

「斷層活動性觀測研究第二階段- 斷層活動性之地球化學觀測與研究(4/4)」

主管單位：經濟部中央地質調查所

楊燦堯¹、劉聰桂¹、郭明錦²、傅慶州¹、吳國維¹、
莊松棧¹、吳承穎¹、林純玉²、蘇建元²、陳逸群²、
許逸惠²、王文良²、鄭羽辰²、梁卉昀²、林雨璇²、王信堯²

¹國立台灣大學地質學系

²國立成功大學資源工程系

摘要

選擇位於斷層帶附近的適當位置，設置氣體地球化學與水壓遠端傳輸觀測站，配合鄰近地區之地殼活動觀測資料，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。

本計畫持續觀測既有的氣體觀測站，新竹大平地測站對於臺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、嘉義中崙站則對於臺灣西南部及東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；臺東池上站之土壤氬氣氣體成份則與臺東及花蓮南部附近的地震活動有很顯著的關連性。

本年度分析 2011 年 12 至 2012 年 11 月間地下水觀測井內之地下水壓變化，主要研究結果如下：(1) 台北觀測站對於東部與北部地震較為敏感，然而今年水位資料狀況較差，觀察出的異常反應也較往年減少。(2) 新竹地區觀測井，新樂站有較佳的地下水壓震前異常反應，震央大多分布於新竹地區、台灣東部地區以及一起台灣南部之地震（霧台地震）。(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外海。嘉義地區之觀測井中，目前僅沄水站順利運作，其他站點之水位計都已故障。

2009 年 3 月至 2012 年 11 月計畫執行期間，花東縱谷南段未發生強震 ($M_w > 6.0$)，安通站監測井中地下水水氬及地下水溶解氣體（甲烷及氮氣）濃度未觀測到異常之變化。墾丁公園社頂站在 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，皆觀測到地下水水氬及地下水溶解氣體（二氧化碳）異常下降之現象。

將連續觀測資料利用不同的時序分析方法進行處理，如：經驗模態分解(EMD)或疊代式高斯平滑法 (Iterative Gaussian Smoothing) 處理之後，能夠初步濾除掉每日的週期性變化，進而系統及客觀地辨識出與地震活動有關的異常。未來將逐漸歸納不同測站的資料特性，以及與地震活動相關的異常情形，以期能夠有效地將地球化學的資料異常與構造、地震活動作聯結。

ABSTRACT

It has been recognized that long-term monitoring of gas/fluid composition and groundwater-level at appropriate sites at or near fault zones is very helpful to understand the mechanism and process of fault/earthquake activity. Furthermore, it may help us to find out potential earthquake precursors in a specific area.

In this project, we continuously monitor the variations of soil gas composition of the existing stations. We found that many radon anomalies have been observed in soil gas prior to the earthquakes occurred in northern Taiwan, especially in Ilan area, for Tapingti station. Gukeng station and Chunglung station are more sensitive for earthquakes occurred in southwestern Taiwan, nevertheless, Pingtung station is sensitive for those occurred in southern Taiwan. The earthquakes occurred in Taitung and southern Hualien areas are usually associated with the soil radon anomalies of Chihshang station.

The groundwater pressure data from December 2011 to November 2012 was analyzed. The followings are the major results: (1) The monitoring stations in Taipei are sensitive to the earthquakes which occur in north and east Taiwan. However, because of some instrument problems, the data were not good enough to make full analysis. (2) In Hsinchu area, groundwater data from Shin-Le (SL) monitoring well show better anomalous pre-seismic variations. Those anomalies are related to the earthquakes which occur in Hsinchu area, eastern Taiwan and southern Taiwan (the Wu-tai earthquake). (3) Pre-seismic events recorded by monitoring wells in Chiayi area correlated with the earthquakes in central and southern Taiwan and offshore. Yunshui (YS) monitoring station was the only one station which working properly in Chiayi area. During the period from March 2009 to November 2012, neither large earthquakes ($MW > 6.0$) nor anomalous decreases of groundwater radon and dissolved gases (methane and nitrogen) were recorded near the Antung station. Anomalous declines in groundwater radon and dissolved gas (CO_2) were recorded at the Kenting station prior to March 4, 2010 $ML = 6.4$ Chiahsien, February 26, 2012 $ML = 6.4$ Wutai, and October 25, 2012 $ML = 5.5$ Kaohsiung earthquakes.

Soil gas data of selected monitoring stations were also dealt with different time-series techniques, such as Iterative Gaussian Smoothing and Empirical Mode Decomposition. After extracting the daily atmospheric temperature effect, we can clearly recognize the anomalous variations of radon concentrations. The results seem to be helpful to quantitatively identify the anomalies related to seismic activities. We will analyze the monitoring data to define the characteristics for each station, furthermore, to clarify the possible relationship between geochemical parameters with tectonic and seismic activities in one area.

一、前言

地震災害至今仍是吾人無法確實預測並防止其造成重大危害之最重要天然災害。自從 1975 年中國大陸成功地對規模達 7.3 級的海城地震提出先期預警 (Deng et al., 1981)，並因而大幅減低居民生命及財產之損失，地震預測研究的可行性即受到地震學者的重視。地震發生過程是很複雜的，其中有可預測的、可能可預測的，及不可預測的部分 (Bolt, 1999; Moki, 1985)。我們在做預測研究時必須於時間及空間上先將其劃分出來。例如臨震預報(數分鐘)及短期預報(數小時~數星期)因牽涉有太多非線性因子，故基本上是不可能達到的。但是對於調查非常清楚且非常活躍的斷層段 (segment)，則中期(數月~10 年)及長期預報(10 年~30 年)是可行的。最重要的是，我們必須對活動性大的斷層進行觀測，以更進一步瞭解地震發生之過程及機制。

地震雖是破壞性極大的地質災害，若能在地震來臨之前有所預測，使國人預作準備，則可望把災害減到最輕。以往國內對此一地質災害之觀測與預測的研究，大都利用地球物理的方法(如全台地震網的設立)，甚少利用流體(水和氣)地球化學的方法。由於地震在即將發生前，通常都會有一些物理的或化學的前兆，若我們能結合地球物理和地球化學的方法，同時來觀測這種地質災害的前兆，必能收集到更為可靠的資料，作為可能發生災害的預警。

在觀測及預測斷層活動與地震的方法中，流體之地球化學變化常可提供有用的地震前兆訊息。這些大部分與地殼受到應力作用或斷層活動有關，一般歸之於斷層活動過程造成的地下流體(水與氣)循環系統的改變而導致的這些流體的混合作用。因此適當選擇有較深循環的地下水與氣系統，常可有機會反應出地震前兆。

二、研究方法

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，使得臺灣地區的地震活動特別活躍，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，隨著觀測結果不斷累積，對地震的篩選標準也漸進修正。因此，本研究對於所有測站的地震一般篩選原則為納入地震規模 (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來篩選地震。

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、地形變化以及水文地球化學的變化。

不過，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，各觀測研究所定義的異常，過去往往是主觀認定，故有時會存在認定之標準的問題。本研究於土壤氣觀測部分使用兩種方法，分別是疊代式高斯平滑法與希爾博-黃轉換來處理觀測資料 (Huang et al., 1998)，以較有系統且客觀的方式來處理觀測結果，下面以嘉義中崙觀測站來說明觀測資料的處理流程。

在利用經驗模態分解法 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 之前，先將受到降雨影響觀測品質不佳的資料去除。然後再針對這段時期的訊號做拆解，得到數個內部模態函數 (Intrinsic Mode Functions, IMF)。選擇周期在 1.5 至 38 天的 IMF 作統計分析，以 1 個標準差作為氬氣異常門檻，高於此門檻即視為異常，如圖 1。觀察圖上 C 有八個超過異常門檻的時段。其中編號 1、5、7 異常時段，只有氣體異常，後續沒有相關地震發生。其餘氣體異常時段隨後皆有相對應地震發生，其與地震的相關性以表 1 做說明。此外編號 2、3、4 異常時段的原始數據是完整的氣體異常反應 (圖上 A 黃色框所示)，這也說明在原始數據若有完整的氣體異常反應，在 EMD 時亦可能會有相同的氣體異常時段。

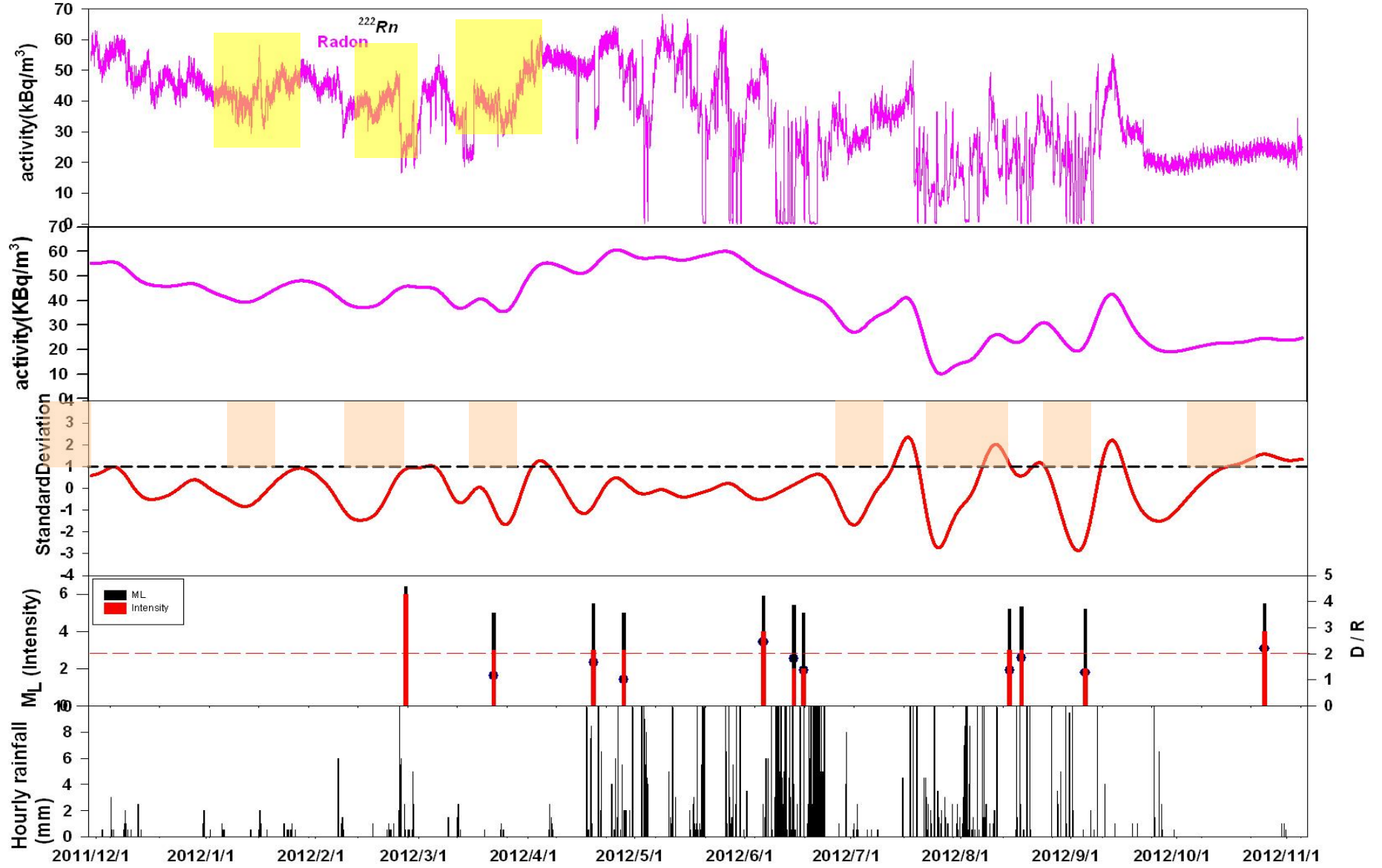
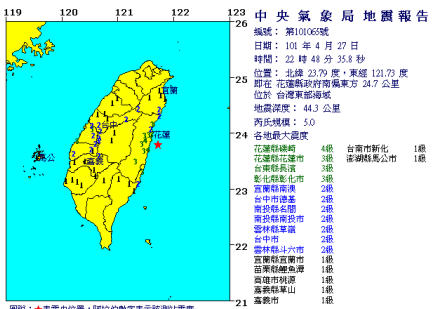
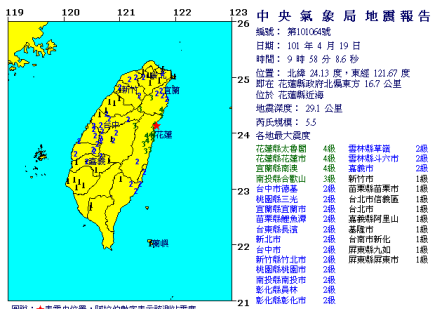
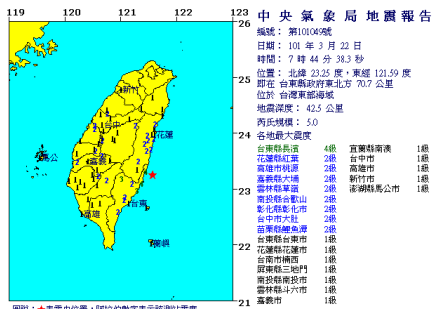
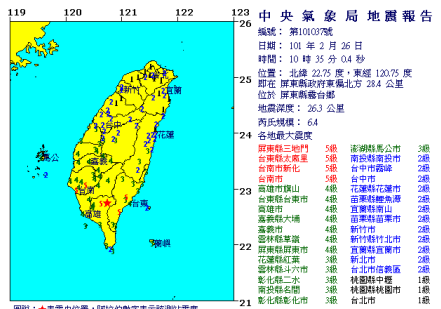
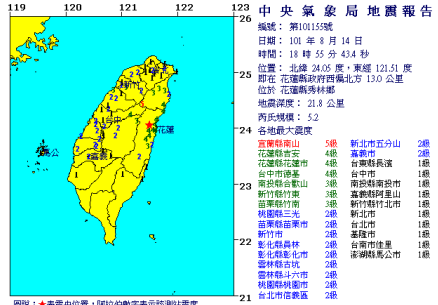


圖 1：氡氣數據經疊代式高斯平滑法與經驗模態分解處理後的結果 (A) 為原始數據；(B) 為疊代式高斯平滑法的結果；(C) 為經驗模態分解 (IMF₆-IMF₁₀)，經程式處理後以 1 個標準差來表示其異常門檻；粉色框為氡氣異常時段；黃色框為完整異常時段。

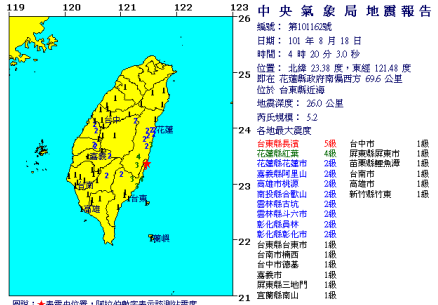
表 1：嘉義中崙觀測站相關地震列表 (2011/11/29—2012/12/3)。V 表示氣體異常與地震有相關性。Δ表示該地震可能也與氣體異常有關，放置表內以供參考。下列地震報告圖為與表 2 相關。

No	西元時間	規模	經度	緯度	深度 km	詳細資料	反應與否	震度	ga l	距測站 (km)	D/R
12-157	2012/2/26 10:35	6.4	120.78	22.74	26.3	屏東縣政府東偏北方 30.4 公里 (位於屏東縣霧台鄉)	V	6	34.61	73.96	7.64
12-212	2012/3/22 07:44	5.5	121.75	23.21	42.5	台東縣政府東北方 79.4 公里 (位於臺灣東部海域)	V	3	11.74	121.99	1.16
12-261	2012/4/19 09:58	5.5	121.67	24.14	29.1	花蓮縣政府北偏東方 16.9 公里 (位於花蓮縣近海)	V	3	8.85	140.01	1.66
12-268	2012/4/27 22:48	5.5	121.87	23.75	44.3	花蓮縣政府東南方 36.7 公里 (位於臺灣東部海域)	Δ	3	9.32	138.70	1.02
12-338	2012/6/6 09:08	5.9	121.43	22.39	18.4	台東縣政府東南方 49.9 公里 (位於臺灣東部海域)		4	25.92	140.53	2.45
12-370	2012/6/15 00:15	5.3	121.64	23.71	6.5	花蓮縣政府南方 31.5 公里 (位於臺灣東部海域)		2	6.04	115.04	1.65
12-428	2012/6/17 17:01	5.5	121.53	23.69	6.5	花蓮縣政府南偏西方 34.6 公里 (位於花蓮縣豐濱鄉)		2	4.17	103.72	1.36
12-550	2012/8/14 18:55	5.2	121.56	24.06	21.8	花蓮縣政府西北方 9.6 公里 (位於花蓮縣秀林鄉)	V	3	11.04	125.77	1.37
12-568	2012/8/18 04:20	5.2	121.58	23.35	26	花蓮縣政府南方 71.2 公里 (位於臺灣東部海域)	V	3	17.49	103.17	1.67
12-597	2012/9/5 04:00	5.2	121.02	22.24	21	台東縣政府南偏西方 58.6 公里 (位於臺灣東部海域)	V	2	6.49	134.23	1.28
12-662	2012/10/25 18:31	5.5	120.4	22.44	33	高雄市政府南偏東方 22.1 公里 (位於屏東縣近海)	V	4	33.99	105.39	2.20

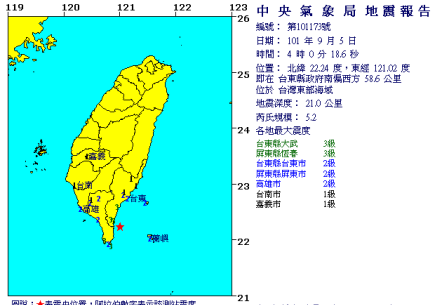




圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度

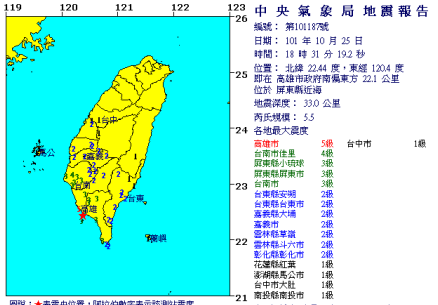


圖說：★表震央位置，阿拉伯數字表示該測站震度



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報告即時地震資料
 地震記錄之錄影。



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報告即時地震資料
 地震記錄之錄影。

三、結果與討論

3.1 土壤氣體觀測

綜合 2008 年 12 月至 2012 年 11 月各土壤氣體觀測站有前兆反應之地震，其空間分布如圖 2 所示。這些地震皆符合本研究所設定的篩選條件，(規模 ≥ 5 且深度 $<100\text{KM}$ 且震央距離測站 $\leq 150\text{KM}$ ，此外震度 ≥ 1 或 $D/R \geq 1$ 的地震)。此外，各觀測站成功捕捉前兆訊息之統計結果於表 2 所示，其中新竹大平地站和台東池上站有較高的成功率。然而過去對於地震反應敏感的嘉義中崙站，僅有約 26%的成功率，這可能歸因於符合篩選的地震數量過多且密集，在一次的氣體異常時段卻出現數起符合篩選因子的地震事件，使得分母增大卻降低成功率。

新竹大平地站共篩選出 56 起地震，有前兆之地震 26 起，多分布在臺灣北部及東部一帶，有數起則位在於中部地區，其空間分布圖如圖 2(A)所示。而這些有前兆訊息的地震分布情形，也代表該觀測站的敏感反應區間。雲林古坑站篩選出 59 起地震，有前兆之地震共 7 起，多分布在臺灣中南部及東部一帶，其空間分布圖及該觀測站的敏感反應區間如圖 2(B)所示。嘉義中崙濁水潭站篩選出 86 起地震，有前兆之地震共 22 起，同樣多分布在臺灣中南部及東部一帶，不過範圍較廣，意味該測站的對於地震的反應較為敏感，其空間分布圖及測站的敏感反應區間如圖 2(C)所示。屏東屏科大站篩選出 34 起地震，有前兆之地震共 11 起，多分布在臺灣南部地區，其空間分布圖及該觀測站的敏感反應區間如圖 2(D)所示。花蓮美崙站篩選出 41 起地震，有前兆之地震共 9 起，多分布在觀測站周遭數十公里的範圍內，代表該測站對於地震反應不太敏感或是僅能反應小區域的地震活動，其空間分布圖及該觀測站的敏感反應區間如圖 2(E)所示。台東池上站篩選出 64 起地震，有前兆之地震共 30 起，多分布在臺灣東部及東南部一帶，少數發生在西部地區且規模較大的地震也有反應，其空間分布圖及該觀測站的敏感反應區間如圖 2(F)所示。

表 2：四年度(2008-2012)各觀測站成功捕捉前兆訊息之統計結果。

	TP T	G K	C L	P T	M L	C S
符合篩選之地震	56	5 9	8 6	3 4	4 1	6 4
與氬氣有關之地震	26	7	2 2	1 1	9	3 0
百分比	46 %	5 %	2 6%	3 2%	2 2%	4 7%

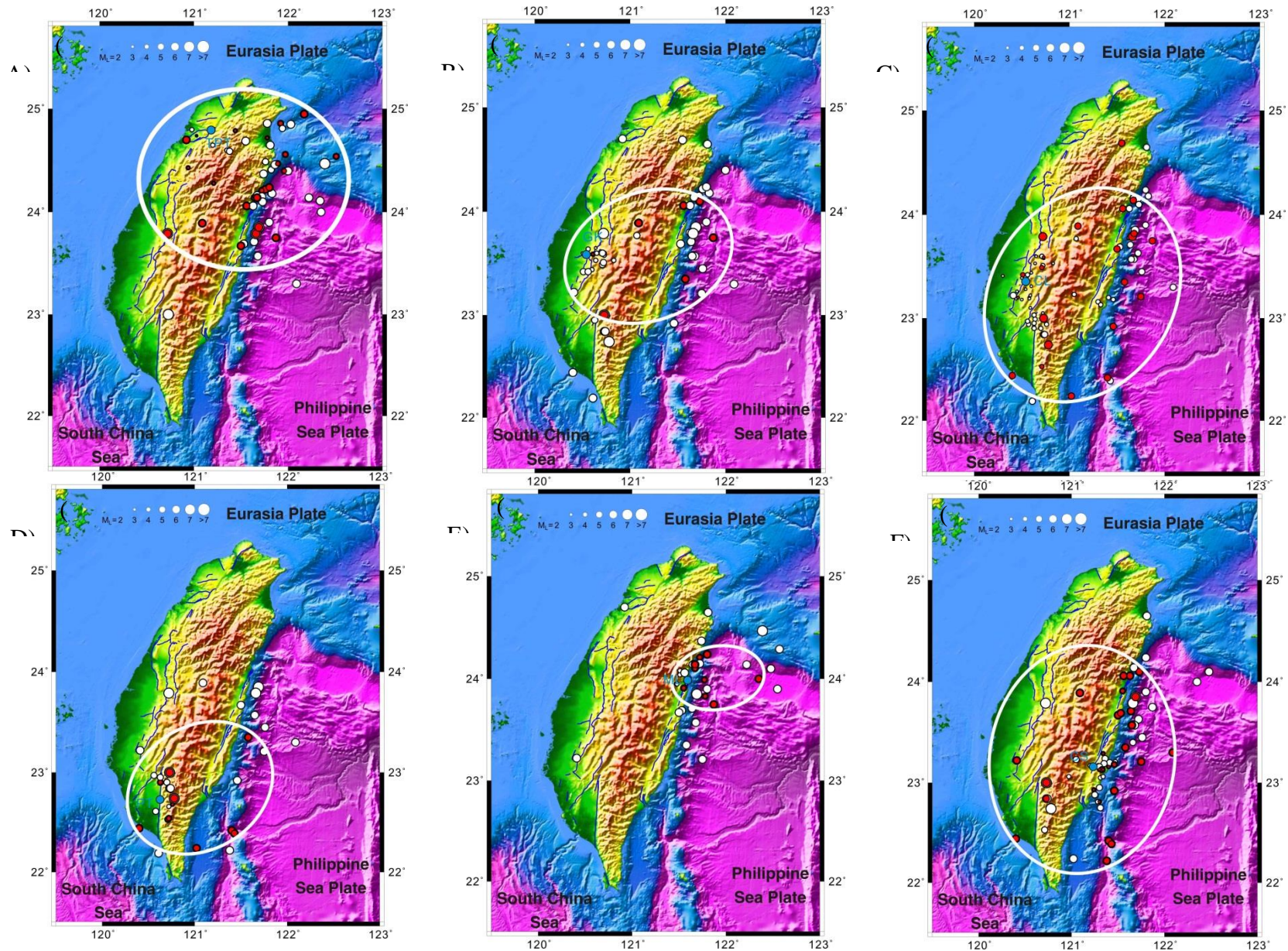


圖 2：土壤氣體觀測站有前兆反應的地震震央分布圖(2008 年 12 月至 2012 年 11 月)，圓點代表符合篩選之地震；紅點代表有氣體前兆之地震，圈選區域為該測站敏感反應範圍。(A)新竹大平地站(B)雲林古坑站(C)嘉義中崙站(D)屏東屏科大站(E)花蓮東華站(F)台東池上站。

累積過去數年的觀測結果，我們建立了可能的地震預測模型。經由地震活動所造成的異常變化得以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，則可以推測未來數天至兩週內有較大地震可能發生在這個交集區域內。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 3 所示。

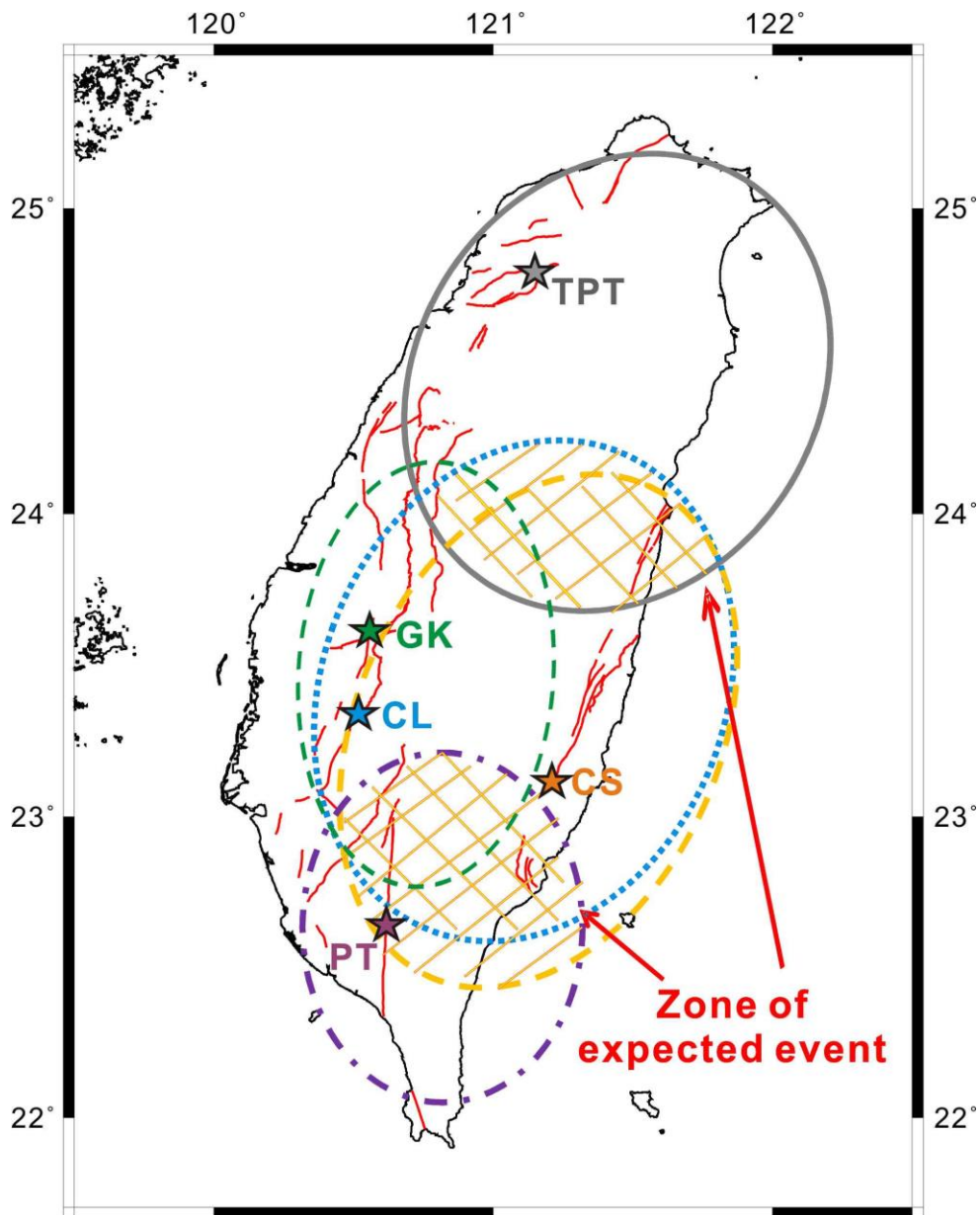


圖 3：地球化學觀測站的地震反應區間示意圖。藍圈、灰圈和綠圈分別代表大平地測站、中崙測站和池上測站的可能地震反應區間範圍，其交集處代表地震可能發生地點。

3.2 地下水壓觀測

地下水壓或水位之異常升降可能為斷層活動之前兆，故將地下水壓異常定義為：

- (1) 在無降雨干擾之時期，地下水壓出現異於前階段之長期（三日以上）水壓變化趨勢或日均變化量三倍以上。
- (2) 在降雨時期，地下水壓出現超出由長期統計而得之預期趨勢與變化量。

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 $D/R \geq 2$ ，其中D為應變半徑，以 $D = 100.43 * ML$ 計算之 (Dobrovolsky et al., 1979)，R為測站與震央之距離。

3.2.1 本年度地下水壓觀測

2011年12月至2012年11月底水位資料觀測記錄如下：

3.2.1.1 台北地區：

明德中學、錦和國小及樹林飛灰掩埋場等三個觀測井水位變動之同步性高，受降雨的影響顯著，對發生於台灣東北部的地震較敏感。由於今年度後期錦和站與明德站水位錄缺失較多，觀察到的震前異常水位明顯較往年少。僅四起地震有震前水位異常現象，依發生時間順序分別為4月9日台灣東部海域規模5.7、5月11日宜蘭近海規模3.6、7月20日新北市三峽規模3.0、以及8月14日花蓮秀林規模5.2的地震，四起地震之震源深度都小於21.5公里。

3.2.1.2 新竹地區：

新竹地區之觀測站運作狀況不佳：瑞峰觀測站在2012年4月以後水壓計故障，資料缺漏；新樂觀測站在今年8月起，出現多次為期數天至數十天的資料缺失；而雙溪觀測站於9月之後已無資料。

新竹地區的三个觀測站水壓變化趨勢一致性低，雖然新樂與雙溪之水位皆受雨量顯著影響，但影響型態不同：新樂站水位受雨量影響明顯，雙溪站在降雨期間地下水位之每日地潮升降幅度減弱。

本年度在新竹測站出現震前水位異常反應的僅有四起，依序為2月26日規模6.4的霧台地震(圖4)，4月9日規模5.7花蓮外海的地震，6月1日規模3.8的新竹尖石鄉地震，以及10月10日規模3.1的苗栗頭份地震。

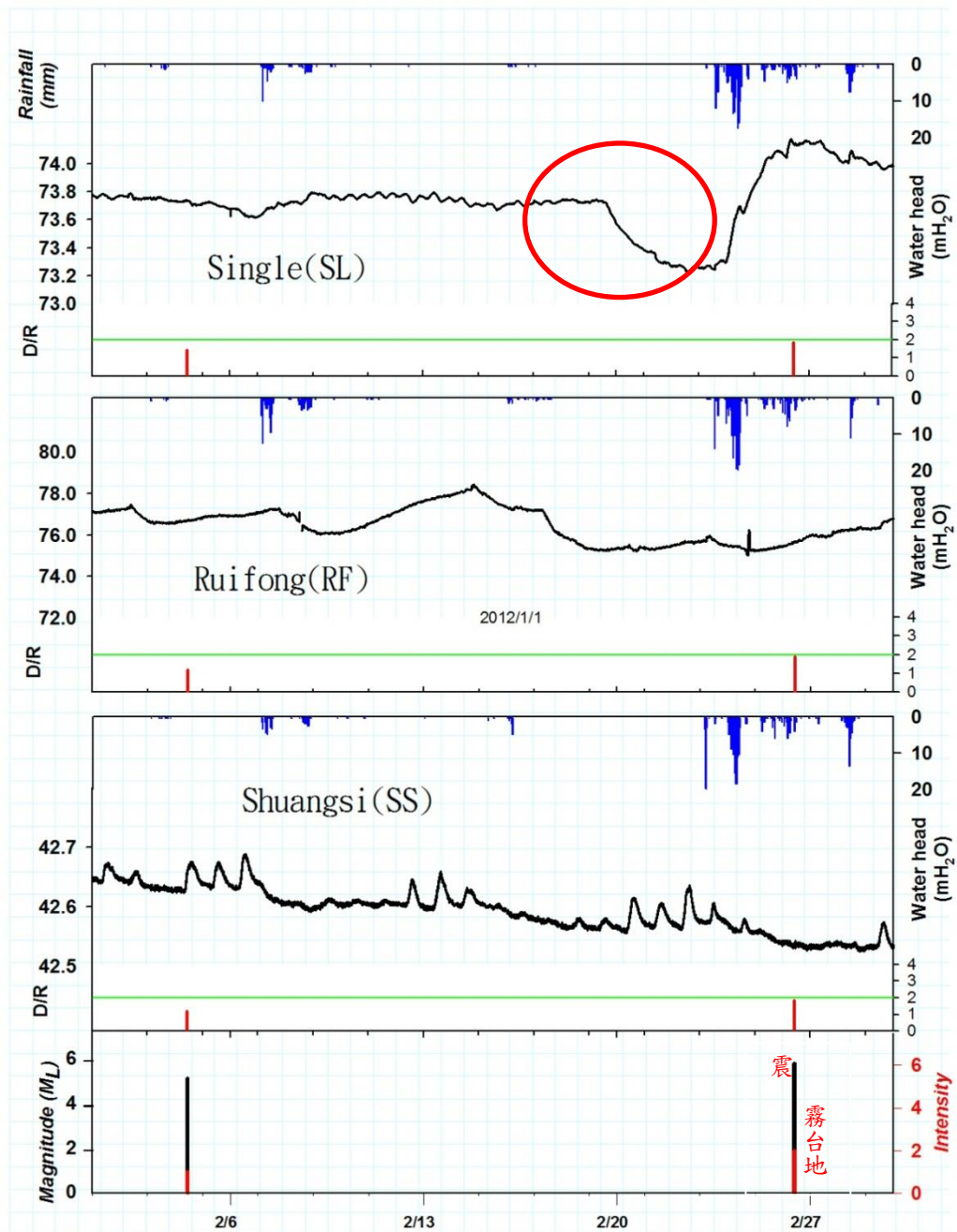
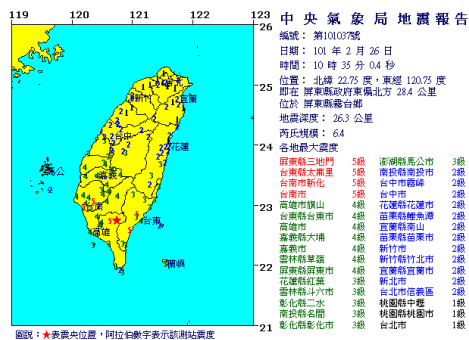


圖 4：新竹地區 2012 年 2 月新樂、瑞峰與雙溪觀測井水壓與地震及降雨對比圖。2 月 19 日之水位異常可對應 2 月 26 日之霧台地震。



3.2.1.3 嘉義地區：

今年度嘉義觀測站僅汙水站有持續運作。因汙水站屬於受壓含水層，水頭高於地表 7 公尺，且水井本身會產氣，擔心受壓氣體在井內累積影響水壓觀測，故在今年度 2 月進行洩氣工作，並在 7 月將井內水頭導出與空氣接觸，而汙水站之水壓也在 7 月後趨於穩定。

汙水觀測站本年度 7 月之前有多起疑似震前水位異常反應，前兆時間為數小時至 13 天不等，多數為鄰近嘉義地區之淺源地震，但由於此期間汙水站水位不穩定，故無法斷論。7 月後汙水站水壓轉穩，並於 7 月 30 日、8 月 23 日、9 月 27 日出現三處水壓異常，7 月 30 日對應地震為 8 月 5 日規模 3.6 之嘉義地震，8 月 23 日之異常對應到 9 月 5 日台東外海規模 5.2 之地震，但是 9 月 27 日出現之水位異常無對應至任何地震。

3.2.2 震央分布統計結果

統計自 2008 年 12 月至 2012 年 11 月有震前異常地下水位反應之地震，將其空間分布繪於圖 5。

台北地區共篩選出 161 起地震，有震前水位異常之地震 39 起，多分布在台灣東北部及外海，島弧邊界（圖 5 中虛線部分）以東、花東縱谷北段的部分，少位在於灣中部地區。有數起具震前水位異常的地震不符篩選條件，這些地震多位於台灣東北部沿海一帶。新竹地區共篩選出 118 地震，其中有水位異常之地震共有 36 起，除了數起新竹境內小規模地震外，多分布在台灣東北部及花蓮近海（圖 5 之 B 部分）。有兩起具震前水位異常之地震位於台灣中南部。2010 年 3 月 4 日甲仙地震與 2012 年 2 月 26 日霧台地震，規模都是 6.4，這兩起地震造成台北、新竹、嘉義 2~6 級震度，新竹、嘉義之觀測井有異常反應。嘉義地區共有篩選出 255 起地震，其中具水位異常反應者有 103 起，多位於台灣中南部及東部外海（圖 5 之 C 部分）。有多起不符篩選條件的地震，有地下水位異常前兆，多是觀測井鄰近地區-嘉南地區-發生的地震。嘉義地區規模小於 4 有前兆反應的地震，其震央距觀測站皆在 80 公里以內。150 公里以外具有震前水位異常反應的地震，規模皆大於 5。

本年度（自 2011 年 12 月至 2012 年 11 月）地震規模 5 以上且跨兩個觀測群以上有震前水位異常之地震，包括：2012 年 2 月 26 日規模 6.4 的霧台地震、2012 年 4 月 9 日規模 5.7 的台灣東部海域地震，此二地震震源深度皆小於 30 公里。

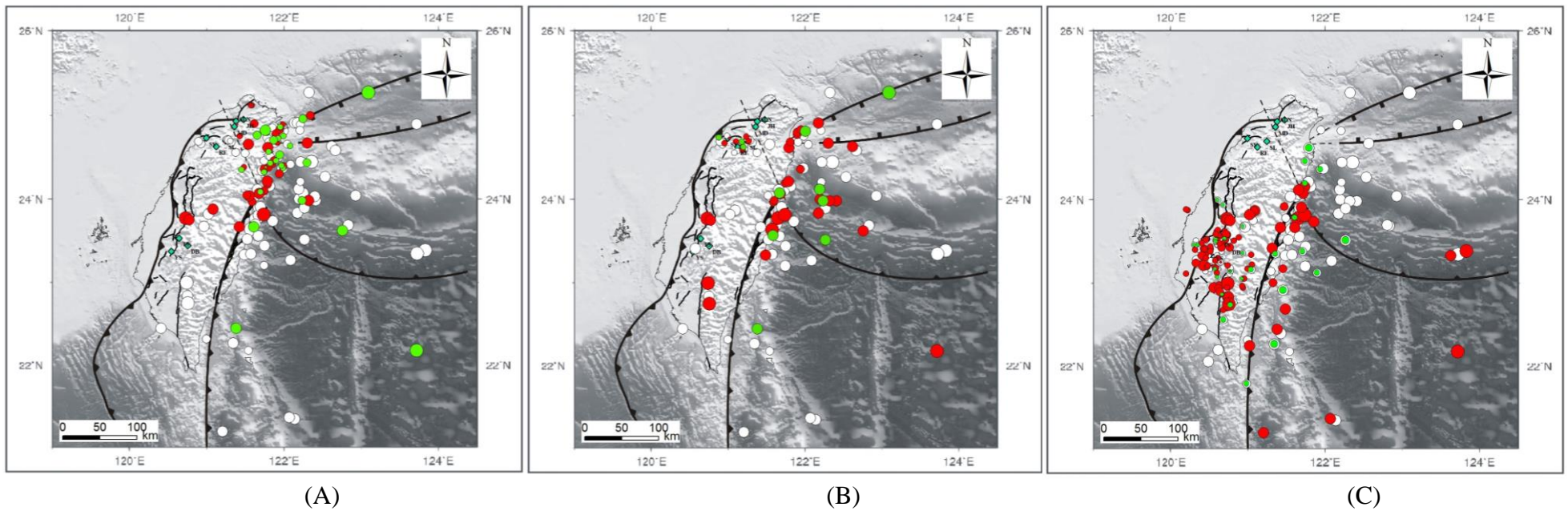


圖 5：台灣島與鄰近地區的板塊構造架構以及台北、新竹、嘉義地區觀測井有震前異常反應的地震分布圖(2008 年 11 月至 2012 年 11 月)。圖中紅色圓圈為具有明顯震前異常之地震，綠色圓圈為疑似異常之地震，白色圓圈為無異常之地震；圓圈的大小代表地震規模。

- (A) 部分為台北地區具震前異常之地震位置分布
- (B) 部分為新竹地區具震前異常之地震位置分布
- (C) 部分為嘉義地區具震前異常之地震位置分布

3.3 地下水水氦及溶解氣觀測

依統計分析結果，2009年11月至2012年11月安通站地下水水氦濃度皆無超出下異常值邊界，趨勢穩定，無異常下降之地震前兆。此段時間內，海岸山脈南段無 $M_w > 6$ 之地震發生。

圖6(A)為2009年9月至2012年11月之墾丁公園社頂監測站地下水水氦濃度監測數據，圖中虛線為監測到地下水水氦濃度異常下降前兆之地震。另外，從3年的觀測資料中，證實地下水水氦濃度變化與豐水季及枯水季有關聯，為一週期性行為。

在墾丁及安通破裂含水層的地質條件下，假設在地震前岩體處於擴張狀態，岩體膨脹而產生破碎微裂隙或孔隙，微裂隙發展的速度快於地下流體補注的速度，進一步產生氣體飽和度(gas saturation)，水相的氦釋放至氣相，導致地下水水氦濃度下降。以上述理論為基礎，可利用三階段圖判斷地下水水氦異常下降之地震前兆。

圖6(B)為墾丁公園社頂水氦監測站在2010甲仙、2012霧台地震及2012高雄地震前水氦異常下降之三階段圖。階段1彈性應變，水氦濃度平穩；階段2裂隙發展，水氦濃度下降；階段3地下水流入，水氦濃度回復背景值。此結果顯示，墾丁公園社頂監測站及安通溫泉之地質條件(延展性地層包圍脆性地層)確實可觀測到地下水水氦濃度異常下降之地震前兆，為適合連續監測之地點。

3.4 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，同時地下水氦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。2012年2月26日屏東霧台地震，數個地球化學測站異常變化情形來進行說明，如圖7所示。

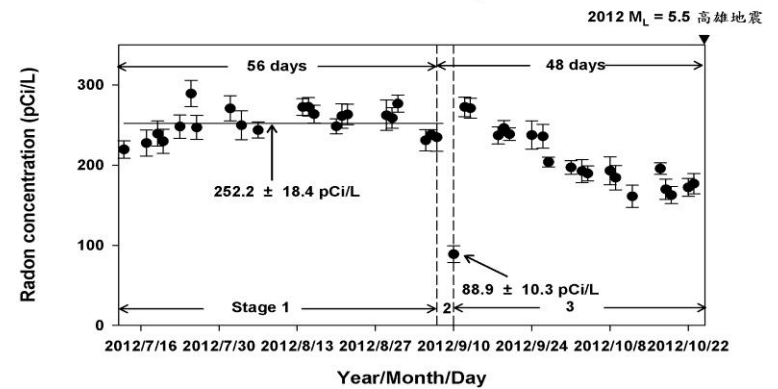
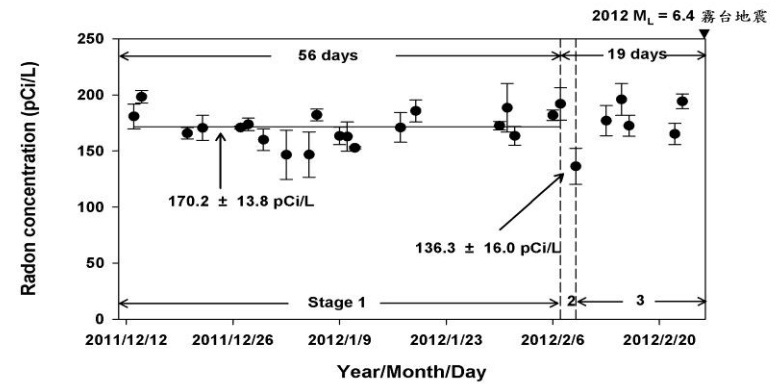
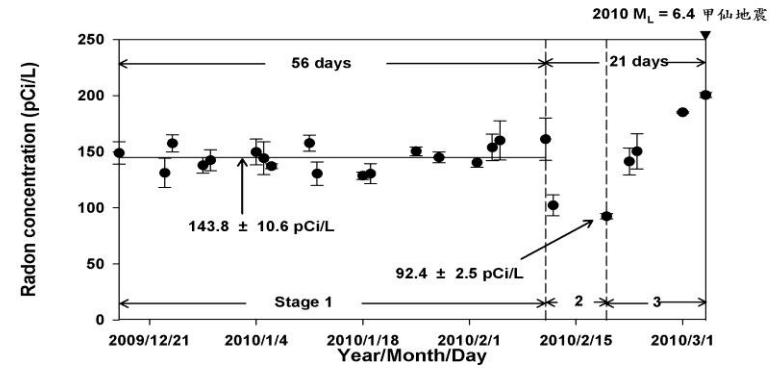
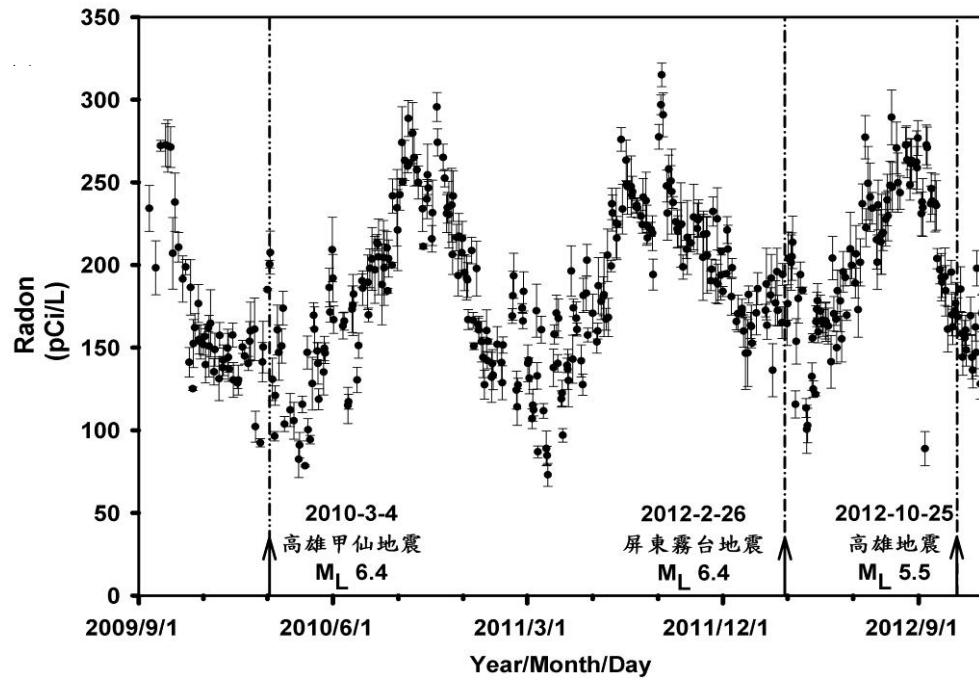


圖 6：(A)社頂站地下水水氣濃度變化，及監測到地下水水氣濃度常下降前兆之地震(2009 年 9 月至 2012 年 11 月)。(B)墾丁公園社頂水氣監測站在 2010 甲仙、2012 霧台地震及 2012 高雄地震前水氣異常下降之三階段圖。階段 1 彈性應變，階段 2 裂隙發展，階段 3 地下水流入。

屏東霧台地震發生前，土壤氬氣觀測站於嘉義中崙站及屏東屏科大站約兩星期前出現顯著異常；地下水壓觀測井於新竹新樂站和嘉義沱水站數天前出現異常；而地下水氬觀測於墾丁社頂站亦出現異常下降的現象，這些的異常變化應為霧台地震的前兆訊息，如圖 7 所示。

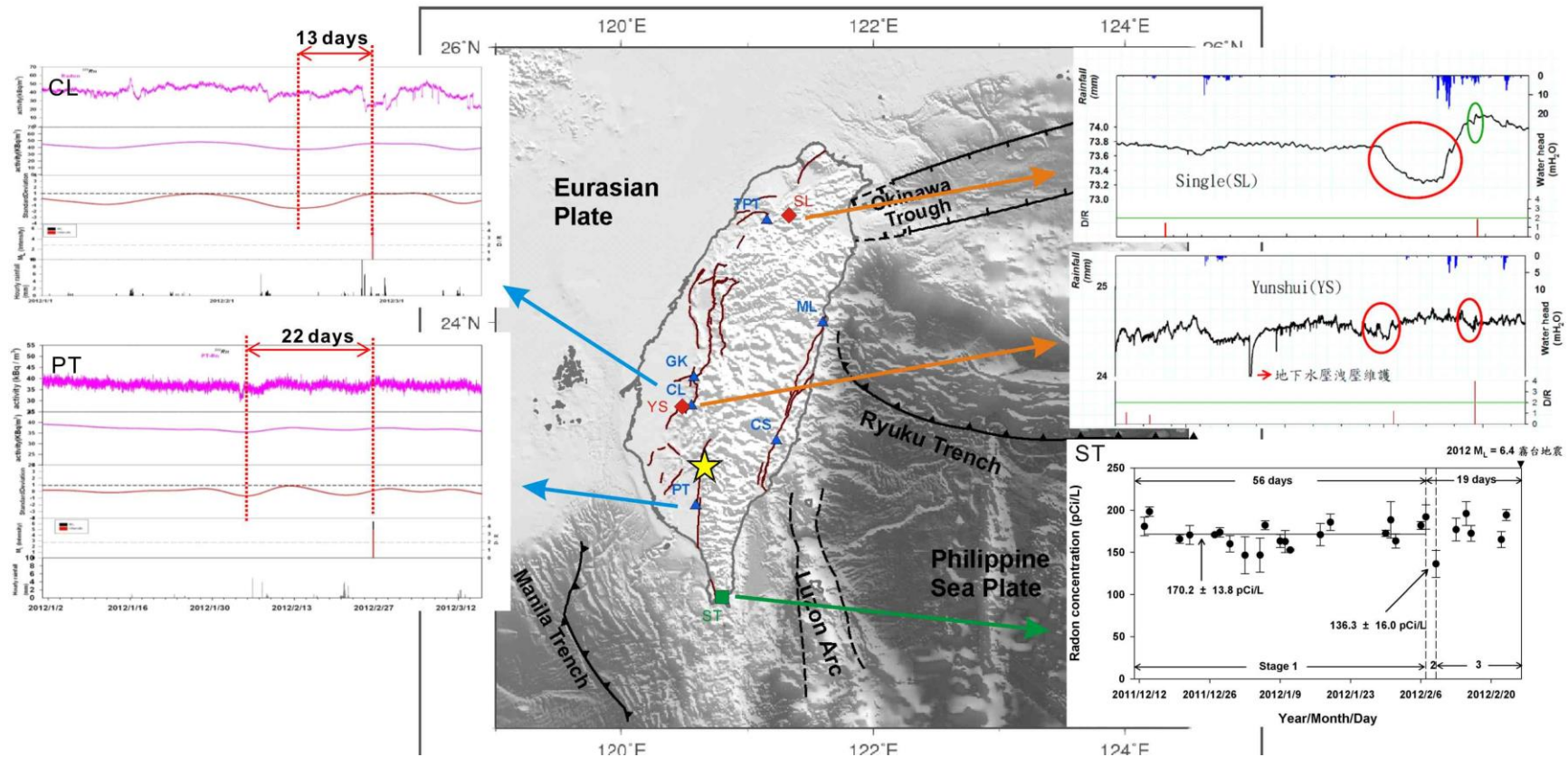


圖 7：2012/2/26 屏東霧台地震與各觀測站之綜合觀測結果。分別為中崙站 (CL) 及屏東站 (PT) 土壤氬氣成份觀測結果 (2012/1/1-2012/3/15)；新竹地區新樂(SL)觀測井及嘉義地區沱水(YS)觀測井水壓變化 (2012/2/1-2012/3/1)；墾丁社頂站(ST)水氬觀測結果 (2011/12/10-2012/2/26)；(D) 黃色星號代表地震的震央位置。

四、結論與建議

1. 台灣地區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。各氣體觀測站的觀測結果顯示，發現地震若發生距觀測站不遠的地方，通常在數天至數小時前，氬氣濃度皆呈現異常升高的變化情形，在排除氣象因子及人為因素影響後，這些的異常值出現很明顯的就是該次地震發生前的地震前兆訊息，本年度以新竹大平地、嘉義中崙、屏東屏科大和台東池上觀測站的觀測成果較為顯著。
2. 地下水各站群之敏感區域範圍：臺北站群以北部與東北部地震為主，最南至南投中部。新竹站群以新竹地區、台灣東北部、東部為主，最南至高雄地區。嘉義站群以中南部為主，至台灣東部與東南部外海。
3. 土壤氬氣利用時序分析方法，如疊代式高斯平滑法與經驗模態分解處理不同觀測站的數據，初步結果顯示能夠濾除掉大氣溫度變化造成的氬氣濃度日夜震盪，也可辨識出與地震前兆的異常反應；然而尚無法有效地移除掉雨量對氣體的影響。未來須累積更多資料，並藉由不斷地測試修改，找出適合各觀測站的分析方法。
4. 同時檢視土壤氣體、地下水壓及水氬等地球化學觀測站，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 2012/2/26 屏東霧台地震 ($M_L=6.4$)，中崙、屏科大土壤氣站和新樂、沄水水壓站及社頂水氬站都有明顯的震前異常變化；2012/10/25 屏東近海地震 ($M_L=5.5$)，中崙、屏科大、池上等土壤氣站及墾丁社頂水氬站皆有前兆反應。
5. 地震前兆模型建立，有助於未來前兆研究發展，並作為往後驗證、與改進之參考。

參考文獻

1. Bolt, B.A. (1999) *Earthquake*, 4th edition, W.H. Freeman and Company, New York, 366pp.
2. Deng, Q., Jiang, P., Jones, L. M. and Molnar, P. (1981) A preliminary analysis of reported changes in ground water and anomalous animal behavior before the 4 February 1975
3. Haicheng earthquake. In *Earthquake Prediction: An International Review*, Maurice Ewing Series 4 (D. W. Simpson and P. G. Richards, eds.), American Geophysical Union.
4. 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.
5. 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.
6. Mogi, K. (1985) *Earthquake Prediction*. Academic Press, New York, 355pp.