

為大地震作準備：科學園區微地震觀測及地震前兆之地球化學研究

文/圖 張道明、瓦里亞、林世榮、謝宏灝 國家地震工程研究中心
溫國樑 國立中央大學 楊燦堯 國立台灣大學

前言

從921集集地震，我們了解地震不易捉摸的個性。要為下一個大地震作準備，唯有從最基本的問題開始釐清所有的因子，才可能有所突破。512四川汶川地震又一次驗證這個觀點。

現階段的科學研究成果還無法預測地震！充其量只能以定性方式解釋地震的發生過程是：板塊推擠的應力在活動斷層及盲斷層上釋放的終極現象。學者們目前都還無法以定量的方式完整的、全面的描述地震發生前（大地應力分佈情形…）、發生中（大地震是如何觸發…）、發生後（震波傳遞及場址效應…）的各種現象。如果我們能夠準確的掌握這些因子，地震預測的問題大概就解決了八成。換言之我們無法準確的回答三個問題：大地震（1）何時發生、（2）何地發生、（3）如何發生？但是透過過去一些研究，我們觀察到一些現象，可以慢慢的將問題轉變成兩組研究方向：（1）如果我們能有效的觀測到地震前兆現象，未來是不是能在地震即將發生的數天到數小時前，判斷地震即將在何時何地發生？（2）地震發生通常與活動斷層及盲斷層有直接關聯性，而發生在相同斷層的大地震應該和平時小地震有相似的破裂特性，因此藉由研究小地震是不是能夠推估未來大地震的發生形態？這兩組研究方向，都需要投入大量人力物力，長期進行野外觀測才有可能突破瓶頸。

近年來三大科學園區產值已經超過台灣國民生產總值（GDP）的16%，此外也是台灣的高科技人力聚集點，絕對稱得上是台灣的經濟命脈。然而觀察這些科學園區的地理位置，並不是非常理想，譬如竹科園區周邊10公里內有新城斷層、新竹斷層，南科附近有新化斷層、觸口斷層，中科附近有彰化斷層、車籠埔斷層，而且不斷地發生淺源地震。而台灣由於板塊擠壓造成災害性地震頻傳，過去百年間曾發生1906梅山地震、1935新竹台中烈震、1999集集地震，尤其於西元1999年發生的芮氏規模7.6之921集集大地震，造成共2,505人罹難，140億美元經濟損失（佔GDP的5%）。因此國震中心針對以上兩個研究方向，對三大科學園區進行（1）以地球化學氣體變化來觀測地震前兆現象；（2）以高精度寬頻地震儀進行觀測、研究小地震的破裂特性。

研究方向一：以地球化學氣體變化來觀測地震前兆現象

地震的發生是一個非常複雜的力學問題，包含岩石材料由彈性變成非彈性、最終破裂的過程；若配合地下流體，還牽涉出岩石變形累積的能量轉換成電磁能等現象。因此地震發生前可能會出現非常多種前兆現象。譬如：前震、

地磁場變化、電離層強度變化、GPS訊號呈現系統性延遲、斷層帶土壤氣體的濃度變化、生物異常反應等。通常，影響生物產生異常反應的因素太多，目前很難進行系統性研究。

如前述，目前學者還無法提出理論來完整描述地震發生的過程，因此地震前兆是屬於「累積觀測資料」階段，希望藉由長期觀測解答大地震：（1）何時發生、（2）何地發生。目前台灣有不少地震前兆的觀測。以中央大學電離層變化研究而言，目前成果顯示大地震前數天可以看到異常，但異常範圍相當大。而氣象局GPS訊號呈現系統性延遲的觀測也有類似現象。此外，國震中心的研究顯示，斷層帶土壤氣體的濃度變化不僅對大地震，也對中小地震有反應，未來可能是一個很好的地震前兆觀測工具。

斷層帶土壤氣體的濃度變化可用於地震前兆觀測的原理是：地殼內有一些放射性元素，在長期穩定的衰變過程中會形成一些特定氣體如氦氣等。許多研究指出地底下的氣體藉由擴散（diffusion）或滲流（advection）行為，特別是在破碎的斷層帶上升至地表。而斷層帶內的孔隙通道，會因為地震前應力變化而變大或變小，而影響土壤氣體的濃度。因此此特性可以用來辨認斷層帶的位置及偵測地震活動。

目前國震中心在新城斷層及新化斷層各設有一座土壤氣體觀測站，進行長期採樣分析，並透過網路連線，即時將資料傳回國震中心，如圖1。

竹科測站（新城斷層）設置於新竹科學園區內，於2005年10月底設置完成，在2005年11

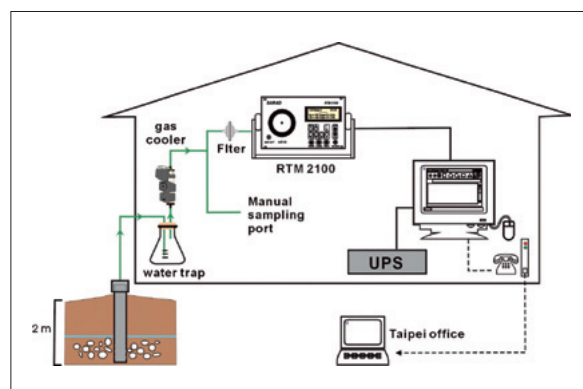


圖1 土壤氣體觀測站內部儀器配置圖。

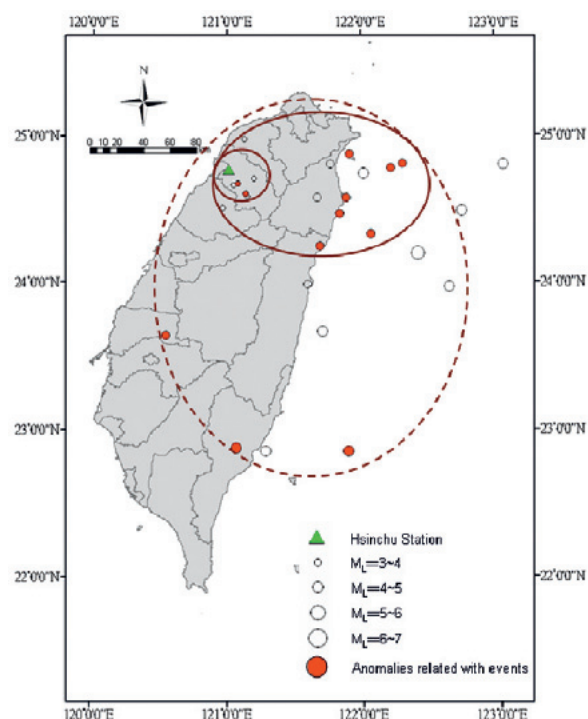


圖2 竹科測站氣體異常訊號所對應地震事件分佈圖。

月至2007年9月觀測期間，共觀測到27起地震事件，土氫氣體連續觀測資料記錄到20起異常事件，研判其中有12起異常事件可能與地震活動有關（圖2及表1）。其餘地震事件未能反映出氣體異常，主要原因是暴雨影響或儀器維護所造成資料暫時中斷，另可能原因為該地震屬深源地震，地震應力無法向上傳遞到地殼內的斷層破碎帶，因此土氫氣體濃度沒有變化。竹科測站在這段觀

表1 兩測站異常訊號與地震事件統計

	Total Anomalies (a)	Total Event (b)	Anomalies related with events (c)	Anomalies not related with events (d)	Signal (%) (c/a)	Noise (%) (c/a)	Confidence level (Signal/Noise)
Hsinchu station	20	27	12	8	60%	40%	1.5
Hsinhua station	11	11	8	3	73%	27%	2.70

測期間，大約有6成的氣體異常事件可反映出鄰近的地震活動事件，如表1，剩下的氣體異常事件可能是潛在小規模地殼活動造成。

新化測站（新化斷層）設置於新化畜產試驗所內，於2006年10月底設置完成，在2006年11月至2007年9月觀測期間，本區共發生11起地震事件，土氫氣體連續觀測資料記錄到11起異常事件，研判其中有8起異常事件可能與地震活動有關（圖3）。其餘未能對應的地震事件，主要受到如暴雨影響而造成資料暫時中斷。以2006年12月26日屏東恆春外海地震為例，測站所記錄到的震度達到4級，為當地近兩年來最大的一次，土氫氣體連續觀測資料顯示與該地震事件有良好的關係性（圖4）。

從目前結果發現：（1）土壤氫氣的濃度通常在地震前數天到數小時會呈現變化；（2）土壤氫氣的濃度變化強度與地震的距離有關聯，反應不同的構造活動區；（3）土壤氫氣濃度變化不僅對大地震有反應，其靈敏度可以偵測到近距離的中小地震。因此，我們大膽的推論：如果我們對台灣活動斷層設置10~20個土壤氣體觀測站，未來應該有機會在地震發生前推測出地震會在何時何處發生，達成地震預警。

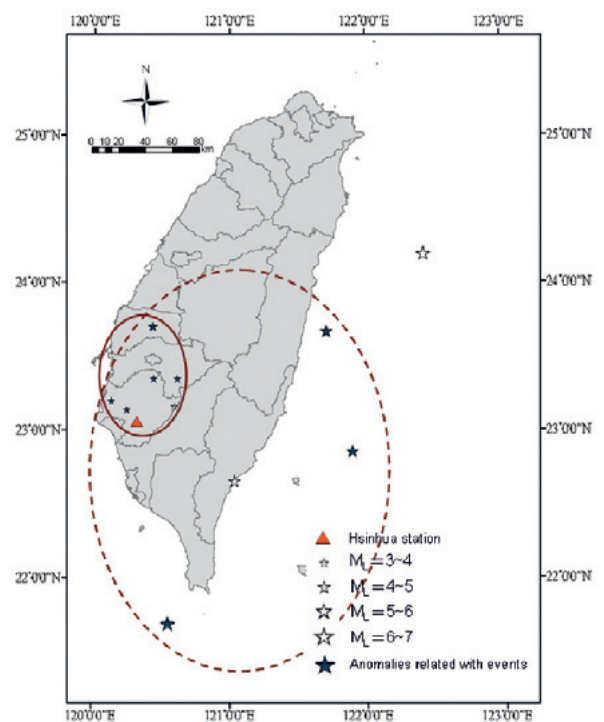


圖3 新化測站氣體異常訊號所對應地震事件分佈圖。

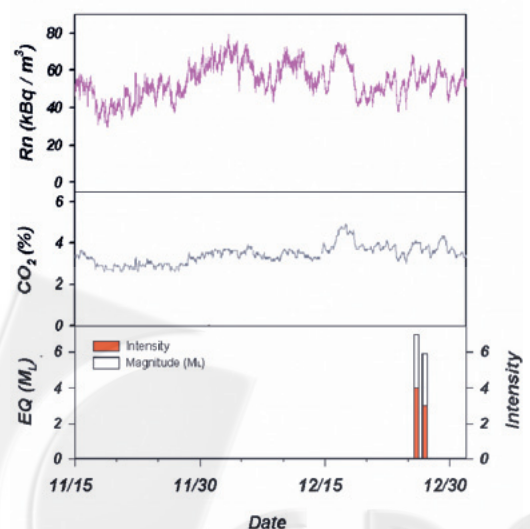


圖4 新化測站在2006/11/15至2006/12/31期間，土氫異常變化與1226屏東地震事件之關係。

研究方向二：以高精度寬頻地震儀進行觀測、研究小地震的破裂特性

如前述，地震發生通常與活動斷層及盲斷層有直接關聯性，而發生在相同斷層的大地震應該和平時小地震有相似的破裂特性，因此我們想藉由研究小地震的特性來推估未來大地震的發生形態？由於這個構想需要進行很多的野外觀測，主要研究方法有二，第一是在科學園區及附屬園區利用密集的微地動量測，來確認場址振動主頻；第二是在科學園區附近佈設多部寬頻地震儀進行微震監測。藉由分析微震的時空分佈及破裂機制，找出園區附近斷層活動性及相關參數。

科學園區密集微地動量測

由於科學園區以半導體廠、LCD面版廠、生醫科技為主，對地動之敏感性極強，為瞭解園區微小振動特性，必須在科學園區內外進行密集微地動量測，平均測點距離為150~200公尺（科學園區內）及300~400公尺（科學園區周遭）。各測點之微地動量測資料經H/V頻譜比法計算後，進行各測點位置之振動主頻辨識，可得微地動振動主頻分佈圖（圖5、圖6、圖7）。新竹科學園區下方之地層呈現南北走向的摺曲，而摺曲的峰一峰約為2公里。此一現象與附近地表丘陵起伏狀況相類似。此外由主頻分佈圖可以看出竹科東北北方向（頭前溪南岸）的地層從地表至基盤之間並無明顯的界面存在（此處之界面為能有效捕獲地表微地動傳下之能量），而竹科西南南方向（國道一號及國道三號新竹系統交流道；双溪、寶山）靠近地表則有一層明顯的界面能有效捕獲地表傳下之震波能量。比對地質圖可知竹科東北北方向為更新世店子湖層（紅土、礫石、砂及粉砂之透鏡體），而竹科西南南方向為更新世

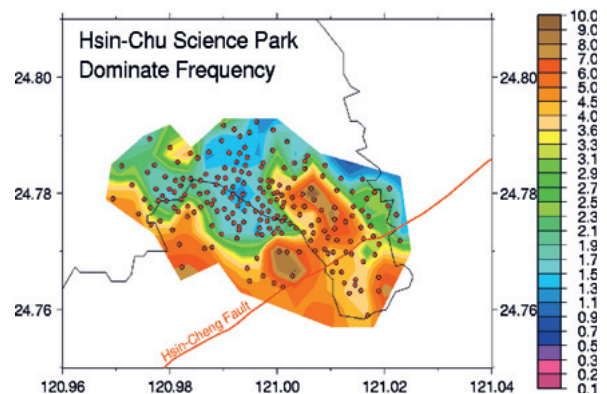


圖5 竹科微地動場址主頻圖。

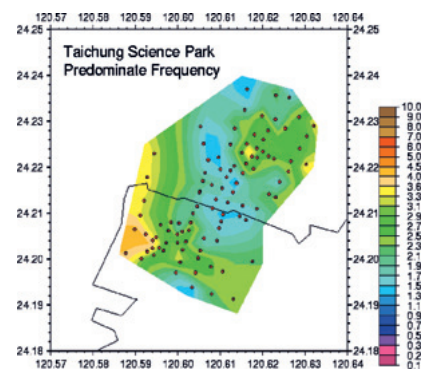


圖6 中科微地動場址主頻圖。

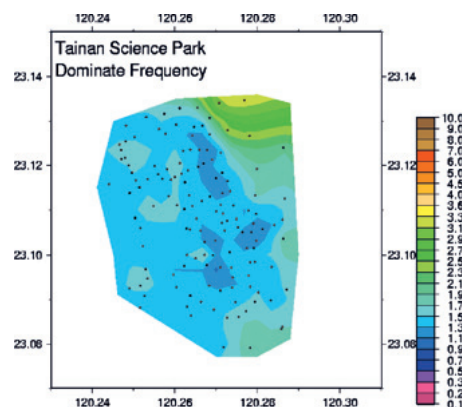


圖7 南科微地動場址主頻圖。

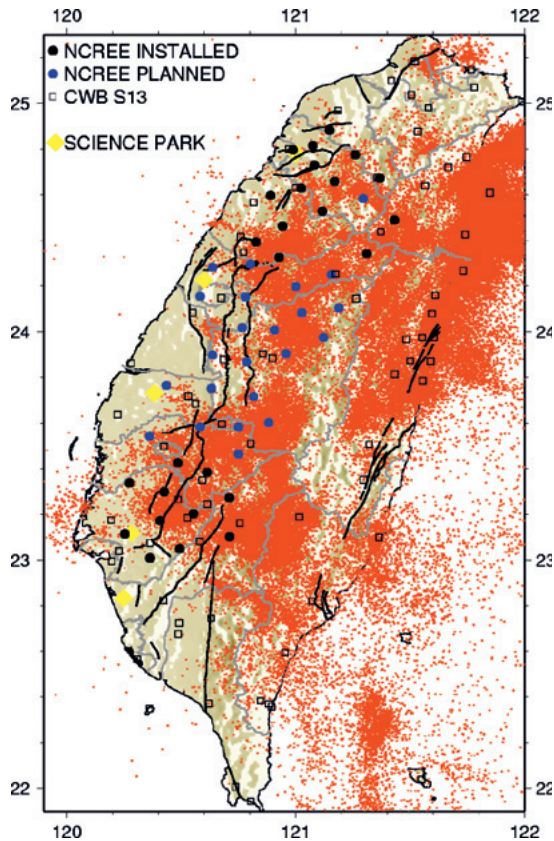


圖8 國震中心寬頻地震觀測站之設置，是依據氣象局過去16年觀測到的淺源地震分佈，涵蓋對三個科學園區有直接影響的西部麓山帶。

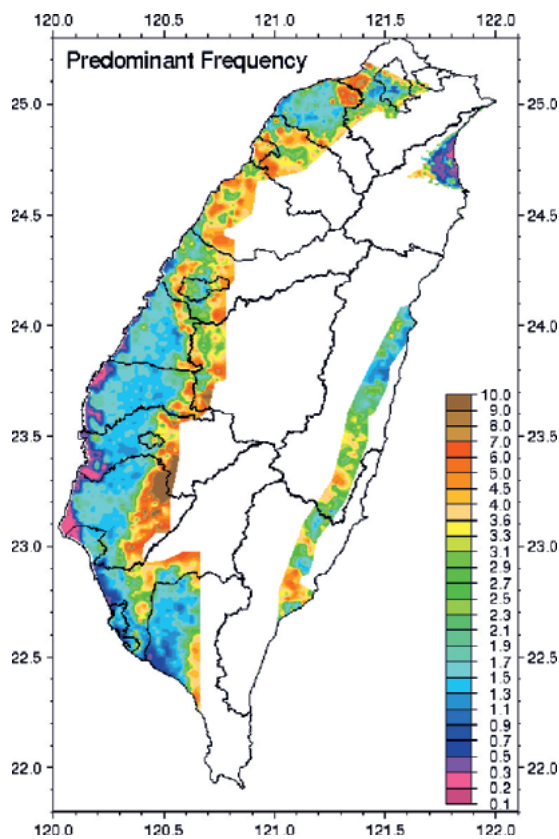


圖9 全台微地動場址主頻圖。

頭嵙山層（砂岩、泥岩、頁岩）。上述之微地動特性正是反應此區地層特性之變化。圖六中黑色線條表示台中縣市在西屯區、沙鹿鄉、大雅鄉的行政分界，也正好是大肚山的東翼，由此圖可以推論台中園區下方之沉積物厚度大致呈現由西向東增厚的趨勢，與丘陵地起伏趨勢相符，但是其中有些地點的沉積物其厚度增加不少。由圖七可以推論，台南園區下方之沉積物厚度大致呈現由東向西增厚的趨勢。此一現象與附近地表丘陵起伏狀況相類似。配合井下速度量測結果，顯示台南科學園區地表多為鬆軟膠結程度差的沙質土壤。因此，初步判斷台南科學園區必須注意地震發生時因鬆軟土層造成的場址效應。

科學園區微震網設置及觀測

就監測小區域地震活動而言，需小範圍之監測網。以目前氣象局全台地震網分佈而言，現有儀器無法有效偵測到一些微小地震；而強震網分佈雖然較密，但儀器之功能是在記錄較強的地面震動。但微小地震正是用以研究地震震源形態的重要依據，因此本計畫採購高靈敏度的寬頻地震儀，於2005年在新竹科學園區附近地區，2007年度在南部科學園區附近地區，設置了微震觀測網。觀測範圍包含新竹、新城、竹東、大平地、獅潭、神卓山、新化、左鎮、觸口、木屐寮、六甲等活動斷層。2008年底將在中部科學園區附近地區設置微震監測網，屆時受觀測的活動斷層將增加九芎坑、梅山、大尖山、屯子腳、彰化、車籠埔、大茅埔-雙冬等斷層（圖8）。當然，如果要將全台的地震發震構造進行研究，需要更多的儀器及研究人員參與。

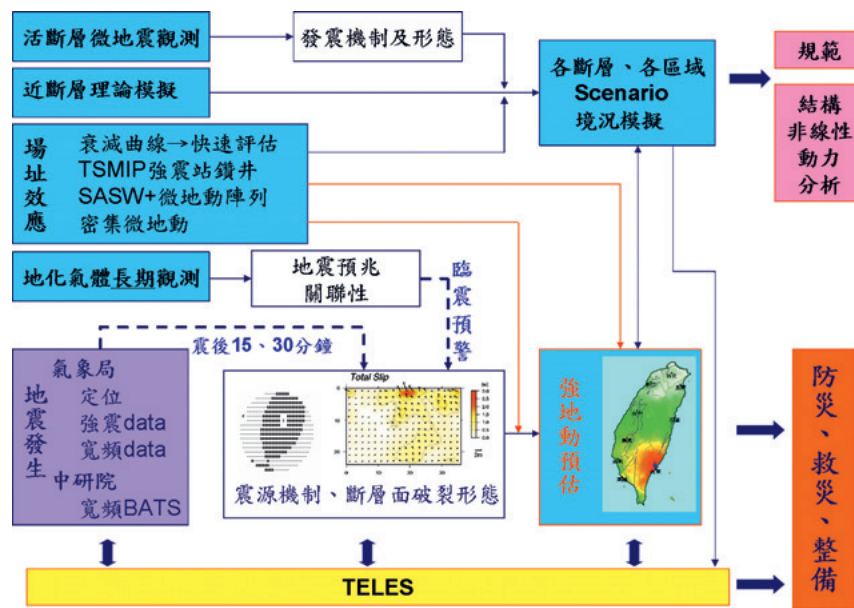


圖10 國震中心落實應用地震及地震前兆研究成果的架構圖。

目前國震中心已克服地震觀測的難題，發展出在城市邊緣地帶進行高精度觀測能力，未來仍會持續改進野外觀測技術並持續改進資料處理方法。而對觀測到的地震紀錄，目前正在進行：

- （1）精密定位；（2）解算地震斷層面機制；
- （3）描繪斷層面之弱帶，因為這很可能是未來大地震的發震機制及形態；（4）更新各區域速度構造，提高數值模擬精度。

未來發展方向：落實應用

除上述的土壤氣體觀測、微地震觀測、科學園區微地動量測，國震中心在這一項目下，還同時進行了不少研究，如進行多年的強震測站地質鑽探計畫、以微地動量測建立全台場址振動主頻（圖9）、以SASW及微地動陣列法求算土層剪力波速、震後快速評估震度圖、理論模擬近斷層破裂效應等。並統合在同一個架構之下（圖10）。此架構分四大塊：以微地震觀測描繪發震構造形態、場址效應研究、以土壤氣體觀測地震

前兆、以強地動預估及大地震境況模擬作為落實應用於規模修訂及防災救災整備工作。國震中心了解只有落實應用，才能真正展現出這些研究的價值，也才是真正為大地震作準備。

完成整合後，我們就有能力在地震發生後1小時後解出地震斷層面解，並計算出斷層面上破裂形態，而後計算各地不同場址特性的理論地震波形，據此可以立即比對重要結構物的設計反應譜，判斷受震損傷的高低程度。此外如能配合國震中心地震災害損失評估系統（TELES），更可判斷諸多社經損失參數。而平時可以根據各目標斷層，演算各種破裂情境可能造成的震災，據此研擬修訂各種防災應變計畫。如果大地震發生前數天或數小時，我們能有效偵測到土壤氣體濃度變化的地震前兆，在地震前就可以計算出可能的震災情境，即時提供給主管機關作為決策依據。