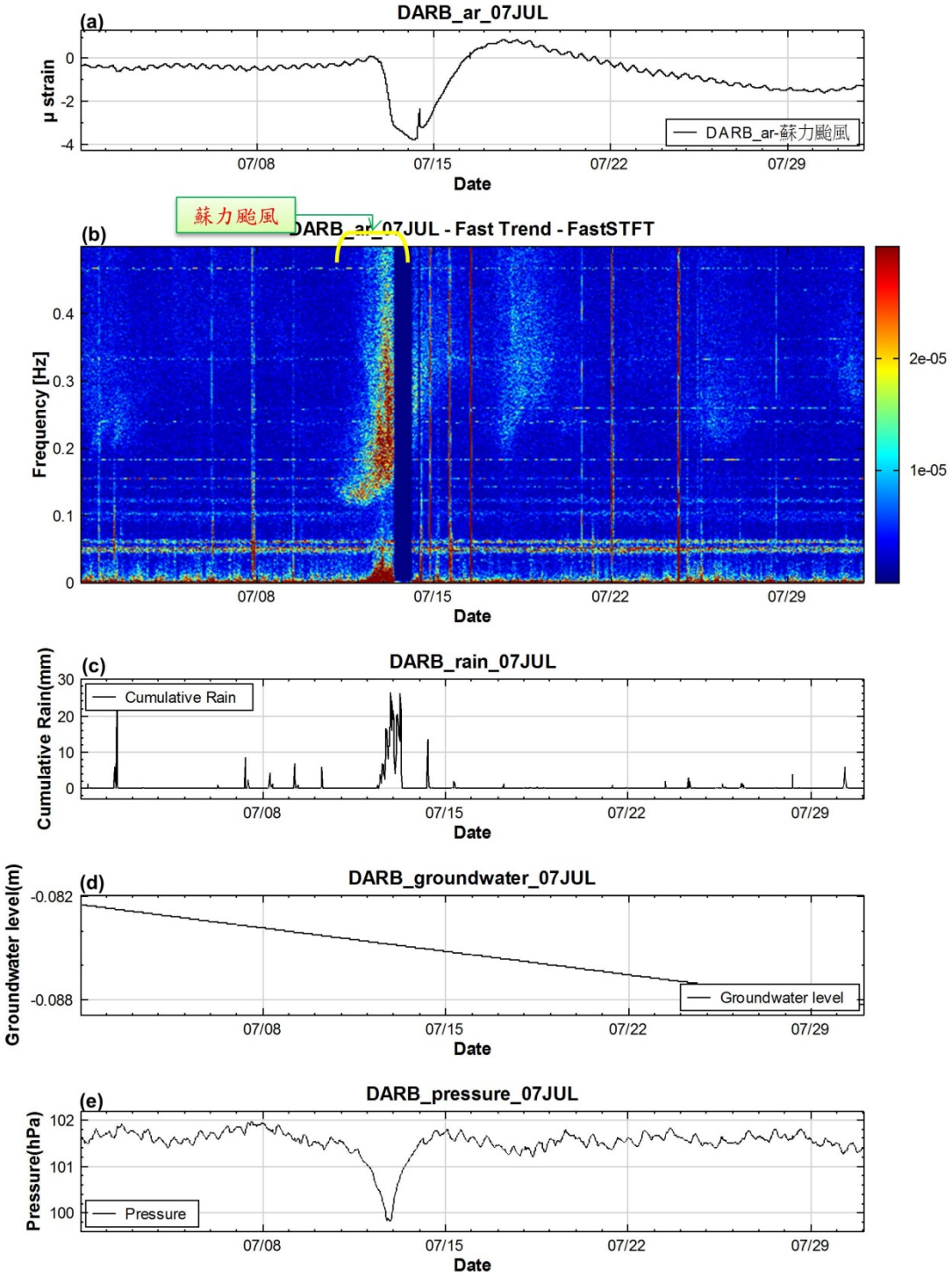


圖 6-2.20：2013 年蘇力颱風前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

(8) 2013 年潭美颱風

台灣中央氣象局於 8 月 20 日 11 時 30 分，對台灣海域發布海上颱風警報，在 8 月 20 日 20 時 30 分對台灣海上、陸上皆發出警報。8 月 22 日 8 點 30 分，台灣中央氣象局解除台灣本島的海陸上颱風警報。緊接於潭美颱風之後的康芮颱風，影響台灣時間為 8/27~8/29；潭美颱風使嘉義地區氣壓下降約 1.0hPa，康芮颱風下降約 0.5hPa，康芮颱風強度低於潭美。井下應變儀中有兩個站紀錄到潭美颱風與康芮颱風的訊號，分別為達邦(DARB)測站與太興國小(TAIS)測站。太興國小(TAIS)測站面應變資料時頻分析結果如圖 6-2.21，有 0.9、0.12Hz

的特徵頻率，達邦(DARB)測站時頻分析結果如圖 6-2.22，有 0.5、0.6Hz 的特徵頻率。於兩個颱風影響台灣期間，當累積雨量最大值與氣壓最低點時，在頻譜圖中 0.1~0.5、0.5Hz 以下的部分，分別具有顯著的強度變化，而該頻段強度變化是受到雨量影響，還是氣壓影響仍待討論、確定。

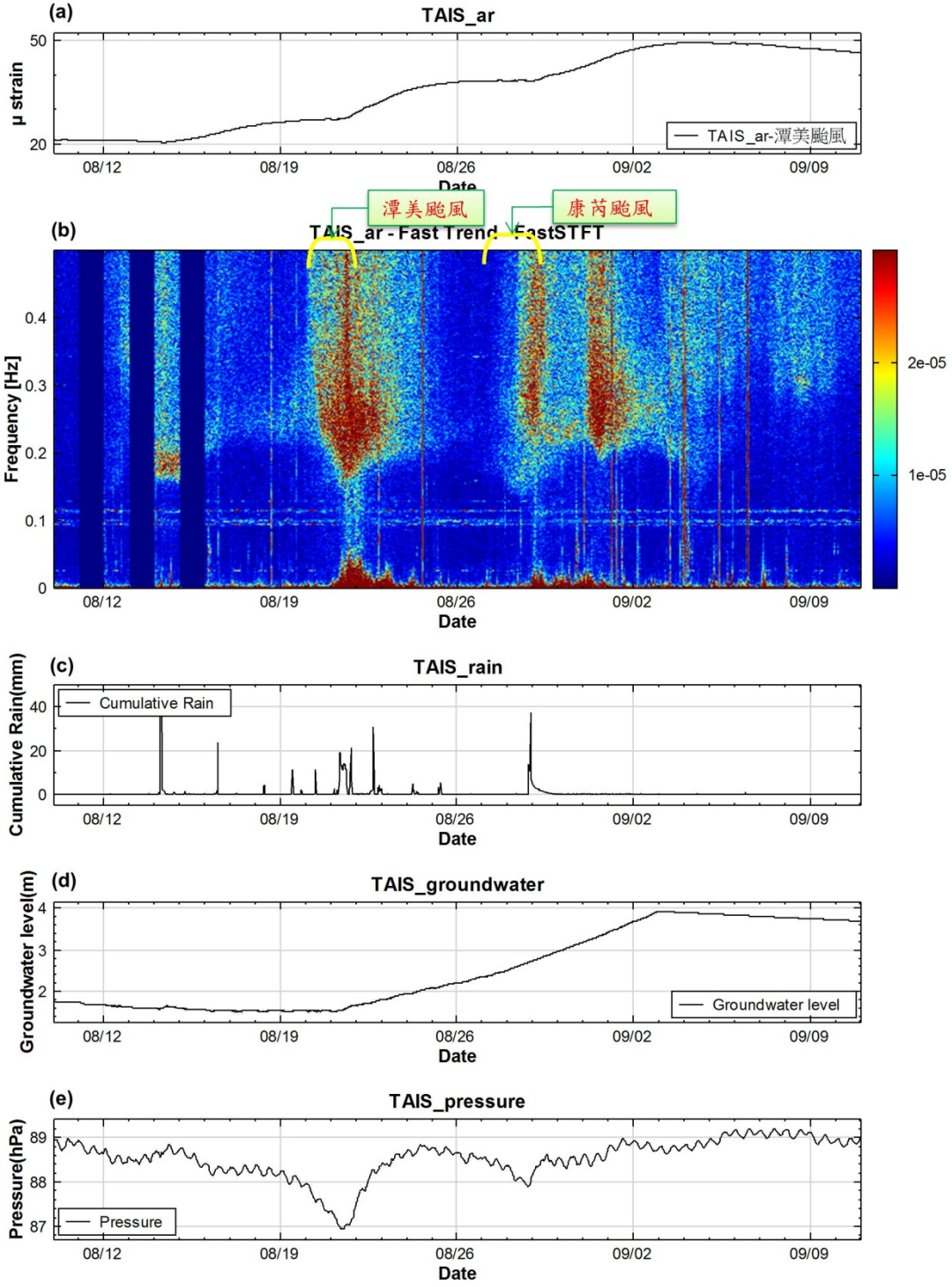


圖 6-2.21：2013 年潭美颱風前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

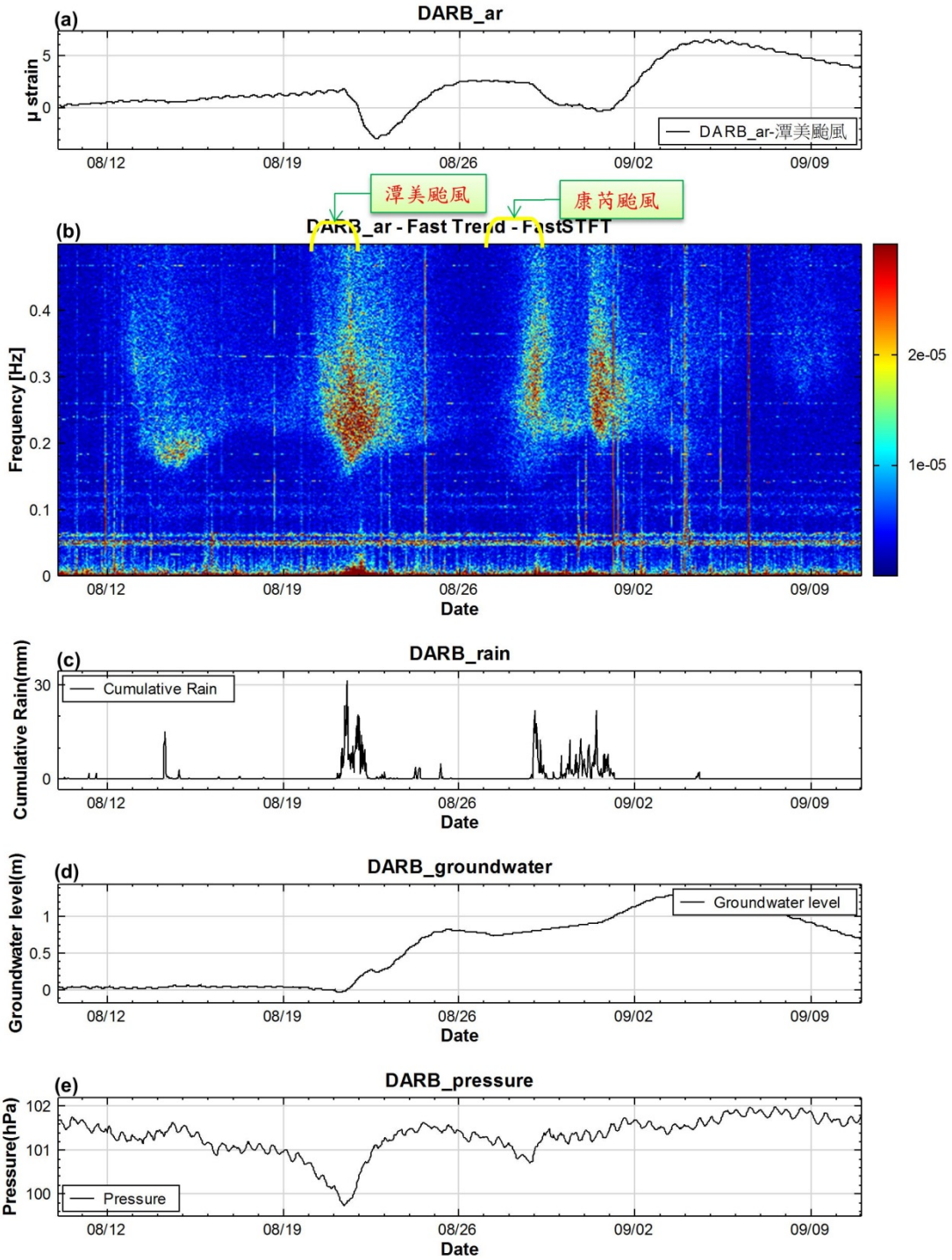


圖 6-2.22：2013 年潭美颱風前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

(9) 2013 年天兔颱風

台灣中央氣象局於 9 月 19 日 23 時 30 分，發布海上颱風警報，在 9 月 20 日 8 時 30 分，對台灣海上陸上皆發出警報。9 月 21 日暴風圈逐漸影響台灣東半部及台中以南陸地，9 月 22 日 8 點 30 分，台灣中央氣象局解除台灣本島的陸上颱風警報，14 時 30 分解除海上颱風警報。受天兔颱風行進路線影響，主要雨量以台灣東部與屏東地區為主，西部較為緩和，但於嘉義網測站地區仍有降雨的情形發生，23 日颱風離台之後，因水氣較多仍有顯著降雨的現象。嘉

義網井下應變儀中有兩個站紀錄到天兔颱風的訊號，分別為達邦(DARB)測站與太興國小(TAIS)測站。時頻分析後的太興國小(TAIS)測站有 0.1、0.12Hz 的特徵頻率，如圖 6-2.23 所示；達邦(DARB)測站有 0.5、0.6Hz 的特徵頻率，如圖 6-2.24 所示。9/21~9/22 前後，於兩站的 0.1~0.5Hz 間都有強度反應，0.5Hz 以下強度變化並無蘇力、潭美等其他颱風事件顯著，此時間點為颱風中心氣壓最低之時，且地表環境中則有降雨的現象發生，造成此頻段有強度反應原因仍待討論。地下水水位變化無反應降雨情形，其原因是儀器損壞或是其他因素待進一步討論。

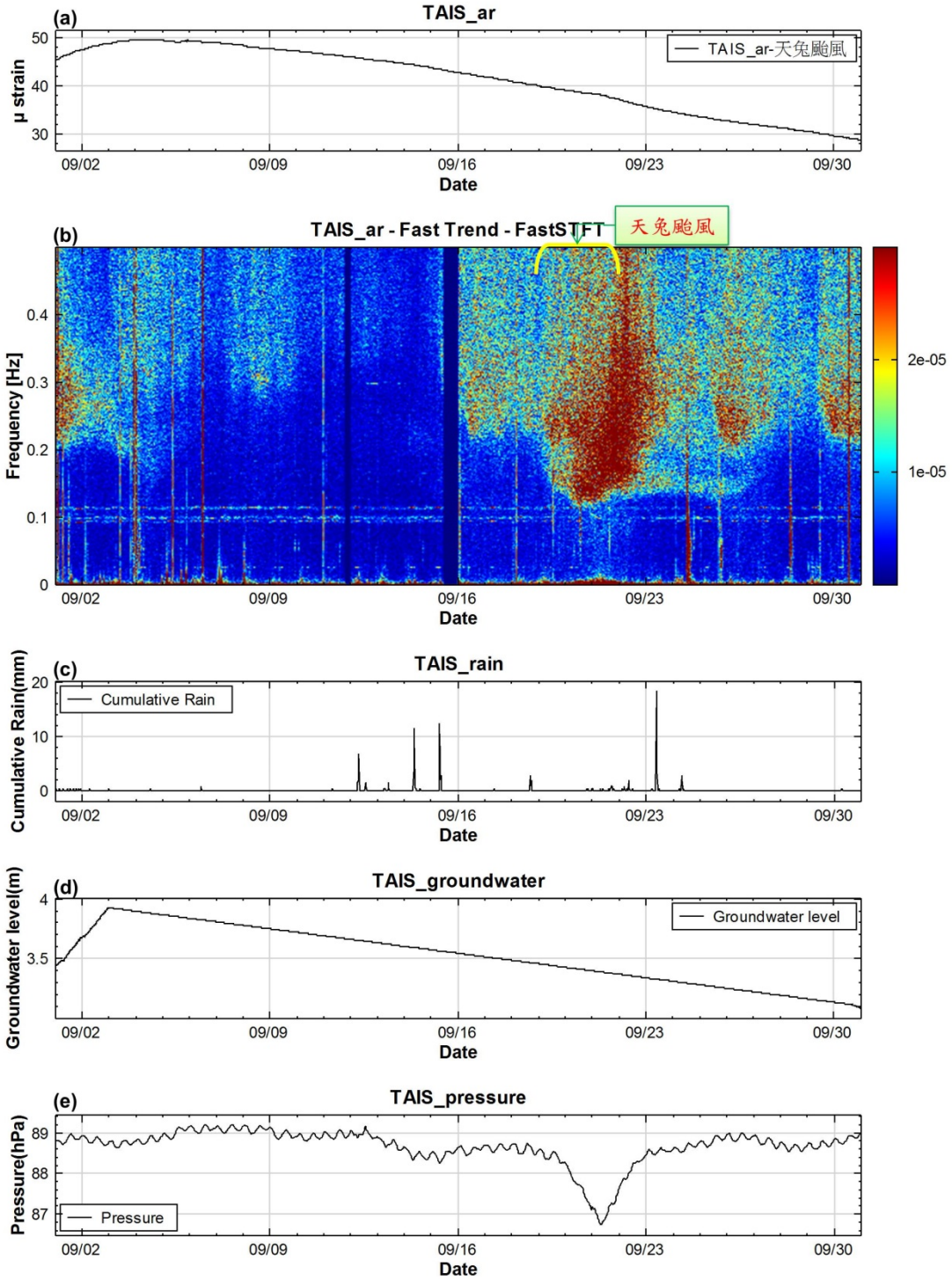


圖 6-2.23：2013 年天兔颱風前後太興國小(TAIS)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

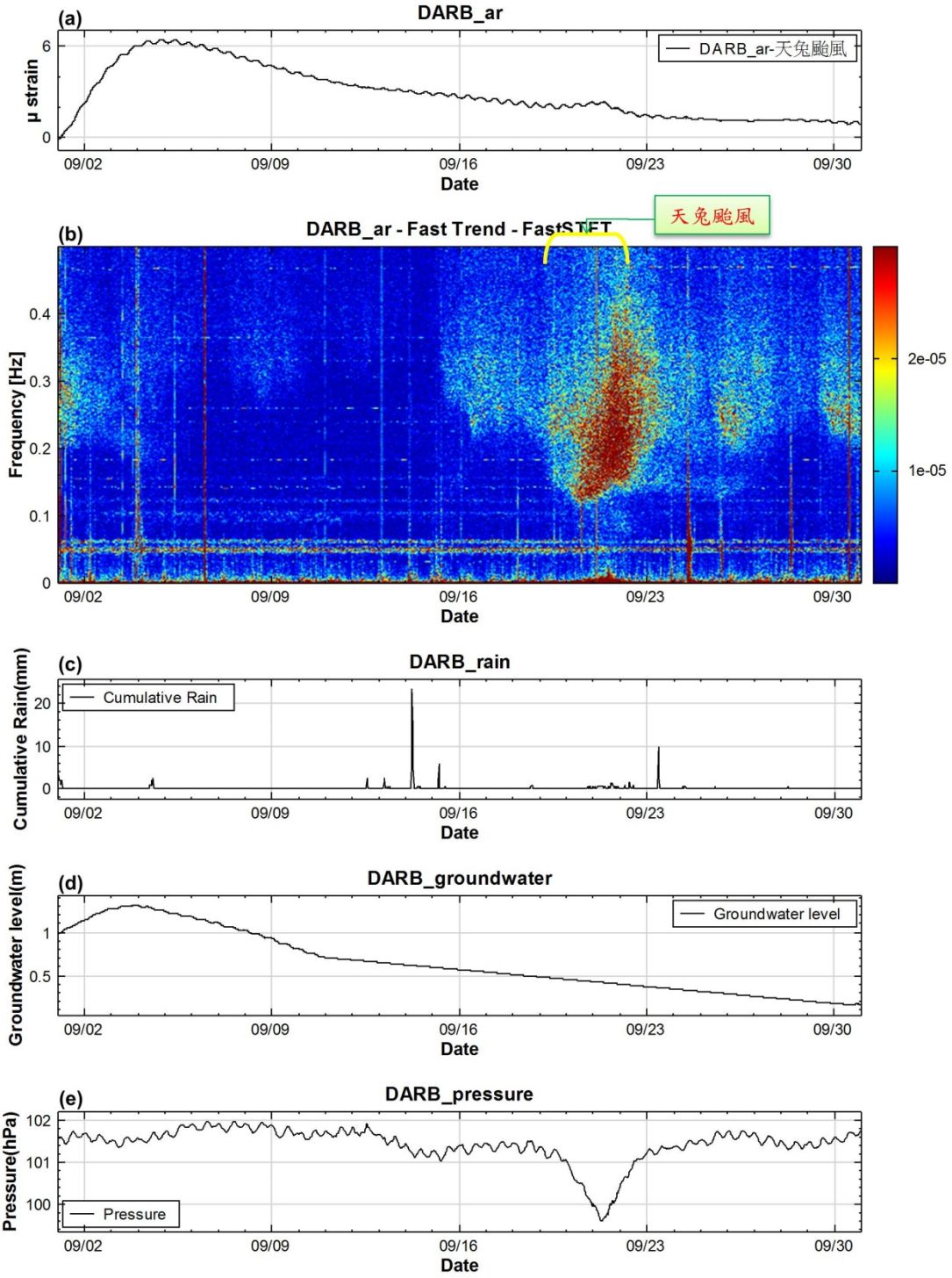


圖 6-2.24：2013 年天兔颱風前後達邦(DARB)測站面應變時頻分析結果。(a)面應變資料時序變化、(b)面應變資料時頻圖、(c)累積雨量時序變化、(d)地下水位時序變化、(e)大氣壓力時序變化。

6-2-3 不同頻段強度變化成因分析

本章節以嘉義網：達邦(DARB)、太興國小(TAIS)、中興國小(TSUN)三測站為研究對象，針對 2013 年 1~9 月的井下應變儀面應變資料進行時頻分析。而分析流程則是先去除面應變資料的趨勢變化，並針對不同頻率範圍進行短時距傅立業轉換分析，頻率範圍分別為高頻(0.15~0.5Hz)、中頻(0.07~0.15Hz)以及低頻(0.0~0.07Hz)，再對各個頻段之面應變資料的時間積分(Marginal Time)，取面應變資料的變化趨勢與其對應之累積雨量、地下水水位和氣壓的變化趨勢正規化(Normalize)後進行比對，透過井下應變儀面應變資料與水文資料之趨勢比對兩者之間的關聯性。

頻率範圍分類皆利用有限脈衝響應 (Finite Impulse Response) 濾波器進行資料前處理，濾出特定頻段之面應變資料，透過頻譜圖呈現各個頻率與時間點中較細節的能量變化。中興國小(TSUN)測站面應變資料於 3/21 開始資料異常的現象，於 6/4 停止記錄，故於此節討論中不包含中興國小(TSUN)測站面應變資料。井下應變儀各個頻段之強度變化趨勢與水文資料之趨勢比對分析結果，詳細列於附錄 6-4 中。

高頻強度變化趨勢與氣壓變化趨勢，在颱風影響台灣期間具有顯著的反比現象，當氣壓極低時，對應之高頻面應變強度較大，如圖 6-2.25 所示；而高頻面應變強度與地下水水位趨勢有逐漸上升的情形，如圖 6-2.26 所示；颱風時大氣壓力與累積雨量為反比的關係，是故高頻強度變化與累積雨量變化趨勢具有正比關係，如圖 6-2.27 所示；於其他頻段強度變化趨勢分析結果中，並無與水文因子有直接的相似性，影響此區頻段之因素仍待討論。

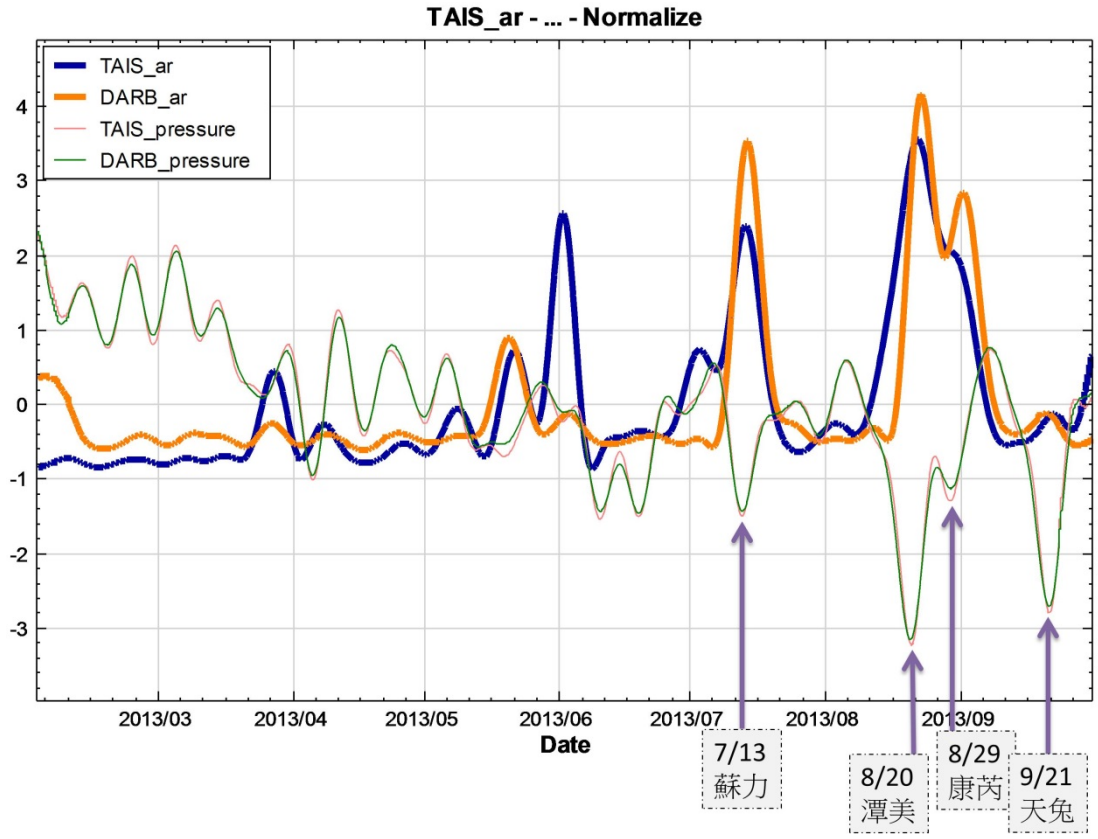


圖 6-2.25：太興國小(TAIS)測站與達邦(DARB)測站 0.15~0.5Hz 面應變強度趨勢變化與氣壓趨勢變化。

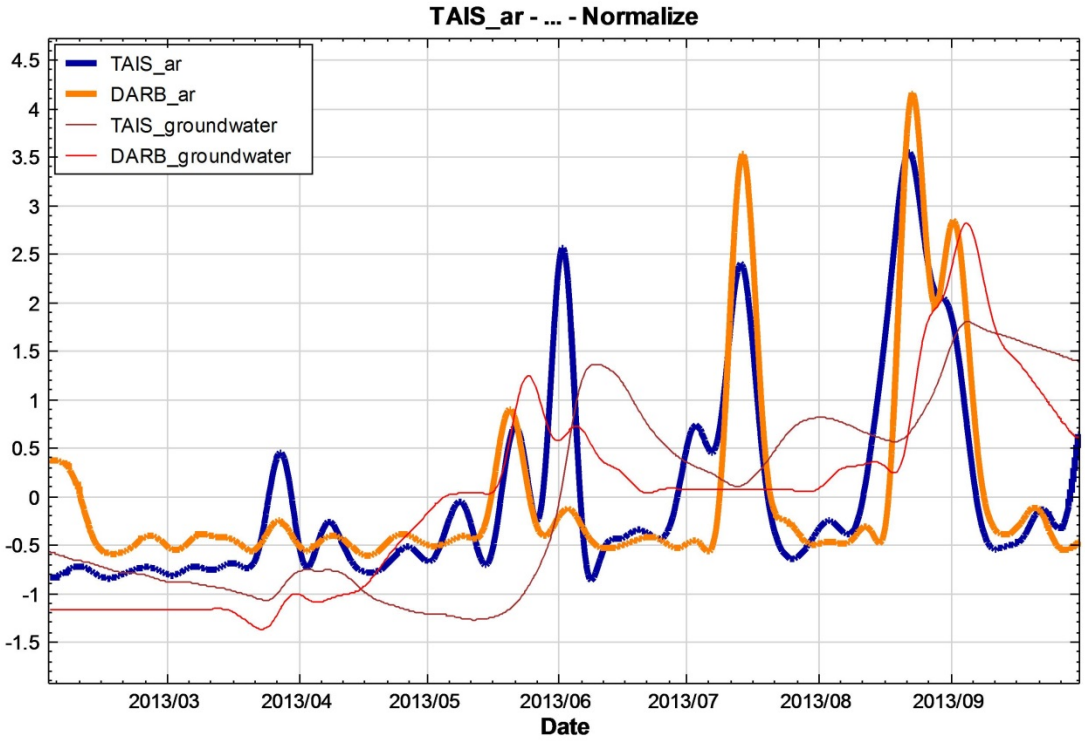


圖 6-2.26：太興國小(TAIS)測站與達邦(DARB)測站 0.15~0.5Hz 面應變強度趨勢變化與地下水水位趨勢變化。

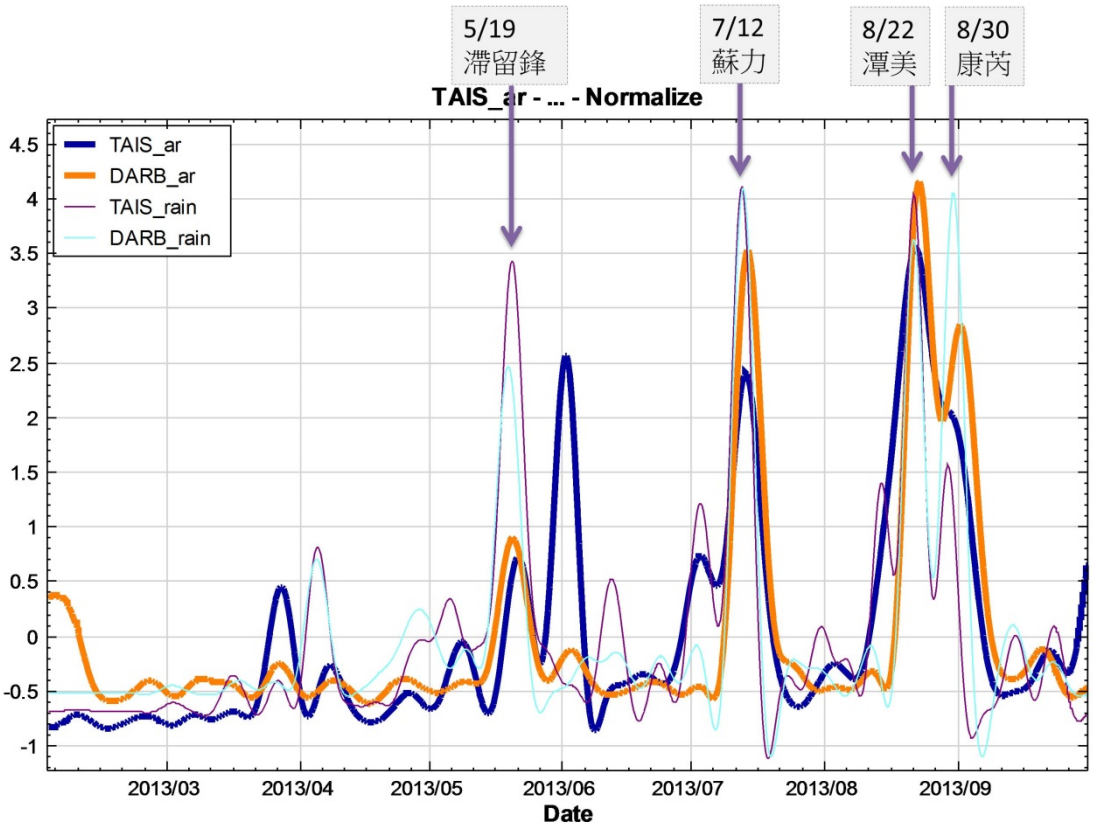


圖 6-2.27：太興國小(TAIS)測站與達邦(DARB)測站 0.15~0.5Hz 面應變強度趨勢變化與累積雨量趨勢變化。

6-3 井下應變儀相關建議事項

目前井下應變儀的研究目的在找出與構造活動的關聯性與其物理意義，資料處理的方式往往會藉由環境因子（降雨、氣壓、地下水等）的量測資訊來做為訊號修正的參考，然而在資料處理的過程中往往會發現資料的不穩定跳動與缺失，這些情況可能是來自於儀器的不穩定，因此需要藉由後續大量時間的人工編修與藉由其他測站的資料來參考修正後才得以使用。然而未來仍希望我們可以藉由井下應變儀的資料提供可能的地震前徵兆，以做為防災的資訊之一。在這個大方向的目標之下，應變儀中各方向感應器與鄰近環境相關偵測儀器的「穩定性」則會是影響資料是否能即時處理運算與呈現的重要一環。然而截至今年度的工作結果來看，井下應變儀的資料仍然有許多變動是來自於儀器的不穩定與資料缺漏，以下提出幾點問題以供未來改進參考：

(1) 三個測站的應變計有較明顯問題，未來可以建議可以首先對這三個測站進行維護與保養的工作：

根據美國地質調查所使用井下應變儀之經驗顯示，井下應變儀壽命可連續十年甚至二十年以上，但必須避免兩個不利的情形發生，一為管線接頭漏蝕，一為雷擊。由於應變儀埋設於地下深部，為能密切反應周圍岩盤的變形，在安裝時即以膨脹型水泥將儀器牢牢地固定在地下，因此若是地下儀器發生問題時，是不可能無損地將儀器從地底下取出更換或維修，而上述的兩種情形都是可能造成地下儀器損毀而無法恢復的情況。

新樂國小測站(CINT)的 CH0 大約從 2012 年 7 月之後有資料中斷與數值不正常跳階的情況發生(圖 6-3.1)，未來在計算該測站面應變時，可能需要考慮使用其他 3 個頻道來做計算。但又由於該測站在方向性檢測的結果非常不理想，使用不同頻道來計算工程應變的會有不一致的趨勢，因此在新舊資料結合與之後的數據分析會有其一定的困擾。

中興國小測站(TSUN)在 2013 年 3 月之後，CH2 與 CH3 的資料都異常，並無法使用(圖 6-3.2)，因此無法計算工程應變與相關分析。

樹林測站(SLIN)的 CH0 明顯有數值異常上升又漸降回的現象，另外 CH2 與 CH3 都有數值突然跳階的情況發生(圖 6-3.3)。

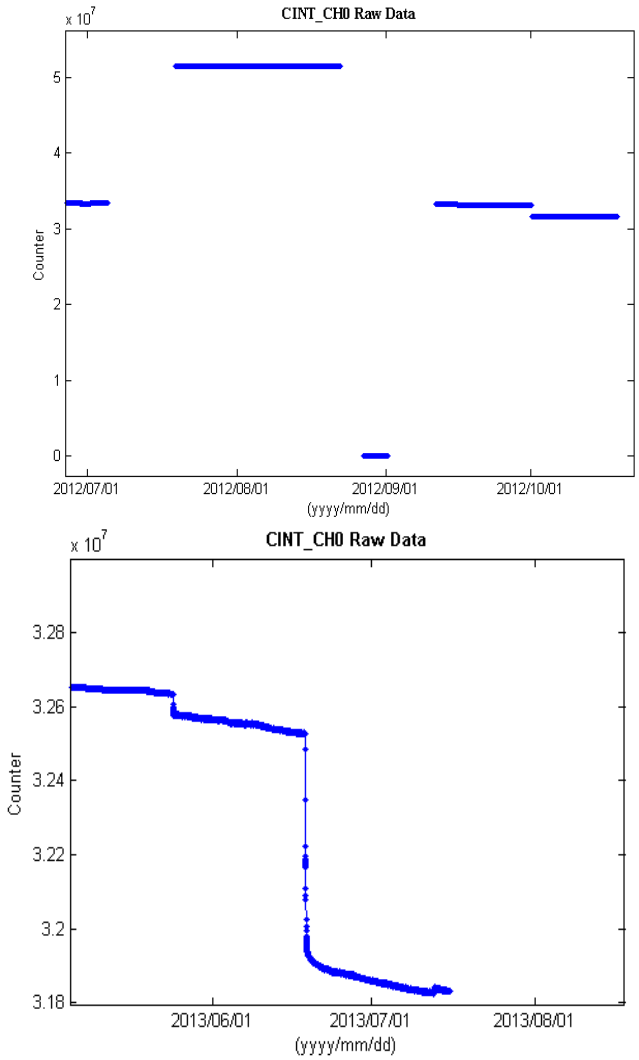


圖 6-3.1：新樂國小測站(CINT)的 CH0 資料異常情況。

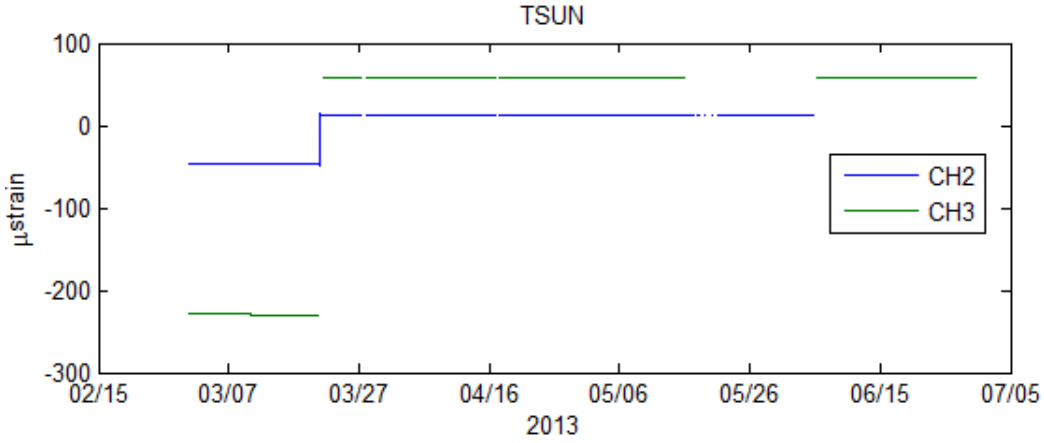


圖 6-3.2：中興國小測站(TSUN)的資料異常情況。

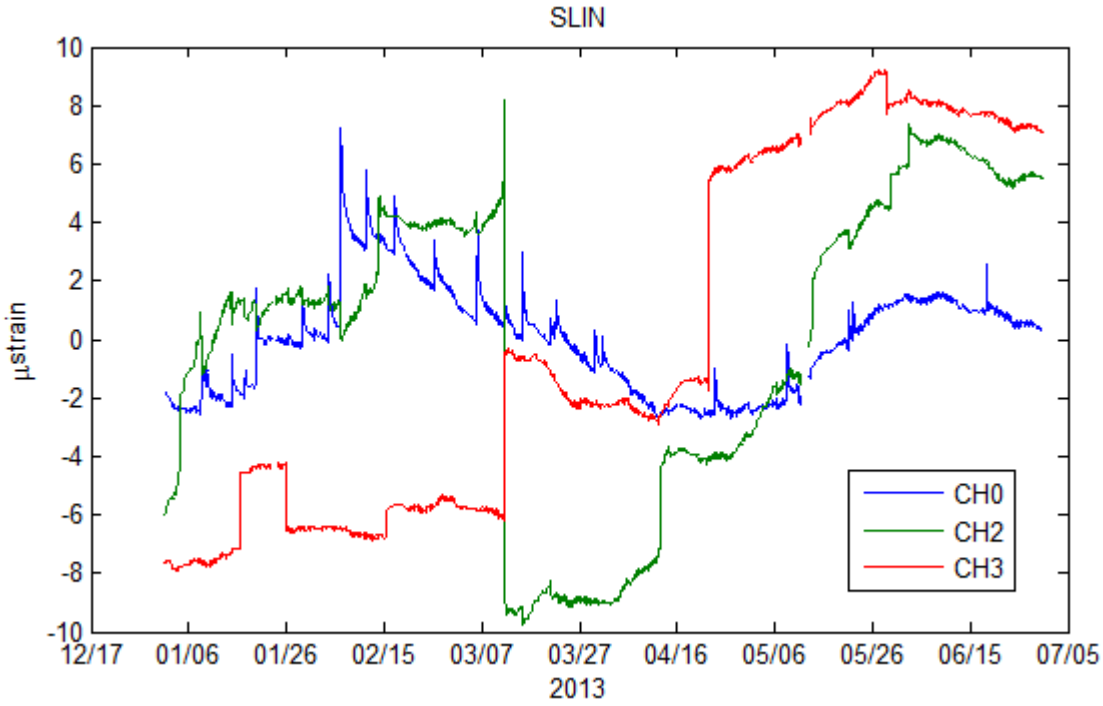


圖 6-3.3：樹林測站(SLIN)的資料異常情況。

(2) 井下應變儀中雨量計資料缺失

當我們將井下應變儀降雨資訊與氣象局的降雨資料做比對後，會發現應變儀的雨量資料有許多缺漏，如梅花國小測站(PFMT)在 2005 年 7 月 15 日至 7 月 22 日期間資料顯示沒有降雨，但從氣象局的資訊的確可以得知在這段期間的總降雨量高達 150 毫米以上(圖 6-3.4)。目前已知降雨的確會對應變計造成負載壓縮的應變，未來如果要完整且即時地從應變資訊中濾除降雨的影響，勢必須有相對正確且完整的降雨資訊，才得以進行這項工作，建議未來必須對應變儀中的雨量計進行維修以確保雨量資訊的正確性。

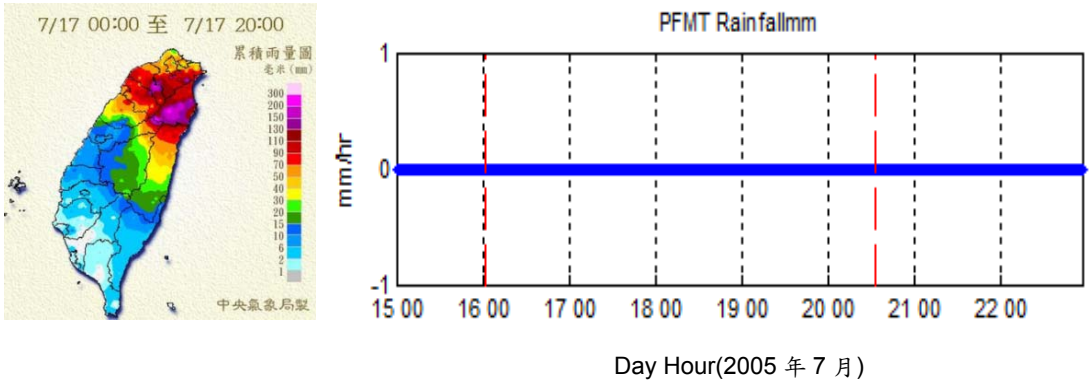


圖 6-3.4：2005 年 7 月 15 日至 7 月 22 日期間降雨資料比對。左圖為氣象局 7/17 當日 0 時累計至 22 時的雨量分布圖；右圖為井下應變儀梅花國小測站(PFMT)的從 7/15-7/22 的降雨資料。

(3) 井下應變儀中氣壓計數值異常問題

首先是氣壓量值並不正確，以海平面平均氣壓 1013 hPa 與每上升 100 公尺氣壓大約下降 10hPa 的概念來計算各測站在所在海拔高度下的理論氣壓，我們可以得到嘉義網達邦測站(DARB)(952 m)、太興國小測站(TAIS)(790 m)及中興國小測站(TSUN)(1370 m) 的平均理論

氣壓值分別為 918 hPa、934 hPa 及 876 hPa，而新竹網大坪國小測站(BMMT)(195 m)、梅花國小測站(PFMT)(496 m)及新樂國小測站(CINT)(505 m) 的平均氣壓理論值分別為 993 hPa、964 hPa 及 963 hPa。但圖 6-3.5 井下應變儀氣壓計的數值偏離理論值太多，並且出現海拔較高測站的氣壓值比相對低海拔測站還要高的現象(圖 6-3.5)。

另外藉由鄰近這些測站地區的氣象局屬自計站的氣壓資料作為比對(圖 6-3.6)，長時間下來的氣壓變化是穩定的，並沒有像應變儀氣壓計訊號有跳階與趨勢上升或下降的現象。

由於井下應變儀的資料處理同時也必許考慮到氣壓的影響，這些非氣壓變動所造成的氣壓數值將會在資料處理的過程帶入，最後會造成判斷構造活動訊號的困難。目前的處理是考慮鄰近測站(包含井下應變儀與氣象局屬自計站)的氣壓數值來調整異常氣壓。建議未來必須對這些應變儀的氣壓計儀器進行校正與維修，以保持訊號的穩定性，則有利進一步邁向即時資料處理與呈現的目標。

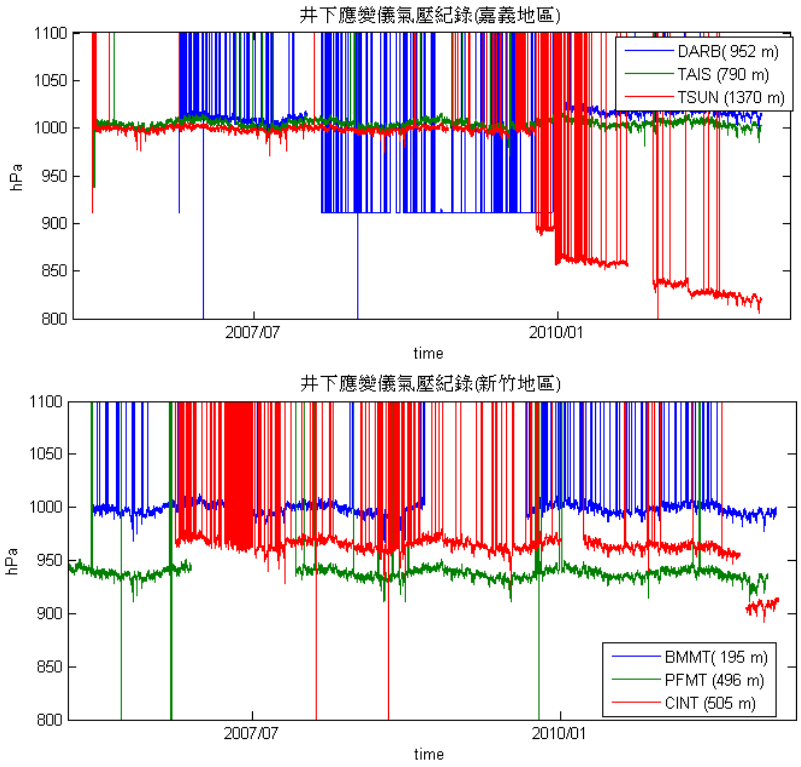
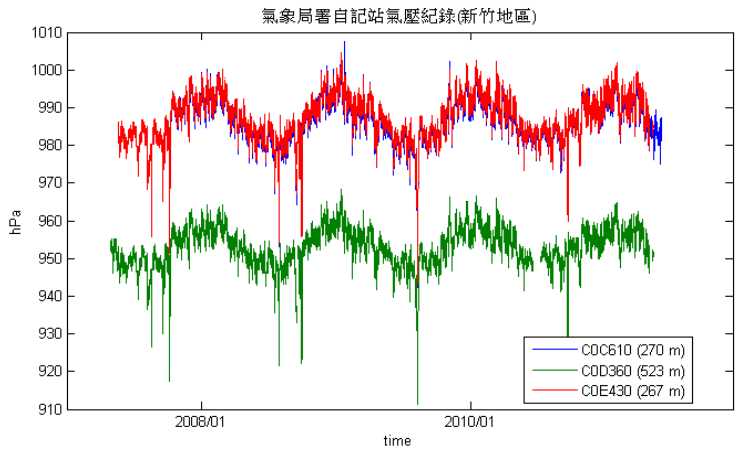


圖 6-3.5：井下應變儀中的原始氣壓記錄。上圖為嘉義地區測站，下圖為新竹地區測站。



氣象局屬自計站氣壓記錄(嘉義地區)

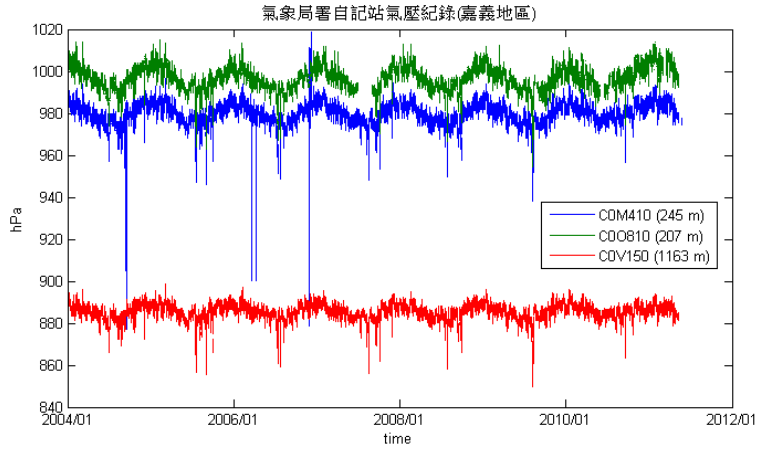


圖 6-3.6：氣象局屬自計站氣壓記錄。上圖為嘉義地區測站，下圖為新竹地區測站。

(4) 共站地下水測站的資料的重要性

由嘉義網井下應變儀與共站地下水水位的比對，可以知道應變計數值的變動有一定比例受到地下水位變動的影響，因此可藉由共站地下水水位站的資料來做為濾除的標準，然而新竹地區則因為地下水水位站的訊號一直很不穩定且時有缺漏，一直無法作用來濾除應變計中地下水的影響，希望未來有機會能對這些地下水水位站進行維護，以維持資料的穩定，也建議未來新增井下應變儀，最好能有地下水水位站共站。

(5) 井下應變儀數值絕對量的校正

理論上同地區之相鄰之井下應變儀於相同時間段的應變資料中，對於地潮訊號的振幅與相位應該要一致，但經過檢視各區的面應變資料後，發現就算相同地區，各測站面應變中地潮振幅的大小卻不太相同，振幅大小的差異可以從 0.06 μstrain 至 1.01 μstrain(表 6-3.1)，而且新竹網與甲仙網的資料顯示明顯的相位不一致(圖 6-3.7)。這些顯示井下應變儀的絕對值應該要更進一步經過校正，其數值才能更代表物理量的變化。

GTSM 井下應變儀埋設在地底下深處，利用膨脹性水泥將儀器與岩層緊緊耦合以確實反應地下岩層變形的大小，但是由於岩層、水泥與儀器外殼不同彈性係數的關係，儀器記錄的觀測數值要確實反應遠場(far-field)的應變量就必須經過一定的計算與校正，考量這三種不同材質的組合，GTSM 設計者提出了在等向(isotropic)環境下的雙環模型(two-ring model)並計算出實驗室內的關係曲線(Gladwin and Hart, 1985)。可是實際上的儀器安裝到地底下後，我們對於膨脹性水泥的耦合程度與厚度難以量測，因此無法直接以實驗室的公式來計算，(Hart, Gladwin et al., 1996)利用鄰近的兩測站井下型與長基線的雷射應變儀觀測站資料比對，校正出井下型應變儀的耦合參數(coupling factor)，並提出修正的方法。利用理論與觀測潮汐振幅與相位間的關係，我們可以推導出井下應變儀與岩層間的耦合參數，使得觀測數值更能反應出實際的物理變化量。一般來說，GTSM 應變儀設計為 3-4 個不同方位角指向的水平線性應變量組合而成的，其分量皆為水平方向而無垂直向，但近年有研究發現應變儀觀測資料中可能也存有垂直變化的分量(Roeloffs, 2010)，其可能與對應垂直變化的水平變化量，其量值與各岩層的泊松比(poisson's ratio)，顯示應變儀資料校正工作的複雜與必要性。

由上可知各觀測站因其周圍岩層與水泥耦合程度的不同而有不同的特性，因此可能造成觀測結果上振幅與相位間的差異，未來需要藉由其他觀測結果或理論潮汐的估算來將原始應變儀數值做一校正，來得到正確的物理絕對量。

目前可先估算各測站地潮反應的振幅比例(表 6-3.1)，並正規化各測站的應變反應量，之後藉由理論地潮的計算，進一步可以反應出實際的物理變化量。

表 6-3.1 各測站地潮反應比較。

測站名	2012/4/6 至 2012/4/10 間 平面應變的最大振幅 (μstrain)	以最小值(RST)為基準的調整比例
SLIN	0.551	0.11
JING	0.138	0.45
SANS	1.011	0.06
PFMT	0.060	1.03
CINT	0.141	0.44
BMMT	0.221	0.28
DARB	0.309	0.20
TSUN	0.126	0.49
TAIS	0.169	0.36
RNT	0.280	0.22
RST	0.061	1.00

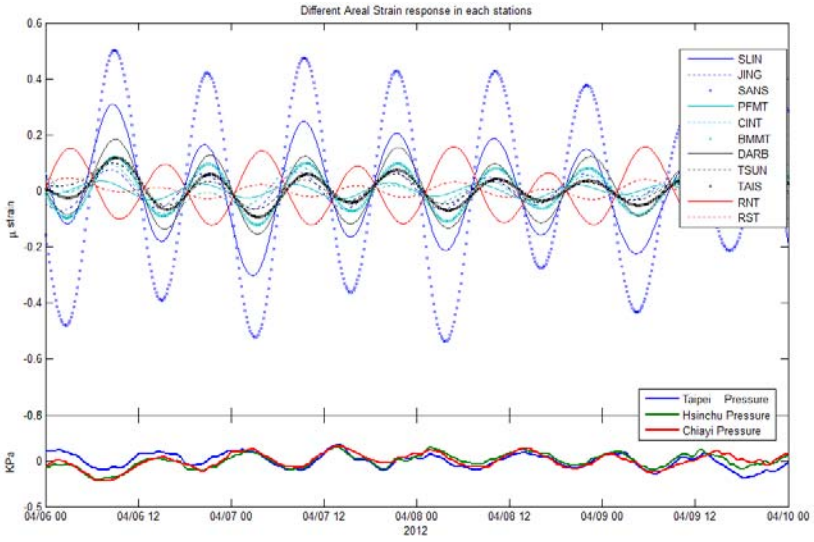


圖 6-3.7：各井下應變儀訊號中地潮振幅之比較。

(6) 地下水水位變化與井下應變儀平面應變的時間偏移情況

過去嘉義網各測站資料中得知每公尺地下水變化可能相對於岩層中的孔隙水壓的變化，對岩層會產生約 0.56 ~ 9.05 μstrain /meter 的應變影響。但目前由達邦測站(DARB)的資料中更發現地下水的變化到影響應變儀有反應之間，可能存在大約 1 到 2 天左右的時間差(圖 6-3.8)，未來需要更加探討地下水影響應變儀的機制，並且在扣除應變儀當中地下水的影響時，需考慮該時間差。

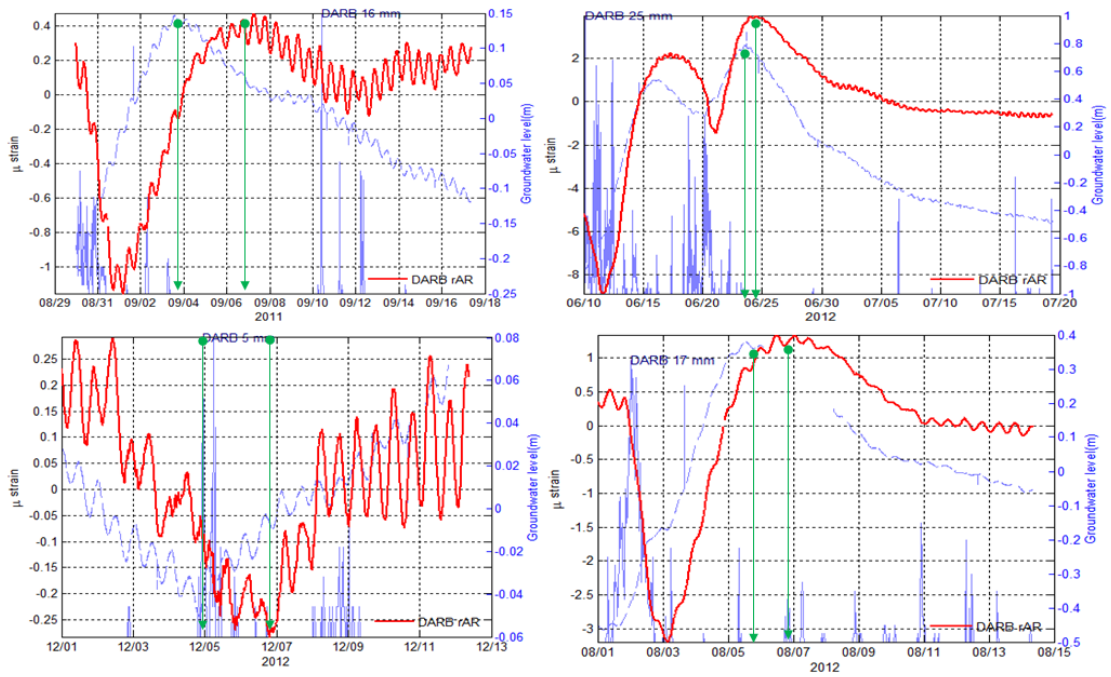


圖 6-3.8：達邦測站(DARB)平面應變與地下水水位。藍線為地下水水位、紅線為平面應變，綠線標示出兩者在峰值出現的時間。

2013 年嘉義網太興國小測站(TAIS)與中興國小測站(TSUN)的共站地下水井重新設置，由於井位深度不同，地下水對應變的反應也需重新評估，以太興國小測站(TAIS)而言，過去井下應變儀的反應與地下水位變動相當一致(圖 6-1.9)，但今年開始應變與地下水位的變動有很明顯的時間差，應變儀會先有反應，之後過大約 10 天左右，地下水位才有變動(圖 6-3.9)。這種情況又與圖 6-3.8 所描述地下水位先變動，過 1 致 2 天應變儀才有反應的情況剛好相反。地下水的變化與井下應變儀所接收到的應變，這之間的物理模式也需要進一步解釋。

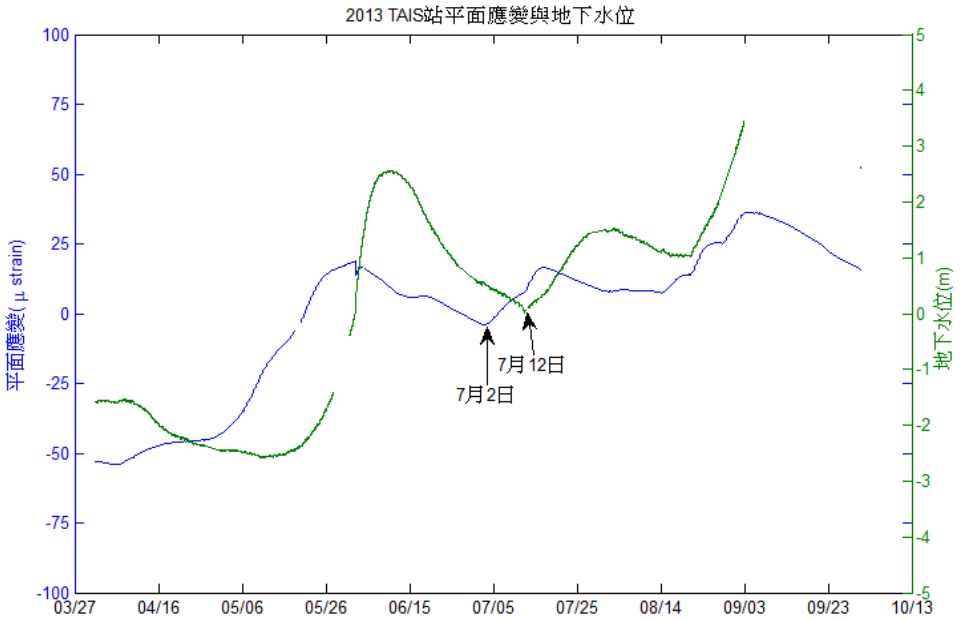


圖 6-3.9：太興國小測站(TAIS) 2013 年平面應變與地下水位。

(7) 精進井下應變儀中氣壓影響的估算

非震性應變在地震孕育期時期頻率可從數個 HZ 到數十年，地震儀、GPS 與 INSAR 等觀測皆已使用來觀測地殼的變形行為(Angelier et al., 2003; Chang et al., 2003; Hu et al., 2007; Huang et al., 2006; Loevenbruck et al., 2001; Pearson et al., 1995; Savage and Lisowski, 1995)，應變儀具有高精度高頻寬的特性，放置於地下深處直接感受地層的變形並有效降低地表人為雜訊的干擾(Gladwin and Hart, 1985; Johnston et al., 1982)，因此資料中包含了多種不同的效應，可以下列簡單的式子表示。主要包含了氣壓、潮汐、地下水、降雨、構造活動、地震以及其他訊號與機械雜訊，每一個變數可能包含不同的函數響應，有的是單純線性關係，如氣壓與地下水，有的則隨時間函數變化而有所不同，如降雨與潮汐，可以以下式子表示：

$Sr(t) = Ti + Ri + Pi + Wi + Ei + Tri + Oi$

$= [F + A_1\exp(T_1t) + A_2\exp(T_2t) + mt]^{*1} + [\Sigma[a_i * \sin(2\pi\omega_i t+\varphi_i)] + [b*Rr(t)*Ri(t)] + c*P(t) + d*W(t) + E(t) + Tri(t) + O(t)$

其中 Sr 表示應變儀觀測的資料，Tri 表示與構造相關的應變分量，Ti 表示潮汐(含海潮與地潮)的應變分量，Wi 為與地下水變化相關的應變分量，Pi 為氣壓分量，Ei 為因地震所造成的應變影響，Ri 為降雨造成的應變分量，而 Oi 則代表其他不可分類的雜訊，項 1 表示井孔回復效應，F 為 Y 軸上的截距，A1 與 A2 分別為兩個指數衰減函數，mt 表示為大地構造長期應變率，(Gladwin and Hart, 1985; Hart et al., 1996; Hodgkinson et al., 2013; Roeloffs, 2010)。

在應變資料處理上，必先處理非構造形成的訊號，降低雜訊等級，使我們要觀察的地殼應變訊號突顯後，才能進行後續的應變異常判讀作業。因此對於潮汐、氣壓以及降雨造成的影響必先瞭解並除去。

氣壓對於應變觀測的影響一般認為是屬於線性關係的，氣壓變化對於地殼來說等於是上覆壓力的改變，對於地殼來說是直接的變化。在(Roeloffs, 2010)的文章中指出由於應變訊號中含有多種不同來源的訊息，氣壓與應變間的關係透過直接線性迴歸的方式並不適當，她建議利用帶通濾波(band-pass filter)取兩者週期 4-6 天左右的濾波後訊號再進行線性迴歸可得到較佳的結果。因此，我們利用頻率分析上常用的相干性(coherence)來檢視兩者的相關係數的高低。

相干性(coherence)可用來檢視兩個時序資料在頻譜上的相關性，利用自相關頻譜密度間的相關性求取兩者交叉相關頻譜密度的量值，所得結果界於 1 至 0 間，越接近 1 表示兩者在頻譜上相關性越高，可幫助我們尋找出兩個不同時序資料的共通頻段。

考量一隨時間變化的函式 x = x(t)，在有限時間 T 裡，可透過富利葉轉換表示為

$$X(f,T) = \int_0^T x(t)e^{-2\pi ftt}dt$$

該頻率域函數的自相關頻譜密度可以下列式子表示：

$$Pxx = \frac{2}{n_d N\Delta t}\sum_{k=1}^{nd}|Xt(f_k)|^2 \quad k = 0,1,2,\ldots,\frac{N}{2}$$

其中 $f_k = k/Ts = K/N\Delta t$　k = 0,1,2, …, N-1 ，N 為各分段的長度。
而交叉相關頻譜密度則為：

$$Pxy = \frac{2}{n_d N \Delta t} \sum_{k=1}^{nd} [X_i^*(f_k) Y_i(f_k)]$$

$X_i^*(f_k)$表示為 $X(f_k)$的複數共軛函數。
兩個函數的相干性(coherence)的定義如下式：

$$\gamma_{xy}^2(f_k) = \frac{|P_{xy}(f_k)|^2}{P_{xx}(f_k) P_{yy}(f_k)}$$

根據上述定義，我們以達邦站(DARB)為例子，來討論氣壓與觀測應變在頻率域上的相關性，找出氣壓對於觀測應的影響分子大小。我們取較少受降雨與其他因素影響的區段，約在每年 10 月至隔年 4 月間的降雨次數與量都相對較小，因此我們取 2008/10 至 2009/3 應變資料，以一個月長度為觀測視窗，每步驟向前移動重覆取樣 50%，取 1024 頻率區段進行兩者在頻率域上的相干性比較，圖 6-3.10 為 CH0 觀測應變與氣壓在頻率域上 0 至 40μHz 的相干性比較，較高頻率的相干性較低且越高頻干擾源越多，因此我們僅就 40μHz，亦即 0.3 天以上週期的訊號來進行比較。比較結果可見其相干性平均值加減標準差為 0.36±0.21，其中在 34.7、22.8、3.8 至 1.6 有較佳的相干性，轉換為週期則為 0.3 天、0.5 天、3 至 7 天，由於 0.3 與 0.5 天的周期與潮汐的半日潮與 1/3 日潮週期相近，但其形成原因卻不相同，頻率相干性雖高卻不能對比，因此還是以 3-7 天的周期區段裡兩者有較高的對比性，而此值包含 Roeloffs 的建議值(4-6 天)。

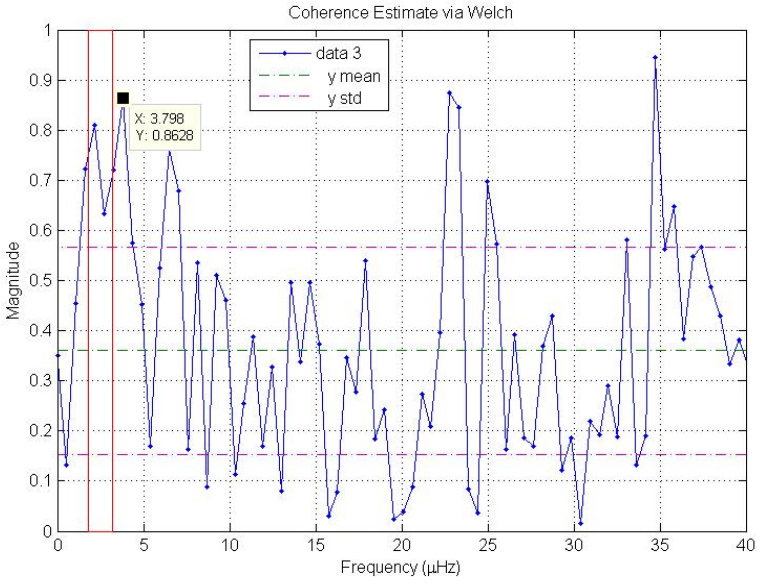


圖 6-3.10：達邦站 CH0 觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較(0-40μHz)。

達邦站的其他 channel 與氣壓對比也得出類似的結果，因此可以說利用帶通濾波取週期 3-7 天結果進行比對來取得觀測應變中的氣壓響應因子的方式是合理的(圖 6-3.11：)。

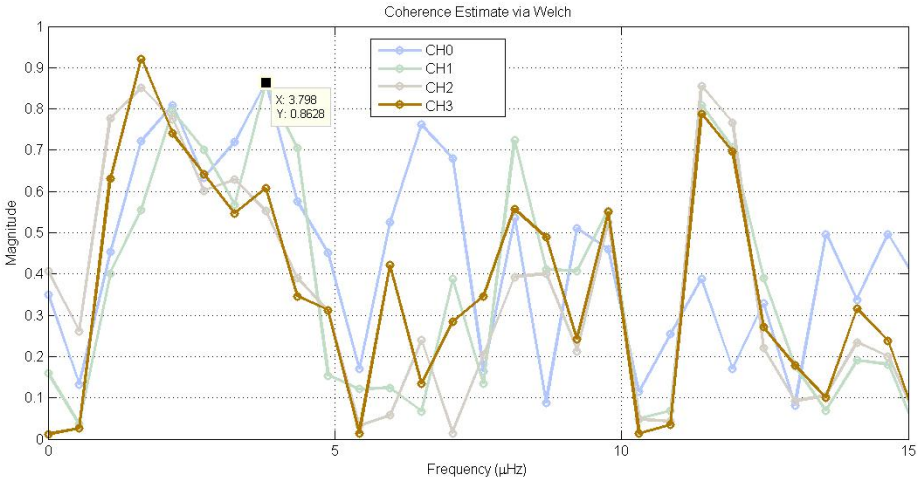


圖 6-3.11：達邦站觀測應變與氣壓訊號在頻率域上的相干性比較，可見在 3-7 天的週期間隔兩者有較高的相干性。

再進一步討論，氣壓因子是否會隨著時間不同而有浮動的對應值，我們利用前述所得結果，先將觀測應變與氣壓資料進行帶通濾波後進行迴歸分析，隨著時間觀察氣壓響應因子的變化。從結果來看氣壓響應因子大致上維持在一定值(圖 6-3.12)，但受到降雨影響很大，在雨季期間的氣壓響應因子震盪幅度相當大，從負值擺盪到正值都有，這表示在降雨期間入滲的雨水會促使地下水位上升，影響到觀測應變的大小，造成應變頻率上的干擾，使得氣壓響應因子的計算結果誤差變大。綜上所述，我們發現氣壓對觀測應變的影響是固定的，並不會隨時間變化而改變，這點也符合理論上的關係，但是計算氣壓時仍需注意地下水位變化的影響，其最直接的指標就是降雨，因此要計算良好穩定的氣壓響應因子，必須先避開降雨密集的時段，才能夠得到相對乾淨穩定的結果。

我們將計算出來的氣壓響應因子帶入關係式除去氣壓的效應後，結果如圖 6-3.13。

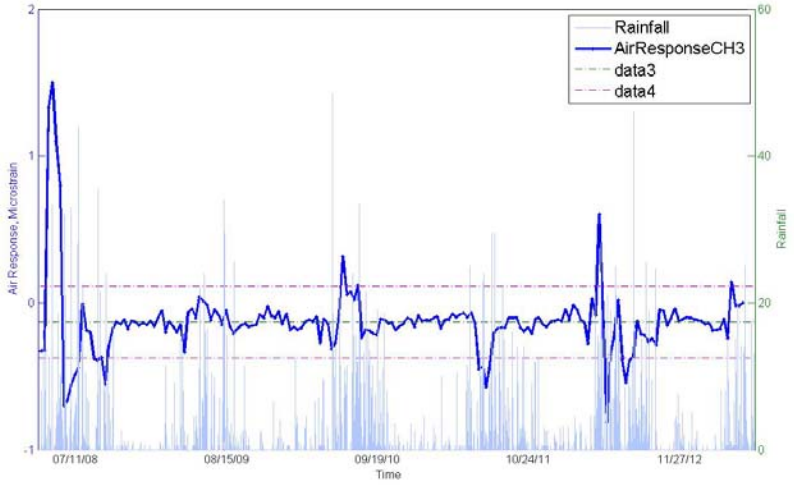


圖 6-3.12：觀測應變與氣壓在時間上的對比關係。

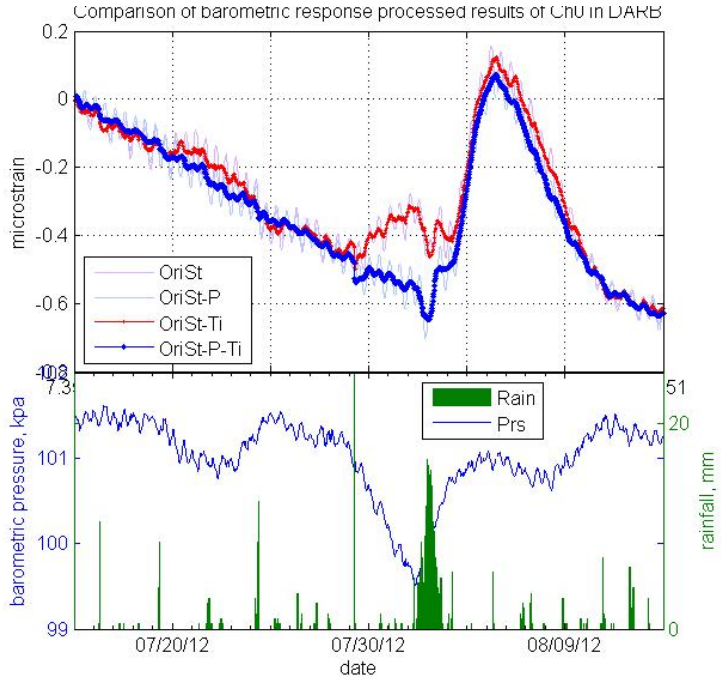


圖 6-3.13：觀測應變去除氣壓響應後的結果。

在除去潮汐與氣壓相關效應後，原本認為是應變異常的地方原來強烈氣壓變化所造成的，也更凸顯了降雨所造成的應變反應與雨水入滲後的地下水壓變化訊號。

(8) 井下應變儀中降雨效應的分析

在應變資料處理上，濾除氣壓與潮汐訊號後，讓我們發現一些與降雨相關的異常資訊存在，其與地下水的反應相當地相似，但是兩者的相位卻是相反的，這與我們觀測到兩者長期間變化一致的關係是不同的，在某些情形下也會影響到資料的判讀。引起我們進一步的研究。

圖 6-3.14 為原始應變資料與氣壓之間的關係，圖上藍線為原始未處理的面應變資料，而綠色線條表示氣壓的變化，從資料上可看到在氣壓下降的地方，藍色的面應變則呈現對應的上升(伸張)的情形，兩者間呈現負相關，在解釋上可說明氣壓對於岩層是一外部施放的應力，當氣壓降低，岩層受力降低則體積呈現彈性伸張的現象，圖上紅線則為除去氣壓變化所造成的應變效應後的殘餘應變量，可明顯看到因氣壓升降所造成的應變變化已被去除，留下較為乾淨的資料，這時卻可發現另一些突兀的變化，而這些異常可能是因為降雨所造成。在應變研究中，若要單純觀察岩層受構造活動影響造成的應變異常現象，由於其量值可能很小，若不進行其他環境效應的濾除，則將不易查覺，因此應變資料的處理，旨在於能夠獲得相對乾淨的資料(clean data)。

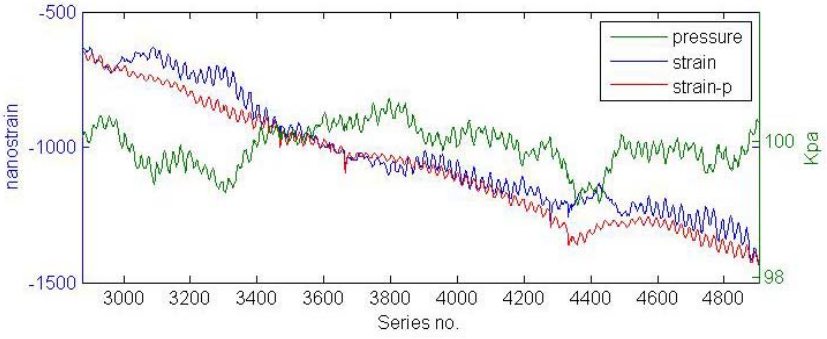


圖 6-3.14：氣壓對應變資料的影響，可看兩者間是屬於負相關性。

若氣壓微小的變化對於應變觀察資料都會造成岩層的變形，那地區性降雨的荷重變化應該也會影響到觀測應變的資料。從圖 6-3.14 除去氣壓後的結果來看，我們仍能發現多處資料突跳(abrupt)的地方，且多為壓縮的訊號，經研判應與降雨有關，我們將原始面應變資料除去氣壓造成的效應後與降雨資料作一個對比(圖 6-3.15)，可發現在降雨量明顯的時間段，面應變呈現壓縮的訊號，在圖上箭頭指處表示各個應變異常的部分都可對應到一明顯的降雨事件，而且都在短時間內進行反應，表現行為類似於地下水位歷時中因降雨引發的快速響應。造成降雨引發的地下水快速響應是因為地表荷重增加，導致孔隙水壓增加，同樣的原因在觀測應變上可會造成類似的影響。降雨帶來的多於荷重，除部分滲入地下影響地下水位面外，部分降水都會化作逕流流入地表河流中，然而地表逕流流動時在地表造成的多於荷重，也會對於岩層造成壓縮的變形影響。從觀測應變中來看，降雨與氣壓變化相反，當降雨量增加時對面應變造成的是負的變化(壓縮)，其對應的變化量與降雨的累積多少有關，與岩層彈性係數相關，當地表逕流失去後，面應變的變化則回復原有的趨勢上。

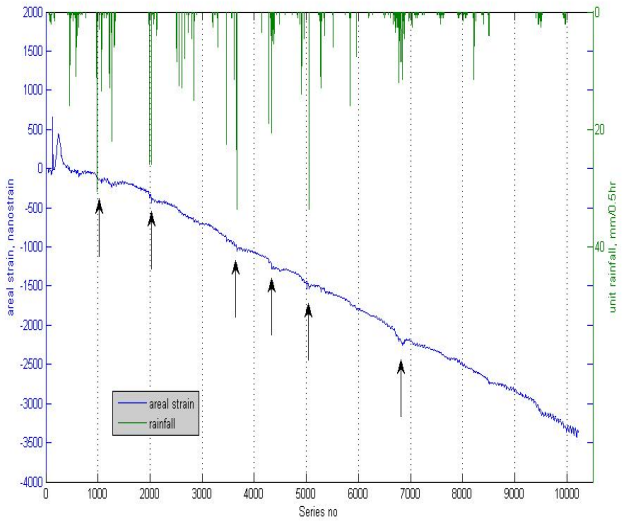


圖 6-3.15：降雨與面應變間之關係，藍線表示面應變，綠線表示單位時間降雨量。

有關降雨對應變造成的影響反應，可區分為快速與緩慢兩個不同的反應。緩慢的降雨反應表示降雨事件發生後地下水因為雨水滲入地層直接補助地下水位面，因為岩層滲透率低下的原因，其影響時間常可持續數天至數個星期(V Lyne and Hollick, 1979)。另一個相對的是降雨的快速反應，快速降雨反應可能是因為表面荷重增加造成孔隙水壓急速上升的反應(Jan et al., 2011)。(Bardsley and Campbell, 2000)指出降雨所造成的龐大水體荷重會對於水井中的水位增加，而當荷重移除後，井中水位即下降，由於應變儀設置的地方皆屬於固結岩層，對於水利導數的突然增加與土壤中的水分突然的擠出情形較不常於固結岩層中出現，在這類岩層中地下水位因降雨產生的變化，是比較可能是因為降雨造成的地表荷重所造的孔隙水壓增加的情形，在移除荷重後便會消失。

為了分離降雨所造成的快速響應(quick response)與緩慢響應(slow response)的部分，本研究中利用了遞迴數位濾波(recursive digital filter)的方式來將快速響應從殘餘地下水文曲線中分離開來。遞迴數位濾波(VD Lyne, 1979)可以下列式子簡單地表示其基本原理：

$$F_i = \lambda F_{i-1} + \frac{1+\lambda}{2}(H_i - H_{i-1}),$$

其中 Fi 與 Fi-1 分別表示濾波後的第 i 與第 i-1 項的快速響應資料點，Hi 與 Hi-1 則分別表示 i 與 i-1 項的殘餘地下水位資料，λ 表示一經驗濾波參數。透過這個方法，快速響應的值會

被限制於 0≤Fi≤Hi，因此，殘差量 Si(=Hi-Fi)則不會是負值(V Lyne and Hollick, 1979)，各參數值表示如圖 6-3.16 所示。

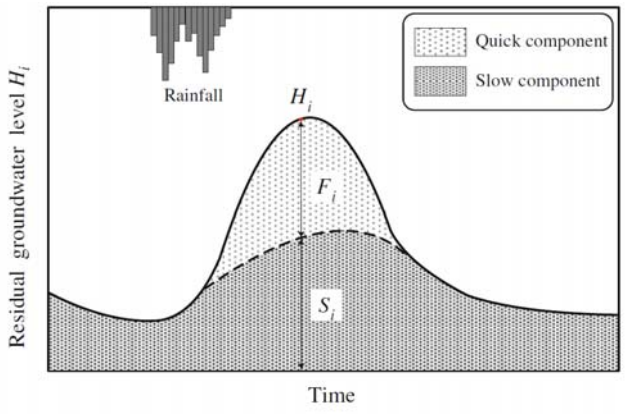


圖 6-3.16：地下水位歷時曲線中因降雨造成的快速與緩慢響應的示意圖。

線性系統分析在水文研究中已使用多年，(Dreiss, 1989)利用這個方法調查降雨與泉水補注間的關係。地下水位因為降雨而上升的快速響應可以下列積分式表示：

$$F(t) = \int_0^t h(t-\tau)R(\tau)\mathrm{d}\tau,$$

其中 F(t)為在時間 t 降雨引發快速響應，R(τ)是降雨量，h(t-τ)表示一非負值的轉換函數，或可稱為一單位降雨影響函數(Kernel function)，而 τ 則表示一不特定的時間變化。

結果與討論

我們初步選了 3 個觀測站的資料來進行計算，從北至南分別為 JING、SANS 和 BMMT 共 3 站，討論在不同環境下降雨對應變觀測資料的影響。

首先我們獲取原始的觀測資料後進行初步的資料處理，除去氣壓變化對應變資料的影響(Roeloffs, 2010)，再利用 baytap-G(Tamura et al., 1991)軟體除去潮汐所造成的變化，並移除了長期間的趨勢效應，可以獲得較乾淨的數據。在除去氣壓與潮汐造成的分量後，可以發現在降雨反應在對應上更為明確，利用分離地下水快速與緩慢反應的方式分離出對應降雨的應變快速響應後，計算與單位降雨的反摺積結果，可以得出各降雨事件對應的單位降雨函數關係，再取多個結果求取其平均值以減小個別事件的區域性影響，可得到一平均單位降雨函數，如圖 6-3.17 至圖 6-3.19 所示。

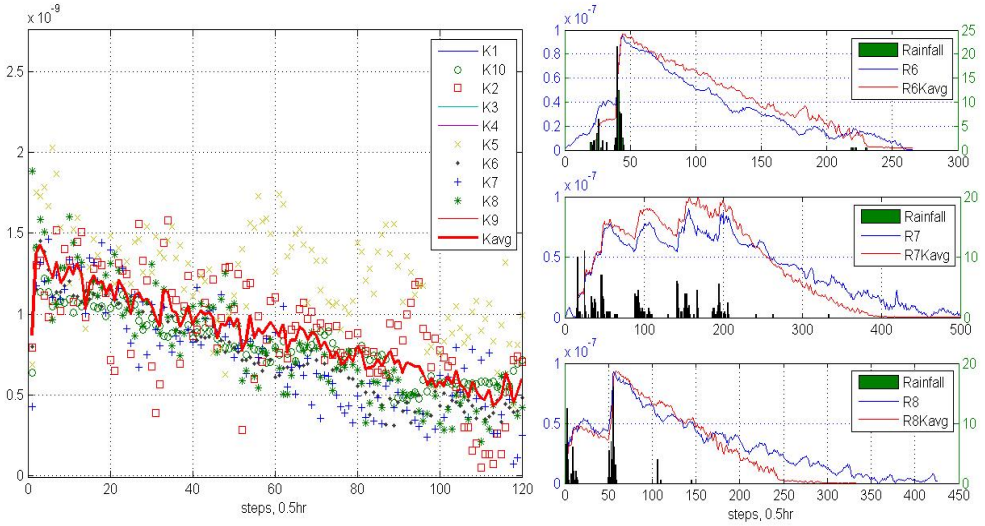


圖 6-3.17：大坪國小觀測站(BMMT)受到降雨引發的快速響應函數，左圖為計算出平均單位降雨影響函數(kernel function)，右圖為利用計算結果預測之快速響應變曲線(紅色)與實際觀測曲線(藍色)。

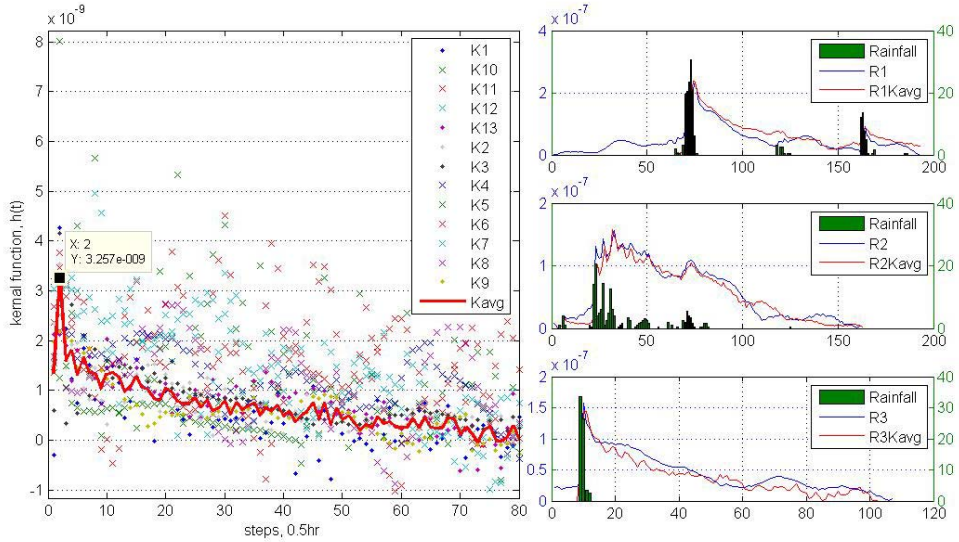


圖 6-3.18：錦和國小觀測站(JING)受到降雨引發的快速響應函數，左圖為計算出平均單位降雨影響函數(kernel function)，右圖為利用計算結果預測之快速響應變曲線(紅色)與實際觀測曲線(藍色)。

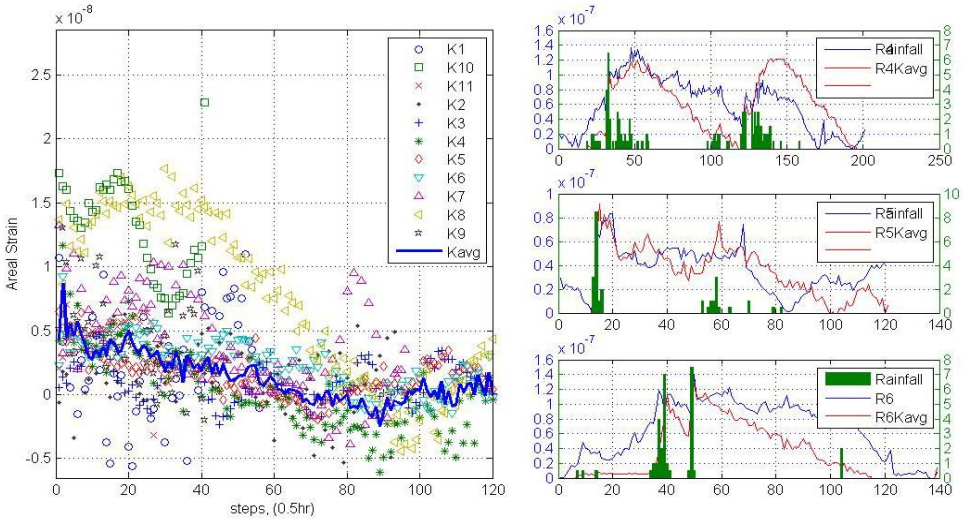


圖 6-3.19：明德國中觀測站(SANS)受到降雨引發的快速響應函數，左圖為計算出平均單位降雨影響函數(kernel function)，右圖為利用計算結果預測之快速響應變曲線(紅色)與實際觀測曲線(藍色)。

我們進一步將模擬降雨響應運用在原始觀測資料上(圖 6-3.20)，可看到原始觀測應變資料上有明顯受到降雨所造成的響應異常，在應用模擬降雨響應結果後，這些與降雨相關的異常可被良好的濾除，減少在資料判讀上的影響。

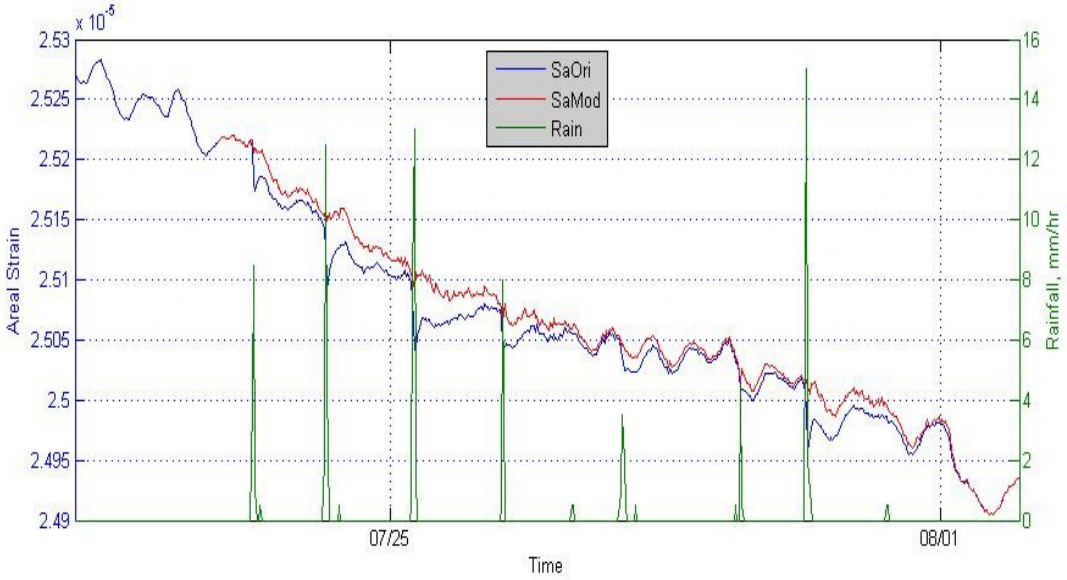


圖 6-3.20：應用模擬降雨響應至原始觀測應變資料上，可有效地除去降雨造成的快速響應的異常現象。

從大坪、錦和與明德三站結果來看，這三站的共通點就是設置的海拔高度都不太高，鄰近地形較無崇山峻嶺等劇烈的高度變化。三站的反應都很類似，在降雨後的一個小時左右就達到最大值然後就持續下降，持續時間從 40 至 60 個小時不等，其最大的降雨響應也從 14 至 65 個 nanostrain/mm，大小變化應與其各站設置位置的岩性相關。一般設置在地形較為低平地區的觀測站，其受到降雨影響所產生對應的應變異常主要是因為地表逕流所產生的自重，當表面逕流流出觀測站的影響範圍後，對於觀測應變的影響就會減至最小。

第七章、地球化學觀測與研究

7-1 緒論

臺灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊的交接處，隨著板塊的作用所造成的斷層活動與地震也就特別多，地球化學變化常可以提供明顯的地震前兆，其中氣體成分的變化較為明顯而迅速，這些大部分和熱水作用相關的氣體如氡（Rn）、氦（He）、氫（H_2）、氬（Ar）、氮（N_2）、甲烷（CH_4）和二氧化碳（CO_2）的異常，以及溶於水體的陰、陽離子濃度的劇烈變化，一般歸因於斷層活動造成地下流體（水與氣）循環系統的改變而導致流體的混合。

經過以往有系統的調查觀測結果顯示，土壤與溶解氣體成分之監測有較為敏感的變化，且較容易達到連續自動化分析，及持續維護之目標。配合鄰近水位觀測井與地震儀連續觀測分析以及鄰近地殼變形觀測結果，當可更有效解釋流體地球化學變化與地殼、地震活動之關聯性。

本研究在第一及第二階段之觀測計畫中，於八年內（94 年-101 年）逐年於臺灣各活動斷層之敏感地區，分別設置土壤氣體連續觀測站、地下水位觀測井及地下水溶解氣體連續觀測站，進行土壤氣體、地下水位及地下水溶解氣體（氡、二氧化碳）之觀測，成為一個含括台灣各地的地球化學觀測網。

本（2013）年度，對於新竹大平地、雲林古坑、嘉義中崙濁水潭、屏東屏科大、臺東池上、花蓮東華（該站於去年十月遷建於花蓮壽豐東華大學校內，測站改名為東華站）地區，共六座已設置之土壤氣體連續觀測站；以及新竹大坪國小、嘉義沄水國小地下水位觀測井與地調所設置之七座地下水位觀測井持續進行觀測；持續在東部池上斷層附近之安通溫泉及南部的恆春半島進行地下水氡的連續觀測並定期採樣分析，以期於全島能夠以較為完整之觀測網，利於往後對於分析資料之判讀。此外，亦於苗栗臺中地區持續進行土壤氣體的調查探勘，以期於將來設站之參考。

然而，地下水位觀測在這兩階段計畫以來，逐步累積大量的連續觀測資料，並且試圖找出震前地下水位異常的規則性，於上一階段結束前，本研究已判定出多數震前水位異常，臺北站群有 40 筆，約佔臺北地區通過篩選條件地震的 25%，新竹站群有 36 筆異常，佔新竹地區通過篩選條件地震的 30%，而嘉義站群有 104 筆，佔嘉義地區通過篩選條件地震的 40%，且全數在地震前兩周之內發生。但前述於 2012 年底所得到之統計數據，是因未考慮水位計特性與氣壓因素而誤判的結果，今年已使用氣壓修正刪除大多數 2012 年前誤判的異常事件，修正後的成果將於本章地下水壓觀測部分詳細說明。

本年度彙整各土壤氣體、地下水位、地下水氡觀測站之觀測結果，比較不同時序分析方法對於異常值辨識的差異，並討論與鄰近地區地震活動之關連性，歸納出各測站對於地震活動的敏感範圍帶，以期進一步建立流體地球化學所相對應的地震活動模型。

7-1-1 觀測站分布位置

本計畫分別有六座既有的土壤氣體觀測站（新竹大平地、雲林古坑、嘉義中崙、屏東屏科大、臺東池上及花蓮東華）。另外，本計畫亦觀察九口地下水觀測井的水壓變化，包括嘉義縣沄水以及其他八口由中央地質調查所提供之地下水觀測井：台北縣明德、錦和、樹林及新竹縣新樂與大坪，以及嘉義縣中興、太興及達邦。此外，地下水氡觀測則在臺灣東部安通站與南部墾丁社頂站進行觀測。各測站之位置如圖 7-1.1 與表 7-1.1。

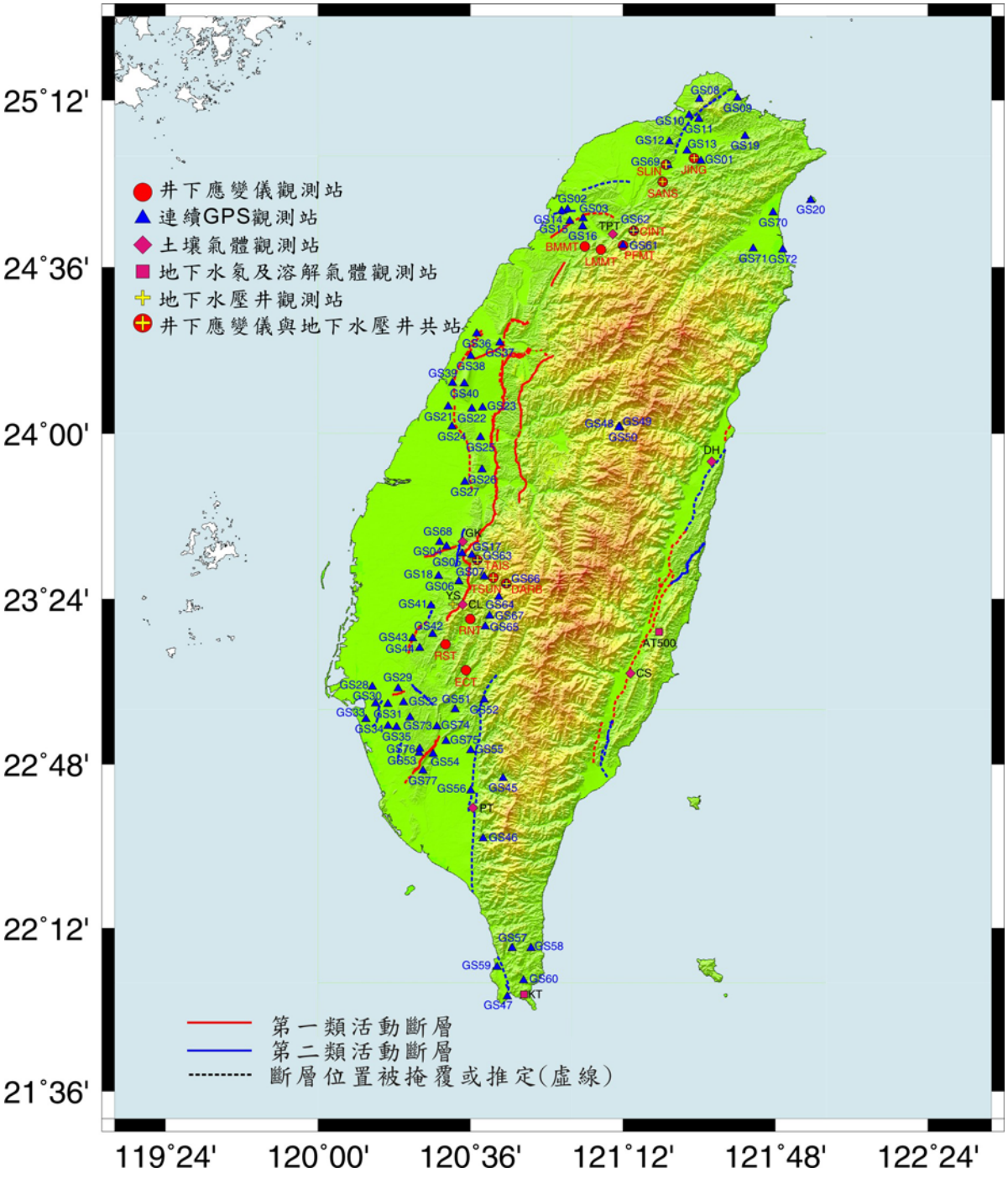


圖 7-1.1：既有觀測站的分布位置。

表 7-1.1：既有觀測站的座標。座標系統為 TWD67。

	二度分帶(E)	二度分帶(N)
土壤氣體觀測站		
新竹大平地站(TPT)	265637	2736929
雲林古坑站(GK)	206325	2609740
嘉義中崙濁水潭站(CL)	204643	2586520
屏東屏科大站(PT)	209017	2505203
花蓮東華站(DH)	279244	2604334
臺東池上站(CS)	273485	2558221
地下水壓觀測站		
臺北明德站(SANS)	286119	2755420
臺北錦和站(JING)	298573	2764916
臺北樹林站(SLIN)	288631	2762888
新竹新樂站(CINT)	274564	2736304
新竹大坪站(BMMT)	255932	2729762
嘉義中興站(TSUN)	219048	2597145
嘉義太興站(TAIS)	211814	2604620
嘉義達邦站(DARB)	227706	2592582
嘉義沄水站(YS)	200697	2586171
地下水氡觀測站		
玉里安通站(AT)	284243	2575601
墾丁社頂站(ST)	229668	2428983

7-1-2 觀測站相關地震選擇依據

臺灣位於歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊的交接處，由於兩板塊的相互作用，使得臺灣地區的地殼活動特別活躍，斷層活動所引發的地震也特別多，並且經常有強烈的地震發生。在眾多地震中如何篩選出可與觀測資料對比的地震是重要的課題，也因此隨著觀測結果不斷累積，本研究也持續對地震的篩選標準漸進修正。

據 Dobrovolsky *et al.*（1979）之研究，在大地應力作用下，即將發生地震的震源區會形成一個震前岩石變形破裂帶。假設此變形帶為一個以震央為中心的圓，其應變半徑（D）與地震規模的關係為：

$D = 10^{0.43ML}$ km

由此估算，一個規模 $M_L = 5$ 的地震，其應變半徑可達約 140 公里；規模 $M_L = 6$ 的地震，其應變半徑約 380 公里；規模 $M_L = 7$ 的地震，更可達 630 公里以上。因此在有較深循環的地下流體系統的特定地區，常可有機會反應出地震前兆。而地震前兆出現的時間，一般與測站距震源的距離成反比關係。

因此，本研究對於所有測站的地震一般篩選原則，納入地震規模（M_L）、測站當地地震震度（Int.）、測站與震央的距離（R），及應變半徑（D）與測站距震源的距離的比值（D/R）等四項參數，其次再依據各測站所在地區之地質構造特性（有的測站只對區域地震有反應，有的測站反應範圍較廣）來篩選出地震。

地震學者經過長期的觀察研究，歸納得知地震發生的可能五個步驟為：（1）板塊擠壓，地殼累積彈性應變；（2）地層發生膨脹和發展微裂隙；（3）斷層帶上有流體侵入和變形；（4）發生地震；（5）餘震後地殼應力突然陡降（Bolt, 1999）。

一般而言，在前三個步驟的地震孕育期中，地殼或多或少可能會有一些徵兆發生。若能對這些前兆的發生有所了解及掌握，則對於地震的即將發生，可能會有所知曉。這些徵兆包括地球物理的前震和地形變化，以及水文地球化學的變化。

依據以上所述，可以將地震發生與氣體異常的時間關係分成四個類型（圖 7-1.2）：（1）地震發生在氣體異常高點；（2）地震發生在氣體異常高點下降途中；（3）地震發生在氣體異常高點後之最低點；（4）地震發生在氣體異常高點後之最低點後升高途中。本章地震列表中，亦同時列出異常類型屬於上述四項之何者，俾利深入觀察異常與地震的關聯性。

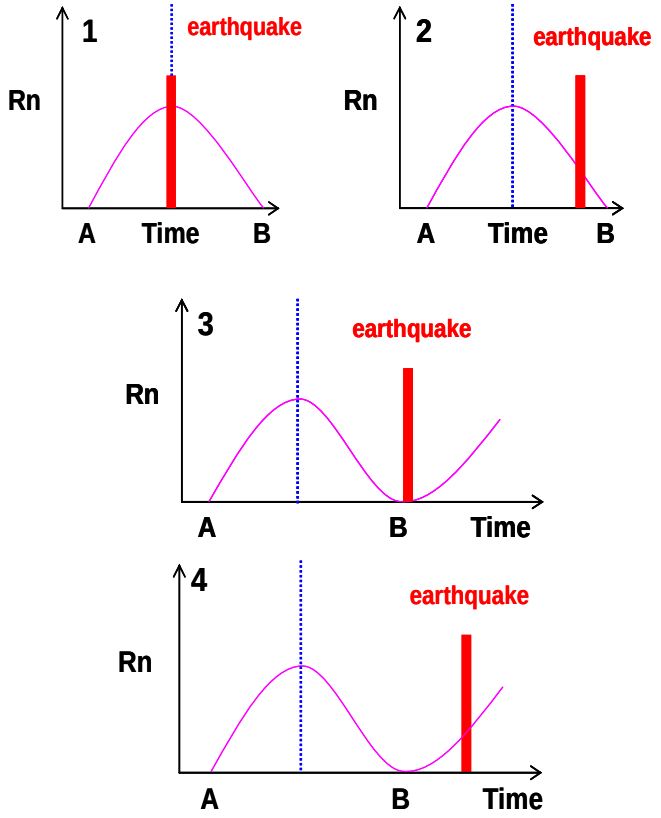


圖 7-1.2：氣體異常與地震發生的時間關係圖。A 至 B 代表一個完整氣體異常變化區間；垂直虛線為異常出現最高值的時間。（1）地震發生在氣體異常高點；（2）地震發生在氣體異常高點下降途中；（3）地震發生在氣體異常高點後之最低點；（4）地震發生在氣體異常高點後之最低點後升高途中。(Fu et al., 2009)。

7-1-3 利用時序分析方法處理觀測資料

由於有些觀測站所記錄到的數據常受到其它環境因子影響，造成判斷異常值與探討其與地震活動的困難。此外，各觀測站所定義的異常往往是主觀認定，故有時會存在認定之標準的問題。本節將利用一些統計及數學方法，以較有系統的方式來連續觀測分析結果。

本研究利用 AnCAD 公司所開發的軟體 Visual Signal 進行數據的處理。在本節中使用三種方法，分別是疊代式高斯平滑法（Iterative Gaussian Smoothing）、希爾博-黃轉換（Hilbert-Huang Transform）及滾動統計法（Rolling Statistics）來處理不同測站的資料，分別於附錄 1-8 中詳細介紹。

本章節就今年度（101/12－102/10）所觀測的數據作分析討論。各節依觀測站分別作圖說明。各測站若有因外來因素，譬如降雨影響致使觀測品質不佳，或是人為因素的更換儀器、管線、乾燥器（劑）而導致數據無法連貫，會先行將其時段刪除，保留可堪用的數據，再分

別以疊代式高斯平滑法（Iterative Gaussian Smoothing）及希爾博－黃轉換 Hilbert-Huang Transform（HHT）之經驗模態分解（Empirical Mode Decomposition, EMD）後將數值標準化（Normalize），選擇大於 N 倍的標準差定義為異常。此外，為了以現有即時土壤氡氣資料研判未來地震發生的可能趨勢，亦可選擇以疊代式高斯平滑法與 14 天的滾動平均值（Rolling average）相減後將數值標準化，同樣的也是定義大於 N 倍標準差為異常。比較圖上 EMD 及 Rolling average 的差異並探討濾波後的訊號與地震活動的關聯。

每個測站利用時序分析方法將資料短缺或品質不佳遭刪除的時段，補齊數據並依據不同的時序分析法做出其標準差，我們給各站所定義的異常門檻會因測站的敏感度不同及隨著資料的增加而有差異（負標準差在本研究暫不做討論），我們將以超出此異常門檻時段與後續發生的地震進行討論與說明。在地震的選擇上，我們則以地震規模較大的地震為主，根據過去的研究，選擇地震規模≧5 且深度<100KM 且震央距離測站≦150KM；此外，當地震規模＜5 且震度≧2 的地震也會選入本研究的相關地震列表。

氡氣的半衰期是 3.8 天，我們以十倍的氡氣半衰期 38 天作為時序分析方法裡對於 IMF 的選擇依據，只選大於 1.5 天以上的 IMF 內部模態函數和小於或等於 38 天的 IMF 內部模態函數相加，進而得到去除雜訊及去除趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析以求得到標準差，各測站會因對氡氣敏感度的差異而有不同的標準差，作為辨識異常的門檻。

7-2 土壤氣體觀測結果

7-2-1 新竹大平地土壤氣體觀測站

圖 7-2.1 是新竹大平地觀測站 2012/12/1-2013/11/30 氡氣觀測與地震、雨量的相關圖。詳細每月的分月圖表請參考附錄（圖 7-1.1 至圖 7-1.13）。圖中雨量數據是採用中央氣象局自動氣象站（距離測站較近的新竹橫山氣象站）的時雨量資料，加入時雨量資料能幫助我們觀察氣體的即時變化與雨量的關係。

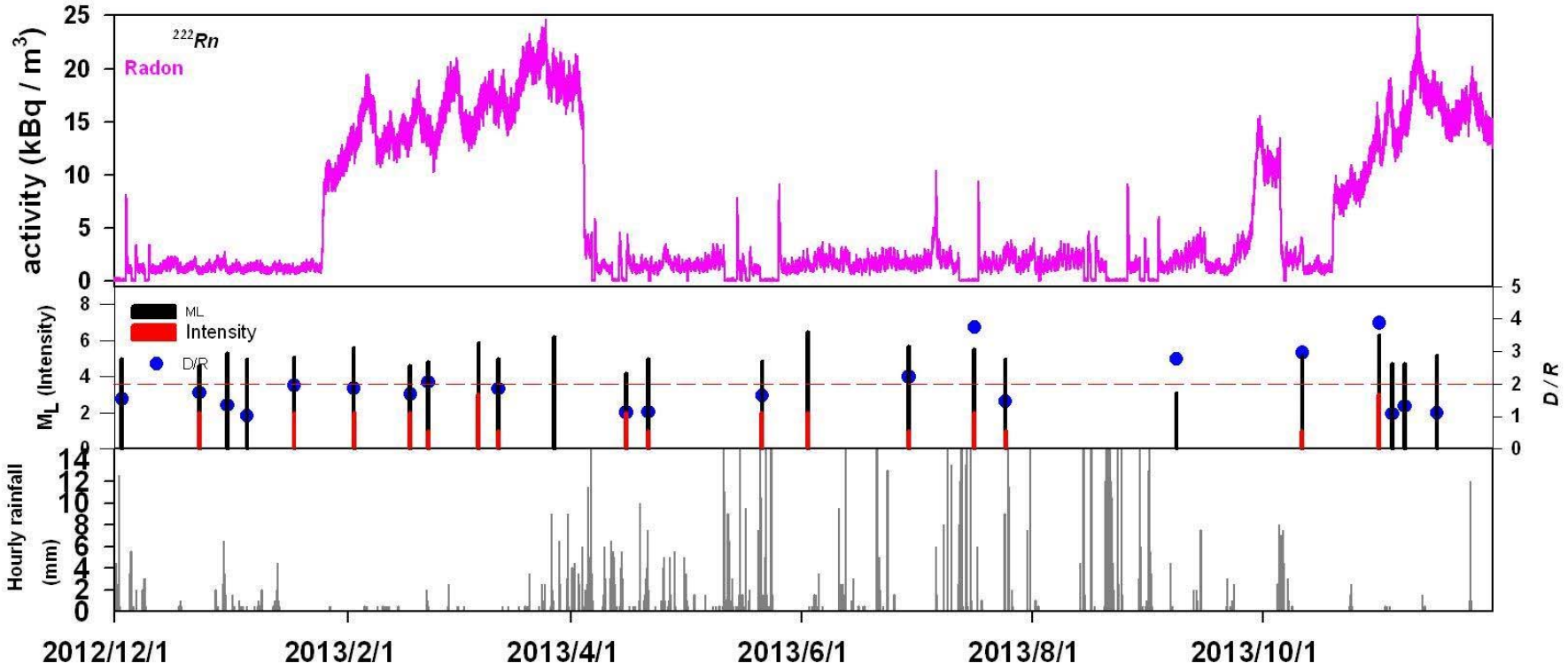


圖 7-2.1：新竹大平地觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。

利用人工辨識方法來判讀氣體異常與地震的關聯性，除非是很明顯的異常區間，否則可能會因個人主觀判識而對於氣體異常與地震的關聯產生無一致性，因此，目前選擇利用時序分析的方法，針對原始數據作整理分析，期望能以此較為客觀的方法，去除掉人為判識的疑慮，使能更清楚了解氣體異常與地震的關聯。

圖 7-2.2 是以時頻分析軟體所做的大平地站氡氣與雨量、地震的關係圖。圖上 A、B、C 分別代表氡氣原始數據、疊代式高斯平滑曲線及 14 天滾動平均線，14 天滾動平均標準差及經驗模態分解 EMD 的標準差結果曲線圖。可以看出原始數據經過高斯平滑法及 14 天滾動平均值濾波後（B），一些毛燥的雜訊已經濾除，整體來看氡氣的變化趨勢較 A 更平滑更容易看出變化（以下各測站方法亦同，不再細述）。

接著利用 EMD 拆解原始訊號，拆解後得到 13 個內部模態函數（IMF）如表 7-2.1。選擇周期在 1.5 至 38 天的 IMF_6（周期為 2.14 天）至 IMF_{10}（周期為 34.09 天）等 5 個內部模態函數（表 7-2.1 粗體字所示）。將 5 個 IMF 相加後，得到去雜訊及去趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析，以 1.5 個標準差作為異常門檻（負異常在此暫不討論，以下各測站亦同）。此外，以疊代式高斯平滑曲線與 14 天滾動平均線相減後將數值標準化，亦是以 1.5 個標準差作為異常門檻。（圖 7-2.2 C 所示）

表 7-2.1：大平地站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/28。

Channel	Zero Crossings	Extrema Counts	Mean Freq. [cycles/day]	Mean Period [day]	Power (%)
IMF_h1	14915	8230	10.67	0.09	0.00
IMF_h2	8715	4605	6.24	0.16	0.00
IMF_h3	4703	2425	3.37	0.30	0.00
IMF_h4	2823	1447	2.02	0.49	0.00
IMF_h5	1180	593	0.84	1.18	0.04
IMF_h6	653	342	0.47	2.14	0.48
IMF_h7	324	163	0.23	4.30	1.62
IMF_h8	171	87	0.12	8.13	1.86
IMF_h9	83	42	0.06	16.64	6.63
IMF_h10	40	21	0.03	34.09	10.54
IMF_h11	22	11	0.02	60.78	15.47
IMF_h12	10	4	0.01	127.08	52.87
IMF_h13	5	2	0.00	232.98	10.49
IMF_residual	0	1	0.00	1397.88	

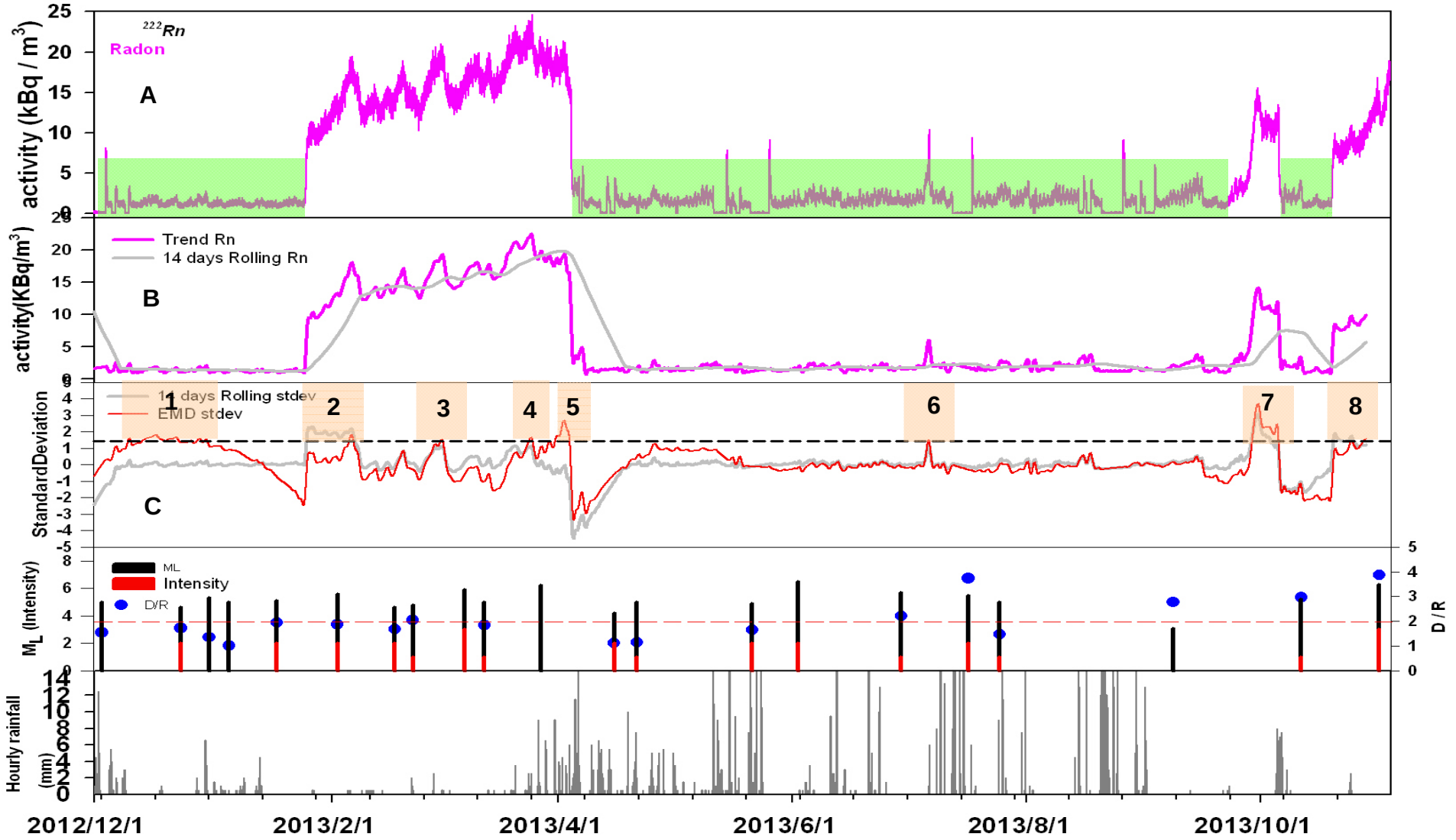


圖 7-2.2：大平地站氡氣數據經時序分析方法處理後結果 (A) 原始數據 (B) 疊代式高斯平滑法及 14 天滾動平均值的結果 (C) 經驗模態分解（IMF_6-IMF_{10}）及 14 天滾動平均值經程式處理後以 1.5 個標準差來表示其異常門檻；粉色框為氡氣異常區間；綠色框為低反應區間。

觀察圖上 C 有 8 個超出異常門檻以粉色框表示的區間，其中編號 1 異常區間是因逸氣暢通，氡氣突然上升所致；編號 5 異常區間則是因雨影響逸氣突然下降所致；編號 6 異常區間則是氡氣開始要往上升，隨即受到降雨影響所致。其餘 5 個異常區間應可視為是真實的氡氣異常反應。編號 2 異常區間所對應的地震分別是 2 月 2 日發生於花蓮外海，規模 5.6；編號 3 異常區間所對應的地震是 3 月 7 日發生於花蓮秀林，規模 5.9；編號 4 異常區間所對應的地震是 3 月 27 日發生於南投仁愛，規模 6.2。編號 7 異常區間，很明顯的是處於高背景值狀態，可惜的是在降雨後受到影響，氡氣下降至低背景值狀態，此時間在 10 月 11 日新北汐止有一起規模 5.2 的地震，但由於深度超過 140 公里，是否與此時期的氡氣異常有關，仍有待討論。編號 8 異常區間，由原始數據看仍處於上升階段，是屬於高背景值部分，此異常應與 10 月 31 日發生於花蓮瑞穗有關，可以繼續觀察後續是否仍維持在高背景值，以了解後續有無其他地震發生的可能性。

此外，利用 EMD 時，圖 A 高反應區間（高背景值）會壓縮其他低反應區間（低背景值）的能見度（圖上 A 綠色框所示），因此我們將原始資料裡高反應區間的數據拿掉，保留低反應區間的資料，再利用 EMD 拆解訊號，如此得到一低反應區間的內部模態函數（IMF）如表 7-2.2。

表 7-2.2：大平地站低反應時段經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/28。

Channel	Zero Crossings	Extrema Counts	Mean Freq. [cycles/day]	Mean Period [day]	Power (%)
IMF_h1	14807	8108	10.73	0.09	0.00
IMF_h2	8549	4531	6.19	0.16	0.00
IMF_h3	4717	2422	3.42	0.29	0.00
IMF_h4	2861	1450	2.07	0.48	0.00
IMF_h5	1174	589	0.85	1.17	1.88
IMF_h6	585	302	0.42	2.36	8.00
IMF_h7	306	158	0.22	4.50	10.35
IMF_h8	166	84	0.12	8.26	13.70
IMF_h9	87	43	0.06	15.68	17.37
IMF_h10	43	21	0.03	31.37	25.83
IMF_h11	21	11	0.02	62.74	9.56
IMF_h12	10	5	0.01	125.48	3.20
IMF_h13	5	3	0.00	230.04	10.12
IMF_residual	0	1	0.00	1380.25	

選擇周期在 1.5 至 38 天的 IMF_6（周期為 2.36 天）至 IMF_{10}（周期為 31.37 天）等五個內部模態函數（表 7-2.2 粗體字所示）。將 5 個 IMF 相加後，得到去雜訊及去趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析，以 1 個標準差作為氡氣異常門檻，高於此門檻即視為異常（圖 7-2.3 C 紅色框所示）。經過處理後，發現低反應區間的氡氣也有異常反應區間（圖 7-2.3，C，12 個粉色框所示）。觀察編號 1、3、9、10、12 異常區間的原始數據與雨量的關係，可以發現都是在降雨時氡氣突然上升，降雨後氡氣突然下降所導致的異常。編號 4、6、11 異常區間暫無相關聯的地震。其餘異常區間皆有其相對應的地震，編號 2 異常區間所相對應的地震是 12 月 23 日發生於花蓮秀林，規模 4.6；編號 5 異常區間所相對應的地震是 5 月 21 日發生於花蓮近海，規模 4.9；編號 7 異常區間所相對應的地震是 6 月 29 日發生於花蓮外海，規模 5.7；編號 8 異常區間所對應的地震是 7 月 16 日發生於花蓮秀林，規模 5.5。

大平地站與其他測站不同，有高低背景值之分，可能代表該測站於高背景時段較為敏感或為區域活動較為頻繁所致，確切原因仍有待與未來其他資料共同比對和討論。目前的研究

方法是將觀測結果分別進行兩種處理，一是不分高低背景值的綜合分析圖表，一是去除高背景值的低背景值分析圖表，以期能在低背景值狀態下，仍能找出氡氣的異常變化與地震的關聯。

此站所能反應的敏感範圍主要在臺灣中、北部及東北部。大平地觀測站相關地震見表 7-2.3；地震分布圖及測站敏感反應範圍如圖 7-2.4 所示。

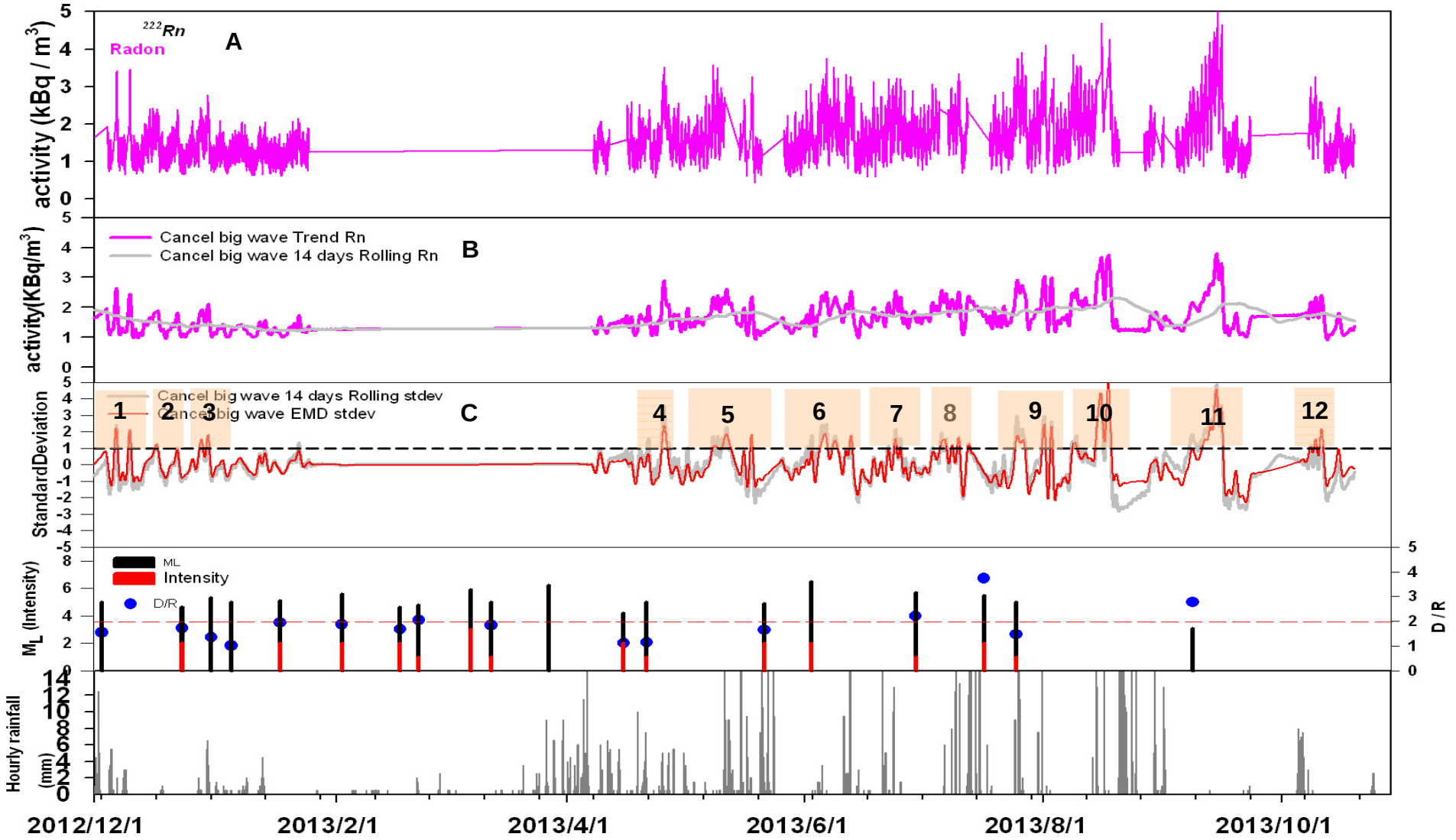
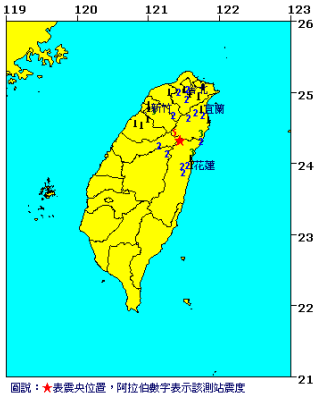


圖 7-2.3：大平地站低反應區間之氡氣數據經時序分析方法處理後的結果（A）原始數據；（B）疊代式高斯平滑法及 14 天滾動平均值的結果；（C）經驗模態分解（IMF_6-IMF_{10}）及 14 天滾動平均值經程式處理後以 1 個標準差來表示其異常門檻；粉色框為氡氣異常區間。

表 7-2.3：新竹大平地觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/11/3），V 表示氣體異常與地震有相關性，下列地震報告圖為與表 7-2.3 相關。

No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料	反應與否	震度	gal	距測站(km)	D/R
12-717	2012/12/3 01:45	5	121.55	23.97	11.8	花蓮縣政府西偏南方 7.5 公里(位於花蓮縣吉安鄉)				91.89	1.54
12-749	2012/12/23 14:13	4.6	121.5	24.33	5.2	花蓮縣政府北偏西方 39.7 公里(位於花蓮縣秀林鄉)	V	2	4.25	55.18	1.72
12-764	2012/12/31 00:03	5.3	120.93	23.46	4.4	嘉義市政府東方 49.1 公里(位於高雄市桃源區)				141.30	1.35
13-13	2013/1/5 04:38	5	122.43	24.22	71.4	花蓮縣政府東偏北方 85.6 公里(位於台灣東部海域)				139.96	1.01
13-27	2013/1/17 16:30	5.1	121.9	24.46	13.7	宜蘭縣政府南偏東方 33.0 公里(位於宜蘭縣近海)		2	5.8	80.18	1.95
13-56	2013/2/2 11:39	5.6	121.99	23.74	35	花蓮縣政府東南方 46.9 公里(位於臺灣東部海域)	V	2	3.11	137.24	1.86
13-85	2013/2/17 09:32	4.6	121.51	24.32	6.3	花蓮縣政府北偏西方 38.2 公里(位於花蓮縣秀林鄉)		2	4.13	56.67	1.68
13-100	2013/2/22 02:35	4.8	121.48	24.3	6.4	花蓮縣政府北偏西方 37.2 公里(位於花蓮縣秀林鄉)		1	1.32	56.63	2.05
13-122	2013/3/7 11:36	5.9	121.49	24.31	5.6	花蓮縣政府北偏西方 37.5 公里(位於花蓮縣秀林鄉)	V	3	15.67	56.32	6.11
13-162	2013/3/12 17:03	5	121.8	24.35	51.9	宜蘭縣政府南方 41.9 公里(位於宜蘭縣近海)		1	1.32	76.61	1.84
13-193	2013/3/27 10:03	6.2	121.07	23.9	19.4	南投縣政府東方 38.8 公里(位於南投縣仁愛鄉)	V			91.15	5.08
13-229	2013/4/15 13:57	4.2	121.49	24.3	7.1	花蓮縣政府北偏西方 36.4 公里(位於花蓮縣秀林鄉)		2	3.47	57.21	1.12
13-236	2013/4/21 11:07	5	122.33	24.38	70.6	宜蘭縣政府東偏南方 69.2 公里(位於臺灣東部海域)		1	1.44	124.20	1.14
13-277	2013/5/21 12:25	4.9	121.76	24.28	14.5	花蓮縣政府北偏東方 34.8 公里(位於花蓮縣近海)	V	2		77.82	1.64
13-312	2013/6/2 13:43	6.5	121	23.87	14.5	南投縣政府東方 32.0 公里(位於南投縣仁愛鄉)		2	4.97	95.40	6.54
13-359	2013/6/29 07:51	5.7	122.17	24.03	19.8	花蓮縣政府東方 56.0 公里(位於臺灣東部海域)	V	1	1.62	127.65	2.21
13-383	2013/7/16 18:11	5.5	121.54	24.28	4.9	花蓮縣政府北偏西方 32.6 公里(位於花蓮縣秀林鄉)	V	2	6.94	62.03	3.74
13-397	2013/7/24 23:32	5	121.54	23.92	10.6	花蓮縣政府西南方 11.4 公里(位於花蓮縣壽豐鄉)		1	2.15	96.50	1.46
13-464	2013/9/8 04:36	3.1	121.12	24.78	12.6	新竹縣政府東偏南方 11.8 公里(位於新竹縣關西鎮)				7.77	2.77
13-506	2013/10/11 12:45	5.2	121.61	25.05	142.6	臺北市政府東偏北方 4.8 公里(位於新北市汐止區)		1	1.26	58.26	2.96
13-536	2013/10/31 20:02	6.3	121.42	23.55	19.5	花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里(位於花蓮縣瑞穗鄉)	V	3	24.47	132.07	3.87

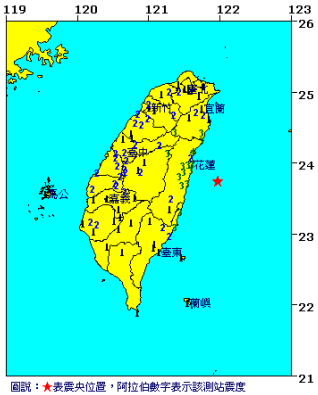


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第101212號
日期： 101 年 12 月 23 日
時間： 14 時 13 分 4.2 秒
位置： 北緯 24.32 度，東經 121.46 度
即在 花蓮縣政府北偏西方 39.7 公里
位於 花蓮縣秀林鄉
地震深度： 5.2 公里
芮氏規模： 4.6
各地最大震度

宜蘭縣南山	5級	台北市	1級
花蓮縣太魯閣	3級		
新竹縣竹東	3級		
南投縣合歡山	2級		
台中市德基	2級		
桃園縣三光	2級		
新北市新店	2級		
新北市	2級		
台北市信義區	2級		
花蓮縣花蓮市	1級		
苗栗縣獅頭山	1級		
宜蘭縣宜蘭市	1級		
新竹市	1級		
苗栗縣苗栗市	1級		
新竹縣竹北市	1級		
桃園縣桃園市	1級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

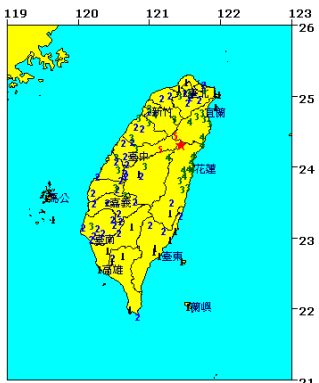


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102014號
日期： 102 年 2 月 2 日
時間： 11 時 39 分 52.4 秒
位置： 北緯 23.75 度，東經 121.98 度
即在 花蓮縣政府東南方 45.4 公里
位於 臺灣東部海域
地震深度： 35.0 公里
芮氏規模： 5.6
各地最大震度

花蓮縣太魯閣	4級	桃園縣桃園市	2級
花蓮縣花蓮市	3級	新竹縣竹北市	2級
臺東縣長濱	3級	臺南市善化	2級
宜蘭縣南澳	3級	宜蘭縣宜蘭市	1級
南投縣合歡山	3級	嘉義縣阿里山	1級
臺中市德基	2級	臺東縣臺東市	1級
桃園縣三光	2級	高雄市桃源	1級
南投縣南投市	2級	臺北市信義區	1級
雲林縣草嶺	2級	新竹市	1級
苗栗縣獅頭山	2級	臺北市	1級
臺中市	2級	嘉義市	1級
彰化縣二水	2級	屏東縣三地門	1級
雲林縣斗六市	2級	澎湖縣馬公市	1級
苗栗縣苗栗市	2級		
新北市	2級		
彰化縣彰化市	2級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

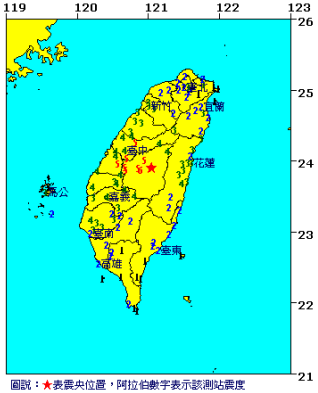


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102029號
日期： 102 年 3 月 7 日
時間： 11 時 36 分 45.7 秒
位置： 北緯 24.3 度，東經 121.46 度
即在 花蓮縣政府北偏西方 38.1 公里
位於 花蓮縣秀林鄉
地震深度： 5.6 公里
芮氏規模： 5.9
各地最大震度

宜蘭縣南山	5級	新竹市	2級
臺中市德基	5級	苗栗縣苗栗市	2級
花蓮縣太魯閣	4級	桃園縣桃園市	2級
南投縣合歡山	4級	臺中市	2級
花蓮縣花蓮市	4級	臺北市	2級
新竹縣竹東	4級	南投縣南投市	2級
桃園縣三光	3級	彰化縣彰化市	2級
苗栗縣獅頭山	3級	基隆市	2級
宜蘭縣宜蘭市	3級	臺東縣長濱	2級
新竹縣竹北市	3級	嘉義縣阿里山	2級
新北市	3級	嘉義市	2級
臺北市信義區	3級	高雄市甲仙	2級
彰化縣員林	3級	臺南市	2級
雲林縣草嶺	3級	屏東縣九如	2級
雲林縣斗六市	3級	臺東縣臺東市	1級
臺南市佳里	3級	屏東縣屏東市	1級

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

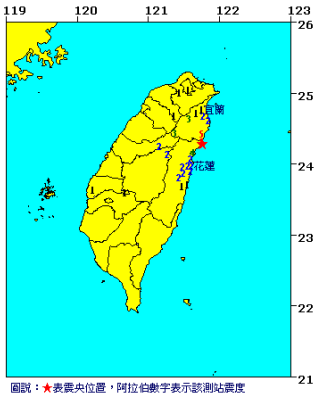


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102041號
日期： 102 年 3 月 27 日
時間： 10 時 3 分 19.6 秒
位置： 北緯 23.9 度，東經 121.05 度
即在 南投縣政府東方 36.9 公里
位於 南投縣仁愛鄉
地震深度： 19.4 公里
芮氏規模： 6.2
各地最大震度

南投縣日月潭	6級	新竹縣竹東	3級
南投縣南投市	5級	新竹市	3級
臺中市霧峰	5級	新竹縣竹北市	3級
彰化縣員林	5級	臺北市信義區	3級
臺中市	4級	新北市五分山	3級
花蓮縣光復	4級	澎湖縣馬公市	3級
嘉義縣阿里山	4級	臺東縣長濱	2級
雲林縣草嶺	4級	高雄市桃源	2級
彰化縣彰化市	4級	桃園縣三光	2級
苗栗縣鯉魚潭	4級	宜蘭縣宜蘭市	2級
嘉義市	4級	桃園縣桃園市	2級
臺南市佳里	4級	新北市	2級
雲林縣斗六市	3級	臺東縣臺東市	2級
花蓮縣花蓮市	3級	臺北市	2級
宜蘭縣南山	3級	屏東縣九如	2級
苗栗縣苗栗市	3級	屏東縣屏東市	2級

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

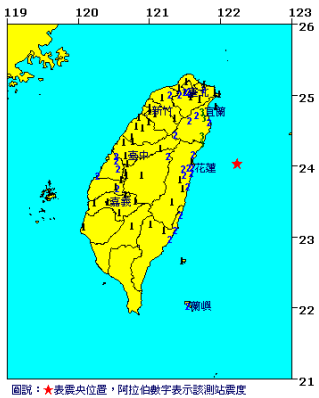


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102064號
日期： 102 年 5 月 21 日
時間： 12 時 25 分 46.9 秒
位置： 北緯 24.28 度，東經 121.77 度
即在 花蓮縣政府北偏東方 35.4 公里
位於 花蓮縣近海
地震深度： 14.5 公里
芮氏規模： 4.9
各地最大震度

花蓮縣和平	5級		
宜蘭縣南澳	5級		
花蓮縣花蓮市	2級		
南投縣合歡山	2級		
臺中市德基	2級		
宜蘭縣宜蘭市	1級		
桃園縣三光	1級		
新北市	1級		
臺北市信義區	1級		
雲林縣草嶺	1級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

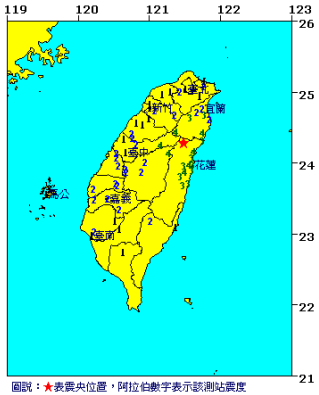


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102084號
日期： 102 年 6 月 29 日
時間： 7 時 51 分 50.3 秒
位置： 北緯 24.03 度，東經 122.24 度
即在 花蓮縣政府東方 63.1 公里
位於 臺灣東部海域
地震深度： 19.8 公里
芮氏規模： 5.7
各地最大震度

花蓮縣和平	3級	新竹縣竹東	1級
宜蘭縣南澳	3級	苗栗縣獅頭山	1級
宜蘭縣宜蘭市	3級	新竹市	1級
花蓮縣花蓮市	2級	新竹縣竹北市	1級
南投縣合歡山	2級	苗栗縣苗栗市	1級
臺東縣長濱	2級	嘉義縣阿里山	1級
新北市五分山	2級	南投縣南投市	1級
臺北市信義區	2級	臺中市	1級
臺北市	2級	雲林縣斗六市	1級
新北市	2級	高雄市桃源	1級
桃園縣桃園市	2級	嘉義市	1級
彰化縣員林	2級	臺南市七股	1級
彰化縣彰化市	2級		
臺中市大肚	2級		
雲林縣古坑	2級		
基隆市	1級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

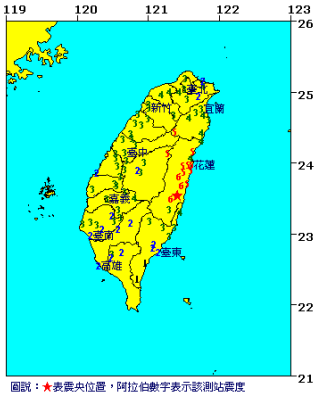


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102090號
日期： 102 年 7 月 16 日
時間： 18 時 11 分 35.0 秒
位置： 北緯 24.28 度，東經 121.5 度
即在 花蓮縣政府北偏西方 34.1 公里
位於 花蓮縣秀林鄉
地震深度： 4.9 公里
芮氏規模： 5.5
各地最大震度

花蓮縣太魯閣	4級	彰化縣彰化市	2級
宜蘭縣南山	4級	新北市	2級
南投縣合歡山	4級	南投縣南投市	2級
臺中市德基	4級	臺南市永康	2級
花蓮縣花蓮市	3級	苗栗縣苗栗市	1級
桃園縣三光	2級	臺中市	1級
宜蘭縣宜蘭市	2級	臺北市	1級
新竹縣竹東	2級	基隆市	1級
苗栗縣鯉魚潭	2級	高雄市甲仙	1級
新北市五分山	2級	新竹縣竹北市	1級
彰化縣員林	2級	屏東縣三地門	1級
雲林縣古坑	2級	新竹市	1級
臺東縣利稻	2級	臺南市	1級
嘉義縣草山	2級	桃園縣桃園市	1級
雲林縣斗六市	2級	澎湖縣馬公市	1級
嘉義市	2級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度



中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102121號
日期： 102 年 10 月 31 日
時間： 20 時 2 分 9.0 秒
位置： 北緯 23.55 度，東經 121.42 度
即在 花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里
位於 花蓮縣瑞穗鄉
地震深度： 19.5 公里
芮氏規模： 6.3
各地最大震度

花蓮縣紅葉	6級	苗栗縣鯉魚潭	3級
花蓮縣花蓮市	5級	苗栗縣苗栗市	3級
南投縣合歡山	5級	屏東縣九如	3級
宜蘭縣南山	5級	宜蘭縣宜蘭市	3級
嘉義縣阿里山	4級	新竹縣竹北市	3級
臺東縣長濱	4級	雲林縣斗六市	3級
桃園縣中壢	4級	新竹市	3級
新北市	4級	臺北市	3級
桃園縣桃園市	4級	南投縣南投市	3級
雲林縣草嶺	3級	高雄市桃源	2級
彰化縣二水	3級	臺東縣臺東市	2級
臺中市霧峰	3級	屏東縣屏東市	2級
臺南市楠西	3級	臺南市	2級
臺中市	3級	高雄市	2級
嘉義市	3級	基隆市	2級
彰化縣彰化市	3級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

本報告係中央氣象局地震觀測網即時地震資料地震速報之結果。

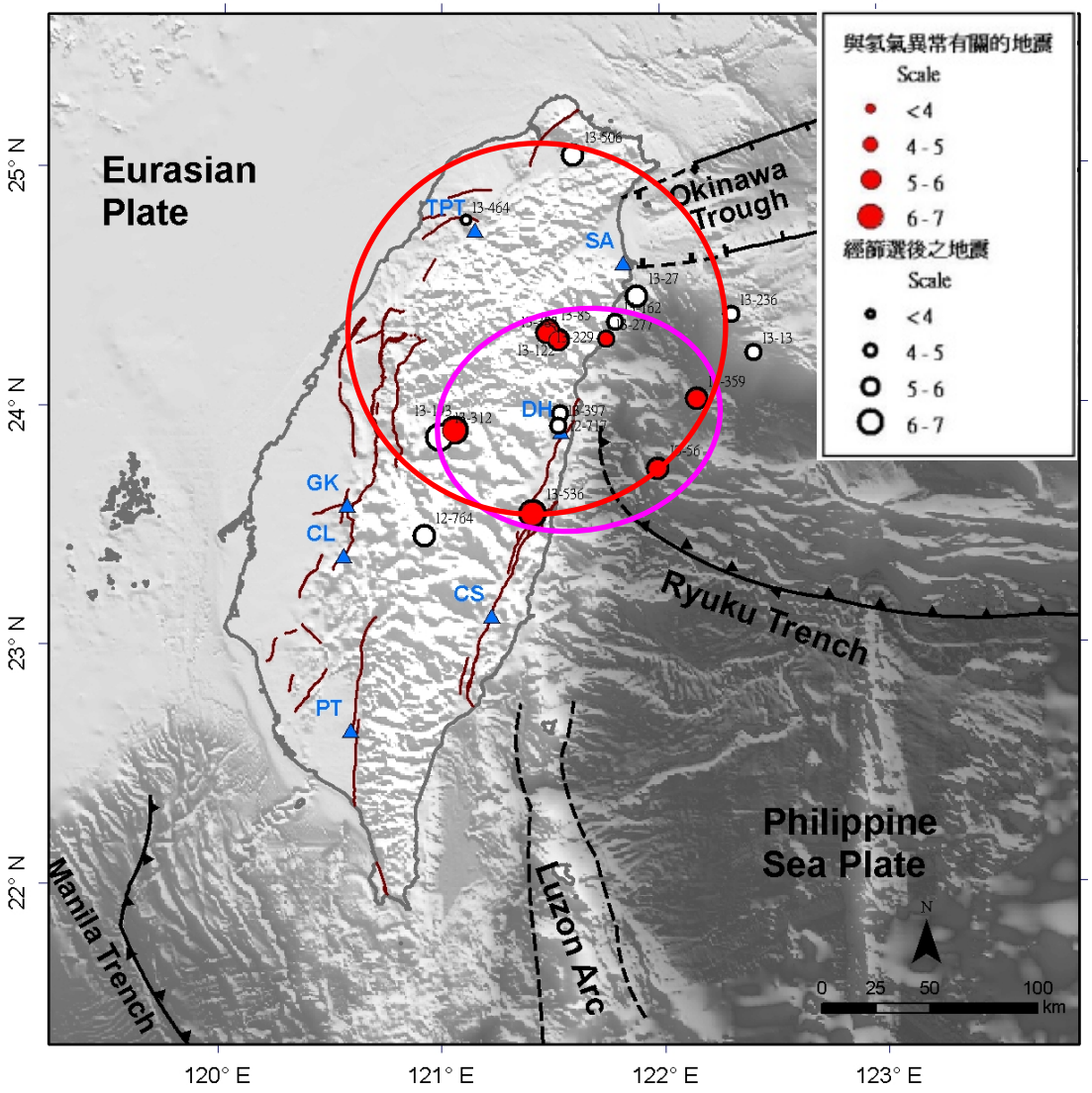


圖 7-2.4：大平地觀測站相關地震位置分布圖。粉色圈為本年度有前兆反應之地震分布範圍，紅圈為該測站已建立的敏感偵測區間範圍。

7-2-2 雲林古坑土壤氣體觀測站

圖 7-2.5 是雲林古坑觀測站 2012/12/1-2013/11/30 氡氣觀測與地震、雨量的相關圖。詳細每月的分月圖表請參考附錄（圖 7-1.14 至圖 7-1.26）。圖中雨量數據是採用中央氣象局自動氣象站（距離測站較近的雲林山豬湖氣象站）的時雨量資料，加入時雨量資料能幫助我們觀察氣體的即時變化與雨量的關係。1 月 10 日前因降雨影響逸氣來源，原來逸氣管道受阻，無氡氣紀錄，另於觀測站旁另建立一逸氣通道供測站使用。

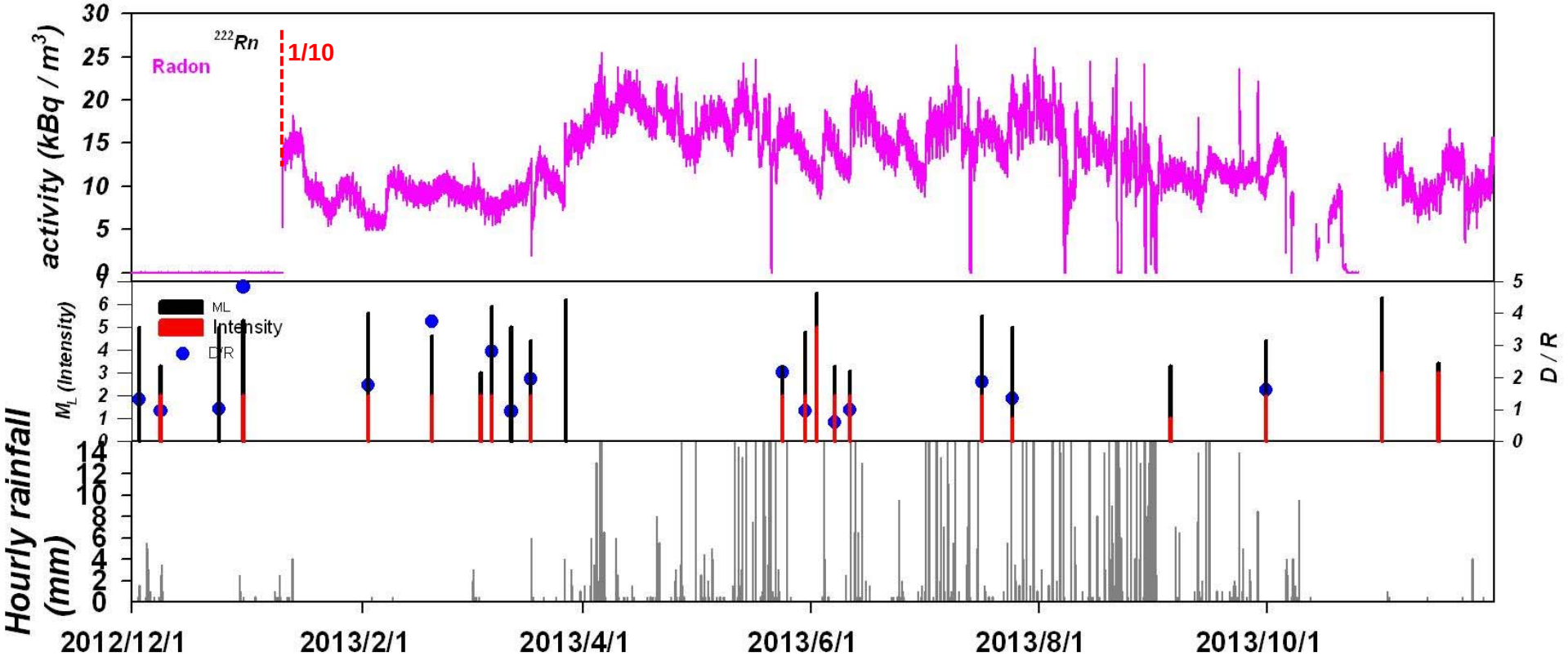


圖 7-2.5：雲林古坑觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。

圖 7-2.6 是以時頻分析軟體所做的古坑站氡氣與雨量、地震的關係圖。接著利用 EMD 拆解原始訊號，拆解後得到 13 個內部模態函數（IMF）如表 7-2.4。選擇周期在 1.5 至 38 天的 IMF_6（周期為 2.18 天）至 IMF_{10}（周期為 33.92 天）等 5 個內部模態函數（表 7-2.4 粗體字所示）。將 5 個 IMF 相加後，得到去雜訊及去趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析，以 1 個標準差作為異常門檻。同樣的以疊代式高斯平滑曲線與 14 天滾動平均線相減後將數值標準化，亦是以 1 個標準差作為異常門檻。(圖 7-2.6 C 所示)

表 7-2.4：古坑站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/21。

Channel	Zero Crossings	Extrema Counts	Mean Freq. [cycles/day]	Mean Period [day]	Power (%)
IMF_h1	12156	6792	10.54	0.09	0.00
IMF_h2	7206	3822	6.25	0.16	0.00
IMF_h3	3962	2044	3.44	0.29	0.00
IMF_h4	2354	1195	2.04	0.49	0.00
IMF_h5	966	484	0.84	1.19	0.28
IMF_h6	528	270	0.46	2.18	1.09
IMF_h7	256	133	0.22	4.49	1.71
IMF_h8	141	70	0.12	8.12	3.13
IMF_h9	63	32	0.06	18.02	4.71
IMF_h10	33	16	0.03	33.92	3.72
IMF_h11	20	10	0.02	54.92	3.90
IMF_h12	9	5	0.01	115.34	42.54
IMF_h13	3	2	0.00	288.35	38.92
IMF_residual	0	0	0.00	1153.42	

觀察圖上 C 有 13 個超出異常門檻以粉色框表示的區間，編號 1 異常區間是因更改逸氣通道，氡氣突然上升所致；編號 6 若去除掉因雨影響的原始數據，其氡氣上升可溯至 3 月初，直到 4 月中下降，這段時間有四起規模超過 5 的地震發生，但都距離測站超過 200KM，超過測站過去所能敏感反應的範圍，因此這段時間的氡氣異常變化，暫無相關的地震。編號 8、9、11 異常區間則是因雨影響氡氣突然上升所致。編號 2 異常區間，其標準差尚未達到定義的異常門檻值，但從原始資料顯示有明顯的氣體異常變化，且無受到降雨影響，我們暫時將其列入有異常變化的區間，其所對應的地震是 2 月 2 日發生於花蓮外海，規模 5.6。編號 3、4 異常區間相對應的地震分別是 2 月 19 日發生於嘉義大埔，規模 4.6 及 3 月 4 日發生於嘉義梅山，規模 3；編號 5 異常區間氡氣開始上升於 3 月 6 日，於 3 月 20 日到達高點後下降，所對應的地震是 3 月 27 日發生於南投仁愛，規模 6.2。編號 7 異常區間扣除降雨影響的時段，也可明顯看出氡氣的異常變化，所對應的地震有三起分別 5 月 24 日發生於嘉義梅山，規模 3.3，5 月 30 日發生於花蓮外海，規模 4.8 以及 6 月 2 日發生於南投仁愛，規模 6.5。

本測站對於受降雨的影響顯著，從 5 月梅雨季中雨量與氡氣的關聯顯示，雖然氡氣因逸氣通道阻塞而降至空氣值但能在短時間內回復到背景值，表示底下逸氣通道不會因雨而長久阻塞，除非是持續性的豪大雨。不過，也常因短暫的大雨而造成氡氣濃度突然上升，造成分析上的困擾，這是之後本研究所要排除的課題。自 10 月 21 日之後因儀器故障帶回送修，因此無 10 月 21 日至目前的資料。

此站所能反應的敏感範圍主要在臺灣中部及東部。古坑觀測站相關地震列表，如表 7-2.5 所示；地震分布圖及測站敏感反應範圍，如圖 7-2.7。

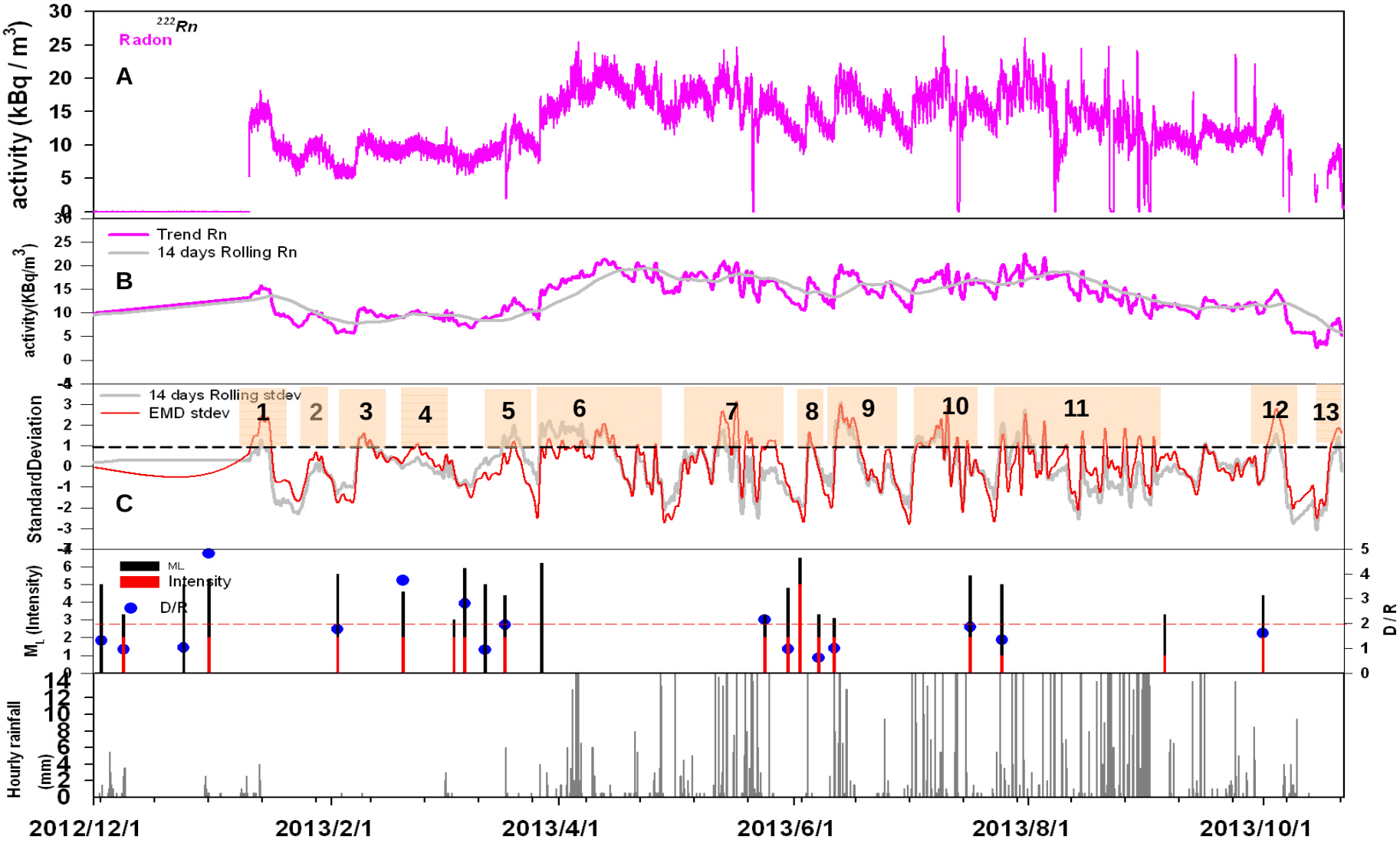
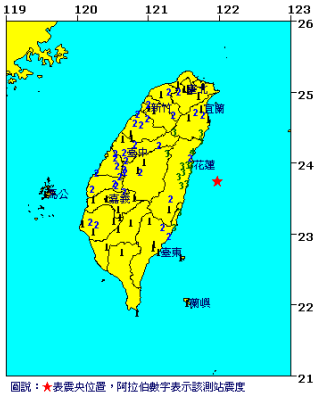


圖 7-2.6：古坑站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果（A）原始數據；（B）疊代式高斯平滑法及 14 天滾動平均值的結果；（C）經驗模態分解（IMF_6-IMF_{10}）及 14 天滾動平均值經程式處理後以 1 個標準差來表示其異常門檻；粉色框為氡氣異常區間。

表 7-2.5：雲林古坑觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/10/21），V 表示氣體異常與地震有相關性，下列地震報告圖為與表 7-2.5 相關。

No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料	反應與否	震度	gal	距測站(km)	D/R
12-717	2012/12/3 01:45	5	121.55	23.97	11.8	花蓮縣政府西偏南方 7.5 公里(位於花蓮縣吉安鄉)				108.23	1.31
12-728	2012/12/8 20:15	3.3	120.84	23.59	17.1	雲林縣政府東偏南方 33.8 公里(位於南投縣信義鄉)		2		27.52	0.95
12-752	2012/12/24 11:17	5	121.32	22.55	67.8	台東縣政府東南方 28.8 公里(位於台灣東部海域)				138.26	1.02
12-764	2012/12/31 00:03	5.3	120.93	23.46	4.4	嘉義市政府東方 49.1 公里(位於高雄市桃源區)		2	7.78	39.43	4.82
13-56	2013/2/2 11:39	5.6	121.99	23.74	35	花蓮縣政府東南方 46.9 公里(位於臺灣東部海域)	V	2	3.65	145.60	1.76
13-93	2013/2/19 10:12	4.6	120.57	23.36	15.1	嘉義市政府東南方 17.2 公里(位於嘉義縣大埔鄉)	V	2	3.05	25.44	3.74
13-112	2013/3/4 15:21	3	120.57	23.56	10.5	嘉義市政府東北方 15.3 公里(位於嘉義縣梅山鄉)	V	2		3.32	5.88
13-122	2013/3/7 11:36	5.9	121.49	24.31	5.6	花蓮縣政府北偏西方 37.5 公里(位於花蓮縣秀林鄉)		2	5.98	122.82	2.80
13-162	2013/3/12 17:03	5	121.8	24.35	51.9	宜蘭縣政府南方 41.9 公里(位於宜蘭縣近海)				150.64	0.94
13-175	2013/3/17 21:53	4.4	120.95	23.68	12.3	南投縣政府東南方 36.0 公里(位於南投縣信義鄉)		2	3.65	39.98	1.95
13-193	2013/3/27 10:03	6.2	121.07	23.9	19.4	南投縣政府東方 38.8 公里(位於南投縣仁愛鄉)	V			61.37	7.55
13-297	2013/5/24 09:38	3.3	120.67	23.53	9.1	嘉義市政府東偏北方 22.6 公里(位於嘉義縣梅山鄉)	V	2		12.16	2.16
13-308	2013/5/30 11:14	4.8	121.71	23.9	46.9	花蓮縣政府東南方 13.9 公里(位於臺灣東部海域)	V	2	3.35	121.02	0.96
13-312	2013/6/2 13:43	6.5	121	23.87	14.5	南投縣政府東方 32.0 公里(位於南投縣仁愛鄉)	V	5	159.2	53.63	11.63
13-319	2013/6/7 08:49	3.3	120.98	23.7	24	南投縣政府東南方 36.8 公里(位於南投縣信義鄉)		2		43.51	0.60
13-328	2013/6/11 10:48	3.1	120.77	23.52	7.4	雲林縣政府東南方 32.2 公里(位於嘉義縣阿里山鄉)		2		21.81	0.99
13-383	2013/7/16 18:11	5.5	121.54	24.28	4.9	花蓮縣政府北偏西方 32.6 公里(位於花蓮縣秀林鄉)		2	5.08	124.69	1.86
13-397	2013/7/24 23:32	5	121.54	23.92	10.6	花蓮縣政府西南方 11.4 公里(位於花蓮縣壽豐鄉)		1	1.02	105.27	1.34
13-459	2013/9/5 07:22	3.3	120.52	23.6	14.5	雲林縣政府南方 11.3 公里(位於嘉義縣大林鎮)		1		5.22	5.03
13-496	2013/9/30 20:05	4.4	120.97	23.83	15.2	南投縣政府東偏南方 29.6 公里(位於南投縣信義鄉)		2	2.87	48.62	1.60

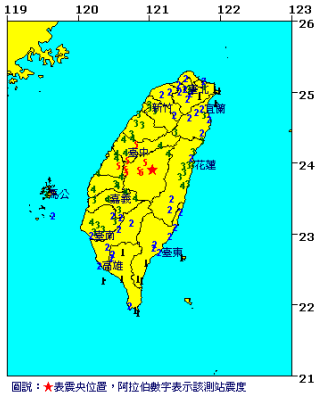


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102014號
日期： 102 年 2 月 2 日
時間： 11 時 39 分 52.4 秒
位置： 北緯 23.75 度，東經 121.98 度
即在 花蓮縣政府東南方 45.4 公里
位於 臺灣東部海域
地震深度： 35.0 公里
芮氏規模： 5.6
各地最大震度

花蓮縣太魯閣	4級	桃園縣桃園市	2級
花蓮縣花蓮市	3級	新竹縣竹北市	2級
臺東縣長濱	3級	臺南市善化	2級
宜蘭縣南澳	3級	宜蘭縣宜蘭市	1級
南投縣合歡山	3級	嘉義縣阿里山	1級
臺中市德基	2級	臺東縣臺東市	1級
桃園縣三光	2級	高雄市桃源	1級
南投縣南投市	2級	臺北市信義區	1級
雲林縣草嶺	2級	新竹市	1級
苗栗縣獅頭山	2級	臺北市	1級
臺中市	2級	嘉義市	1級
彰化縣二水	2級	屏東縣三地門	1級
雲林縣斗六市	2級	澎湖縣馬公市	1級
苗栗縣苗栗市	2級		
新北市	2級		
彰化縣彰化市	2級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

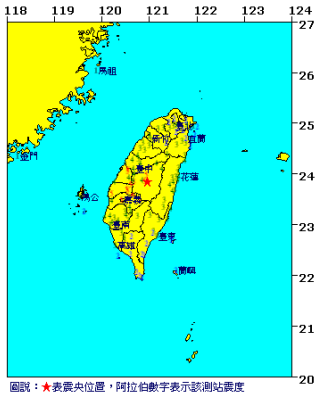


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102041號
日期： 102 年 3 月 27 日
時間： 10 時 3 分 19.6 秒
位置： 北緯 23.9 度，東經 121.05 度
即在 南投縣政府東方 36.9 公里
位於 南投縣仁愛鄉
地震深度： 19.4 公里
芮氏規模： 6.2
各地最大震度

南投縣日月潭	6級	新竹縣竹東	3級
南投縣南投市	5級	新竹市	3級
臺中市霧峰	5級	新竹縣竹北市	3級
彰化縣員林	5級	臺北市信義區	3級
臺中市	4級	新北市五分山	3級
花蓮縣光復	4級	澎湖縣馬公市	3級
嘉義縣阿里山	4級	臺東縣長濱	2級
雲林縣草嶺	4級	高雄市桃源	2級
彰化縣彰化市	4級	桃園縣三光	2級
苗栗縣鯉魚潭	4級	宜蘭縣宜蘭市	2級
嘉義市	4級	桃園縣桃園市	2級
臺南市佳里	4級	新北市	2級
雲林縣斗六市	3級	臺東縣臺東市	2級
花蓮縣花蓮市	3級	臺北市	2級
宜蘭縣南山	3級	屏東縣九如	2級
苗栗縣苗栗市	3級	屏東縣屏東市	2級

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

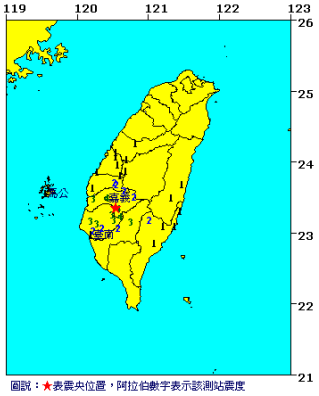


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102075號
日期： 102 年 6 月 2 日
時間： 13 時 43 分 3.2 秒
位置： 北緯 23.86 度，東經 120.97 度
即在 南投縣政府東方 29.3 公里
位於 南投縣魚池鄉
地震深度： 14.5 公里
芮氏規模： 6.5
各地最大震度

雲林縣草嶺	6級	苗栗縣苗栗市	3級
南投縣日月潭	5級	高雄市桃源	3級
彰化縣二水	5級	新竹縣竹東	3級
嘉義縣阿里山	5級	新竹市	3級
雲林縣斗六市	5級	臺東縣臺東市	3級
彰化縣彰化市	5級	臺南市	3級
臺中市大肚	5級	桃園縣中壢	3級
嘉義市	5級	桃園縣桃園市	3級
南投縣南投市	4級	新北市	3級
臺中市	4級	屏東縣九如	3級
花蓮縣西林	4級	屏東縣屏東市	3級
苗栗縣三義	4級	臺北市	3級
花蓮縣花蓮市	4級	澎湖縣馬公市	3級
臺東縣長濱	4級	新竹縣竹北市	3級
臺南市楠西	4級	高雄市	3級
宜蘭縣南山	3級	宜蘭縣宜蘭市	2級

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

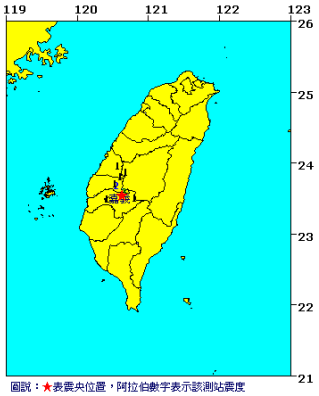


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102021號
日期： 102 年 2 月 19 日
時間： 10 時 12 分 45.6 秒
位置： 北緯 23.35 度，東經 120.55 度
即在 嘉義市政府東南方 17.4 公里
位於 嘉義縣大埔鄉
地震深度： 15.1 公里
芮氏規模： 4.6
各地最大震度

嘉義縣草山	4級		
嘉義市	4級		
臺南市東山	3級		
高雄市桃源	3級		
雲林縣草嶺	2級		
雲林縣斗六市	2級		
臺東縣利稻	2級		
彰化縣二水	1級		
臺南市	1級		
南投縣名間	1級		
臺中市霧峰	1級		
花蓮縣紅葉	1級		
彰化縣彰化市	1級		
澎湖縣馬公市	1級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

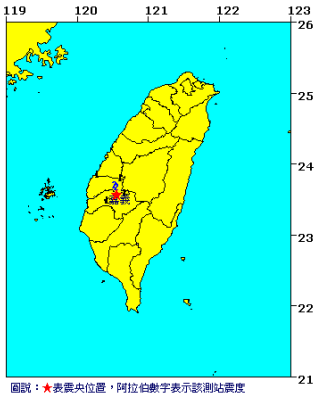


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

小區域有感地震
日期： 102 年 5 月 24 日
時間： 9 時 38 分 43.3 秒
位置： 北緯 23.54 度，東經 120.64 度
即在 嘉義市政府東偏北方 20.1 公里
位於 嘉義縣梅山鄉
地震深度： 9.1 公里
芮氏規模： 3.3
各地最大震度

雲林縣草嶺	3級		
嘉義縣阿里山	1級		
雲林縣斗六市	1級		
嘉義市	1級		
彰化縣二水	1級		
南投縣名間	1級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

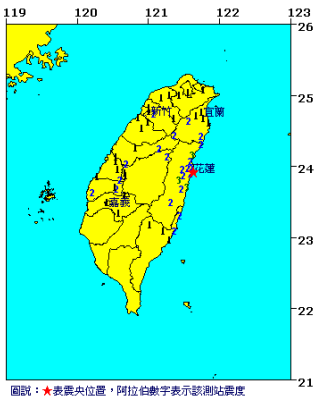


中 央 氣 象 局 地 震 報 告

小區域有感地震
日期： 102 年 3 月 4 日
時間： 15 時 21 分 59.2 秒
位置： 北緯 23.57 度，東經 120.57 度
即在 嘉義市政府東北方 15.2 公里
位於 嘉義縣梅山鄉
地震深度： 10.5 公里
芮氏規模： 3.0
各地最大震度

雲林縣古坑	2級		
雲林縣斗六市	2級		
嘉義市	1級		
彰化縣二水	1級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度



中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102074號
日期： 102 年 5 月 30 日
時間： 11 時 14 分 43.4 秒
位置： 北緯 23.92 度，東經 121.64 度
即在 花蓮縣政府南偏東方 7.9 公里
位於 花蓮縣近海
地震深度： 46.9 公里
芮氏規模： 4.8
各地最大震度

花蓮縣瞭崎	3級	新竹縣竹北市	1級
花蓮縣花蓮市	2級	新北市	1級
南投縣合歡山	2級	臺北市信義區	1級
宜蘭縣南澳	2級	桃園縣桃園市	1級
臺中市德基	2級	嘉義縣草山	1級
臺東縣長濱	2級	嘉義市	1級
彰化縣二水	2級		
新竹縣竹東	2級		
雲林縣古坑	2級		
桃園縣三光	1級		
宜蘭縣宜蘭市	1級		
南投縣南投市	1級		
苗栗縣獅潭	1級		
彰化縣彰化市	1級		
新竹市	1級		
雲林縣斗六市	1級		

圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

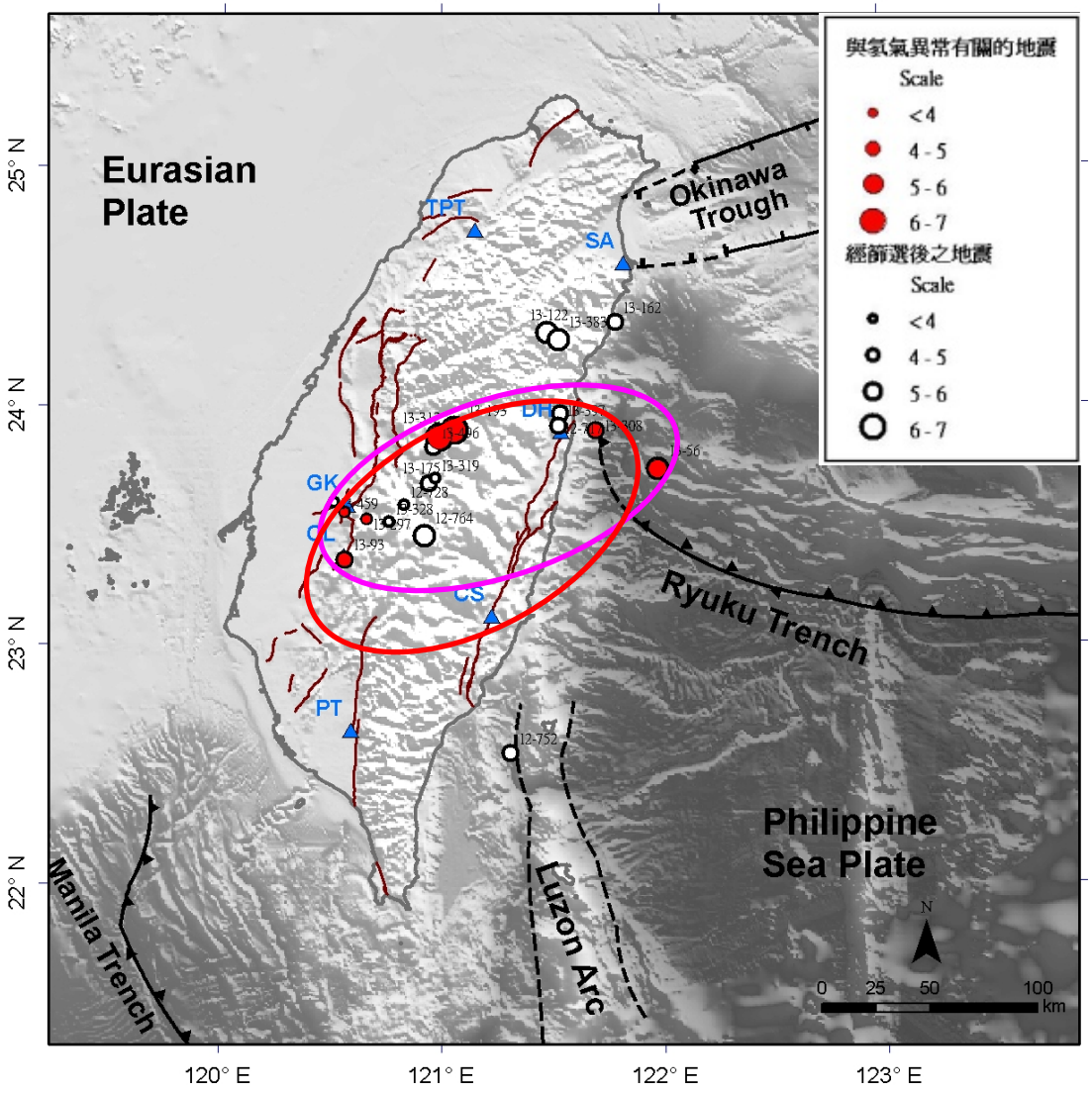


圖 7-2.7：古坑觀測站相關地震位置分布圖。粉色圈為本年度有前兆反應之地震分布範圍，紅色圈為該測站已建立的敏感偵測區間範圍。

7-2-3 屏東屏科大土壤氣體觀測站

圖 7-2.8 是屏東屏科大觀測站 2012/12/1-2013/11/30 氡氣觀測與地震、雨量的相關圖。詳細每月的分月圖表請參考附錄（圖 7-1.27 至圖 7-1.39）。其中雨量數據是採用中央氣象局自動氣象站（距離測站較近的屏東三地門氣象站）的時雨量資料。此站於 12 月 30 日至 1 月 10 日及 8 月 16 日至 9 月 16 日由於氣體乾燥器內部管線脫落，造成無氣體進入，導致氡氣分析儀的分析結果呈現緩慢下降趨勢。此段後續於資料處理時會將之濾除。另外，5 月 15 日至 5 月 26 日氡氣呈現明顯向下變化的區間，此變化可能與連續的豪大雨有關，本研究暫且將之排除。（圖中粉色框所示）

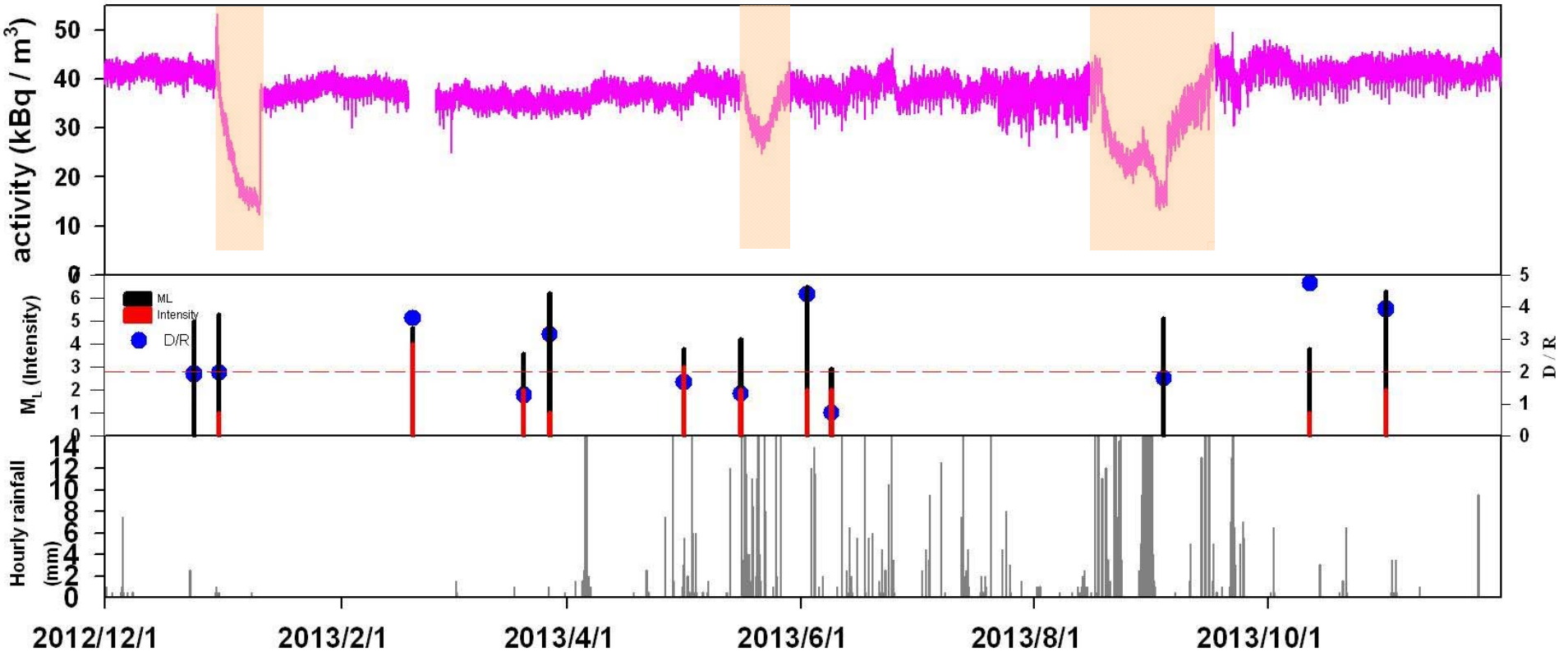


圖 7-2.8：屏東屏科大觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30；粉色框表示氡氣變化受到儀器及雨量影響。

經由時頻分析所得到的屏科大站土壤氡氣與雨量、地震的關係圖，如圖 7-2.9 所示。接著利用 EMD 拆解原始訊號，拆解後得到 13 個內部模態函數（IMF）如表 7-2.6。選擇周期在 1.5 至 38 天的 IMF_6（周期為 2.08 天）至 IMF_{10}（周期為 29.69 天）等 5 個內部模態函數（表 7-2.5 粗體字所示）。將 5 個 IMF 相加後，得到去雜訊及去趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析，以 1 個標準差作為異常門檻。同樣的以疊代式高斯平滑曲線與 14 天滾動平均線相減後將數值標準化，亦是以 1 個標準差作為異常門檻。（圖 7-2.9 C 所示）

表 7-2.6：屏科大站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/26。

Channel	Zero Crossings	Extrema Counts	Mean Freq. [cycles/day]	Mean Period [day]	Power (%)
IMF_h1	15174	8259	10.87	0.09	0.00
IMF_h2	8749	4605	6.27	0.16	0.00
IMF_h3	4757	2430	3.41	0.29	0.00
IMF_h4	2832	1443	2.03	0.49	0.00
IMF_h5	1174	595	0.84	1.19	0.61
IMF_h6	670	338	0.48	2.08	1.37
IMF_h7	362	184	0.26	3.84	1.65
IMF_h8	187	94	0.13	7.42	3.05
IMF_h9	100	50	0.07	13.82	5.12
IMF_h10	46	23	0.03	29.69	6.31
IMF_h11	20	10	0.02	66.45	15.24
IMF_h12	7	5	0.01	174.43	18.95
IMF_h13	4	1	0.00	279.08	47.71
IMF_residual	0	0	0.00	1395.42	

觀察圖上 C 有 11 個超出異常門檻以粉色框表示的區間，編號 1 異常區間有兩個短暫突然升高的變化，觀諸雨量，也未受到影響，因此，此異常區間極有可能是機器的突波所致；第二個升高在 12 月 31 日地震之前，之後因為氣體乾燥器內部管線脫落，致使氡氣分析儀只能分析迴圈內殘存的氣體，所以到 1 月 10 日的氡氣是呈現緩慢下降的趨勢。編號 3 異常區間，由原始資料來看有短缺，亦無相關地震與其對應。編號 7 異常區間，由原始數據來看是個向下的變化，應為大雨影響所致。編號 8、9 異常區間，並無發生符合與之相關的地震事件，不過降雨因素的影響亦可能參雜其中。編號 10 異常區間是同時受到降雨及氣體乾燥器故障影響所致。編號 2 異常區間內無受到降雨影響，所對應的地震是 2 月 19 日發生於高雄六龜，規模 4.7；編號 4 異常區間，由於變化幅度小，應與附近發生的小地震有關，對應的地震是 3 月 20 日發生於臺東金鋒，規模 3.6；編號 5、6 異常區間，變化量也不大，應是與附近的小地震有關，所對應的地震分別是 5 月 1 日發生於屏東三地門，規模 3.8 及 5 月 16 日發生於高雄桃源，規模 4.2；編號 11 異常區間，所對應的地震是 10 月 11 日發生於屏東鹽埔，規模 3.8。

長期來看氡氣的趨勢平穩偶微幅變化，就算降雨也不會有逸氣通道受阻的現象致使氡氣降至零。屏科大站氡氣敏感反應範圍主要為臺灣南部及東南部，大都皆是距離測站較近的小地震。屏科大觀測站相關地震列表，如表 7-2.7 所示。地震分布圖及測站敏感反應範圍，見圖 7-2.10。

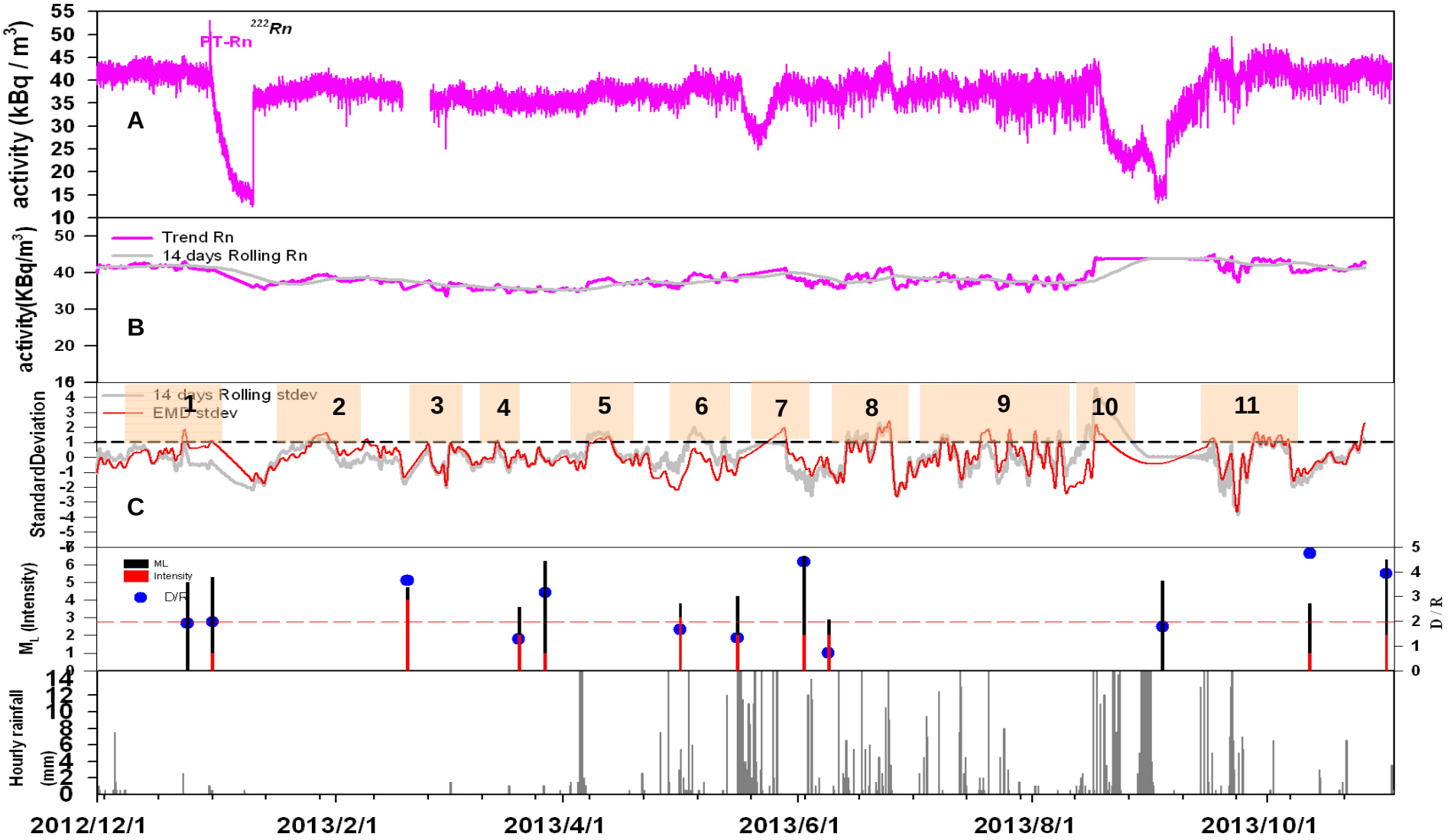
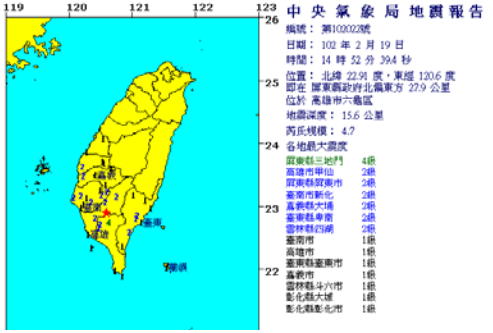
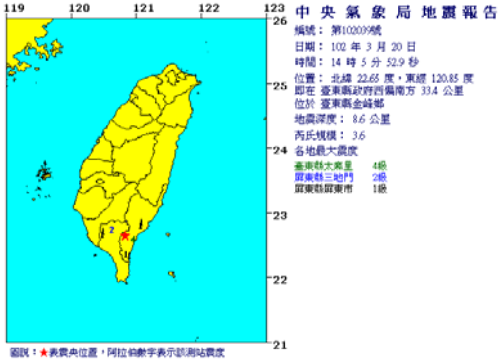


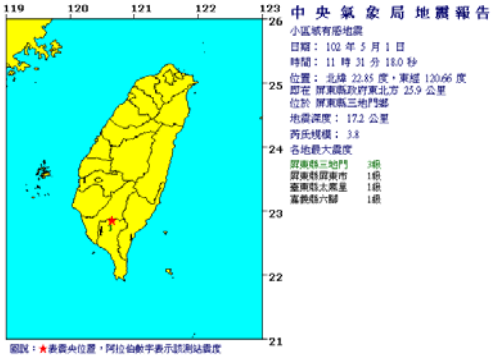
圖 7-2.9：屏科大站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果（A）原始數據；（B）疊代式高斯平滑法及 14 天滾動平均值的結果；（C）經驗模態分解（IMF_6-IMF_{10}）及 14 天滾動平均值經程式處理後以 1 個標準差來表示其異常門檻；粉色框為氡氣異常區間。

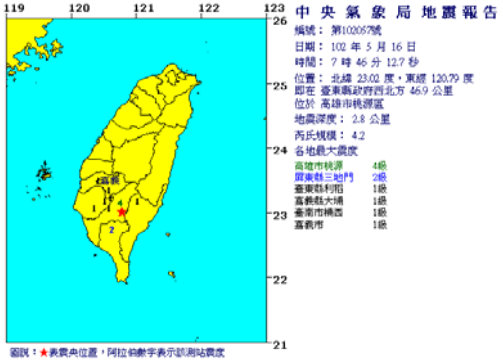
表 7-2.7：屏東屏科大觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/11/2），V 表示氣體異常與地震有相關性，下列地震報告圖為與表 7-2.7 相關。

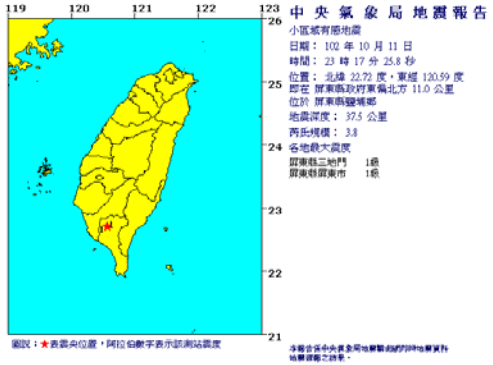
No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料	反應與否	震度	gal	距測站(km)	D/R
12-752	2012/12/24 11:17	5	121.32	22.55	67.8	台東縣政府東南方 28.8 公里(位於台灣東部海域)				73.57	1.92
12-764	2012/12/31 00:03	5.3	120.93	23.46	4.4	嘉義市政府東方 49.1 公里(位於高雄市桃源區)		1	0.9	96.41	1.97
13-94	2013/2/19 14:52	4.7	120.61	22.9	15.6	屏東縣政府北偏東方 27.0 公里(位於高雄市六龜區)	V	4	34.39	28.75	3.65
13-179	2013/3/20 14:05	3.6	120.88	22.62	8.6	臺東縣政府西偏南方 31.5 公里(位於臺東縣金峰鄉)	V	2	6.82	27.80	1.27
13-193	2013/3/27 10:03	6.2	121.07	23.9	19.4	南投縣政府東方 38.8 公里(位於南投縣仁愛鄉)		1	2.15	147.05	3.15
13-246	2013/5/1 11:31	3.8	120.72	22.85	17.2	屏東縣政府東北方 30.2 公里(位於屏東縣三地門鄉)	V	3		25.82	1.67
13-259	2013/5/16 07:46	4.2	120.83	23.03	2.8	臺東縣政府西北方 44.9 公里(位於高雄市桃源區)	V	2	4.31	48.66	1.31
13-312	2013/6/2 13:43	6.5	121	23.87	14.5	南投縣政府東方 32.0 公里(位於南投縣仁愛鄉)		2	7.24	141.74	4.40
13-324	2013/6/8 23:37	2.9	120.85	22.66	8.4	臺東縣政府西偏南方 32.3 公里(位於臺東縣金峰鄉)		2		24.73	0.71
13-454	2013/9/3 17:54	5.1	120.58	21.85	36.2	高雄市政府南偏東方 90.2 公里(位於臺灣南部海域)				87.40	1.78
13-507	2013/10/11 23:17	3.8	120.59	22.72	37.5	屏東縣政府東偏北方 11.0 公里(位於屏東縣鹽埔鄉)	V	1		9.08	4.74
13-536	2013/10/31 20:02	6.3	121.42	23.55	19.5	花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里(位於花蓮縣瑞穗鄉)		2	2.75	130.35	3.93











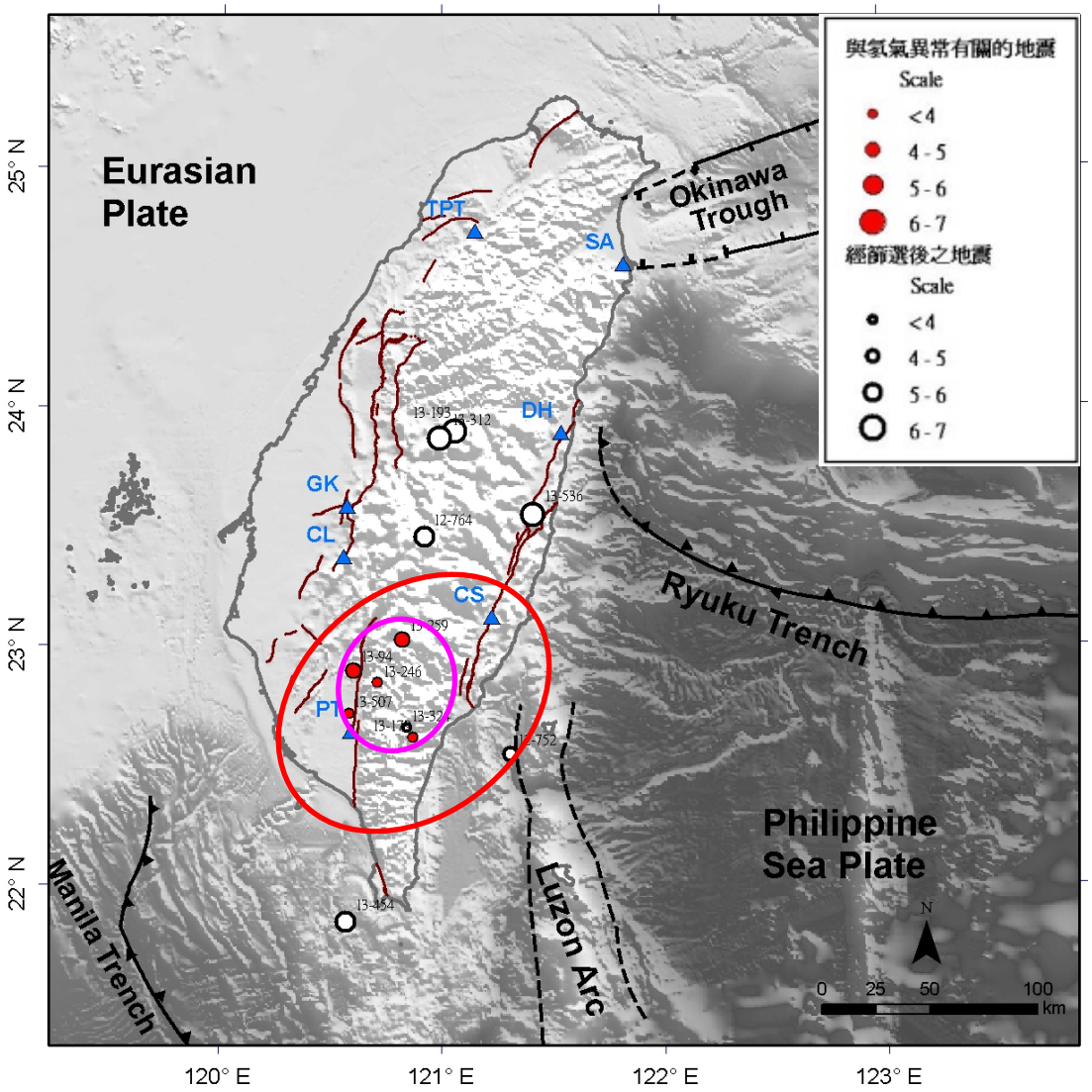


圖 7-2.10：屏科大觀測站相關地震位置分布圖。粉色圈為本年度有前兆反應之地震分布範圍，紅色圈為該測站已建立的敏感偵測區間範圍。

7-2-4 臺東池上土壤氣體觀測站

圖 7-2.11 是臺東池上觀測站 2012/12/1-2013/11/30 氡氣觀測與地震、雨量的相關圖。詳細每月的分月圖表請參考附錄（圖 7-1.40 至圖 7-1.52）。其中雨量數據是採用中央氣象局自動氣象站（距離測站較近的臺東池上氣象站）的時雨量資料。圖中粉色曲線為池上站（池上斷層上盤）土壤氡氣變化資料，藍色曲線為池上錦園村錦園站（池上斷層下盤）土壤氡氣變化資料(此為參考測站)。氡氣變化趨勢由兩站來看大致是一致的，當其中一站儀器故障時或是對觀測的結果有疑慮時，可由另一站的資料來輔助分析。

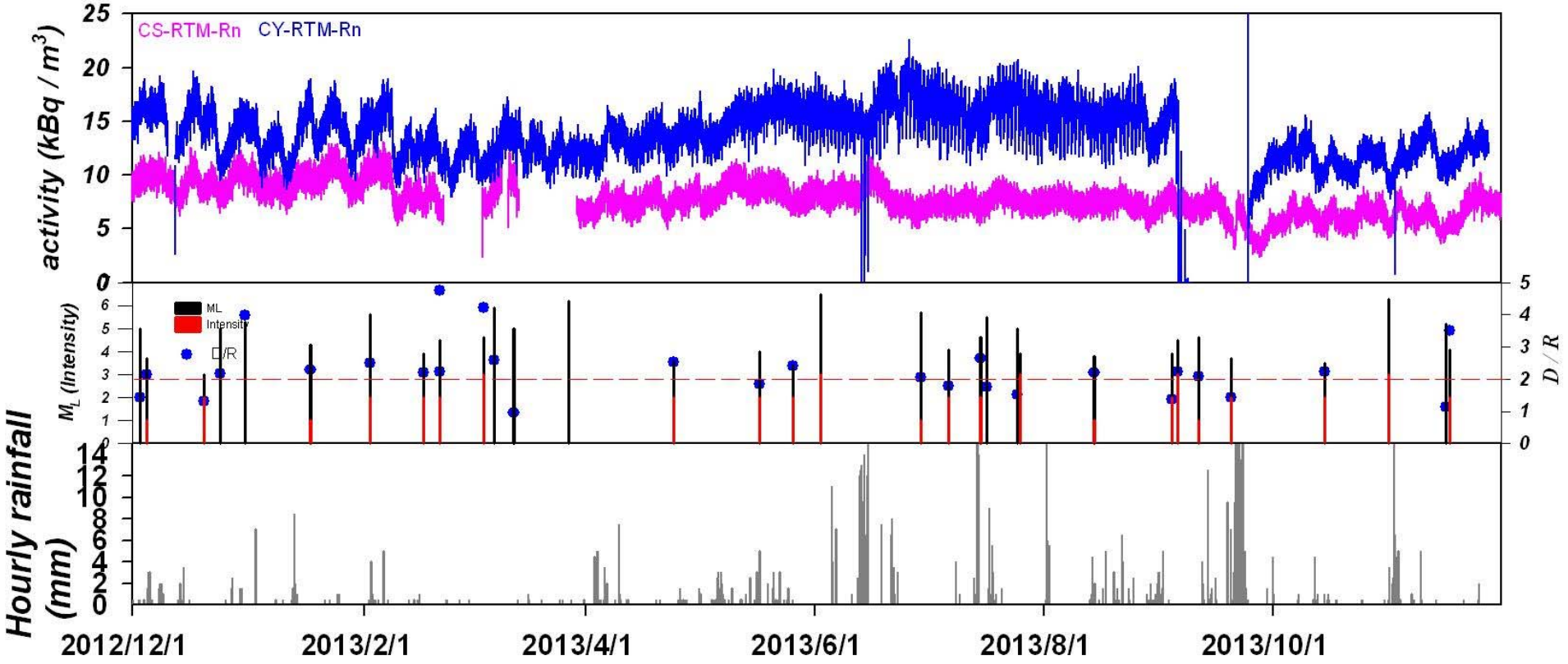


圖 7-2.11：臺東池上觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。

圖 7-2.12（池上站）和圖 7-2.13（錦園站）分別為池上站及錦園站氡氣與雨量、地震的關係圖，利用 EMD 拆解兩站的原始訊號，其中池上站拆解後得到 13 個內部模態函數（IMF）如表 7-2.8。選擇周期在 1.5 至 38 天的 IMF_6（周期為 2.05 天）至 IMF_{10}（周期為 30.02 天）等 5 個內部模態函數（表 7-2.8 粗體字所示）。將 5 個 IMF 相加後，得到去雜訊及去趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析，以 1 個標準差作為異常門檻。同樣的以疊代式高斯平滑曲線與 14 天滾動平均線相減後將數值標準化，以 1 個標準差作為異常門檻。（圖 7-2.12 C 所示）

錦園站拆解後也是得到 13 個內部模態函數（IMF）如表 7-2.9。選擇周期在 1.5 至 38 天的 IMF_6（周期為 2.04 天）至 IMF_{10}（周期為 32.34 天）等 5 個內部模態函數（表 7-2.8 粗體字所示）。將 5 個 IMF 相加後，得到去雜訊及去趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析，以 1 個標準差作為異常門檻。以疊代式高斯平滑曲線與 14 天滾動平均線相減後將數值標準化，亦是以 1 個標準差作為異常門檻。（圖 7-2.13 C 所示）。

比較兩個測站的 IMF 列表所選取的函數，大致上是相近的，表示這兩站的對氡氣的反應是一致的。錦園站在 9 月 5 日之後氡氣分析儀器故障，9 月 24 日更換新儀器，9 月 24 日至 10 月 23 日的氡氣數據尚不足以時序分析法處理，所以此站對於氡氣的時序分析到 9 月 5 日為止。

池上站與錦園站對於斷層的活動較為敏感，大如規模超過 5 的地震之外，對於測站附近發生的地震也相當敏感，若是有氣體異常卻沒有地震，則是斷層本身的潛移造成氡氣的變化 (Fu et al., 2009)，所以此區的兩個測站異常反應明顯且甚多。

觀察兩站的圖上 C 部分，池上站有 16 個異常區間，錦園站有 17 個異常區間。兩站的編號 1 異常區間，查附近時日並無地震發生。池上站編號 6 異常區間，前後皆無氡氣資料，但是經由錦園站資料輔助，可以發現其氣體異常是確定的。池上站的編號 7、9、16 異常區間及錦園站的編號 6、7、11、13 異常區間是有氣體異常但無相關地震。若是一個異常區間有多起地震發生，我們選擇規模較大的地震做為其與異常相關。以下分別就兩站的異常區間與對應的地震做一表格說明（表 7-2.10）。

這兩站的敏感反應範圍在臺灣東部及東南部，偶有中西部規模超過 5 以上大地震也會影響氡氣的變化。池上和錦園觀測站的相關地震事件如表 7-2.11 所示。地震分布圖及測站敏感反應範圍如圖 7-2.14 所示。

表 7-2.8：池上站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/28。

Channel	Zero Crossings	Extrema Counts	Mean Freq. [cycles/day]	Mean Period [day]	Power (%)
IMF_h1	14741	8189	10.45	0.10	0.00
IMF_h2	8725	4622	6.19	0.16	0.00
IMF_h3	4905	2530	3.48	0.29	0.00
IMF_h4	2911	1495	2.06	0.48	0.00
IMF_h5	1201	603	0.85	1.17	0.69
IMF_h6	686	350	0.49	2.05	2.60
IMF_h7	339	173	0.24	4.15	5.64
IMF_h8	165	85	0.12	8.50	10.16
IMF_h9	88	44	0.06	15.85	24.68
IMF_h10	46	23	0.03	30.02	14.71
IMF_h11	26	12	0.02	52.25	4.67
IMF_h12	16	7	0.01	82.99	3.80
IMF_h13	6	3	0.00	201.54	33.04
IMF_residual	0	1	0.00	1410.75	

表 7-2.9：錦園站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/9/5。

Channel	Zero Crossings	Extrema Counts	Mean Freq. [cycles/day]	Mean Period [day]	Power (%)
IMF_h1	13742	7614	10.62	0.09	0.00
IMF_h2	7940	4204	6.14	0.16	0.00
IMF_h3	4420	2268	3.42	0.29	0.00
IMF_h4	2592	1327	2.00	0.50	0.00
IMF_h5	1087	547	0.84	1.19	0.51
IMF_h6	632	318	0.49	2.04	1.51
IMF_h7	305	156	0.24	4.23	4.42
IMF_h8	154	77	0.12	8.35	11.87
IMF_h9	86	43	0.07	14.87	11.78
IMF_h10	39	19	0.03	32.34	16.48
IMF_h11	19	9	0.02	64.68	13.33
IMF_h12	7	4	0.01	161.70	18.50
IMF_h13	3	2	0.00	323.39	21.58
IMF_residual	0	1	0.00	1293.56	

表 7-2.10：池上站及錦園站異常區間編號與相關地震。

西元時間	規模	詳細資料	池上異常區間編號	錦園異常區間編號	震度	距測站 (km)	D/R
2012/12/3 01:45	5	花蓮縣吉安鄉				98.46	1.43
2012/12/4 21:33	3.7	台東縣近海			1	18.26	2.14
2012/12/20 06:00	3	台東縣成功鎮	2	2	2	14.98	1.30
2012/12/24 11:17	5	台灣東部海域		3		64.79	2.18
2012/12/31 00:03	5.3	高雄市桃源區	3	4		47.65	3.99
2013/1/17 13:09	4.3	台灣東部海域	4	5	1	30.70	2.30
2013/2/2 11:39	5.6	臺灣東部海域	4		2	102.79	2.49
2013/2/16 16:07	3.9	臺東縣近海			2	21.51	2.21
2013/2/20 23:20	4.5	臺東縣成功鎮	5	8	2	18.10	4.76
2013/2/21 00:02	3.5	臺東縣成功鎮			1	14.31	2.24
2013/3/4 16:42	4.6	臺東縣近海		9	3	22.57	4.21
2013/3/7 11:36	5.9	花蓮縣秀林鄉				133.58	2.58
2013/3/12 17:03	5	宜蘭縣近海	6	10		146.87	0.96
2013/3/27 10:03	6.2	南投縣仁愛鄉				86.70	5.35
2013/4/24 06:30	3.6	臺東縣近海	8	12	2	14.01	2.52
2013/5/17 05:15	4	臺東縣海端鄉	10		2	28.39	1.85
2013/5/26 03:57	3.4	臺東縣成功鎮			2	12.05	2.40
2013/6/2 13:43	6.5	南投縣仁愛鄉		14	3	85.13	7.33
2013/6/29 07:51	5.7	臺灣東部海域	11	15	1	138.16	2.04
2013/7/6 12:17	4.1	臺灣東部海域			2	32.30	1.79
2013/7/15 03:24	4.6	臺東縣海端鄉			2	35.80	2.66
2013/7/16 18:11	5.5	花蓮縣秀林鄉				131.04	1.77
2013/7/24 23:32	5	花蓮縣壽豐鄉	12	16		92.91	1.52
2013/7/25 17:12	3.9	花蓮縣卓溪鄉			3	4.52	10.52
2013/8/14 09:11	3.8	臺東縣近海			1	19.46	2.21
2013/9/4 03:24	3.9	臺灣東部海域	13		2	34.56	1.38
2013/9/5 16:48	4.5	臺灣東部海域			3	38.68	2.23
2013/9/11 07:15	4.6	臺灣東部海域			1	45.78	2.08
2013/9/19 20:18	3.7	臺東縣鹿野鄉	14		2	27.42	1.42
2013/10/14 20:54	3.5	臺東縣海端鄉	15		2	14.27	2.24
2013/10/31 20:02	6.3	花蓮縣瑞穗鄉	16		3	19.68	10.17

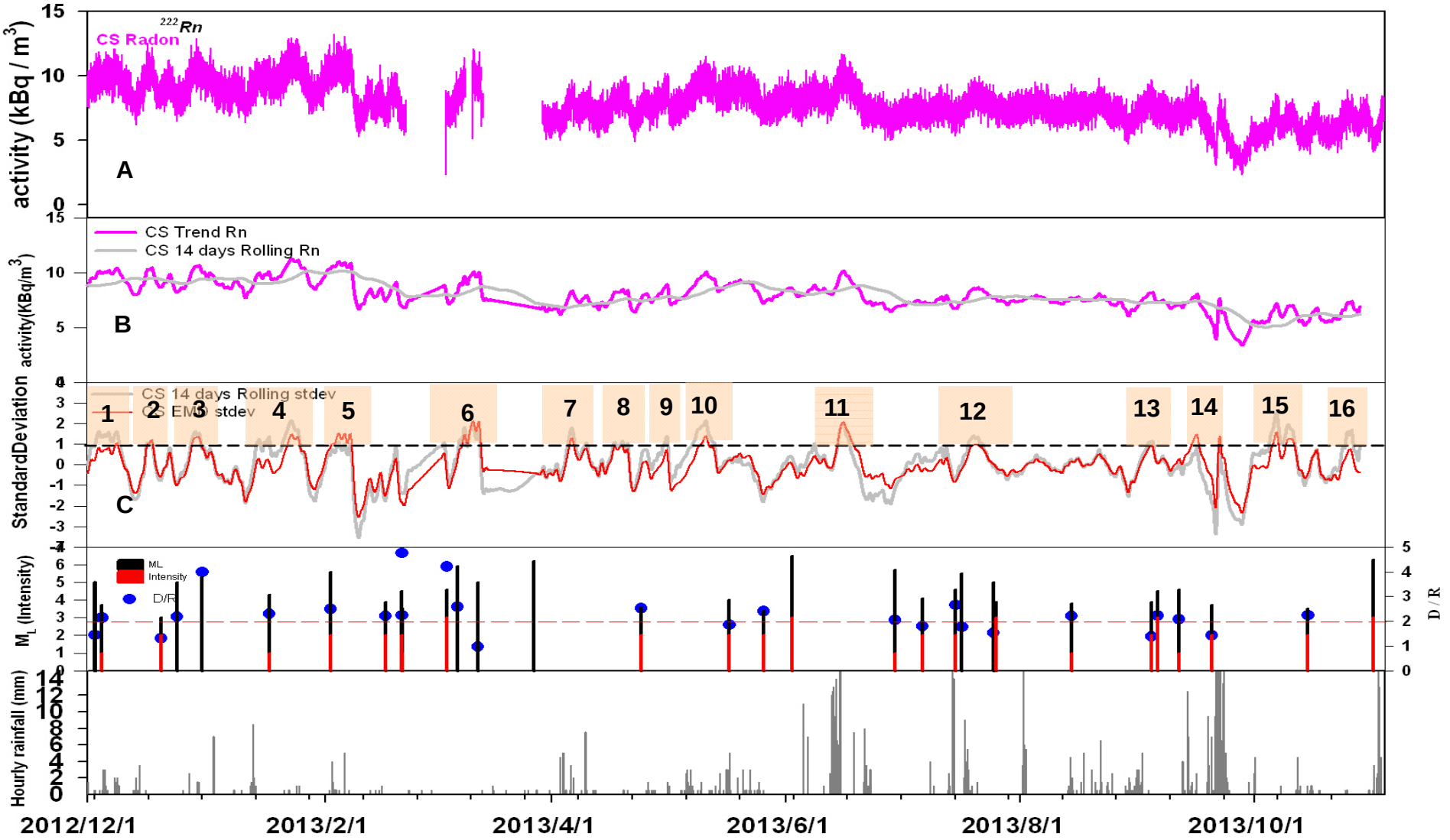


圖 7-2.12：池上站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果 (A) 原始數據 (B)疊代式高斯平滑法及 14 天滾動平均值的結果 (C) 經驗模態分解（IMF_6-IMF_{10}）及 14 天滾動平均值經程式處理後以 1 個標準差來表示其異常門檻；粉色框為氡氣異常區間。

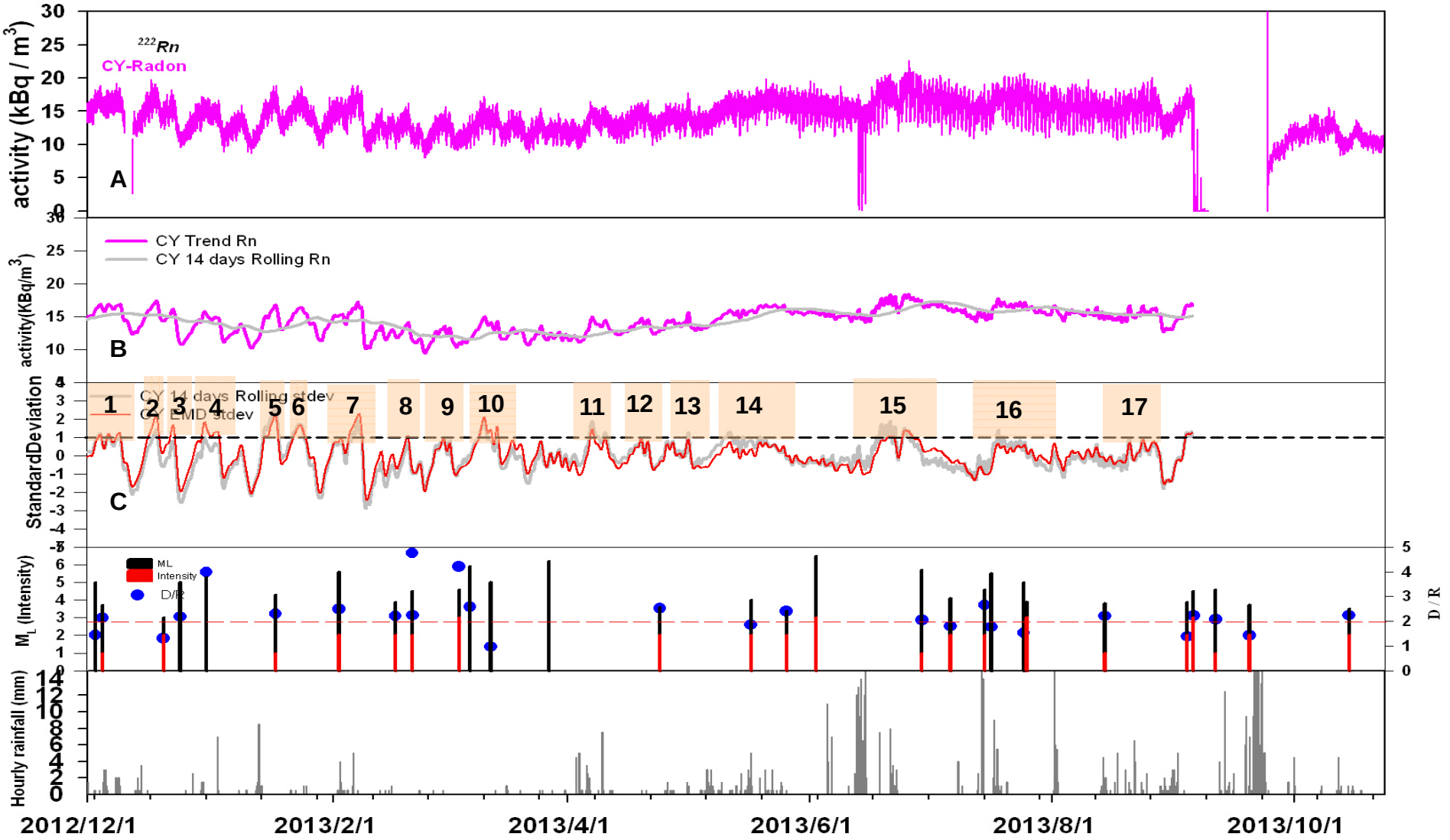


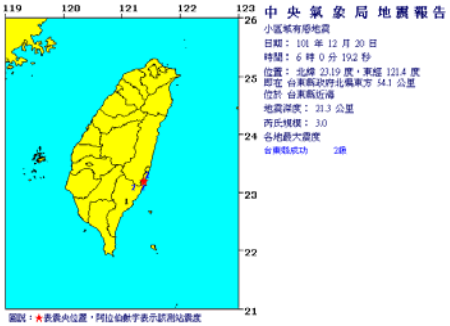
圖 7-2.13：錦園站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果（A）原始數據；（B）疊代式高斯平滑法及 14 天滾動平均值的結果；（C）經驗模態分解（IMF_6-IMF_{10}）及 14 天滾動平均值經程式處理後以 1 個標準差來表示其異常門檻；粉色框為氡氣異常區間。

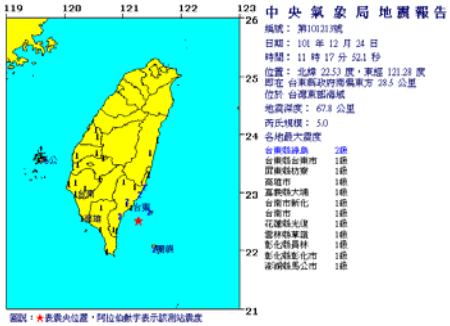
表 7-2.11：臺東池上及錦園觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/11/3），V 表示氣體異常與地震相關，下列地震報告圖為與表 7-2.11 相關。

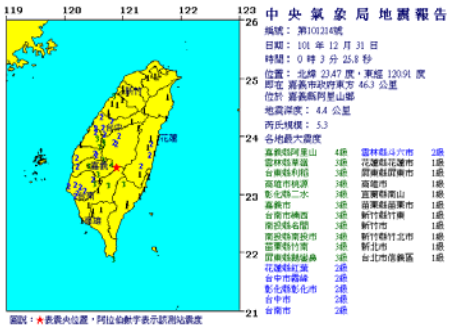
No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料	反應與否	震度	gal	距測站(km)	D/R
12-717	2012/12/3 01:45	5	121.55	23.97	11.8	花蓮縣政府西偏南方 7.5 公里(位於花蓮縣吉安鄉)				98.46	1.43
12-720	2012/12/4 21:33	3.7	121.34	23	36.2	台東縣政府東北方 33.0 公里(位於台東縣近海)		1		18.26	2.14
12-744	2012/12/20 06:00	3	121.37	23.17	21.3	台東縣政府北偏東方 51.2 公里(位於台東縣成功鎮)	V	2		14.98	1.30
12-752	2012/12/24 11:17	5	121.32	22.55	67.8	台東縣政府東南方 28.8 公里(位於台灣東部海域)	V			64.79	2.18
12-764	2012/12/31 00:03	5.3	120.93	23.46	4.4	嘉義市政府東方 49.1 公里(位於高雄市桃源區)	V			47.65	3.99
13-25	2013/1/17 13:09	4.3	121.3	22.86	42.6	台東縣政府東北方 19.5 公里(位於台灣東部海域)	V	1		30.70	2.30
13-56	2013/2/2 11:39	5.6	121.99	23.74	35	花蓮縣政府東南方 46.9 公里(位於臺灣東部海域)	V	2	2.99	102.79	2.49
13-81	2013/2/16 16:07	3.9	121.43	23.07	20.1	臺東縣政府東北方 44.9 公里(位於臺東縣近海)		2		21.51	2.21
13-96	2013/2/20 23:20	4.5	121.39	23.2	20	臺東縣政府北偏東方 54.4 公里(位於臺東縣成功鎮)	V	2	4.61	18.10	4.76
13-97	2013/2/21 00:02	3.5	121.34	23.21	18.9	臺東縣政府北偏東方 54.2 公里(位於臺東縣成功鎮)		1		14.31	2.24
13-113	2013/3/4 16:42	4.6	121.38	23	23.7	臺東縣政府東北方 35.7 公里(位於臺東縣近海)	V	3	22.01	22.57	4.21
13-122	2013/3/7 11:36	5.9	121.49	24.31	5.6	花蓮縣政府北偏西方 37.5 公里(位於花蓮縣秀林鄉)				133.58	2.58
13-162	2013/3/12 17:03	5	121.8	24.35	51.9	宜蘭縣政府南方 41.9 公里(位於宜蘭縣近海)	V			146.87	0.96
13-193	2013/3/27 10:03	6.2	121.07	23.9	19.4	南投縣政府東方 38.8 公里(位於南投縣仁愛鄉)				86.70	5.35
13-239	2013/4/24 06:30	3.6	121.36	23.09	20.2	臺東縣政府北偏東方 42.8 公里(位於臺東縣近海)	V	2		14.01	2.52
13-265	2013/5/17 05:15	4	120.96	23.19	5.8	臺東縣政府北偏西方 52.1 公里(位於臺東縣海端鄉)	V	2	3.29	28.39	1.85
13-299	2013/5/26 03:57	3.4	121.31	23.05	19.1	臺東縣政府北偏東方 36.3 公里(位於臺東縣成功鎮)		2		12.05	2.40
13-312	2013/6/2 13:43	6.5	121	23.87	14.5	南投縣政府東方 32.0 公里(位於南投縣仁愛鄉)	V	3	21	85.13	7.33
13-359	2013/6/29 07:51	5.7	122.17	24.03	19.8	花蓮縣政府東方 56.0 公里(位於臺灣東部海域)	V	1	1.44	138.16	2.04
13-369	2013/7/6 12:17	4.1	121.32	22.85	21.2	臺東縣政府東偏北方 20.4 公里(位於臺灣東部海域)		2	3.53	32.30	1.79
13-377	2013/7/15 03:24	4.6	120.92	22.98	1.7	臺東縣政府西北方 34.0 公里(位於臺東縣海端鄉)		2	4.31	35.80	2.66
13-383	2013/7/16 18:11	5.5	121.54	24.28	4.9	花蓮縣政府北偏西方 32.6 公里(位於花蓮縣秀林鄉)				131.04	1.77
13-397	2013/7/24 23:32	5	121.54	23.92	10.6	花蓮縣政府西南方 11.4 公里(位於花蓮縣壽豐鄉)	V			92.91	1.52
13-401	2013/7/25 17:12	3.9	121.2	23.16	10.6	臺東縣政府北方 45.3 公里(位於花蓮縣卓溪鄉)		3	10.17	4.52	10.52

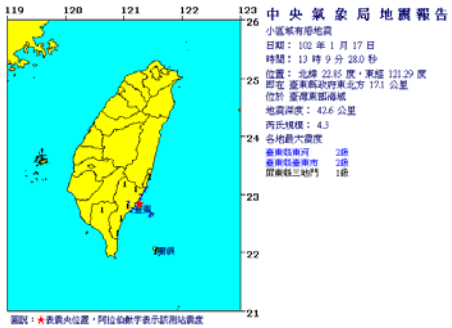
續表 7-2.11

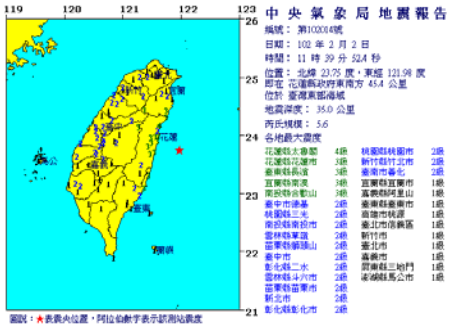
No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料	反應與否	震度	gal	距測站(km)	D/R
13-430	2013/8/14 09:11	3.8	121.42	23.12	21.8	臺東縣政府東北方 48.3 公里(位於臺東縣近海)		1		19.46	2.21
13-456	2013/9/4 03:24	3.9	121.4	22.86	23.1	臺東縣政府東偏北方 27.7 公里(位於臺灣東部海域)	V	2		34.56	1.38
13-461	2013/9/5 16:48	4.5	121.54	22.93	23.2	臺東縣政府東偏北方 44.5 公里(位於臺灣東部海域)		3	8.43	38.68	2.23
13-468	2013/9/11 07:15	4.6	121.38	22.74	31.9	臺東縣政府東方 24.0 公里(位於臺灣東部海域)		1		45.78	2.08
13-481	2013/9/19 20:18	3.7	121.13	22.9	17.5	臺東縣政府北方 16.0 公里(位於臺東縣鹿野鄉)	V	2	2.93	27.42	1.42
13-512	2013/10/14 20:54	3.5	121.13	23.04	7.2	臺東縣政府北方 31.5 公里(位於臺東縣海端鄉)	V	2		14.27	2.24
13-536	2013/10/31 20:02	6.3	121.42	23.55	19.5	花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里(位於花蓮縣瑞穗鄉)	V	3	19.68	50.34	10.17

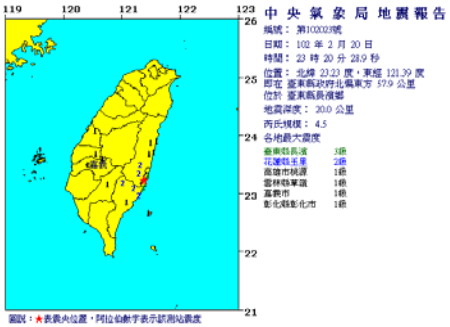


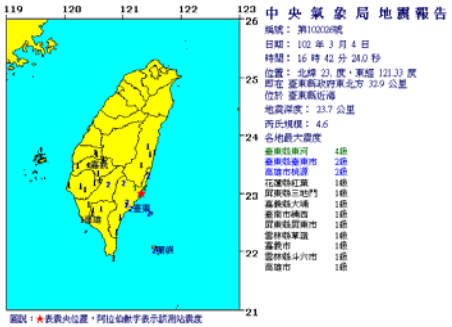


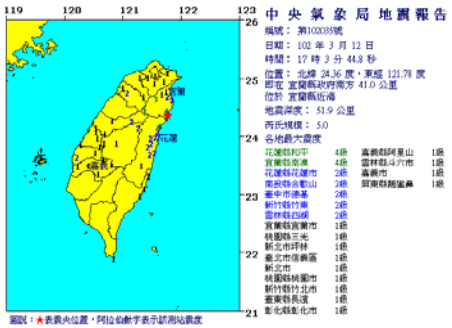


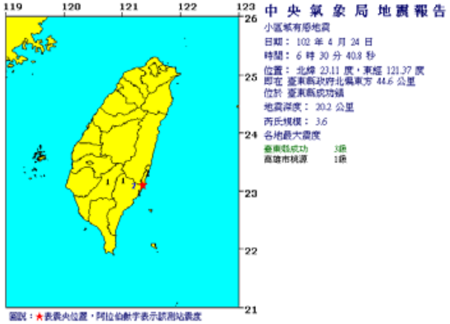


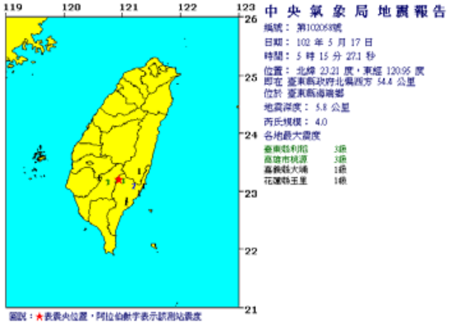


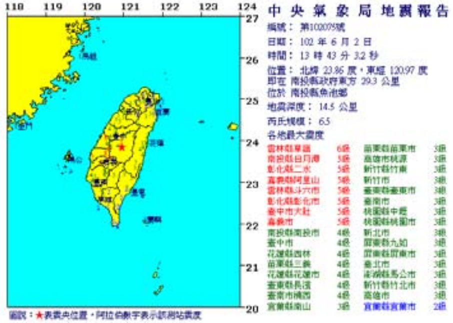


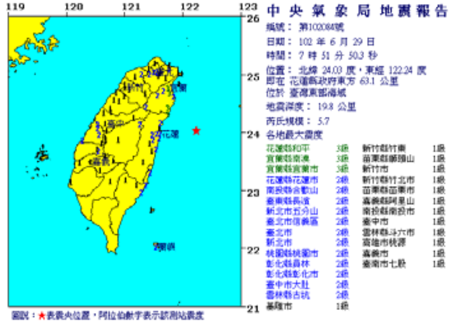


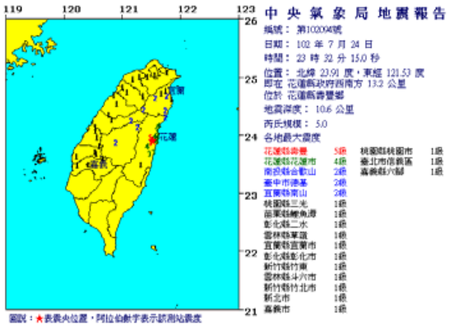


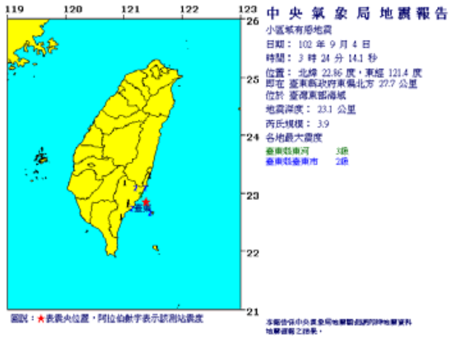

中央氣象局地震報告
小區域有感地震
日期： 102 年 4 月 24 日
時間： 6 時 30 分 40.8 秒
位置： 北緯 23.11 度，東經 121.37 度
即在 臺東縣政府北偏東方 44.6 公里
位於 臺東縣成功鎮
地震深度： 20.2 公里
芮氏規模： 3.6
各地最大震度
臺東縣成功 3級
高雄市桃源 1級
圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

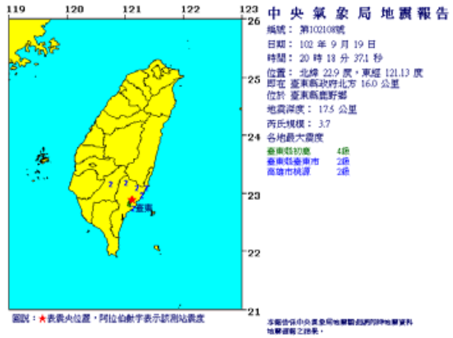

中央氣象局地震報告
編號： 第102063號
日期： 102 年 5 月 17 日
時間： 5 時 15 分 27.1 秒
位置： 北緯 23.21 度，東經 120.95 度
即在 臺東縣政府北偏西方 54.4 公里
位於 臺東縣海端鄉
地震深度： 5.8 公里
芮氏規模： 4.0
各地最大震度
臺東縣利稻 3級
高雄市桃源 3級
嘉義縣大埔 1級
花蓮縣玉里 1級
圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

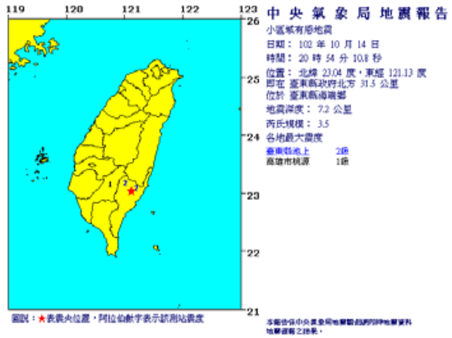

中央氣象局地震報告
編號： 第102075號
日期： 102 年 6 月 2 日
時間： 13 時 43 分 3.2 秒
位置： 北緯 23.86 度，東經 120.97 度
即在 南投縣政府東方 29.3 公里
位於 南投縣魚池鄉
地震深度： 14.5 公里
芮氏規模： 6.5
各地最大震度
雲林縣草嶺 6級
南投縣日月潭 5級
彰化縣二水 5級
嘉義縣阿里山 5級
雲林縣斗六市 5級
彰化縣彰化市 5級
苗栗縣苗栗市 3級
高雄市桃源 3級
新竹縣竹東 3級
新竹市 3級
臺東縣臺東市 3級
臺南市 3級
臺南市楠西 4級
宜蘭縣南山 3級
高雄市 3級
宜蘭縣宜蘭市 2級
圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

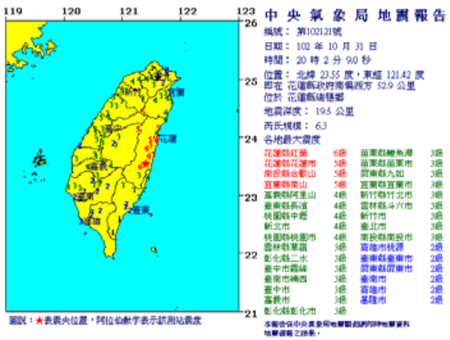

中央氣象局地震報告
編號： 第102084號
日期： 102 年 6 月 29 日
時間： 7 時 51 分 50.3 秒
位置： 北緯 24.03 度，東經 122.24 度
即在 花蓮縣政府東方 63.1 公里
位於 臺灣東部海域
地震深度： 19.8 公里
芮氏規模： 5.7
各地最大震度
花蓮縣和平 3級
宜蘭縣南澳 3級
宜蘭縣宜蘭市 3級
花蓮縣花蓮市 2級
南投縣合歡山 2級
臺東縣長濱 2級
新竹縣竹東 1級
苗栗縣獅潭山 1級
新竹市 1級
新竹縣竹北市 1級
苗栗縣苗栗市 1級
嘉義縣阿里山 1級
雲林縣古坑 2級
基隆市 1級
圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度


中央氣象局地震報告
編號： 第102094號
日期： 102 年 7 月 24 日
時間： 23 時 32 分 15.0 秒
位置： 北緯 23.91 度，東經 121.53 度
即在 花蓮縣政府西南方 13.2 公里
位於 花蓮縣壽豐鄉
地震深度： 10.6 公里
芮氏規模： 5.0
各地最大震度
花蓮縣壽豐 5級
花蓮縣花蓮市 4級
南投縣合歡山 2級
臺中市德基 2級
宜蘭縣南山 2級
桃園縣三光 1級
桃園縣桃園市 1級
臺北市信義區 1級
嘉義縣六腳 1級
嘉義市 1級
圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度


中央氣象局地震報告
小區域有感地震
日期： 102 年 9 月 4 日
時間： 3 時 24 分 14.1 秒
位置： 北緯 22.86 度，東經 121.4 度
即在 臺東縣政府東偏北方 27.7 公里
位於 臺灣東部海域
地震深度： 23.1 公里
芮氏規模： 3.9
各地最大震度
臺東縣東河 3級
臺東縣臺東市 2級
圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度


中央氣象局地震報告
編號： 第102108號
日期： 102 年 9 月 19 日
時間： 20 時 18 分 37.1 秒
位置： 北緯 22.9 度，東經 121.13 度
即在 臺東縣政府北方 16.0 公里
位於 臺東縣鹿野鄉
地震深度： 17.5 公里
芮氏規模： 3.7
各地最大震度
臺東縣初鹿 4級
臺東縣臺東市 2級
高雄市桃源 2級
圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度


中央氣象局地震報告
小區域有感地震
日期： 102 年 10 月 14 日
時間： 20 時 54 分 10.8 秒
位置： 北緯 23.04 度，東經 121.13 度
即在 臺東縣政府北方 31.5 公里
位於 臺東縣海端鄉
地震深度： 7.2 公里
芮氏規模： 3.5
各地最大震度
臺東縣池上 2級
高雄市桃源 1級
圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度


中央氣象局地震報告
編號： 第102121號
日期： 102 年 10 月 31 日
時間： 20 時 2 分 9.0 秒
位置： 北緯 23.55 度，東經 121.42 度
即在 花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里
位於 花蓮縣瑞穗鄉
地震深度： 19.5 公里
芮氏規模： 6.3
各地最大震度
花蓮縣紅葉 6級
花蓮縣花蓮市 5級
南投縣合歡山 5級
宜蘭縣南山 5級
嘉義縣阿里山 4級
臺東縣長濱 4級
苗栗縣鯉魚潭 3級
苗栗縣苗栗市 3級
屏東縣九如 3級
宜蘭縣宜蘭市 3級
新竹縣竹北市 3級
雲林縣斗六市 3級
圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

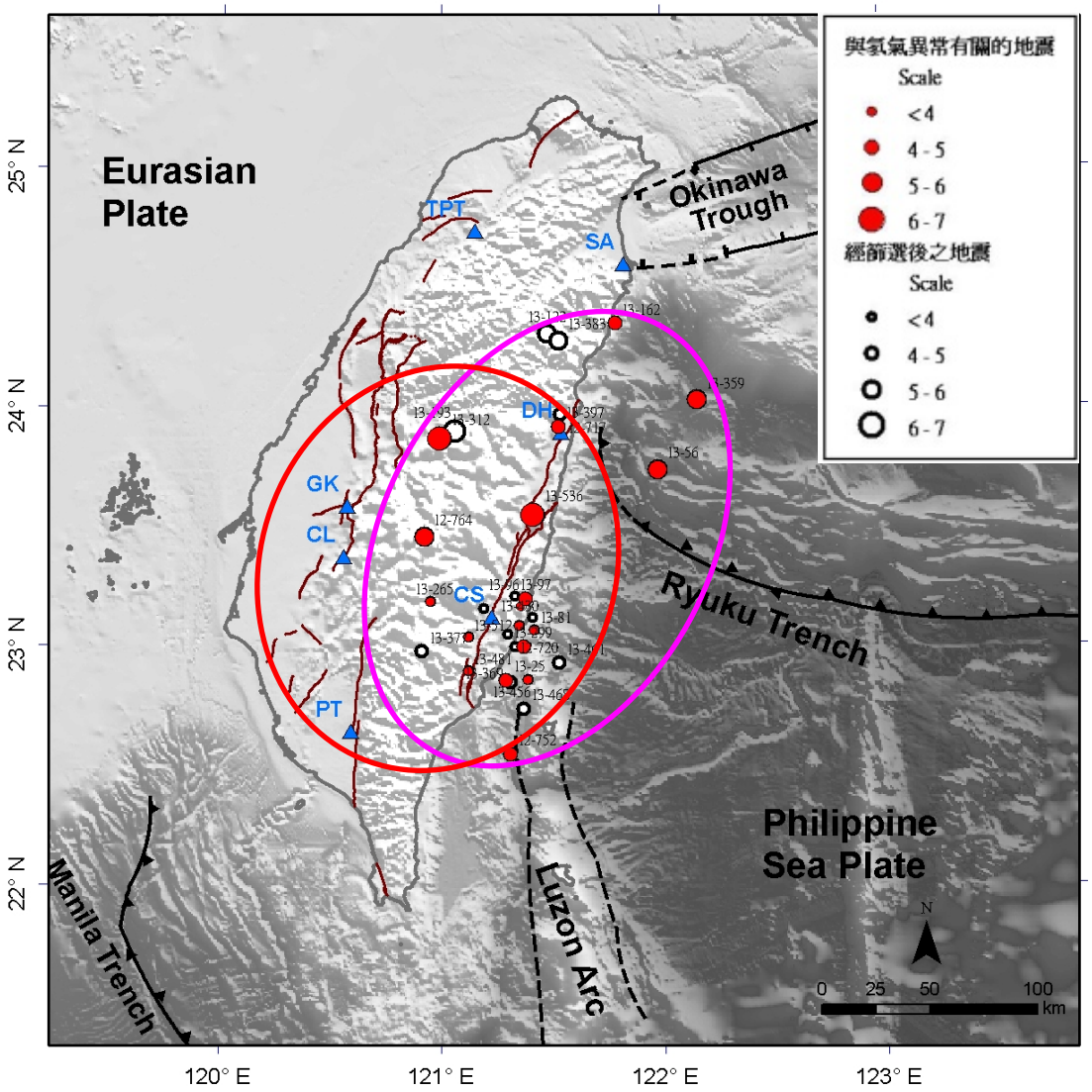


圖 7-2.14：池上及錦園觀測站相關地震位置分布圖。粉色圈為本年度有前兆反應之地震分布，紅圈為池上站已建立的敏感偵測區間範圍。

7-2-5 花蓮土壤氣體觀測站

東華觀測站

圖 7-2.15 是花蓮東華觀測站 2012/12/1-2013/11/30 氡氣觀測與地震、雨量的相關圖。詳細每月的分月圖表請參考附錄（圖 7-1.53 至圖 7-1.65）。其中雨量數據是採用中央氣象局自動氣象站（距離測站較近的花蓮吳全城氣象站）的時雨量資料。此站設置方式為將氣體導入迴圈裝置內，迴圈內放置一被動式氡氣分析儀（Soil Probe），迴圈外面接一主動式氡氣分析儀（RTM2200），兩組分析儀皆分析迴圈內之氡氣，由下圖觀之，分析後的氡氣結果是一致的，研判已無在此多放儀器之必要，故在 7 月 3 日移除被動式氡氣分析儀以備他用。圖上兩處粉色框肇因於氣體乾燥器故障，氣體沒有進到迴圈內供氡氣分析儀分析，氡氣分析儀只能繼續分析迴圈內的殘餘氣體，在修復之後氡氣即恢復原先的背景值。

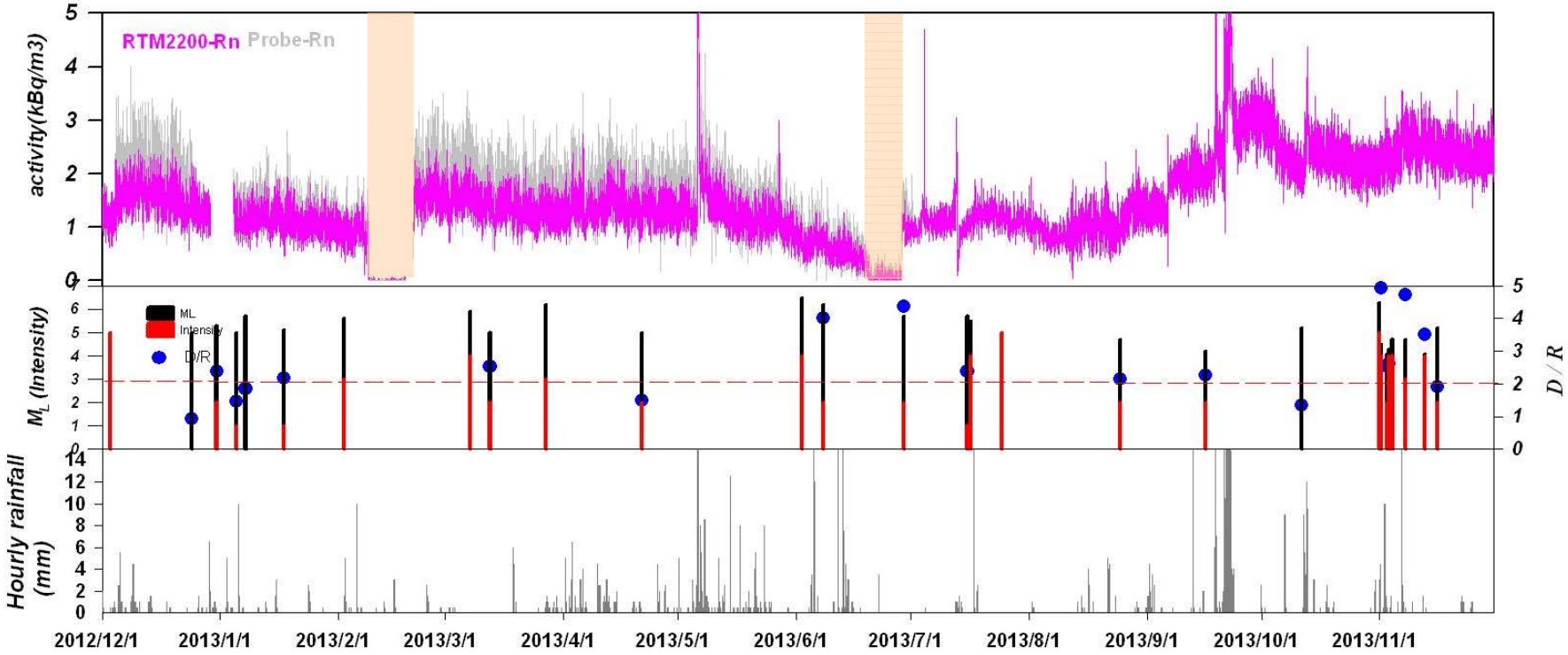


圖 7-2.15：花蓮東華觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。粉色框表示氡氣變化受到儀器影響。

此觀測站有兩組氡氣分析儀，由於兩台儀器所觀測的結果相近，因此，在此以主動式氡氣分析儀的資料進行分析處理，圖 7-2.16 為土壤氡氣與雨量、地震的關係圖。利用 EMD 拆解原始訊號，得到 14 個內部模態函數（IMF）如表 7-2.12。選擇周期在 1.5 至 38 天的 IMF_7（周期為 1.38 天）至 IMF_{12}（周期為 40.42 天）等 6 個內部模態函數（表 7-2.12 粗體字所示）。將 6 個 IMF 相加後，得到去雜訊及去趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析，以 1 個標準差作為異常門檻。以疊代式高斯平滑曲線與 14 天滾動平均線相減後，再將數值標準化，以 1.5 個標準差作為異常門檻。（圖 7-2.16 C 所示）

表 7-2.12：東華站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/10/28。

Channel	Zero Crossings	Extrema Counts	Mean Freq. [cycles/day]	Mean Period [day]	Power (%)
IMF_h1	18721	10822	25.73	0.04	0.00
IMF_h2	11809	6482	16.23	0.06	0.00
IMF_h3	6839	3611	9.40	0.11	0.00
IMF_h4	3741	1936	5.14	0.19	0.00
IMF_h5	2031	1028	2.79	0.36	0.00
IMF_h6	1087	566	1.50	0.67	0.00
IMF_h7	527	267	0.73	1.38	1.41
IMF_h8	271	135	0.37	2.68	1.90
IMF_h9	139	69	0.19	5.20	2.20
IMF_h10	67	35	0.09	10.70	4.53
IMF_h11	38	19	0.05	18.66	5.22
IMF_h12	17	8	0.02	40.42	6.88
IMF_h13	10	5	0.02	66.15	29.83
IMF_h14	3	3	0.01	181.91	48.02
IMF_residual	0	0	0.00	727.63	

此站氡氣分析結果是屬於低濃度的狀態，氡氣濃度約在 3K Bq/m3 上下，少有大幅度的變化，多為高頻的雜訊為主。因此，由原始數據來直接辨識出氡氣與地震的關聯是相當困難的。利用上述的時序分析分法，可幫助我們釐清細微的氡氣變化與地震的關係。由圖 7-2.16 C 所示。

這段時間有 12 個異常區間，編號 2、4、8 異常區間，由於資料短缺或是受儀器故障影響，在不確定氡氣變化的情形下，我們暫且排除其與地震的關聯。編號 6、12 異常區間，觀察當時的雨量紀錄，研判應是受到大雨影響所致；編號 7 異常區間，應是儀器突波所造成的異常，與氣體無關。其餘異常區間皆可與後續發生的地震進行其相關性連結。編號 1 異常區間所對應的地震是 12 月 24 日發生於臺東外海，規模 5，不過此起地震距離測站超過 150 Km，且當地亦無震度，此異常區間是否是這起地震的前兆反應時間，仍需其他資料輔助才能明瞭；編號 3 異常區間所對應的地震是 2 月 2 日發生於花蓮外海，規模 5.6；編號 5 異常區間所對應的地震是 4 月 21 日發生於宜蘭外海，規模 5；編號 9 異常區間所對應的地震有兩起，分別是 8 月 24 日發生於南投仁愛，規模 4.7 及 9 月 3 日發生於花蓮秀林，規模 3.9；編號 10 異常區間所對應的地震是 9 月 16 日發生於花蓮近海，規模 4.2。編號 11 異常區間，由原始數據來看，自 8 月 20 日開始氡氣即往上升，到 9 月 29 日達到高點即往下降，由於上升是在降雨前，且扣除掉雨量的影響這仍是很明顯的一個氣體異常變化，這段時間有三起規模超過 5 的地震可能與其土壤氡氣的變化有關，一是 10 月 11 日發生於新北汐止，規模 5.2；一起是 10 月 14 日發生於花蓮外海，規模 5.1；另一起則是 10 月 31 日發生於花蓮瑞穗，規模 6.3，

其中汐止地震深度超過 140KM，無法肯定是否與測站氣體異常有關；花蓮外海地震則是距測站超過 150KM，超過測站目前的敏感反應範圍，因此也可初步予以排除；最後，發生於花蓮瑞穗的地震與測站同樣位在花東縱谷內且距離不遠，推測這段時間的氣體異常很有可能與該地震有關，不過，由於本次氣體異常持續了相當長的時間，在過去其他觀測站的結果中也鮮少出現類似情形。若為前兆則可能意味著這段時間為該地震的孕育期，可反應東部縱谷地區大地震發生前的獨特行為。

然而，本測站目前僅有一年左右的觀測結果，對於本站的氣體異常和地震活動的關聯性，尚未能了解透徹，但本次的結果可能意味著東華站對於花東縱谷地區的地震或斷層活動較為敏感，這需要未來繼續收集資料來予以佐證。

此東華站的敏感反應範圍主要為臺灣東部地區，對於中部地區規模超過 5 的地震亦可能有反應。東華觀測站相關地震列表，如表 7-2.13。地震分布圖及測站敏感反應範圍，如圖 7-2.17。

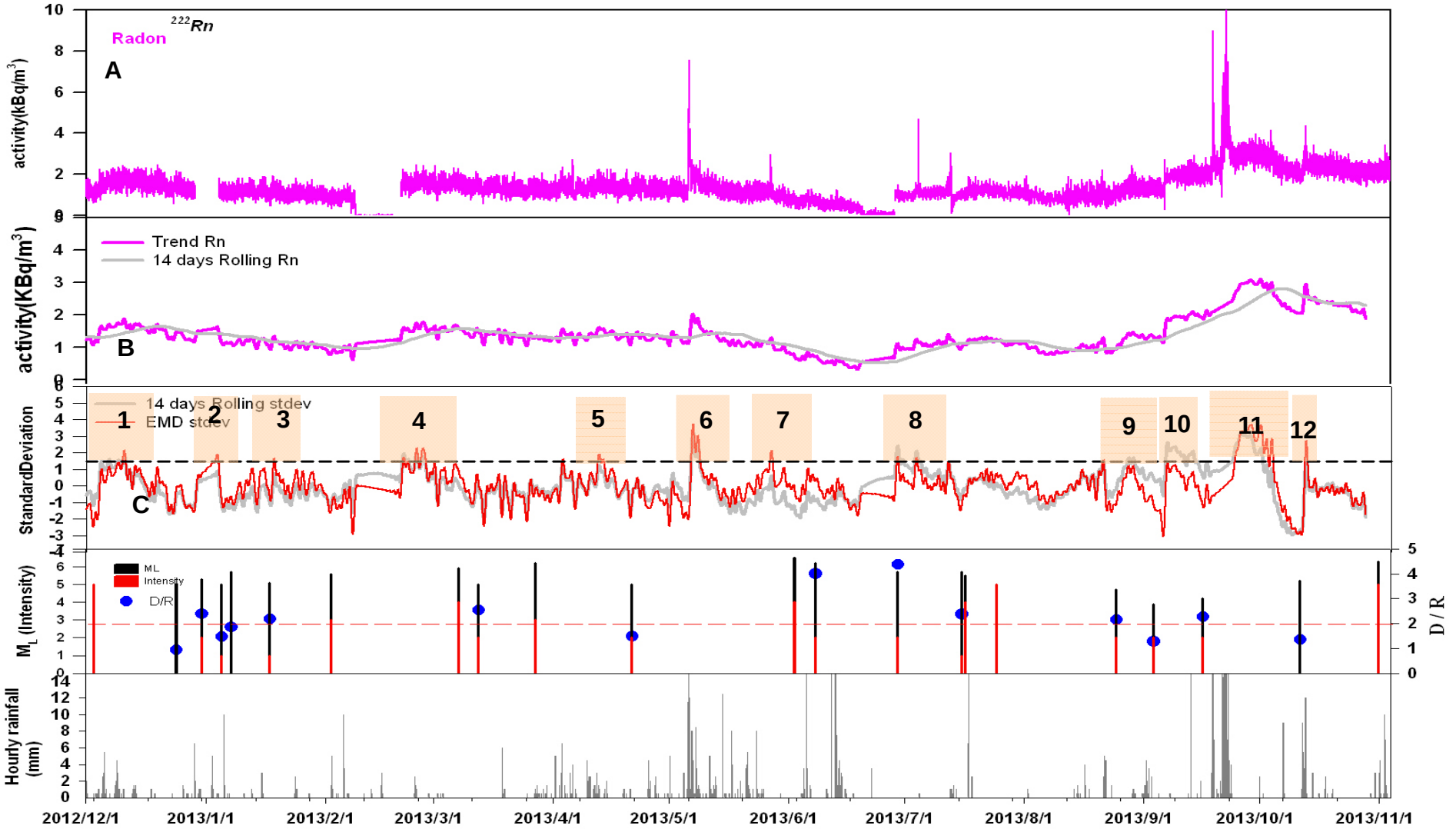
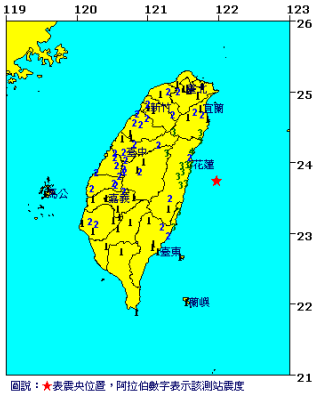


圖 7-2.16：東華站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果（A）原始數據；（B）疊代式高斯平滑法及 14 天滾動平均值的結果；（C）經驗模態分解（IMF_7-IMF_{12}）及 14 天滾動平均值經程式處理後以 1.5 個標準差來表示其異常門檻；粉色框為氡氣異常區間。

表 7-2.13：花蓮東華觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/11/3），V 表示氣體異常與地震有相關性，下列地震報告圖為與表 7-2.13 相關。

No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料	反應與否	震度	gal	距測站(km)	D/R
12-717	2012/12/3 01:45	5	121.55	23.97	11.8	花蓮縣政府西偏南方 7.5 公里(位於花蓮縣吉安鄉)		5	104.6	7.74	18.25
12-752	2012/12/24 11:17	5	121.32	22.55	67.8	台東縣政府東南方 28.8 公里(位於台灣東部海域)				151.13	0.93
12-764	2012/12/31 00:03	5.3	120.93	23.46	4.4	嘉義市政府東方 49.1 公里(位於高雄市桃源區)		2	2.69	79.72	2.38
13-13	2013/1/5 04:38	5	122.43	24.22	71.4	花蓮縣政府東偏北方 85.6 公里(位於台灣東部海域)		1	2.03	96.13	1.47
13-16	2013/1/7 14:49	5.7	122.96	24.38	69.4	宜蘭縣政府東偏南方 127.7 公里(位於台灣東部海域)				152.64	1.85
13-27	2013/1/17 16:30	5.1	121.9	24.46	13.7	宜蘭縣政府南偏東方 33.0 公里(位於宜蘭縣近海)		1	1.97	71.40	2.18
13-56	2013/2/2 11:39	5.6	121.99	23.74	35	花蓮縣政府東南方 46.9 公里(位於臺灣東部海域)	V	3	11.55	48.14	5.32
13-122	2013/3/7 11:36	5.9	121.49	24.31	5.6	花蓮縣政府北偏西方 37.5 公里(位於花蓮縣秀林鄉)		4	48.15	45.75	7.53
13-162	2013/3/12 17:03	5	121.8	24.35	51.9	宜蘭縣政府南方 41.9 公里(位於宜蘭縣近海)		2	5.14	55.87	2.53
13-193	2013/3/27 10:03	6.2	121.07	23.9	19.4	南投縣政府東方 38.8 公里(位於南投縣仁愛鄉)		3	20.46	48.81	9.50
13-236	2013/4/21 11:07	5	122.33	24.38	70.6	宜蘭縣政府東偏南方 69.2 公里(位於臺灣東部海域)	V	2	3.17	95.32	1.48
13-312	2013/6/2 13:43	6.5	121	23.87	14.5	南投縣政府東方 32.0 公里(位於南投縣仁愛鄉)		4	29.13	56.03	11.13
13-321	2013/6/8 00:38	6.2	122.69	23.88	35.3	花蓮縣政府東方 109.9 公里(位於臺灣東部海域)		2	4.01	115.95	4.00
13-359	2013/6/29 07:51	5.7	122.17	24.03	19.8	花蓮縣政府東方 56.0 公里(位於臺灣東部海域)		2	3.77	64.63	4.37
13-380	2013/7/15 21:41	5.7	122.69	23.66	40	花蓮縣政府東偏南方 115.3 公里(位於臺灣東部海域)		1	1.68	119.02	2.37
13-383	2013/7/16 18:11	5.5	121.54	24.28	4.9	花蓮縣政府北偏西方 32.6 公里(位於花蓮縣秀林鄉)		4	31.22	42.04	5.51
13-397	2013/7/24 23:32	5	121.54	23.92	10.6	花蓮縣政府西南方 11.4 公里(位於花蓮縣壽豐鄉)		5	83.26	2.43	58.02
13-439	2013/8/24 22:46	4.7	121.07	23.89	18.9	南投縣政府東方 38.8 公里(位於南投縣仁愛鄉)	V	2	3.23	48.82	2.15
13-453	2013/9/3 14:24	3.9	121.62	24.23	22.4	花蓮縣政府北方 26.4 公里(位於花蓮縣秀林鄉)	V	2	3.59	37.18	1.28
13-476	2013/9/16 09:16	4.2	121.67	24.13	10.2	花蓮縣政府北偏東方 16.5 公里(位於花蓮縣近海)	V	2	2.87	28.21	2.27
13-506	2013/10/11 12:45	5.2	121.61	25.05	142.6	臺北市政府東偏北方 4.8 公里(位於新北市汐止區)				127.34	1.35
13-511	2013/10/14 01:20	5.1	122.79	23.03	31.9	花蓮縣政府東南方 159.7 公里(位於臺灣東部海域)		1		158.93	0.98
13-536	2013/10/31 20:02	6.3	121.42	23.55	19.5	花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里(位於花蓮縣瑞穗鄉)	V	5	230.5	40.91	12.51



圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102014號

日期： 102 年 2 月 2 日

時間： 11 時 39 分 52.4 秒

位置： 北緯 23.75 度，東經 121.98 度

即在 花蓮縣政府東南方 45.4 公里

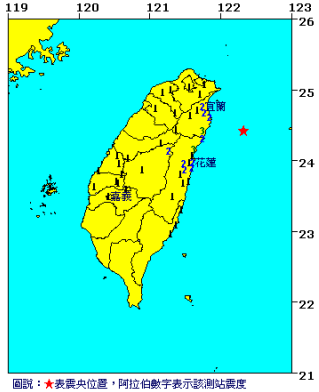
位於 臺灣東部海域

地震深度： 35.0 公里

芮氏規模： 5.6

各地最大震度

花蓮縣太魯閣	4級	桃園縣桃園市	2級
花蓮縣花蓮市	3級	新竹縣竹北市	2級
臺東縣長濱	3級	臺南市臺化	2級
宜蘭縣南澳	3級	宜蘭縣宜蘭市	1級
南投縣合歡山	3級	嘉義縣阿里山	1級
臺中市德基	2級	臺東縣臺東市	1級
桃園縣三光	2級	高雄市桃源	1級
南投縣南投市	2級	臺北市信義區	1級
雲林縣草嶺	2級	新竹市	1級
苗栗縣獅頭山	2級	臺北市	1級
臺中市	2級	嘉義市	1級
彰化縣二水	2級	屏東縣三地門	1級
雲林縣斗六市	2級	澎湖縣馬公市	1級
苗栗縣苗栗市	2級		
新北市	2級		
彰化縣彰化市	2級		



圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102055號

日期： 102 年 4 月 21 日

時間： 11 時 7 分 51.8 秒

位置： 北緯 24.41 度，東經 122.34 度

即在 宜蘭縣政府東偏南方 67.8 公里

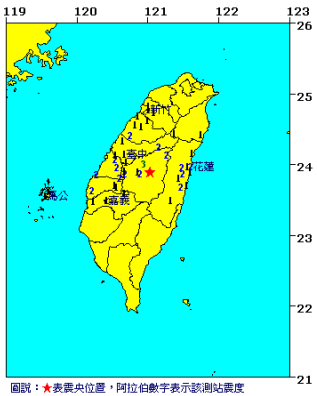
位於 臺灣東部海域

地震深度： 70.6 公里

芮氏規模： 5.0

各地最大震度

宜蘭縣南澳	3級		
花蓮縣太魯閣	3級		
宜蘭縣宜蘭市	2級		
花蓮縣花蓮市	2級		
南投縣合歡山	2級		
新北市坪林	1級		
桃園縣三光	1級		
臺北市信義區	1級		
臺中市德基	1級		
桃園縣桃園市	1級		
新竹縣竹東	1級		
臺東縣長濱	1級		
彰化縣彰化市	1級		
雲林縣草嶺	1級		
雲林縣斗六市	1級		
嘉義市	1級		



圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102099號

日期： 102 年 8 月 24 日

時間： 22 時 46 分 43.8 秒

位置： 北緯 23.89 度，東經 121.04 度

即在 南投縣政府東方 35.7 公里

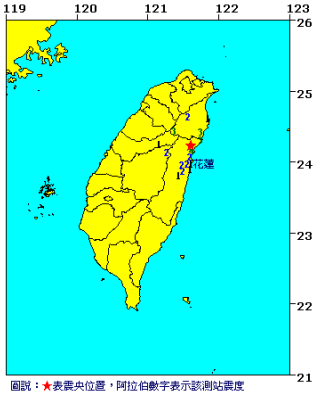
位於 南投縣仁愛鄉

地震深度： 18.9 公里

芮氏規模： 4.7

各地最大震度

南投縣埔里	3級	新竹市	1級
臺中市德基	2級	新竹縣竹北市	1級
彰化縣二水	2級	澎湖縣馬公市	1級
花蓮縣銅門	2級		
彰化縣彰化市	2級		
花蓮縣花蓮市	2級		
苗栗縣三義	2級		
雲林縣四湖	2級		
南投縣南投市	1級		
臺中市	1級		
雲林縣斗六市	1級		
宜蘭縣南山	1級		
嘉義市	1級		
苗栗縣苗栗市	1級		
新竹縣竹東	1級		
嘉義縣六腳	1級		



圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102103號

日期： 102 年 9 月 3 日

時間： 14 時 24 分 6.1 秒

位置： 北緯 24.23 度，東經 121.62 度

即在 花蓮縣政府北方 26.4 公里

位於 花蓮縣秀林鄉

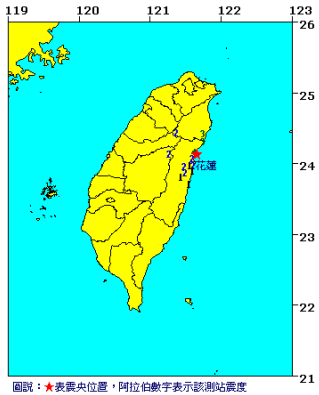
地震深度： 22.4 公里

芮氏規模： 3.9

各地最大震度

花蓮縣太魯閣	4級		
宜蘭縣南澳	3級		
南投縣合歡山	2級		
花蓮縣花蓮市	1級		
臺中市德基	1級		

本報告係中央氣象局地震觀測網即時地震資料地震速報之結果。



圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102106號

日期： 102 年 9 月 16 日

時間： 9 時 16 分 57.4 秒

位置： 北緯 24.13 度，東經 121.67 度

即在 花蓮縣政府北偏東方 16.5 公里

位於 花蓮縣近海

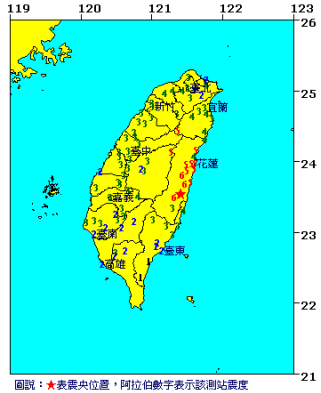
地震深度： 10.2 公里

芮氏規模： 4.2

各地最大震度

花蓮縣太魯閣	4級		
宜蘭縣南澳	3級		
花蓮縣花蓮市	2級		
南投縣合歡山	2級		

本報告係中央氣象局地震觀測網即時地震資料地震速報之結果。



圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

中 央 氣 象 局 地 震 報 告

編號： 第102121號

日期： 102 年 10 月 31 日

時間： 20 時 2 分 9.0 秒

位置： 北緯 23.55 度，東經 121.42 度

即在 花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里

位於 花蓮縣瑞穗鄉

地震深度： 19.5 公里

芮氏規模： 6.3

各地最大震度

花蓮縣紅葉	6級	苗栗縣鯉魚潭	3級
花蓮縣花蓮市	5級	苗栗縣苗栗市	3級
南投縣合歡山	5級	屏東縣九如	3級
宜蘭縣南山	5級	宜蘭縣宜蘭市	3級
嘉義縣阿里山	4級	新竹縣竹北市	3級
臺東縣長濱	4級	雲林縣斗六市	3級
桃園縣中壢	4級	新竹市	3級
新北市	4級	臺北市	3級
桃園縣桃園市	4級	南投縣南投市	3級
雲林縣草嶺	3級	高雄市桃源	2級
彰化縣二水	3級	臺東縣臺東市	2級
臺中市霧峰	3級	屏東縣屏東市	2級
臺南市楠西	3級	臺南市	2級
臺中市	3級	高雄市	2級
嘉義市	3級	基隆市	2級
彰化縣彰化市	3級		

本報告係中央氣象局地震觀測網即時地震資料地震速報之結果。

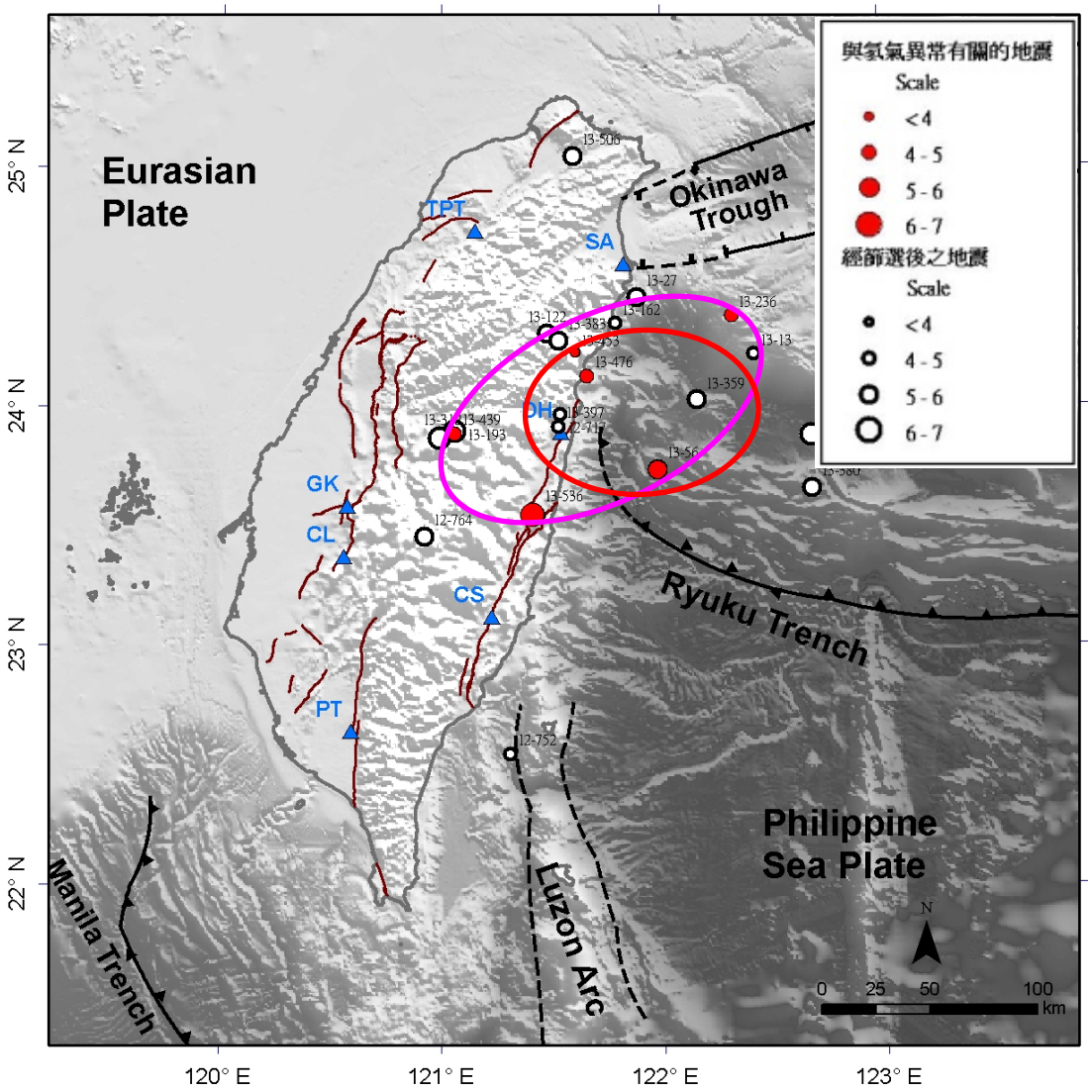


圖 7-2.17：東華觀測站相關地震位置分布圖。粉色圈為本年度有前兆反應之地震分布範圍，紅色圈為該測站已建立的敏感偵測區間範圍。

米崙斷層美崙山公園簡易氣體觀測站

由於東華土壤氣體觀測站位在米崙斷層以南，土壤氡氣濃度變化由前一節圖表可以看出是屬於低背景濃度的變化，氡氣濃度變化並不如其他位於斷層帶附近的測站來的明顯，可能會增加我們對資料判識的困難。因此我們在米崙斷層通過之美崙山生態公園內設置一簡易型土壤氡氣觀測站（代號為 MeiLeun，簡稱 ML），期望能與東華土壤氣體觀測站配合來解釋此地區的氣體異常與地震的關係。位置如圖 7-2.18 所示。

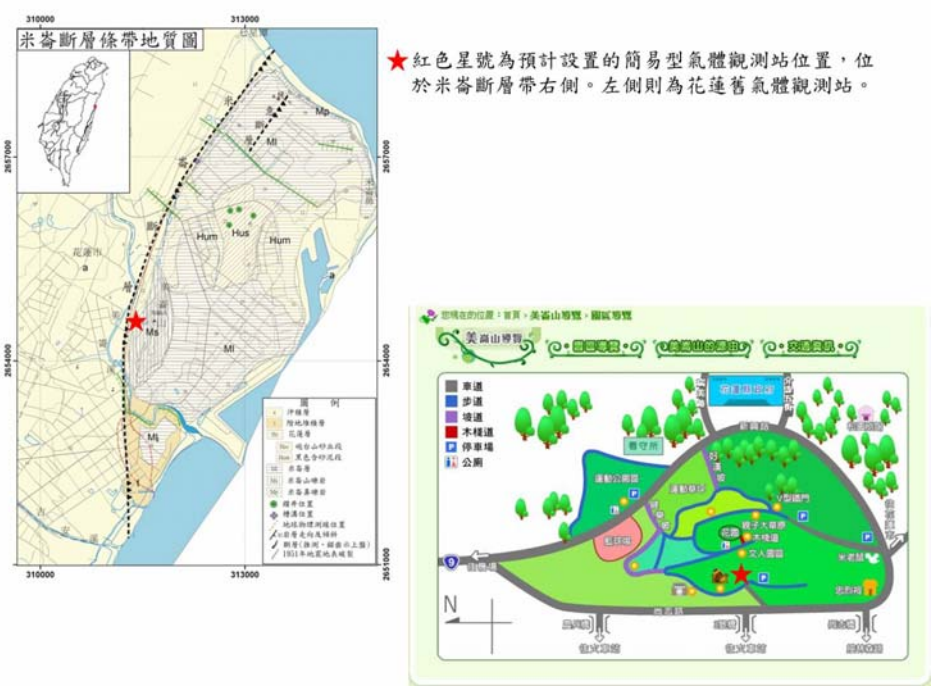
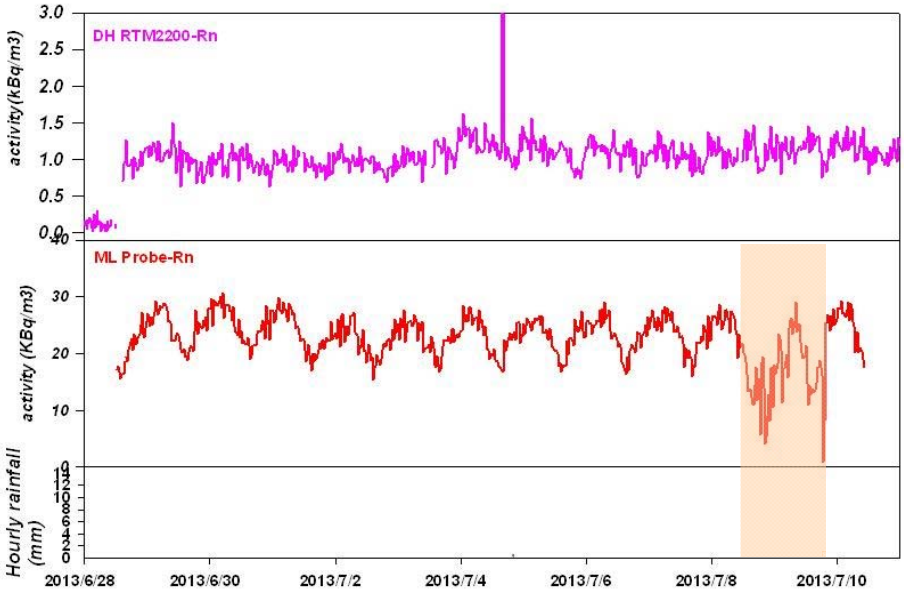


圖 7-2.18：花蓮美崙簡易型土壤氣體觀測站位置示意圖（美崙山生態公園導覽圖，花蓮縣政府美崙山生態公園網站）。

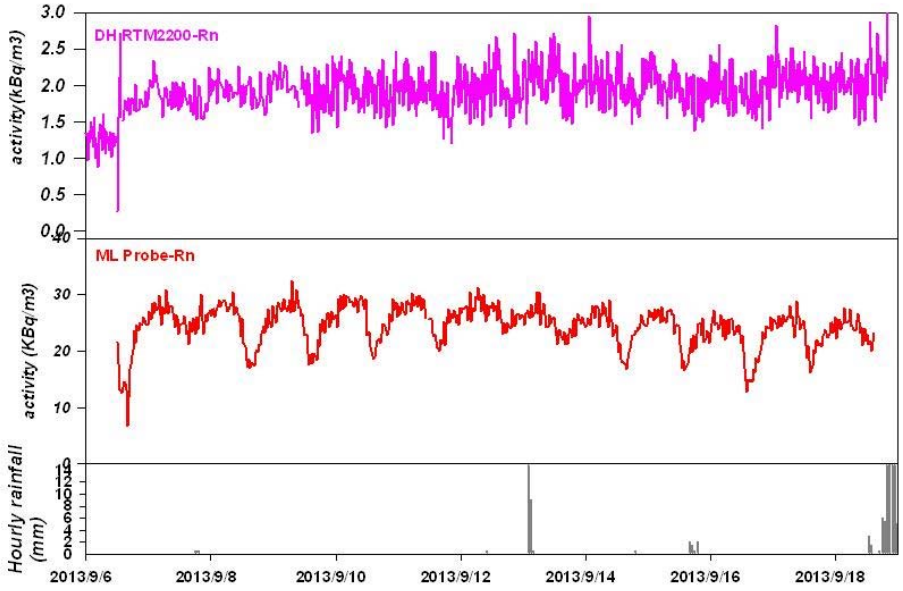
我們於 6 月 28 日在上述地點設置一簡易型土壤氡氣觀測站，以汽車電瓶供電給氡氣分析儀及電動幫浦。此處放置被動式氡氣分析儀（Probe NO.128）。整個設置如圖 7-2.19 所示。先打一鐵桿入土深約一公尺作為土壤逸氣通道，將地底下氣體藉由電動幫浦抽出經過錐形瓶（除水），進入一圓形迴圈裝置，迴圈裝置設置一單向閥，以利迴圈內壓力過大時將氣體排出，氡氣分析儀感應頭置於迴圈裝置內，設定分析時間每 30 分鐘紀錄一筆，如此運作兩次，分別是 6 月 28 日至 7 月 10 日，及 9 月 6 日至 9 月 18 日，之後皆因颱風緣故而暫時撤站。美崙土壤氡氣與東華土壤氡氣比較如圖 7-2.20 所示。



圖 7-2.19：美崙土壤氡氣簡易觀測站配置示意圖。



（2013/6/28-2013/7/10）



（2013/9/6-2013/9/18）

圖 7-2.20：東華與美崙土壤氡氣比較圖。粉色框表示氡氣變化受到電瓶電力不足的影響。

圖 7-2.20 顯示兩個測站氡氣都有日夜變化的趨勢，東華站氡氣日夜變化量約 500 Bq/m^3 左右，美崙站氡氣日夜變化量約在 10K Bq/m^3。東華站氡氣變化趨勢，氡氣濃度多在 1K Bq/m^3 至 1.5K Bq/m^3 之間；美崙站氡氣變化趨勢，氡氣濃度在 20K Bq/m^3 至 30K Bq/m^3 左右。明顯的，美崙站土壤氡氣的背景值要比東華站高很多，這有可能是美崙站直接位在米崙斷層帶上的緣故，可初步解釋為何美崙站的土壤氡氣背景濃度較東華站高的原因。

美崙站 7 月 9 日之後因供電給幫浦的電瓶電力不足，造成抽氣速率改變以致影響氡氣分析儀分析的結果，資料上呈現較毛躁的現象（圖上粉色框所示）。對於美崙站的運作，由於是測試性質，沒有連續的電源供應，所以目前仍是以短期的氡氣分析為主，與東華站進行資料比對後，發現兩測站整體的趨勢變化相當一致，意味著雖然東華站的背景濃度雖低，但仍與位在斷層帶上的濃度變化類似，未來有助於我們瞭解氡氣濃度變化與斷層帶距離的關聯性。

7-2-6 嘉義中崙濁水潭土壤氣體觀測站

氡氣分析儀－土壤氡氣分析：

圖 7-2.21 是嘉義中崙濁水潭觀測站 2012/12/1-2013/5/20 氡氣觀測與地震、雨量的相關圖。詳細每月的分月圖表請參考附錄（圖 7-1.66 至圖 7-1.78）。其中雨量數據是採用中央氣象局自動氣象站（距離測站較近的嘉義小公田氣象站）的時雨量資料。此站設置方式為將氣體導入迴圈裝置內，迴圈有兩個出口，分別給氡氣分析儀分析土壤氡氣和四極桿質譜儀分析其他氣體（下一小節說明）。5 月 20 日之後由於氣體乾燥器及氡氣分析儀進水故障，由於備品仍在維修，因此到 6 月 19 日前未能記錄到氣體的觀測結果。

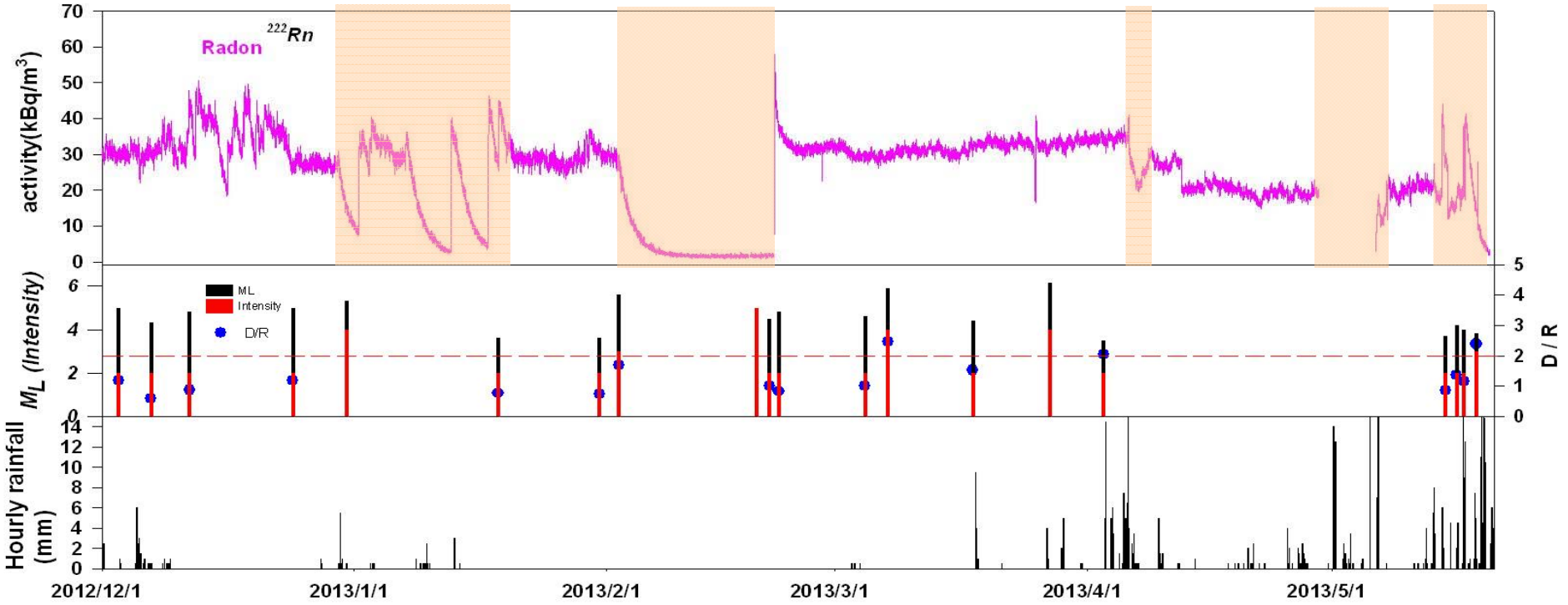


圖 7-2.21：嘉義中崙濁水潭觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/5/20。粉色框表示氡氣變化受到雨量與儀器影響。

6 月 19 日重新設置運作氣體乾燥器及氡氣分析儀，並啟動四極桿質譜儀分析，圖 7-2.22 為 2013/6/19-2013/11/30 氡氣觀測與地震、雨量的相關圖。由於本測站位於濁水潭旁，近年潭水持續往測站侵蝕，造成測站常會因為受到密集降雨的影響，造成逸氣通阻塞或氣體乾燥器抽到水故障而無法抽氣進行分析而造成土壤氣下降。例如：7 月 9 日後由於氣體乾燥器進水故障，在沒有逸氣來源補充下，導致氡氣分析儀只分析迴圈內殘餘的氣體，造成氡氣呈現緩慢下降的趨勢。此時段由於累積數據較少，很難經由時序分析來判識氣體異常與地震的關係，同時又需剔除因降雨影響的資料，故此時期的氡氣暫以原始數據顯示，在 10 月 1 日之後由於沒有降雨，資料較為連續，從中或可看出與地震的關聯。

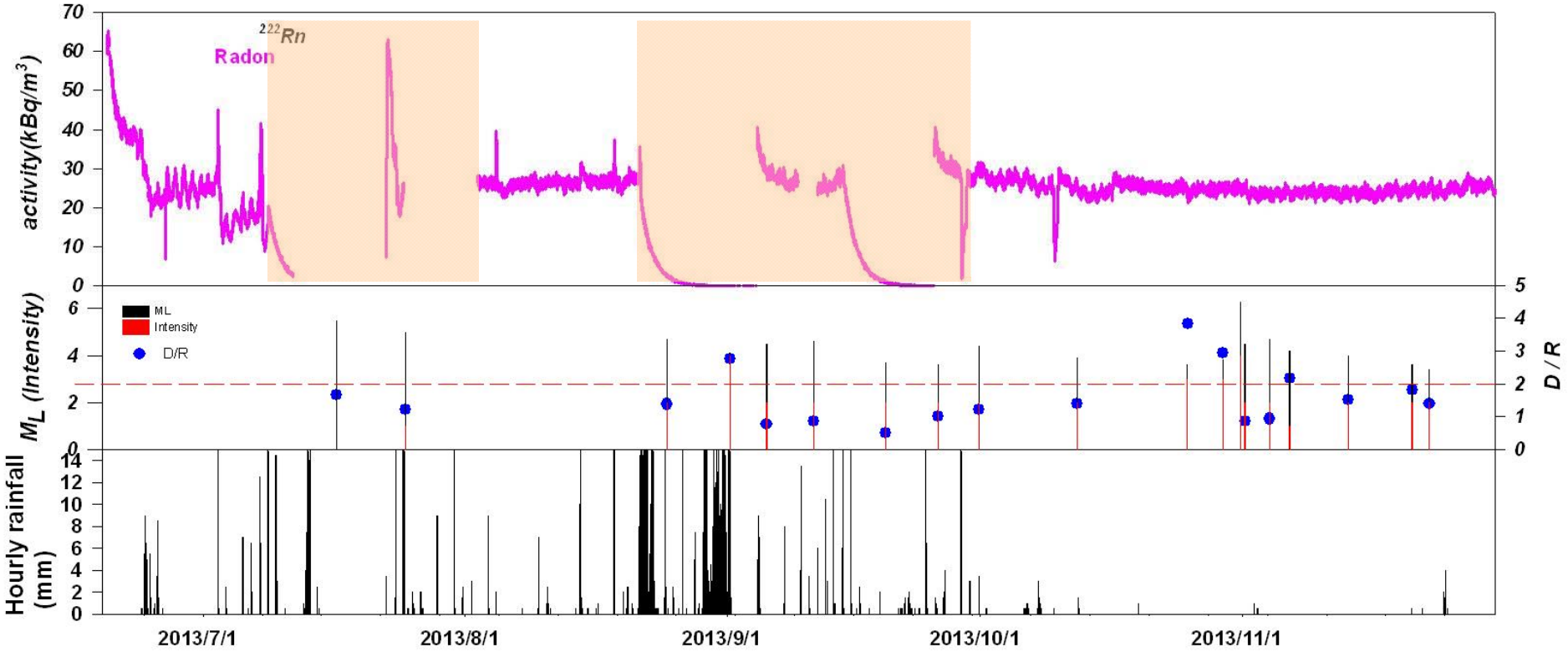


圖 7-2.22：嘉義中崙濁水潭觀測站氡氣與地震、雨量相關圖 2013/6/19-2013/11/30。粉色框表示氡氣變化受到雨量與儀器影響。

圖 7-2.23 為 2012/12/1-2013/5/20 的氡氣與雨量、地震的關係圖，利用 EMD 拆解原始訊號，得到 12 個內部模態函數（IMF）如表 7-2.14。選擇周期在 1.5 至 38 天的 IMF_6（周期為 2 天）至 IMF_{10}（周期為 30.54 天）等 5 個內部模態函數（表 7-2.14 粗體字所示）。將 5 個 IMF 相加後，得到去雜訊及去趨勢的訊號，再將此訊號作統計分析，以 1 個標準差作為異常門檻。另外，以疊代式高斯平滑曲線與 14 天滾動平均線相減後將數值標準化，以 1 個標準差作為異常門檻。（圖 7-2.23 C 所示）

表 7-2.14：中崙站經驗模態分解 IMF 列表 2012/12/1－2013/5/20。

Channel	Zero Crossings	Extrema Counts	Mean Freq. [cycles/day]	Mean Period [day]	Power (%)
IMF_h1	11211	6223	10.49	0.10	0.00
IMF_h2	6535	3453	6.11	0.16	0.00
IMF_h3	3601	1857	3.37	0.30	0.00
IMF_h4	2130	1079	1.99	0.50	0.00
IMF_h5	903	455	0.85	1.18	0.29
IMF_h6	533	272	0.50	**2.00**	2.16
IMF_h7	259	133	0.24	**4.11**	3.31
IMF_h8	141	70	0.13	**7.53**	3.20
IMF_h9	68	34	0.06	**15.49**	4.19
IMF_h10	34	16	0.03	**30.54**	12.71
IMF_h11	17	8	0.02	59.39	4.76
IMF_h12	9	4	0.01	106.90	26.45
IMF_h13	3	2	0.00	267.26	42.93
IMF_residual	0	0	0.00	1069.04	

由圖 7-2.23 C 所示，這段時間有 6 個異常區間，編號 3、4、5 異常區間，由於資料短缺或是受降雨導致儀器故障影響，在不確定氡氣變化的情形下，暫且排除其與地震的關聯；編號 1 異常區間，觀察當時並無大雨的紀錄，但是觀察附近時日也並無相關地震發生。編號 2 異常區間所對應的地震是 12 月 24 日發生於臺東外海。規模 5 與編號 6 異常區間之後有四起地震發生，這四起地震都在測站敏感反應範圍內，我們選擇較大的一起 5 月 16 日發生於高雄桃源，規模 4.2 的地震作為此異常反應的相關連結，當然其他三起地震仍可視為與此異常區間有關。

中崙觀測站的敏感反應範圍主要為臺灣中南部及東南部。中崙濁水潭觀測站相關地震列表如表 7-2.15。地震分布圖及測站敏感反應範圍如圖 7-2.24。

濁水潭測站後方與潭水之間，原有一處平台可供人行走拍照，經過多年大雨影響，平台已被大雨沖刷掉侵蝕成峭壁（如圖 7-2.25 所示），目前測站後方與潭水僅有一步之隔，站在其上須慎防跌落；此外，因大雨造成測站附近土石鬆軟，鐵皮測站及其旁邊的 FRP 箱（內有地震儀）皆已傾斜，短期內雖尚無倒塌風險，惟之後若繼續大雨發生，很難確保測站不會因後方遭沖刷而掉落潭水裡。

由這幾年觀察結果顯示，每當梅雨季或是颱風季，土壤逸氣通道常會受到雨水侵入，導致儀器抽到水故障，增加辨識該段時期資料的困難，因此只有在乾季才有較佳的觀測品質。目前，我們已在濁水潭下方一處原為縣政府欲作觀光遊憩但現已無開發價值的溫泉井，進行長期人工採樣並分析其氣泡的氣體成分的變化，以其將來能作為濁水潭觀測站的遷站參考。另一方面，我們也積極在濁水潭附近尋找是否有適合的位置，以供未來進行遷站之參考。

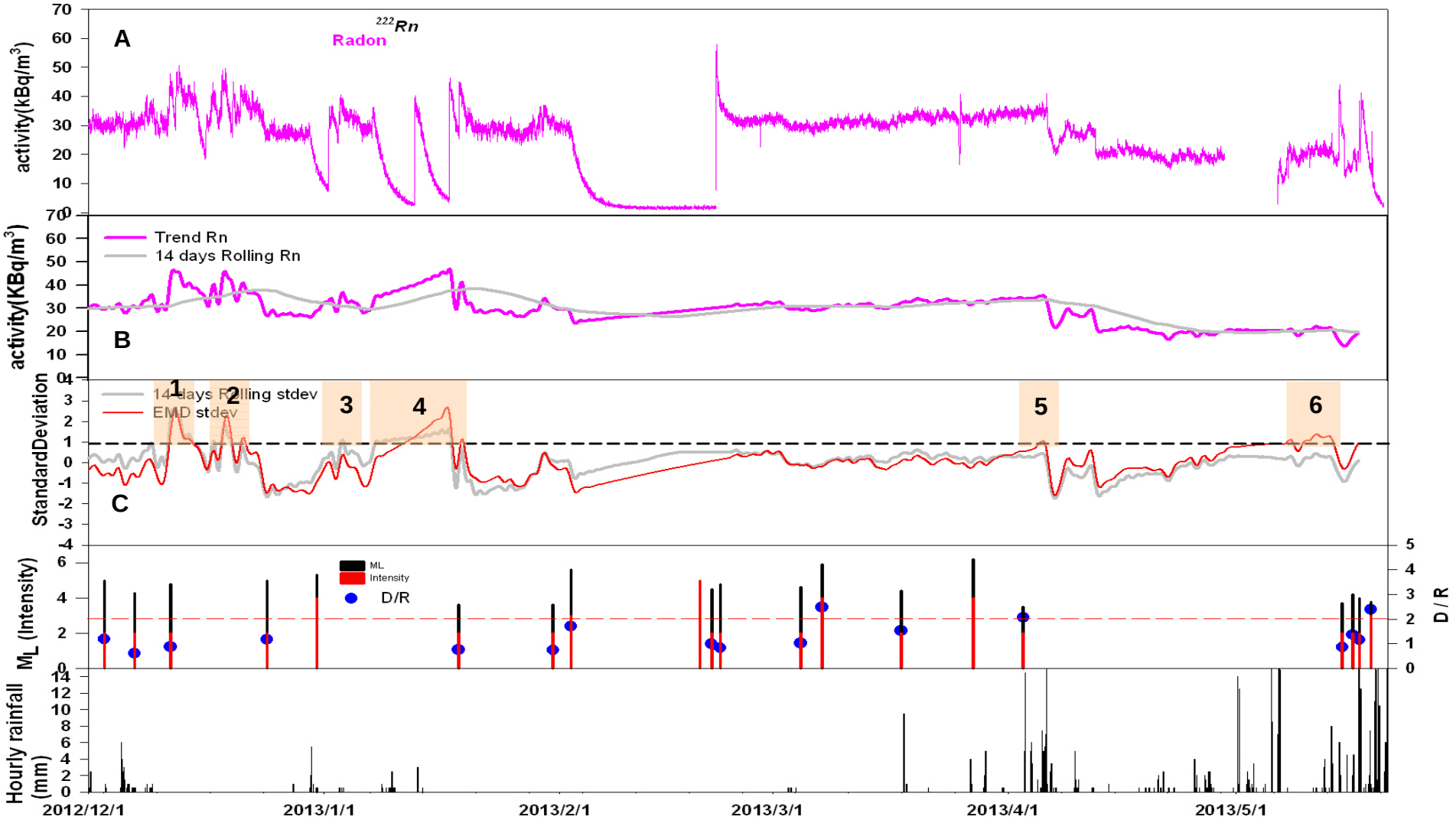
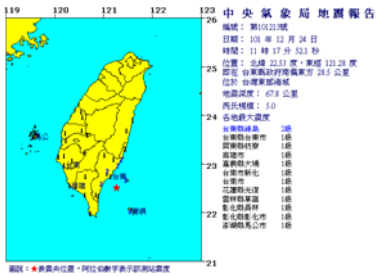
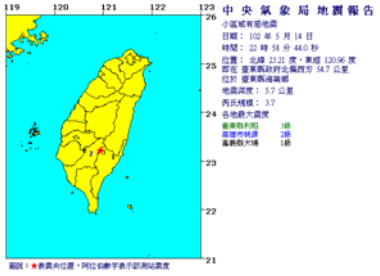


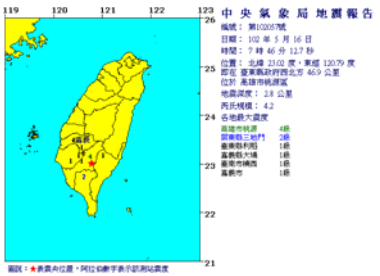
圖 7-2.23：中崙站氡氣數據經時序分析方法處理後的結果（A）原始數據；（B）疊代式高斯平滑法及 14 天滾動平均值的結果；（C）經驗模態分解（IMF_6-IMF_{10}）及 14 天滾動平均值經程式處理後以 1 個標準差來表示其異常門檻；粉色框為氡氣異常區間。

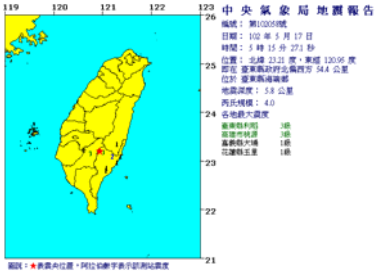
表 7-2.15：嘉義中崙濁水潭觀測站相關地震列表（2012/12/1－2013/5/20），V 表示氣體異常與地震有相關性，下列地震報告圖為與表 7-2.15 相關。

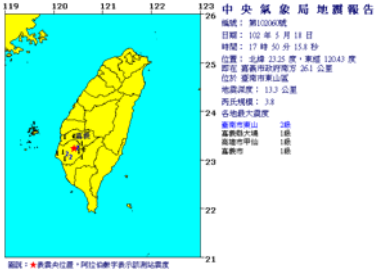
No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料	反應與否	震度	gal	距測站(km)	D/R
12-717	2012/12/3 01:45	5	121.55	23.97	11.8	花蓮縣政府西偏南方 7.5 公里(位於花蓮縣吉安鄉)		2	2.81	119.26	1.18
12-724	2012/12/7 00:48	4.3	121.6	23.83	28	花蓮縣政府南方 17.9 公里(位於花蓮縣近海)		2	3.04	116.17	0.61
12-736	2012/12/11 18:32	4.8	121.62	24.08	27.7	花蓮縣政府北方 10.2 公里(位於花蓮縣近海)		2	3.34	131.99	0.88
12-752	2012/12/24 11:17	5	121.32	22.55	67.8	台東縣政府東南方 28.8 公里(位於台灣東部海域)	V	2	4.27	119.67	1.18
12-764	2012/12/31 00:03	5.3	120.93	23.46	4.4	嘉義市政府東方 49.1 公里(位於嘉義縣阿里山鄉)		4	53.22	37.79	5.03
13-33	2013/1/18 15:14	3.6	120.96	23.17	6.1	台東縣政府北偏西方 49.5 公里(位於台東縣海端鄉)		2	2.55	46.12	0.77
13-51	2013/1/31 02:43	3.6	120.95	23.14	4.3	臺東縣政府北偏西方 47.2 公里(位於臺東縣海端鄉)		2	2.6	47.03	0.75
13-56	2013/2/2 11:39	5.6	121.99	23.74	35	花蓮縣政府東南方 46.9 公里(位於臺灣東部海域)		3	9.31	150.14	1.70
13-93	2013/2/19 10:12	4.6	120.57	23.36	15.1	嘉義市政府東南方 17.2 公里(位於嘉義縣大埔鄉)		5	164.6	2.21	42.98
13-96	2013/2/20 23:20	4.5	121.39	23.2	20	臺東縣政府北偏東方 54.4 公里(位於臺東縣成功鎮)		2	3.28	86.10	1.00
13-100	2013/2/22 02:35	4.8	121.48	24.3	6.4	花蓮縣政府北偏西方 37.2 公里(位於花蓮縣秀林鄉)		2	4.45	137.56	0.84
13-113	2013/3/4 16:42	4.6	121.38	23	23.7	臺東縣政府東北方 35.7 公里(位於臺東縣近海)		2	5.7	92.86	1.02
13-122	2013/3/7 11:36	5.9	121.49	24.31	5.6	花蓮縣政府北偏西方 37.5 公里(位於花蓮縣秀林鄉)		4	29.07	139.06	2.48
13-175	2013/3/17 21:53	4.4	120.95	23.68	12.3	南投縣政府東南方 36.0 公里(位於南投縣信義鄉)		2	7.4	51.01	1.53
13-193	2013/3/27 10:03	6.2	121.07	23.9	19.4	南投縣政府東方 38.8 公里(位於南投縣仁愛鄉)		4	77.65	76.83	6.03
13-210	2013/4/2 23:16	3.5	120.56	23.24	15.6	嘉義市政府南偏東方 29.3 公里(位於嘉義縣大埔鄉)		2	4.58	15.52	2.06
13-256	2013/5/14 22:58	3.7	120.95	23.17	5.7	臺東縣政府北偏西方 50.8 公里(位於臺東縣海端鄉)	V	2	4.51	45.24	0.86
13-259	2013/5/16 07:46	4.2	120.83	23.03	2.8	臺東縣政府西北方 44.9 公里(位於高雄市桃源區)	V	2	3.95	46.95	1.36
13-265	2013/5/17 05:15	4	120.96	23.19	5.8	臺東縣政府北偏西方 52.1 公里(位於臺東縣海端鄉)	V	2	2.75	45.04	1.17
13-270	2013/5/18 17:50	3.8	120.44	23.27	13.3	嘉義市政府南方 23.0 公里(位於臺南市東山區)	V	3	11.13	18.01	2.39











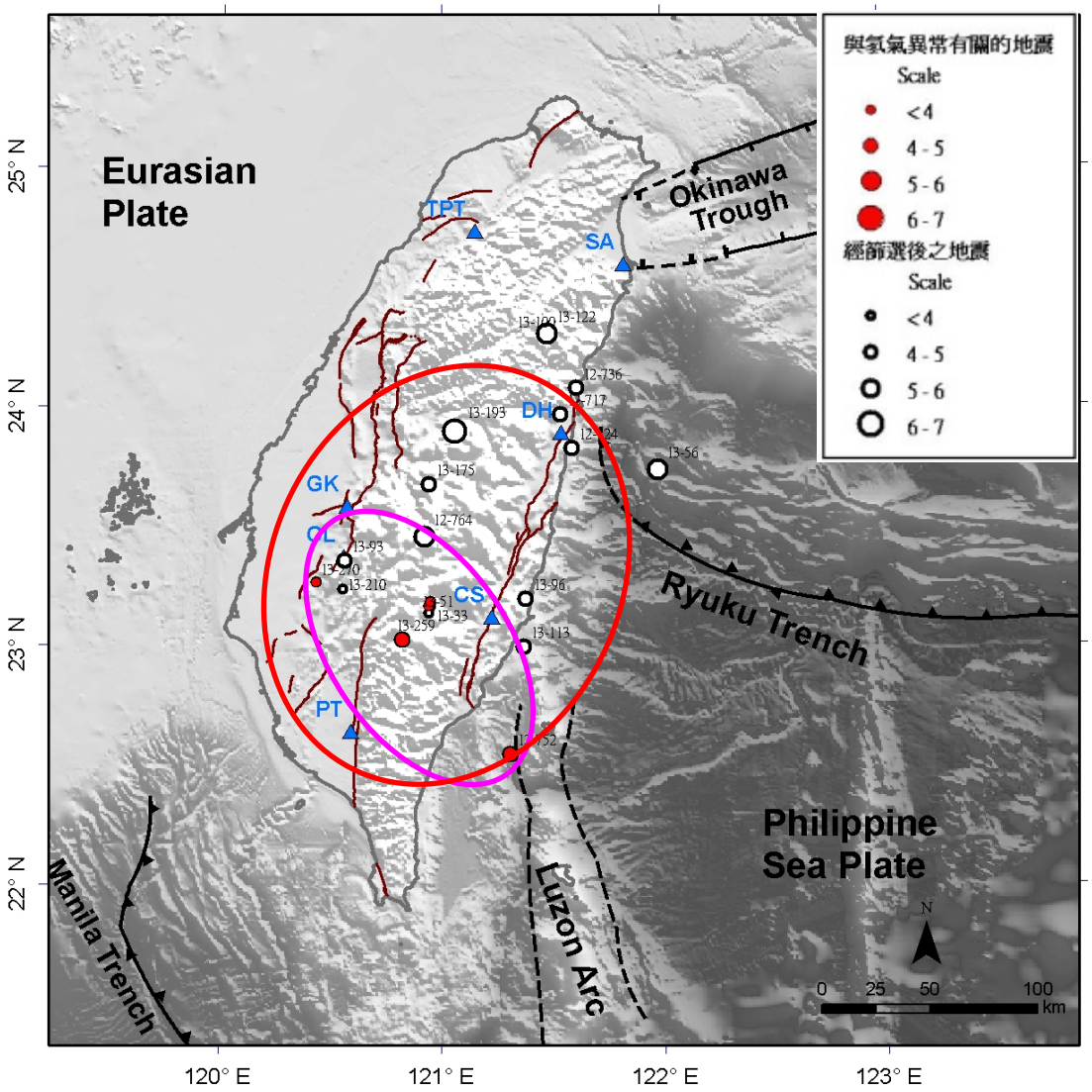


圖 7-2.24：中崙濁水潭觀測站相關地震位置分布圖。粉色圈為本年度有前兆反應之地震分布範圍，紅圈為該測站已建立的敏感偵測區間範圍。



圖 7-2.25：中崙濁水潭觀測站野外現地照片，圖中顯示測站與潭水之間的距離逐漸接近，有崩塌之疑慮。

四極桿質譜儀－其他氣體分析：

圖 7-2.26 是嘉義中崙濁水潭觀測站 2012/12/1-2013/11/30 四極桿質譜儀及氡氣分析儀觀測與地震、雨量的相關圖。詳細每月的分月圖表請參考附錄（圖 7-1.79 至圖 7-1.91）。下圖 A 表示四極桿質譜儀分析的氣體成分變化圖；B 表示土壤氡氣變化圖。

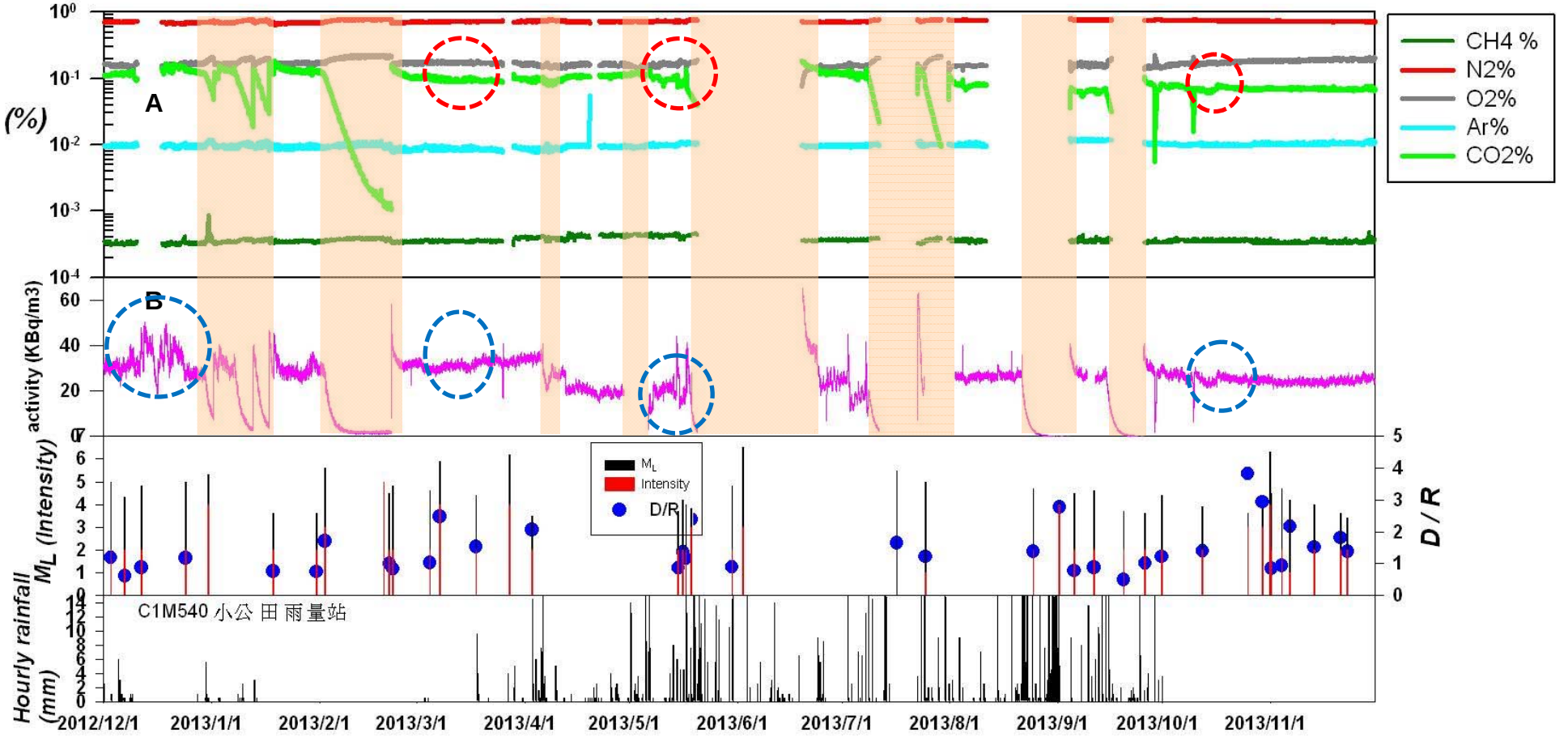


圖 7-2.26：嘉義中崙濁水潭觀測站土壤氣體成分及氡氣與地震、雨量相關圖 2012/12/1-2013/11/30。粉色框表示氡氣變化受到雨量與儀器影響。

觀察圖 7-2.26 A，四極桿質譜儀分析此站土壤氣體成分依濃度高低由上到下依序是氮氣（N_2）、氧氣（O_2）、二氧化碳（CO_2）、氬氣（Ar）、甲烷（CH_4）。其中以二氧化碳的變化最為明顯，甲烷偶有小凸起的變化，但對於我們判識其與地震的關係不大，僅供參考。我們以粉色框標示出受到雨量及儀器故障影響的部分，可以發現二氧化碳的變化與氡氣的變化大致上是一致的，當受到雨量及儀器故障影響而變化時，氡氣和二氧化碳也會受到影響。圖 7-2.26 B 氡氣部分以藍色圓形虛框表示為異常，在前一節裡有提到其異常變化的說明。在第一個氡氣異常變化，同時比對圖 7-2.26 A 其他氣體的部分，由於儀器的當機導致此時期並無資料紀錄。接著圖 7-2.26 B 氡氣第二個異常變化圓形虛框，變化幅度不大；而圖 7-2.26 A 二氧化碳的部分，也是一個小突起的變化；圖 7-2.26 B 第三個氡氣異常變化虛框，一個完整的上升下降的變化趨勢，比較圖 7-2.26 A 二氧化碳也是有同步的升高下降的變化趨勢；圖 7-2.26 B 第四個氡氣異常變化虛框，明顯的有一升高下降趨勢，再看圖 7-2.26 A 二氧化碳也是有同樣的變化。

綜合以上氡氣與二氧化碳的變化，我們知道此站四極桿質譜儀分析的其他土壤氣體成分，以二氧化碳與土壤氡氣的變化較為一致，表示在斷層破裂處帶出的氣體除了氡氣有異常變化之外，二氧化碳也會有變化且應為為氡氣的攜行氣體(Yang et al., 2005)，在與地震活動的評判上，是一有利的輔助證明。

7-2-7 新觀測站設置之評選與研究區域

本研究在於對觀測站的設置進行前置的初步探勘，首先利用土壤逸氣調查方法，針對地下氣體的來源及分布情形，用以判斷地表下有無之構造活動或是斷層分布位置。本研究對於苗栗台中地區附近進行調查，找尋敏感及適合的觀測站設置地點。利用地球化學中稀有氣體的特性，可偵測地表下活動斷層的分布。因為源於地殼深處與近地表處的氣體組成截然不同，在斷層或破裂帶經過的地方，會形成氣體通道，使氧氣、氮氣、氫氣、二氧化碳與甲烷等揮發性氣體沿著此通道向上遷移擴散，而在近地表處顯示異常高濃度值(傅慶州等，2004)。利用此原理可判斷該處是否有斷層抑或破裂帶通過，也可用來判定斷層的走向和位置。位於構造活動上的某些地區，在氣體成份的變化上，經常與地震活動有明顯關聯，因此可扮演推手的角色。

三義斷層

三義斷層(圖 7-2.27)，為逆移斷層，在此分為 2 段加以說明：北段略呈東西走向，由苗栗縣大湖鄉大窩，向西延伸經雙連潭、重河至三義，長約 8 公里；南段呈南北走向，由三義向南延伸經鯉魚口、中城至大甲溪（丹桂之助，1936；張麗旭，1951；Meng, 1963），向南可能延伸至豐原潭子地區，長約 25 公里。三義斷層北段，三義至大湖之間尚未發現斷層截切更新世晚期地層的證據。

三義斷層南段，在三義鄉上湖西南方，三義斷層的斷層破損帶寬度可能超過 400 公尺，上盤並有分支斷層；大甲溪北岸斷層帶寬約 30 公尺，斷層破損帶寬約 500 公尺，上盤出露數條分支斷層；其中分支斷層 SF5 錯移低位河階面及一層灰黑色土壤層，造成約 50 公分的垂直移距。由鑽探結果位於車籠埔斷層下盤的斷層帶，可能是桂竹林層或更老的地層逆衝至頭嵙山層之上，此斷層可能是三義斷層的向南延伸，因此三義斷層有可能向南延伸至豐原潭子地區。由近期的大地測量結果顯示，跨三義斷層並沒有明顯的高程差變化量。三義斷層，截切低位的河階礫石層與河床上的土壤層，研判斷層在全新世曾經活動，改列第一類活動斷層。

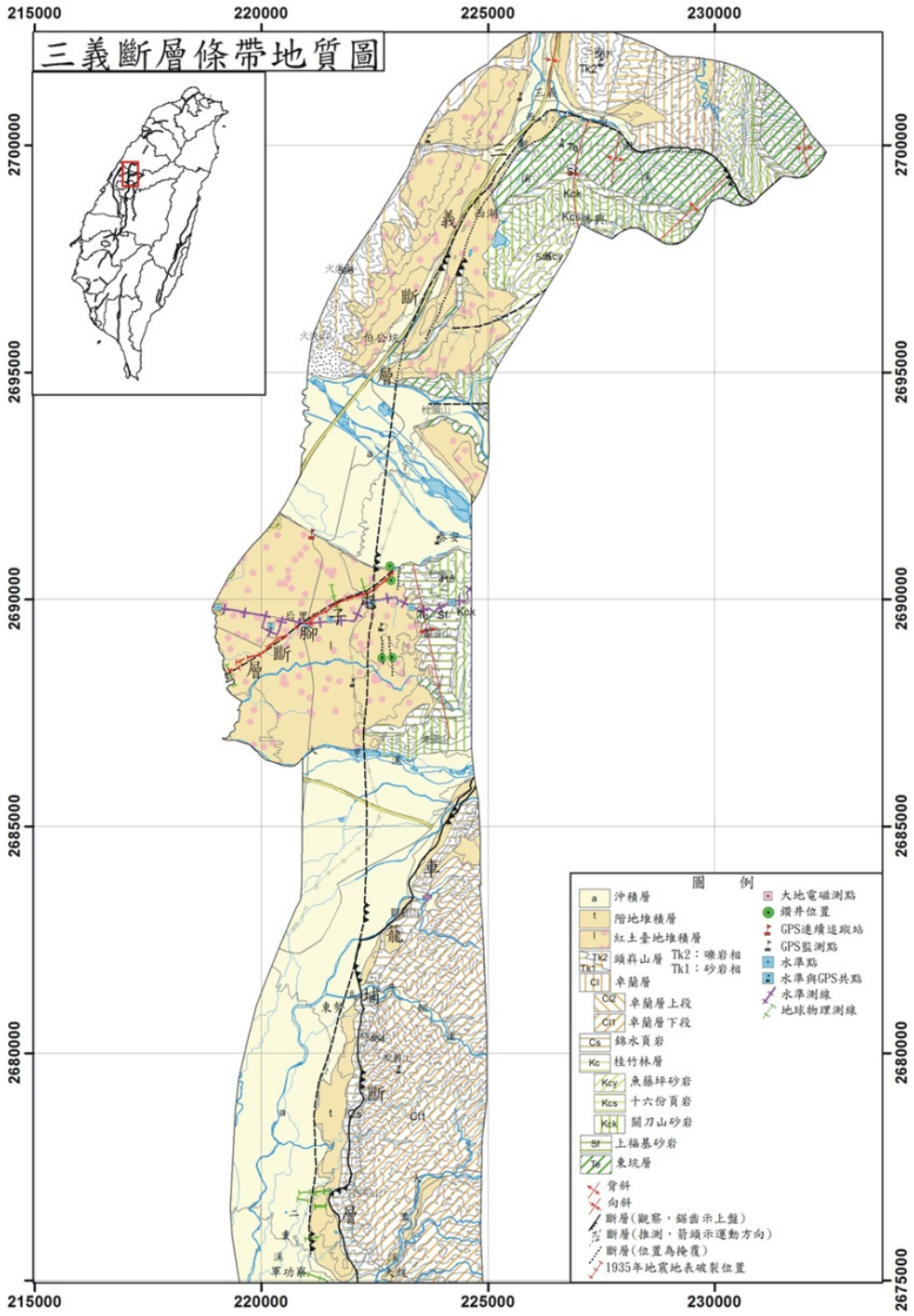


圖 7-2.27：三義斷層兩萬五千分之一條帶地質圖（林啟文等，2008）。

車籠埔斷層

車籠埔斷層，為逆移斷層，以烏溪為界分為兩部份：北段約呈南北走向，由台中豐原北陽里向南延伸至霧峰鄉，長約 38 公里，在 1999 年集集地震時，石岡以東至苗栗縣卓蘭鎮也形成地表破裂與地面隆起，長約 16 公里（圖 7-2.28；李元希等，2000）；車籠埔斷層南段約呈南北走向，由南投草屯向南延伸至竹山嶺腳附近，長約 38 公里（林啟文等，2000）。在豐原以北，斷層可能連接三義斷層；竹山以南，斷層連接鹿寮斷層與大尖山斷層（林啟文等，2000）。

由車籠埔斷層的古地震研究結果，過去 3000 年以來共有七次地震事件造成地表破裂，最後 6 次地震之間的發生時距最小約 200 年，最長約 700 年。最早的 2 次古地震的時距相距約 1200 年，可能還有許多次的古地震事件未被發現。車籠埔斷層的長期滑移速率為每年 6.94 公厘，發震模式屬於時間可預測的再發性模式，以長期的滑移速率來推估車籠埔斷層下次可能的地震時間，約西元 2340±95 年，車籠埔斷層列為第一類活動斷層。

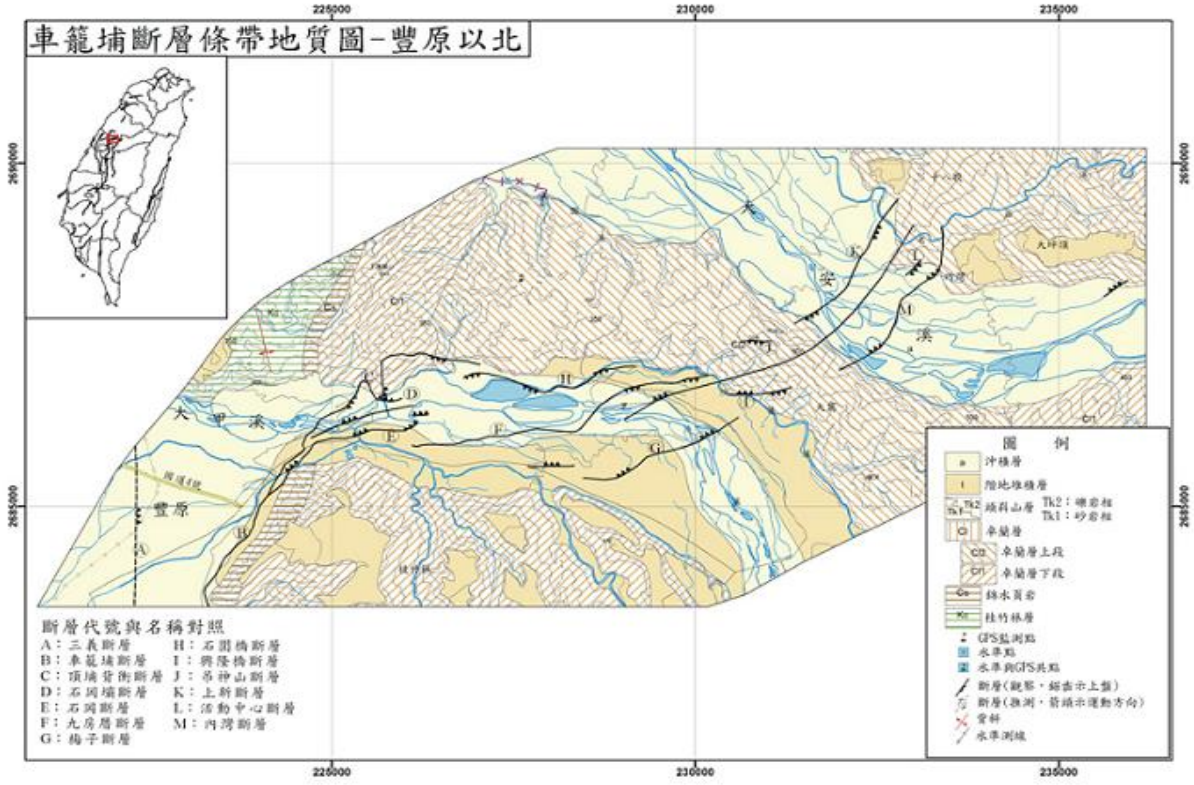


圖 7-2.28：車籠埔斷層兩萬五千分之一條帶地質圖，豐原以北段（李元希等，2000）。

在 100 年 10 月開始於三義斷層利用土壤氣體地球化學方法調查，加上去年（101 年）於車籠埔斷層豐原以北段進行採樣，採集了共 97 個樣本進行分析（圖 7-2.29、圖 7-2.30）。

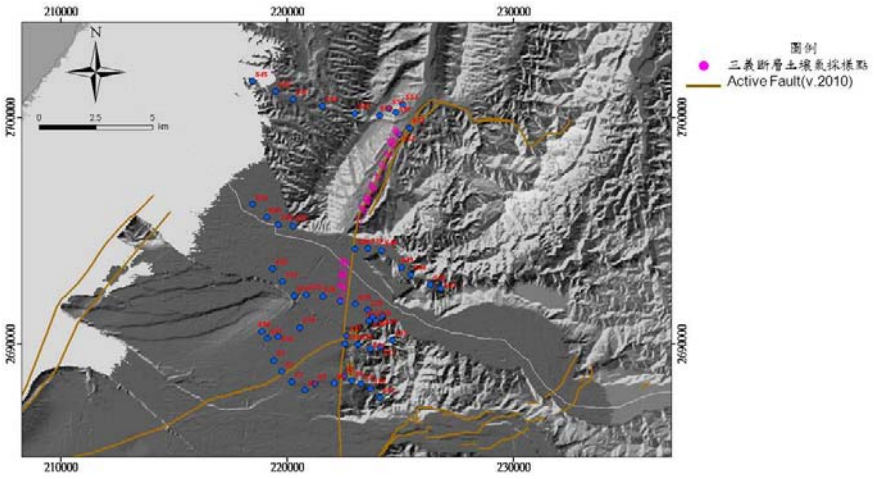


圖 7-2.29：苗栗台中地區土壤氣體採樣點分佈圖，共 67 個（三義斷層）。

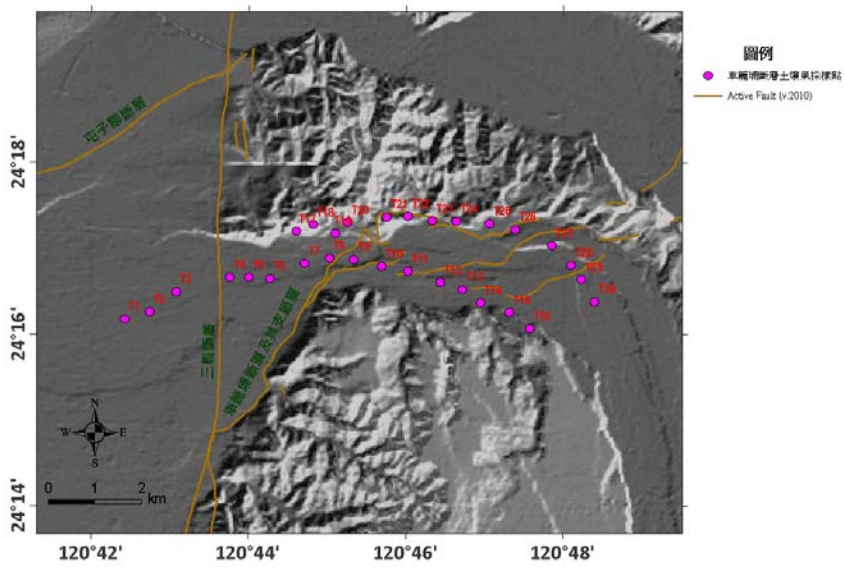


圖 7-2.30：苗栗台中地區土壤氣體採樣點分佈圖，共 30 個（車籠埔斷層豐原以北段）。

各採樣點的氣體成份差異很大，在特定區域可看出明顯的高濃度值（圖 7-2.31、圖 7-2.32）。去年（101 年）下半年則是針對上述採樣點氣體異常的點位（共 25 個，含氡氣異常、氦氣異常、二氧化碳異常等），作一固定桿設置及採樣。今年亦是針對固定桿進行採樣分析，惟有 7 個點位因為地勢低窪積水、地形地貌改變、或是人為禁止外，其餘 18 個固定桿點位，進行人工採樣分析，分析結果如表 7-2.16（粗體部分為各氣體異常高點）。之後仍會持續進行固定桿採樣分析，期望能於未來在此地區敏感點位設置土壤氣體觀測站的參考。

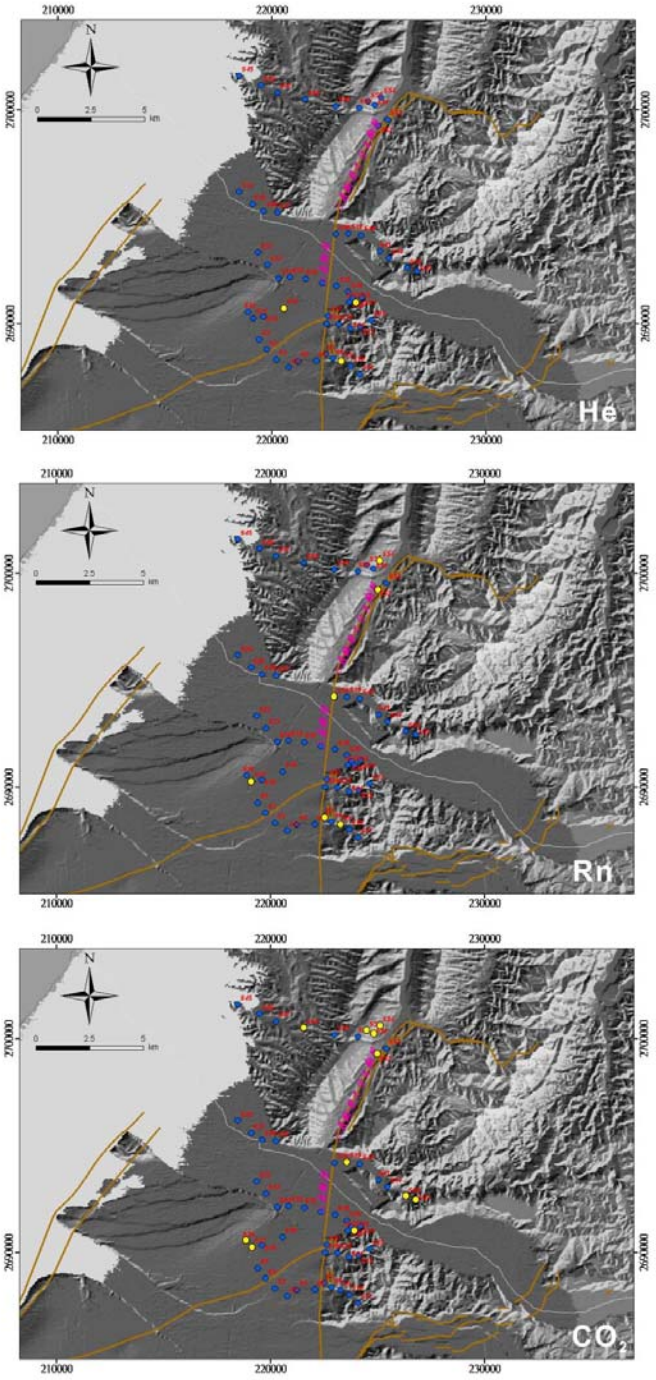


圖 7-2.31：三義斷層土壤氣異常點分布圖，分別為土壤氦氣、氡氣和二氧化碳，黃點為異常點位。

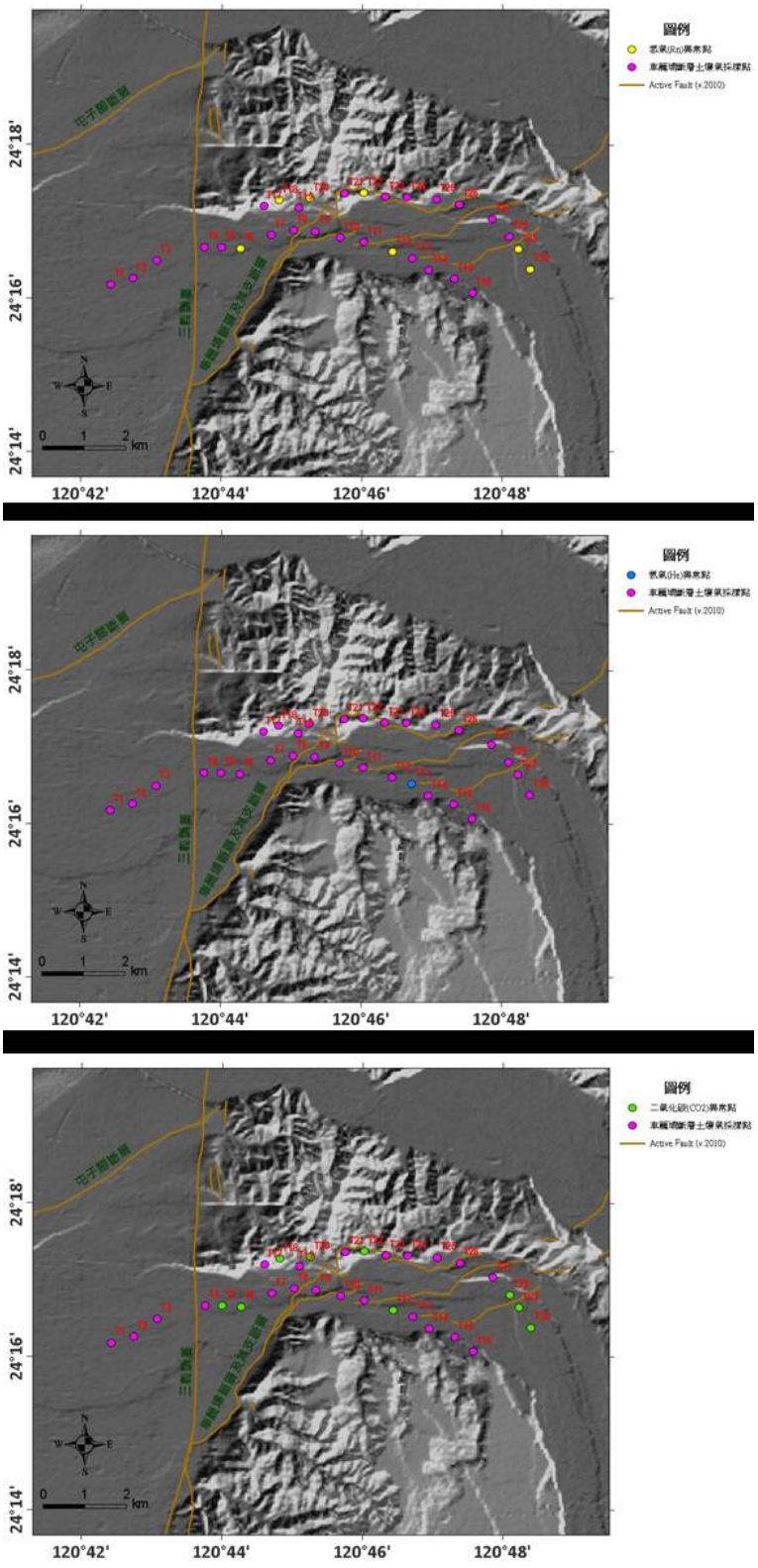


圖 7-2.32：車籠埔斷層豐原以北段土壤氣異常點分布圖，由上到下依序為土壤氡氣、氦氣和二氧化碳。

表 7-2.16：異常點位土壤氣體成份分析結果。

No	Date	longitude	latitude	He (ppm)	Rn(Bq/m3)	Micro GC			
						N2 (%)	O2+Ar (%)	CO2 (%)	CH4 (%)
S9	2011/10/27	120.73	24.30	5.28	36996	81.74	17.48	0.77	0.00
	2013/7/4			5.27	63417	75.76	18.49	4.72	1.05
	2013/10/17			x	21396	75.61	21.80	2.55	0.04
S31	2011/11/3	120.74	24.33	5.38	14992	86.33	12.55	1.11	0.00
	2012/9/14			5.36	10648	80.29	19.16	0.55	0.00
	2013/7/4			5.33	16464	80.05	12.96	5.87	1.12
	2013/10/17			x	8964	76.54	20.48	2.23	0.75
S42	2011/11/4	120.75	24.35	5.24	25876	84.45	12.09	3.45	0.00
	2012/10/5			5.27	13139	77.30	21.78	0.92	0.00
	2013/7/4			5.36	40708	78.55	9.87	10.19	1.39
	2013/10/17			x	25745	75.11	16.10	7.80	0.99
S43	2011/11/4	120.75	24.35	5.24	26199	82.81	13.96	3.22	0.00
	2012/10/5			5.24	17963	76.17	19.96	3.87	0.00
	2013/7/4			5.27	44244	74.41	9.71	14.81	1.06
	2013/10/17			x	36795	74.33	13.67	11.03	0.99
S52	2011/11/21	120.74	24.41	5.24	48338	85.94	5.19	8.87	0.00
	2012/10/12			5.24	11893	77.83	19.28	2.89	0.00
	2013/7/5			5.24	16224	75.45	10.12	3.32	0.98
	2013/10/3			x	12711	75.81	20.28	3.85	0.05
S54	2011/11/21	120.76	24.41	5.24	44115	86.87	8.83	4.30	0.00
	2012/10/12			5.24	30667	76.89	22.41	0.70	0.00
	2013/7/5			5.24	39064	75.59	19.34	3.90	1.18
	2013/10/3			x	14229	76.50	21.33	1.86	0.31
S55	2011/11/21	120.76	24.40	5.24	32011	78.81	14.65	6.54	0.00
	2012/10/12			5.24	31858	76.79	21.16	2.05	0.00
	2013/7/5			5.24	35368	73.97	17.09	7.96	0.98
	2013/10/3			x	15440	74.69	18.26	6.64	0.42
S56	2011/11/21	120.77	24.40	5.24	38861	86.25	8.89	4.86	0.00
	2012/10/5			5.40	20354	77.75	19.69	2.55	0.00
	2013/7/5			5.24	54605	71.89	10.68	16.49	0.94
	2013/10/3			x	25727	74.30	17.74	6.99	0.97
S58	2011/11/21	120.76	24.41	5.24	26799	85.77	8.79	5.45	0.00
	2012/10/5			5.24	17974	75.26	22.27	2.48	0.00
	2013/7/5			5.24	25879	74.53	17.32	7.19	0.96
	2013/10/3			x	17831	75.38	18.85	5.57	0.19

續表 7-2.16：異常點位土壤氣體成份分析結果。

No	Date	longitude	latitude	He (ppm)	Rn(Bq/m3)	Micro GC			
						N2 (%)	O2+Ar (%)	CO2 (%)	CH4 (%)
S59	2011/11/25	120.77	24.42	5.24	49184	x	x	x	x
	2012/10/5			5.24	25914	76.89	20.04	3.07	0.00
	2013/7/5			5.24	19747	73.52	17.70	7.76	1.02
	2013/10/3			x	13809	73.62	17.17	8.29	0.91
S61	2011/11/25	120.75	24.40	5.24	54019	x	x	x	x
	2012/10/5			5.24	39394	77.68	18.98	3.34	0.00
	2013/7/5			5.24	23610	74.97	18.14	5.94	0.95
	2013/10/3			x	39977	75.03	17.90	6.11	0.96
S64	2011/11/25	120.75	24.39	5.24	64748	x	x	x	x
	2012/10/5			5.24	36223	77.31	22.13	0.56	0.00
	2013/7/5			5.24	70110	74.89	16.85	7.14	1.12
	2013/10/3			x	50555	75.52	19.62	3.85	1.01
S66	2011/11/25	120.75	24.37	5.31	35996	x	x	x	x
	2012/10/5			5.25	30744	88.69	1.08	10.24	0.00
	2013/7/5			5.24	24818	76.36	17.17	5.30	1.17
	2013/10/3			x	66950	80.88	6.59	11.51	1.03
T6	2012/5/24	120.75	24.28	5.24	20917	89.10	9.25	1.65	0.00
	2012/9/13			x	13991	79.31	20.44	0.25	0.00
	2013/7/4			5.32	20374	77.01	16.22	5.67	1.10
	2013/10/17			x	14147	76.24	19.50	3.66	0.59
T12	2012/5/25	120.78	24.28	5.24	23186	80.64	18.13	1.24	0.00
	2012/9/13			x	4631	68.67	31.31	0.02	0.00
	2013/7/4			5.24	9533	75.16	15.46	8.41	0.96
	2013/10/17			x	6018	75.58	18.83	5.15	0.44
T13	2012/5/25	120.79	24.27	5.85	x	77.63	22.36	0.01	0.00
	2012/9/13			x	24943	81.67	17.82	0.51	0.00
	2013/7/4			5.36	34223	78.17	16.65	3.85	1.33
	2013/10/17			x	16074	76.32	21.08	1.90	0.70
T18	2012/5/30	120.76	24.29	5.24	56683	83.85	15.06	1.09	0.00
	2012/9/14			x	56353	77.80	21.82	0.38	0.00
	2013/7/4			5.28	83665	75.75	14.31	8.89	1.05
	2013/10/17			x	33917	75.46	19.82	3.93	0.79
T22	2012/5/31	120.78	24.29	5.24	50857	85.49	13.45	1.06	0.00
	2012/9/14			x	43008	77.46	22.08	0.46	0.00
	2013/7/4			5.27	52755	75.84	10.95	12.12	1.09
	2013/10/17			x	37603	74.61	17.50	7.13	0.76

註：x 表示無該筆資料。粗字表示各異常氣體部分

7-2-8 土壤氣體綜合觀測結果

數個土壤氣體觀測站對單一地震的異常變化：

根據過去的觀測結果我們可經由地震活動所造成的異常變化而初步劃分出各觀測站的異常反應範圍，當各測站的反應區間出現交集處，則地震可能將發生在這個區域。例如：當北部的大平地觀測站出現異常且嘉義的中崙測站也出現異常變化時，此時兩個測站的反應區間交集處則可能為地震即將發生的位置；如果東部的池上觀測站也出現異常變化，那則可更提高準確度，如圖 7-2.33 所示。

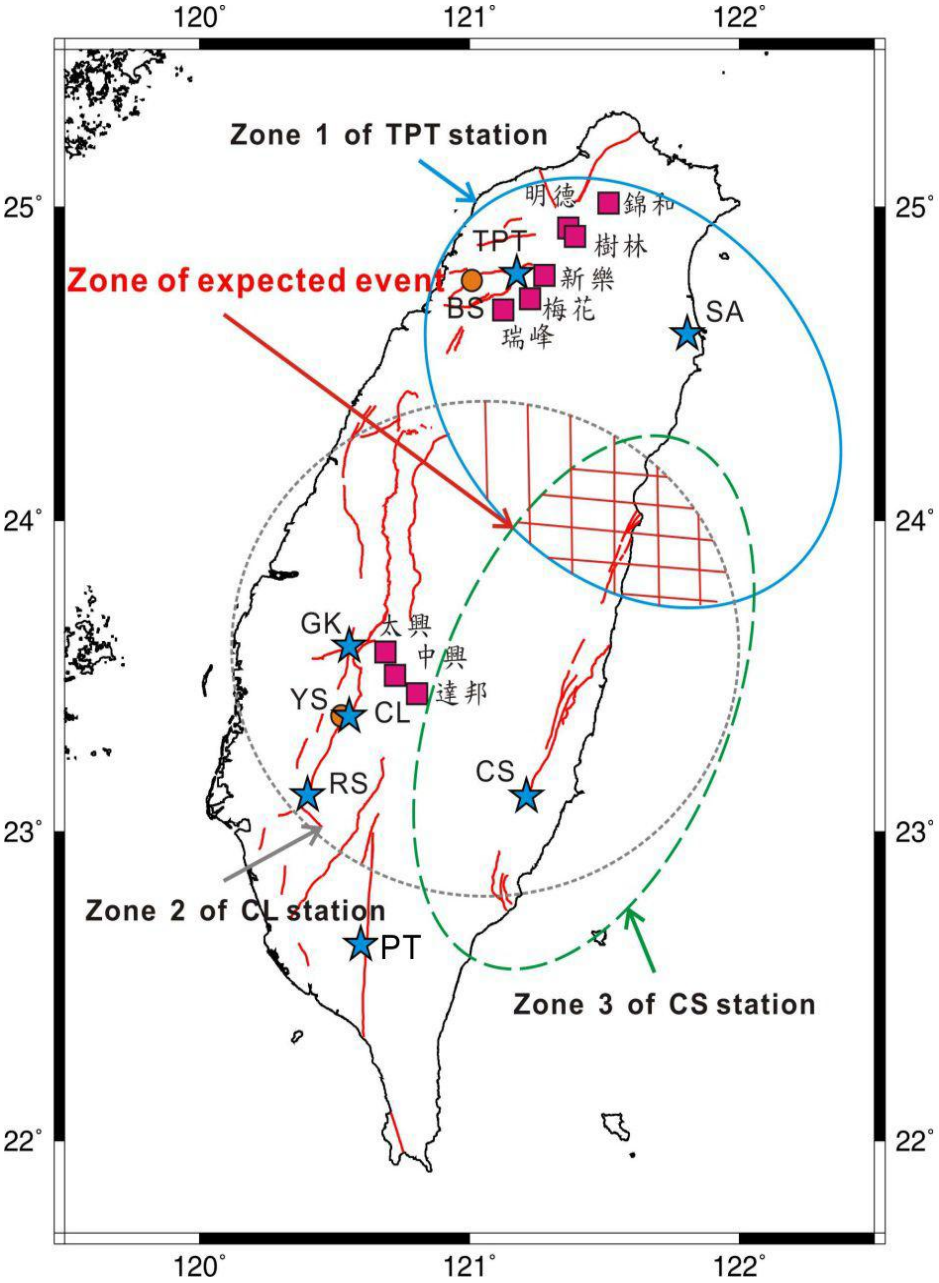


圖 7-2.33：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。藍圈、灰圈和綠圈分別代表大平地測站、中崙測站和池上測站的可能地震反應區間範圍，其交集處代表地震可能發生地點。

綜合以上各小節所討論的單一測站土壤氣體異常變化與地震的關係，本節要討論多個土壤氣體觀測站對單一地震的同時異常變化。2012 年 12 月至 2013 年 11 月間各觀測站所觀測到的氡氣異常共有 8 起地震，同時有兩個（含）以上的測站氡氣產生前兆反應現象。如表 7-2.17。以下分別說明。

表 7-2.17：地震與多個土壤氣體觀測站的氡氣異常反應。

NO.	西元時間	規模	深度 km	震央位置	大平地(TPT)			古坑(GK)			中崙(CL)			屏科大(PT)			池上(CS)錦園(CY)			東華(DH)		
					Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R	Int.	gal	D/R
1	2012/12/24 11:17	5	67.8	臺東外海							2.0	4.3	1.2						2.2			
2	2013/2/2 11:39	5.6	16.9	花蓮外海	2.0	3.1	1.7	2.0	3.7	1.8							2.0	3.0	2.5	3.0	11.6	5.3
3	2013/3/7 11:36	5.9	15.2	花蓮秀林	3.0	15.7	4.5	2.0	6.0	2.8										4.0	48.2	7.5
4	2013/3/27 10:03	6.2	19.4	南投仁愛			5.1			7.6												
5	2013/6/2 13:43	6.5	14.5	南投仁愛				5.0	159.2	11.6							3.0	21.0	7.3			
6	2013/6/29 07:51	5.7	19.8	花蓮外海	1.0	1.6	2.2										1.0	1.4	2.0			
7	2013/10/31 20:02	6.3	19.5	花蓮瑞穗	3.0	24.5	3.9										3.0	19.7	10.2	5.0	230.5	12.5
8	2013/11/16 03:39	5.2	16.9	花蓮外海			1.1												1.1			

2012/12/24 臺東外海地震（M_L＝5）

如圖 7-2.34 所示，中崙站在 4 天前，池上的錦園站在 5 天前即有氣體異常反應，且前兆反應時間都不長，由於震源較深，氣體所能反應的前兆時間就變得比較短且不是很明顯的濃度變化。這兩站我們都以 1 δ 來定義異常門檻，兩站此段時期的氡氣變化都超過異常門檻。這起地震震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 7-2.34（B）黃色星號）。

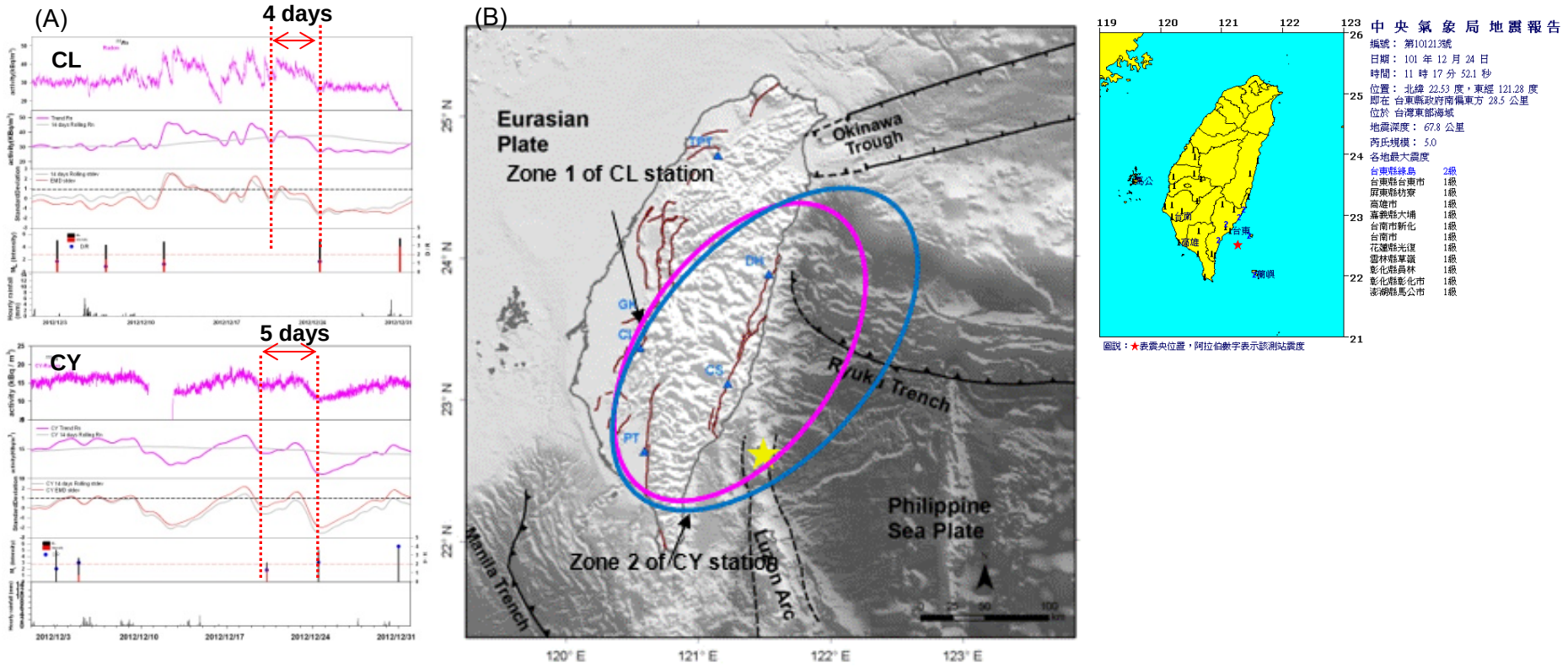


圖 7-2.34：2012/12/24 臺東外海地震與各測站觀測情形，（A）中崙站（CL）、錦園站（CY）土壤氣體觀測結果（2012/12/1-2012/12/31）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示臺東外海地震的震央位置。

2013/2/2 花蓮外海地震（M_L＝5.6）

如圖 7-2.35 所示，大平地站在 9 天前，古坑站在 12 天前，池上站在 16 天前，東華站在 16.5 天前即有氣體異常反應。大平地站、東華站以 1.5 δ 定義異常門檻，古坑站及池上站以 1 δ 來定義異常門檻，古坑站雖然是 EMD 或是 Rolling average 都尚未達到異常門檻，但觀察其原始資料有明顯的異常變化，我們暫將此異常視為是這起地震的前兆反應時間。東華站則是超過這起地震震央落在圖上四個反應區範圍交集處（圖 7-2.35（B）黃色星號）。

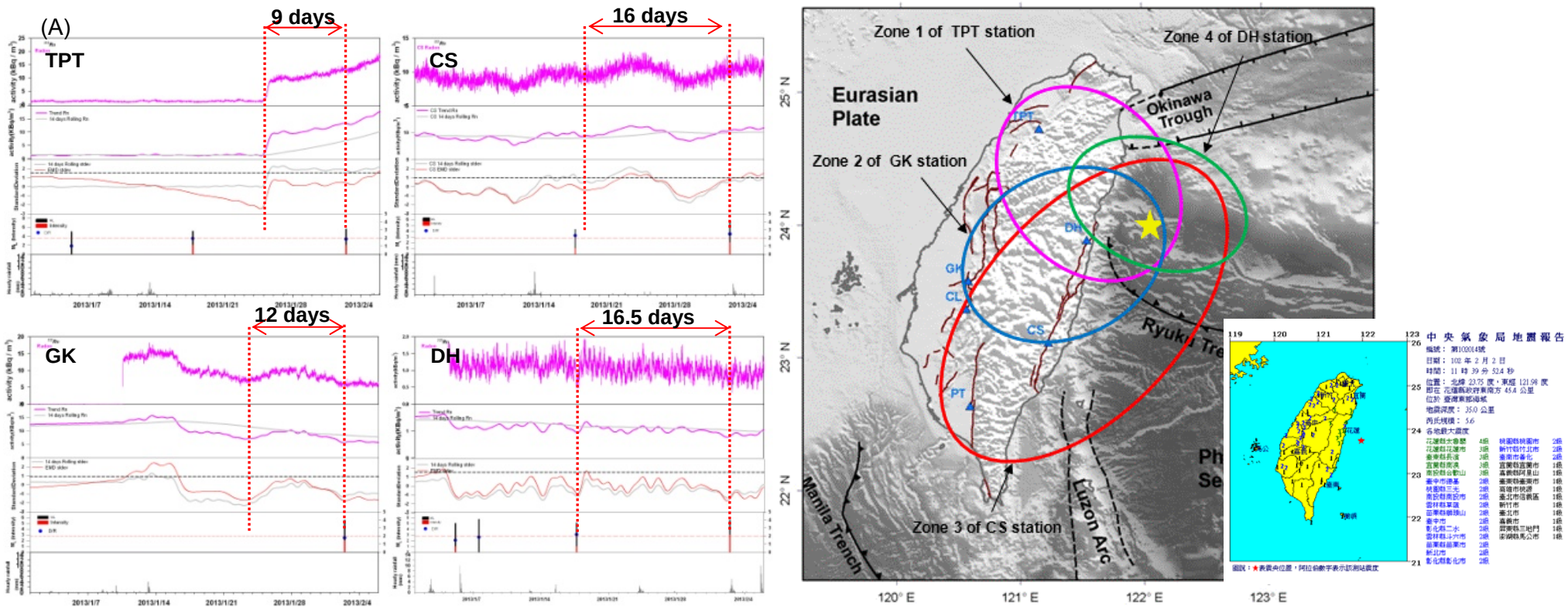


圖 7-2.35：2013/2/2 花蓮外海地震與各測站觀測情形，（A）大平地站（TPT）、古坑站（GK）、池上站（CS）、東華站（DH）土壤氣體觀測結果（2013/1/1-2013/2/5）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮外海地震的震央位置。

2013/3/7 花蓮秀林地震（M_L＝5.9）

如圖 7-2.36 所示，大平地站在 12 天前，古坑站在 16 天前，東華站在 12 天前即有氣體異常反應，此起地震對於三個測站的前兆反應時間都很長。大平地站及東華站都超過 2 δ，古坑站則是約 1.5 δ 皆超過我們定義的異常門檻。大平站的變化幅度較大，約 20KBq/m^3；東華站的變化幅度最小，偶有向下趨勢隨即又升高，經由 EMD 及 Rolling average 的運算，我們仍可藉由定義 δ 來看出是否有異常及其與地震的關係。這起地震震央落在圖上三個反應區範圍交集處（圖 7-2.36（B）黃色星號）。

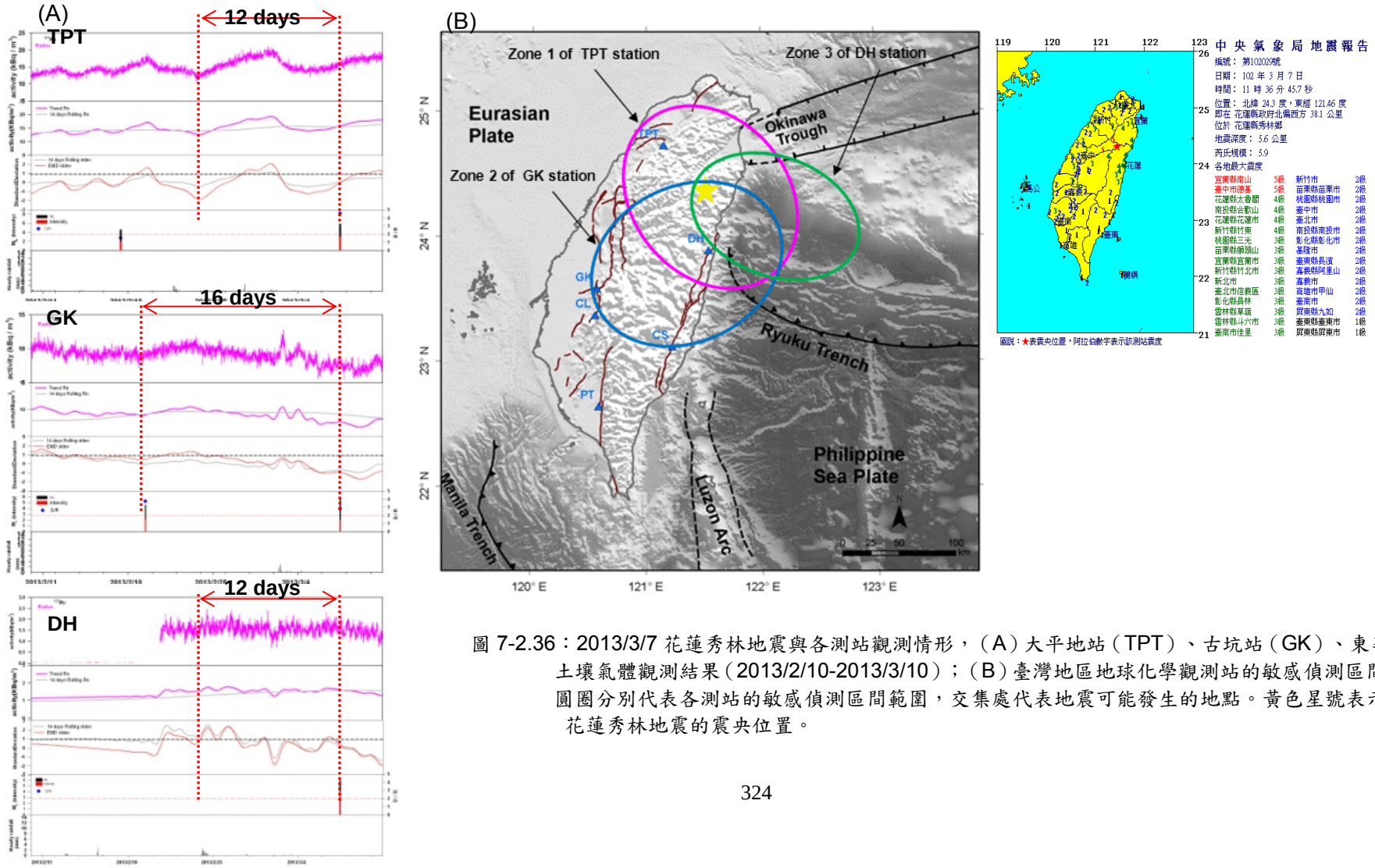


圖 7-2.36：2013/3/7 花蓮秀林地震與各測站觀測情形，（A）大平地站（TPT）、古坑站（GK）、東華站（DH）土壤氣體觀測結果（2013/2/10-2013/3/10）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮秀林地震的震央位置。

2013/3/27 南投仁愛地震（M_L＝6.2）

如圖 7-2.37 所示，大平地站在 12 天前，古坑站在 19 天前即有氣體異常反應，前兆反應時間都很長，尤其是古坑站，從 3 月 8 日之後氡氣穩定的緩慢往上升，3 月 18 日因雨影響而下降，但隨即又升到原來的背景值直到 3 月 20 日最高點之後才下降，從 3 月 8 日到 3 月 26 日形成一完整的濃度變化曲線。同樣的大平地站，從 3 月 15 日開始由低點往上升高，雖在 3 月 22 日短暫往下隨即又往上升，直到 3 月 25 日最高點後下降。兩個測站都超過我們所定義的異常門檻。這起地震震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 7-2.37（B）黃色星號）。

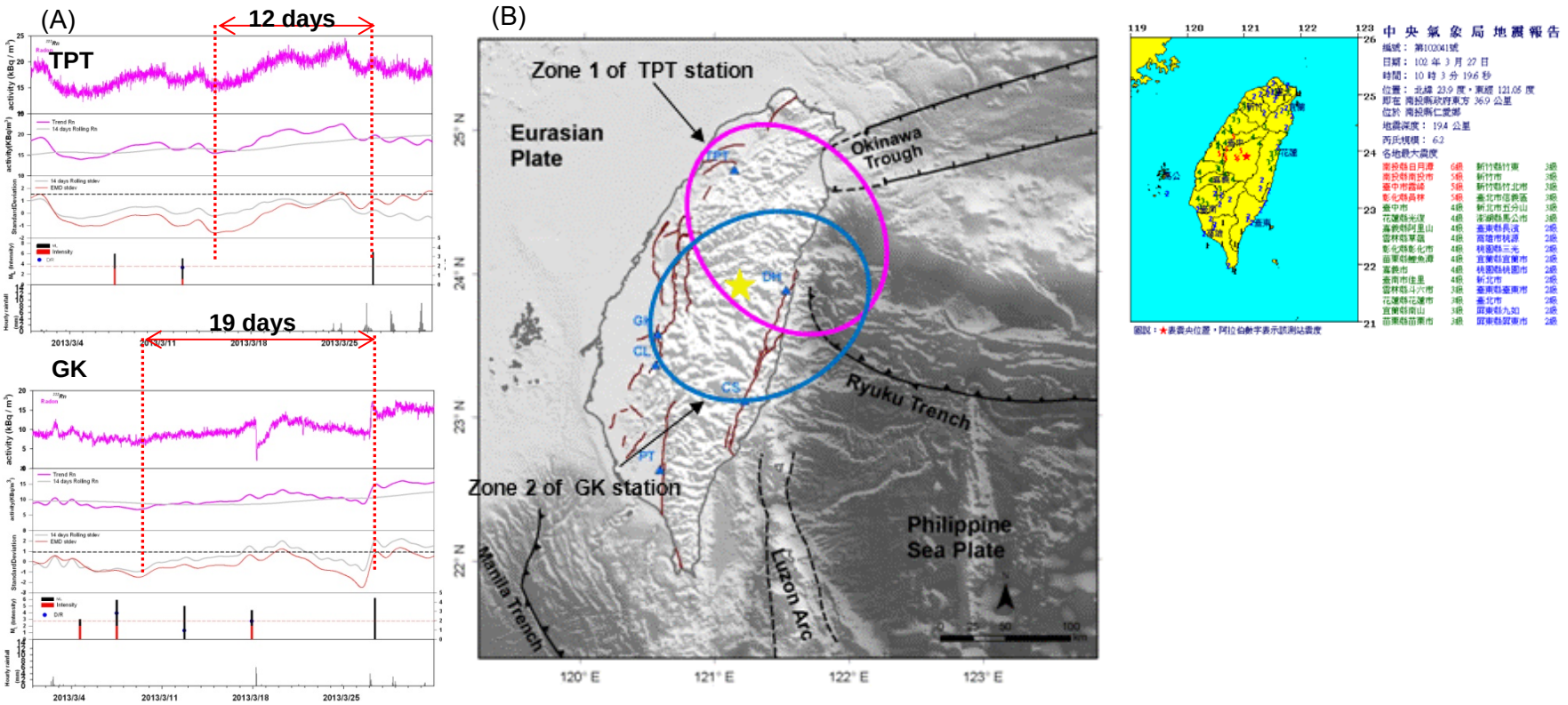


圖 7-2.37：2013/3/27 南投仁愛地震與各測站觀測情形，（A）大平地站（TPT）、古坑站（GK）土壤氣體觀測結果（2013/3/1-2013/3/31）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示南投仁愛地震的震央位置。

2013/6/2 南投仁愛地震（M_L＝6.5）

如圖 7-2.38 所示，古坑站在 23 天前，池上的錦園站在 29 天前，即有氣體異常的前兆反應。由於地震規模大，地底下釋放的氣體濃度長達三週以上，兩站皆超過我們定義的 1δ 異常門檻值。古坑站扣除掉中間偶有受到降雨影響的部分，仍可看出其異常變化的趨勢。錦園站則是從 5 月初開始緩慢上升，直到下降仍維持平穩的趨勢，唯有利用時序分析標準化，才能看出其有異常變化。這起地震震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 7-2.38（B）黃色星號）。

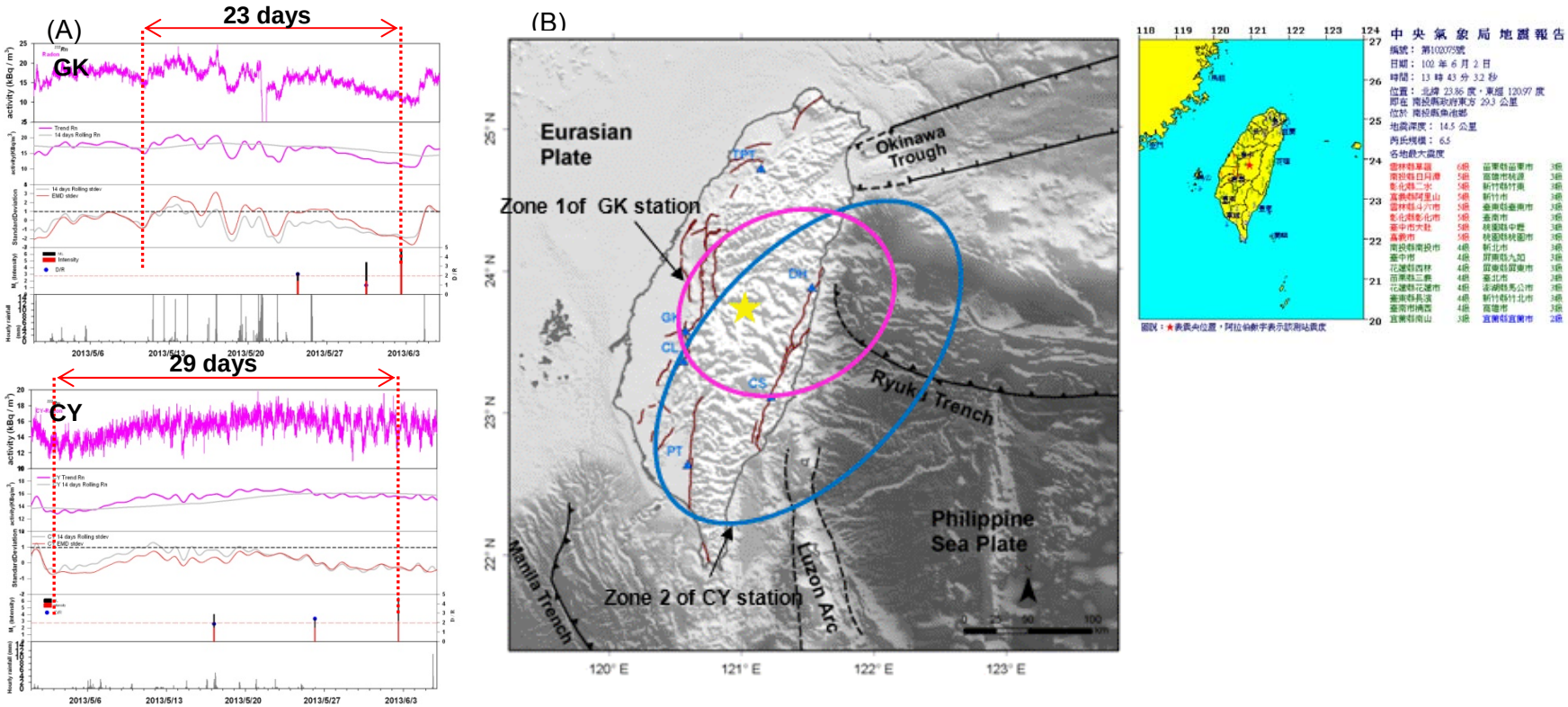


圖 7-2.38：2013/6/2 南投仁愛地震與各測站觀測情形，（A）古坑站（GK）、錦園站（CY）土壤氣體觀測結果（2013/5/1-2013/6/5）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示南投仁愛地震的震央位置。

2013/6/29 花蓮外海地震（M_L＝5.7）

如圖 7-2.39 所示，大平地站在 14 天前，池上的錦園站在 13 天前即有氣體異常反應。此時期大平地站是處在低背景值階段，全時段濾掉高背景值後，利用時序分析法求得其標準化；錦園站在異常變化期間有一明顯往下降的趨勢（原因不明），隨即恢復並在 6 月 26 日高點後緩慢往下降，兩個測站都有超過我們定義的異常門檻值。從圖上可以看出這起地震震央落在圖上兩個反應區範圍交集處（圖 7-2.39（B）黃色星號）。

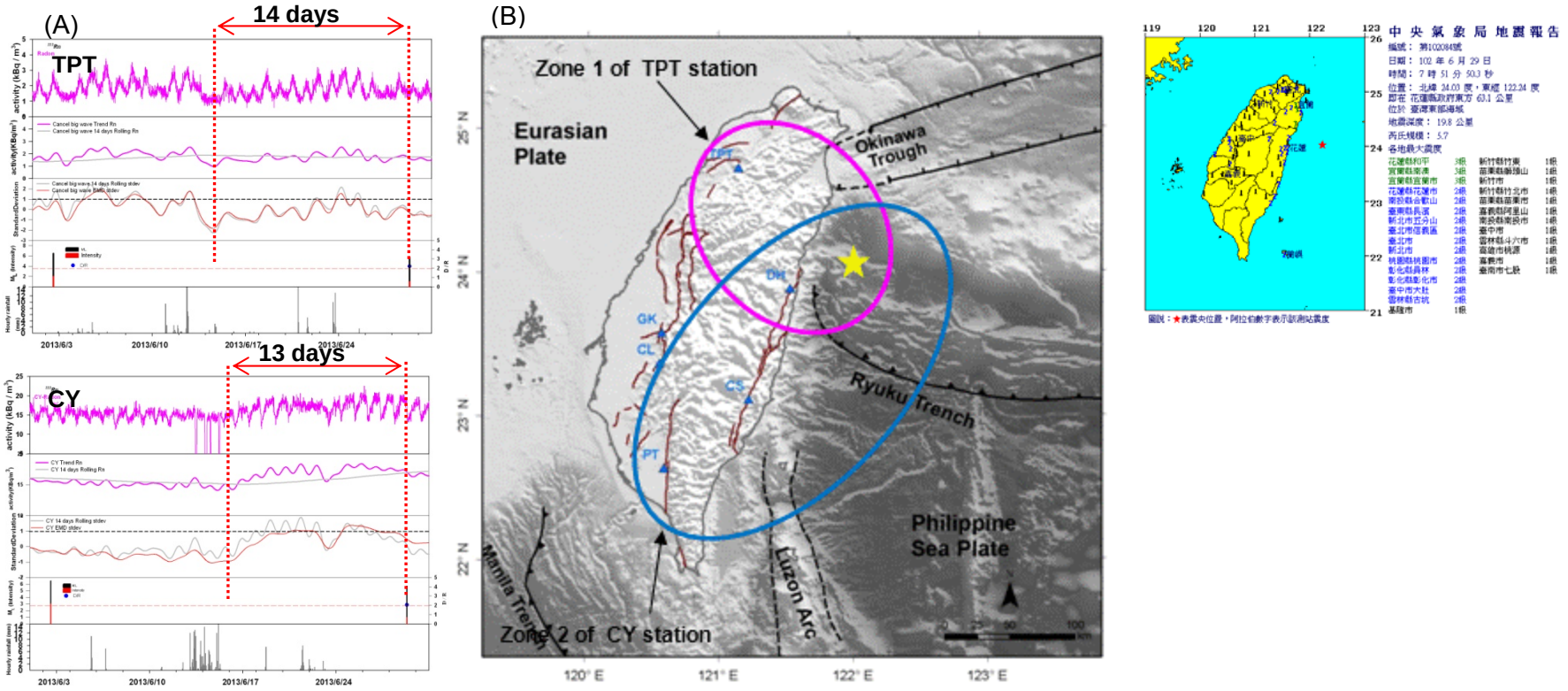


圖 7-2.39：2013/6/29 花蓮外海地震與各測站觀測情形，（A）大平地站（TPT）、錦園站（CY）土壤氣體觀測結果（2013/6/1-2013/6/30）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮外海地震的震央位置。

2013/10/31 花蓮瑞穗地震（M_L＝6.3）

如圖 7-2.40 所示，大平地站在 13 天前、池上站在 10 天前有氣體異常反應，東華站更在 9 月中約 45 天前氡氣濃度即緩慢上升。較平常時期明顯。目前時序分析法雖只運算到 10 月 28 日，但由圖上也可看出在地震來前氡氣確實有明顯的異常。三個測站都有超過我們定義的異常門檻值。從圖上可以看出這起地震震央落在圖上三個反應區範圍交集處（圖 7-2.40（B）黃色星號）。

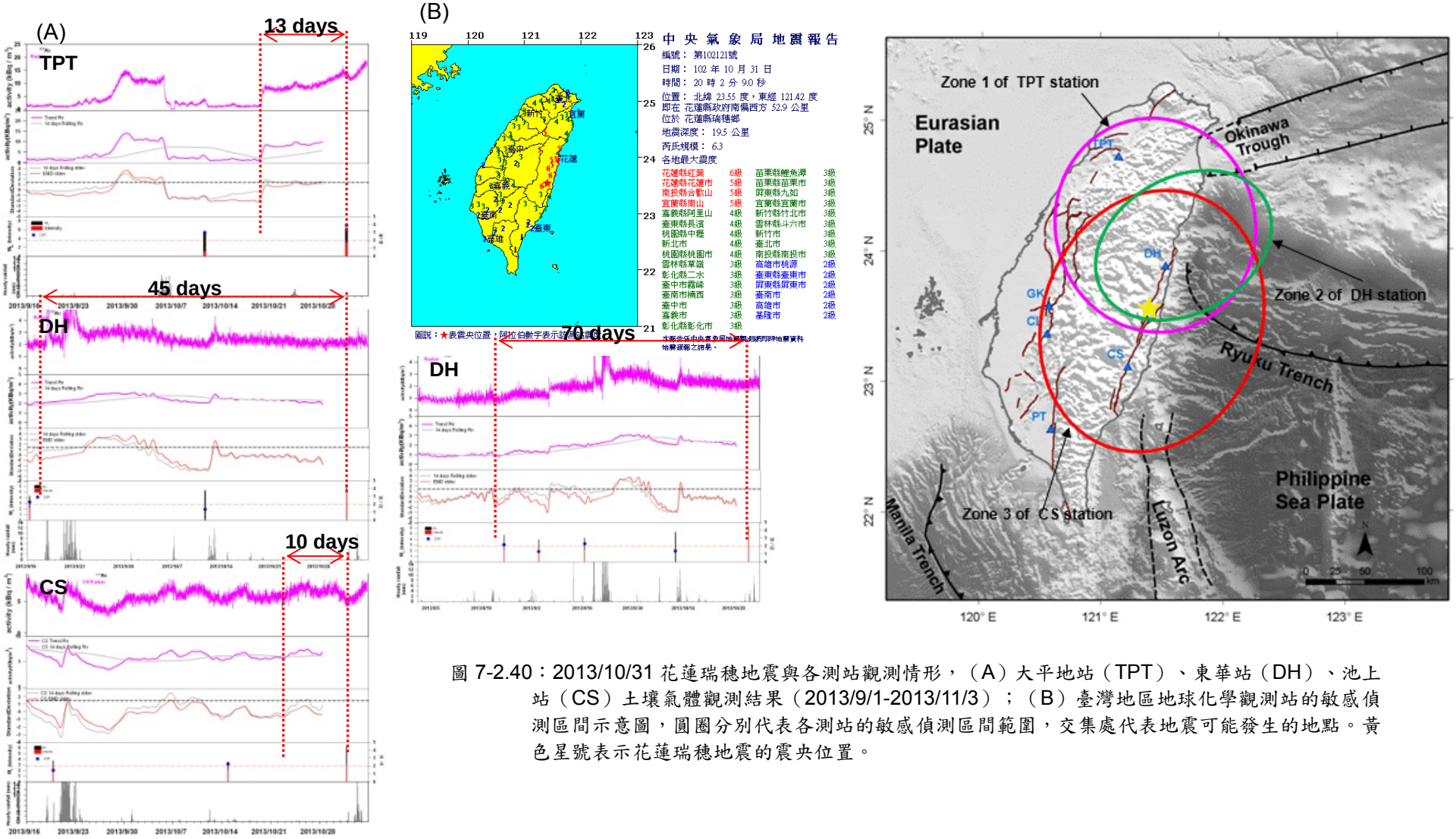


圖 7-2.40：2013/10/31 花蓮瑞穗地震與各測站觀測情形，（A）大平地站（TPT）、東華站（DH）、池上站（CS）土壤氣體觀測結果（2013/9/1-2013/11/3）；（B）臺灣地區地球化學觀測站的敏感偵測區間示意圖，圓圈分別代表各測站的敏感偵測區間範圍，交集處代表地震可能發生的地點。黃色星號表示花蓮瑞穗地震的震央位置。

7-3 地下水壓觀測

地下水壓或水位之升降主要原因歸類為三者：地下水的補注與流失、氣壓的變動、其他因素。第一項主要是因降雨以及人為抽水所造成的水位變化，此項為地下水位最明顯最主要的變動因素。第二項是因氣壓的變化影響到井下水壓計的讀數，其水位影響量會與氣壓變化量成一定比例，且變化的時間點會完全一致，若配合氣壓資訊可以簡單判讀。第三項為本研究之重心，在非為自然之水循環補助與流失、氣壓變動的因素之下，仍出現水位震動者，便稱之為水位異常變化。

研判為地下水壓異常之時段，與中央氣象局發布之地震事件發生時間比對篩選，進一步研判是否為同震或震前地下水壓變化。各測站篩選地震條件為：

規模≧5 或測站附近震度≧2 或 D/R≧2，其中 D 為應變半徑，以 $D = 10^{0.43*ML}$ 計算之，R 為測站與震央之距離。本年度新增一篩選條件：當地震震央距離水位站超過 200km，且震度或 D/R 值未達上列標準，則無視其地震規模，均予剔除。

7-3-1 臺北地區地下水壓觀測

將 2012 年 12 月至 2013 年 11 月底臺北地區明德中學、錦和國小及樹林飛灰掩埋場等三個觀測井之地下水壓資料，以及中央氣象局臺北站雨量及篩選出的地震（地震列表請見表 7-3.1）交互比對，可得下述主要結果（全年水位資料見圖 7-3.1）。

臺北地區三個觀測井水位變動之同步性高，受降雨的影響顯著。臺北站群中，明德、錦和兩站的水位變動幅度相近，明德站的特色為受短期降雨影響的情形最明顯，有許多因降雨而水位快速上升的情形；錦和站有著明顯的鋸齒狀日變化，因該站地處新北市永和區市區內，研判應為抽水的影響，但此狀況不影響錦和的水位趨勢，仍於臺北其他兩站一致；樹林站的水位變化幅度較其他兩站大，其變化量約兩站的五倍，但趨勢仍然與其他站相同，且樹林站水位變化幅度雖大，其每日的周期性水位變化量卻是三站之中最小。今年將氣壓因素加入比對之後，發現絕大部分的短期水位變化都與氣壓變化時間點一致，而長期以及大幅度的水位升降仍受控於雨量。經氣壓修正後，確認 2008 年 12 月至今臺北地區所發生的震前水位異常全數是由氣壓變動所引起，此與共站的井下應變儀觀測結果相符。2012 年 12 月至 2013 年 10 月底止，共發生 17 起符合篩選條件地震，其中規模大於 6 者有 3 月 27 日、6 月 2 日、6 月 8 日、10 月 31 日四起；臺北的三水位測站資料在這 18 起地震之前均未觀察到明顯的水位異常，絕大部分的水位波動受雨量、氣壓、每日變化所控制。

表 7-3.1：2013 年符合臺北三個觀測井篩選條件的地震。

西元時間	規模	震度	E	N	深度 (km)	震央	錦和井前兆	地下水壓異常程度	距震央 (km)	D/R	D/R >2	樹林井前兆	地下水壓異常程度	距震央 (km)	D/R	D/R >2	明德井前兆	地下水壓異常程度	距震央 (km)	D/R	D/R >2	備註
2012/12/3 01:45	5.1	0	121.55	23.97	18.1	花蓮縣政府西偏南方 7.5 公里			132	0.80				130	0.81				123	0.85		
2012/12/23 14:13	4.3	2	121.5	24.33	9.3	花蓮縣政府北偏西方 39.7 公里			73	0.97				72	0.98				65	1.09		
2013/1/7 14:49	5.6	1	122.96	24.38	37.5	宜蘭縣政府東偏南方 127.7 公里			163	1.57				172	1.49				172	1.49		
2013/1/17 16:30	4.8	2	121.9	24.46	5.2	宜蘭縣政府南偏東方 33 公里			72	1.61				77	1.51				73	1.59		
2013/1/21 3:09	5.5	2	122.56	24.69	105.6	宜蘭縣政府東方 80.6 公里			113	2.05	有			122	1.90				123	1.88		
2013/2/2 11:39	5.5	1	121.99	23.74	16.5	花蓮縣政府東南方 46.9 公里			147	1.57				149	1.55				144	1.61		
2013/2/17 9:32	4.5	2	121.51	24.31	19.8	花蓮縣政府北偏西方 38.2 公里			75	1.14				74	1.16				67	1.28		
2013/3/7 11:36	5.6	2	121.49	24.31	15.2	花蓮縣政府北偏西方 37.5 公里			75	3.40	有			74	3.46	有			67	3.82	有	
2013/3/12 17:03	5	1	121.8	24.35	47.4	宜蘭縣政府南方 47.9 公里			78	1.82				80	1.76				76	1.87		
2013/3/27 10:03	6.2	2	121.07	23.9	19.4	南投縣政府東方 38.8 公里			128	3.28	有			123	3.41	有			115	3.64	有	
2013/4/20 12:36	5.1	1	122.54	24.81	109.2	宜蘭縣政府東方 79.1 公里			108	1.44				117	1.33				119	1.31		

2013/6/2 13:46	6.5	3	121	23.87	14.5	南投縣政府東方 32 公里			134	3.83	有			128	3.99	有			120	4.25	有	
2013/6/8 0:38	6.2	2	122.69	23.88	58.6	花蓮縣政府東方 109.9 公里			173	2.68	有			179	2.59	有			176	2.64	有	
2013/6/29 07:51	5.6	2	122.17	24.03	16.9	花蓮縣政府東方 56 公里			127	2.02	有			131	1.96				127	2.02	有	
2013/7/16 18:11	5.3	2	121.54	24.28	10	花蓮縣政府北偏西方 32.6 公里			79	2.41	有			78	2.44	有			71	2.66	有	
2013/10/11 12:45	5.2	2	121.61	25.05	142.6	臺北市政府東偏北方 4.8 公里			14	12.39	有			24	7.24	有			29	5.84	有	D/R 僅平面運算，若考慮深度，三站數值均小於 2。
2013/10/31 20:05	6.3	3	121.42	23.55	19.5	花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里			160	3.21	有			157	3.25	有			150	3.41	有	
2013/11/16 3:39	5.2	1	122.44	23.92	16.9	花蓮縣政府東方 84.1 公里			153	1.13				158	1.09				152	1.12		

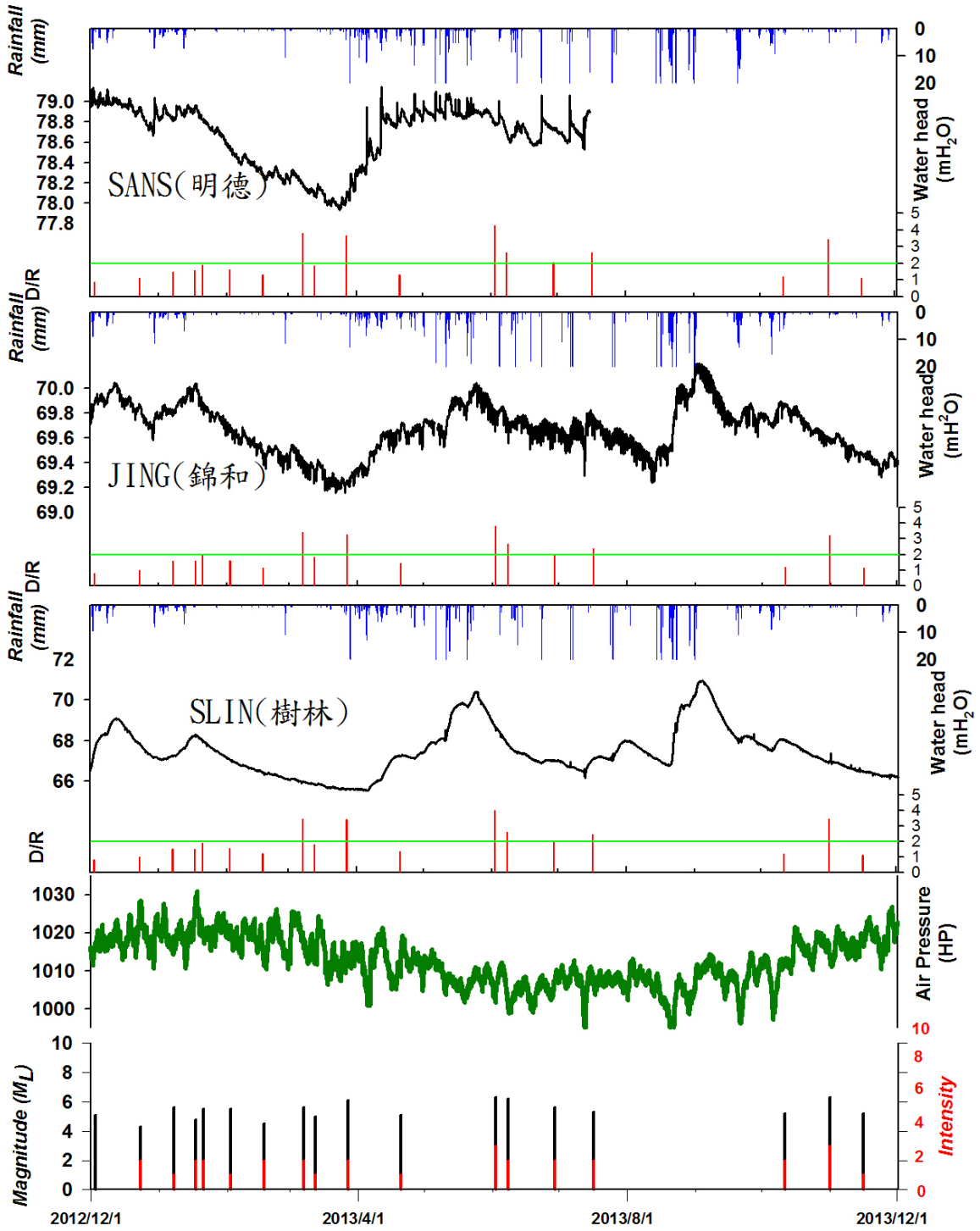


圖 7-3.1：臺北地區 2012 年 12 月至 2013 年 11 月，明德、錦和與樹林三個觀測井水壓、地震、降雨以及氣壓之對比圖。圖中每一站下方以及最下一欄為入選的地震事件，而每一站上方線條為降雨量。

7-3-2 新竹地區地下水壓觀測

新竹站群因各井的運作狀況發生異動，故本年度起改為接收 CINT（新樂）、BMMT（大坪）兩站的資料並分析，而去年仍有運作的雙溪、瑞峰兩站則去除，其中雙溪站是因地主不同意繼續提供該地點作為觀測井使用；而瑞峰站則是因儀器遭雷擊而故障，且經歷年來之水

位數據研判該地點對地下活動之敏感性不高。本年度所觀察分析的雨站中，新樂站會因降雨而出現明顯且大幅度的水位變化，且氣壓變動也會小幅度的影響水位，但在某些大地震前仍會出現明顯的震前異常現象，屬於敏感型的水井，同時也有可能因降雨而掩蓋了地震前的訊息；大坪則是今年首度分析水位變化的站點，目前能歸納出大坪站的水位不會因降雨而出現及時性的影響，但長期的水位（指周期在月以上之水位變化）仍會因季節性的累積雨量而變動，該站的日變化明顯，且每日變動的週期、幅度可能因氣壓、降雨、甚至地下應力改變而出現變化，日前仍在累積觀察資料中。新竹區全年水位資料見圖 7-3.2。

2012 年 12 月至 2013 年 11 月底，符合新竹站群篩選條件的地震共計 15 起（如表 7-3.2 所列），其中 3 月 27 日、6 月 2 日、6 月 8 日、10 月 31 日四件規模大於 6 的地震事件為 2013 年影響臺灣本島最大之地震。新樂站於 3 月 17 日起水位突然下降（如圖 7-3.3），在兩日內下降約 40cm，這段期間新竹地區無降雨，故研判其為明顯之震前水位異常現象，對應的地震為 3 月 27 日發生於南投、規模 6.1 之地震；與本次異常類似的事件，為去年 2 月 26 日霧台地震發生前，新樂站同樣出現大幅度且快速的水壓下降，時間為震前 7 日。在新樂站 2008 年 12 月以來的資料，快速的水位變化絕大多數都是受到驟雨影響而上升，其升高幅度可達 5 公尺，並且在雨停後一到二日內恢復至原水位面。新樂站突發性水位下降的情況，在這四年間共發生三次，一在 2012 年 1 月，降幅約 15 公分，無對應地震；二為 2012 年 2 月，降幅 55 公分，對應到同年 2 月 26 日的霧台地震；三為 2013 年 3 月，降幅 40 公分，對應到今年 3 月 27 日的南投地震。6 月 2 日地震前，新竹地區連續降雨，新樂站水位受此影響而未觀察出震前水位異常變化。10 月 31 日地震前，新竹地區有降雨一小段時間，水位小幅上升，未觀察出該地震所引起的震前水位異常現象。

表 7-3.2：2013 年符合新竹二個觀測井篩選條件的地震。

西元時間	規模	震度	E	N	深度(km)	震央	新樂井前兆	地下水壓異常程度	距震央(km)	D/R	D/R>2	大坪井前兆	地下水壓異常程度	距震央(km)	D/R	D/R>2	備註
2012/12/3 01:45	5.1	1	121.55	23.97	18.1	花蓮縣政府西偏南方 7.5 公里			90	1.74				105	1.49		
2013/1/7 14:49	5.6	1	122.96	24.38	37.5	宜蘭縣政府東偏南方 127.7 公里			177	1.44				204	1.25		
2013/1/17 16:30	4.8	2	121.9	24.46	5.2	宜蘭縣政府南偏東方 33 公里			72	1.60				98	1.18		
2013/1/21 3:09	5.5	2	122.56	24.69	105.6	宜蘭縣政府東方 80.6 公里			133	1.75				159	1.46		
2013/2/2 11:39	5.5	1	121.99	23.74	16.5	花蓮縣政府東南方 46.9 公里			133	1.74				152	1.52		
2013/3/7 11:36	5.6	2	121.49	24.31	15.2	花蓮縣政府北偏西方 37.5 公里			53	4.86	有			72	3.58	有	
2013/3/12 17:03	5	1	121.8	24.35	47.4	宜蘭縣政府南方 47.9 公里			70	2.02	有			94	1.50		
2013/3/27 10:03	6.2	2	121.07	23.9	19.4	南投縣政府東方 38.8 公里	有	10 日前水位下降 40 cm	94	4.47	有			96	4.36	有	
2013/4/20 12:36	5.1	1	122.54	24.81	109.2	宜蘭縣政府東方 79.1 公里			131	1.19				157	0.99		
2013/6/2 13:46	6.5	3	121	23.87	14.5	南投縣政府東方 32 公里			99	5.18	有			99	5.16	有	
2013/6/8 0:38	6.2	2	122.69	23.88	58.6	花蓮縣政府東方 109.9 公里			108	1.44				117	1.33		
2013/6/29 07:51	5.6	1	122.17	24.03	16.9	花蓮縣政府東方 56 公里			134	3.83	有			128	3.99	有	
2013/7/16 18:11	5.3	2	121.54	24.28	10	花蓮縣政府北偏西方 32.6 公里			58	3.28	有			65	2.90	有	
2013/9/8 16:07	3.3	2	121.02	24.78	8.8	新竹縣政府南方 16.8 公里			24	1.09				12	2.13	有	
2013/10/31 20:05	6.3	3	121.42	23.55	19.5	花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里			132	3.88	有			130	3.94	有	
2013/11/16 3:39	5.2	1	122.44	23.92	16.9	花蓮縣政府東方 84.1 公里			150	1.14				163	1.05		

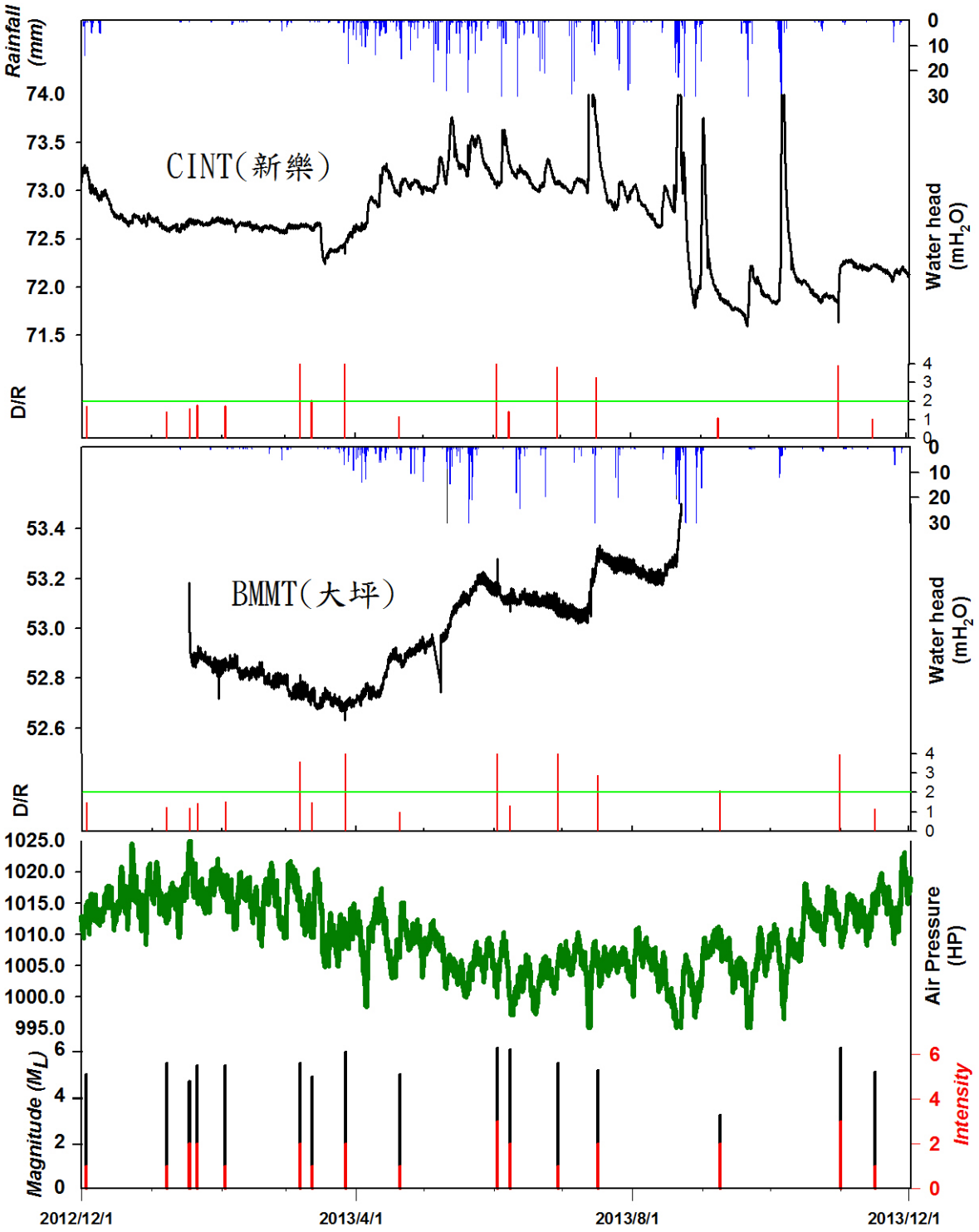
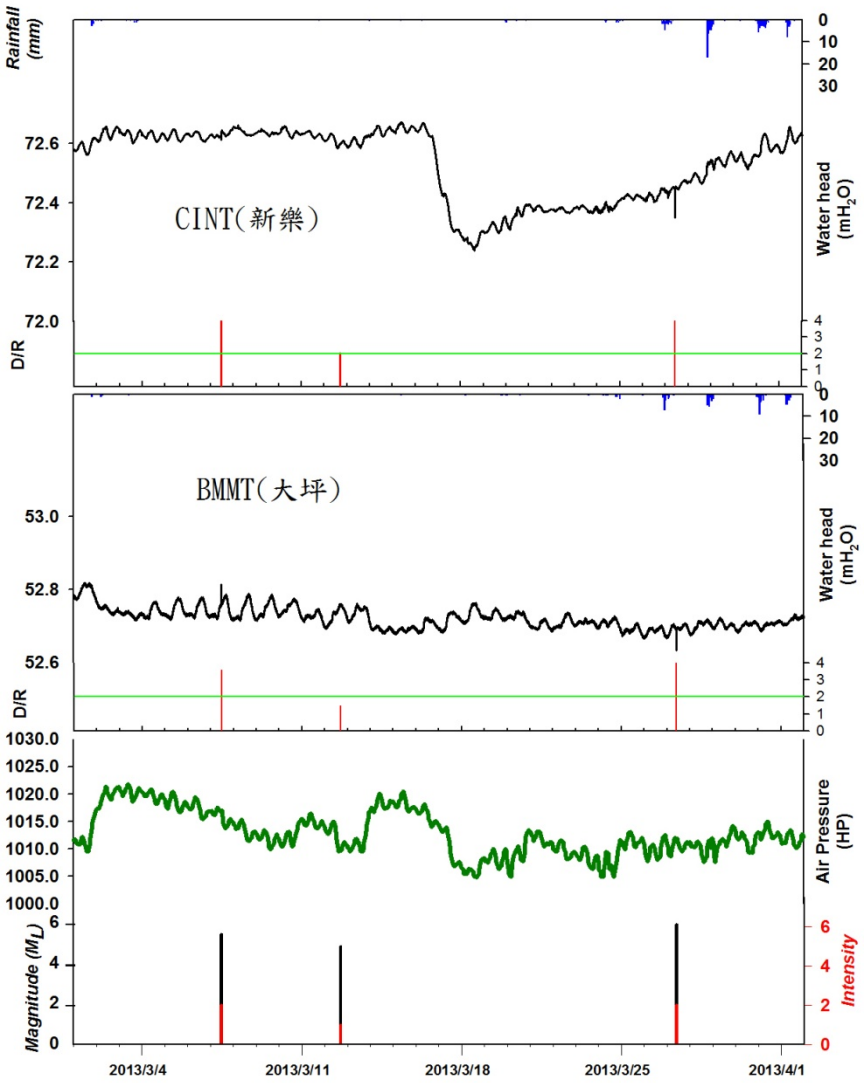


圖 7-3.2：新竹地區 2012 年 12 月至 2013 年 11 月，新樂與大坪觀測井水壓、地震、降雨以及氣壓之對比圖。圖中每一站下方以及最下一欄為入選的地震事件，而每一站上方線條為降雨量。（大坪於 1 月 17 日後使有資料，但 8 月颱風後再度故障。）



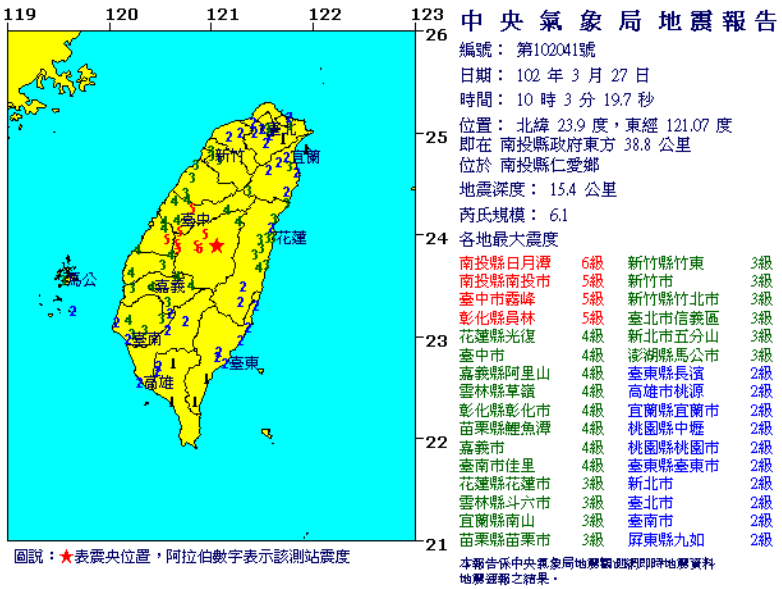


圖 7-3.3：新竹地區 2013 年 3 月新樂與大坪觀測井水壓、地震、降雨以及氣壓之對比圖。新樂站 3 月 17 日之異常對應 3 月 27 日之地震。

7-3-3 嘉義地區地下水壓觀測

2013 年嘉義觀測站群包含重新打井的中興與太興（2012 年 12 月中旬始有資料），以及儀器修復後的達邦（2013 年 3 月中旬始有資料，但 7 月後又中斷），共計分析 4 站水位資料。嘉義站群的沄水站今年加入氣壓資料分析，發現沄水站水位與氣壓資料幾乎呈現相反的圖形，此現象的原因為該站所使用的水壓計乃通氣式，自動平衡大氣壓力所帶來的誤差，又因為該站的水位對壓力特別敏感（自湧井），當氣壓增加，水位便會降低，在地下水壓力與大氣壓力之間達成平衡。本年度沄水站的多數水位波動因與大氣壓力的變動息息相關，非異常水位變化。中興與太興兩新井完工後於 2012 年 12 月中加入分析，依目前的資料看來，太興與中興兩井在降雨當下水位不會發生劇烈變化，水位上升約延遲三至五日，四、五月期間的水位大幅上升即是因為雨季來臨的關係；中興與太興站的水位變動幅度很大，尤其是中興站，如四月與五月的水位差可達 16 公尺，屬於水位劇烈升降型的觀測井。中興井於 4 月初發生一起水位驟降的事件，降幅約達 1 公尺，但之後的一個月內未發生符合篩選條件的地震，無法確認是否為地下應力改變而引起的水位異常變化。達邦站於今年 3 月中恢復資料，該站的特性與中興、太興類似，在降雨當下不會出現劇烈變化，是長期的季節性水位波動，但達邦的水位變動幅度低，上半年度的水位變化量在 1.5 公尺以內，目前仍未觀察出因地震引起的異常變化。自 2012 年 12 月至 2013 年 11 月底嘉義地區沄水、太興、中興與達邦四個觀測井之地下水壓資料，中央氣象局中埔站、樟腦寮、阿里山等鄰近雨量站時降雨資料，再配合地震資料（表 7-3.3）繪製成圖 7-3.4。此段時間內未發現因地震而引起的異常水位變化。

表 7-3.3：2013 年符合嘉義四個觀測井篩選條件的地震。

西元時間	規模	震度	E	N	深度(km)	震央	中興井前兆	太興井前兆	地下水壓異常程度	距震央(km)	D/R	D/R>2	達邦井前兆	地下水壓異常程度	距震央(km)	D/R	D/R>2	沄水井前兆	地下水壓異常程度	距震央(km)	D/R	D/R>2	備註
2012/12/3 01:45	5.1	1	121.55	23.97	18.1	花蓮縣政府西偏南方 7.5 公里				105	1.49				100	1.56				123	1.27		
2012/12/31 00:03	5.4	4	120.93	23.46	5.7	嘉義市政府東方 49.1 公里				32	6.65	有			18	11.35	有			42	5.03	有	
2013/2/2 11:39	5.5	1	121.99	23.74	16.5	花蓮縣政府東南方 46.9 公里				140	1.65				131	1.77				154	1.50		
2013/2/19 10:12	4.5	4	120.57	23.36	14.5	嘉義市政府東南方 17.2 公里				21	4.05	有			21	4.10	有			5	18.34	有	
2013/3/7 11:36	5.6	2	121.49	24.31	15.2	花蓮縣政府北偏西方 37.5 公里				122	2.10	有			121	2.11	有			142	1.80		
2013/3/17 21:53	4.6	2	120.95	23.68	5	南投縣政府東南方 36 公里				36	2.67	有			32	2.93	有			54	1.76		
2013/3/27 10:03	6.2	3	121.07	23.9	19.4	南投縣政府東方 38.8 公里				60	7.05	有			59	7.08	有			80	5.28	有	
2013/4/2 23:16	3.8	4	120.56	23.24	14.1	嘉義市政府南偏東方 29.3 公里				34	1.25				31	1.41				16	2.70	有	
2013/4/6 17:34	3.7	3	120.69	23.21	8.7	嘉義市政府東南方 38.5 公里				37	1.05				28	1.41				25	1.56		
2013/5/18 17:50	3.8	1	120.44	23.27	16.8	嘉義市政府南方 23 公里				36	1.19				38	1.15				15	2.79	有	
2013/5/28 12:00	3.4	2	120.44	23.46	7.8	嘉義市政府南偏西方 3.1 公里				22	1.33				32	0.92				13	2.28	有	
2013/6/2 13:46	6.5	5	121	23.87	14.5	南投縣政府東方 32 公里				52	9.83	有			53	9.70	有			72	7.08	有	
2013/6/2 16:16	4.6	2	121	23.87	10.5	南投縣政府東方				52	1.83				53	1.80				72	1.32		

						31.3 公里																
2013/6/8 00:38	6.2	2	122.69	23.88	58.6	花蓮縣政府東方 109.9 公里				213	2.18	有			204	2.28	有			227	2.04	有	
2013/6/11 10:48	3.9	1	120.77	23.52	14.7	雲林縣政府東南方 32.2 公里				14	3.37	有			8	6.18	有			29	1.65		
2013/6/29 07:51	5.6	1	122.17	24.03	16.9	花蓮縣政府東方 56 公里				166	1.55				158	1.62				182	1.41		
2013/7/16 18:11	5.3	2	121.54	24.28	10	花蓮縣政府北偏西方 32.6 公里				123	1.54				122	1.56				143	1.33		
2013/9/1 10:28	4.1	2	120.75	23.29	8.3	嘉義市政府東偏南方 37.2 公里				30	1.91				18	3.21	有			25	2.35	有	
2013/9/30 20:05	4.4	2	120.97	23.83	15.2	南投縣政府東偏南方 29.6 公里				47	1.67				47	1.64				67	1.17		
2013/10/25 12:43	3.6	1	120.66	23.37	15.2	嘉義市政府東偏南方 24.4 公里				19	1.83				13	2.73	有			13	2.66	有	
2013/10/29 17:04	3.8	2	120.43	23.41	15.3	嘉義市政府南偏西方 8.3 公里				25	1.69				33	1.31				11	4.01	有	
2013/10/31 20:05	6.3	3	121.42	23.55	19.5	花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里				80	6.38	有			69	7.38	有			93	5.52	有	
2013/11/16 3:39	5.2	1	122.44	23.92	16.9	花蓮縣政府東方 84.1 公里				189	0.91				180	0.96				204	0.85		
2013/11/21 03:10	3.6	1	120.72	23.49	13.8	嘉義市政府東方 27.6 公里	有		下降 20cm	11	3.35	有			5	7.00	有			23	1.55		
2013/12/1 08:18	3.3	2	120.64	23.48	7.7	嘉義市政府東方 18.6 公里			同上	7	3.77	有			12	2.27	有			16	1.68		
2013/12/3 18:54	3.8	1	120.72	23.6	12.3	雲林縣政府東偏南方 23.2 公里			同上	11	3.97	有			17	2.61	有			31	1.39		
2013/12/7 14:53	3.9	1	120.49	23.51	20.3	嘉義市政府東北方 5.1 公里			同上	15	3.14	有			27	1.75				15	3.21	有	

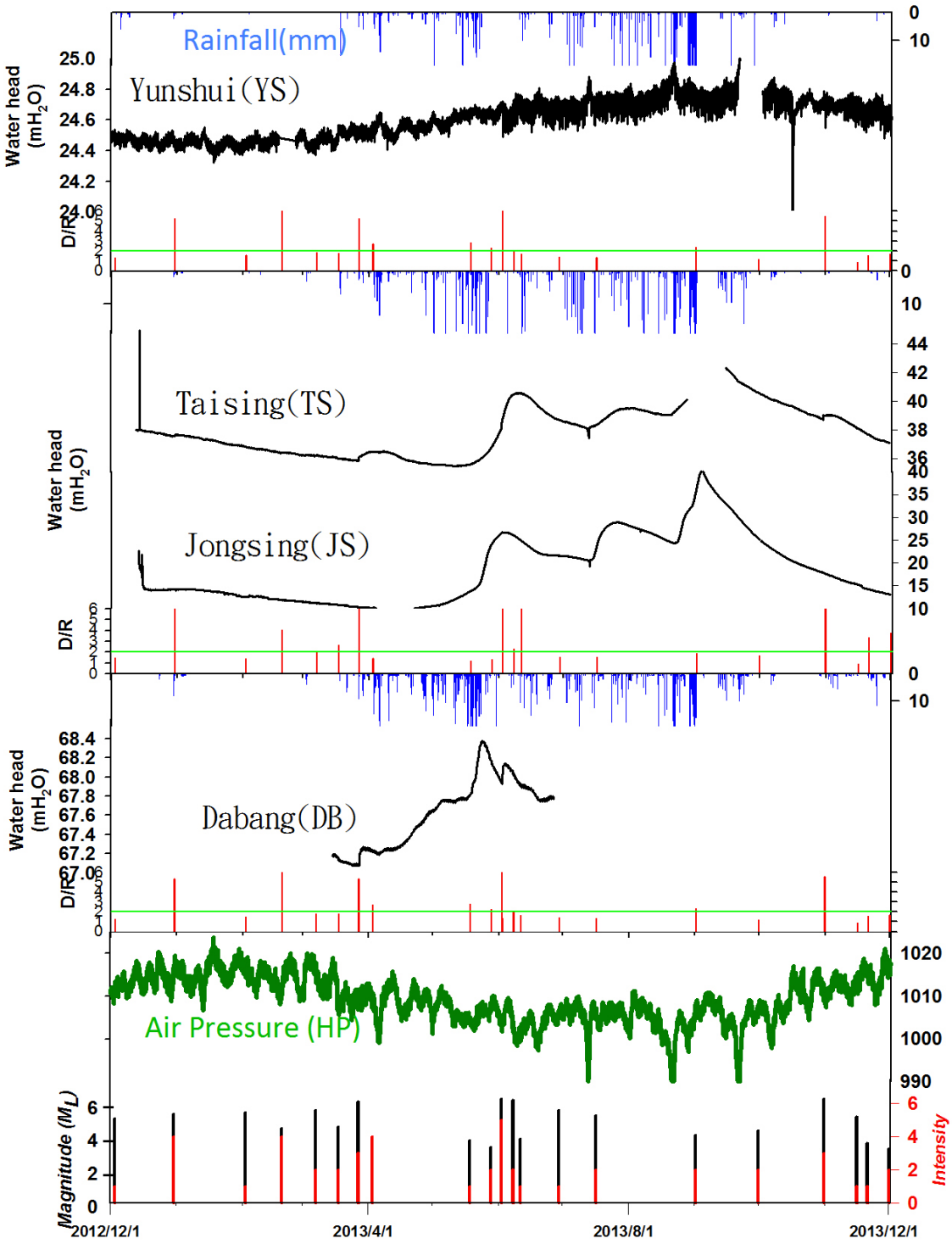
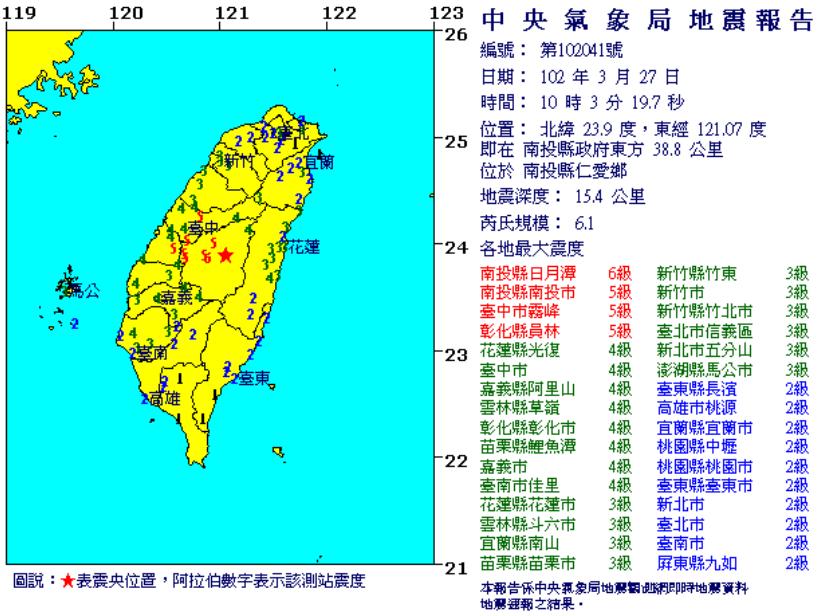


圖 7-3.4：嘉義地區 2012 年 12 月至 2013 年 11 月，沄水、中興、太興與達邦觀測井水壓、地震、降雨以及氣壓之對比圖。圖中每一站下方以及最下一欄為入選的地震事件，而每一站上方線條為降雨量。目前達邦站資料狀況不佳，沄水站 10 月中旬的水壓驟降是因為開井取水樣，非地震因素造成。

7-3-4 2013 年較大地震討論

依據中央氣象局所公布的地震資料顯示，臺灣地區於 2012 年 12 月至 2013 年 11 月間所發生規模超過 6 的地震共計 6 起，分別發生於 3 月 27 日、4 月 11 日、5 月 21 日、6 月 2 日、6 月 8 日、10 月 31 日六天，但 4 月 11 日與 5 月 21 日所發生之地震距離臺灣本島過遠，多數地區無感，而 6 月 8 日的發生於花蓮外海的地震也只對本島產生 1 與 2 級的震度，故本節將重點放於 3 月 27 日、6 月 2 日與 10 月 31 日三起發生地震作討論。

(1) 2013 年 3 月 27 日南投地震



該地震發生於南投縣仁愛鄉，震央介於新竹站群與嘉義站群之間，對新竹與嘉義的影響程度相似，對臺北站群的影響較小；關於 3 月 27 日地震對各站群所造成的水位影響，將分別呈現於圖 7-3.5、圖 7-3.6、圖 7-3.7。

依據目前的觀測結果，僅新樂站出現震前水位異常反應，其他站則多數為氣壓影響所致的水位變化；新樂站此種水位驟降的震前異常之前曾於 2012 年 2 月 26 日發生之霧台地震前發生過，當時水位在兩日之內下降 60 公分，3 月 27 日南投地震與去年 2 月 26 日霧台地震的比較圖請見圖 7-3.8。

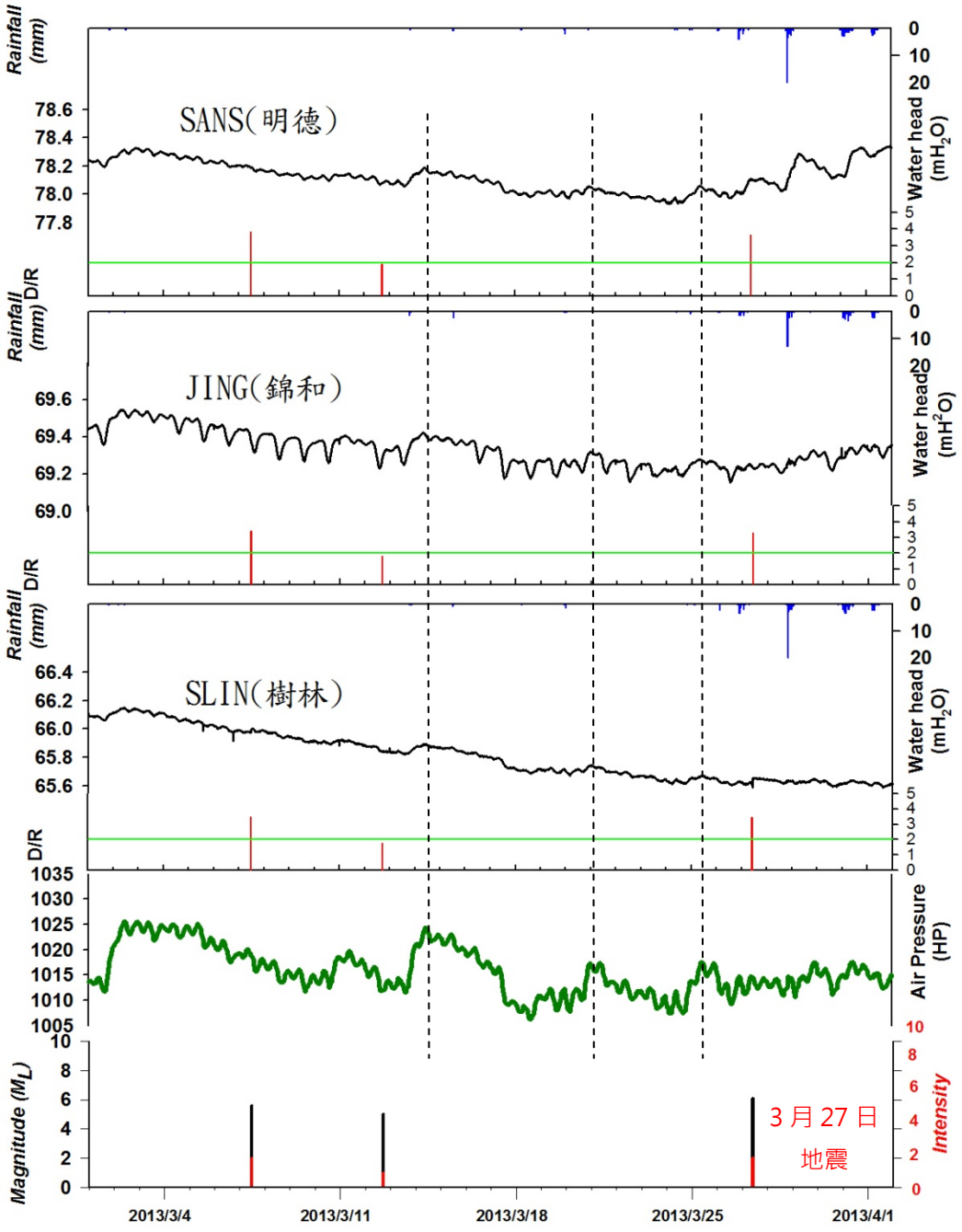


圖 7-3.5：3 月 27 日地震前，臺北站群水位圖。

臺北三站均無明顯震前異常，雖此段時間內降雨稀少且水位出現小幅波動，但與氣壓變化的時間點完全一致（圖中虛線），故判斷為氣壓所致，非 3 月 27 日地震之震前異常。

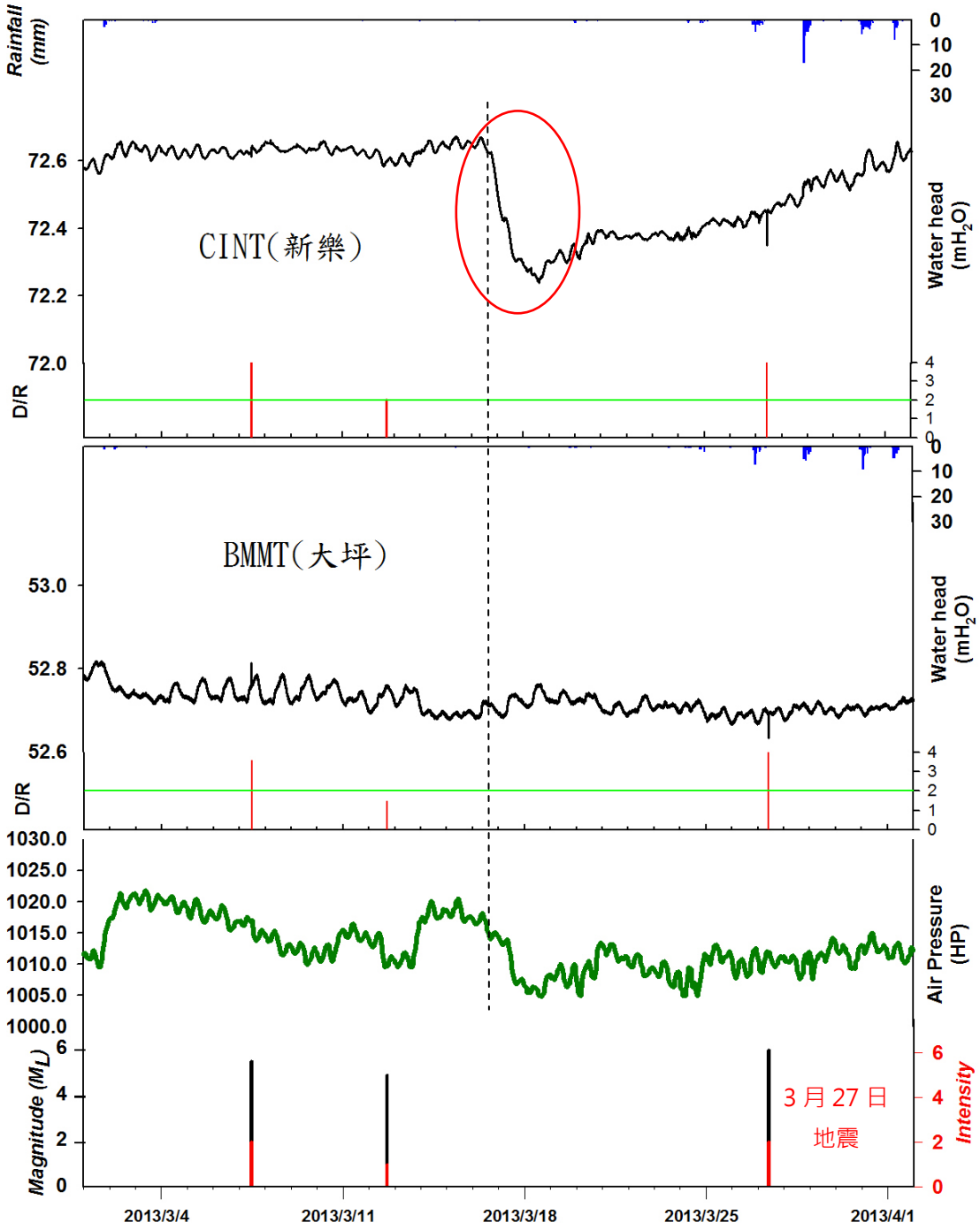


圖 7-3.6：3 月 27 日地震前，新竹站群水位圖。

新樂站於震前 10 日出現明顯的水位下降，氣壓與水壓的下降時間點不一致(圖中虛線)，且水位下降量遠大於氣壓下降量，故判定為 3 月 27 日地震之震前水位異常；而大坪站在 3 月期間的每日水位波動的頻率出現數次改變，但因與氣壓高點的穩合度太高，無法確認為異常。

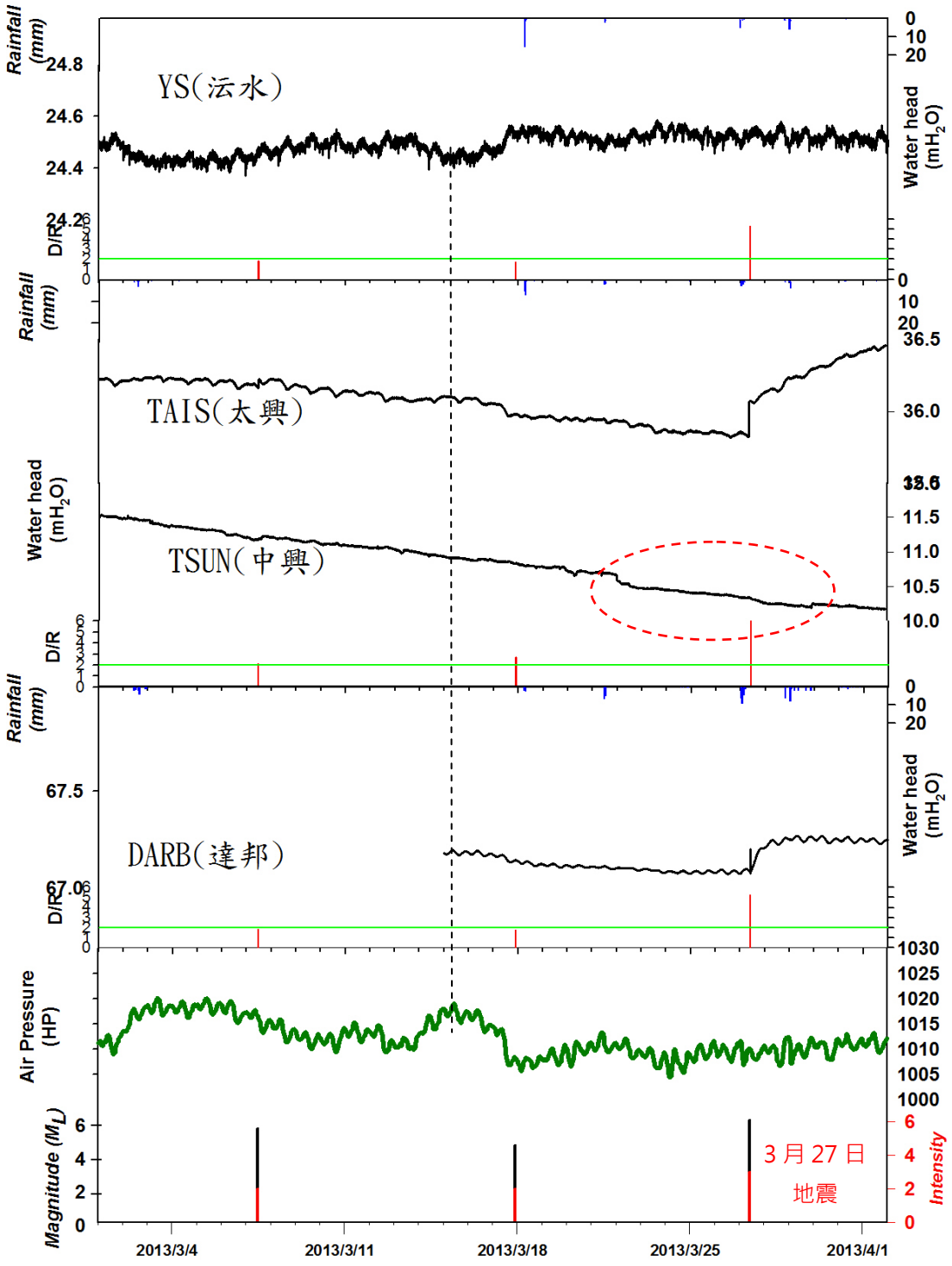


圖 7-3.7：3 月 27 日地震前，嘉義站群水位圖。

沄水站的水位變化與氣壓變化互為鏡像圖形，無震前異常訊息；太興、中興與達邦站在 3 月前期出現與氣壓些為吻合的水位變化，震前中興站水位雖有上下波動（圖中虛線圓圈），但該水位變化形式在中興站很常見，故無法判定異常。

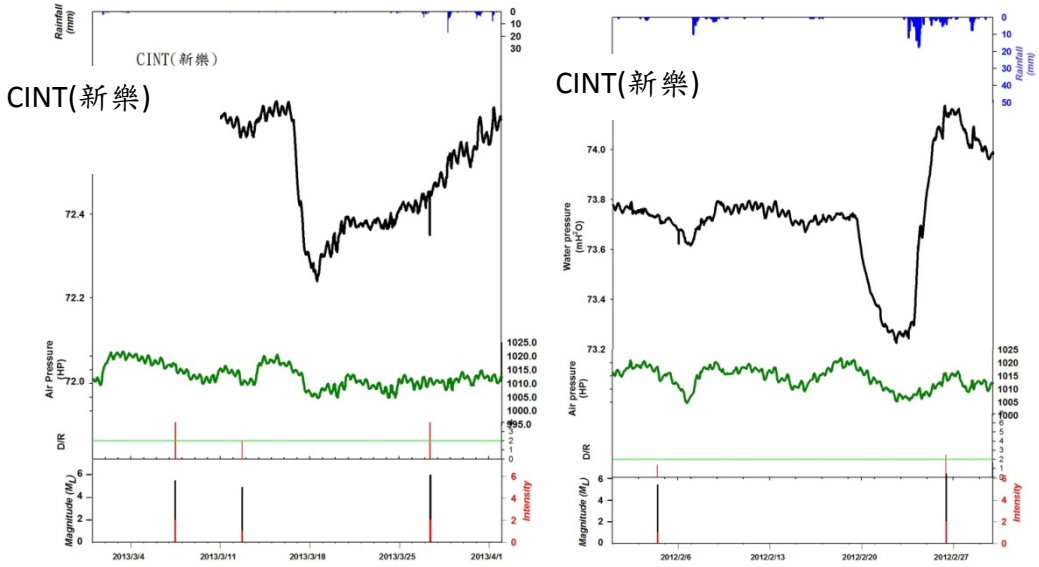


圖 7-3.8：3 月 27 日南投地震與霧台地震，新樂站水位異常比較圖。

兩次震前異常的相似點在於水位異常型態皆為下降，降幅大於 40cm， 水位異常的開始時間為地震發生前 7~10 天。

(2) 2013 年 6 月 2 日南投地震

6 月 2 日之地震與 3 月 27 日之地震在規模、震央、深度都相當類似；關於 6 月 2 日地震對各站群所造成的水位影響，將分別呈現於圖 7-3.9、圖 7-3.10、圖 7-3.11。

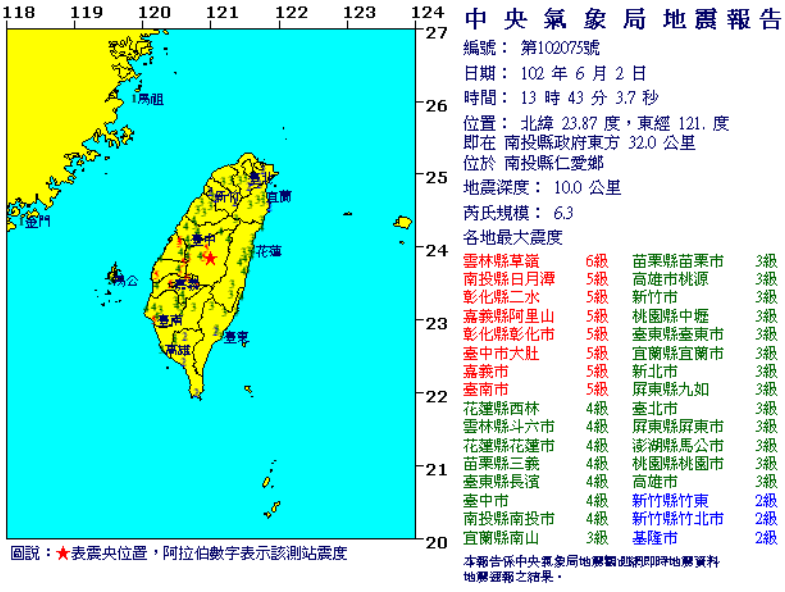


圖 7-3.9：6 月 2 日地震前，臺北站群水位圖。

5 月前期受臨續降雨影響嚴重，無法辨識異常水位。5 月 27 日到地震前有一段無降雨的時間明德站所出現的水位變化（圖中虛線）是由氣壓所引起，非震前異常。

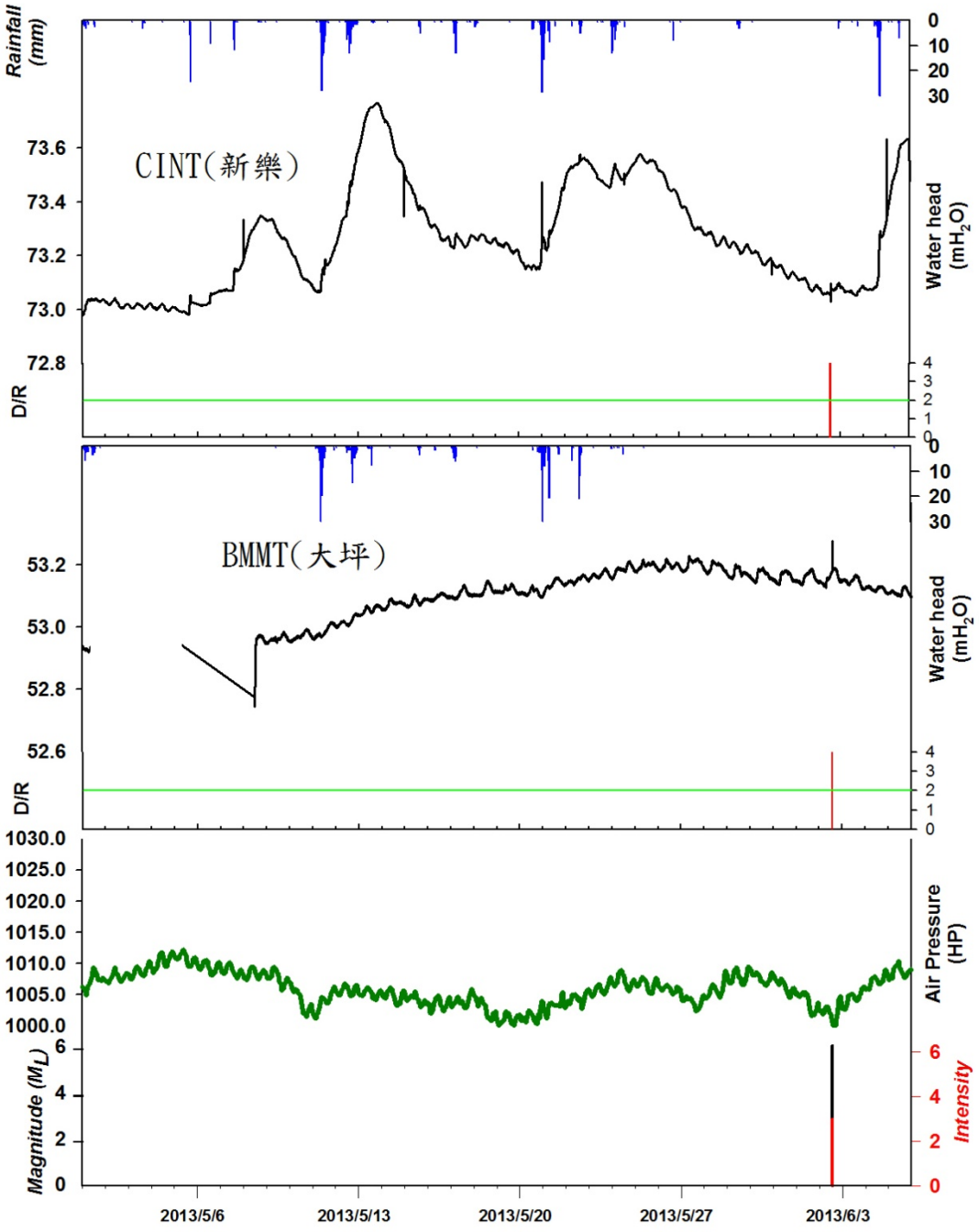


圖 7-3.10：6 月 2 日地震前，新竹站群水位圖。

本月份新樂水位變化主要受控於連續降雨，在強烈的降雨之下氣壓的影響被掩蓋掉，同時也無類似 3 月 27 日的震前驟降反應。

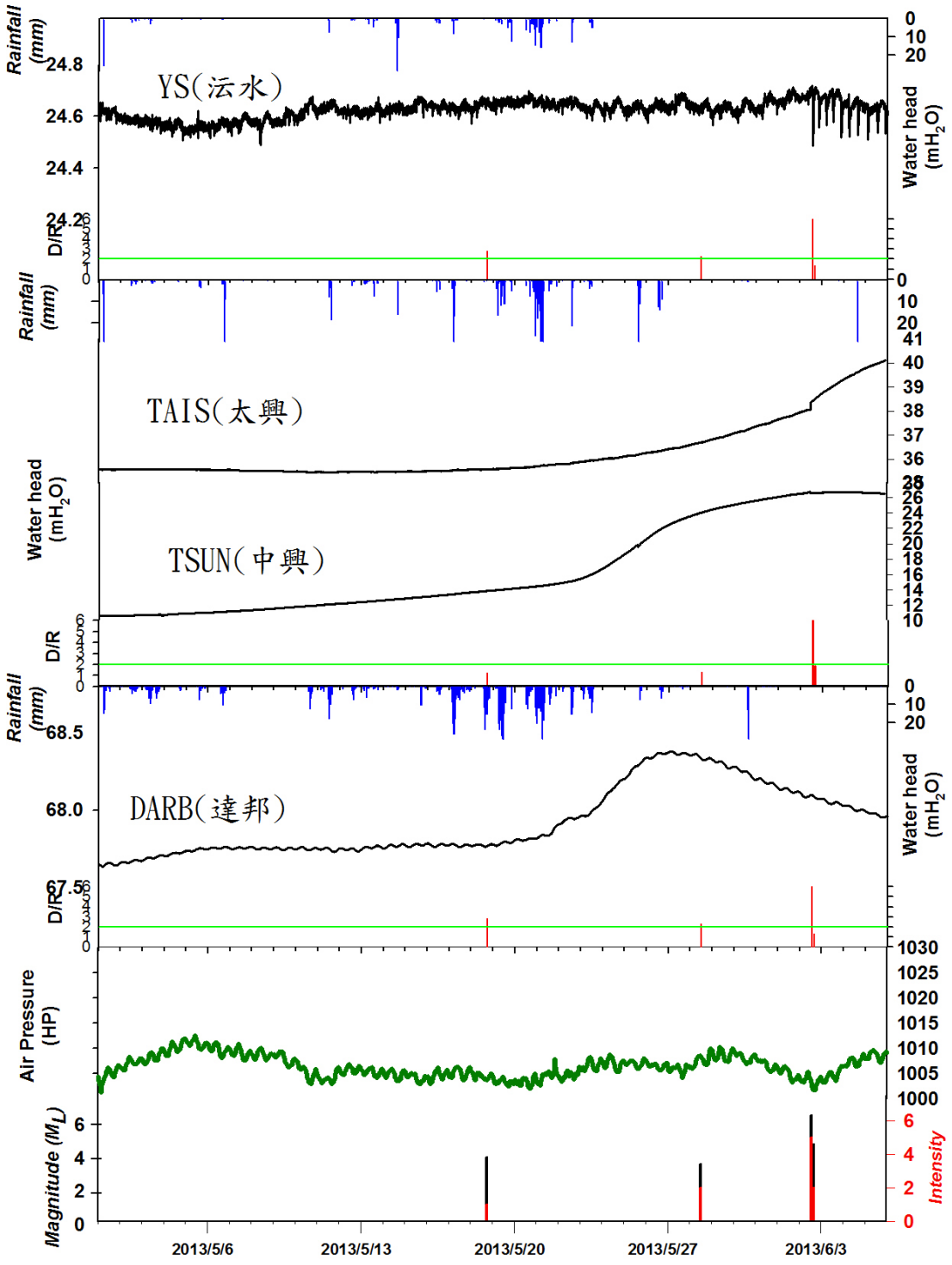
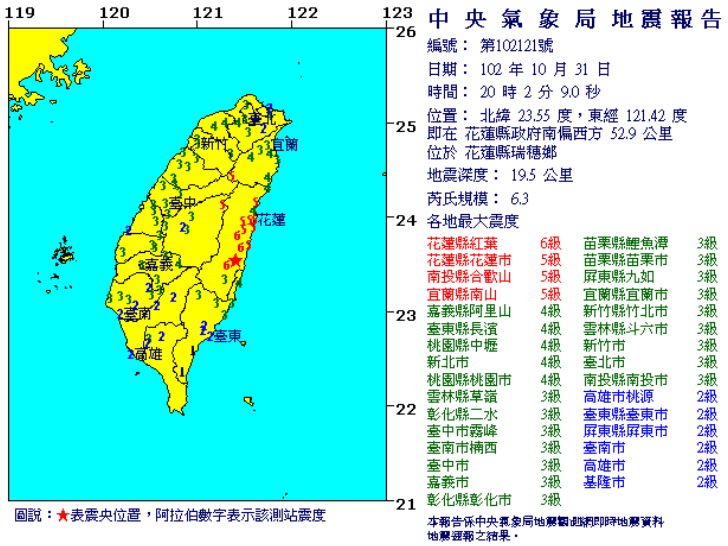


圖 7-3.11：6 月 2 日地震前，嘉義站群水位圖。

本月份除沄水站外，都有出現長期性的大量水位上升，主要原因為五月初、五月中的連續降雨，而對於降雨反應不明顯的沄水站，則仍維持與氣壓相反的走勢，無震前異常訊息。

(3) 2013 年 10 月 31 日花蓮地震



10 月 31 日發生於花蓮規模 6.3 的地震，震央位於島內、震源淺，對全臺均有強烈影響，但可惜在三站群的震前水位資訊中，均無明顯的震前異常出現。關於 10 月 31 日地震對各站群所造成的水位影響，將分別呈現於圖 7-3.12、圖 7-3.13、圖 7-3.14。

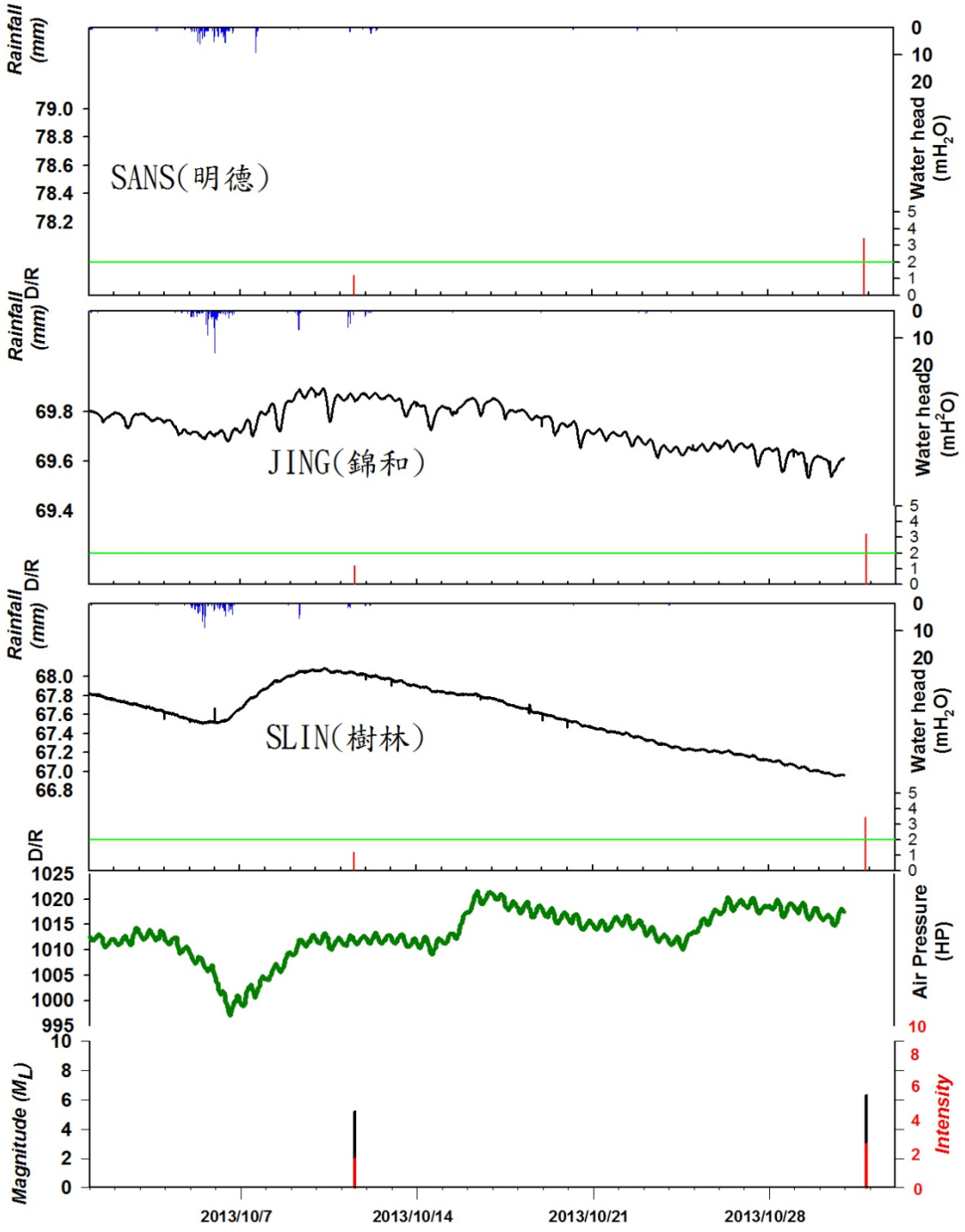


圖 7-3.12：10 月 31 日地震前，臺北站群水位圖。

10 月份降雨稀少，而在 10 月 25 日附近錦和與樹林同時出現小幅上升，此現象為氣壓升高造成，故於 10 月 31 日前無震前異常訊息。

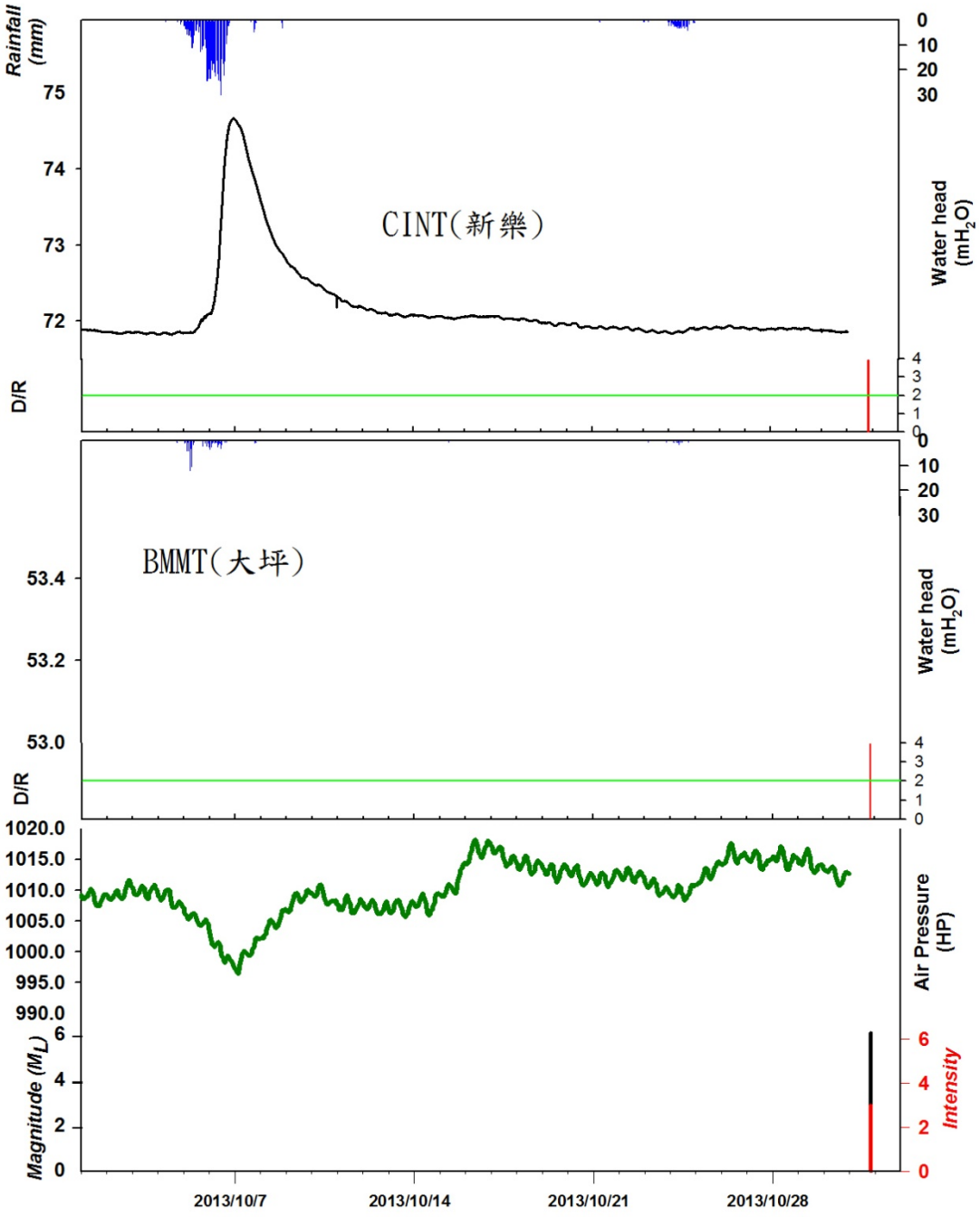


圖 7-3.13：10 月 31 日地震前，新竹站群水位圖。

受本月初連續降雨影響，新樂站水位上升近 3 公尺，不過在 5 天後水位即恢復至基準線，10 月 25 日的小幅降雨對新樂水位影響不大，整體而言，10 月 31 日前無震前異常訊息。

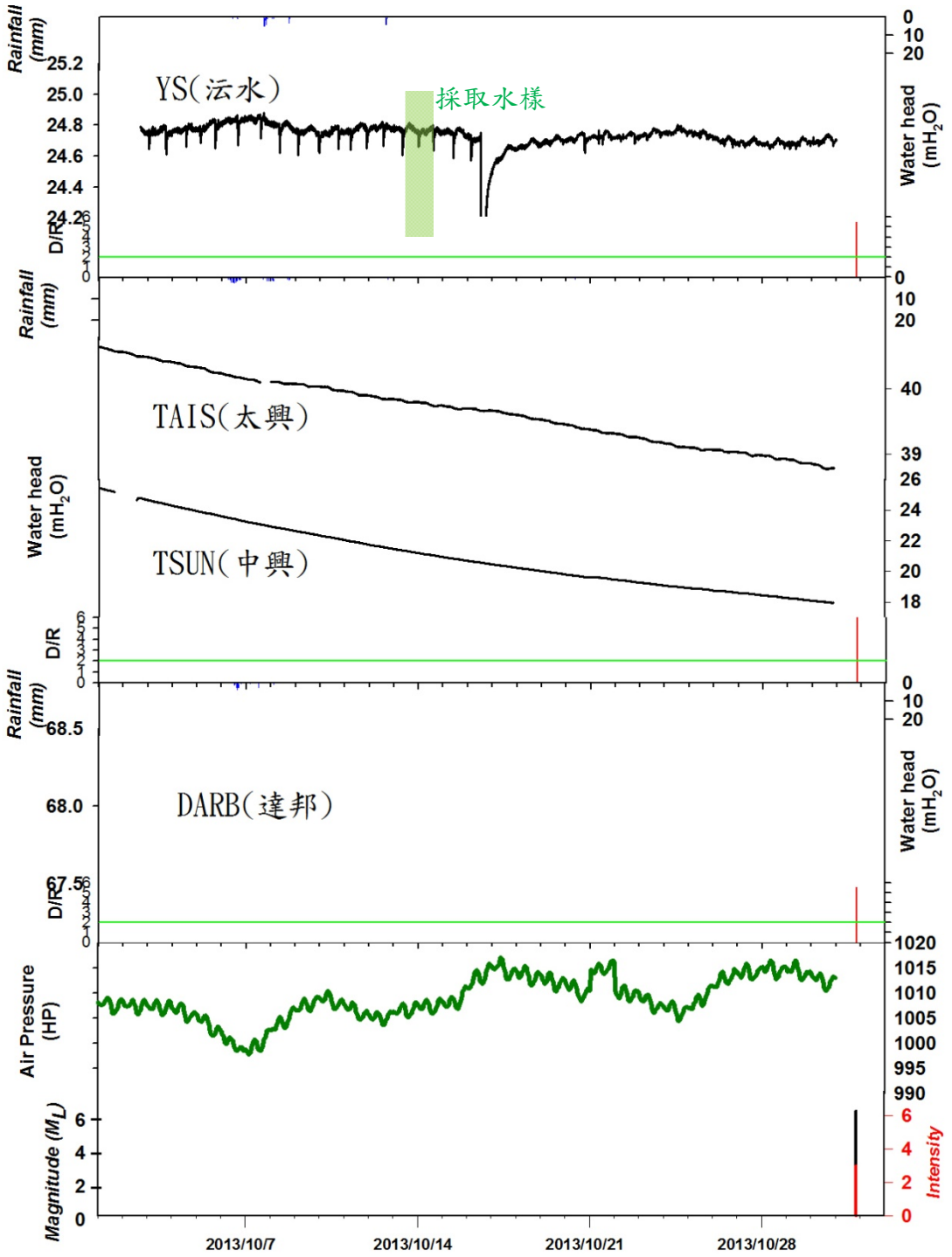


圖 7-3.14：10 月 31 日地震前，嘉義站群水位圖。

10 月 16 日中午的沄水水位因為現場取水樣測溶解氣與氚所造成，非震前異常現象，而在 10 月 31 日前，中興、太興兩井的水位皆無明顯變化。

2013 年地下水壓觀測部分，導入氣壓因素比對，確認多數小型水位波動為氣壓所致，剔除了大部分的異常數量，故今年僅新竹站群的新樂站出現一處明顯水位異常。

7-3-5 歷年水位資料的氣壓修正與異常重新確認

2013 年開始，地下水壓之異常判定新增氣壓變動的比對要素，因此使異常判定更加準確，同時也明示地下水壓之異常數量非往年所認定的多，如 2013 年僅新樂站出現一處明顯的水位異常。

目前使用氣壓資料來判斷的方式，依照各井所使用的水位計類形而有所不同，目前 9 口觀測井中水壓計類型分為兩類,一為絕對壓力式水位計,二為平衡壓力式水位計(如圖 7-3.15):

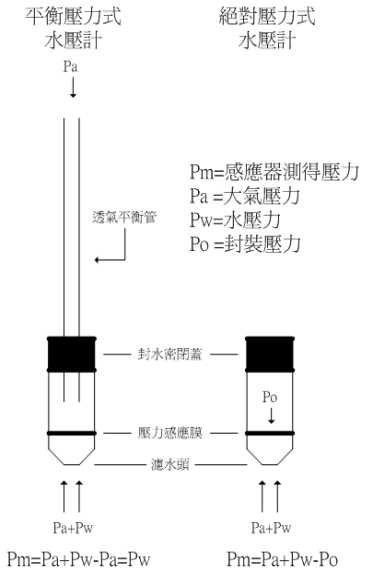


圖 7-3.15：兩種水位計類型簡示。

絕對壓力式水位計：

其水位計內的壓力膜為封閉構造，不與外界相連通，故該水位計所測得的壓力為水位計上方全部壓力的總合，包含水的壓力與大氣的壓力，而數值即會隨著氣壓上升而上升，反之亦然。本計畫使用絕對壓力式水位計的觀測井較多，包含臺北的明德、錦和、樹林，新竹的新樂，以及嘉義的中興、太興、達邦等 7 站。

平衡壓力式水位計：

水位計壓力膜的另一端接有氣管與地表大氣相通，理論上記錄器所顯示的數值將不受氣壓影響，但是本計畫的沄水測站仍出現與氣壓波動成完全相反走勢情況發生，此現象是因為沄水觀測井所深入的含水層為封閉性良好的水層，其水位面是地下總壓力與氣壓的平衡點，當其中任一方壓力發生改變的時候，其平衡點（水位面）就會移動。本計畫使用平衡壓力式水位計的觀測井為新竹的大坪與嘉義的沄水等 2 站；其中大坪非封閉水層，水位高低幾乎與氣壓無關，而沄水水層封閉良好，水位與氣壓成相反的走勢。

以上兩種類型的水位計數值受到氣壓的影響比率均為固定，可以使用數學方式加以修正，以下為修正的步驟：

1. 將水位資料與氣壓資料的取樣頻率同步化：目前水位資料為每分鐘一筆，而氣壓資料為每小時一筆，故將兩者均處理成每十分鐘一筆的資料，水位為每十分鐘取一點，氣壓則在兩筆資料之間以內插法增加五筆線性資料。
2. 將水位資料與氣壓資料轉換為同一單位：均換算成「公尺-水柱高」。
3. 將氣壓資料標準化：為了呈現水位因氣壓改變而影響的變化量，故將每一筆氣壓數值減

去氣壓的平均值，成為在基準線 0 上下變動的數字。

4. 將水位數值減去（或加上）標準化後的氣壓值：使用絕對壓力式水位計的 7 站，以減去的方式修正氣壓，而平衡壓力式水位計的沄水站使用加上的方式修正，大坪站則無需修正。

整體修正過程即為上述四步驟的重複操作，以沄水站 2013 年 1、2 月的修正為例，結果如圖 7-3.16 所示。

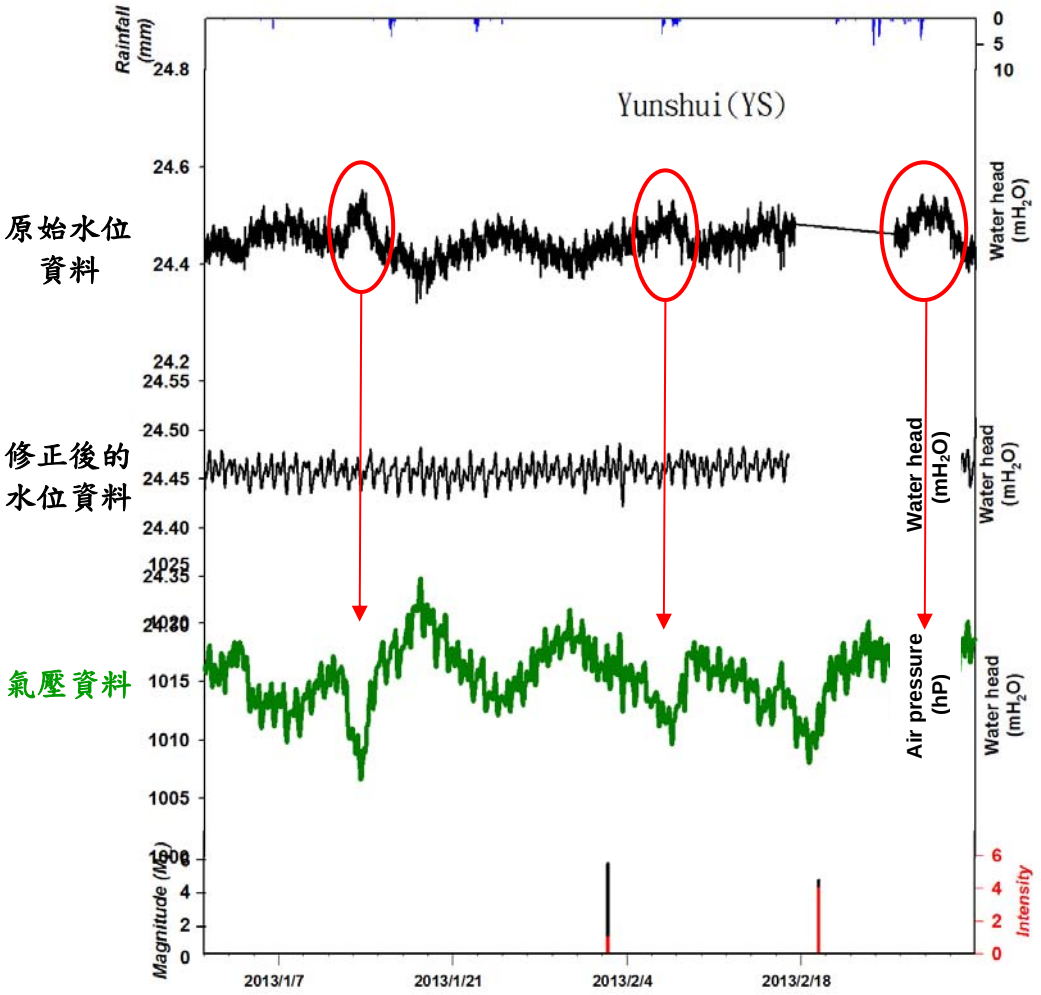


圖 7-3.16：2013 年沄水站 1、2 月資料氣壓修正結果。

第一欄為沄水站原始水位資料，第二欄是經修正過後的水位資料，第三欄是氣壓資料；圖上圓圈為未修正前疑為異常者，比對後確認為氣壓所引起。

將以上修正氣壓影響之方法套用回先前的水位資料，從 2008 年 12 月起至今臺北、新竹、嘉義三站群修正結果如下。

臺北站群修正結果：

2008 年 12 月起始的水位資料，先前研究曾判定出 40 處與降雨無關的震前水位異常變化，而今加入氣壓修正後，臺北站群之 40 處異常全數認定為氣壓影響，故臺北站群目前沒有震前水位異常現象，前後差異的比較如圖 7-3.17 所示。

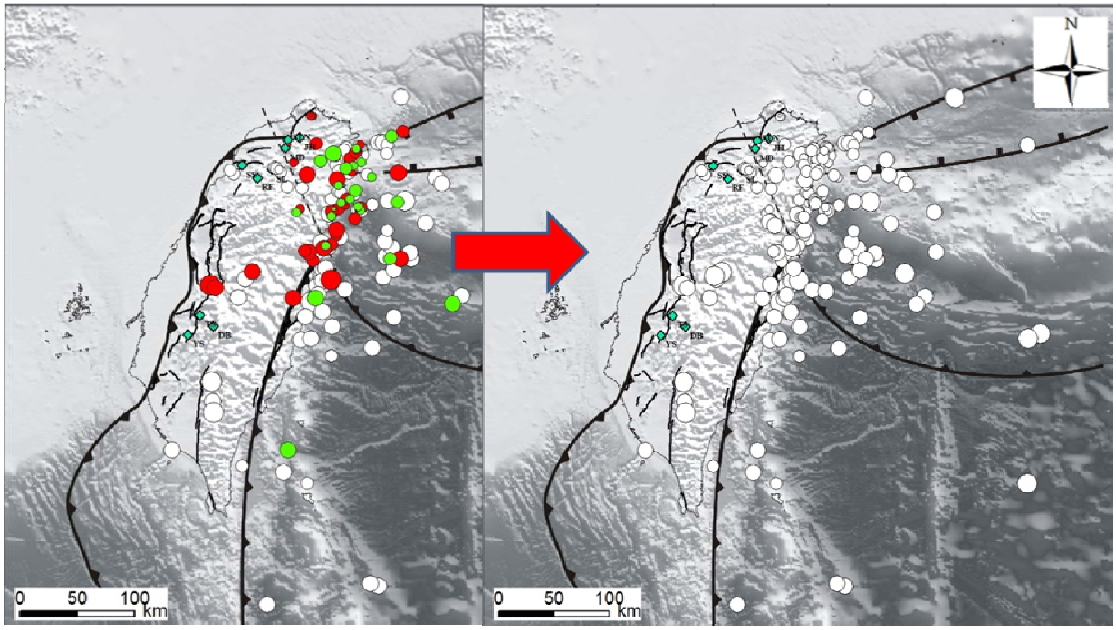


圖 7-3.17：臺北站群震前異常分布，氣壓修正前後比較圖。

新竹站群修正結果：

新竹站群先前研究曾判定出 36 處與降雨無關的震前水位異常變化，而今加入氣壓修正後，仍有 6 處震前水位異常不受影響，仍具有震前水位異常的地震如表 7-4.4 所列，異常地震分布前後差異的比較如圖 7-3.18 所示。修正後仍有 6 起地震有震前水位異常，震央主要分布於花東縱谷以西陸地以及東北宜蘭外海。

表 7-3.4：新竹站群經氣壓修正後仍無影響之水位異常與地震列表。

地震發生時間	規模	新竹震度	異常測站	備註
2008/12/30 9:31	5.1	1	新樂	
2010/8/30 16:45	5.2	2	新樂	
2012/1/4 14:59	4.7	1	新樂	
2012/2/26 10:35	6.4	2	新樂	霧台地震，前兆明顯
2012/10/10 10:06	3.1	2	新樂	鄰近小地震
2013/3/27 10:03	6.2	2	新樂	南投地震，前兆明顯

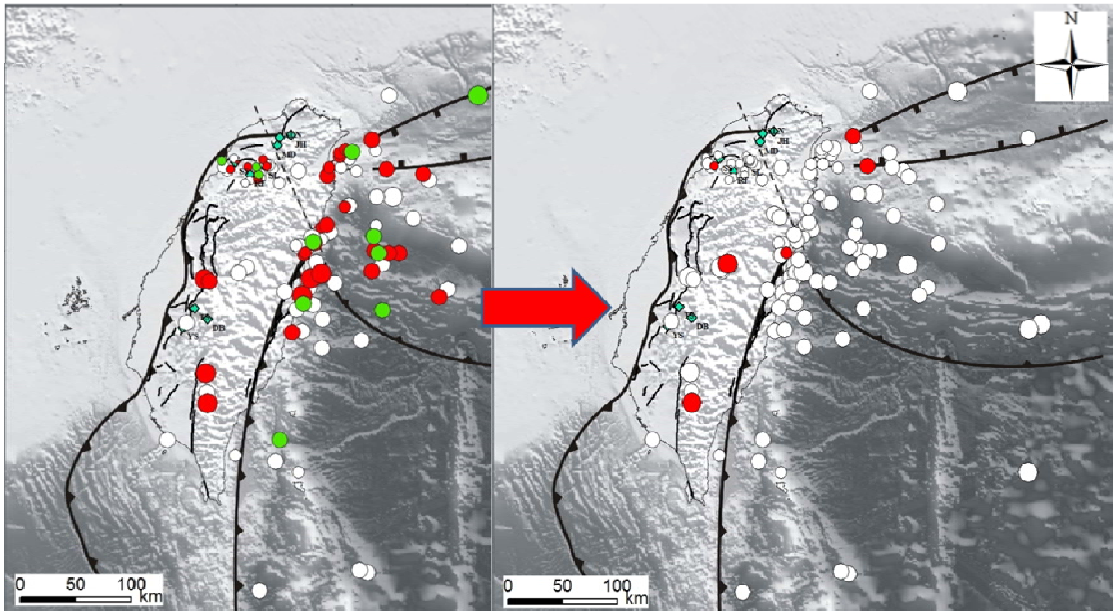


圖 7-3.18：新竹站群震前異常分布，氣壓修正前後比較圖。

嘉義站群修正結果：

嘉義測站的情況較為複雜，先前研究曾判定出 104 處與降雨無關的震前水位異常變化，而今加入氣壓修正後，仍有 67 處震前水位異常不受影響，但這 67 處中包含 64 處來自沄水測站不穩定時期的判定，以下說明之。

沄水測站從 2008 年 12 月以來，有過多次改變水位變動型態的事件，在此簡單將其分為穩定期與不穩定期，不穩定期的水壓特徵是時常出現瞬間可達一公尺上的壓力驟降（壓力變化，非水位變化，沄水井的透水性、流動性相當差），而水壓恢復也在一日之內，其變化型態見圖 7-3.19。不穩定期最長可持續 15 個月（2011 年 5 月至 2012 年 7 月均處於不穩定期），最短則持續二個月，之後恢復成穩定期。

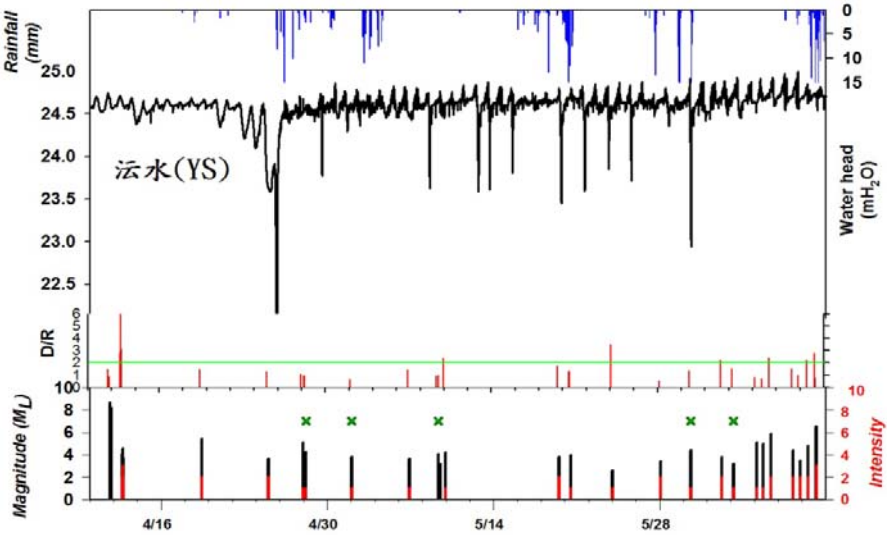


圖 7-3.19：沄水的特有不穩定現象例圖(圖中時段為 2011 年 4 月中旬至 6 月中旬)。

在穩定期的沄水水位與氣壓成相反走勢，無異常發生。推測沄水測站的不穩定水位與其井本身產氣相關，在地層活動較頻繁的時間，地下產氣旺盛，累積於井管內的氣體可能循某處裂隙洩出，造成井內壓力突然降低，之後又慢慢累積回來；在沄水測站不穩定時期，確實能觀察出嘉義地區鄰近的小地震密集發生，但無大地震。此種行為比較困難運用在一對一的地震前兆解釋上，故先將此類異常的資料保留並區隔出。剩餘的 3 處不是來自沄水井的震前水位異常如表 7-3.5 所列，異常地震分布前後差異的比較如圖 7-3.20 所示。

修正後(右圖)剩餘 3 起地震有震前水位異常，標記為紅色圓圈，而標記綠色圓圈則是代表與沄水不穩定期的 63 起異常事件相關的地震。

表 7-3.5：嘉義站群經氣壓修正後仍無影響之水位異常與地震列表。

地震發生時間	規模	新竹震度	異常測站	備註
2009/9/19 17:57	4.1	3	中興	震央於 嘉義大埔
2009/12/19 21:02	6.9	4	中興	震央於 花蓮市東南
2010/3/4 8:18	6.4	5	太興	甲仙地震

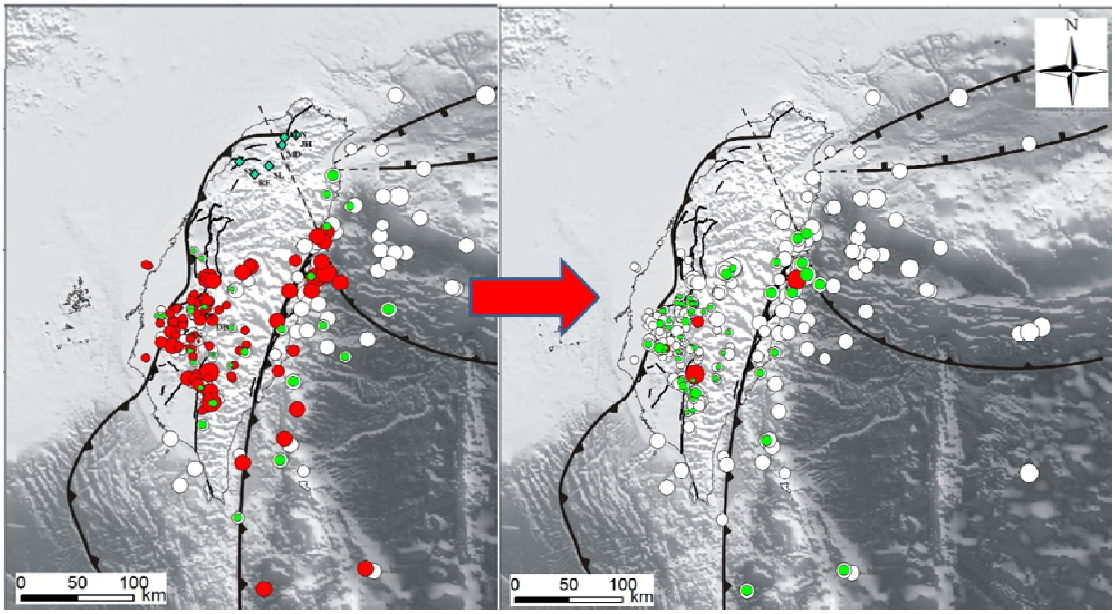


圖 7-3.20：嘉義站群震前異常分布，氣壓修正前後比較圖。

7-3-6 各站井體與儀器狀況說明

2013 年雖為本計畫之第一年，但本計畫內使用的水井均設置已久，在井體、記錄儀器以及周邊狀況上均有些許需要檢討之處。

臺北站群：

今年度臺北站群三站中，錦合與樹林二站運作狀況良好，但錦和站記錄器較為老舊，偶爾會出現記憶體短路的問題，造成資料不連續的狀況；明德站的水位計目前可能已經損壞，自今年七月下旬起已無資料。

新竹站群：

新竹站群今年預計復舊兩口井，本預計為瑞峰與梅花，但瑞峰因雷擊事件導至井下應變儀損壞，無法修繕，故地調所方面已宣布棄站，復舊的目標改為梅花與大坪兩站。今年十月進行梅花站的洗井工程，但因洗井工具卡於井下，管線在上拉時斷裂，洗井工程失敗，研判原因應為梅花井井體變形，才導致工具無法抽出，之前已經損壞的水位計仍留於井下沒有洗出。正與億輝公司討論彌補辦法，目前傾向將置於沄水的備用水位計投下量測水壓，因洗井過程中皂土層有洗開，故可能仍有監測的價值，但至少水位資料能提供井下應變儀進行地表水荷重校正之用。

大坪站目前已放置水位計進行監測，但該水位計在今年八月起時常出線短路現象，目前已請億輝公司進行水位計維修。

嘉義站群：

嘉義四站之中，中興、太興兩站屬於新井，水位監測已經穩定進行，而達邦站目前狀況不佳，可能已經損壞；沄水站因今年未觀察出任何異常，且井體本身有產氣，故楊燦堯老師建議希望在也能沄水測站進行氣體地球化學的觀測，故於今年十月前往沄水井採取水樣，進行化學分析，並有可能在之後改裝沄水站（待氣體分析結果後決定）。

共通問題：

目前水位觀測與井下應變儀監測的工作中，測站的雨量是相當重要的天氣因素，雖各站在設置之初都有規劃隨站裝設雨量計，但因無人管理，這些裝置至今已全數不敷使用。本團隊之雨量資料皆已改用鄰近的中央氣象局測站資料，但因這些資料站可能離井站較遠，仍不如隨站雨量那麼具代表性，故建議各站復舊隨站的雨量計。

7-4 地下水水氡觀測結果

7-4-1 安通站與地震活動之關聯性

本計畫 2009 年 3 月至 2013 年 11 月期間，持續在海岸山脈南段安通溫泉安通站定期採集水樣，分析地下水水氡濃度。執行本計畫期間，海岸山脈南段未發生強震（M_w＞6.0），安通站地下水水氡濃度也未觀測到異常之變化(圖 7-4.1)。由安通站之現地連續監測數據(圖 7-4.2)顯示，SARAD 已在 2013 年 11 月回復正常運作。

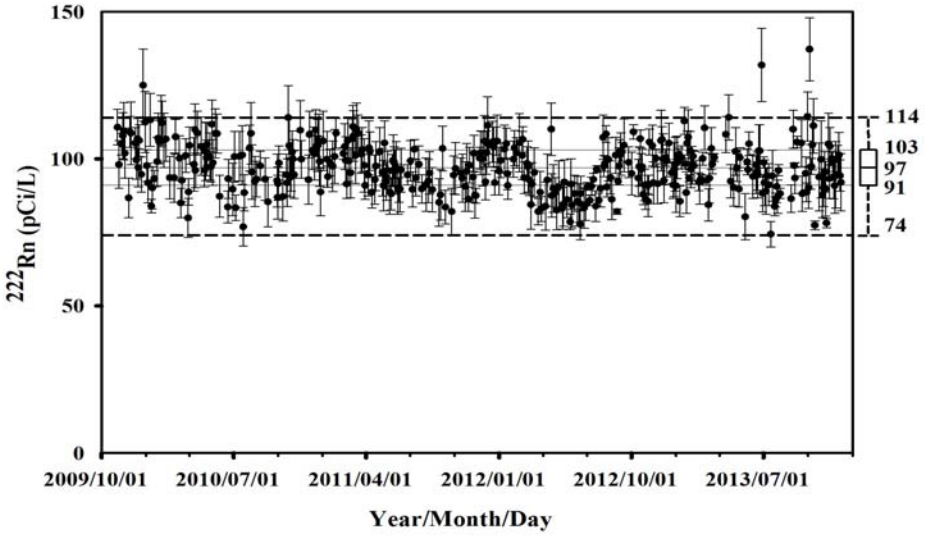


圖 7-4.1：利用四分位數統計分析安通站地下水水氡濃度。

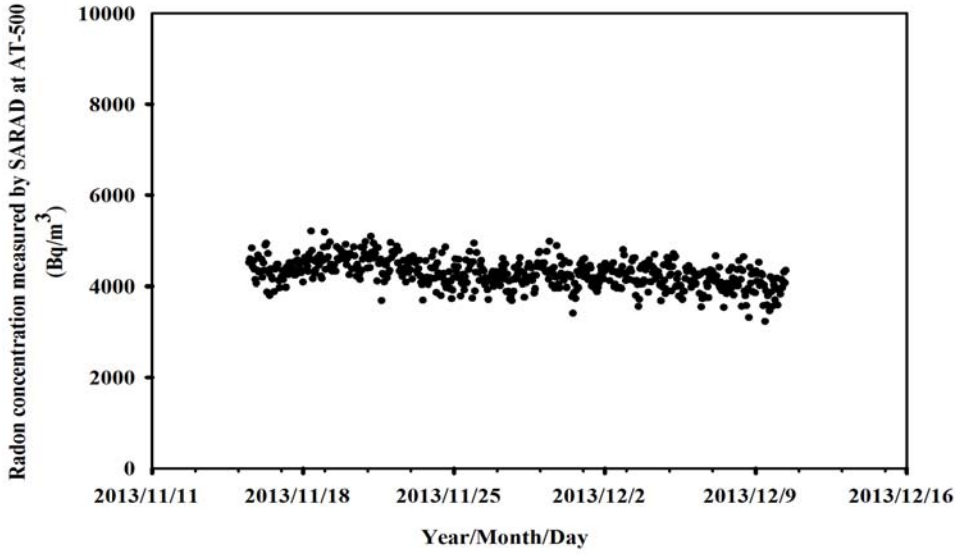


圖 7-4.2：安通站以 SARAD 量測之氣相氡濃度。

7-4-2 社頂站與地震活動之關聯性

社頂站於 2009 年 9 月開始定期採集水樣，分析地下水水氡濃度。執行本計畫期間，在 2010 年 3 月 4 日 M_L = 6.4 高雄甲仙地震、2012 年 2 月 26 日 M_L = 6.4 屏東霧台地震及 2012 年 10 月 25 日 M_L = 5.5 高雄地震來臨前，社頂站地下水水氡有觀測到異常下降之現象(圖 7-4.3)，可確定地下水水氡對於墾丁公園社頂地區地層的應變有一定的反應。社頂站 SARAD 數據分析方法是採用移動平均(Moving Average)，資料點之數值以六個小時數據的平均值代替，此方法可降低短期波動對於異常現象判斷上之影響。社頂站 SARAD 及 LSC 量測之地下水水氡濃度比較後（圖 7-4.4），兩者皆在 2012 年 10 月 25 日 M_L = 5.5 高雄地震來臨前，監測到地下水水氡濃度異常下降之地震前兆。此外，2013 年 8 月 29 日及 2013 年 10 月 22 日分別監測到地下水水氡濃度異常下降之現象（圖 7-4.4），預期將有相對應的地震發生。

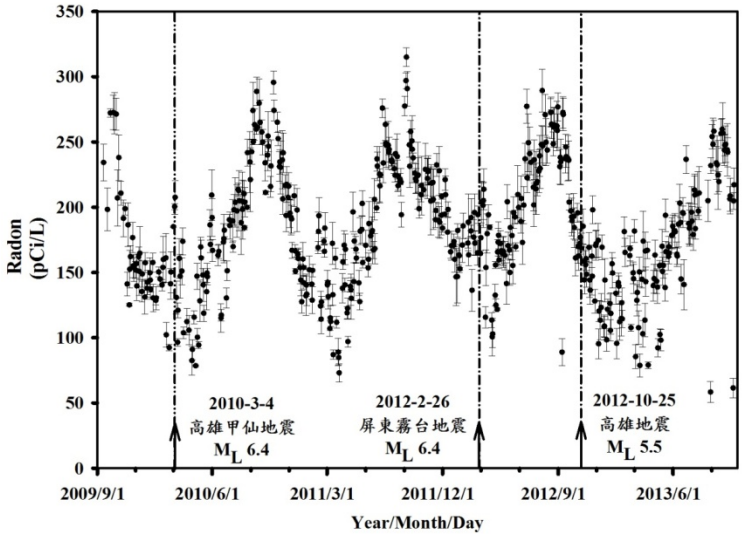


圖 7-4.3：社頂站地下水水氡濃度變化，及監測到地下水水氡濃度異常下降前兆之地震。

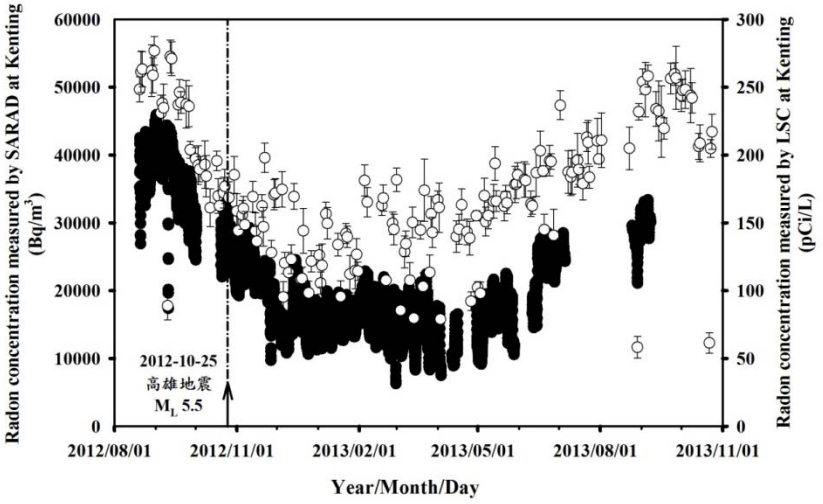


圖 7-4.4：社頂站現地量測之氣相氡濃度及實驗室量測之地下水水氡濃度比較。

7-5 綜合觀測結果

目前的觀察結果顯示，可以發現到在某些較大的地震發生前，有兩個或兩個以上的土壤氣體觀測站或地下水壓觀測站可以發現到異常變化，同時地下水氡亦出現相對應的異常變化，尤其是規模較大的地震，其異常的前兆反應通常更是較為顯著，例如：2010 年 3 月 4 日高雄甲仙地震和 2012 年 2 月 26 日屏東霧台地震。表 7-5.1 顯示 2012 年 12 月至 2013 年 11 月間地震規模大於 5 且土壤氣體有觀測到異常的地震事件與地下水壓、地下水氡觀測結果。其中，2013 年 3 月 27 日南投地震，大平地和古坑土壤氣體觀測站和新樂地下水壓觀測站同時在地震發生前 10 天左右，開始出現異常變化。其餘相關的地震並未觀察到地下水壓和地下水氡有同步顯著的異常出現。

表 7-5.1：2012 年 12 月至 2013 年 11 月間，規模大於 5 且多個土壤氣體觀測站有前兆訊號的地震事件與各地球化學觀測站之前兆反應列表。

	地震					土壤氣體觀測站						地下水壓觀測井										溶解氣觀測站	
ID	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	TPT	CL	GK	PT	DH	CS	台北網			新竹網			嘉義網				AT	ST
				(KM)		新竹大平地站	嘉義中崙站	雲林古坑站	屏東屏科大站	花蓮東華站	台東池上站	錦和站	樹林站	明德站	雙溪站	新樂站	瑞峰站	中興站	太興站	達邦站	汰水站	台東安通站	墾丁社頂站
1	2012/12/24 11:17	121.32	22.55	67.8	5		前				前												
2	2013/2/2 11:39	121.99	23.74	16.9	5.6	前		前		前	前												
3	2013/3/7 11:36	121.49	24.31	15.2	5.9	前		前		前													
4	2013/3/27 10:03	121.07	23.9	19.4	6.2	前		前								前							
5	2013/6/2 13:43	121	23.87	14.5	6.5			前			前												
6	2013/6/29 07:51	122.17	24.03	16.9	5.6	前					前												
7	2013/10/31 20:02	121.42	23.55	19.5	6.3	前				前	前												
8	2013/11/16 03:39	122.44	23.92	16.9	5.2	前					前												

第八章、整合觀測資料分析

整合觀測資料分析之目的在於綜合本計畫所用的各種觀測資料，依各種資料的時空分佈及其物理特性，找出不同方法獨立觀測的相似性或相異性，可以提高觀測異常與地震關聯性的可信度，或找出異常變化與地震斷層活動的可能物理模式。在這階段，我們依下列的步驟，一面進行不同資料間的比對，一面對所使用比對資料的特性做修正，試圖使各種資料的敏感度與可靠度較相近，便於資料的整合解釋。

a. 建立資料綜合解釋的方法，例如找出共同的特徵頻率、將 GPS 資料轉換成地表應變的觀測、異常資料的時間領域或頻率領域的比對。
b. 整合分析累積至最新之 GPS 連續站資料及井下應變儀觀測資料，分析應變異常事件。
c. 彙整地球化學觀測站及地下水資料加以比較，利用時間序列比對，分析各觀測資料異常之時間的相關性。

8-1 地震特性與相關的觀測異常

本計畫在現階段所使用的觀測方法：全球衛星定位系統連續觀測站(CGPS)、PS-InSAR 技術、井下應變儀以及各種地球化學與地下水的觀測，除了 PS-InSAR 是新增加的方法，尚在蒐集資料與建立資料處理模式外，其餘觀測是承續上一期四年計畫，已經有固定的觀測模式以及異常現象的評斷標準，以及用各自的方法來尋找與地震的關聯性，每種觀測在現階段都還無法單獨建立有效的異常與地震發生的模式，所以在這一期我們會努力的蒐集多種觀測的異常變化來尋求有效的模式。

首先，我們先回顧一下地震的一些特性，地震的發生最簡單的說法就是地殼中的斷層使巨大的累積能量在瞬間釋放出來，產生地殼的震動。所以早期的地震研究大多以地震儀的記錄為研究的基本資料，從中萃取地震發生的時間、地點、破裂形態與釋放能量的大小，來了解地震本身的性質。在過去也有很多努力在研究地震發生的週期性、地殼的震波速度變化、發生頻率變化等等，試圖推測地殼應變的累積或岩石的彈性狀況是否有所變化，以其能掌握所謂的”地震前兆”，來推測是否可能在預期的未來會發生較大的災害性地震。

在廿世紀有許多觀測方法的異常在統計上顯示和附近的地震有所關聯，也建立了一些物理或數學模式，近半世紀間也有兩三次成功的預測了地震，但這些方法並無法有效的複製到其它的地震，對於大多數上千百的災害地震仍無法有效的預測。一般而言，大家所認同的地震前兆需要能掌握下一個大地震的規模、時間與地點，不精確的預測反而會帶來更多的經濟損失與人民的恐慌。現階段全球科學家對地震前兆仍無法掌握的時機，對預測這些物理特性的精度要求仍然比較寬鬆，但類似"台灣地區在今年之內會發生規模六以上的地震”的預測是無法被接受的，所以我們要先根據地震的特性與不同觀測的物理特性來對這些精度要求做一些規劃。

一個地震的發生會釋放大量的能量，這些能量是來自板塊擠壓，經數十年、數百年或數千年累積在地殼中，當應力超過地殼材質所能負荷時，會瞬間破裂而釋放出來，因板塊擠壓的速度是相當穩定的，所以以地震週期來預測地震是最早被使用的，但因地殼本身的複雜性，應力的累積與周遭的相對應力也有關係，以週期來預測還是有相當的不穩定性。因此，科學家考慮物質破裂過程的特性，岩石在一般應力擠壓所產生的應變通常會符合彈性變形的範疇，但在破裂前通常會歷經一段塑性變形的歷程，在這過程中，地殼的變形速度可能會與彈性變形有所差異，而岩層中的孔隙也可能會封閉再因破裂而展開，因此所有的變形觀測會看

到位移速度或應變的異常，地下水的觀測也會看到突然的水位上升或下降，而觀測岩石中釋放出來的化學元素或氣體的觀測，也會在破裂前會有異常的濃度變化。因此在 1970 年代以後，大地測量的觀測網，如 EDM、精密水準測量、GPS、地表應變儀等測量地殼位移、上升或下降和基線長度變化的方法普遍被佈設在斷層周遭，而定期量測自流水中特定化學元素濃度或地表土壤或自流水中釋放出來的氣體中特定元素的濃度，也成為地震前兆的重要方法。

我們要先將關聯的地震限制在會產生災害的地震，根據中央氣象局統計，台灣每年會有 1~2 個規模六以上的地震，自 1950 年至今，台灣地區共計有 50 個災害性地震，其規模分佈在 5.3~7.8 之間，所以在本計畫中，只會將各種觀測的異常關聯到規模 5.0 以上的地震。再來考慮地震前兆發生的時間與關聯地震的時間差，發生的地點與相關聯地震間的距離，這可能會因為不同觀測方法而有不同。對於直接量測位移的方法如 GPS、PS-InSAR 或精密水準測量，因為在地震之前，斷層區域是被鎖住的，所以在該地震的影響範圍內的相對位移量是相當的小，所以必須將位移量相對於較遠的地震區外的穩定地點，而且其位移量是經數十年或數百年的累積，所以每年的變形量通常不大，只能做較長期的觀測，所以在本計畫中，此類觀測都是以數年的觀測資料一起評估。但若以觀測地殼應變的方法如地表應變儀、井下應變儀或 GPS 應變的觀測，則觀測的範圍通常是集中在地震斷層的鎖定區域，快速的應變累積最後會在同震變形式放出來，若以規模 6.0 的地震，其斷層破裂長度約略在 8~16 km 左右，而規模 6.5 的地震斷層則在 30~40 km 的長度，若以井下應變儀的高敏感度，可能可以感應到兩三倍以上距離的地震之應變。而對於地下水位變化或經由地下水收集的氣體觀測，因為液體的流動性與地下水層分布的廣度，可能分佈範圍較廣，如對地震規模 6.0 的影響範圍可能在 380 km 左右，這也就是爲什麼氣體觀測站與地下水觀測站總是關聯到較多的地震。

可以關聯到較大範圍的觀測異常代表其敏感性較高，但也表示其對所預測地震的可能位置的不確定性較大，但若有兩個以上不同地點的觀測站同時觀測到異常，則其影響範圍的重疊區域也可提高預測的地震位置之精度。多種獨立觀測若同時發生，並指向同一地區，也可以增加前兆的可信度。

8-2 GPS、水準及 PS-INSAR 觀測資料綜合討論

台灣中部地區主要位在西部麓山帶內。區域內之主要地形為海拔 1000 公尺以下的丘陵地，並由東向西逐漸降低，西邊進入台地、盆地與沖積平原。在地質上台灣中部之地質組成為漸新世晚期、中新世、上新世至更新世之未變質沈積岩，岩層大多朝南北方向延展。其中較東側的內麓山帶主要由漸新世晚期至中新世地層所構成，斷層和褶皺分布較多而緊密。較西邊的外麓山帶由較年輕的上新世或更新世地層構成，斷層和褶皺分布較寬疏，變形較輕微。外麓山帶的西側鄰接盆地、台地及沖積平原。在構造地形上，內麓山帶與外麓山帶之界線為大茅埔-雙冬斷層，外麓山帶與西側的盆地、沖積平原交界大致為三義斷層及車籠埔斷層，此外還有平原地區的大甲斷層與清水斷層（圖 8-2.1）。

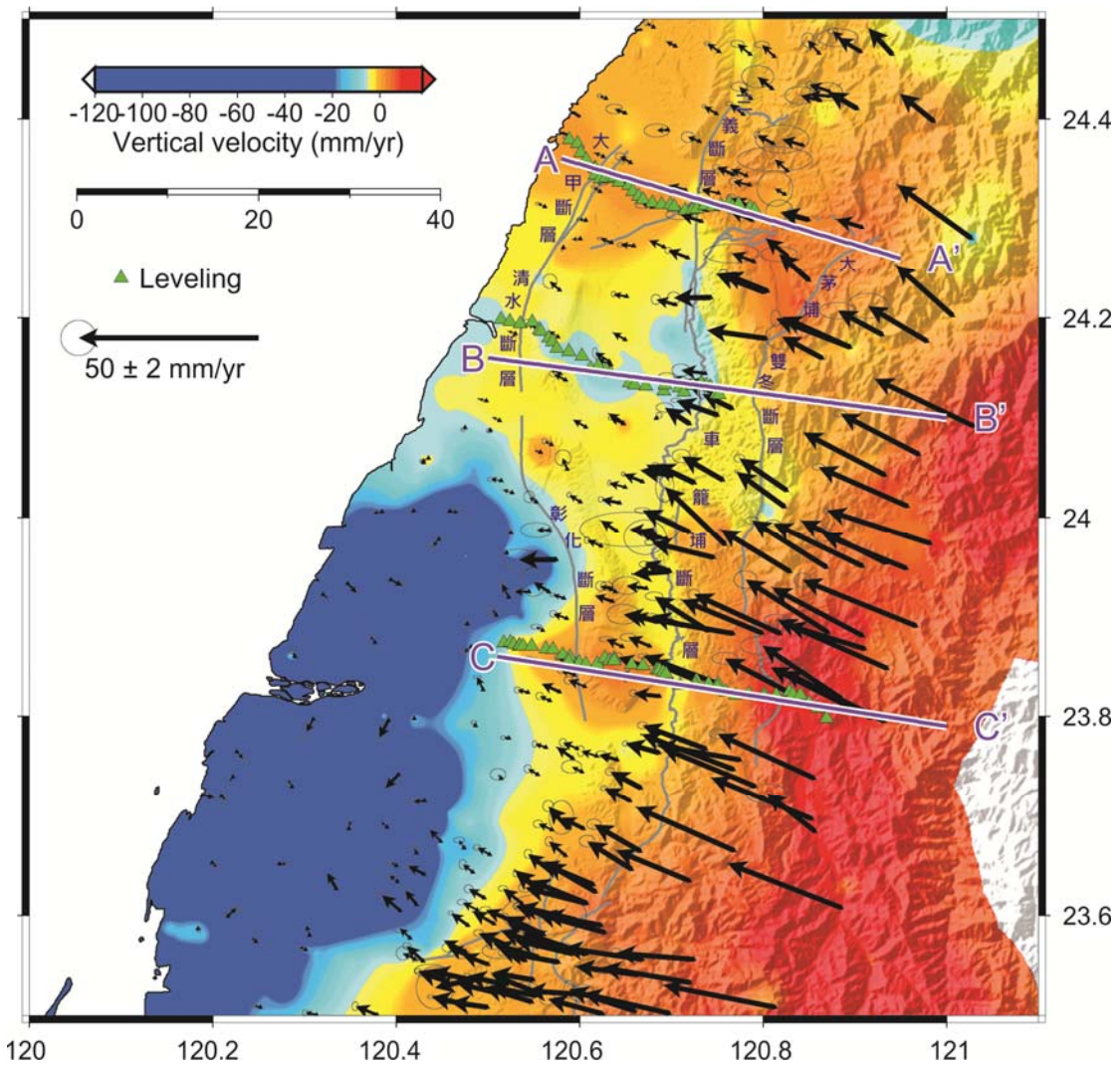


圖 8-2.1：研究區域內之垂直速度場（色階）、GPS 水平速度場、水準測線位置及三條剖面線位置。灰色實線標示主要斷層位置。

由於東西方向的擠壓應力，使得台灣中部地區的地層發生褶皺、斷裂，形成逆斷層，因此主要的斷層與褶皺軸走向大致為南北方向且約略相互平行（圖 8-2.1）。逆斷層的斷層面均傾向東方，東側較老的地層逆衝於西側較年輕地層之上，形成覆瓦狀斷層系統。除此之外，北港基盤高區亦是影響本區構造的一項因素。向西擠壓的板塊受到穩定的北港基盤高區阻擋，使北港基盤高區的周圍地帶（包括苗栗、三義、東勢、埔里、日月潭、竹山、梅山...等地）的麓山帶、台地及部分平原區之淺層發生斷層活動與地震。這個基盤高區亦影響地質構造線的排列，並形成一個向東突出的弧形構造。

綜合本計畫所有觀測結果，比較台灣中部地區之水平向速度場、垂直向速度場、水準測線位置與主要斷層分布如圖 8-2.1。垂直速度場與 GPS 水平速度場之速率為相對於澎湖 (S01R) GPS 觀測站，而每一條水準測線之垂直速度則是利用鄰近的 GPS 測站做為控制點。因此圖 8-2.1 中垂直速度場的抬升與沉降與之後將展示的各水準測線的垂直速度相比，其數值非絕對的對比關係。由 GPS 與水準觀測計算出的中部地區垂直速度場顯示中部麓山帶地區為抬升區，抬升速率大於 10 mm/yr，且大茅埔-雙冬斷層南端與車籠埔斷層的東側皆較西側有顯著的抬升。主要沉降區發生在濁水溪沖積扇扇央及扇端，最大沉陷量達到 120 mm/yr。

濁水溪沖積扇扇央及扇端之沉陷可能與平原地區之地下水位變化有關。根據江崇榮等 (2011)之分析，地下水位之起伏與地表高程變化有密切的關係。在不同的水壓以及荷重的情形下，地下水位變化與地表升降可呈現正相關或負相關：若水壓上升使有效應力下降，會造

成地層膨脹而地表上升；若水壓上升使得荷重增加，會造成地層壓縮而地表沉降。對於濁水溪沖積扇觀測到的沉降機制，未來值得與地下水位觀測做進一步的比對分析。

接下來本研究將綜合所有中部地區觀測記錄，以 3 條約略垂直於主要構造方向的剖面為例（圖 8-2.1）。水準測量取接近剖面的測線，In-SAR 分析由於資料點較密，取剖面左右 0.4 公里寬度的 PS 點。GPS 測站及地震取剖面左右 10 公里內的點位。分別說明比較不同的觀測結果，並加入地質構造討論。

8-2-1 大安-東勢 (AA') 剖面與地表變形觀測

8-2-1-1 地表變形觀測

AA'剖面由苗栗大安延伸至南投東勢，剖面位置如圖 8-2.1。地形上在大安地區海拔約 10 公尺，向東逐漸抬升至約 1200 公尺（圖 8-2.2a）。將鄰近的大安-東勢水準測線投影在 AA' 剖面線上，並用編號 GS36 的 GPS 測站作為控制點，以用來校正整條水準測線的垂直速率。結果顯示由西向東至東勢附近的地表垂直向變化皆為沉降（圖 8-2.2b）。

PS-InSAR 同樣利用 GS36 的 GPS 測站作為參考點，以校正整幅 PS 結果的對視衛星方向速率，其結果亦顯示此區的主要變形為沉降（圖 8-2.2c）。ALOS、ENVISAT、及 ERS 的衛星影像分析結果在向東經過三義斷層後出現較大的分歧。尤其以 ENVISAT 在接近麓山帶地區出現顯著的沉降（圖 8-2.2c），此現象可能是因為 C 波段影像在山區植被茂密處的辨識能力較差所致。ERS 的垂直速度變化小且趨近於零，其正確性需進一步討論。

GPS 水平速度場投影到剖面的垂直向與水平向分量顯示與剖面平行的分量有較大的速度，也就是主要的變形趨近於東西向（圖 8-2.2d）。

8-2-1-2 構造解釋

AA'剖面經過主要斷層為大甲斷層、三義斷層與大茅埔-雙冬斷層。剖面經過的其他主要構造有鐵砧山背斜、石圍牆向斜、東勢背斜以及內灣向斜（圖 8-2.2f）。水準測量結果顯示通過大甲三義斷層之地表下沉速率有些微增加又隨即降低（圖 8-2.2b），在 ENVISAT 及 ALOS 視衛星方向速度亦有些微改變（圖 8-2.2c），但在 GPS 水平速度上無顯著變化（圖 8-2.2d）。

在三義斷層以西，水準測量結果顯示地表沉降逐漸減少，過了三義斷層後又逐漸增加（圖 8-2.2b）。然而 ENVISAT 視衛星方向速度在經過三義斷層後由沉降轉為抬升，但 ALOS 結果無顯著變化（圖 8-2.2c），ENVISAT 的變化是否為真實變化或是受到植被影響需進一步確定。

至於大茅埔-雙冬斷層，水準測線並未跨越此斷層，PS-InSAR 分析及 GPS 觀測亦觀測到無顯著變化。

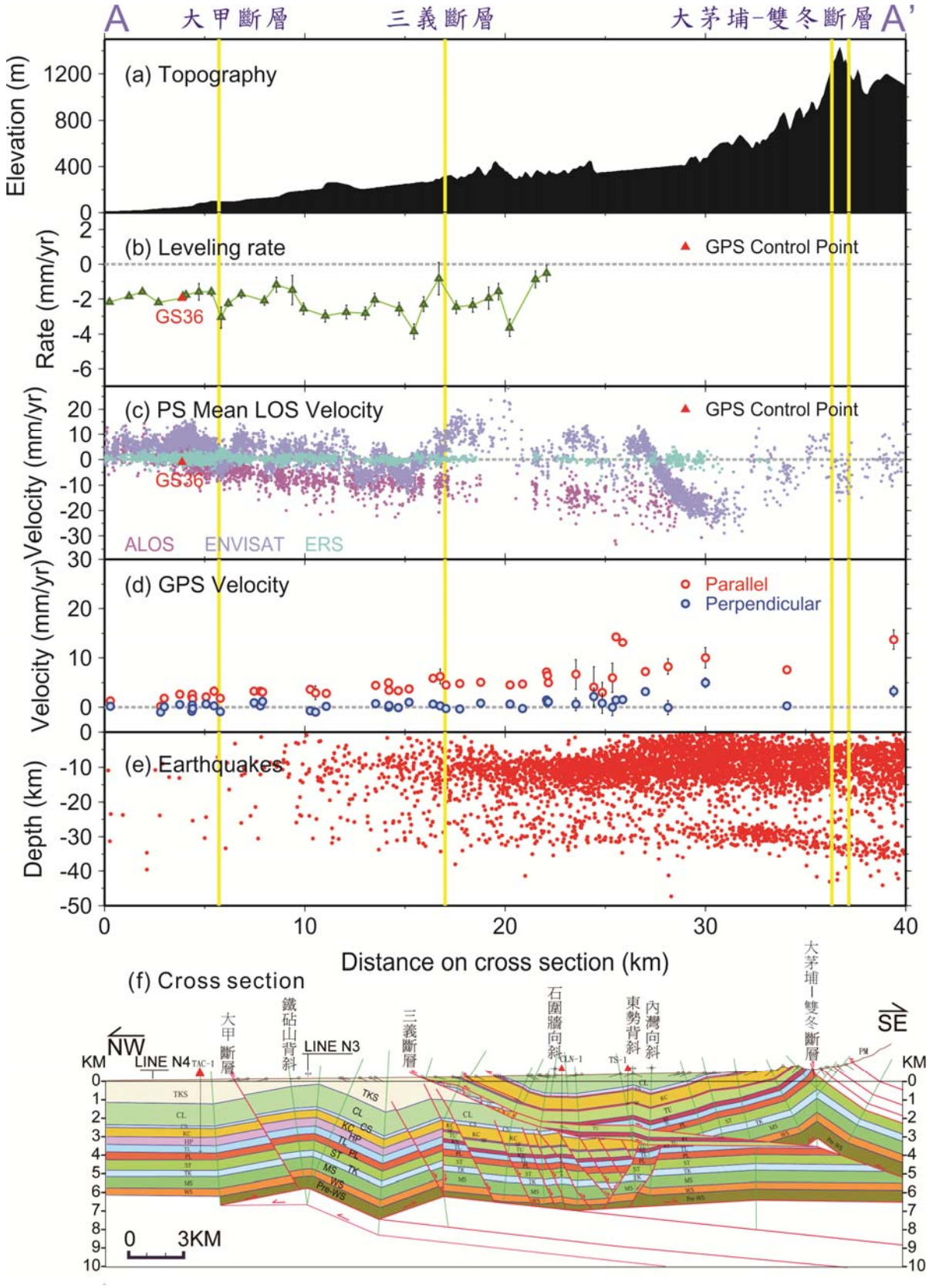


圖 8-2.2：沿著 AA'剖面之綜合各項觀測結果。剖面位置見圖 8-2.1。(a) 地表高程起伏 。(b) 水準測線高程變化。紅色三角形為用來控制該位置水準點之 GPS 測站位置。(c) ALOS、ENVISAT 及 ERS 的平均視衛星方向變形速度。紅色三角形為用來控制該位置 PS 點之 GPS 測站位置。(d) 水平向 GPS 投影在剖面上的水平向及垂向分量。(e) 地震分布。(f) 參考構造剖面（修改自楊耿明等，2003）。構造剖面位置與 AA'剖面非完全重疊，故標示斷層位置比較可能有偏移。

8-2-2 龍井-國姓 (BB') 剖面與地表變形觀測

8-2-2-1 地表變形觀測

BB'剖面由台中市龍井區延伸至南投縣國姓鄉，剖面位置如圖 8-2.1。地形上在大安地區海拔約 5 公尺，向東穿過大肚台地及台中盆地並進入麓山地區，約 1200 公尺（圖 8-2.3a）。將鄰近的龍井-太平水準測線投影在 BB'剖面線上，並用編號 LSB0 的 GPS 測站作為控制點，以用來校正整條水準測線的垂直速率。結果顯示由西向東至東勢附近的地表垂直向變化多為沉降，但在大肚台地東側有顯著的速度改變，且由沉降轉為抬升（圖 8-2.3b）。

PS-InSAR 同樣利用 LSB0 的 GPS 測站作為參考點，以校正整幅 PS 結果的對視衛星方向速率，其結果亦顯示在車籠埔斷層以西主要的變形為抬升，以東為沉降（圖 8-2.3c）。車籠埔斷層以東 ENVISAT 及 ERS 之 PS 點較少，應是受到植被影響。此外 ERS 的垂直速度變化小且趨近於零，其正確性需進一步討論。

GPS 水平速度場投影到剖面的垂直向與水平向分量顯示與剖面平行的分量有較大的速度，也就是主要的變形趨近於東西向（圖 8-2.3d）。

8-2-2-2 構造解釋

BB'剖面經過主要斷層為清水斷層、車籠埔斷層與大茅埔-雙冬斷層。剖面經過的其他主要構造有八卦山背斜及集集大山向斜（圖 8-2.3f）。水準測量結果顯示經過清水斷層以東之地表下沉速率增加約 2 mm/yr，又隨即降低（圖 8-2.3b），但在 PS-InSAR 分析（圖 8-2.3c）及 GPS 水平速度上無顯著變化（圖 8-2.3d）。

車籠埔斷層呈南北向延伸，南接觸口斷層，北連三義斷層，為台灣西部山麓山帶西界之前峰逆斷層（frontal thrust）。在車籠埔斷層以東，水準測量結果顯示地表由沉降轉為抬升（圖 8-2.3b）。GPS 觀測結果亦在車籠埔斷層附近出現顯著的反曲現象，尤其是平行剖面方向的速度變化明顯增加，顯示地底的斷層可能鎖住，使得斷層上盤因為持續應力的累積而逐漸抬升。然而 ALOS 視衛星方向速度在經過車籠埔斷層時發生明顯的沉降，向東沉降速度持續增加，位移量最大地區為埔里盆地地區（圖 8-2.3c）。ALOS 的變化是否顯示鎖住之地表發生沉降或是受到其他因素影響，仍待進一步確認。

至於大茅埔-雙冬斷層，水準測線並未跨越此斷層，PS-InSAR 分析及 GPS 觀測亦無觀測到顯著變化。

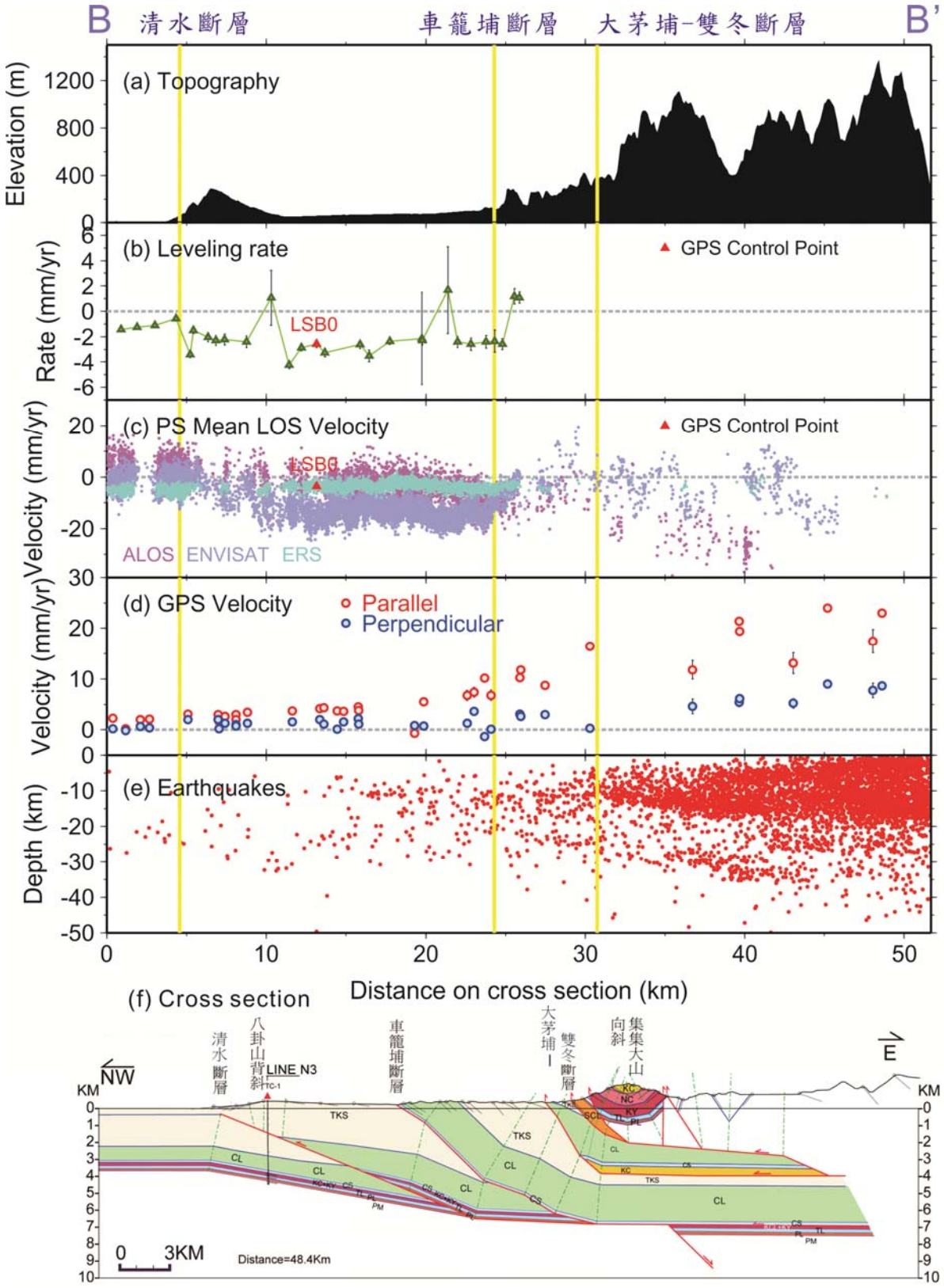


圖 8-2.3：沿著 BB'剖面之綜合各項觀測結果。剖面位置見圖 8-2.1。(a) 地表高程起伏 。(b) 水準測線高程變化。紅色三角形為用來控制該位置水準點之 GPS 測站位置。(c) ALOS、ENVISAT 及 ERS 的平均視衛星方向變形速度。紅色三角形為用來控制該位置 PS 點之 GPS 測站位置。(d) 水平向 GPS 投影在剖面上的水平向及垂向分量。(e) 地震分布。(f) 參考構造剖面（修改自楊耿明等，2003）。構造剖面位置與 BB'剖面非完全重疊，故斷層可能有所偏移。

8-2-3 北斗-水里 (CC') 剖面與地表變形觀測

8-2-3-1 地表變形觀測

CC'剖面由彰化縣北斗鎮延伸至南投縣水里鄉，剖面位置如圖 8-2.1。地形上在北斗地區海拔約 28 公尺，向東穿過八卦台地並進入麓山地區，最大高程約 850 公尺（圖 8-2.4a）。將鄰近的北斗-水里水準測線投影在 CC'剖面線上，並用編號 GS26 的 GPS 測站作為控制點，以用來校正整條水準測線的垂直速率。結果顯示沿剖面線 0 至 25 公里之地表垂直向變化多為沉降，但在 25 公里以東有明顯的速度增加，且由沉降轉為抬升（圖 8-2.4b）。

PS-InSAR 同樣利用 GS26 的 GPS 測站作為參考點，以校正整幅 PS 結果的對視衛星方向速率，其結果亦顯示沿剖面的速度變化較為平緩（圖 8-2.4c）。ENVISAT 資料顯示在八卦台地東側有顯著的升降變化，但 ERS 與 ALOS 無明顯變化，因此對於三種影響的分析結果須再次確認。此外 ERS 的垂直速度變化小且趨近於零，其正確性需進一步討論。

GPS 水平速度場投影到剖面的垂直向與水平向分量顯示與剖面平行的分量有較大的速度，也就是主要的變形趨近於東西向（圖 8-2.4d）。

8-2-3-2 構造解釋

BB'剖面經過主要斷層為彰化斷層、車籠埔斷層與大茅埔-雙冬斷層。剖面經過的其他主要構造有八卦山背斜、大橫屏向斜、國姓背斜及水長流背斜（圖 8-2.4f）。在各種觀測結果之中，跨越彰化斷層並無出現明顯的變化（圖 8-2.4）。

在車籠埔斷層以東，如同 BB'剖面觀察到的現象，水準測量結果顯示地表由沉降轉為抬升（圖 8-2.4b）。GPS 觀測結果亦在車籠埔斷層附近出現顯著的反曲現象，尤其是平行剖面方向的速度大幅度增加，顯示地底的斷層可能鎖住，使得斷層上盤因為持續應力的累積而逐漸抬升。然而這樣的現象在 ALOS、ENVISAT 以及 ERS 的 PS-InSAR 分析結果卻未顯現（圖 8-2.4c），其原因為何需進一步確認。此外，雖然 BB'剖面與 CC'剖面皆顯示車籠埔斷層上盤地表抬升增加，BB'剖面之變化較為緩和，而 CC'剖面較為顯著，可能說明車籠埔斷層南北段的運動模式不同。

對於大茅埔-雙冬斷層，水準測線在跨越此斷層後抬升速率快速降低（圖 8-2.4a），而在 GPS 觀測中速度亦停止向上增加（圖 8-2.4b）。至於 PS-InSAR 分析及無觀測到顯著變化（圖 8-2.4c）。

此外，在剖面線 27 公里處，水準測量與 GPS 觀測都有徒升、徒降之現象，對應到地形剖面亦有山峰存在，是否為構造的影響可做進一步分析。

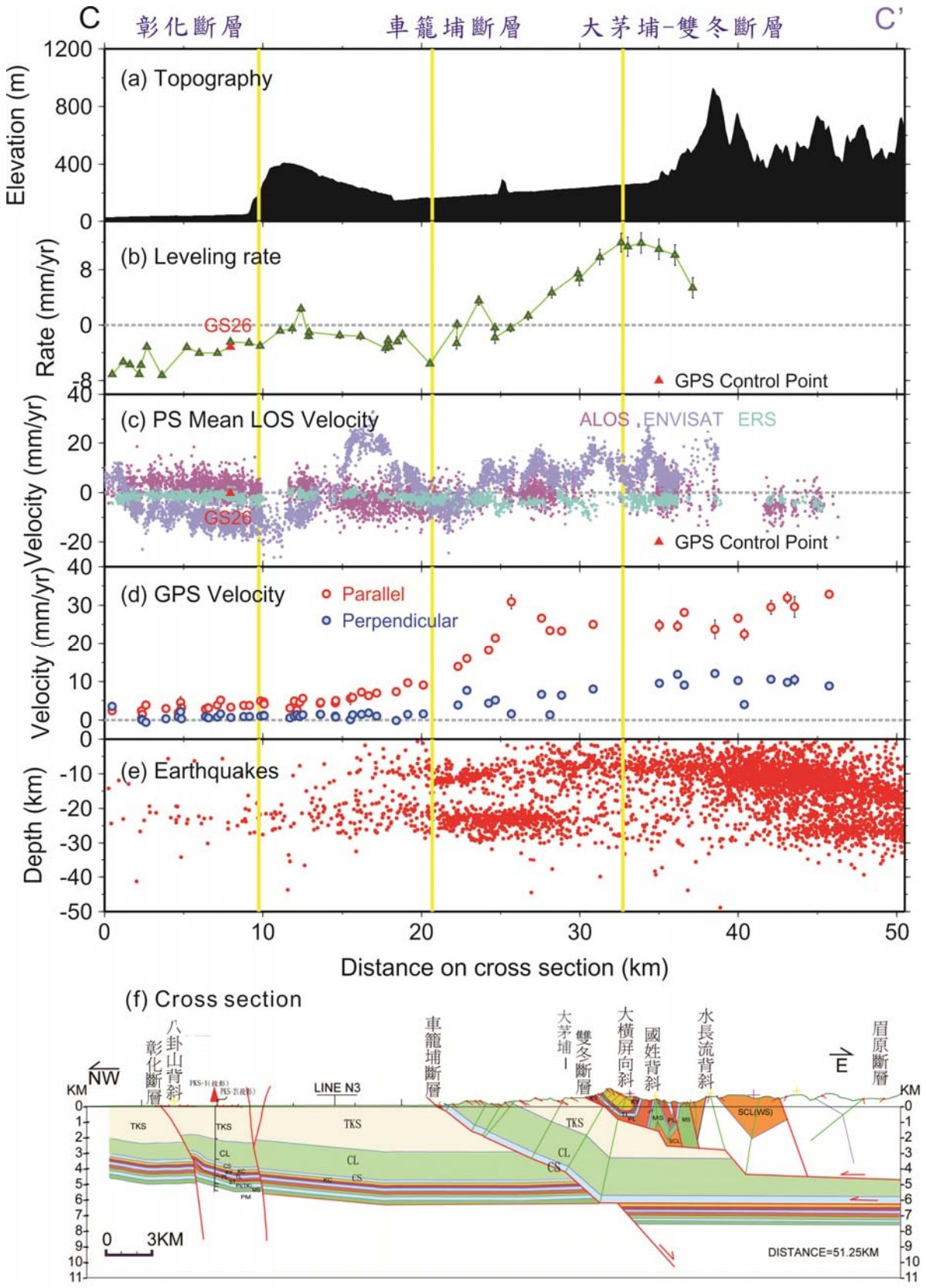


圖 8-2.4：沿著 CC'剖面之綜合各項觀測結果。剖面位置見圖 8-2.1。(a) 地表高程起伏 。(b) 水準測線高程變化。紅色三角形為用來控制該位置水準點之 GPS 測站位置。(c) ALOS、ENVISAT 及 ERS 的平均視衛星方向變形速度。紅色三角形為用來控制該位置 PS 點之 GPS 測站位置。(d) 水平向 GPS 投影在剖面上的水平向及垂向分量。(e) 地震分布。(f) 參考構造剖面（修改自楊耿明等，2003）。構造剖面位置與 BB'剖面非完全重疊，故斷層位置比較可能有所偏移。

8-3 異常記錄與大地震活動之關係

累計 2009 年 1 月至 2013 年 11 月共 146 個規模大於五之地震事件，如表 8-3.1 詳列，而其震源機制海灘球標示於圖 8-3.1 及圖 8-3.2 的相關位置中。在這期間各種觀測的異常記錄標示在相關的地震編號上，如圖 8-3.3 中，水平軸的數字代表事件 ID(表 8-3.1)，粉紅色菱形、黃色十字、粉紅色方形、紅色圈圈和黑色方塊分別代表氣體觀測、地下水位、水氡、井下應變儀和地震訊號異常，而垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測。本次期末報告考慮 2012 年 12 月至 2013 年 11 月間的異常觀測，這期間並無任何同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測，但有一個地震(ID=124)同時觀測到(1)地下水位(新竹網)(2)井下應變儀(嘉義網) (3)地化氣體記錄(新竹網、雲林古坑測站)三樣異常，其為 2013/03/27 10:03 規模 6.2 發生在南投縣政府東方 36.9 公里的地震。

表 8-3.1：2009 年 1 月至 2013 年 11 月規模大於五之地震事件列表。

ID	臺灣時間	經度	緯度	深度	規模	震央位置
1	2009/01/02 09:39	119.91	21.65	65.1	5.1	屏東恆春地震站西偏南 94.0 公里
2	2009/01/04 06:04	121.73	24.15	7.5	5.1	花蓮秀林地震站東偏北方 16.2 公里
3	2009/01/23 20:38	121.19	21.05	51.7	5.3	台東蘭嶼地震站南偏西方 116.2 公里
4	2009/04/17 20:37	121.68	23.92	43.4	5.3	花蓮市地震站東南方 9.5 公里
5	2009/05/27 06:27	119.56	21.74	55.1	5.7	高雄市地震站西南方 120.8 公里
6	2009/06/20 11:44	122.44	24.04	48.6	5.4	宜蘭南澳地震站東偏南方 82.2 公里
7	2009/06/25 05:09	122.29	24.03	21.9	5.0	花蓮市地震站東方 68.6 公里
8	2009/06/28 17:34	121.75	24.18	12.9	5.3	花蓮秀林地震站東北方 18.8 公里
9	2009/07/14 02:05	122.22	24.02	18.1	6.0	花蓮市地震站東方 61.9 公里
10	2009/07/14 04:28	122.19	24.08	16.9	5.2	宜蘭南澳地震站東南方 58.5 公里
11	2009/07/16 18:48	122.29	24.02	21.4	5.4	花蓮市地震站東方 69.1 公里
12	2009/07/17 02:42	122.29	24.00	20.8	5.1	花蓮市地震站東方 69.0 公里
13	2009/07/26 09:00	120.96	23.69	14.3	5.4	南投名間地震站東南方 34.3 公里
14	2009/07/26 14:10	121.32	23.43	12.5	5.4	花蓮玉里地震站北方 8.8 公里
15	2009/07/30 00:53	120.48	22.05	41.3	5.8	屏東恆春地震站西方 27.8 公里
16	2009/08/17 08:05	123.88	23.37	43.3	6.8	花蓮市地震站東偏南方 240.4 公里
17	2009/08/17 18:10	123.67	23.32	31.6	5.9	花蓮市地震站東偏南方 221.6 公里
18	2009/08/17 18:15	123.56	23.36	55.0	5.4	花蓮市地震站東偏南方 210.4 公里
19	2009/08/18 21:17	123.63	23.45	49.2	5.3	花蓮市地震站東偏南方 213.9 公里
20	2009/08/19 07:47	123.56	23.43	59.6	5.2	花蓮市地震站東偏南方 207.7 公里
21	2009/08/20 22:18	123.57	23.53	61.4	5.5	花蓮市地震站東偏南方 205.2 公里
22	2009/08/22 04:57	120.46	22.36	24.3	5.1	屏東枋寮地震站西方 16.9 公里
23	2009/09/12 20:05	122.49	23.97	25.1	5.1	花蓮市地震站東方 89.3 公里
24	2009/10/04 01:36	121.58	23.65	29.2	6.1	花蓮西林地震站東南方 23.0 公里
25	2009/10/11 14:42	120.63	21.93	42.0	5.0	屏東恆春地震站西偏南 14.8 公里
26	2009/10/23 07:05	121.49	22.69	104.0	5.1	台東市地震站東偏南方 35.1 公里
27	2009/11/05 17:32	120.72	23.79	24.1	6.2	南投名間地震站南偏東方 10.1 公里
28	2009/11/05 19:34	120.76	23.77	24.0	5.7	南投名間地震站南偏東方 13.6 公里
29	2009/11/15 22:47	122.17	24.95	125.4	5.5	基隆市地震站東偏南方 46.3 公里

30	2009/11/22 01:27	121.76	24.22	66.9	5.0	花蓮秀林地震站東北方 22.4 公里
31	2009/12/19 21:02	121.66	23.79	43.8	6.9	花蓮市地震站南偏東方 21.4 公里
32	2010/01/05 03:27	121.83	24.18	46.1	5.5	花蓮秀林地震站東偏北方 25.8 公里
33	2010/01/19 14:09	121.68	23.82	41.0	5.6	花蓮市地震站南偏東方 18.2 公里
34	2010/02/07 14:10	123.77	23.33	88.0	6.6	花蓮市地震站東偏南方 230.9 公里
35	2010/02/09 13:02	121.21	20.94	65.8	5.4	台東蘭嶼地震站南偏西方 127.1 公里
36	2010/02/12 10:42	121.08	23.90	18.4	5.2	花蓮西林地震站西偏北方 38.3 公里
37	2010/02/22 13:21	122.97	24.05	35.6	5.6	宜蘭蘇澳地震站東偏南方 128.5 公里
38	2010/02/26 09:07	122.87	23.69	52.1	5.8	花蓮市地震站東偏南方 131.9 公里
39	2010/02/26 13:38	122.84	23.72	42.9	5.0	花蓮市地震站東偏南方 128.1 公里
40	2010/03/04 08:18	120.71	22.97	22.6	6.4	高雄甲仙地震站東南方 17.1 公里
41	2010/03/04 15:07	122.06	22.80	35.4	5.1	台東成功地震站東偏南方 78.0 公里
42	2010/03/04 16:16	120.63	22.96	19.0	5.7	高雄甲仙地震站南偏東方 14.3 公里
43	2010/03/10 14:27	123.23	23.36	55.5	5.1	花蓮市地震站東偏南方 178.3 公里
44	2010/03/27 07:07	121.68	24.10	58.9	5.2	花蓮秀林地震站東偏北方 8.0 公里
45	2010/04/09 19:49	122.00	24.87	103.8	5.1	宜蘭市地震站東偏北方 27.6 公里
46	2010/04/11 12:57	122.10	23.27	30.3	5.4	台東成功地震站東偏北方 76.7 公里
47	2010/04/23 09:49	122.33	24.60	85.0	5.0	宜蘭蘇澳地震站東方 47.6 公里
48	2010/04/26 10:59	123.74	22.15	73.4	6.8	台東蘭嶼地震站東方 225.9 公里
49	2010/05/03 21:38	123.65	23.32	86.4	5.1	花蓮市地震站東偏南方 220.1 公里
50	2010/06/15 08:31	121.62	24.04	16.7	5.5	花蓮秀林地震站南偏東方 4.5 公里
51	2010/06/27 02:05	121.56	24.65	68.0	5.1	宜蘭牛鬥地震站西北方 1.9 公里
52	2010/07/03 03:11	120.68	22.86	17.8	5.1	高雄旗山地震站東方 26.0 公里
53	2010/07/09 03:43	122.04	24.35	19.3	5.3	宜蘭南澳地震站東偏南方 30.4 公里
54	2010/07/09 08:41	122.61	24.70	113.6	5.8	宜蘭蘇澳地震站東方 76.9 公里
55	2010/07/17 17:04	121.74	23.45	40.0	5.2	花蓮玉里地震站東偏北方 45.6 公里
56	2010/07/18 21:03	122.44	24.00	24.3	5.2	花蓮市地震站東方 84.5 公里
57	2010/07/25 11:52	120.69	22.84	19.6	5.7	高雄旗山地震站東方 27.0 公里
58	2010/08/22 00:38	121.59	23.58	40.2	5.3	花蓮西林地震站南偏東方 29.3 公里
59	2010/08/30 16:45	122.21	24.95	15.0	5.2	基隆市地震站東偏南方 48.8 公里
60	2010/09/04 03:06	122.68	24.13	43.7	5.0	宜蘭蘇澳地震站東偏南方 98.1 公里
61	2010/09/20 11:17	121.62	23.68	36.2	5.1	花蓮西林地震站東南方 23.2 公里
62	2010/09/29 01:33	121.70	24.13	9.0	5.0	花蓮秀林地震站東偏北方 10.6 公里
63	2010/10/03 03:23	121.80	24.36	19.4	5.1	宜蘭南澳地震站東南方 9.0 公里
64	2010/10/04 21:28	125.51	23.97	35.0	6.6	宜蘭蘇澳地震站東方 377.7 公里
65	2010/11/08 21:01	120.41	23.21	17.5	5.2	台南東山地震站西偏南 11.2 公里
66	2010/11/12 21:08	122.48	24.10	26.1	5.3	宜蘭南澳地震站東偏南方 82.5 公里
67	2010/11/12 23:39	120.61	22.19	38.0	5.3	屏東枋寮地震站南方 20.4 公里
68	2010/11/21 20:31	121.69	23.85	46.9	6.1	花蓮市地震站南偏東方 15.5 公里
69	2010/12/06 10:14	121.43	23.68	24.8	5.2	花蓮西林地震站南方 15.0 公里
70	2010/12/07 10:46	121.37	22.96	40.5	5.1	台東成功地震站南方 14.8 公里
71	2010/12/10 04:42	122.14	21.33	167.1	5.2	台東蘭嶼地震站東南方 98.9 公里
72	2011/02/01 16:16	121.80	24.21	18.3	5.5	花蓮縣政府東北方 30.6 公里外海

73	2011/02/15 15:18	121.20	21.18	71.2	5.5	台東縣政府南方 174.1 公里外海
74	2011/03/20 16:00	121.38	22.44	27.5	5.8	台東縣政府東南方 41.9 公里外海
75	2011/04/29 21:12	122.07	21.35	178.1	5.9	台東縣政府南偏東方 182.5 公里外海
76	2011/04/30 16:35	121.81	24.65	75.0	5.8	宜蘭縣政府南偏東方 10.1 公里
77	2011/05/03 23:52	121.71	23.93	41.2	5.2	花蓮縣政府東偏南方 10.7 公里外海
78	2011/05/22 09:34	121.76	24.12	6.1	5.0	花蓮縣政府東北方 20.3 公里外海
79	2011/06/03 01:07	121.34	22.26	22.2	5.2	台東縣政府南偏東方 58.0 公里 (位於台灣東部海域)
80	2011/06/10 09:25	121.59	23.59	34.9	5.1	花蓮縣政府南方 44.6 公里 (位於花蓮縣近海)
81	2011/06/26 21:19	121.00	23.85	14.8	5.0	南投縣政府東方 31.9 公里 (位於南投縣仁愛鄉)
82	2011/07/12 19:17	121.52	23.51	31.2	5.3	花蓮縣政府南偏西方 53.9 公里 (位於花蓮縣近海)
83	2011/07/13 15:19	123.80	24.91	120.8	5.4	宜蘭縣政府東方 206.8 公里 (位於台灣東部海域)
84	2011/07/18 22:48	122.37	23.59	29.8	5.1	花蓮縣政府東偏南方 88.2 公里 (位於台灣東部海域)
85	2011/09/09 11:26	120.99	22.31	10.4	5.0	台東縣政府南偏西方 52.4 公里 (位於台灣東部海域)
86	2011/09/12 13:15	122.84	23.70	43.8	5.1	花蓮縣政府東偏南方 128.2 公里 (位於台灣東部海域)
87	2011/09/22 06:18	121.67	24.09	17.2	5.1	花蓮縣政府北偏東方 11.9 公里 (位於花蓮縣近海)
88	2011/10/30 11:23	123.16	25.31	215.8	6.3	基隆市政府東方 143.6 公里 (位於台灣東北部海域)
89	2011/10/31 23:17	121.94	24.84	92.1	5.0	宜蘭縣政府東偏北方 21.7 公里 (位於台灣東部海域)
90	2011/12/23 03:39	122.60	23.97	26.9	5.0	花蓮縣政府東方 99.5 公里 (位於台灣東部海域)
91	2012/01/25 16:36	122.20	24.89	124.3	5.0	宜蘭縣政府東偏北方 47.4 公里 (位於台灣東部海域)
92	2012/01/29 16:07	122.37	25.32	264.7	5.6	基隆市政府東偏北方 66.4 公里 (位於台灣東北部海域)
93	2012/02/04 10:54	122.66	24.67	116.2	5.6	宜蘭縣政府東方 90.9 公里 (位於台灣東部海域)
94	2012/02/26 10:35	120.75	22.75	26.3	6.4	屏東縣政府東偏北方 28.4 公里 (位於屏東縣霧台鄉)
95	2012/03/22 07:44	121.59	23.25	42.5	5.0	台東縣政府東北方 70.7 公里 (位於台灣東部海域)
96	2012/04/09 05:43	122.36	24.04	29.2	5.7	花蓮縣政府東方 75.3 公里 (位於台灣東部海域)
97	2012/04/19 09:58	121.67	24.13	29.1	5.5	花蓮縣政府北偏東方 16.7 公里 (位於花蓮縣近海)
98	2012/04/27 22:48	121.73	23.79	44.3	5.0	花蓮縣政府南偏東方 24.7 公里 (位於台灣東部海域)
99	2012/06/05 04:38	122.19	24.22	49.9	5.1	花蓮縣政府東偏北方 62.9 公里 (位於台灣東部海域)
100	2012/06/05 17:56	122.24	24.22	28.6	5.1	花蓮縣政府東偏北方 67.4 公里 (位於台灣東部海域)
101	2012/06/06 09:08	121.42	22.44	18.4	5.9	台東縣政府東南方 44.6 公里 (位於台灣東部海域)
102	2012/06/10 05:00	122.31	24.46	69.9	6.6	宜蘭縣政府東偏南方 62.8 公里 (位於台灣東部海域)
103	2012/06/10 05:54	122.22	24.49	69.6	5.1	宜蘭縣政府東偏南方 53.7 公里 (位於台灣東部海域)
104	2012/06/15 00:15	121.54	23.71	6.5	5.3	花蓮縣政府南偏西方 32.0 公里 (位於花蓮縣豐濱鄉)
105	2012/06/17 17:01	121.53	23.68	6.5	5.0	花蓮縣政府南偏西方 35.5 公里 (位於花蓮縣豐濱鄉)
106	2012/08/14 18:55	121.51	24.05	21.8	5.2	花蓮縣政府西偏北方 13.0 公里 (位於花蓮縣秀林鄉)
107	2012/08/18 04:20	121.48	23.38	26.0	5.2	花蓮縣政府南偏西方 69.6 公里 (位於台東縣近海)
108	2012/08/31 20:11	120.88	24.72	10.0	5.0	新竹市政府西南方 13.0 公里 (位於苗栗縣竹南鎮)
109	2012/09/05 04:00	121.02	22.24	21.0	5.2	台東縣政府南偏西方 58.6 公里 (位於台灣東部海域)
110	2012/10/20 16:49	122.57	24.29	46.1	5.1	宜蘭縣政府東偏南方 95.5 公里 (位於台灣東部海域)
111	2012/10/25 18:31	120.40	22.44	33.0	5.5	高雄市政府南偏東方 22.1 公里 (位於屏東縣近海)
112	2012/11/21 01:09	121.4	22.45	17.5	5.5	台東縣政府東南方 42.5 公里 (位於台灣東部海域)
113	2012/12/03 01:45	121.58	23.98	11.8	5.0	花蓮縣政府西偏南方 4.4 公里 (位於花蓮縣吉安鄉)
114	2012/12/08 22:26	122.45	25.67	312	6.2	基隆市政府東北方 92.3 公里 (位於台灣東北部海域)
115	2012/12/24 11:17	121.28	22.53	67.8	5.0	台東縣政府南偏東方 28.5 公里 (位於台灣東部海域)

116	2012/12/31 00:03	120.91	23.47	4.4	5.3	嘉義市政府東方 46.3 公里 (位於嘉義縣阿里山鄉)
117	2013/01/05 04:38	122.43	24.35	71.4	5.0	宜蘭縣政府東偏南方 79.4 公里 (位於臺灣東部海域)
118	2013/01/07 14:49	122.84	24.48	69.4	5.7	宜蘭縣政府東偏南方 112.7 公里 (位於臺灣東部海域)
119	2013/01/17 16:30	121.98	24.44	13.7	5.1	宜蘭縣政府東南方 39.0 公里 (位於臺灣東部海域)
120	2013/01/21 03:09	122.52	24.7	108.2	5.6	宜蘭縣政府東方 76.5 公里 (位於臺灣東部海域)
121	2013/02/02 11:39	121.98	23.75	35	5.6	花蓮縣政府東南方 45.4 公里 (位於臺灣東部海域)
122	2013/03/07 11:36	121.46	24.3	5.6	5.9	花蓮縣政府北偏西方 38.1 公里 (位於花蓮縣秀林鄉)
123	2013/03/12 17:03	121.78	24.36	51.9	5.0	宜蘭縣政府南方 41.0 公里 (位於宜蘭縣近海)
124	**2013/03/27 10:03**	**121.05**	**23.9**	**19.4**	**6.2**	**南投縣政府東方 36.9 公里 (位於南投縣仁愛鄉)**
125	2013/03/31 08:49	121.97	21.18	162.2	5.5	臺東縣政府南偏東方 194.5 公里 (位於臺灣東南部海域)
126	2013/04/11 04:20	122.22	20.65	22.1	6.1	臺東縣政府南偏東方 258.2 公里 (位於臺灣南部海域)
127	2013/04/20 12:36	122.44	24.78	118.9	5.0	宜蘭縣政府東方 68.4 公里 (位於臺灣東部海域)
128	2013/04/21 11:07	122.34	24.41	70.6	5.0	宜蘭縣政府東偏南方 67.8 公里 (位於臺灣東部海域)
129	2013/05/21 16:25	123.69	23.33	53.1	6.1	花蓮縣政府東偏南方 223.2 公里 (位於臺灣東部海域)
130	2013/06/02 04:32	121.27	22.04	31.5	5	臺東縣政府南方 79.8 公里 (位於臺灣東部海域)
131	**2013/06/02 13:43**	**120.97**	**23.86**	**14.5**	**6.5**	**南投縣政府東方 29.3 公里 (位於南投縣魚池鄉)**
132	2013/06/08 00:38	122.65	23.98	35.3	6.2	花蓮縣政府東方 104.5 公里 (位於臺灣東部海域)
133	2013/06/29 07:51	122.24	24.03	19.8	5.7	花蓮縣政府東方 63.1 公里 (位於臺灣東部海域)
134	2013/07/15 21:41	122.84	23.76	40	5.7	花蓮縣政府東方 126.8 公里 (位於臺灣東部海域)
135	2013/07/16 18:11	121.5	24.28	4.9	5.5	花蓮縣政府北偏西方 34.1 公里 (位於花蓮縣秀林鄉)
136	2013/07/24 23:32	121.53	23.91	10.6	5	花蓮縣政府西南方 13.2 公里 (位於花蓮縣壽豐鄉)
137	2013/08/23 05:02	118.75	25.64	18	5	連江縣政府西偏南方 133.7 公里
138	2013/09/03 17:54	120.58	21.85	36.2	5.1	高雄市政府南偏東方 90.2 公里 (位於臺灣南部海域)
139	2013/09/04 06:23	118.76	25.64	14.7	5.3	連江縣政府西偏南方 132.2 公里
140	2013/09/06 19:33	122.24	20.32	211.6	6.7	臺東縣政府南偏東方 291.7 公里 (位於臺灣南部海域)
141	2013/10/11 12:45	121.61	25.05	142.6	5.2	臺北市政府東偏北方 4.8 公里 (位於新北市汐止區)
142	2013/10/14 01:20	122.79	23.03	31.9	5.1	花蓮縣政府東南方 159.7 公里 (位於臺灣東部海域)
143	2013/10/30 06:17	122.16	25.55	243.8	5.7	基隆市政府東北方 62.7 公里 (位於臺灣北部海域)
144	**2013/10/31 20:02**	**121.42**	**23.55**	**19.5**	**6.3**	**花蓮縣政府南偏西方 52.9 公里 (位於花蓮縣瑞穗鄉)**
145	2013/11/11 12:55	123.23	24.64	103	5.7	宜蘭縣政府東方 148.4 公里(位於臺灣東部海域)
146	2013/11/16 03:39	122.44	23.92	16.9	5.2	花蓮縣政府東方 84.1 公里(位於臺灣東部海域)

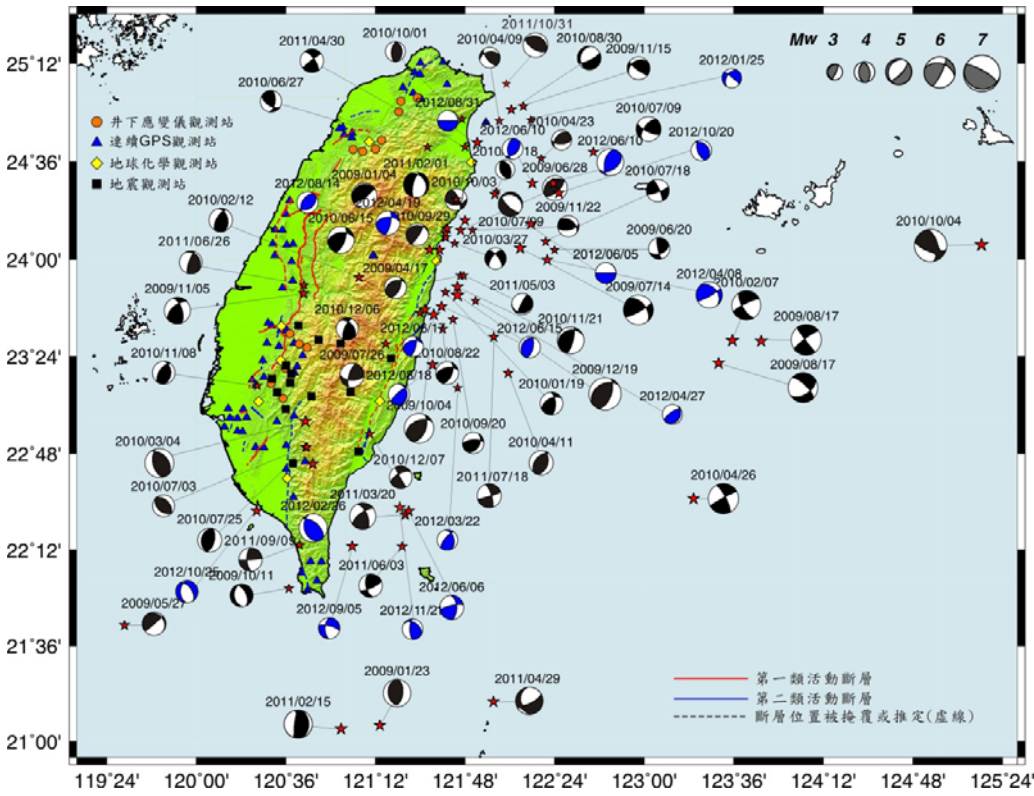


圖 8-3.1：2009 年 1 月至 2012 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。橘色圓圈、藍色三角形、黃色菱形和黑色方形分別代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、CGPS、地化觀測(氣體和水位)及地震觀測站。藍色海灘球為 2011 年 11 月至 2012 年 11 月規模大於五之地震事件。

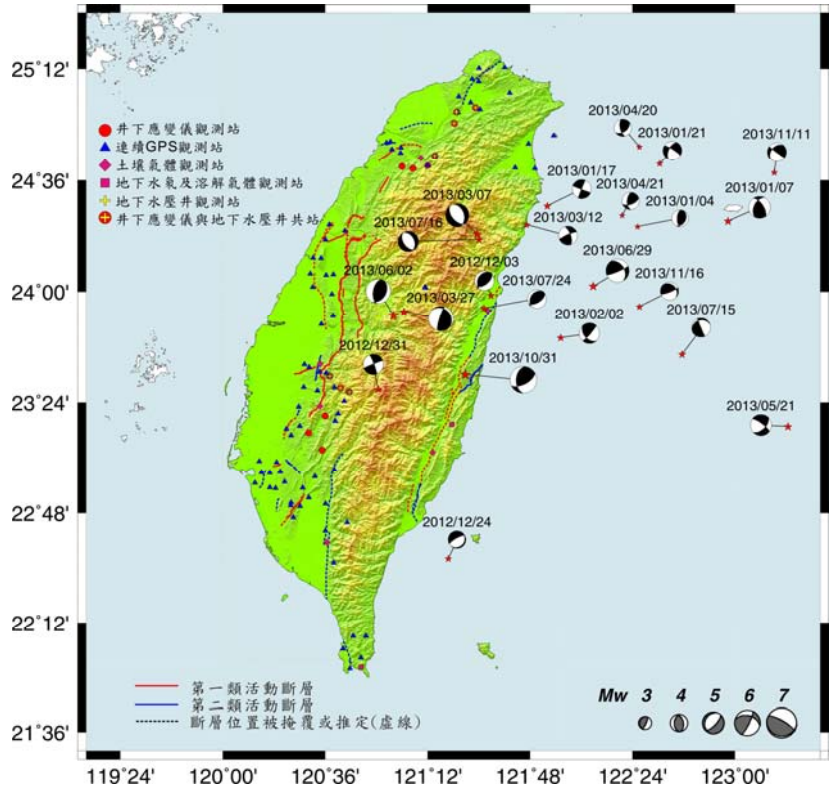


圖 8-3.2：2012 年 12 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之位置及震源機制圖。紅色圓圈、藍色三角形、粉紅色菱形、粉紅色方形和黃色十字分別代表整合分析異常資料所使用之井下應變儀、CGPS、地化氣體、地化水氡和地下水位觀測站。

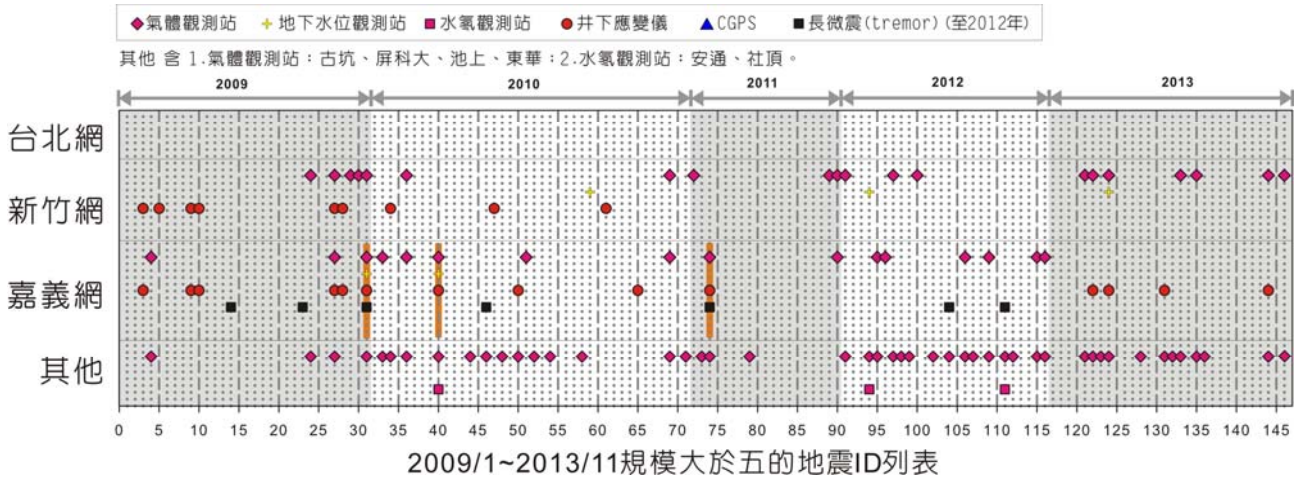


圖 8-3.3：2009 年 1 月至 2013 年 11 月規模大於五地震之異常記錄對應比較圖。水平軸的數字代表事件 ID(表 8-3.1)，粉紅色菱形、黃色十字、粉紅色方形、紅色圈圈和黑色方塊分別代表氣體、地下水位、水氡、井下應變儀和地震訊號異常，而垂直橘線則代表同一觀測網有三個或以上的同步異常觀測。

3/27 南投地震前還有另外發生於 3/7 花蓮地區規模 5.9 的地震，嘉義網三個井下應變儀的測站在地震前(約二月中到三月初)都有應變異常出現，且兩個地震當時三個測站都有應變震的數值永久變化，表示這三個測站都在該地震的影響範圍中，因此這應該是明顯的地震前應變異常。但這二起地震發生在一個月內，對於判識受那一個地震影響，或是辨識地震間應變資料是否有異常會有困難度，因每次地震後的應變行為多少會有些微改變，如果在短時間內又發生地震，在判斷該應變訊號的變化是地震前的應變異常亦或只是前次地震後的應變改變是有一定難度存在的。因此，目前並無法個別區分該異常是屬於哪一起地震相關的前兆現象。至於相關於新竹網新樂地下水觀測站於 3 月 17 日起水位突然下降，在兩日內下降約 40 cm，這段期間新竹地區無降雨，故研判其為明顯為 3 月 27 日發生於南投之震前水位異常現象；與本次異常類似的事件，為 2012 年 2 月 26 日霧台地震發生前，新樂測站同樣出現大幅度且快速的水壓下降，時間為震前 7 日。

同樣的，在新竹網的大平地土壤氣體觀測站和雲林古坑土壤氣體觀測站同時在地震發生前 10 天左右，開始出現異常變化。由於這些異常發生地點分布相當分離，不符合原來訂定的同一地區三種獨立觀測方法的一致異常的原則

8-4 GPS 與井下應變儀的共同解釋：GPS 應變分析

GPS 應變的分析，其實與 Gladwin 應變儀的原理一般，採用 3~4 條 GPS 基線長的變化，就如井下應變儀中利用 3~4 個不同方向的電容板來量測其各自方向的線性應變，我們採用將兩站間的基線變化轉換成區域性的面積應變與剪斜應變。

近年來連續衛星定位追蹤站(CGPS)普遍設置於高地震活動的區域，並交錯的設置了一些高精度的井下應變儀，這兩種儀器都可以用來觀測地殼的微小變形量。應變之觀測是單純觀測地區本身的應變，可以避開以往 GPS 觀測必須相對於某一穩定座標的要求，因此可以減少許多系統誤差所帶來的困擾。井下應變儀的觀測資料在移除各種非地殼構造活動相關的修正模式後，可以細微的觀測到地殼應變的時間序列，而 GPS 固定站普遍的安裝在全台各地，用來觀測一地區每天之位移，通常以各測站的位移量或年平均位移速度來表示，假若幾個相鄰站的年平均速度不相等或不一致，則表示該地區除了地殼移動外，還有其地殼內部的應變。然而，GPS 測站間相距可能在數公里到數十公里，甚至達數百公里以上，一邊用 GPS 位移或速度來換算成應變時，通常都假設該地區地殼應變是均勻的，但其間的變形真如換算時所

假設的均勻變形，或其間已有潛在斷層的破裂滑動，這些都會影響到最終的解釋。

井下應變儀的觀測，由於其超高的精度，已在近年來成為觀測慢地震(slow earthquake)的最佳利器。地殼釋放能量的過程除了一般所認知的地震活動外，尚有地殼的顫動(Tremor)與慢地震(slow earthquake)的可能性，因此，在本計畫中將針對結合 GPS 與井下應變觀測的聯合解釋踏出了第一步，二者有相同之處，也有不同之處，其中還有許多尚待突破的異同點，在這過程中，將有助於科學家對地震，或是對地殼的能量釋放的物理過程的了解，也或許對地震的前兆觀測也有所助益。

GPS 觀測與井下應變儀觀測一般，都可以觀測到地殼的應變率時間序列，而且相當的穩定。將 GPS 固定站所觀測得到的位移轉換成地殼應變，可看出板塊擠壓的情況。應變的大小及變化可能與地殼中的應力累積與釋放息息相關，也才是與地震活動最有直接關係的資料。一般而言，在 20 公里以內，若觀測數小時，GPS 基線的觀測精度約在 5mm ± 1.0ppm 左右，但若用連續觀測站的每日基線解而言，其觀測精度可提高到 5mm ± 0.5ppm 左右，利用一個 GPS 網形中各站所得的每日座標變化，每日座標解的精度約在 1~2 公分左右，以此求得該網的地表應變應該接近於 1.5 μstrain。若以這樣的地殼應變而言，除非有規模大於 5 的地震，否則很難明確的看到比這更小規模的地震相關的訊號。然而，對於小區域的 GPS 觀測網而言，這精度還是有改善的空間，例如在每日解的座標或基線分量，通常都有共同的誤差，相減求得相對運動時，會互相抵消，但是仍有一些不規則的誤差，特別是在垂直方向，因為收得到的 GPS 訊號都是來自上方(天空)，在其下方無所控制的情況下，所有的垂直分量都較難以約制，誤差約為水平方向誤差的兩倍以上。因此，放棄垂直分量，直接以水平分量來計算地殼的應變，可以得到較好的結果。另外若直接以 GPS 基線長直接換算成線性變形率，避開計算各站座標所引入的參考點誤差以及幾何性誤差，其精度會比較高。

另外，GPS 應變所代表的只是地表的相對位移量，縱使有變化，在這兩個 GPS 觀測站間的地殼可能有數公里到數十公里的距離，可能無法確定其斷層是應力或應變正在累積，還是斷層已經破裂且其能量已經釋放了？但是井下應變儀不同，它的精度高，基線短，雖然只能代表數十公分間的變化，但其結果明確，若有數個井下應變儀的觀測站，形成一個距離在數公里到數十公里的觀測網，且能得到一致的結果，或可以用合理模式推算出的結果，則其確定性遠高於 GPS。

將 GPS 觀測網組成許多三角形或長方形的區域，每個區域可根據所有點位間的基線長變化，換算成該區的應變，或是利用三角形三個點位的速度向量，轉換成該區的應變率。嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站，選取兩個三角形網做為分析的例子。如圖 8-4.1 所示，可以將 DARB 與 TSUN 兩個井下應變儀站附近的三個 GPS 連續觀測站如測站 1 (GS07)、測站 2 (GS66)、測站 3 (W029)形成一個三角網，網中每一邊的邊長都可由 GPS 的每日計算中取得，其變化即為線性變形量 e_1、e_2、e_3，根據與井下應變儀的相同計算，可以轉換成該區域的面積變形及剪斜變形量，其結果可與井下應變儀的觀測互相比較。同樣的，測站 1 (GS07)、測站 4 (GS66)、測站 5 (W029)也可以組成另一個三角網，與 TAIS 的觀測互相比較。

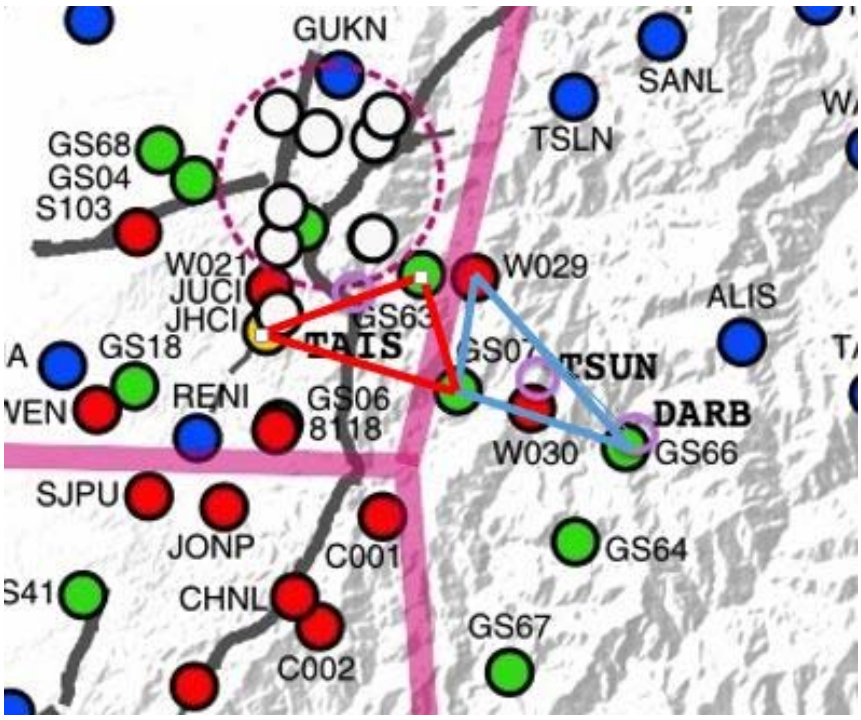


圖 8-4.1：嘉義地區井下應變儀網附近各單位的 GPS 連續觀測站。

圖 8-4.2 顯示 GS07-GS62-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013 年的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變(上)、GM1(中)與 GM2(下)的變化，圖中的垂直線表示地震的時間(紅色)與井下應變儀可能有變化(異常)的時刻，由此變化可看到在井下應變儀變化的時刻，GPS 應變也有相同的異常現象，右圖為 DARB 井下應變儀站在 2013 年的面積應變(上)、GM1(中)與 GM2(下)的變化，比較兩種資料在面積應變方面，在變化趨勢上有高度的相似性，但 GPS 應變所得到的變化較井下應變儀面積應變的變化為小，約在 1/4 左右，由於井下應變儀的絕對值尚在修正中，GPS 應變也是可用來修正的參考資料之一種。在剪斜應變方面，GM2 有高度的相似性，數值尚還是差約 4~5 倍，GM1 的變化則有所不同，尚待進一步研究。

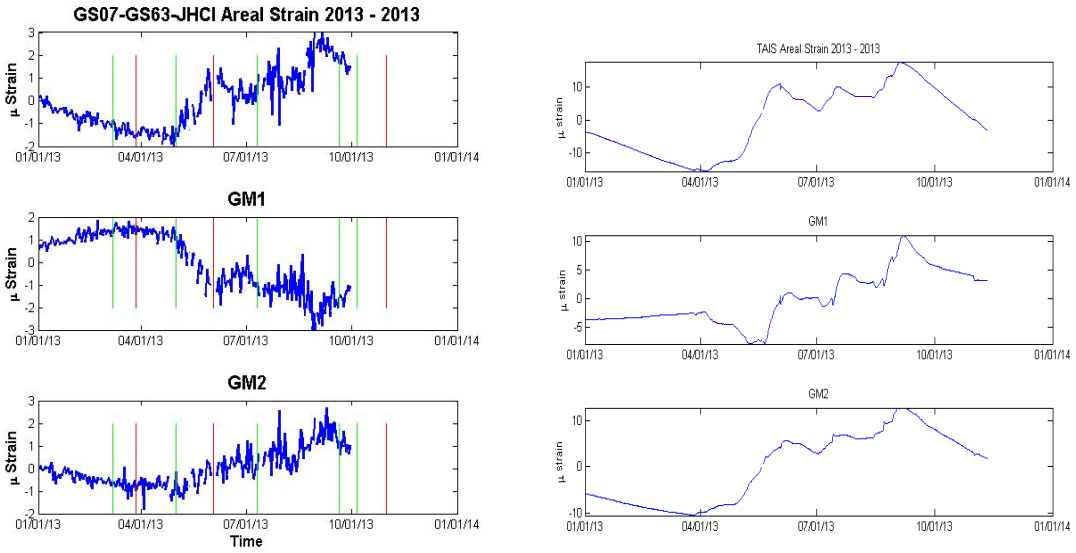


圖 8-4.2：GS07-GS62-JHCI 所形成的 GPS 三角網在 2013 年的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變(上)、GM1(中)與 GM2(下)的變化，右圖為 TAIS 井下應變儀站在 2013 年的面積應變(上)、GM1(中)與 GM2(下)的變化。

圖 8-4.3 顯示 GS07-GS66-W029 所形成的 GPS 三角網在 2013 年的觀測換算成應變量的變化。此依區域的 GPS 應變與井下應變儀的應變大小一致，面積應變的變化時積與趨勢也大都一致，有幾個時刻的變化量略有不同，這表示 GPS 應變是一種可靠的觀測量，因為一個三角網涵蓋約 5~10 平方公里的區域，這與井下應變儀只涵蓋約 0.04 平方公尺的區域，應變在趨勢上可預期有相似性，但在應變大小即細部變化未必要處處相等。在此區域的剪斜應變，GM2 的相似性較高，GM1 則趨勢相反。

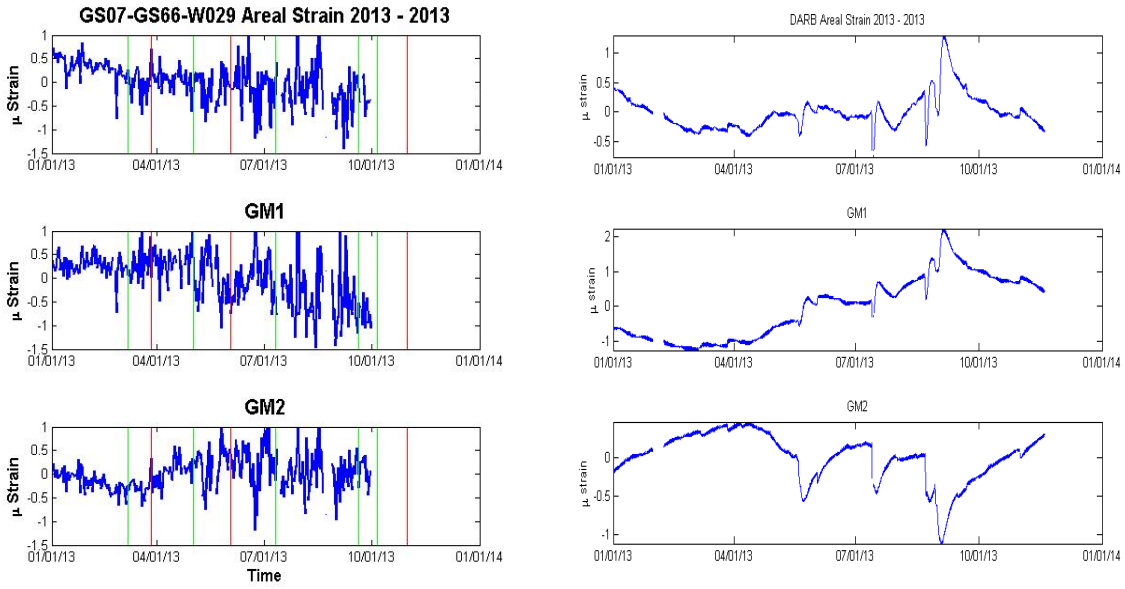


圖 8-4.3：GS07-GS66-W029 所形成的 GPS 三角網在 2013 年的觀測換算成應變量的變化，左圖為面積應變(上)、GM1(中)與 GM2(下)的變化，右圖為 DARB 井下應變儀站在 2013 年的面積應變(上)、GM1(中)與 GM2(下)的變化。

井下應變儀的特性在於其高精度 (10^{-9})與其連續的高取樣率(可有 0.001Hz ~ 100Hz 的穩定紀錄)，但其造價昂貴，很難普遍設置，而且因為其高精度，任何空氣壓力、地下水與地下溫度變化都會顯現於其記錄之中，影響相當大，且會被誤解釋為地殼應變的變化。GPS 固定站現在已普遍設置於地殼活動區域，通常每十公里~百公里左右會有一個測站，在台灣形成一個高密度的地殼位移觀測網，其精度大約是 0.5~2.0 公分的每日座標解，但在地殼變動大的區域很難找的到穩定的參考點，因此，往往困惑於其所測出來的微小位移或速度是否為真正的地殼變動。

一般在地震或斷層活動的研究觀測中，主要是要觀測地殼的應變，因此，比較注重相對的變形量，不需引用百公里外的參考點來求得變動量，因此，相對穩定的 GPS 程序可以求得測站間的精密距離及其變化，通常在數十公里距離之精度可達次公分之下，因此，對於一個單一斷層系統來說，其地殼應變的觀測應該可以達到 10^{-7} 左右之精度，雖不及井下應變儀的精密，但仍可以做有效率的應用。GPS 觀測的另外一個優點就在於其長期的穩定性，因為所有的 GPS 觀測都可追溯到 VLBI 與 SLR 的太空觀測技術，其穩定度可達數十年不變，所以 GPS 所觀測到的距離變化也是有數十年的一致性。

井下應變儀與 GPS 觀測的結果，另有一個不同點，就是在斷層附近，若在間震期時，其地殼應變值應該是該斷層系統中變動最大之處，而在位移的觀測中卻是移動最小之處。而且在 GPS 觀測中若偵測到一個變形量，並不一定表示該斷層的應變已經累積了，因為若斷層已破裂時，在遠離斷層(數公里到數十公里外)所觀測的結果可能都是一樣的位移相對變化。因此，結合 GPS 觀測網與井下應變儀觀測站的聯合地殼變動網才是現代地殼監測的最佳組合。

8-5 高頻 GPS 連續觀測資料的運用

在這一階段整合不同觀測資料的解釋中，GPS 資料的運用有兩個新的方法，一個是將 GPS 每日解轉換成地殼應變的觀測，並與井下應變儀的應變時間序列做比對，另一項則是高頻 GPS 的計算，期望能對井下應變儀的應變異常找出更多的佐證。由於這兩項都是正在開發的方法，必須先做可靠性的驗證。GPS 應變原理較單純，其方法與 Gladwin 的井下應變儀儀器設計原理相同，以不同方向的線性應變轉換成面積應變、剪斜應變、最大應變、最小應變與最大應變方向等工程應變參數，因此只是在精度考量與共同解釋方面要下功夫。而高 GPS 的計算方面，現在有許多正在發展中的程式，每種都有不同的限制與不同的精度，有些需要有附近的參考站，所算得的結果只是相對於該參考站，若參考站選的近，所得精度較高，但不能保證該參考站沒受該地震的影響，所以所得的結果可能不是絕對的變化量；假若參考站選在完全不受地震影響的遠距地區，則會因為距離過遠而降低精度，太大的雜訊會使 GPS 資料的變化不明顯。

本研究所使用之解算軟體為 GAMIT/GLOBK 10.35 之 TRACK 模組。TRACK 動態相對定位模組為麻省理工學院(Massachusetts Institute of Technology)行星、地球與大氣科學系教授 Tom Herring 團隊所研發之動態解算後處理軟體(Chen, 1998; Herring et al., 2009)。該軟體在計算每時刻之位置之前已處理了全時段之觀測量，並且利用卡曼濾波(Kalman Filter)技術估計在解算位置時所需之參數。對於週波未定值之求解，TRACK 使用 Melbourne-Wubena 寬巷組合應用於在長基線之網型，藉以消除電離層之影響。為取得最佳之解算成果，TRACK 軟體會持續迭代至未收斂之週波未定值數為最小。針對 10 公里以內之基線，利用區域環境之一致性，在差分的過程可消除大部份之誤差，使定位之成功率較高。而隨著基線長度增加，兩地之電離層與對流層遲延量變異性較大，因此利用差分濾除誤差之效能降低，其定位精度亦隨之降低。在大於 100 公里之基線，週波未定值常有不收斂之情形。此時 TRACK 可利用在 GAMIT 靜態計算中所獲得參數代入第二次之解算來獲得更佳之定位成果。該軟體經超過十年之持續更新與進步，其定位精度與模式均有所提升，在空載光達之定位應用(King et al., 2009)與地震波導致之地表位移(Davis and Smalley, 2009)均獲得良好之結果。

本次測試了 2013 年 3 月 27 日與 6 月 2 日兩個南投地震在嘉義井下應變儀網附近高頻 GPS 連續觀測站每秒一筆的資料，可惜 3 月 27 日的資料雜訊較大，僅有在平原區(沉積層較厚，有較大的表面波)與在南投震源附近有明顯的波形，而在 6 月 2 日的地震則震波明顯，如圖 8-5.1 與圖 8-5.2 所示。各圖中都與最近的井下應變儀資料並列，以便比較。

由於這是比較的第一步，先是比較變化的波形時間與大小，接下來的研究將再研究兩者的差異與各自的意義。由於井下應變儀的資料單位是應變，這是震波位移的空間偏微分，而 GPS 所得的資料是位移，有兩個方法可以使兩者相匹配，一是兩個相近的測站做差分，則也可以得到應變，但由於 GPS 測站間的距離都在幾公里以上，其可比較度較低了。另一方法是將前後兩筆 GPS 位移資料差分，可以得到該站的速度，這是位移的時間偏微分，兩者的比值應該是表面波速度，在短時間內應該是個常數，但這尚待進一步的證實。

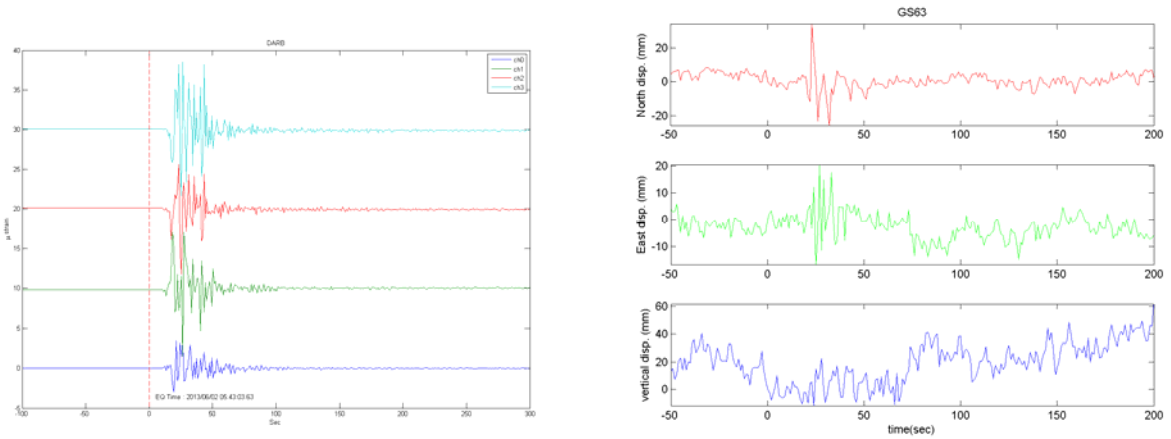


圖 8-5.1：GS63 高頻 GPS 連續觀測站資料在 2013 年 6 月 2 日南投地震的每秒座標解(右圖)，左圖則為鄰近井下應變儀站同時間的應變資料。

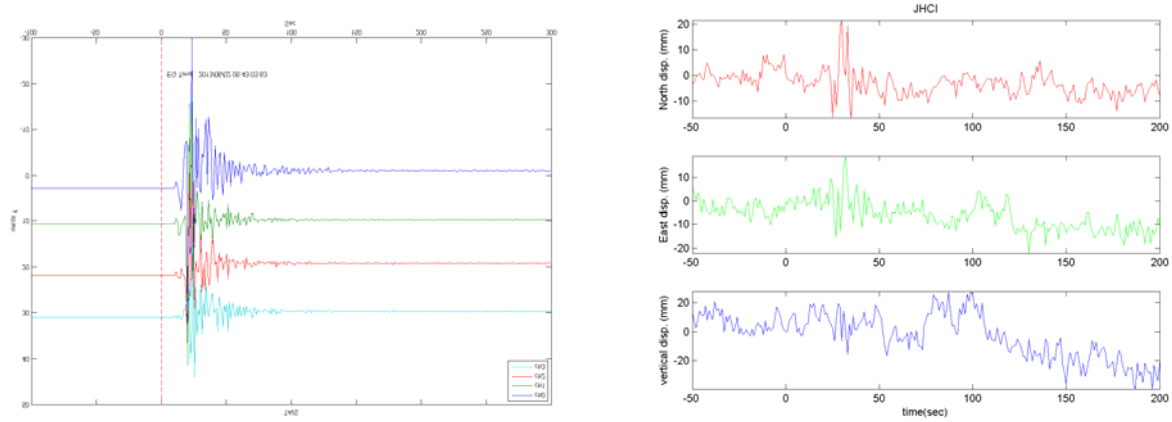


圖 8-5.2：JHCI 高頻 GPS 連續觀測站資料在 2013 年 6 月 2 日南投地震的每秒座標解(右圖)，左圖則為鄰近井下應變儀站同時間的應變資料。

第九章、結論與建議

(1) GPS、精密水準測量、CGPS 及 PS-InSAR

精密水準的部分已有 33 測線（共計 1147 測段）完成施測並送審，藉由誤差分析及與 GPS 連續站座標時間序列比對後，顯示觀測資料品質符合歷年施測水準穩定且可靠； GPS 亦完成恆春地區 32 點、桃竹地區 114 點、嘉南地區 183 點、高屏地區 113 點及中部地區 155 點之移動站測量及查核工作；並解算地調所及其交換之所設置之全台連續全球定位系統測站的 2013 年資料，結果顯示水平速度場在 ITRF2008 框架下在台南以北測站多為西北往東南移動，以南地區多呈現東北往西南移動，此結果與過去長期解算結果約略相同。

本年度利用 GAMIT/GLOBK 軟體計算求解精密之測站座標。由於軟體運算效率之限制，我們將所有站數、網型幾何及斷層分布為原則，切割成 8 個子網分別計算，每個子網之計算均包含 16 個已估計座標與速度場之核心站，並於最後整體網型平差時提供一致之約制。本計畫計算 2013 年全台連續全球定位系統測站共 246 站。由於各測站設置背景不同，在首次利用 GAMIT 計算時所需提供資基本資料各有差異。因為某些測站資料的精度不佳，會造成解算時誤差過大而遭剔除，因此今年本研究主要瞭解各測站之狀況，並彙整時間序列，分析座標跳變動過大與誤差過大的點位，以瞭解發生的原因，以利於測站移動速度場分析並將探討資料跳階或地震影響。

在同震變形研究方面，2013 年 3 月及 6 月南投地震的震央位置相當接近日月潭站(SUN1)，受到較大同震影響的測站為 DPIN、PLIM、S167、S170、SINY 以及位移量最大的 SUN1。其最大水平位移量為 6 月 2 日地震時的同震變形，向北向西分量各為 32.6 mm 以及 33.0 mm。另外，在高頻解算部分(1 秒採樣率)，針對 2013 年 6 月南投地震，利用美國推進噴射實驗室(Jet propulsion laboratory, JPL)所研發的 GIPSY 軟體，計算高頻的資料，以期望得到地震發生前後，地震震央附近地表動態變形過程，與其他單位(GPSLAB、CWB、成功大學)公布的解算結果相似。南投地震同震位移都以水平方向比較為明顯，最大變形位於日月潭的 SUN1 測站，其他周圍距離約 50 km 的測站以內也能觀測到明顯的同震地表變形。

至於 2013 年 10 月 31 日 20 時 02 分花蓮瑞穗地區發生一芮氏規模 6.3 的地震，本研究團隊同樣針對此地震進行高頻 GPS 動態解算，取其地震前後 10 小時動態解，並整合其他單位 GPS 單日解同震位移速度場，結果與單日解相似。更利用瑞士波昂大學所研發的後處理計算程式，以池上牧野渡假村 SHAN 為參考站，計算震央附近 DSIN，GUFU，JPEI 及 JSUI 連續固定站一秒採樣率的地震前後一分鐘的動態結果，成果顯示一秒採樣率可詳細記錄測站的地形變化，可作為後續動態變形模式的參考。

PS-InSAR 的觀測資料結合 GPS 觀測及精密水準測量觀測，可將原本點狀或線狀分布的觀測結果擴展成接近面狀的地殼變動觀測。今年 PS-InSAR 選取與中部四條水準路線相同的區域做比較，並與 GPS 的水平變動量及水準點的垂直變動量互相比較。此外，還互相對照 ENVISAT、ERS 與 ALOS 三種 InSAR 衛星的資料。由於 InSAR 所得的結果是衛星到反射體視線方向的長度變化，所以比較時要將不同觀測量轉換到相同分量。本計畫採用兩種比較方法，即 1) 把 GPS 的垂直與水平速度場轉換成 LOS 方向的向量，並與 PS-InSAR 結果做比較; 2) 直接比較 PS-InSAR 之 LOS 速度場與水準的垂直速度場。最後顯示，ENVISAT 之 LOS 速度場和 GPS 的吻合度較高，而與水準測量的結果僅與大趨勢的變化約略一致，但在數量上還是有所差異，InSAR 的結果也較離散。這樣的結果應該是在於衛星觀測上的系統誤差，以及觀測時間的差異。三種大地資料觀測時間無法一致，所以得到的速度場是不同時段的結果。在下陷區域，不同季節可能會有不同的下陷量，唯一的解決方法是比較長期的變化趨勢，一來可提高精度，二來可降低時間差異所產生的誤差。

另外，InSAR 資料的處理還有許多要精進之處，特別是衛星軌道精度與 SAR 電波經過

大氣層的折射誤差修正。前者需要看是否有人為相同時段的軌道做計算，或是在地面上較穩定的區域佈設地面控制點(Ground Contrl Point; GCP)。後者則可利用該地區的 GPS 連續觀測站分析在衛星通過時段，在衛星方位角與高度所計算得到的大氣折射誤差修正量，因為 GPS 為訊號是 L 波段，與 ERS 與 ENVISAT 衛星所用的是相同的，如此應該可以減少數公分到數十公分的誤差量。這都有待在下一計畫年度繼續分析。

關於 GPS、精密水準測量、CGPS 及 PS-InSAR 的建議如下：

1. 縣117_新竹至峨眉測線之水準點GB90、縣182_安平至龍崎測線之水準點G435及台22_岡山至安坡測線之水準點G533，前述點位皆有異常變動。經過實地勘驗，是因為點位附近施工或設置地點不穩定而造成，建議分析時應特別注意並停止測量或重新設置該點位。
2. 跨車籠埔斷層之五條精密水準短測線，建議在有重大事件發生後再進行測量，或者將其連結成一水準網，可以觀測出該地區之整體變化。
3. 連續站分析資料過程發現許多測站因維修關係造成誤差甚大，建議與其它單位交換長期資料的同時，亦應一併要求測站維修記錄，以利後續分析。
4. 根據本年度研究結果顯示，ENVISAT衛星相當適合觀測台灣地區的地表變形。然而本計畫在北部地區影像較少，因此建議下年度開始前，可將北部區域影像補齊，以便得到此區域較長時間範圍的地表變形時空變化。表9.1中為ENVISAT在台灣北部地區能使用的所有影像，灰色區塊為本計畫擁有之影像，白色區塊為建議可採購影像。

表 9.1：台灣北部地區 ENVISAT 影像，白色區塊為建議採購影像。

ENVISAT ASAR IMAGE MODE		TRACK：461	FRAME：3105
2003/04/26	2004/12/11	2006/04/15	2007/08/18
2003/11/22	2005/01/15	2006/09/02	2007/12/01
2004/03/06	2005/02/19	2006/10/07	2008/01/05
2004/04/10	2005/06/04	2006/11/11	2008/02/09
2004/05/15	2005/07/09	2007/01/20	2008/03/15
2004/06/19	2005/08/13	2007/02/24	2008/04/19
2004/07/24	2005/09/17	2007/03/31	2008/05/24
2004/08/28	2005/11/26	2007/05/05	2008/06/28
2004/10/02	2005/12/31	2007/06/09	
2004/11/06	2006/03/11	2007/07/14	

(2) 活動斷層潛勢分析與斷層面滑移虧損率(slip deficit rate)評估

本計畫為「斷層活動性觀測研究第三階段-斷層整合性觀測與潛勢分析(1/4)」(第一年度)成果，主要進行中部地區 7 條活動斷層潛勢評估，蒐集了活動斷層幾何面及活動性之相關文獻，建立了斷層參數表，可做為後續地震危害度分析參考使用。**車籠埔斷層**利用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 2.2%、5.9%和 17.7%；**梅山斷層**利用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 30.9%，44.1%，63.4%；**大茅埔-雙冬斷層**利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 3.2%，5.1%，9.6%；**彰化斷層**利用 BPT 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 15.0%、22.4%及 35.5%，利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 10.5%、16.4%及 27.9%；**九芎坑斷層**利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 3.1%、5.0%及 9.2%；**觸口斷層**利用 Poisson 模式，其未來 30、50、100 年最大可能地震規模之發生機率，分別為 11.7%、18.2%及 30.3%。

在評估過程中會遇到斷層可能為其南北斷層之延伸（如大尖山斷層），為了避免重複計算的問題，在未來的潛勢評估中，需考慮以整個斷層系統來進行潛勢評估。此外，背衝斷層與主斷層一起破裂的問題、兩條鄰近斷層是否會合併同時破裂、斷層長度地下延伸性等問題均需考慮。另外，本計畫建議對於斷層活動行為未知的斷層，加入截切指數模式為邏輯樹之分支進行評估。機率圖後續應用上，藉由本計畫建構之活動斷層的特徵地震規模與發生機率模式，可進一步產製地震危害度圖(seismic hazard map)。本計畫之各活動斷層幾何形貌與相關參數，可以作為地震危害度分析與地震波模擬之輸入參數，地震動之成果可進一步作為區域災害防救規劃、地震保險差別費率規劃、工程耐震設計、國土開發審議參用。

針對台灣中部地區由 GPS 觀測到的現今(2002-2012)水平地表變形速率進行塊體模型分析，表 5-8.3 列出各斷層平均的長期滑移速率、震間期滑移速率及滑移虧損率(slip deficit rate)，可以看到在本區域內滑移虧損率(slip deficit rate)大約都落在 9 mm/yr 以內。以車籠埔斷層為例，Chen et al. (2004)利用槽溝開挖得到近 190 年來的平均長期滑移率約為 8.5 mm/yr；此結果和塊體模型所估算的滑移虧損率(slip deficit rate)5-8 mm/yr 相當接近，但卻明顯低於所估算的長期滑移率 9-19 mm/yr。這個結果顯示車籠埔斷層在震間滑動時，斷層面上被 asperity 鎖住的效應十分明顯。

另外，彰化斷層、大尖山斷層、大茅埔－雙冬斷層有出現超過 9 mm/yr 的滑移虧損率(slip deficit rate)，而在觸口斷層包含大尖山南段時也出現大於 9 mm/yr 的滑移虧損率(slip deficit rate)，其中又以大茅埔－雙冬斷層雙冬段的 26 mm/yr 最大，這與上述方法所計算出在大茅埔雙冬斷層有相對較小的地震發生機率有所出入，而我們認為這種差別主要是由於塊體模型的結果會受到速度場的空間分布所影響。例如由圖 5-8.2 的 GPS 速度場顯示，在跨大茅埔雙冬斷層兩側有較明顯的速度梯度，因此可對應出較高的斷層滑移率。反而言之，利用 BTP 模式算出的梅山斷層發生機率明顯較大，但由於圖 5-8.2 顯示跨梅山斷層沒有明顯的速度梯度變化，因此梅山斷層的滑移虧損率(slip deficit rate)只有相對較低的 7 mm/yr。除此之外，上述差異也可能由於塊體模型並未移除其他影響 GPS 速度場的效應而受到影響。例如 1999 集集地震後的黏彈性震後效應(viscoelastic postseismic effects) 影響，或是和未考慮大茅埔—雙冬斷層以東的塊體效應有關。未來的研究將朝此方向改善進行。

(3) 井下應變儀與地球化學觀測

井下應變儀部分，目前利用幾年來多次較大氣壓變化時的資料，試圖建立氣壓對井下應變儀資料的影響模式，並作修正。以建立移除環境影響因素後的殘餘地殼應變時間序列，作為尋找與大地震相關的應變"異常"。從 2012 年 12 月至 2013 年 11 月，在嘉義網觀測到 3 個應變異常事件，可能與下列三個地震事件相關：(1) 2013 年 3 月 7 日芮氏規模 5.9 花蓮地震與 3 月 27 日芮氏規模 6.2 南投地震；(2) 2013 年 6 月 2 日芮氏規模 6.3 南投地震；(3) 2013 年 10 月 31 日芮氏規模 6.3 花蓮地震。

井下應變儀資料時頻分析之目的在於了解應變資料的特性，並借用時頻特性的相似性來了解產生應變異常或變化的環境影響因素。本年度只分析嘉義網之達邦 (DARB)、太興國小 (TAIS)、中興國小 (TSUN)三測站的資料，針對 2013 年 1~9 月的井下應變儀面應變資料進行時頻分析。分析流程為先去除面應變資料的趨勢變化，並針對不同頻率範圍進行短時距傅立葉轉換分析，頻率範圍分別為高頻(0.15~0.5 Hz)、中頻(0.07~0.15 Hz)以及低頻(0.0~0.07 Hz)。再對各個頻段之面應變資料的時間積分 (Marginal Time)，取面應變資料的變化趨勢與其對應之累積雨量、地下水水位和氣壓的變化趨勢正規化(Normalize)後進行比對，透過井下應變儀面應變資料與水文資料之趨勢比對兩者之間的關聯性。分析中採用天然事件(地震與颱風)所產生的應變與環境變數來尋找事件所造成變化的特性與原因。高頻強度變化趨勢與氣壓變化趨勢，在颱風影響台灣期間具有顯著的逆相關現象：當氣壓極低時，對應之高頻面應變強度較大 (伸張)。而高頻面應變強度與地下水水位趨勢有正相關的情形；地下水壓高則地殼

有伸張應變颱風時大氣壓力與累積雨量為逆相關的關係，是故高頻強度變化與累積雨量變化趨勢具有正比關係，這些都是已知的合理現象。在這一次的分析中，證實此方法的可信度，並可以此方法來找出變數與應變數之間的精確數值關係。未來期望也可以對未知原因的異常應變，利用時頻分析來找出異常的原因，或是與其它因素的相關性。

以土壤氣體異常變化之方法來評估斷層活動性或地震活動之發生，並利用時序分析方法處理不同觀測站的數據，可進一步以較客觀的方式辨識出與地震前兆的異常反應。本年度截至目前為止，以新竹大平地、雲林古坑和台東池上觀測站的觀測成果較為顯著，在數個地震規模較大的地震案例中，若兩個以上的測站同步出現明顯的濃度異常變化，可增加其前兆訊息的可信度，進而推估該地震可能發生的時間與地點。

地下水位在經過氣壓修正後，震前水位異常數量大幅減少，並訂正先前研究中所誤認之異常事件。目前地下水位之異常的出現頻率低，修正後大部分的震前水位異常都與大地震相關。但因數量少，已無法進行誤報率的計算。2013 年觀察結果，唯一一起地下水位異常發生於新竹的新樂站，在 3 月 27 日地震前 10 日水位驟降達 40 公分。在 2012 年 2 月 26 日霧台地震前，新樂站也出現類似的異常水位變化。

地下水水氡部分，安通站 2009 年 3 月至 2013 年 10 月地下水水氡濃度未觀測到異常之變化。社頂站在 2013 年 8 月 29 日及 2013 年 10 月 22 日，LSC 分別監測到地下水水氡濃度異常下降之現象，預期將有相對應的地震發生。由於安通溫泉及墾丁公園社頂之地質條件(脆性含水層被延展性地層包圍)，適合觀測地下水水氡濃度異常下降之地震前兆。

同時檢視土壤氣體、地下水壓及水氡等地球化學觀測站，發現在特定大地震來臨前，數個觀測站能在數天至數周前觀察到異常的變化。例如在 2013 年 3 月 27 日南投地震前（M_L=6.2），大平地、古坑氣體觀測站之氡氣濃度呈現明顯的異常變化，新樂地下水壓井之水位都有明顯的震前異常變化。

在這一期 (2012 年 12 月至 2013 年 11 月間)新發生的地震中，有 8 個規模 6 的地震，其中有 3 個發生在陸地上。本次期末報告考慮的異常觀測中，並無任何同一觀測網有 3 個或以上的同步異常觀測，但有一個地震(ID=124)同時觀測到地下水位 (新竹網)、井下應變儀 (嘉義網)和地化氣體記錄 (新竹網、雲林古坑測站)三樣異常，該地震為 2013/03/27 10:03 規模 6.2 發生在南投縣政府東方 36.9 公里的地震。由於這些異常發生地點分布相當分離，不符合原來訂定的同一地區三種獨立觀測方法的一致異常的原則。

關於井下應變儀與地球化學觀測未來方向與建議如下：

1. 觀察得知嘉義網及新竹網之井下應變儀氣壓計的數值偏離理論值太多，並且出現海拔較高測站的氣壓值比相對低海拔測站還要高的現象。目前的處理是考慮鄰近測站(包含井下應變儀與氣象局屬自計站)的氣壓數值來調整異常氣壓。建議未來必須對這些應變儀的氣壓計儀器進行校正與維修，以保持訊號的穩定性，將有利進一步邁向即時資料處理與呈現的目標。
2. 目前與井下應變儀、水位監測站共站的雨量資料絕大部分都已損壞或不堪使用。現在雨量資料使用中央氣象局鄰近測站的雨量資料，但恐有代表性不足之疑慮，希望將來可以修復隨站的雨量觀測器。
3. 發現地下水變化與應變變化之間存在一個時間差異，而且在太興國小測站(TAIS)顯示應變先有反應，地下水井監測在10天左右之後才有水位反應，未來須更進一步討論地下水影響應變的機制。建議維護共站的地下水水位站以維持資料的穩定，並新增井下應變儀共站的地下水水位站。
4. 在資料經過地下水與氣壓修正後，開始編輯程式做潮汐的估計與移除，已可有效估計為期三個月資料的潮汐並移除之。但由於多種環境因素影響，地下岩層的應變遠大於每日潮汐，特別是與斷層滑移相關的活動，這些會嚴重影響所估計潮汐的正確性。將考慮以切除較大的異常訊號後再估計潮汐。現有程式已可以容許30%左右的資料遺缺，所以切

除較大異常訊號尚不會造成困擾，但需要對所求得的潮汐做正確性的分析。但是發現相同地區中井下應變儀對於地潮反應的振幅不一致，與相位不對齊的現象，目前先正規化各測站的地潮反應量值，未來須進一步由海潮或固體潮模式求得井下應變儀應變的響應值。

5. 中崙濁水潭觀測站由於受到鄰近潭水的影響，常會因豪大雨而導致逸氣通道受阻或儀器故障，且未來有崩塌的疑慮，故建議另尋合適地點進行遷站。
6. 沄水站因今年未觀察出任何異常，且水體帶有氣體逸出，似乎會影響地下水位的觀測，建議未來改為地下水溶解氣觀測站。

(4) 總結

本次配合性的觀測資料(非固定觀測站固定時間觀測的)新增了數種，包括 PS-InSAR、GPS 應變與高頻 GPS，這是用來配合有大地震或有井下應變儀異常時，GPS 可提供相似於應變的觀測，如此可提供另一個獨立的觀測，增加觀測的可靠性，也可幫助於異常的解釋。在這些觀測中，PS-InSAR 與 GPS 及水準高程測量有趨勢上的一致性，但在數量上尚待進一步的提高精度，包括提高衛星軌道精度與折射誤差修正。GPS 應變則與井下應變儀的觀測量有高度的相似性。精度略差，但是是一個絕對量，可用來做應變儀校準的一種參考資料，但不可忽略的是，GPS 應變所代表的區域是一個數平方公里的區域，與井下應變儀不到一平方公尺的面積大為不同。所受的誤差與環境影響因素也不同，有待進一步分析。高頻 GPS 也是一個正在發展的方法，這一次僅僅試用了 Bernese 與 MIT 的 TRACK 軟體，近年來尚有幾種新發展的軟體，正在聯繫如何取得使用權。高頻 GPS 資料的分析將有助於在地震時或在無地震時的應變異常解釋。

參考文獻

丁國瑜、田勤儉、孔凡臣、謝霄峰、張立人、王力平 (1993) 活斷層分段-原則、方法及應用。地震出版社，143 頁。

大江二郎 (1938) 台中州國姓油田調查報告。 臺灣總督府殖產局出版， 第 804 號。

日本地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2001) 長期的な地震発生確率の評価手法について。

日本地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2008) 全國地震動預測地圖 2008 年版。

日本地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2010) 全国地震動予測地図 2010 年版。

中油公司臺探總處 (1986) 十萬分之一地質圖-嘉義圖幅，中國石油公司出版。

王源、楊昭男、陳文山 (1992) 台灣地質圖說明書圖幅第四十八號，玉里圖幅。經濟部中央地質調查所，共 81 頁。

六角兵吉、牧山鶴彥 (1934) 高雄州恆春油田調查報告。台灣總督府殖產局出版，第 660 號，共 43 頁。

丹桂之助(1936)有關三叉逆衝斷層及附近之地質構造，台灣地學記事，第 7 卷，第 1-3 號。

石瑞銓、王乾盈、謝昭輝 (1998) 雲嘉南地區活動斷層震測調查。經濟部中央地質調查所活動斷層地球物理探勘計畫 87 年度報告，130。

石瑞銓、陳平護、呂明達、陳文山 (2002) 地震地質與活動斷層資料庫建置：淺層地球物理探勘(1/5)。經濟部中央地質調查所 91 年度研究報告，166。

石瑞銓、陳平護、呂明達、陳文山 (2003) 地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫-地球物理探勘計畫(2/5)，經濟部中央地質調查所九十二年度委辦計畫期末報告，共 218 頁。

吉田要 (1931) 所謂觸口山層。台灣地學記事，27–29。

江崇榮、林燕初、陳建良 (2011) 地下水位與地表高程互動模式之研究，經濟部地質調所彙刊，第 24 號，1-35 頁。

李錫堤 (1993) 活斷層工程評估的新發展。地工技術，44 期，5-18。

李錫堤、鄭錦桐、紀立民、廖啟雯、廖卿妃 (2000) 槽溝開挖探查成果簡介。第三屆台灣活斷層調查研討會資料.

李元希、吳維毓、石同生、盧詩丁、謝孟龍、張徽正 (2000) 九二一集集地震地表變形特性—埤豐橋以東，經濟部中央地質調查所特刊，第十二號，第 19 至 40 頁。

何信昌、謝凱旋、高銘健、陳華玟 (2005) 新化圖幅與說明書，五萬分之一台灣地質圖第 50 號。經濟部中央地質調查所出版。

何春蓀 (1959) 台灣中部台中與南投間之逆衝斷層構造。台灣省地質調查所彙刊，第 11 號，13-20 頁。

何春蓀 (2003) 台灣地質概論台灣地質圖說明書。經濟部中央地質調查所，130-134。

林偉雄 (2000) 集集地震所致地表變形－石岡和竹子坑地區。經濟部中央地質調查所特刊，第十二號，1–18。

林啟文、盧詩丁、黃文正、石同生、張徽正 (2000a) 台灣中部濁水溪以南地區的集集地震斷層與構造分析，經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，89–112。

林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正 (2000b) 台灣活動斷層概論(第二版)五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書。經濟部中央地質調查所等刊第十三號。

林啟文、盧詩丁、石同生、劉彥求、林偉雄、林燕慧 (2007) 臺灣西南部的活動斷層—二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第 17 號，共 141 頁。

林啟文、盧詩丁、石同生、劉彥求、林偉雄、林燕慧 (2007) 台灣西南部的活動斷層-兩萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書：大尖山斷層，經濟部中央地質調查所特刊，第 17 號，141。

林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村 (2008) 大茅埔-雙冬斷層，經濟部中央地質調查所特刊， 21，148。
林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正 (2000) 台灣活動斷層概論第二版，五十萬分之一台灣活動斷層分佈圖說明。經濟部中央地質調查所特刊，第十三號，共 117 頁。
林啟文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村 (2008) 台灣中部的活動斷層：二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書，經濟部中央地質調查所特刊，第二十一號，共 148 頁。
林啟文、陳文山、劉彥求、陳柏村 (2009) 台灣東部與南部的活動斷層，二萬五千分之一活動斷層條帶圖說明書。經濟部中央地質調查所特刊，第二十三號，共 178 頁。
林朝棨 (1957) 臺灣地形，臺灣通志稿卷一，土地誌，地理篇。臺灣省文獻委員會，第一冊，共 424 頁。
林慶偉、吳炫宗、蕭崇利 (1999) 嘉義地區活斷層研究:梅山斷層與九芎坑斷層之初步研究，中國地質學會 88 年年會論文集，279-280 頁。
林煌棋 (1996) 嘉南地區麓山帶地質構造之研究。國立中央大學應用地質研究所碩士論文，共 105 頁。
吳相儀 (2000) 台灣地區中大型地震震源參數分析。國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
松田時彥 (1990) 最大地震規模による日本列島の地震分帶図。地震研彙報，65，289-319 頁。
胡植慶、劉啟清、饒瑞鈞 (2012) 斷層活動性觀測研究第二階段：斷層監測與潛勢分析研究(4/4)。經濟部中央地質調查所期末報告書，共 366 頁。
侯進雄、王菁穗、費立沅 (2002) 台灣西南部地區地殼變形監測。第 31 屆測量學術及應用研討會論文集，687–694 頁。
侯進雄 (2007) 台灣活動斷層構造相關地殼變形監測研究。國立台灣大學地球科學研究所博士論文，共 209 頁。
徐鐵良 (1976) 台灣海岸山脈的利吉混同層。台灣省地質調查所彙刊，第二十五號，87-96。
翁子偉 (2005) 以反射震測法研究九芎坑斷層及其附近構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 118 頁。
許晉耀 (2003) 九芎坑斷層之研究。國立成功大學地球科學研究所碩士論文，共 90 頁。
郭烈銘、梁敬豪、張濟權、李伯當 (1985) 嘉義梅山地震斷層地電阻探勘研究，行政院國家科學委員會防災科技研究報告。
陳于高 (1993) 晚更新世以來南臺灣地區海水面變化與新構造運動研究。國立臺灣大學地質學研究所博士論文，共 158 頁。
陳文山、石瑞銓、楊小青、楊志成、葉明官、李龍昇、劉力豪、顏一勤、彭秋雯、張徽正、陳于高、李元希、林偉雄、石同生、盧詩丁 (2003) 梅山斷層的構造特性與古地震研究，經濟部中央地質調查所特刊，14，149-160。
陳文山、鄭穎敏、黃奇瑜 (1985) 台灣南部恆春半島之地質。地質，6 卷 2 期，21-38。
陳文山、黃能偉、顏一勤、楊志成、楊小青 (2004) 恆春斷層條帶地質圖說明書。經濟部中央地質調查所地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫－槽溝開挖與古地震研究計畫(3/5)，共 38 頁。
陳文山、楊志成、石瑞銓、楊小青、顏一勤、陳于高、張徽正、林偉雄、李元希、石同生、盧詩丁 (2003) 九芎坑的斷層特性與活動性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 14 號，113-128 頁。
陳文山、楊志成、楊小青、吳樂群、林啟文、張徽正、石瑞銓、林偉雄、李元希、石同生、盧詩丁 (2004) 從構造地形探討嘉南地區活動構造及構造分區。經濟部中央地質調查所彙刊，第 17 號，53-77。
陳文山、葉明官、楊志成、石瑞銓、林啟文、侯進雄 (2006) 梅山斷層的構造特性，經濟部中央地質調查所彙刊，19，135-151。

陳文山、游能悌、松多信尚、楊小青 (2008) 地震地質與地變動潛勢分析計畫：斷層長期滑移速率與再現週期研究(1/4) (p. 86)。經濟部中央地質調查所報告。
陳正宏、劉聰桂、宋聖榮、楊燦堯、李寄嵎 (2000) 台灣陸上斷層活動性之環境地球化學調查研究(1/5)─嘉南地區。經濟部中央地質調查所報告 89-3 號，共 215 頁。
陳正宏、劉聰桂、宋聖榮、楊燦堯、李寄嵎 (2001) 台灣陸上斷層活動性之環境地球化學調查研究(2/5)─西部地區。經濟部中央地質調查所報告 90-5 號，共 258 頁。
陳正宏、劉聰桂、宋聖榮、楊燦堯、李寄嵎 (2002) 台灣陸上斷層活動性之環境地球化學調查研究(3/5)─西部地區。經濟部中央地質調查所報告 91-5 號，共 300 頁。
陳建良、林啟文、陳文山 (2005) 台灣南部恆春半島地殼變形初步研究。經濟部中央地質調查所特刊，第十六號，55-73。
陳郁文 (2006) 以反射震測法研究觸口斷層及其附近構造，國立中央大學。
陳致言 (2007) 臺灣西南部井下應變研究。95 年度研究發展報告，經濟部中央地質調查所，共 51 頁。
陳國誠、黃柏壽、溫國樑、邱宏智、葉永田、鄭世楠、彭瀚毅 (1999) 一九九八年嘉義瑞里地震之餘震調查。地質，19(1)，34–41。
陳華玟、陳勉銘、邵屏華、張碩芳、謝凱旋 (2007) 彰化斷層與八卦丘陵的演化 (p. 6370)。台北縣中和市: 地質環境與資源研討會論文集。
張國楨、徐澔德、詹瑜璋、陳柔妃、葉恩肇、賴光胤 (2011) 重要活動斷層調查特性研究－近斷層高精度地形資料之判釋與分析(1/4)。經濟部中央地質調查所報告第 100-10 號，共 289 頁。
黃旭燦 (2003) 台灣中南部褶皺逆衝斷層帶地質構造特徵分析，共 141 頁，國立中央大學地球物理研究所博士論文，中壢。
黃旭燦、楊耿名、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏 (2004) 台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(5/5)-台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析。斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究，經濟部中央地質調查所報告 93-13 號。
黃明哲、潘國樑、王文龍、顏滄波 (1985) 活動斷層之航照地質研二嘉義梅山地震斷層研究。工研院礦能所，42。
黃孟涵 (2006) 以合成孔徑雷達干涉法研究台灣之地殼變形，國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 185 頁。
黃鑑水、陳勉銘 (2000) 台灣中部地區之雙冬斷層，經濟部中央地質調查所特刊，12，171-182。
黃鑑水、張憲卿、劉桓吉 (1994)，台灣南部觸口斷層地質調查與探勘，經濟部中央地質調查所彙刊，第九號，51–76。
黃鑑水、劉桓吉、張憲卿 (1992) 台灣南部觸口斷層之地質調查與探勘研究(一)。國科會防災科技研究報告，81-22 號，24 頁。彭秋紋、石瑞銓、張徽正、林啟文、陳文山、石同生、盧詩丁 (2004) 梅山斷層與其淺部剪切帶構造特徵，經濟部中央地質調查所特刊，15，85-98。
游明聖 (1996) 斷層活動所造成之災害-以民國四十年花蓮、台東地震為例。台灣博物，第十五卷，第二期，16-25。
張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁 (1998) 台灣活斷層概論，五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書。 經濟部中央地質調查所特刊，103。
張麗旭 (1951) 三叉衝上斷層及其附近之地質構造，台灣省地質調查所彙刊，第 3 號，23-34 頁。
傅慶州、楊燦堯、陳正宏 (2004) 利用土壤逸氣調查掩覆斷層及破裂帶可能分佈：以潮州斷層為例。經濟部中央地質調查所特刊，第十五號，147-160 頁。
詹新甫 (1974) 恆春半島之地層與構造並申論中新世傾瀉層。台灣省地質調查所彙刊，第 24

號，99-108。
葉義雄、陳光榮、王維豪、蔡義本 (1984) 1906 年嘉義梅山地震斷層之觀測研究。
楊耿明、洪日豪、吳榮章、黃旭燦、丁信修、徐祥宏 (2000) 台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(1/5)－西南地區(觸口斷層)，經濟部中央地質調查所，93。
楊耿明、洪日豪、吳榮章、黃旭燦 (2001) 斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究_台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(1/5)-西南地區(觸口斷層)，經濟部中央地質調查所報告第 89- 4 號，共 93 頁。
楊耿明、黃旭燦、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏 (2003) 斷層活動性觀測與地震潛勢評估調查研究：台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究(4/5)－台灣中部麓山帶地區，經濟部地質調查所，51 頁。
楊燦堯、宋聖榮、傅慶州、蘇春旭、劉聰桂、陳正宏 (2004) 活動斷層地球化學監測現況與成果。2004 年台灣活動斷層與地震災害研討會論文集，120-137，國立成功大學。
楊燦堯、劉聰桂、陳正宏、吳逸民 (2005) 斷層活動性之地球化學觀測與研究(1/4)。經濟部中央地質調查所報告第 94-15 號，共 506 頁。
楊燦堯、劉聰桂、陳正宏、吳逸民 (2006) 斷層活動性之地球化學觀測與研究(2/4)。中央地質調查所報告第 95-15 號，共 147 頁。
經濟部中央地質調查所 (1999a) 九二一地質調查報告，經濟部中央地質調查所出版。
經濟部中央地質調查所 (1999b) 九二一地震車籠埔斷層沿線地表破裂位置圖，比例尺兩萬五千分之一，經濟部地質調查所出版。
經濟部中央地質調查所 (2004) 九十三年度「斷層活動性觀測站設置-竹東地區」完工報告書。經濟部中央地質調查所。
經濟部中央地質調查所 (2006a) 九十四年度「斷層活動性井下應變儀觀測站設置(1/4)」完工報告書。經濟部中央地質調查所，共 224 頁。
經濟部中央地質調查所 (2006b) 斷層活動性觀測研究第一階段：斷層活動性井下應變儀觀測站設置(2/4)。中央地質調查所報告第 95-14 號，共 119 頁。
經濟部中央地質調查所 (2007) 斷層活動性觀測研究第一階段：斷層活動性井下應變儀觀測站設置(3/4)。中央地質調查所報告第 96-08 號，共 123 頁。
經濟部中央地質調查所 (1999a) 九二一地質調查報告，經濟部中央地質調查所出版。
經濟部中央地質調查所 (1999b) 九二一地震車籠埔斷層沿線地表破裂位置圖，比例尺兩萬五千分之一，經濟部地質調查所出版。
劉彥求、林啟文、石瑞銓、陳平護 (2004) 臺灣中部大尖山斷層的構造特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，69-83 頁。
劉桓吉、李錦發 (1998) 雲林圖幅及說明書，五萬分之一台灣地質圖，第 38 號，經濟部中央地質調查所，47。
劉康克、陳欽溢、侯財源、林慶仁 (1986) 連續水氡監測方法及數據處理。中央研究院地球科學研究所研究報告，第 33 頁。
劉聰桂、陳正宏、宋聖榮、楊燦堯、李寄嵎 (2003) 台灣陸上斷層活動性之環境地球化學調查研究(4/5)─北部地區。經濟部中央地質調查所報告 92-04 號，共 256 頁。
鄭世楠(1995)，台灣及鄰近地區大地應力分布的研究。國立中央大學地球物理研究所博士論文，196-207 頁。
鄭世楠、葉永田 (1989) 西元 1604 年至 1988 年台灣地區地震目錄，中央研究院地球科學研究所，IES-R-661，255 頁。
鄭世楠、葉永田 (2002) 1848 年彰化地震與彰化斷層關係的初步研究，港灣報導，61，38-47。
鄭世楠、葉永田、徐明同、辛在勤 (1999) 台灣十大災害地震圖集。交通部中央氣象局地震測報中心，210-211。
鄭世楠、葉永田、蕭乃祺、江嘉豪 (2000) 災害地震目錄在 GIS 的建置，中央氣象局地震技

術報告彙編，33，pp195-210。
鄭錦桐 (2002) 台灣地區地震危害度的不確定性分析與參數拆解。國立中央大學地球物理研究所博士論文，227 頁。
盧詩丁、張徽正 (1998) 簡介地震與活動斷層調查案例-梅山斷層的調查回顧，地質，18(2)，29-51。
謝昭輝 (1989) 梅山斷層的震波測勘研究(II)。行政院國家科學委員會防災科技研究報告 77-65 號，64。
謝昭輝、辛在勤 (1988) 梅山斷層的震波測勘研究(I)。行政院國家科學委員會防災科技研究報告 76-47 號，24。
顏君毅、陳錕山、張中白、趙進福 (2005) 嘉義市附近的地表變形-以雷達差分干涉觀察，經濟部中央地質調查所特刊，16，31-40。
顏滄波、吳慶餘 (1986) 恆春半島南部之上新世及上覆地層。地質，第 7 卷，1 期，1-10。
饒瑞鈞 (2003) 台灣南部地震活動性研究及潛能分析，行政院國家科學委員會專題研究計畫精簡版成果報告(p. 5)。
饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建誠、詹瑜璋 (2006) 地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫--活動斷層監測系統計畫(5/5) (p. 147)。經濟部中央地質調查所報告第 95-10 號。
饒瑞鈞、李元希、胡植慶 (2010) 地變動監測分析總報告。中央地質調查所報告第 99-10 總號，403。
Anderson, J. G. (1979) Estimating the seismicity from geological structure for seismic-risk studies. Bull. Seism. Soc. Am., 69, 135-158.
Anderson, J. G. and J. E. Luco (1983) Consequences of slip rate constraints on earthquake occurrence relations. Bull. Seism. Soc. Am., 73, 471-496.
Angelier, J., Chu, H.T. Lee, J.C. and Hu, J.C. (2000) Active faulting and earthquake hazard: The case study of the Chihshang fault, Taiwan. Journal of Geodynamics, 29, 151-185.
Angelier, J., J.-C. Lee, H.-T. Chu, and J.-C. Hu (2003) Reconstruction of fault slip of the September 21st, 1999, Taiwan earthquake in the asphalted surface of a car park, and co-seismic slip partitioning, J Struct Geol, 25(3), 345-350.
Bardsley, W., and D. Campbell (2000) Natural geological weighing lysimeters: calibration tools for satellite and ground surface gravity monitoring of subsurface water-mass change, Natural Resources Research, 9(2), 147-156.
Barsukov, V.L., Serebrennikov, V.S., Belyaev, A.A, Bakaldin, Y.A. and Aresnyeva, R.V. (1985a) Someexperience in unraveling geochemical earthquake precursors. Pure and Applied Geophysics, 122, 157-163
Barsukov, V. L., Varshal, G. M. and Zamokina, N. S. (1985b) Recent results of hydrogeochemical studies for earthquake prediction in the USSR. Pure and Applied Geophysics, 122, 143-156.
Baubron, J.-C., Rigo, A. and Toutain, J.-P. (2002) Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: the Jaut Pass example (Pyrenees, France). Earth Planetary Science Letter, 196, 69-81.
Bella, F., P. F. Biagi, M. Caputo, E. Cozzi, G. Della Monica, A. Ermini, E. I. Gordeez, Y. M. Khatkevich, G. Martinelli, W. Plastino, R. Scandone, V. Sgrigna, and D. Zilpimiani. (1998) Hydrogeochemical anomalies in Kamchatka (Russia). Physics and Chemistry of The Earth, 23, 921-925.
Biagi, P. F., Kingsley, S. P. and Vallianatos, F. (2000) Earthquake precursors, Special issue of Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 25, 225-328.
Bock, Y, Abbot RI, Counselman, CharlesC III, King RW. (1986) A demonstration of 1–2 parts in 107 accuracy using GPS. Bulletin géodésique. 60:241-254.:

Springer-Verlag 10.1007/BF02521056
Bollina, M. G. (1970) Surface faulting and related effects: in earthquake engineering. R. L. Wiegel, Editor, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 47-74.
Bolt, B.A. (1999) Earthquake, 4th edition, W.H. Freeman and Company, New York, 366pp.
Bomford, G., (1985) Geodesy, 4th Ed., Oxford University Press.
Brace, W.F., Paulding, B.W.Jr. and Scholz, C. (1966) Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. Journal of Geophysical Research, 71, no. 16, 3939-3953.
Chadha, R. K. and Pandey, A. P. (2003) Search for earthquake precursors in well water levels in a localized seismically active area of Reservoir Triggered Earthquakes in India. Geophysical Research Letters, 30, 1416-1420.
Chang, C.-P., T.-Y. Chang, J. Angelier, H. Kao, J.-C. Lee, and S.-B. Yu (2003), Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system: constraints from GPS observation and tectonic data, Earth Planet Sc Lett, 214(1), 115-127.
Chapman, S., and Lindzen, R.S. (1970) Atmospheric Tides, D. Reidel Publishing, Dordrecht-Holland, 200pp.
Chen, C.H., Wang, C.H., Liu, J.Y., Liu, C., Liang, W.T., Yen, H.Y., Yeh, Y.H., Chia, Y.P., and Wang, Y., (2010) Identification of earthquake signals from groundwater level records using the HHT method. Geophysical Journal International, 180, 1231-1241.
Chen, J.-S. (1978). A Comparative Study Of The Refraction And Reflection Seismic Data Obtained On The Changhua Plain To The Peikang Shelf, Taiwan. Petroleum Geology of Taiwa, No.15.
Chen, W.S., and Wang, Y. (1996) Geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. Geology of Taiwan 7.
Chen, W.-S., C.-C. Yang, I.-C. Yen, L.-S. Lee, K.-J. Lee, H.-C. Yang, H.-C. Chang, Y. Ota, C.-W. Lin, W.-H. Lin, T.-S. Shih and S.-T. Lu (2007) Late Holocene paleoseismicity of the southern part of the Chelungpu Fault in central Taiwan: evidence from the Chushan excavation site. Bull. Seism. Soc. Am., 97(1B), 1–13. doi:10.1785/0120050161
Chen, Y.-G., Y.-W. Chen, W.-S. Chen, J.-F. Zhang, H. Zhao, L.-P. Zhou and S.-H. Li (2003) Preliminary results of long-term slip rates of 1999 earthquake fault by luminescence and radiocarbon dating. Quat. Sci. Rev., 22(10-13), 1213–1221. doi:10.1016/S0277-3791(03)00037-4.
Chen, Y.-G., Y.-T. Kuo, Y.-M. Wu, H.-L. Chen, C.-H. Chang, R.-Y. Chen, P.-W. Lo, K.-E. Ching and J.-C. Lee (2008) New seismogenic source and deep structures revealed by the 1999 Chia-yi earthquake sequence in southwestern Taiwan. Geophys. J. Int., 172(3), 1049-1054.
Chen, Y.W., Chena, Y.G., Murray, A.S., Watanuki, T., Chena, W.S., Yanga, C.C.B., Liua, T.K., Lin, C.W., 2009. Long-term crustal movement caused by the Chiuchiungkeng Fault in southwestern Taiwan: Constraints from luminescence dating
Cheng, C.-T., S.-J. Chiou, C.-T. Lee, and Y.-B. Tsai (2007) Study on probabilistic seismic hazard maps of Taiwan after Chi-Chi earthquake. J. GeoEng., 2, 19–28.
Ching, K.-E., R.-J. Rau, J.-C. Lee, and J.-C. Hu (2007) Contemporary deformation of tectonic escape in SW Taiwan from GPS observations, 1995-2005, Earth Planet. Sci. Lett., 262, 601-619.
Ching, K.-E., R.-J. Rau, K. M. Johnson, J.-C. Lee and J.-C. Hu (2011) Presentday kinematics of active mountain building in Taiwan from GPS observations during 1995–2005. J. Geophys. Res., vol. 116, B09405, doi:10.1029/2010JB008058.
Chiu, H.-T. (1975) Miocene stratigraphy and its relation to the palaeogene rocks in west-central Taiwan. Petrol. Geol. Taiwan, 12, 51-80.
Chou, J.-T. (1971). A Sedimentologic And Paleogeographic Study Of The Neogene Formations In The Taichung Region, Western Taiwan. Petroleum Geology of Taiwan,No.9, 43–66.

Chyi, L. L., Quick, T. J., Yang, T. F., & Chen, C. H. (2005) Soil gas radon spectra and earthquakes. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 16(4), 763-774.
Cooper, H.H. and Jacob, C.E. (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. American Geophysical Union Transactions, 27, 526-534.
Coppersmith, K. J. (1991) Seismic source characterization for engineering seismic hazard analyses. Proceeding Fourth International Conference on Seismic Zonation, Stanford University, 4, 3-60.
Cramer, C. H. (2001) A seismic hazard uncertainty analysis for the New Madrid seismic zone. Eng. Geol., 62, 251-266.
Cramer, C. H., M. D. Petersen and M. S. Reichle (1996) A Monte Carlo approach in estimating uncertainty for a seismic hazard assessment of Los Angeles, Ventura, and Orange counties, California. Bull. Seism. Soc. Am., 86, 1681-1691.
Dach, R., U. Hugentobler, P. Fridez, and M. Meindl (Eds.), 2007, Bernese GPS Software Version 5.0, Astronomical Institute, University of Berne, 612 pp.
Davison, F. C. and C. H. Scholz (1985) Frequency-moment distribution of arthquakes in the Aleutian Arc, A test of the characteristic earthquake model. Bull. Seismo. Soc. Am., 75, 1349-1361.
Dobrovolsky, P., Zubkov, S.I. and Miachkin, V.I. (1979) Estimation of the size of earthquake preparation zones. Pure and Applied Geophysics, 117, 1025-1144.
Dominguez, S. (2003) Horizontal coseismic deformation of the 1999 Chi-Chi earthquake measured from SPOT satellite images: Implications for the seismic cycle along the western foothills of central Taiwan. J. Geophys. Res., 108(B2), 2083. doi:10.1029/2001JB000951
Dreiss, S. J. (1989), Regional scale transport in a karst aquifer: 1. Component separation of spring flow hydrographs, Water Resour Res, 25(1), 117-125.
Ellsworth, W. L., M. V. Matthews, R. M. Nadeau, S. P. Nishenko, P. A. Reasenberg and R. W. Simpson (1999) A physically-based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities. U. S. Geological Survey, OFR 99-522, 23 p.
Esposito, E., Pece, R., Porfido, S. and Tranfaglia, G. (2009) Ground effects and hydrological changes in the Southern Apennines (Italy) in response to the 23 July 1930 earthquake (M-S = 6.7). Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, 539-550.
Etiope, G. and Lombardi, S. (1995) Soil gases as fault tracers in clay basin: a case history in the Siena basin (Central Italy). Gas Geochemistry. Science Reviews, Northwood, 19-29.
Etiope, G. and Martinelli, G. (2002) Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 129, 185-204.
Fu, C.C., Yang, T.F., Walia, V. and Chen, C-H. (2006) Reconnaissance of soil gas composition over the buried fault and fracture zone in southern Taiwan. Geochemical Journal, 39, 427-439.
Fu, C.C., Yang, T.F., Du, J., Walia, V., Chen, Y.G., Liu, T.K. and Chen, C-H. (2008) Variations of helium and radon concentrations in soil gases from an active fault zone in southern Taiwan. Radiation Measurements, 43, 348-352.
Fu, C.C., Yang, T.F., Walia, V., Liu, T.K., Lin, S.J., Chen, C-H. and Hou, C.S. (2009) Variations of soil-gas composition around the active Chihshang Fault in a plate suture zone, eastern Taiwan. Radiation Measurements, 44 (9-10):940-944.
Gau, H.-S., Chen, T.-C., Chen, J.-S. and Liu, C.-W. (2007) Time series decomposition of groundwater level changes in wells due to the Chi-Chi earthquake in Taiwan: a possible hydrological precursor to earthquakes. Hydrological Processes, 21, 510-524.
Gladwin, M.T. (1974) Ultrasonic stress monitoring in active sites: observation of the time dependence of stress relief mechanisms in mining pillars, Eos Trans. AGU, 55, 1192.
Gladwin M.T. (1977) Simultaneous monitoring of stress and strain in massive rock,

Pageoph, 115, 267-274.
Gladwin, M.T. (1982) Ultrasonic stress monitoring in underground mining, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, 221-228.
Gladwin, M.T. (1984) High precision multi component borehole deformation monitoring, Rev. Sci. Instrum., 55, 2011-2016.
Gladwin, M. T. and R. Hart (1985). "Design Parameters for Borehole Strain Instrumentation." Pure and Applied Geophysics 123(1): 59-80.
Gladwin, M.T., Gwyther, R.L., Higbie, J.W. and Hart, R.G. (1991) A medium term precursor to the Loma Prieta earthquake? Geophys. Res. Lett., 18, 1377-1380.
Gutenberg, B., and C. F. Richter (1944) Frequency of earthquake in California. Bull. Seism. Soc. Am., 34, 185-188.
Hanks, T. C. and H. Kanamori (1979) A moment magnitude scale. J. Geophys. Res., 84, 2348-2350.
Hanks, T. C. and W. H. Bakun (2008) M-logA observations for recent large earthquakes. Bull. Seis. Soc. Am., 98(1), 490–494, doi:10.1785/0120070174.
Hart, R. H. G., M. T. Gladwin, R. L. Gwyther, D. C. Agnew, and F. K. Wyatt (1996), Tidal calibration of borehole strain meters: Removing the effects of small-scale inhomogeneity, J Geophys Res-Sol Ea, 101(B11), 25553-25571.
Haubrich, R.A. (1965) Earth noise, 5 to 500 millicycles per second, 1, spectral stationarity, normality and nonlinearity, J. geophys. Res.,70, 1415-1427.
Hauksson, E. (1981) Radon content of groundwater as an earthquake precursor: Evaluation of worldwide data and physical basis. Journal of Geophysical Research, 86, no. B10, 9397-9410.
Healy, J.H. and Urban, T.C. (1985) In situ fluid pressure measurements for earthquake prediction: An example from a deep well at Hi Vista, California. Pure and Applied Geophysics, 122, 255-279.
Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky, (2006) Massachusetts Institute of Technology: GPS Analysis at MIT, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Release 10.3, September 2006.
Hickman, S., Sibson, R., & Bruhn, R. (1995) Introduction to special section: Mechanical involvement of fluids in faulting. Journal of Geophysical Research, 100(B7), 12831-12840.
Hodgkinson, K., J. Langbein, B. Henderson, D. Mencin, and A. Borsa (2013), Tidal calibration of plate boundary observatory borehole strainmeters, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, n/a-n/a.
Hsu, T.L. (1962) Recent faulting in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan. Memoir of the Geological Society of China, 1: 95-102.
Hsu, Y.-J., N. Bechor, P. Segall, S.-B. Yu, L.-C. Kuou and K.-F. Ma (2002) Rapid afterslip following the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake. Geophys. Res. Lett., 29(16), 1754. doi:10.1029/2002GL014967
Hu, J.-C., C.-S. Hou, L.-C. Shen, Y.-C. Chan, R.-F. Chen, C. Huang, R.-J. Rau, K. H.-H. Chen, C.-W. Lin, and M.-H. Huang (2007), Fault activity and lateral extrusion inferred from velocity field revealed by GPS measurements in the Pingtung area of southwestern Taiwan, J Asian Earth Sci, 31(3), 287-302.
Huang, M. H., J. C. Hu, C. S. Hsieh, K. E. Ching, R. J. Rau, E. Pathier, B. Fruneau, and B. Deffontaines (2006), A growing structure near the deformation front in SW Taiwan as deduced from SAR interferometry and geodetic observation, Geophys Res Lett, 33(12).
Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. L. C. Wu, H. H. Shih, Q. N. Zheng, N. C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu (1998) The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,

454(1971), 903-995.
Hung, J. H., D. V. Wiltschko, H. C. Lin, J. B. Hickman, P. Fang, and Y. Bock (1999), Structure and motion of the southwestern Taiwan fold and thrust belt, TAO, 10(3), 543–568.
Hung, J. H. and J. Suppe (2002) Subsurface geometry and kinematics of the Sani-Chelungpu thrust faults. Eos Trans. AGU, 83, 22.
Jacob, C. E. (1963) Correction of drawdown caused by a pumped well tapping less than the full thickness of aquifer, in : Bentall, R. (Editor):Method of
Jan, C.-D., T.-H. Chen, and H.-M. Huang (2011), Analysis of rainfall-induced quick groundwater-level response by using a Kernel function, Paddy and Water Environment, 1-10.
Jenny, S., S. Goes, D. Giardini, and H. G. Kahle (2004), Earthquake recurrence parameters from seismic and geodetic strain rates in the eastern Mediterranean. Geophys. J. Int. 157, 1331-1347.
Ji, C. and D. V. Helmberger (2003) Slip history and dynamic implications of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake. J. Geophys. Res., 108(B9), 2412. doi:10.1029/2002JB001764
Johnson, K. M. and P. Segall (2004) Imaging the ramp–decollement geometry of the Chelungpu fault using coseismic GPS displacements from the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. Tectonophysics, 378, 123–139.
Johnston, M., A. Linde, I. Sacks, and D. Myren (1982), Borehole dilatometer strain array—installation and preliminary results from the Mojave desert, EOS, 63, 430.
Johnston, M.J.S., Linde, A.T., Sacks, I.S. and Myren, D. (1986) Borehole dilatometer strain array- Preliminary results from Mojave Desert, Eos Trans. AGU, 63, 430.
Johnston, M.J.S., Linde, A.T. and Agnew, D.C. (1994) Continuous borehole strain in the San Andreas Fault zone before, during, and after the 28 June 1992, Mw 7.3 Landers, California Earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am., 84, 799-805.
Kagan, Y. Y. and L. Knopoff (1987) Random stress and earthquake statistics; time dependence. Geophys. J. R. Astr. Soc., v. 88, p. 723-731.
Kanamori, H. (1977) The energy release in great earthquakes. J. Geophys. Res., 82, 2981-2987.
Kao, H. and W.-P. Chen (2000) The Chi-Chi earthquake sequence: active, out-of-sequence thrust faulting in Taiwan. Science, 288(5475), 2346–2349, doi:10.1126/science.288.5475.2346.
Kawabe, I. (1985) Anomalous changes of CH4/Ar ratio in subsurface gas bubbles as seismo-geochemical precursors at Matsuyama, Japan. Pure and Applied Geophysics, 122, 194-214.
Keefer, D. L. and S. E. Bodily (1983) Three-point approximations for continuous random variables. Manage. Sci., 29, 595-609.
King, C.Y. (1986) Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview. Journal of Geophysical Research, 91, 12269-12281.
King, C.Y., Azuma, S., Ohno, M., Asai, Y., He, P., Kitagawa, Y., Igarashi, R. and Wakita, H. (2000) In search of earthquake precursors in the water-level data of 16 closely clustered well at Tono, Japan. Geophysical Journal International, 143, 469-477.
King, C.Y., Evans, W.C., Presser, T. and Husk, R. (1981) Anomalous chemical changes in well water and possible relation to earthquakes. Geophysical Research Letters, 8, 425-428.
Koizumi, N., Yoshioka, R. and Kishimoto, Y. (1985) Earthquake prediction by means of change of chemical composition in mineral spring water. Geophysical Research Letters, 12, 510-513.
Kostrov, V. V. (1974), Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rocks. Izv. Acad. Sci. USSR Phys. Solid Earth, 1, 23-40.

Kovach, R.L., Nur, A., Wesson, R.L. and Robinson, R. (1975) Water-level fluctuations and earthquakes on the San Andreas fault zone. Geology, 3,437-440.
Kuo, M.C.T., Fan, K., Kuochen, H. and Chen, W. (2006a) A mechanism for anomalous decline in radon precursory to an earthquake. Ground Water, 44, no. 5, 642-647.
Kuo, T., Fan, K., Kuochen, H., Han, Y., Chu, H. and Lee, Y. (2006b) Anomalous decrease in groundwater radon before the Taiwan M6.8 Chengkung Earthquake. Journal of Environmental Radioactivity, 88, no. 1, 101-106.
Kuo, T., Lin, C., Fan, K., Chang, G., Lewis, C., Han, Y., Wu, Y., Chen, W. and Tsai, C. (2009) Radon anomalies precursory to the 2003 Mw=6.8 Chengkung and 2006 Mw=6.1 Taitung earthquakes in Taiwan. Radiation Measurements, 44, no. 3, 295-299.
Kuo, T., Lin, C., Chang, G., Fan, K., Cheng, W. and Lewis, C. (2010a) Estimation of aseimic crustal-strain using radon Repetitive radon precursors of the 2003 M 6.8, 2006 M 6.1, and 2008 M 5.0 earthquakes in eastern Taiwan. Natural Hazards, 53, no. 2, 219-228.
Kuo, T., Cheng, W., Lin, C., Fan, K., Chang, G. and Yang, T. (2010b) Simultaneous declines in radon and methane precursory to 2008 Mw 5.0 Antung earthquake: corroboration of in-situ volatilization. Natural Hazards, Vol. 54, 367-372.
Kuo, T., Su, C., Chang, C., Lin, C., Cheng, W., Liang, H., Lewis, C. and Chiang, C. (2010c) Application of recurrent radon precursors for forecasting large earthquakes (Mw > 6.0) near Antung, Taiwan. Radiation Measurements, 45, 1049-1054.
Kuo, T., Lin, C., Su, C., Liu, C., Lin, C.H., Chang, C. and Chiang, C. (2011) Correlating recurrent radon precursors with local earthquake magnitude and crust strain near the Chihshang fault of eastern Taiwan. Natural Hazards, 59, 861-869.
Lamar, D. L. and Merifield, P. M. (1979) Water-level monitoring along the San Andreas and San Jacinto faults, southern California, during fiscal year 1979. Lamar-Merifield Tech. Report 79-5, Final Report, U.S. Geological Survey Contract 14-08-0002-17680, 65pp.
Lay, T. and T. C. Wallace (1995) Modern global seismology: Academic Press, San Diego, California, p. 521.
Le Provost, C., M.L. Genco, and F. Lyard (1995) Modeling and predicting the tides over the World Ocean, In Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Studies, D.R. Lynch and A.M. Davies (Eds.), AGU, 175-202.
Lee, J.C., Angelier, J., Chu, H.T., Hu, J.C., Jeng, F.S. and Rau, R.J. (2003) Active fault creep variations at Chihshang, Taiwan, revealed by creep meter monitoring, 1998-2001. Journal of Geophysical Research, 108, no. B11, 2528-2548.
Lee, S.-J., K.-F. Ma and H.-W. Chen (2006) Effects of fault geometry and slip style on near-fault static displacements caused by the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. Earth Planet. Sci. Lett., 241(1-2), 336–350, doi:10.1016/j.epsl.2005.09.064.
Lee, J.-C. and Y.-C. Chan (2007) Structure of the 1999 Chi-Chi earthquake rupture and interaction of thrust faults in the active fold belt of western Taiwan. J. Asian Earth Sci., 31, 226–239.
Lee, Y.-H. and Y.-X. Shih (2011) Coseismic displacement, bilateral rupture, and structural characteristics at the southern end of the 1999 Chi-Chi earthquake rupture, central Taiwan. J. Geophys. Res., 116(B7), B07402, doi:10.1029/2010JB007760.
Igarashi, G. and Wakita, H. (1995) Geochemical and hydrological observations for earthquake prediction in Japan. Journal of physics of the earth, 43, 585-598.
Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M. and Sano, Y. (1995) Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. Science, 269, no. 5220, 60-61.
Igarashi, G., Tohjima, Y. and Wakita, H. (1993) Time-variable response characteristics of groundwater radon to earthquakes. Geophysical Research Letters, 20, no. 17, 1807-1810.
Igarashi, G.; Wakita, H. and Sato, T. (1992) Precursory and coseismic anomalies in well water levels observed for the Februaru 2, 1992 Tokyo Bay earthquake. Geophysical

Research Letters, 19, 1583-1586.
Li, G., Jiang, F., Wang, J. and Zhang, P. (1985) Preliminary results of seismo-geochemical research in China. Pure and Applied Geophysics, 122, 218-230.
Lin, C.-H. (2000) Thermal modeling of continental subduction and exhumation constrained by heat flow and seismicity in Taiwan. Tectonophysics, 324,pp. 189– 201.
Lin, C.W., Hsu, C.Y., Yu, T.D., 2007. The Chiuhsiungken fault: a candidate to trigger a hazardous earthquake in western Taiwan. Journal of Asian Earth Science 30, 390-402.
Liu, C.C., A.T. Linde, and I.S. Sacks. (2009) Slow earthquakes triggered by typhoons, Nature, 459, 833-836.
Liu, K.K., Yui, T.F., Yeh, Y.H., Tsai, Y.B. and Teng, T.L. (1984/85) Variations of radon content in groundwaters and possible correlation with seismic activities in northern Taiwan. Pure and Applied Geophysics, 122, 231-244.
Liu, K.K., Teng, T.L., Hou, T.Y., Yeh, Y.H. and Tsai, Y.B. (1985) Continuous monitoring of radon emanation as an earthquake precursor at two hot springs in northern Taiwan, Preceedings of the ROC-JAPAN Joint Seminar on Mutiple Hazards Mitigation, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC, March.
Loevenbruck, A., R. Cattin, X. Le Pichon, M.-L. Courty, and S.-B. Yu (2001), Seismic cycle in Taiwan derived from GPS measurements, Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science, 333(1), 57-64.
Lyne, V. (1979), Recursive modeling of sluggish and time-varying streamflow responses, M.Eng. Sc. Thesis.
Lyne, V., and M. Hollick (1979), Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling, paper presented at Institute of Engineers Australia National Conference.
Matsu'ura, M., D. D. Jackson, and A. Cheng (1986), Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California. J Geophys. Res., 91(B12), 12661-12674.
Masson, F., J. Chery, D. Hatzfeld, J. Martinod, P. Vernant, F. Tavakoli, and M. Ghafory-Ashtiani (2005), Seismic versus aseismic deformation in Iran inferred from earthquakes and geodetic data. Geophys. J. Int. 160, 217-226.
Matsuda, T. (1975) Magnitude and recurrence interval of earthquakes from a fault associated. J. Seism. Soc. Japan, Series 2, 28, 268-283.
McCalpin, J. P. (1996) Application of paleoseismic data to seismic hazard Assessment and neotectonic research. McCalpin ed. "Paleoseismology", Academic Press, p.439-493.
McCaffrey, R. (2005) Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data. J. Geophys. Res., 110, B07401, doi:10.1029/2004JB003307.
McGuire, R. K. and K. M. Shedlock (1981) Statistical uncertainties in seismic hazard evaluations in the United States. Bull. Seism. Soc. Am., 71, 1287-1308.
Meng, C.Y. (1963) San-I overthrust. Petro. Geol. Taiwan, 2, 1-20.
Merifield, P. M. and Lamar, D. L. (1981) Water-level monitoring along the San Andreas and San Jacinto faults, southern California, during fiscal year 1981. Lamar-Merifield Tech. Report 82-3, Final Report, U. S. Geological Survey Contract 14-08-0002-19253, 78pp.
Miklavcic, I., Radolic, V., Vukovic, B., Poje, M., Varga, M., Stanic, D., et al. (2008) Radon anomaly in soil gas as an earthquake precursor. Applied Radiation and Isotopes, 66(10), 1459-1466.
Mogi, K. (1985) Earthquake Prediction. Academic Press, New York, 355pp.
Munk, W. H. and D. E. Cartwright (1966) Tidal spectroscopy and prediction. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 259, 533–581.
National Research Council (1988) Probabilistic seismic hazard analysis. National Academic Press, Washington, D.C., 97pp.
NOAA (2000) TIDAL DATUMS AND THEIR APPLICATIONS., NOAA Special Publicaation NOS CO-OPS 1.
Noguchi, M. and Wakita, H. (1977) A method for continuous measurement of radon in

groundwater for earthquake prediction. Journal of Geophysical Research, 82, no. 8, 1353-1357.
Oki, Y. and Hiraga, S. (1979) Water level anomalies prior to the Izu-Oshima earthquake, January 14, 1978. Translated from the Japanese by E. Silberman, in Technical Report 79-2, Lamar-Merifield Geologists, Special Technical Report for the U. S. Geological Survey.
Omori, F (1907) Preliminary note on the Formosa earthquake of March 17, 1906. Bull. Imp. Earthquake Investigation Committee, 1(2), 53-69.
Ota, Shyu, B.H., Chen, Y.G., Hsieh, M.L. (2002) Deformation and age of fluvial terraces south of the Choushui River, central Taiwan, and their tectonic implications. Western Pacific Earth Sciences 2, 251–260.
Pacific Gas and Electric Company (PG&E) (1988) Diablo Canyon power plant long term seismic program. Final Report unpublished document.
Pearson, C., J. Beavan, D. Darby, G. Blick, and R. Walcott (1995), Strain distribution across the Australian-Pacific plate boundary in the central South Island, New Zealand, from 1992 GPS and earlier terrestrial observations, Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 100(B11), 22071-22081.
Perez, N. M., Hernandez, P. A., Padron, E., Melian, G., Marrero, R., Padilla, G., et al. (2007) Precursory subsurface Rn-222 and Rn-220 degassing signatures of the 2004 seismic crisis at Tenerife, Canary Islands. Pure and Applied Geophysics, 164(12), 2431-2448.
Petersen, M. D., A. D. Frankel, S. C. Harmsen, C. S. Mueller, K. M. Haller, R. L. Wheeler, R. L. Wesson, Y. Zeng, O. S. Boyd, D. M. Perkins, N. Luco, E. H. Field, C. J. Wills and K. S. Rukstales, (2008) Documentation for the 2008 update of the United States national seismic hazard maps. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008–1128, 61 p.
Rau, R.-J. (2002) Seismicity and fault structures in Taiwan. in APEC Workshop on Active Fault Study, edited.
Roeloffs, E. (1999) Radon and rock deformation. Nature, 399, no. 6732, 104-105.
Sano, Y., Takahata, N., Igarashi, G., Koizumi, N. and Sturchio, N.C. (1998) Helium degassing related to the Kobe earthquake. Chemical Geology, 150, 171-179.
Roeloffs, E. (2005) Long-term trends in borehole strainmeter and tiltmeter data. 2005 Strainmeter and Tiltmeter Course.
Roeloffs, E. (2010), Tidal calibration of Plate Boundary Observatory borehole strainmeters: Roles of vertical and shear coupling, J Geophys Res-Sol Ea, 115, 25.
Roeloffs, E. A. (1988) Hydrologic precursors to earthquakes: A review. Pure and Applied Geophysics, 126, 177-209
Roeloffs, E. A. (1998) Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. Journal of Geophysical Research, 103, 869-889.
Savage, J., and M. Lisowski (1995), Strain accumulation in Owens Valley, California, 1974 to 1988, B Seismol Soc Am, 85(1), 151-158.
Savage, J. C., and R. W. Simpson (1997), Surface strain accumulation and the seismic moment tensor. Bull. Seismol. Soc. Am., 87(5), 1345-1353.
Sawyer, C.N., McCarty, P.L., and Parklin, G.F. (1994) Chemistry for Environmental Engineering. McGraw-Hill, Inc., New York, USA.
Schaffrin, B, Bock Y. (1988) A unified scheme for processing GPS dual-band phase observations. Bulletin géodésique. 62:142-160.: springer-Verlag 10.1007/BF02519222.
Scherer, W.D. (1990) Decomposition of Sea Level Variations: An Approach, National Ocean Service, Oceanography Workshop, unpublished manuscript.
Scholz, C.H., Sykes, L.R. and Aggarwal, Y.P. (1973) Earthquake prediction: A physical basis. Science, 181, no. 4102, 803-810.
Schureman, P. (1941) Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides, Special Publication No. 98 (1940), U.S. Coast and Geodetic Survey, U.S. Govt. Printing Office,

revised ed.
Schwartz, D. P. and K. J. Coppersmith (1984) Fault behavior and characteristic earthquakes: example from the Wasatch and San Andreas Fault zones. J. Geophys. Res., 89, 5681-5698.
Shaw, B. E. (2009) Constant stress drop from small to great earthquakes in magnitude-area scaling. Bull. Seis. Soc. Am., 99(2A), 871–875, doi:10.1785/0120080006.
Shimazaki, K. and T. Nakata (1980) Time-predictable recurrence model for large earthquakes. Geophys. Res. Lett., v. 7, p. 279-282.
Siame L. L., Chen, R.-F., Derrieux, F., Lee, J.-C., Chang, K.-J.,Bourlès, D. L. Braucher, R., Léanni, L., Kang, C.-C., Chang. C.-P., Chu, H.-T. (2012) Pleistocene alluvial deposits dating along frontal thrust of Changhua Fault in western Taiwan: The cosmic ray exposure point of view. J. Asian Earth Sci., 51, 1-20.
Silver, P.G. and Wakita, H. (1996) A search for earthquake precursors. Science, 273, no. 5271, 77-78.
Simoes, M., Avouac, J.-P., Chen, Y.-G., Singhvi, A.K., Wang, C.-Y., Jaiswal, M., Chan, Y.-C., Bernard, S. (2007). Kinematic analysis of the Pakuashan fault tip fold, west central Taiwan: shortening rate and age of folding inception. Journal of Geophysical Research 112, B03S14. doi:10.1029/2005JB004198.
Slemmons, D. B. (1982) Determination of design earthquake magnitudes for microzonation, Proceedings, 3rd International Earthquake Microzonation conference, Seattle, Washington, 1, 119-130.
Sue, C., B. Delacou, J. D. Champagnac, C. Allanic, M. Burkhard (2007), Aseismic deformation in the Alps: GPS vs. seismic strain quantification. Terra Nova, 19, 182-188.
Sugisaki, R. (1978) Changing He/Ar and N2/Ar ratios of fault air may be earthquake precursors. Nature, 275, 209-211.
Sugisaki, R. (1985) Relation between hydrogen emission and seismic activities. Pure and Applied Geophysics, 122, 175-184.
Sugisaki, R., Ito, T., Nagamine, K. and Kawabe, I. (1996) Gas geochemical changes at mineral springs associated with the 1995 southern Hyogo earthquakes (M=7.2), Japan. Earth and Planetary Science Letters, 139, 239-249.
Suppe, J. (1985). Principles of structural geology (p. 537). London: Prentice-Hall.
Suppe, J. (1987) The active Taiwan mountain belt. In: Schaer, J.P.,Rodgers, J. (Eds.), Anatomy of Mountain Chains. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, pp. 277– 293.
Takemoto, S., Yamamoto, T., Mukai, A., Otsuka, S. and Fujimori, K. (2003) Crustal strain observation for nine years with a laser strainmeter in Kobe, Japan. J. Geody., 35, 483-498.
Talwani, P. and Van Nieuwenhuise, R.E. (1980) Water level and geochemical anomalies at Lake Jocassee, South Carolina, EOS. American Geophysical Union Transactions, 61, p.1035.
Tamura, Y.; Sato, T.; Ooe, M.; Ishiguro, M. (1991) A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. In: Geophysical Journal International, No. 104, pp. 507-516. Oxford.
Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe, and M. Ishiguro (1991), A Procedure for Tidal Analysis with a Bayesian Information Criterion, Geophys J Int, 104(3), 507-516.
Teng, T.L. (1980) Some recent studies on groundwater radon content as an earthquake precursor. Journal of Geophysical Research, 85, no. B6, 3089-3099.
Theis, C.V. (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of well using ground-water storage. American Geophysical Union Transactions, 16, 519-524.
Thomas D. (1988) Geochemical Precursors to Seismic Activity. Pageoph 126, no. 2-4, 241-266.

Toutain, J.P. and Baubron, J.C. (1999) Gas geochemistry and seismotectonics: A review. Tectonophysics, 304, 1-24.
Toutain, J.P., Munoz, M., Poitrasson, F. and Lienard, A.C. (1997) Springwater chloride ion anomaly prior to a ML=5.2 Pyrenean earthquake. Earth and Planetary Science Letters, 149, 113-119.
Tsunogai, U. and Wakita, H. (1995) Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, Japan. Science, 269, 61-63.
Tsunogai, U. and Wakita, H. (1996) Anomalous change in groundwater chemistry – possible precursors of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Japan: Journal of physics of the earth, 44, 381-390.
Wakita, H., Igarashi, G. and Notsu, K. (1991) An anomalous radon decrease in groundwater prior to an M6.0 earthquake: A possible precursor? Geophysical Research Letters, 18, no. 4, 629-632.
Wakita, H., Nakamura, Y., Notsu, K., Noguchi, M. and Asada, T. (1980) Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai earthquake. Science, 207, no. 4433, 882-883.
Walia, V., Su, T. C., Fu, C. C. and Yang, T. F. (2005) Spatial variations of radon and helium concentrations in soil gas across Shan-Chaio fault, Northern Taiwan. Radiation Measurements, 40, 513–516.
Walia, V., Yang, T. F., Hong, W.L., Lin, S.J., Fu, C.C., Wen, K.L., et al. (2009) Geochemical variation of soil-gas composition for fault trace and earthquake precursory studies along the Hsincheng fault in NW Taiwan. Applied Radiation and Isotopes, 67(10), 1855-1863.
Wallace, R. E. (1970) Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. Geol. Soc. Am. Bull., 81, 2875-2889.
Wallace, R.E. and Teng, T.-L. (1980) Prediction of the Sungpan-Pingwu earthquakes, August 1976. Bulletin of the Seismological Society of America, 70, 1199-1223.
Wang, C. (1985) Ground-water studies for earthquake prediction in China. Pure and Applied Geophysics, 122, 215-217.
Wang, C.-Y., C.-L. Li, F.-C. Su, M.-T. Leu, M.-S. Wu, S.-H. Lai and C.-C. Chern (2002) Structural mapping of the 1999 ChiChi earthquake fault, Taiwan, by seismic reflection methods. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 13, 211–226.
Ward, S. N. (1998a), On the consistency of earthquake moment rates, geological fault data, and space geodetic strain: The United States. Geophys. J. Int., 134, 172-186.
Ward, S. N. (1998b), On the consistency of earthquake moment release and space geodetic strain rates: Europe. Geophys. J. Int., 135, 1011-1018.
Weigel, F. (1978) Radon. Chemiker Zeitung, 102, 287-299.
Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seis. Soc. Am., 84, 974-1002.
Wesnousky, S. G. (1994) The Gutenberg-Richter or characteristic earthquake distribution, Which Is It? Bull. Seismo. Soc. Am., 84, 1940-1959.
Working Group on California Earthquake Probabilities (1995) Seismic hazards in southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024. Bull. Seism. Soc. Am., 85, 379–439.
Working Group on California Earthquake Probabilities (2003) Earthquake probabilities in the San Francisco Bay region: 2002-2031.USGS Open-File Report 03-214.
Working Group on California Earthquake Probabilities 2007 (2008) The uniform California earthquake rupture forecast, Version 2. USGS Open-File Report 07-1437.
Yang, K.-M., S.-T. Huang, J.-C. Wu, H.-H. Ting, W.-W. Mei, M. Lee, H.-H. Hsu and C.-J. Lee (2007) 3D Geometry of the Chelungpu thrust system in central Taiwan: Its implications for active tectonics. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 18(2), 143–181.
Yang, T.F., Walia, V., Chyi, L.L., Fu, C.C., Chen, C.H., Liu, T.K., Song, S.R., Lee, C.Y. and

Lee, M. (2005) Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan. Radiation Measurements, 40, 496-502.
Yen, Y.-T. and K.-F. Ma (2011) Source-scaling relationship for M 4.6–8.9 earthquakes, specifically for earthquakes in the collision zone of Taiwan. Bull. Seismol. Soc. Am., 101(2), 464–481.
Yu, S.B. and Kuo, L.C. (2001) Present-day crustal motion along the Longitudinal Valley Fault, eastern Taiwan. Tectonophysics, 333, 199-217.
Yu, S. B. and H.Y. Chen (1998) Strain accumulation in southwestern Taiwan: TAO, 9, 31-50.
Yu, S.B., Jackson, D.D., Yu, G.K. and Liu, C.C. (1990) Dislocation model for crustal deformation in the Longitudinal Valley area, eastern Taiwan. Tectonophysics, 183, 97-109.
Yu, S.-B., L.-C. Kuo, Y.-J. Hsu, H.-H. Su, C.-C. Liu, C.-S. Hou, J.-F. Lee, T.-C. Lai, C.-C. Liu, C.-L. Liu, T.-F. Tseng, C.-S. Tsai and T.-C. Shin (2001) Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. Bull. Seism. Soc. Am.91, 995-1012 (SCI).
Youngs, R. R. and K. J. Coppersmith (1985) Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates. Bull. Seism. Soc. Am., 75, 939-964.
Yue, L.-F., J. Suppe and J.-H. Hung (2005) Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan (Mw=7.6). J. Struct. Geol., 27, 2058–2083.
Yue L. F., Suppe, J., Hung, J. H. (2009) Two contrasting kinematics styles of active folding above thrust ramps, western Taiwan. In: McKlay, K., Shaw, J., Suppe, J. (Eds.), Thrust Fault-related Folding. American Association of Petroleum Geologists Memoir 94, pp. 1-34.
Yue, Li-Fan, John Suppe, and Jih-Hao Hung (2011) Two contrasting kinematic styles of active folding above thrust ramps, western Taiwan, in K. McClay, J. H. Shaw, and J. Suppe, eds., Thrust fault-related folding: AAPG Memoir 94, p.153–186.
Zadro, M., Plenizio, E., Ebblin, C. and Chiaruttini, C. (1988) Influence of groundwater table level variations and of rainfall on tilting in the Friuli area, NE, Italy. Acta Geophysica Polonica, 35, 323-338.
Zhang, X., & Sanderson, D. J. (1996) Numerical modelling of the effects of fault slip on fluid flow around extensional faults. Journal of Structural Geology, 18(1), 109-119.

委員審查意見

期初委員審查意見

期初審查意見	處理情形
1. 各觀測站站名、屬性資料與計畫構想書不相同部份，請再查對後修正。	遵照辦理。詳見第 3 頁至第 6 頁，表 3.1 至表 3.5。
2. 圖 4.1(p.71)是否應使用彩色以配合圖說內容，並請一併修正其他類似問題。	圖說已修正。詳見第 71 頁。
3. p.123~124 預期進度甘梯圖所列第 9 月(12 月份)工作分配是否合宜請再檢討。	遵照辦理。已修正工作分配，詳見第 122 頁至第 123 頁。
4. 文中參考文獻漏列部份請再予以補強。	遵照辦理。已增修參考文獻。詳見第 7 頁至第 121 頁。
5. 分年、分區進行之工作項目（PS-InSAR 雷達影像分析、斷層活動潛勢分析等）請加強說明整體規劃；全臺 33 條活動斷層參數表彙整及斷層活動潛勢評估並請逐年檢討更新。	遵照辦理。已逐年說明分區規劃。詳見第 20 頁至第 26 頁，以及第 64 頁至第 69 頁。
6. 新竹地區雙溪地下水觀測站因用地問題已於 2012 年 9 月後撤站，水壓計請移至新竹地區洗井復舊後之觀測井繼續接收觀測資料；請配合修改服務建議書內容。	遵照辦理。已於服務建議書中刪除新竹地區雙溪地下水觀測站。詳見第三章與第四章內文。
7. p.68 有關(4)地球化學與地下水觀測資料分析：於苗栗台中地區土壤氣調查結果並評估適合設站位址，重複列於 c 及 i。	遵照辦理。已刪除(4)地球化學與地下水觀測資料分析之第 i 項。詳見第 68 頁。
8. p.138 井下應變儀時頻分析及資料庫更新請列明估算方法及明細。	遵照辦理。已增加井下應變儀時頻分析估算方法及明細，詳見第 137 頁。
9. p.138 項目 16.維護費部份請列明估算方法及明細，並列出各設備原始成本。	遵照辦理。已增列維護費之估算方法與明細，以及各設備原始成本，詳見第 137 頁至第 138 頁。

期中委員審查意見

期中審查意見	處理情形
(一) 報告書整體	
1. 第一冊<總論>僅重覆各冊部份資料，並無綜合比較與整合解釋，使各研究整合之必要性不易彰顯。	感謝委員意見，期末報告改撰寫成一冊，站位基本資料、研究原理、基礎成果及相似表單放至附錄呈現。
2. 各冊與各章節之關係較為混亂應予調整（例如第五章為第四冊，第六章為第三冊）。	感謝委員意見，期末報告改撰寫成一冊，站位基本資料、研究原理、基礎成果及相似表單放至附錄呈現。
3. <總論>之內容需再精簡，建議提供足夠且必要之資訊即可。非必要或中間成果，如第四章之 PSI 成果，可放在附冊，此處僅標註即可。	遵照辦理。
4. 本計畫所提供資訊相當重要，如何提供學界使用相當重要。	感謝委員意見，盡最大努力配合地調所辦理。
5. 綜合彙整活動斷層的相關觀測結果，確實是一不容易的工作，相關工作目前已進行至第三階段，在任一年度的期中及期末報告中，常常以分段式報告，缺乏大架構下第三階段的每一年度目標及進度總體比較。建議在期中及期末報告皆有一整體各年度時程規劃目標及進度比較。	遵照辦理。詳見表 A。
6. 降雨形成地面水、土壤水、非受壓（unconfined）地下水，最後一部份成受壓（confined）地下水，依次進展完成之時程可短可長。其過程包括由純垂直荷重到等向性之水壓，或二者併存。荷重對地層造成加壓，水壓則造成解壓，引起地層壓縮或伸張。因此降雨資料、地下水位資料、連續 GPS 高程觀測資料、井下應變資料宜聯合解析。	在今年的分析成果中，有數項是針對此問題在研究，降雨的影響也用統計模式分析，證實會有兩個不同時期的重力影響，下一步將估計這影響量的大小，會與氣壓的影響做比較，以確認二者有相同的重力(荷重)效應，如此，就可在分析地下水壓的影響時，可將荷重與孔隙水壓效應分離。
7. 建議期末報告書能將五冊報告書彙整為一冊，部份資料如相似的表單可列印一部份，其餘置於電子檔內以節省篇幅。	感謝委員意見，期末報告改撰寫成一冊，站位基本資料、研究原理、基礎成果及相似表單放至附錄呈現。
8. 報告書文字、圖表誤植者(另附)，請於期末報告書中修正（若有使用於期末報告書）。	遵照辦理。
(二) 斷層活動性觀測	
1. GPS 及水準測量部份宜加強複核計畫外之相關成果，尤其是 PSInSAR 於恆春斷層觀	由於觀測資料之不同，需待恆春地區 PSInSAR 觀測資料之 line of sight 與絕對

期中審查意見	處理情形
測結果，整條水準測線之觀測結果請在期末報告內呈現。	座標之轉換完成，即可與精密水準資料進行比對。
2. GPS 追蹤站需整合並處理本所設置 71 個(包含後續新增)及與其它單位交換(視實際交換所得資料而定)之 GPS 連續觀測站資料，進行資料檢核及坐標解算，期末報告書應有所有站的分析結果，並請自各站起始接收時間進行分析。	遵照辦理。目前已將 2013 年所有測站(包含其他單位交換站)之 GPS 連續觀測站資料，進行資料檢核及座標解算，並扣除同震位移、更換天線等因素，以得到震間平均速度場，詳見附錄 3-2。2013 年以前資料目前正在進行中，預計期末報告將能完整呈現。
3. 建議將 GPS 移動站、GPS 連續站及水準點之位移場、應變場、滑移速率等相關解算成果以列表形式呈現，表中並需加入點位坐標、觀測起始時間、各分量滑移速率及精度資料等，以增進計畫成果的可用性。	遵照辦理。詳見附錄 2-1、2-2 及 3-2。
4. 有關 2013 年 0602 地震經氣象局重定位後規模已修正為 6.5、深度為 14.5km，請使用最新結果。	遵照辦理。
5. 應變儀、水位儀、地下水取樣井等基本資料包括現地地形、位置、地層柱狀圖、儀器安裝及完成之結構、儀器解析度等宜加以蒐集整理，並納入報告中。	詳見附錄 1-2 及附錄 1-3。
6. 井下應變儀的觀測結果影響因素複雜，尤其達邦測站之結果顯示應變量深受降雨因素影響。井下應變儀用於斷層觀測的適用性可能需要再檢討，建議增加井下應力監測，以彌補應變監測之不足。	井下應變儀係一靈敏度相當高的應變監測儀器，也因此在一環境影響因子相對複雜的地區，監測目標的反應如果相對較小於其他環境變化的反應時，對於要實踐研究目的的確有一定的困難度。此時，如何更仔細的定性紀錄中所含括的環境影響因子與定量環境因子影響的物理機制就是實踐原來研究目的的一個重要手段。當能夠更精確的移除環境影響的反應之後，監測目標(斷層活動監測)的反應理論上會更加的清楚。目前儀器深埋在井下 200 多公尺，並用水泥填充，無法再增設井下應力監測，也不建議在附近重新鑽井設置應力監測，因為新鑽之井孔本身會有井孔回復的體積改變，會造成應變儀一長期的指數函數的應變變化。
7. 有關井下應變儀運作異常的維護及修正建議，如何能有效排除現有的異常狀況？	建議在下一次原廠來維修時，考慮將記錄器換用標準的商用記錄器，最好與地震儀紀錄器相同，然後將井下儀器的接頭端每一條線都分列清楚，如此才能一勞永逸。

期中審查意見	處理情形
8. 應變異常的分析，目前已累積近八年的資料，在資料修正如降水、潮汐等因子應已成熟，對於應變異常的定義，屬於同震應變或前兆應有名詞上使用的不同。土壤及氣體累積多年經驗，其原則的判定已有一定的規範，應變異常的判定方式，希望如氣體觀測定義出規範，才能有效判斷同震或前兆訊息。	感謝委員建議，目前研究對於台灣所架設之GTSM 井下應變儀所受到的環境影響因子逐漸了解，但仍有些不明確的地方有待進一步研究，如應變儀中地潮反應大小的差距、氣壓在應變儀中反應大小的差距，理論上各測站應該要接近，就算埋設地點岩性有差異，也不應有太大的差別，但實際上應變儀的數值卻有所不同，如何對應變儀的絕對值做校正，可能是目前階段重要的工作，進一步才能有效判定地震相關的前兆訊號。
9. 氣壓與井內地下水位之相關性有無可用來判定地下水受壓或非受壓之屬性。有時尚可用來估計地層架構之彈性壓縮量與應力變化量之比值參數，有助應變儀資料之分析解釋。	地下水受壓屬性方面，確實可由地下水位與氣壓之間的連動關係來推判，但與水壓計的型態也有很大的關係。一般而言平衡式水壓計(具有與大氣連通的氣管)較容易判斷水層的封閉性，當量測非封閉含水層時，水位讀數將不受到氣壓影響，而封閉的含水層中，水位的上下變動會與氣壓相反，氣壓影響水位變化量的比值越接近 1，表示水層封閉性越完整，本計畫中，嘉義的沄水觀測站即為封閉性良好的水層範例。
10. 地下水位觀測在新樂站有發現震前地下水位下降達 40~50 公分的現象，建議加強說明該井地下水位的長期變動情形及該水位變動有無受其他事件之影響。	新樂站 2008 年 12 月以來的資料，快速的水位變化絕大多數都是受到驟雨影響而上升，其升高幅度可達 5 公尺，並且在雨停後一到二日內恢復至原水位面。新樂站突發性水位下降的情況，在這四年間共發生三次，一在 2012 年 1 月，降幅 15 公分，無對應地震；二為 2012 年 2 月，降幅 55 公分，對應到同年 2 月 26 日的霧台地震；三為 2013 年 3 月，降幅 40 公分，對應到今年 3 月 27 日的南投地震。
11. 各觀測站宜增列較完整的水文及地質背景資料。	詳見附錄 1-1~1-6。
12. 本計畫觀測期間是否出現異常及其相關分析，建議定期彙整資訊電郵給審查委員、計畫參與人員、主辦單位及國科會參考。	遵照辦理。
(三) 斷層活動潛勢分析	
1. 活動斷層潛勢評估之流程與架構未於報告書中呈現，期末報告應加強。	活動斷層潛勢評估之流程、架構及方法論在期末報告中將以附錄方式附於報告書之後以供參考。

期中審查意見	處理情形
2. 報告書之梅山斷層參數表，依據目前推估斷層長度所計算出的最大可能地震規模最大僅 6.9，小於 1906 年地震之規模 7.1，能否考慮如何涵蓋已發生的事件？	本計畫梅山斷層邏輯樹中若考慮長度 35 公里，深度 15 公里及傾角 70 度之分支，從尺度-規模經驗式中可推得地震矩規模 7.0 之地震，換算成芮氏規模則為 7.1，因此在邏輯樹中已涵蓋規模 7.1 之可能性。
3. 有關車籠埔斷層與大茅埔-雙冬斷層加入權重計算而得之活動機率請再確認是否正確。	車籠埔斷層是根據槽溝古地震事件決定其權重分配；大茅埔-雙冬斷層則是以各分段發生規模 6.5 以上之可能性進行權重分配。
4. 有關活動斷層潛勢分析部份，報告標示了以 2013 年為基準之活動斷層未來 30 年、50 年及 100 年發生地震之機率，若以近年規模較大的地震為例，1999 年的集集地震及 2003 年成功地震發生後，對相鄰的活動斷層發生地震機率是否有影響，如何評估其影響？請加以說明。	大規模地震發生後，對於誘發地震之活動斷層本身需重新以機率密度函數計算其發生機率，另外對於鄰近斷層的影響，則需利用庫倫應力轉換方式，可考慮加入詹忠翰的研究或是加入 GPS 資料應用在潛勢評估中。
5. 本計畫在評估潛勢部份較缺乏由斷層開挖定年或地形面定年的長期滑移速率資料，在此狀況下，短時間內仍以專家會議方式做評估較為有效；長期方面則要加強斷層開挖定年及地形面定年工作，以取得此等關鍵資料。	感謝委員意見，本計畫在進行潛勢評估時，對於缺乏由斷層開挖定年或地形面定年的長期滑移速率資料，會提出建議需加強開挖定年及地形面定年工作之斷層。

期末委員審查意見

期末審查意見	處理情形
(一) 報告書整體	
1. 第 1 頁第 6 行「地球化學觀測站」建議加入觀測站數量。	遵照辦理。
2. 第 12 頁第 2 段第 1 行「全臺已設置了 77 座 GPS 連續站」應為「地調所在全臺已設置了 77 座 GPS 連續站」。	感謝委員指正，已修正。
3. 第 27 頁最後一段提及觸口斷層之鎖定深度為 0.4±0.3km，請考量如此淺的深度是否合理？	本年度斷層參數已由中興工程顧問社完成解算，已修正本文內容。
4. 第 34 頁最後一段文字與第 37 頁第 3 段文字重複，請修正。	感謝委員指正，已修正。
5. 第 41 頁表 1-4.3 有關車籠埔斷層 30 年機率欄位之數字「31.6%」，圖 1-4.20 中為「1.6%」；池上斷層 30 年機率欄位之數字「336.3%」，圖 1-4.20 中為「36.3%」，請修正。	感謝委員指正，已修正。
6. 第 70 頁 2-2-9 苗栗至南庄測線描述「水準垂直速度在±4mm/yr 之間」與圖 2-2.10 顯示之數值不符，請修正。	感謝委員指正，已修正。
7. 第 75 頁圖 2-2.15 左下圖中大尖山斷層代號為「TASF」，圖說為「TASA」，請統一。	感謝委員指正，已修正。
8. 第 76 頁第 4 行「5 公里內有達-10mm/yr 的垂直抬升速度」，既為抬升為何為負值？請確認。	感謝委員指正，已修正。
9. 第 79 頁圖 2-2.20 圖說「CTKF 為古亭坑斷層」是否為「GTKF」。	感謝委員指正，已修正。
10. 第 80 頁第 4 行「G533 至 G536，；…」刪除「，」。	感謝委員指正，已修正。
11. 第 81 頁圖 2-2.23 圖說「CCAF 為七佳背斜」應刪除「F」。	感謝委員指正，已修正。
12. 第 89-91 頁圖 2-2.31 至圖 2-2.35 圖說「CLP 為車籠埔斷層」，但圖上皆標示為「CLPF」，請確認。	感謝委員指正，已修正。
13. 第 97 頁圖 2-3.3 圖名應為水平速度場，並請修正相關說明。	感謝委員指正，已修正。
14. 第 105 頁第 2 段第 3 行「北港連續站（PKGM）」，圖 3.1 中顯示為「PLGM」，	感謝委員指正，已修正。

期末審查意見	處理情形
請修正。	
15. 第 106 頁圖 3.2 缺圖例，圖中紅色線條為斷層線，但部分斷層出現某一段卻顯示數條不同線段（ex.山腳、獅潭、雙冬、觸口等斷層），請確認資料內容。	感謝委員指正，已修正。
16. 第 120 頁第 1 段第 4 行「車籠埔斷層之間」是否為「三義斷層」之誤，請確認。	感謝委員指正，已確認並修正。
17. 第 123 頁第 1 段第 2 及 3 行、第 126 頁第 3 及 5 行「車籠埔斷層之間」、「車籠埔斷層以東」，是否為「三義斷層」之誤，請確認。	感謝委員指正，已確認並修正。
18. 第 125 頁第 3 行及第 128 頁第 4 行「大都數 GPS 站」應為「大多數」。	感謝委員指正，已修正。
19. 第 130 頁 4-2-4-4 一節內容描述與 4-2-4-3 節完全重複，請更正。	感謝委員指正，已修正。
20. 第 170 頁第 2 行「永興社區等路頭」應為「露頭」。	感謝委員指正，已修正。
21. 第 196 頁圖 5-8.1 圖說「紅色實線表示地調所 2010 公布之活斷層，紅色虛線表示存疑性斷層」，目前最新版的活動斷層圖為 2012 年版，相關資訊請更新，圖中紅線都是活動斷層，惟虛線顯示為推測或隱伏部分，建議修正相關描述。	已經將斷層分布圖改成 2012 年公布的版本。
22. 第 197 頁第 2 段第 3 行「塊體 TAST 及 EKSH 有相對小的角速度值，但其內的 GPS 測站卻有著相對高的西北西向水平速度（多位於車籠埔—大尖山—觸口斷層以西）」，但圖中顯示塊體 TAST 及 EKSH 皆位於車籠埔—大尖山—觸口斷層以東，請確認相關敘述。	中興團隊請回覆因為修改過的塊體模型只有 EKSH 誤差值相對較大所以把 TAST 刪掉，也把位於車籠埔—大尖山—觸口斷層以西改成以東。
23. 第 222 頁科羅莎颱風一節第 6 行「10/9 為氣壓最低與累積雨量達最大值之時」，但圖 6-2.4 與圖 6-2.5 中顯示氣壓最低、雨量最大及時頻圖出現山形變化的時間皆非 10/9，請確認相關描述。	感謝委員指正，10/9 已更正為 10/6。
24. 第 224 頁第 2 行「地震深度 5 公里」，有關甲仙地震的深度經氣象局人工定位後將深度修正為 22.64 公里，請修正。	感謝委員指正，已將地震深度 5 公里修正為 22.64 公里。
25. 第 304 頁圖 7-2.20 圖說「粉紅框表示氡氣	感謝委員指正，已修正。

期末審查意見	處理情形
變化受到電瓶電力不足的影響」，但圖中未見粉紅框，請增補。	
26. 第 307 頁第 3 段「皆已頃斜」應為「傾斜」。	感謝委員指正，已修正。
27. 第 344 頁至 346 頁圖 7-3.5 至圖 7-3.7 圖說提及「圖中虛線」或「圖中虛線圓圈」，但圖上皆未標示，請增補。	感謝委員指正，已修正。
28. 第 355 頁第 3 段第 2 行提及「圖上圓圈為未修正前疑為異常者」但圖上未見標示，請增補。	感謝委員指正，已修正。
29. 第 377 頁第 4 行「但這三起地震發生在一個月內」應該是指 3/7 與 3/27「二起」地震。	感謝委員指正，已修正。
30. 有關 2013 年 0327 地震及 0602 地震經氣象局重定位後，地震深度及規模已作修正（ML6.2、D19.4km 及 ML6.5、D14.5km），報告有些部分已修正但部分內容並未修正（ex. xxvi、xxviii、p216、p309、p332、p362 等頁），請再確認後修正。	感謝委員指正，已修正。
31. 報告書內圖片應同時繳交解析度優於 300dpi 的圖檔或向量檔，以利引用或彙整報告書內容時使用。	遵照辦理。
32. 報告書內專有名詞如慢地震、長微地震及滑移虧損率等應加入英文原詞彙輔助表示，供閱讀者查對。	遵照辦理。
33. 引用的參考文獻請再仔細核對避免格式及內容上的錯誤。	遵照辦理。
34. 本計畫包含許多工作項目，各工作間之互補及相對關係十分複雜，建議明確標出各項目、各階段與各年度之工作內容、目標及相互之關係與比較。	請詳見章節 1-1 p.10 ~ p.11。
35. 建議水準測線剖面應標明端點位置及方向。	感謝委員建議，已標註。
36. 請說明第四章 PS-InSAR 與水準資料比較之剖面圖所使用之高程剖面是否為真實地形？並應標示各圖所繪地下構造名稱。	感謝委員指正，已修正。
37. 圖 4-2.11 及 4-2.16 衛星影像干涉結果顏色使用上不易閱讀（皆為紅色），請調整適當的色階。	感謝委員指正，已修正。

期末審查意見	處理情形
38. 建議圖 1-1.1 觀測站的圖例與顏色應與底圖區隔，避免使用相近的顏色。	感謝委員指正，已修正。
39. 報告書 1-2-7 活動斷層發生潛勢圖建置一節建議加入臺灣的例子與描述。	本計畫臺灣的方法請參閱[附錄 5-1] 活動斷層地震潛勢評估方法論。
(二) 斷層活動性觀測	
1. 本計畫審核測量公司 GPS 測量及水準測量之成果，宜儘早提出並預留超出規範值時需進行重新測量的時間。	遵照辦理。
2. 建議將 GPS 連續觀測站觀測結果是否出現異常及其相關分析，定期彙整資訊電郵給審查委員、計畫參與人員、主辦單位及國科會參考。	由於本年度為第一年使用 Gamit 解算 GPS 資料，目前正試著找出每一個測站的時間序列分佈狀態，以及釐清造成其觀測異常的因子。考慮資料提供時間以及區域性地滑或天線更換周期頻率，建議初期以季報告方式彙整，電郵給審查委員、計畫參與人員、主辦單位及國科會參考，待大致測站異常區間定義之後，再試著將季報縮短為月報以提供參考。
3. 建議 GPS 觀測結果各種圖中皆應說明觀測的起迄時間。	遵照辦理。
4. 請加強說明觀測到異常現象之位置與現地異常地點距離上有差異的原因。	一個斷層的應力累積在空間分佈是連續的，在地震發生時的破裂區域只是應力累積超過岩石強度的區域，而未破裂的區域在地震前、中、後也都會有應力的變化，地下水與地球化學的監測都是檢驗岩石應力變化所產生的水壓或釋放氣體濃度的改變來判斷是否有異常，GPS 與井下應變儀則是檢驗岩石應力所產生的應變，所以所有的檢測方法都未必要侷限在斷層破裂的區域，至於可以在多大的區域檢驗出異常，則決定在儀器的敏感度與異常的特性，地下水與氣體都有較大的流動性，一般都認為會有較大的敏感區域，且地化異常的時間持續越長，相關的地震事件距離測站通常比較遠且規模較大，代表該地地震事件影響的範圍較廣；反之，規模小且距離測站近，其地化異常持續時間也較短。而井下應變儀的精度較高，可以檢測到一個 ppb 的應變，若不是環境因素所產生雜訊的影響，應該對於大於規模六的地震，在台灣任何一地方都可以感應到其應變，所以在本計畫中，花費很多時間在檢驗環境的影響因素，試圖在擴大敏感區域的範

期末審查意見	處理情形
	圍。這一次南投地震，在嘉義地區所觀測到的異常，值得嘗試去觀察其關聯性。
5. 第 386 頁(3)節第 6 點提及沄水站有氣體逸出，會影響地下水位觀測，建議未來改為地下水溶解氣觀測站，是否已有初步想法與規劃？請予以補充說明。	目前完成該站之水體溶解氣初步分析，正規畫設計中。同時，由於中崙土壤氣體觀測站有崩塌之虞，建議未來沄水站改為中崙站之遷站候選區之一。
6. 當大氣壓力上升時，地下水壓力也會跟著上升，請加強說明本計畫觀測站所觀測到的此二者間的關係，若有不一致的情形也請詳加說明原因並予以討論。	地下水受壓屬性方面，確實可由地下水位與氣壓之間的連動關係來推判，但與水壓計的型態也有很大的關係。一般而言平衡式水壓計(具有與大氣連通的氣管)較容易判斷水層的封閉性，當量測非封閉含水層時，水位讀數將不受到氣壓影響，而封閉的含水層中，水位的上下變動會與氣壓相反，氣壓影響水位變化量的比值越接近 1，表示水層封閉性越完整，本計畫中，嘉義的沄水觀測站即為封閉性良好的水層範例。
(三) 斷層活動潛勢分析	
1. 請說明活動斷層潛勢評估中，斷層傾角與面積如何定義。	請參閱[附錄 5-1] 活動斷層地震潛勢評估方法論中 5-1-2 節之相關敘述。
2. 建議加入為何第一年選擇中部地區 7 條斷層進行分析的描述以及四年分區規劃的說明與討論。	已補充於章節 1-1 p.10 ~ p.11。
3. 建議加強塊體模型深部控制的討論。	目前塊體模型的斷層幾何形貌是根據相關地質及地震證據而設定的，但未必是最好的控制資料。例如斷層的震間潛移有可能發生在較深部的塑性下部地殼，而不是在溫度與壓力都相對低的脆性上部地殼。未來研究會改變模型的斷層幾何，將可能發生滑移虧損(slip deficit)的斷層合理的往深部延展，並考慮不同深度斷層的傾角變化效應（listric fault effect）。
4. 在長、短期滑移速率推估中，是否有活動紀錄的斷層（例如車籠埔斷層），其槽溝開挖古地震定年結果可與塊體模型結果進行比較。	說明及討論補充於第九章第二節中。
5. 報告書 5-8 斷層面滑移虧損率評估一節內容過於簡略，圖 5-8.6 內文未予描述及說明，建議應針對其基本假設、材料性質及邊界條件等詳細說明，亦應說明由滑移虧	已加入有關圖 5-8.6 的解釋在文字中，並針對塊體模型的基本假設及邊界條件限制進行補充說明（主要在 5-8-1 節）。滑移虧損率(slip deficit rate)與地震潛勢分析結果的比較也在

期末審查意見	處理情形
損率推估的地震發生潛勢結果，是否與其他方法推估的結果相近。	9-2 節中有所討論。
6. 圖 2-1.3 顯示臺灣西南部可能有三條構造線（觸口斷層、九芎坑-木屐寮-六甲斷層及西部平原下伏之盲斷層）有鎖住的情形，應加以探討並反應在斷層潛勢評估內。	本計畫會逐步建立西南部地區塊體模型探討活動斷層之行為模式。
7. 第 147 頁表 5-2.1 有關梅山斷層最後一次活動時間列出「1792」，因該次地震並未證實與梅山斷層有關，且有學者認為該地震與大尖山斷層或彰化斷層相關（陳文山等，2002），建議保留一些彈性。	西元1792年地震仍有部分學者認為與梅山斷層相關，本計畫不排除所有歷史地震之可能性，列出 1792 地震僅提供作為參考，實際評估則以 1906 年作為最近一次活動時間。
8. 第 164 頁表 5-4.3 有關彰化斷層最近一次活動時間，列出 2 筆資料（29230 年至 34390 年前、西元 1845 年？），但第 167 頁計算未來發生機率時就明指最後一次發生時間為西元 1845 年。若已確認 1845 年即為最後一次活動時間，則建議修正表 5-4.3 內容；若僅推測西元 1845 年地震可能與彰化斷層有關，則建議修正第 167 頁計算過程之相關敘述，或增加 Poisson 模式進行評估後做二者之比較。	西元 1845 年為歷史典籍記載之地震，而 29230 年至 34390 年前則為根據野外露頭定年所獲得之結果，本計畫同時列出此兩種方法所得研究結果以供參考比較。本計畫會針對彰化斷層增加 Poisson 模式進行評估比較。
9. 有關斷層活動潛勢機率計算部分，建議增加背景說明、使用限制及活動機率代表意義之較詳盡說明，以免資料遭誤解或誤用。	已補充於 5-9 節的圖說中。