

陽明山國家公園管理處 委託調查報告（99-100 年度）

陽明山國家公園大屯火山群監測工作

（計畫執行時間：中華民國99年3月至100年12月）

總計畫主持人：林正洪（中央研究院地球科學研究所）

子計畫主持人：楊燦堯（台灣大學地質科學系）

子計畫主持人：陳洲生（中央大學地球物理研究所）

子計畫主持人：江協堂（台灣大學海洋研究所）

中華民國 100 年 12 月

學明一國本也

學明一國本也

目次

表次	III
圖次	V
一、摘要	1
二、計畫緣起	3
三、方法與原理	9
四、結果與討論	22
五、結論	49
六、建議	52
七、參考書目	53



表次

表一 MT 與 TEM 比較·····	19
表二 大屯山地區 GPS 觀測站·····	34

陽明大學



圖次

圖 1 全球火山分佈	4
圖 2 台灣北部之地形與主要地質構造區	4
圖 3 小油坑火山土壤氣體監測站配置圖	10
圖 4 逸氣通量計算示意圖	11
圖 5 噴氣孔溫度監測系統配件	12
圖 6 計算地球上的位置之參考座標示意圖	14
圖 7 常用的時間域電磁探測方法地面施配置圖	16
圖 8 TEM 系統在發射線圈內的階梯函數電流波形與接收線圈內所產生的感應電動勢波形	16
圖 9 良導體與不良導體暫態電壓衰減曲線圖	17
圖 10 terraTEM 主機與電池組，右圖為其發射的電壓曲線圖	17
圖 11 三維移動向量接收器	18
圖 12 暫態電磁法探測的線圈配置圖	18
圖 13 圈內模式測點分布示意圖	18
圖 14 竹子湖附近地區光達影像呈現山腳斷層位置與走向	20
圖 15 竹子湖附近之火山碎屑岩堆積層最危險之土石流潛勢區	21
圖 16 自 2010 年 1 月 1 日至 2011 年 10 月 31 日連續分析土壤氣體	23
圖 17 自 2010 年 1 月 1 日至 2011 年 10 月 31 日連續分析土壤氣體	24
圖 18 自 2008 年 6 月 20 日至 2011 年 10 月 31 日連續分析土壤氣體	25
圖 19 推測小油坑地區土壤逸氣示意圖	26
圖 20 小油坑噴氣孔溫度變化	29
圖 21 小油坑噴氣孔溫度變化之頻譜分析	30
圖 22 小油坑噴氣孔溫度與竹子湖氣象測站之雨量	31
圖 23 小油坑噴氣孔溫度與竹子湖氣象測站之氣溫	31
圖 24 大油坑噴氣孔溫度與竹子湖氣象測站之雨量	32
圖 25 大油坑噴氣孔溫度變化之頻譜分析	32
圖 26 大屯山及北臺灣地區 GPS 觀測站求得之地殼水平變形每年之平均速度	34
圖 27 大屯山地區 GPS 觀測站求得之地殼垂直變形每年之平均速度	35
圖 28 大屯山地區 GPS 觀測站(YM01)位置隨時間變化情況	36

圖 29 大屯山地區 GPS 觀測站(YM02)位置隨時間變化情況	37
圖 30 大屯山地區 GPS 觀測站(YM03)位置隨時間變化情況	38
圖 31 大屯山地區 GPS 觀測站(YM04)位置隨時間變化情況	39
圖 32 大屯山地區 GPS 觀測站(YM05)位置隨時間變化情況	40
圖 33 大屯山地區的歷年地震活動統計分布	41
圖 34 大屯山地區 GPS 站即時解算系統	41
圖 35 大屯山觀測站火山氣體與噴氣即時影像監測系統	42
圖 36 大油坑測區實況及 TEM 現場施測圖	43
圖 37 TEM 法測點分布圖	44
圖 38 大油坑測區 0.02s(ch10)之視電阻率分佈	44
圖 39 代表大油坑測區 0.135s(Ch26)之視電阻率分佈	45
圖 40 併合各時域資料所完成測區三維視電阻率屏圖	45
圖 41 大油坑測區 TEM 逆推後之電阻率三維屏圖	46
圖 42 大油坑測區 MT 與 TEM 施測成果之比較	46
圖 43 陽明山國家公園內竹子湖地區四處(三角形)土石流潛勢監測地 點	47
圖 44 湖田國小單頻 GPS 土石流潛勢監測站之室外天線接受器	48
圖 45 單頻 GPS 監測站之主要設備(包括室外天線接受器、記錄器及電 磁等)	48

一、摘要

本計畫主要將同時利用地球化學成份變化監測、地溫監測、地表地殼變形及微震監測、大地電磁法分析及土石流潛勢區位移監測等方法，對陽明山國家公園內之大屯火山群之可能地質與地震災害進行調查研究。

火山氣體中除了水氣之外，二氧化碳是含量最多的氣體；且在火山活動時，不只會從噴氣孔釋放也會藉由擴散作用已散置大氣中。本計畫設置火山土壤氣體連續監測站，利用土壤氣體中二氧化碳含量變化，配合其它觀測結果來監測大屯山地區可能之岩漿活動。經過有系統之土壤氣地球化學探勘後，在七星山亞群火山噴氣活動較為活躍區域的小油坑地熱區，選擇適當地點設置了土壤氣二氧化碳連續監測站。小油坑監測站自2008年06月20日運作至今，在這期間二氧化碳通量介於0.012 至3350 g m⁻² day⁻¹。結果顯示，土壤中二氧化碳通量明顯受到降雨量影響，在降大雨初期逸氣通量會突增，隨後因降雨改變土壤的滲透率造成逸氣通道不順而使逸氣通量下降。排除降雨影響外，逸氣通量亦有明顯變化，此大幅之通量變化有可能與當地之地熱活動有關。本監測站亦已增設雲端資料記錄模組、搭配無線網路將數據，即時傳送至網路雲端料庫，以達到即時監測的目標。

地表噴氣孔溫度監測計畫於2009年開始在小油坑裝設一套溫度監測系統，並將即時監測的溫度資料展現於小油坑遊客中心內的電腦螢幕，提供很好的火山教育訊息，約三年的監測結果發現，噴氣孔的溫度大都維持在95.2-95.9°C，溫度變化約0.7°C，但2010年11月2日至2011年1月9日，溫度下降約1.9°C，原因不明，時頻分析結果，溫度變化從開始至今一直都有12小時週期訊號，但24小時週期訊號不明顯，由於地潮有相同的週期性變化，推測地潮的作用改變地下水位或岩石的應力，使地下噴氣的流速發生變化，進而使噴氣孔溫度產生此週期性變化。本計畫在大油坑於2010年5月另設置一套溫度監測系統及2011年10月再設一套自動回傳系統，監測結果，2011/2/11至2011/3/31期間的溫度變化介於94.8°C至96.7°C，50天的溫度變化約1.9°C，而2011/10/13至2011/11/23新設置的自動回傳系統儀器所記錄之溫度變化介於96.9°C至100.9°C之間，40天之內溫度變化約4.0°C，溫度的變化似乎有變大的現象，溫度資料之時頻分析結果並未發現明顯的週期訊號，顯示大油坑噴氣孔的溫度主要受控於噴氣，不易受到地

表環境因子的干擾，因此，本站的溫度變化比較可以直接指示地表下噴氣流體的活動情形。

本計劃於陽明山國家公園內持續維護一個共有五個地殼變形觀測站(GPS)，來監測七星山附近之火山活動可能引起之地殼變動。利用大屯山地區五個地殼變形監測站(GPS)獲知大屯山地區與台灣北部地區，每年之平均地殼變形之速度大約以 2 到 3 公分左右向東南方向移動。大屯山地區五個地殼變形監測站觀測之結果，在水平地殼變形速度非常相似，但在垂直地殼變形速度卻有少許差異。此外並發現有些地殼變形監測站隨時間之有明顯之變化，可能解釋之原因可包括季節性之變化，地震活動度有關及其他未知之因素，這些均有待進一步監測與分析。

為協助調查陽明山國家公園內坡度陡峭之不穩定地區堆積層厚度及其分佈，先選在大油坑處，以時間域電磁法(Time domain electromagnetic method) 測試，紀錄電阻率分佈，研判出岩盤形貌及其上覆之堆積層厚度，結果顯示該處之堆積層厚度約 7m，呈東西向分佈，而其下之岩盤相當固結，此調查方法克服了山區地形之限制，有效率而便捷地測獲深部資料，可推廣運用到陽明山國家公園區坡度陡峭之不穩定地區供引發土石流、山崩及地滑等現象之預警參考。為探討陽明山國家公園內火山灰或火山碎屑岩堆積層、土石鬆軟區及坡度陡峭之不穩定地區，在火山地震或颱風暴雨後，是否會引發土石流、山崩及地滑等現象，依據過去利用光達影像及火山碎屑岩堆積層最危險之土石流潛勢區調查結果，選擇於竹子湖附近逐年設樁進行位移監測之地點，裝設單頻 GPS 土石流潛勢監測站，進行長期地表位移監測工作。

政府於民國一百年底，為了增進我國對於火山觀測之能力及了解大屯火山活動的現況，已積極整合現有的研究成果，並提升主要觀測方法達到即時監測的功能，在陽明山國家公園內之菁山保育中心設置了大屯火山觀測站(TVO)。目前主要的火山即時監測方法包括有(1)火山地震活動監測、(2)火山氣體與溫泉水的化學成份分析調查、(3)地殼變形的量測、(4)地溫監測及(5)噴氣即時影像監測。未來正積極規劃加入傾斜儀、重力、地磁、衛星影像等不同方法，以達到更完整之火山監測目的。

二、計畫緣起

西元 2010 年四月冰島火山再次噴發，大量的火山灰散佈在歐洲上空，迫使許多機場關閉，航空班次大亂，許多觀光及商務旅客大量滯留機場，航空貨運也大受影響。短短幾天內歐洲國家航空公司曾取消接近上萬航次的航班，其停飛的規模已經超過美國 911 恐怖攻擊，這也是自第二次世界大戰以來最大規模航空業停飛，估計經濟損失達到數十億歐元。事實上，火山噴發，從古至今曾給人類帶來了許多可怕之災難。例如，大約兩千年前意大利維蘇威(Vesuvius)火山噴發，當時繁華的龐貝古城被火山灰掩埋。希臘桑托林(Santorini)島的火山噴發，並同時觸發一次駭人聽聞的大海嘯(波高超過 60 米)，導致公元前 1470 年間米諾斯文明突然消失。一兩百年前印度尼西亞坦博拉火山猛烈大噴發，造成的直接死亡人數約 1 萬人，噴發次年全球氣候異常，有數萬人死於噴發後的飢荒和疫病。中國長白山天池火山的千年大噴發，摧毀了方圓數十公裡半徑內的森林生態，使遠在四百至五百公裡之外的朝鮮開城地區的上空被濃密的火山灰籠罩，火山灰甚至還飄到日本北部。西元 1982 年墨西哥埃爾奇瓊火山噴發，進入大氣圈的火山灰雲和硫酸氣溶膠組成的高空雲層，從墨西哥一直延伸到沙特阿拉伯上空，到達地面的陽光總量減少導致全球平均氣溫下降，受這次火山災害直接影響的人數達十餘萬。即使 21 世紀的今天，地球上仍有因板塊活動所造成之活火山活動 (圖 1)，隨時可能會再對人類文明造成威脅。小規模的火山噴發也許僅會對其附近城市與村莊造成破壞。大規模的火山活動，可能會影響全球的生態，甚至造成全面性的生物滅絕，其主要原因是大量火山灰會遮蔽了陽光，讓地球上生物無法獲取所需的太陽能，造成嚴重的生態浩劫。

緊鄰於台北盆地之陽明山國家公園內大屯火山群 (圖 2)，為台灣唯一具有火山自然景觀之國家公園。根據過去地質調查顯示，雖然大屯火山群已經沉寂長久，但是地表地熱活動還是很明顯，故大屯火山群是否復活的可能性，不僅是一個值得研究的科學問題，更關係大台北附近民眾的生命財產安全。初步的氦同位素研究結果顯示，大屯山地區的噴氣與溫泉氣仍有大於 60% 源於深部地函源的氣體組成(Yang et al., 1999; 楊燦堯, 2000)，暗示台灣北部地底下仍有非常大可能性有岩漿庫的存在。同時根據過去的幾年的地震觀測結果(林等 2006)，強烈地說明陽明山國家公園內之七星山附近，有明顯的微震活動存在。而且在這些微震中，並發現有明顯地群震現象。此外，仔細比較每一測站每天之連續地震記錄，也發現有異常的火山地震訊號(Lin et al., 2005a, 2005b)，例如

地震波形類似螺絲釘及單頻水滴狀地震紀錄。雖然依目前之地震資料，無法清楚判識這些群震現象與異常訊號之來源，但其特徵卻與一般火山地區之岩漿或熱水活動相似，

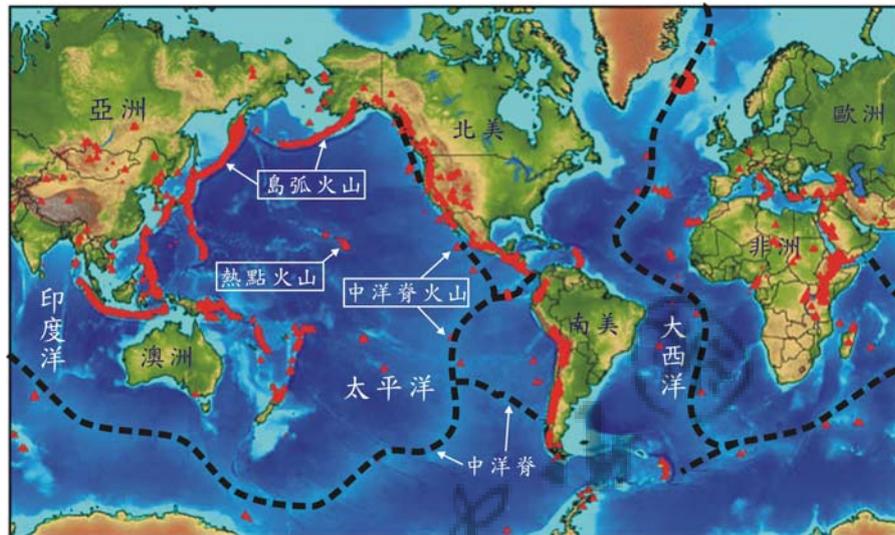


圖 1 全球火山分佈(紅色三角)。

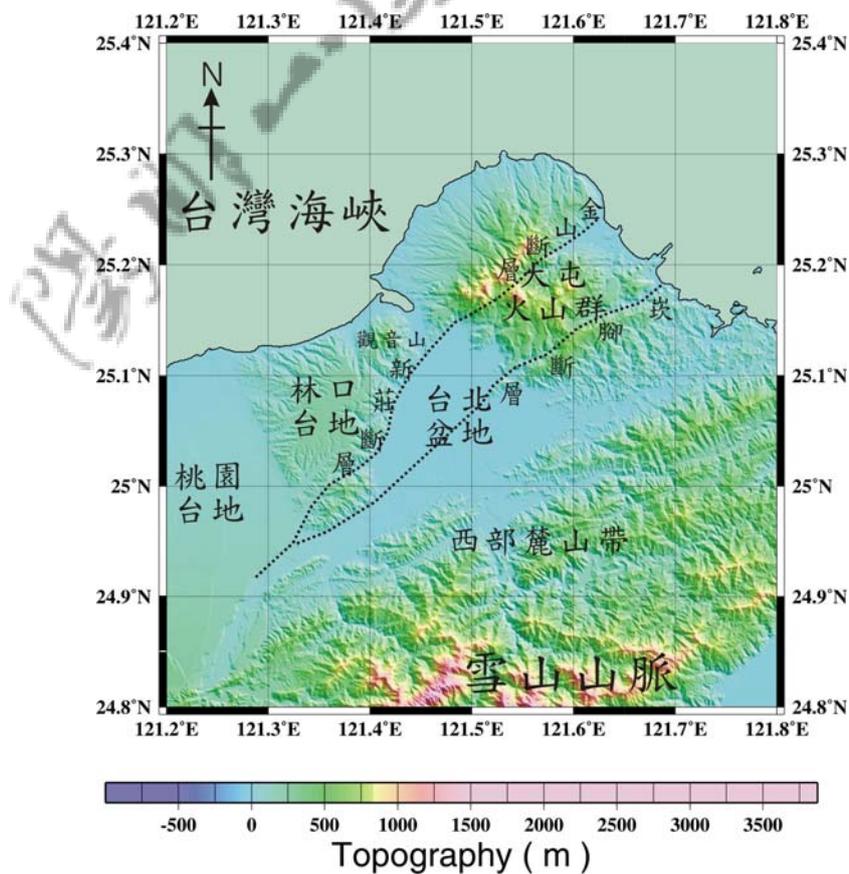


圖 2 台灣北部之地形與主要地質構造區。

故很值得作更進一步之探討與研究。

想要掌握火山活動的規模或時間，根據日本、美國、義大利、紐西蘭和菲律賓等國家監測火山活動的經驗，可採用多種不同地球科學方法(地球物理與地球化學)方法來完成。火山岩漿存在與否，除了可由其岩漿之活動產生火山性的地震分佈與震源特性之研究而獲知外，亦可由地球化學成份變化、地表地殼變形、大地電磁法及地溫監測等方法來評估。

大屯火山群位於西環太平洋火山地震頻繁帶上，且與岩漿活動有關的地熱活動仍然十分頻繁。過去數個研究認為台灣北部火山活動是因菲律賓海板塊向西北隱沒所造成島弧岩漿活動，大屯火山群為琉球島弧向西的延伸（陳正宏, 1990; Teng et al., 1992; Teng, 1996）。然而 Wang et al. (1999, 2002) 指出這些具有「島弧」地球化學特徵的熔岩，不一定與現在正在進行中琉球海溝隱沒作用有直接關係。這些岩漿活動，可能與台灣北部因為碰撞作用所生成的造山崩解張裂作用（extensional collapse）有關。若是此說法是正確的，則傳統認為大屯山及北部諸火山島已經逐漸停止活動的看法將必須要作很大的修正，因為台灣北部的張裂活動現正逐步加強發育當中，若是地殼下方有岩漿庫存在，則隨時有可能提供管道給岩漿噴發至地表。

根據氦同位素資料、原生火山灰薄層、和微震資料指出大屯火山群可能是潛在性活火山。已有的氦同位素研究結果顯示，大屯山地區的噴氣與溫泉氣仍有大於 60% 源於深部地函源的氣體組成（Yang et al., 1999; 楊燦堯, 2000; 楊燦堯等, 2003），暗示台灣北部地底下仍有非常大可能性有岩漿庫的存在，其最可能之岩漿庫位置可能在有最高氦同位素比值火山氣體成份的大油坑底下；Song et al. (2000) 更據此推論大屯火山群可能為一活火山。Chen and Lin (2002) 由台北盆地之鑽井岩芯中，發現在松山層中夾有原生火山灰薄層，且推論其最有可能為大屯火山群之噴發產物，假設松山層最老的沈積年代為兩萬年以前，所以他們推論大屯火山群最近的一次噴發紀錄應該年輕於兩萬年前。最近學者於大屯火山群內鑽井開挖發現了原生火山灰，由地層中發現的碳化木定年結果顯示此火山灰距今約為 5000 年（Belousov et al., 2010）。此一年輕的噴發記錄，又加強了大屯山底下可能仍有岩漿庫活動的說法。Lin et al. (2005a, b) 地震監測資料分析結果顯

示，在七星山底下確有異常的地震活動，可能與岩漿熱液活動所引發的微震有關，非常值得持續對當地的可能岩漿活動進一步監測，根據以上種種跡象顯示大屯火山群可能為活火山，故對大屯火山活動之長期監測，為一重要而急迫的工作項目。

土壤氣體是存在於地下的氣體，可能由生物或是地質等作用產生；由於氣體密度低而經由土壤中的裂隙擴散至地表。土壤氣體的成分與大氣有顯著的差異，藉由成份的分析及各種性質的探討，給予我們許多地質意義上的解析。其應用範圍廣泛包括有礦床、地熱及石油蘊含的分佈、地震預測及新構造的研究等 (King et al., 1996; Klusman, 1993; Lombardi and Reimer, 1990; Schumacher, 1991)。在火山調查與監測的應用方面：不論火山處於活動或休眠狀態，只要有岩漿活動，大量的火山氣體就會由火山地區釋放到大氣中。而火山氣體不僅會由噴氣孔或是火山口逸散，周圍的土壤也是相當重要的逸氣管道，火山氣體經由擴散作用而被釋放到大氣中 (Allard et al., 1991)。火山氣體在除水之後的氣體成份以二氧化碳含量較高，同時也是岩漿上升過程中，首先脫離的氣體之一，因此二氧化碳可以用作探討岩漿活動的有利工具 (e.g., Giggenbach, 1996; Symonds et al., 1994; Lee et al., 2005; 2008)。利用觀測土壤氣中二氧化碳的釋放，來監測火山活動，是相當重要的火山預報機制之一，並且可以讓科學家在安全的距離內監測火山活動 (Lan et al., 2007)。

本計畫首先利用土壤氣體中二氧化碳含量變化，配合其它觀測結果來監測大屯山區可能之岩漿活動。研究地區將以七星山區火山噴氣活動較為活躍的小油坑地熱區為主，經過土壤氣體地球化學探勘後，選擇適當位置設置一座土壤氣二氧化碳連續觀測站，希望藉由對二氧化碳濃度的連續觀測，達到監測本地區可能火山活動之目的。

此外，長期監測地溫亦是探討火山活動的主要研究工作之一 (Tillting, 1989)，當火山地區地底下存在岩漿庫、殘餘的岩漿或有後火成活動，則在地表附近常可發現較高的地溫，地底下的地溫梯度也會偏大，並呈現較高的熱流值 (Zeni et al., 2007)，然而測量這些溫度參數並無法探討火山的活動性，如要從溫度因子探討地底下火山的活動，必須對地溫做長期的監測，溫度的變化趨勢才能推測地下火山的活動化 (Sudo and Hurst, 1998)。地下溫度的監測需要打井，再於井內裝設監測儀器，此種作法費用較昂貴，噴氣孔的噴汽是後火山活動的流體，其溫度的變化可能跟地下的流體有關，本計畫改採監

測地表噴氣孔的溫度變化，探討噴氣孔的溫度變化是否會跟地底下流體的活動有關，以達到監測火山活動的目的。

小油坑和大油坑位於大屯火山區七星山周圍，該地區具強烈的後火山活動（Song, 2000），噴氣孔噴出的蒸氣可綿延數十公尺高，從遠處即可看到高聳的白煙，小油坑遊客中心步道入口處附近在地面上發現許多小型的噴氣孔，噴氣孔周圍常有黃色的硫磺結晶，噴氣孔附近的岩石受熱換質作用變成黏土，岩石強度降低，用鐵鎚輕敲即會破碎，有些地方有地下水通過，水與黏土混和形成滾燙的泥漿池，顯示本地區噴氣孔的一些地質作用與地下流體活動息息相關，在這兩個地方進行噴氣孔溫度監測，最有可能探討地溫變化與火山活動的關係，過去井下的地溫監測結果發現，七星山周圍地下存在一厚 200 公尺的地下水對流包，地下數百公尺內的溫度會有一些變化，雖然其機制尚不十分清楚（江，2010），但溫度顯示地下溫度場確實會有變化。本研究自 98 年 6 月起於小油坑開始進行監測噴氣孔溫度，去年（2010 年）於大油坑另設置一套溫度監測系統，今年（2011 年）10 月再於大油坑設置一套溫度記錄自動回傳系統，可省去人力定期至野外收取資料的麻煩，溫度監測資料除了有學術上的研究價值外，若能將監測資料即時展示在公共場所（如遊客中心），讓遊客可以隨時了解這些訊息，亦是一項富有教育意義的工作，在小油坑監測系統除了記錄溫度資料外，藉由該場地電力、建物、設備等之便，我們將溫度監測資料以即時的方式顯示於小油坑遊客中心內的螢幕看板，因此，遊客在中心內觀賞簡介或休息時，即可看到噴氣孔溫度的變化情形，提供遊客對噴氣孔的性質進一步的了解，此套監測系統是國內第一個將火山噴氣孔溫度即時展示於公共場所之案例，具遊客中心工作人員和解說志工表示，遊客反應良好。

此外根據日本、美國、義大利、紐西蘭和菲律賓等國家監測火山活動的經驗，火山岩漿存在與否，除了可由由其岩漿之活動產生火山性的地震分佈與震源特性之研究而獲知外，亦可由地表地殼變形之情況來評估。其中利用全球衛星定位系統(GPS)的定位可以紀錄地表的三軸座標，進而計算高程的變化，其結果類似水準測量，均可以提供非常高精確度之地殼變形資料。若是在適度地配合高精密度之水準測量結果，對陽明山國家公園內之大屯火山群之地殼活動進行監測。

依據過去幾年對陽明山國家公園園區內大地電磁法之調查發現，從七星山到大油坑

之地表下東西向之二維電性構造剖面，在 10 公里深度內，大至呈現隆起之構造，電性地層呈層狀分佈。此外七星山到大油坑之表層約 500 m 厚，係良導體，主要原因可能是火山之熱水對流所致，此岩層之孔隙率相當高。七星山到大油坑之地下約 6 Km 深處，發現一形貌近似球狀構造，是否岩漿活動有關則尚待仔細澄清。

綜合上述多項火山監測與分析成果，同時並配合地震監測來研究大屯火山群，期許未來能辨識岩漿庫之可能之位置、大小和形狀；岩漿之運動形態；岩漿運動行為與周遭地震與斷層活動之關連性，進出配合各項監測系統之建立，我們期望能進行火山爆發之預報。

三、方法與原理

本計畫主要將同時利用地球化學成份變化分析、地溫監測、地表地殼變形、時間域電磁法及土石流潛勢區位移監測等方法，對陽明山國家公園內之大屯火山群之可能地質與地震災害進行調查研究。分別簡單說明如下：

(1) 地球化學成份變化分析：

監測站設置的原理為近年來最常被使用的密閉式氣罩法 (Chiodini et al., 1998)，主要由三部分組成：二氧化碳分析儀、密閉氣罩、定時抽氣泵浦。主要使用的儀器為 EDINBURGH 所製造的二氧化碳分析儀，使用 NDIR 紅外線感測器，偵測範圍為 0-30%，內建抽氣泵浦，其流速為 1 L min^{-1} 。密閉容器的總體積為 11245 立方公分，高 21.5 公分、底面積為 523 平方公分，容器上有四個可供氣體進出的連接孔，為了避免內部壓力過大而影響氣體通量的變化，於是我們加裝毛細管以維持內外壓力平衡，免除壓力造成的影響。土壤氣體藉由擴散作用向上擴散至地表，利用鐵桿提供一順暢的逸氣通道使氣體可以在短時間內逸散至地表以利進行分析，除此之外還可以定期採集土壤氣體回實驗室進行成份分析。監測站內部預留 2 支 PVC 管，以供氬氣分析儀使用。此外，由於二氧化碳密度較空氣大，易沉降於低處而造成濃度不均勻，因此於容器內部裝置一轉速固定的風扇，用以均勻混合空氣與二氧化碳。為防止水氣進入儀器造成損壞或誤差，容器管線連接至儀器前加裝一乾燥劑，氣體在進入二氧化碳分析儀後，出氣端再將氣體導回密閉容器形成一迴路（詳細的設置如圖 3 所示）。同時，我們也關心環境因子對土壤二氧化碳逸氣通量的影響，因此加裝土壤溫度計；本研究使用 Testo 175-T2 的數位式溫度記錄器，本機型除了主機內部有溫度感應器之外還可以再外加一支探棒 20 公分以測量土壤溫度，溫度測量範圍主機部分為 -35°C 至 70°C ；探棒部分為 -40°C 至 120°C 。

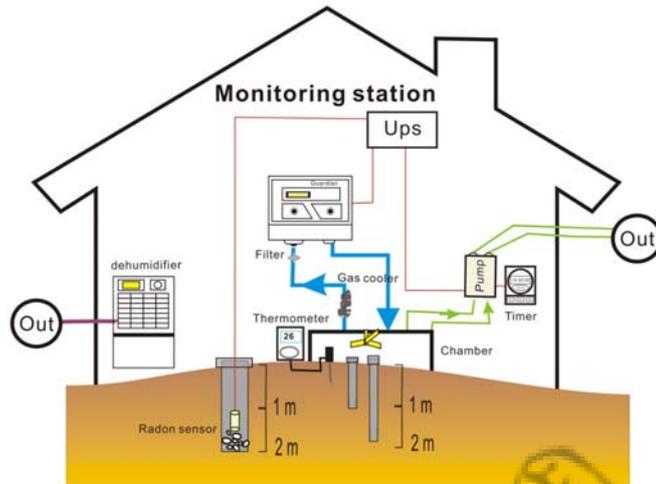


圖 3 小油坑火山土壤氣體監測站配置圖。

本監測站之分析系統中設定分析時間為每 5 分鐘一筆資料，可 24 小時連續分析。而每經過 1 小時，開啟容器另外兩接口的抽氣泵浦，將容器內部的氣體排出觀測站。經過 11 分鐘，泵浦便停止動作不再抽氣，使得容器內部的氣體可繼續累積。我們利用回歸線得到二氧化碳每分鐘的平均增加量之方法以計算其通量變化。以圖 4 的分析數據為例，由於我們設定整點啟動抽氣泵浦將密閉容器中的二氧化碳排出，於是在第五分鐘和第十分鐘所紀錄到的數據是呈現下降的；從第十五分鐘開始累積二氧化碳、直到六十分鐘止為一循環。我們利用線性迴歸方式，求得此段時間內二氧化碳增加的回歸方程式，該方程式中的斜率即代表此段時間內二氧化碳的通量。再經過單位換算，我們可以得到國際間常用的通量單位數值（如 $\text{mole m}^{-2} \text{day}^{-1}$ 或 $\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$ ）。

在火山地區中，具有酸蝕的硫化氫和二氧化硫等酸性氣體是儀器的頭號公敵，加上山區架設網路並不方便，因此無法在監測站中將設置電腦與儀器連接再利用網路將數據傳送回實驗室。我們現在已增設雲端資料記錄模組、和 3G 網路，將監測站數據即時地傳送至網路平台資料庫中；我們只要利用網際網路即可隨時監看目前的數據資料，以達到即時監測的目標。當網路收訊較差時，本雲端資料記錄模組內建 20,000 筆資料暫時儲存，等到訊號回復時再將數據依序傳送至雲端資料中，因此可以保障資料的完整性。

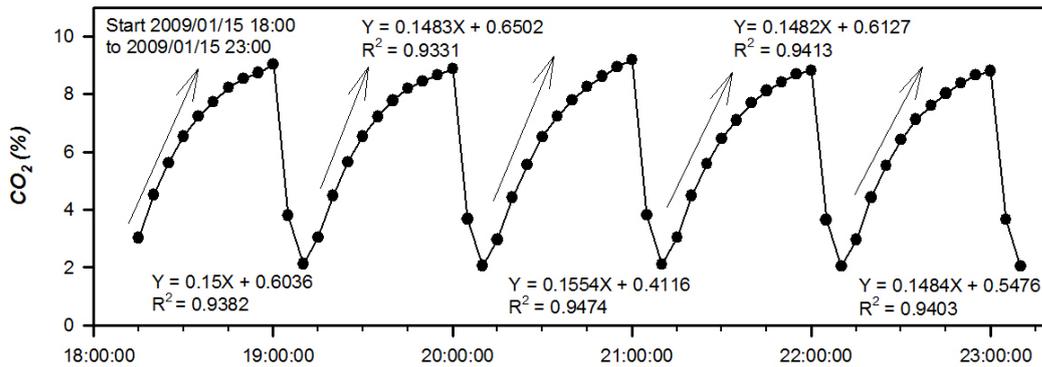


圖 4 逸氣通量計算示意圖。我們取第 15 分鐘至 60 分鐘間的 10 筆數據，計算其增加速率再經換算得出每小時的逸氣通量。

(2) 噴氣孔溫度監測:

噴氣孔的溫度可能都在 80、90°C 以上，一般電子式的溫度記錄器無法耐此高溫，因此溫度感應器和溫度記錄器、資料儲存設備等必須分開，本研究所建置的地溫監測系統主要分成兩個部分：溫度感應器以及資料儲存設備，溫度感應器為一高敏感度、高穩定性白金電阻，由於電阻與溫度有一定之關係函數，若能測得電阻的變化即能得知當時之溫度大小，由於白金電阻穩定性高，以溫度解析度 0.1°C 而言，並不需要經常進行溫度校正，溫度感應器感應到的溫度資料，可經由電纜線傳到溫度記錄器內，其運作方式是記錄器在電纜線中傳出一固定電流，量測流經白金電阻兩端之電壓即可得知白金電阻的大小，再將電阻大小換算成溫度值，記錄在儲存設備內，為降低雜訊，電路採三線式迴路。於小油坑所使用的監測系統，解析度約 0.1°C，另用於大油坑地區的監測系統則為台灣大學海洋研究所研發的微小型熱探針經改良而成，該熱探針已多年使用於台灣附近深海進行地熱探測，微小型熱探針將電源和電路系統縮小在直徑 2.2 公分、長 24 公分的鈦合金圓柱管內，電路系統耗費的電量非常低，以一顆 15KWhr 的 1 號電池裝設在外加的電源供應座上來說，可維持整個監測系統運轉所需的電力約 10 年，記錄器使用電流差分概念，配備精密的參考電阻，可使溫度的解析度高達 0.0001°C，可記錄溫度細微的變化。

野外設置噴地溫氣孔溫度監測系統方式為：挑選適當的噴氣孔位，避免人員被噴氣灼傷；將鈦合金溫度感應器插入噴氣孔；埋設連接溫度感應器與記錄器的鐵弗龍電纜線；架設收納記錄器之鈦合金儀器箱，要注意隔絕外面的酸性氣體進入儀器箱內；啟動記錄器，之後定期收取資料及維護測站設備。記錄器每三分鐘測錄噴氣孔溫度一次，記憶模組可連續記錄資料時間約 2 年，工作人員每一至兩個月前往現場收取資料並維護儀器設備，溫度資料可用 excel 程式繪圖，察看溫度隨時間的變化情形，同時也會進行頻譜分析，以探討溫度的週期性變化。

有鑑於野外儀器內的記錄資料必須依靠人員定期前往收取，若能藉由 GSM 或其他方式將資料自動傳回實驗室，則可以節省人力成本，儀器故障發生問題無法記錄時，也可以隨時得知，對提高資料記錄效率上有很大的助益，今年 9 月我們嘗試在大油坑設置一套溫度記錄自動傳回系統，溫度感應器、纜線等等跟先前設備一樣，但為配合資料自動回傳方式，記錄器改用 CR800，該記錄器溫度解析度為 0.01°C ，由於噴氣孔溫度日變化可達 0.1°C ，因此 0.01°C 的解析度尚可以接受，測試兩星期後，除中間因太陽能電力不足，導致資料無法回傳外，在加裝另一顆蓄電池後，目前已運作正常，每天固定時間，資料回傳一次，記錄正常。



圖 5 噴氣孔溫度監測系統配件。包括溫度感應器、電纜線、溫度記錄器、訊號傳輸線、筆記型電腦（收取資料）等。

(3) 地表地殼變形:

本計畫以精密的全球定位系統儀器，測量微小地殼變形。所謂全球定位系統(Global Positioning System，通常簡稱 GPS) 是一個中距離圓型軌道衛星導航系統。它可以為地球表面絕大部分地區提供準確的定位。該系統利用地面上 GPS 站來接收用太空中 24 顆 GPS 衛星之訊號，來計算地球上 GPS 站所處的位置及海拔高度。最少只需其中 4 顆衛星，就能迅速確定用戶端在地球上所處的位置及高度。地球上任何一點均能觀測到 6 至 9 顆衛星。所能收聯接到的衛星數越多，解碼出來的位置就越精確。使用者只需擁有 GPS 接收機，無需另外付費。GPS 系統擁有如下多種優點：全天候，不受任何天氣的影響；全球覆蓋（高達 98%）；三維定速定時高精度；快速、省時、高效率；應用廣泛、多功能；可移動定位。

GPS 衛星是由洛克菲爾國際公司空間部研製的。在星體底部裝有 12 個單元的多波束定向天線，能發射張角大約為 30 度的兩個 L 波段（19cm 和 24cm 波）的信號。在星體的兩端面上裝有全向遙測遙控天線，用於與地面監控網的通信。此外衛星還裝有姿態控制系統和軌道控制系統，以便使衛星保持在適當的高度和角度，準確對準衛星的可見地面。由 GPS 系統的工作原理可知，星載時鐘的精確度越高，其定位精度也越高。1981 年，休斯公司研製的相對穩定頻率為 10^{-14} /秒的氫原子鐘使 BLOCK IIR 型衛星誤差僅為 1m。

GPS 定位原理:

以地心為三度空間座標上原點(圖 5)，XY 軸在赤道平面上，X 軸貫穿經度 0 度與 180 度，Y 軸貫穿東西經 90 度，Z 軸貫穿南北兩極，距離地心半徑 R 的球體方程式如下:

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2$$

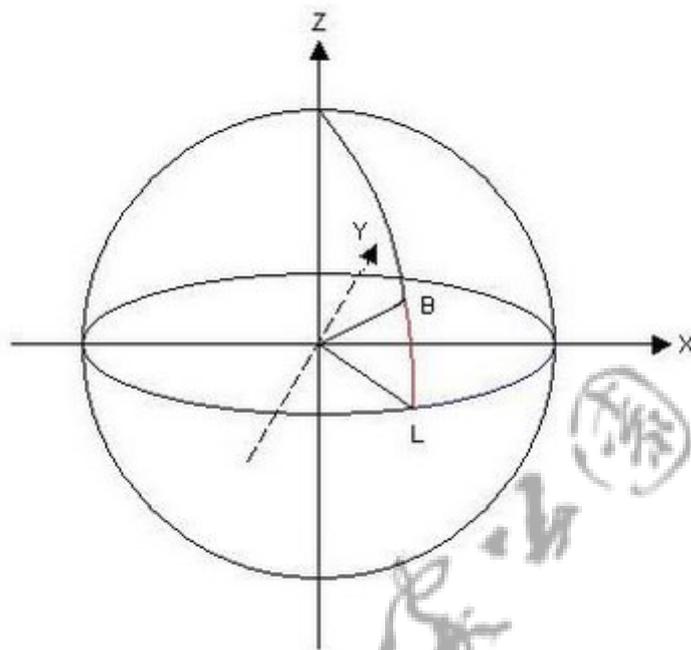


圖 6 計算地球上的位置之參考座標示意圖。

利用全球共有 24 顆 GPS 衛星，分佈在六條相交 30 度的軌道上，任何地方只要能接收四顆衛星資料，就可以計算出在地球上的位置(圖 6)。GPS 衛星傳遞的訊號包括衛星自身 (a, b, c) 座標資料以及發射時間，那麼 GPS 接收器就可以利用這些資訊計算位址。

(4) 時間域電磁法

時間域電磁法 (Time domain electromagnetic method, TEM)，亦稱暫態電磁法 (Transient electromagnetic method, TEM)，而先前計畫中監測使用為大地電磁探測法 (Magnetotellurics, MT)，屬於頻率域電磁法。茲將 TEM 探測法之原理、方法與儀器簡述於下。

TEM 探測原理，類似一般熟悉的透地雷達，但探測深度較透地雷達為深；一般透地雷達測深為 10m 內，但 TEM 測深可達 100m 以下。TEM 探測的主要原理是以方波電流通入在地表面不接地的封閉線圈內(圖 7)，如果將線圈內的電流突然切斷(圖 8)，會使原

先在封閉線圈周遭已經建立的磁場突然產生變化，此變化將造成地下導體被感應產生二次磁場(依循法拉第感應定律)，該二次磁場，可被地表之接收線圈所測獲，TEM 即是量取該二次磁場(實際上接收線圈記錄的是二次磁場之感應電動勢)隨時間之變化值，藉以獲取地下岩層導電的相關訊息，亦即電動勢越強反應目標體越好導電，越晚期訊號反應越深部訊息，是一種效率極高的地電探測方式。圖 9 展示良導體與不良導體暫態電壓衰減曲線圖，由輸出的暫態電壓值高低與其衰減的現象可據以判斷地下岩層的電阻率及其位置(Smith, et al., 1994)。

TEM 的儀器設備，主要有：暫態電磁儀 (terraTEM)、三向量接收器 (Roving Vector Receiver) 等。

圖 10 為暫態電磁儀，主要功能係輸出電流導入發射線圈以產生一次磁場，最大輸出電流為 10A，並於接收線圈量測由二次磁場感應產生的暫態電壓。terraTEM 系統為澳洲 MONEX GEOSCOPE ALPHA GEOINSTRUMENTS Monash University Alpha Geoscience P/L 生產的暫態電磁儀，內含 Pentium-III 等級的中央處理器 (CPU) 與 15 吋 TFT LCD 觸控式顯示器 最大輸出電流 10 A 與固定增益的接收線圈，具內部測試電路與一至三個輸入選擇，接收器取樣率為 16-bit A/D 500 kHz 並可選配全球衛星定位模組 (GPS module)，主要目的在探查地下導體的位置(如地下水、礦脈探查)及地層描繪、污染追蹤、工程基址調查等，運作模式為對發射線圈通入方波函數的電流以產生 Khz 以下的脈衝，接收並記錄散射回來的訊號，量測接收線圈內的暫態電壓。

圖 11 為移動向量接收器，簡稱 TRC-RVR。主要功能係接受來自垂直於地面方向 (即 Z 軸) 與平行於地面 (即 X 或 Y 軸) 的二次磁場感應產生暫態電壓。內建多匝線圈與前置放大器，由±12 V (120 mA) 電源提供訊號放大功能，可以產生等同於單圈面積 1000m² 的接收線圈效果，每個分量的輸入都可以獨立操作濾波與訊號增益。

暫態電磁法探測主要係接收來自地下導體所產生的二次場，因此發射線圈與接收線圈的配置對於探測結果影響相當顯著，圖 12 為二種常用的線圈配置模式，一為共圈模式 (coincident)，發射線圈與接收線圈的形態與面積相似，可以測得大面積範圍內的平均效應，常用以探測深部目標，另一為圈內模式 (in loop)，以 RVR 在發射線圈內移動接收訊號，接收線圈範圍小，接收點密集可以解析細部構造(圖 13)。

Surface TEM

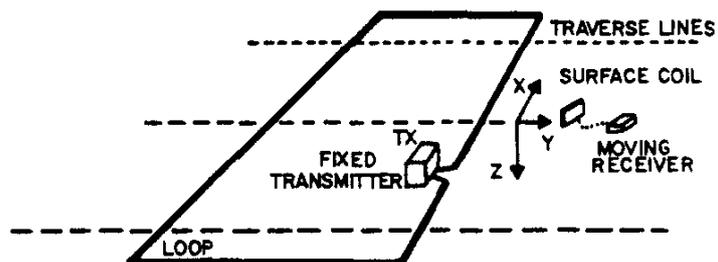


圖 7 常用的時間域電磁探測方法地面施配置圖

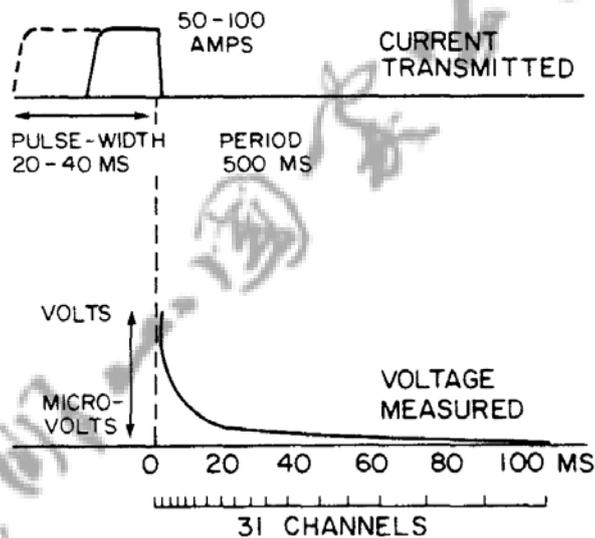


圖 8 TEM 系統在發射線圈內的階梯函數電流波形（上圖）與接收線圈內所產生的感應電動勢波形（下圖）。

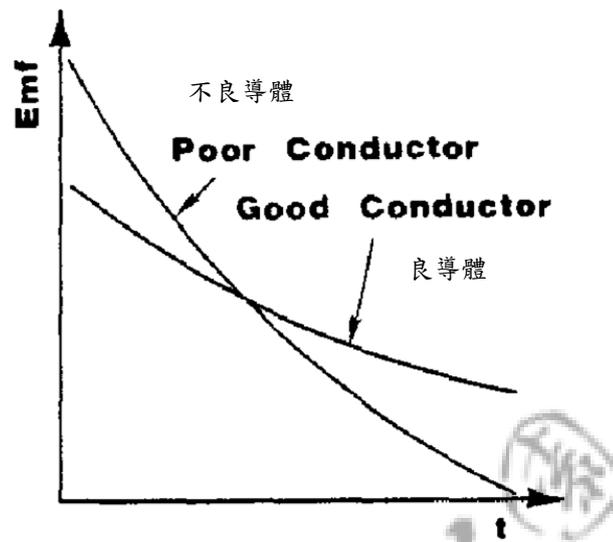


圖 9 良導體與不良導體暫態電壓衰減曲線圖。由暫態電壓值高低與衰減曲線斜率不同的現象可據以判斷目標的屬性是否為良導體。

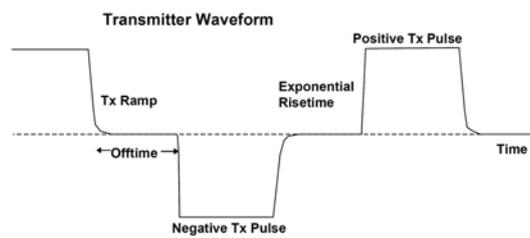


圖 10 terraTEM 主機與電池組，右圖為其發射的電壓曲線圖。

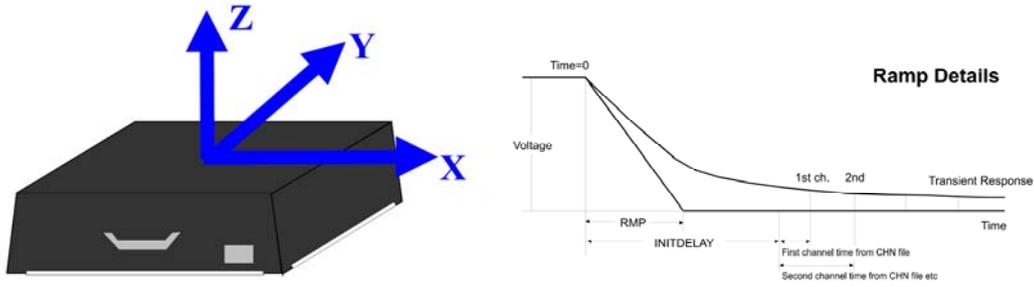


圖 11 三維移動向量接收器，簡稱 TRC-RVR，主要功能係接受來自垂直於地面方向（即 Z 軸）與平行於地面（即 XY 軸）的二次磁場感應產生暫態電壓。內建多匝線圈可以產生等同於單圈面積 1000m^2 的接收線圈效果。右圖為其接收所產生的電壓曲線。

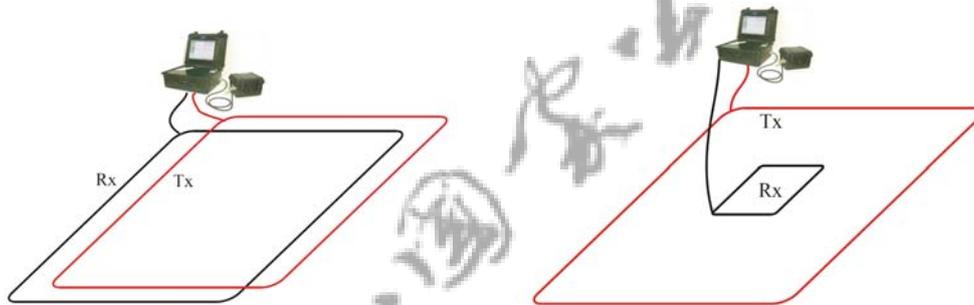


圖 12 暫態電磁法探測的線圈配置圖。左圖為共圈模式（coincident），常用以探測大面積的深部目標，右圖為圈內模式（in loop），以 RVR 在發射線圈內移動接收訊號，可以解析細部構造。

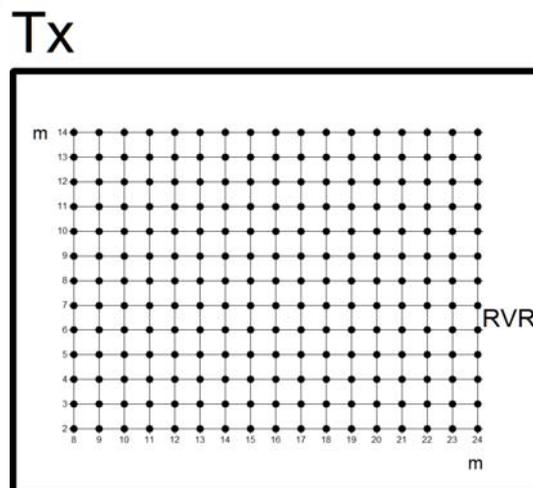


圖 13 圈內模式（in loop）測點分布示意圖，施測時，移動 RVR 在發射線圈內接收訊號。

茲將先前大地電磁測深 MT 與目前時間域電磁法 TEM 之比較列於表一。

表一 MT 與 TEM 比較

項目	MT	TEM
探測深度	較深，可達 10 km 以上	較淺，約數百公尺
施測效率(測點/時間)	較低	較高
施測方式	利用自然波源方式施測， 頻率測深	人為控制波源方式施測， 時間測深
訊雜比	較高	較低
對導體解析度	良好	極佳
對非導體解析度	較差	較差
資料受側向影響 (如地形等)	無	無

(5)土石流潛勢區位移監測:

為初步探討區內火山灰或火山碎屑岩堆積層、土石鬆軟區及坡度陡峭之不穩定地區，在火山地震或颱風暴雨後，是否會引發土石流、山崩及地滑等現象，去年(2010)於竹子湖附近光達影像呈現山腳斷層位置與走向(圖 14)，竹子湖附近之火山碎屑岩堆積層最危險之土石流潛勢區(圖 15)進行選址調查，並評估選擇逐年設樁進行位移監測之地點。今(2011)年度選擇四處園區內危險之土石流潛勢區地點，進行位移監測工作。

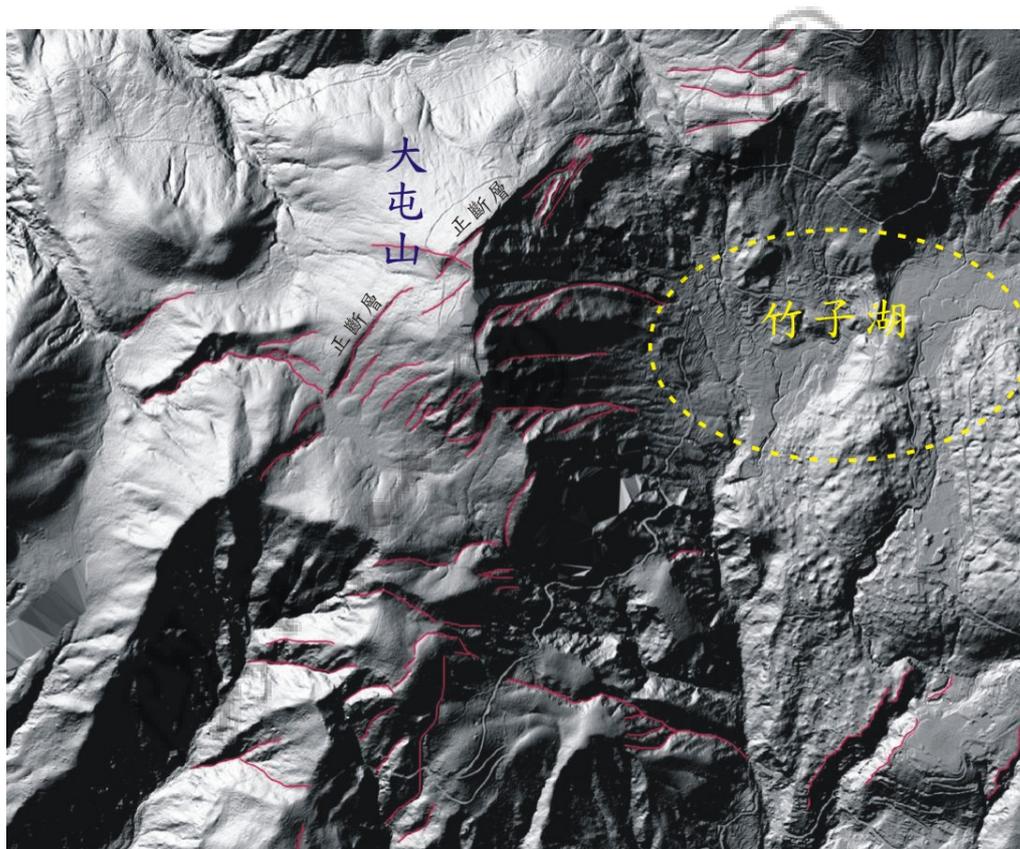


圖 14 竹子湖附近光達影像呈現山腳斷層位置與走向(摘自詹瑜璋, 2008)。

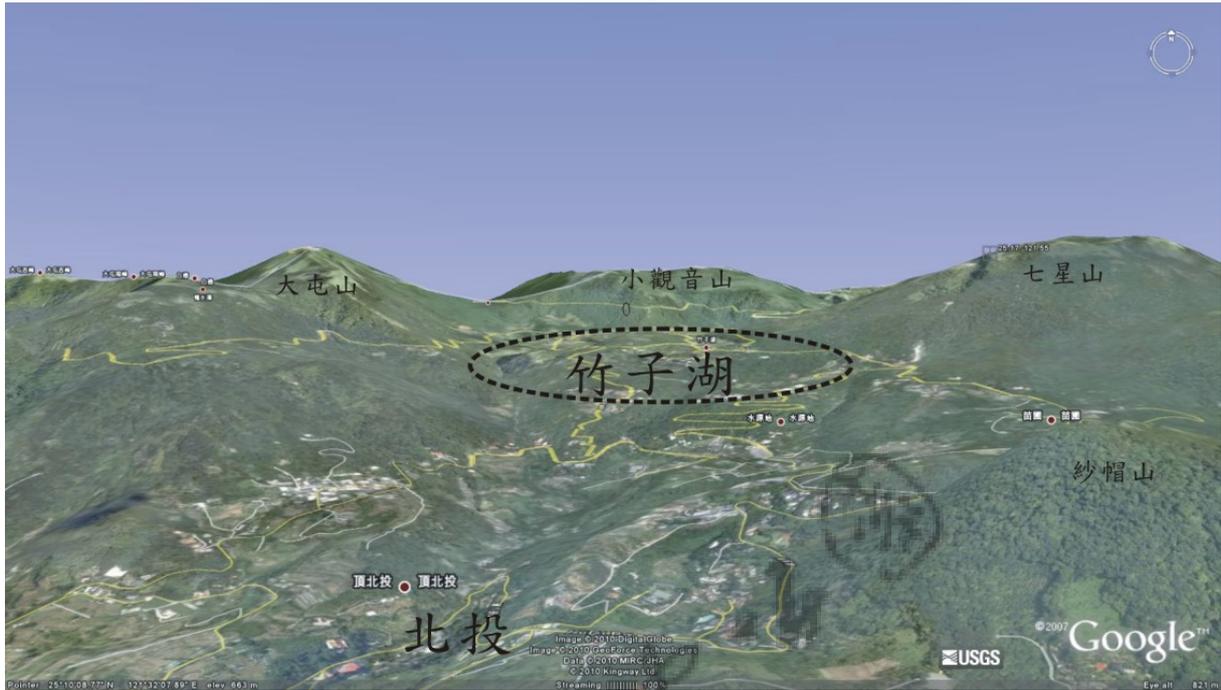


圖 15 竹子湖附近之火山碎屑岩堆積層最危險之土石流潛勢區。

四、結果與討論

本計畫主要同時利用地球化學成份變化、地溫監測、地表地殼變形、時間域電磁法及土石流潛勢區位移監測等方法，對陽明山國家公園內之大屯火山群之可能地質與地震災害進行調查研究。初步結果與討論分別簡單說明如下：

(1) 地球化學成份變化監測成果：

小油坑火山土壤監測站於 2011 年 2 月 27 日下午連續分析土壤二氧化碳濃度變化，發現本地區的二氧化碳濃度高達 48% 如圖 16 所示。推測此一記錄並非代表活山活動的狀態，而是定時抽氣泵未如期啟動，未能將密閉氣罩中的氣體抽離排出，因而出現監測站設置以來的最高二氧化碳濃度數值。在 2011 年 3 月 24 日我們到現地下載資料時，檢查後發現是定時裝置的線路銹蝕而短路，導致定時裝抽氣泵無法順利運作，隨後我們立即更換定時裝置。過去小油坑土壤氣體監測站的資料是存在記錄器中，需由人工到現地下載所得，故無法掌控現地的即時變化；目前我們利用 3G 網路將小油坑監測站的資料即時地傳送至網路平台資料庫中，一旦資料出現不尋常的現象時，我們可以迅速到現地進行處理，排除一切非火山熱水活動所造成的影響以資料維護得更完整。

小油坑火山土壤連續監測站自 2011 年 8 月 2 日起將偵測極限為 30% 的二氧化碳分析儀配載資料即時傳輸，可隨時藉由網路查看監測資料。自 8 月底開始二氧化碳濃度出現大幅度的變化，不時會出現超出偵測極限的數值(37.8%)但其餘時間的二氧化碳濃度則較為偏低大約為 10% 左右。造成此現象可能受到濕度的影響，我們在氣體進入儀器前都有加裝 3A 分子塞加強除水，分子塞是屬於消耗品其除溼效果會隨時間而遞減，未來我們將縮短更換分子塞的時間週期或是改成使用連續除水的特殊裝置。有幾次我們剛好到監測站現地查看，發現二氧化碳濃度數值呈現高值但是分子塞等裝置並未有任何異狀，而我們要從預留的鐵桿採集氣體樣本回實驗室經四極感質譜儀分析地其二氧化碳濃度卻無法順利取得氣體樣本，原因可能是土壤孔隙被水分子佔據亦有可能是氣體來源減少。當然我們不排除其土壤二氧化碳濃度真的高於分析儀的偵測極限 30% 之可能性，需要更多的資料再加以解釋。目前分析儀故障已經聯絡廠商送修。

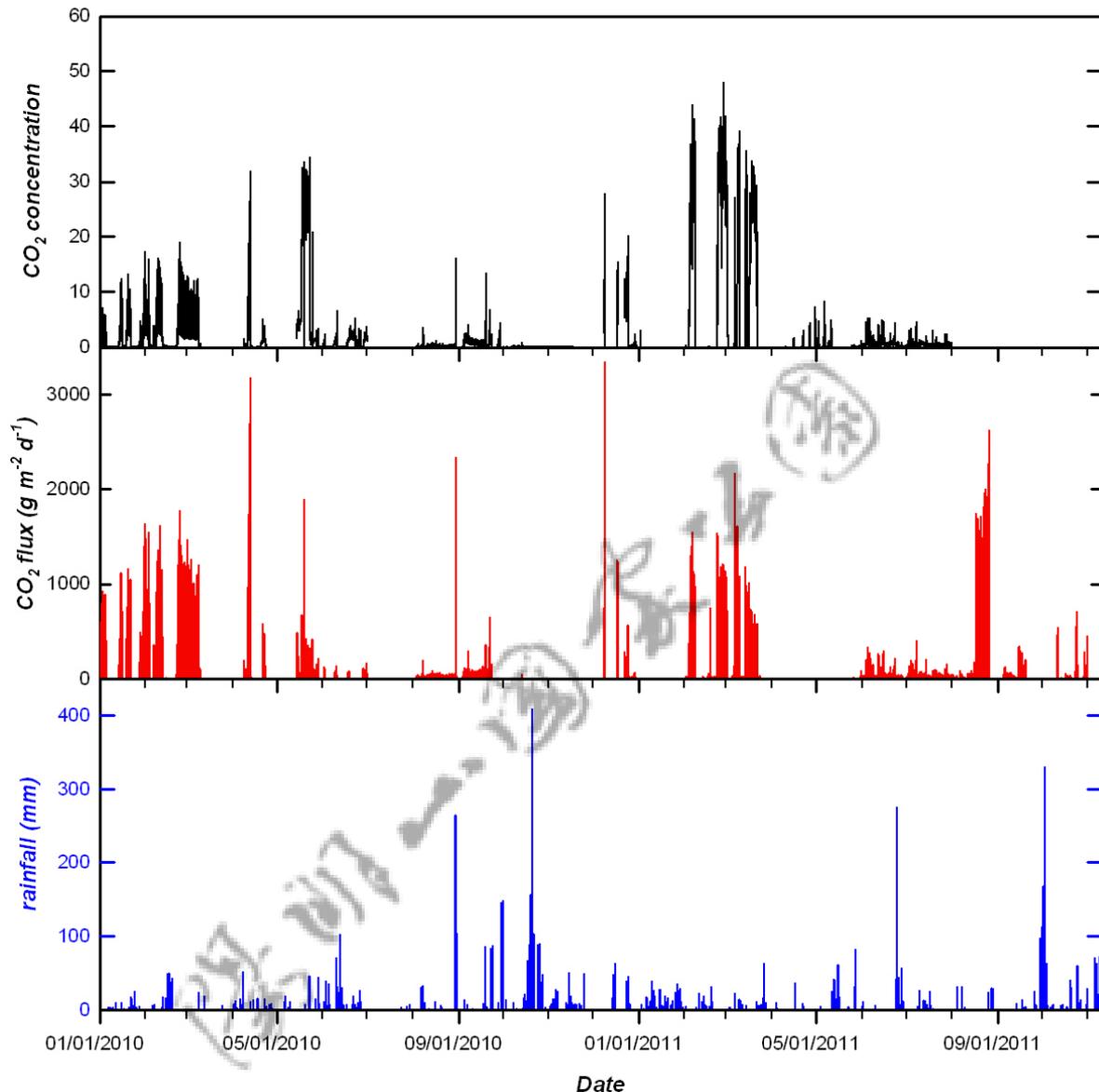


圖 16 自 2010 年 1 月 1 日至 2011 年 10 月 31 日連續分析土壤氣體二氧化碳濃度(黑色)和逸氣通量(紅色)以及竹子湖氣象站之雨量資料(藍色)。

在小油坑地溫監測站中土壤溫度計的紀錄結果如圖 17 所示，圖中褐色代表監測站室內溫度同時可代表大氣溫度；綠色代表土壤溫度，一般認為岩漿上升的過程中會釋放大量的氣體和熱，而熱的變化可以反映在溫度的變化上。土壤溫度介於 13°C 至 35.2°C 之間，不過由監測結果發現溫度變化呈現年周期的趨勢與土壤二氧化碳逸氣通量間的相關性不大。推測可能是因為所釋放出來的熱不足以造成溫度上的變化，此外我們設置的土壤溫度計之精準度不足以反應其溫度變化。

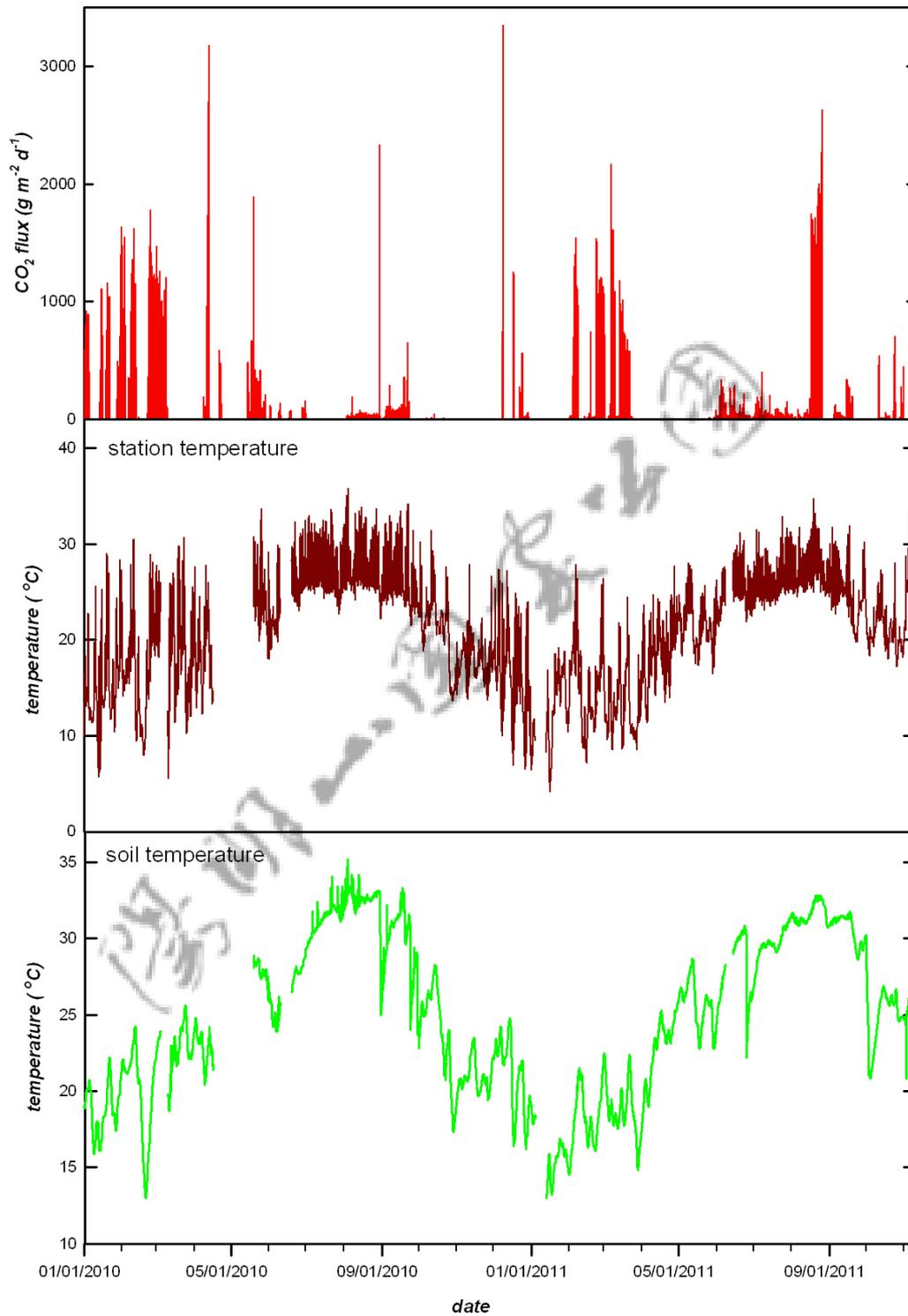


圖 17 自 2010 年 1 月 1 日至 2011 年 10 月 31 日連續分析土壤氣體二氧化碳逸氣通量(紅色)監測站溫度(褐色)以及土壤溫度(綠色)。

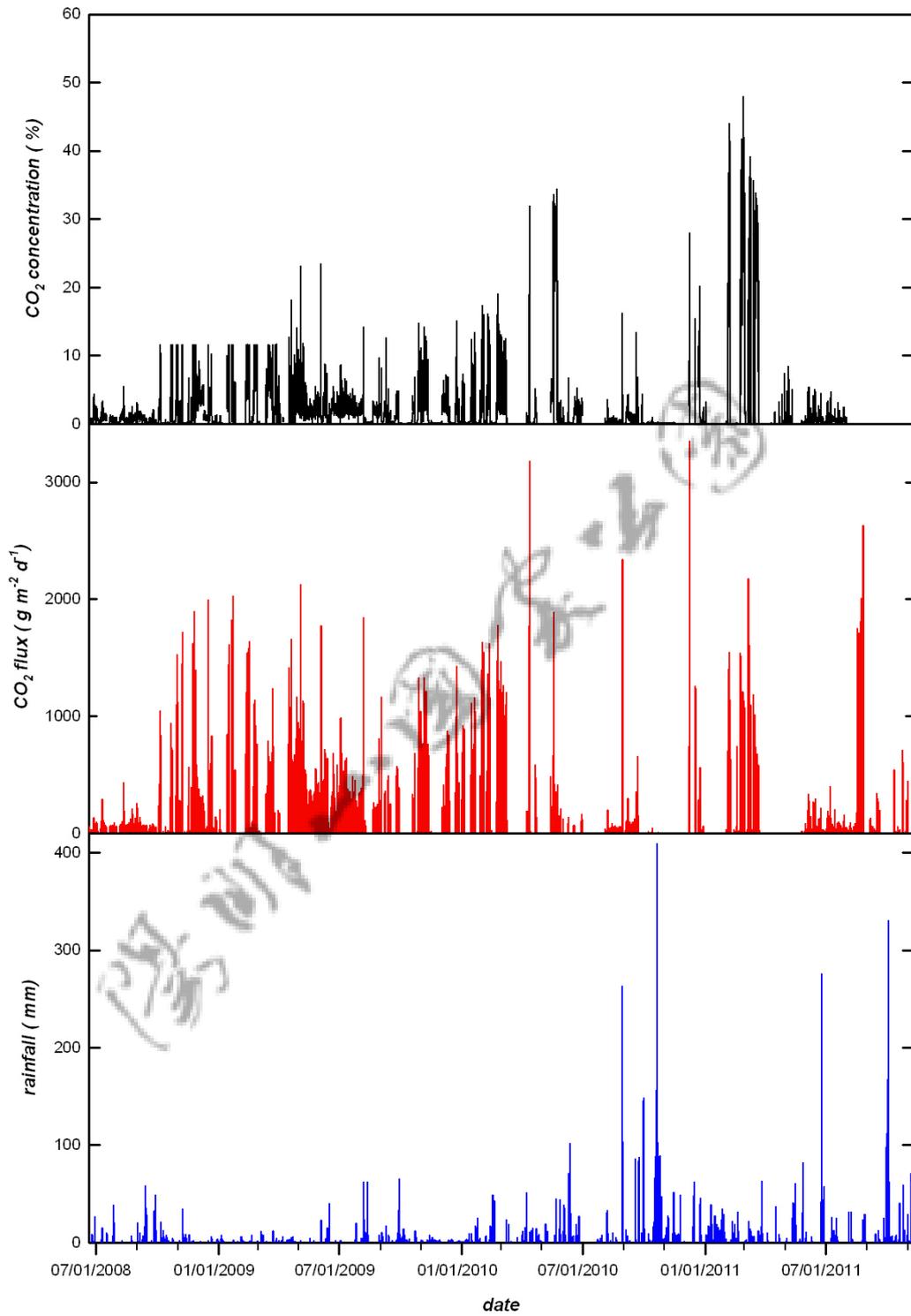


圖 18 自 2008 年 6 月 20 日至 2011 年 10 月 31 日連續分析土壤氣體二氧化碳濃度(黑色)和逸氣通量(紅色)以及竹子湖氣象站之雨量資料(藍色)。

本監測站自 2008 年 6 月 20 日起開始連續長期監測，目前已累積有三年多的資料(圖 18)，顯示本監測站的二氧化碳濃度和逸氣通量皆具有相當大的變化。除了代表火山熱水作用外，部分也顯示出降雨量對其的影響：高降雨，低通量的現象。而我們也針對小油坑地區的逸氣型態提出一個模式(圖 19)，推測出現此種情況可能是因受到雨量的影響而造成的；在短時間內雨量激增，土壤無法快速排水於是向下滲透累積存在於土壤孔隙中。雨水的溫度較低，且大量累積存在於土壤最終使得土壤溫度下降，同時阻礙氣體向上逸散導致逸氣通量下降。雨停後將會再恢復到原本的逸氣狀態與土壤溫度，但恢復的時間會依降雨程度而有所不同。

在小油坑火山土壤監測站設置過程中發現小油坑地區下有黏土層，黏土質地細密孔隙度較小而氣體在上升的過程中受到阻礙比較不易逸散甚至開始累積，當氣量累積到一定程度及有足夠的力量突破阻礙逸散至地表，於是造成變異性大的逸氣通量。除此之外在降雨時，這些黑色的黏土會隨著雨水進入我們設置的鐵桿中，當雨水退去而黏土卻留在鐵桿內，使得逸氣通道嚴重受阻氣體無法順利逸散至大氣中。為了解決此問題，我們新定製一組桿徑 2 公分寬的鐵桿，以避免黏土礦物留在鐵桿中，並於 2011 年 11 月 2 日將此大孔徑的鐵桿設置於小油坑監測站中。

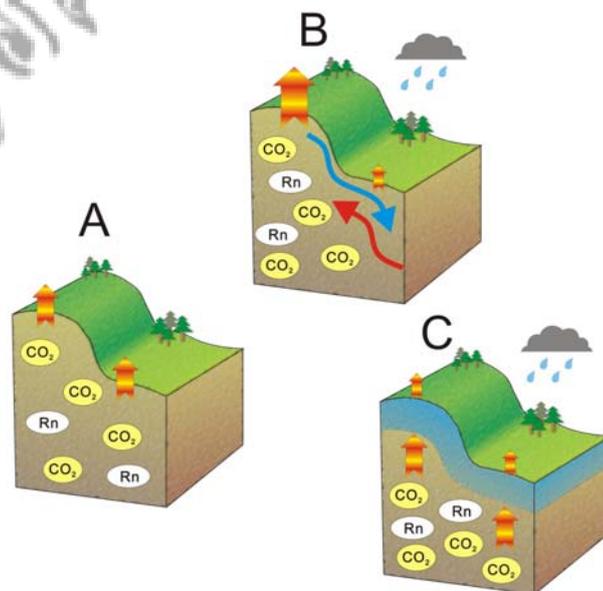


圖 19 推測小油坑地區土壤逸氣示意圖。圖 A 為正常情況下的逸氣型態；圖 B 是當下雨時，水往低處流將氣體向上排擠，導致位於高處的監測站會量測到較多的氣體；圖 C 是當發生驟雨時，無法立即排水導致土壤中的氣體無法順利向上擴散至大氣中，

因此會量測到較低的逸氣通量。

(2) 大小油坑噴氣孔溫度監測主要成果:

小油坑 2009/06/16 至 2011/11/23 的噴氣孔溫度監測資料顯示，噴氣孔的溫度大部分的時間都相當穩定，約 93.9-95.9°C（圖 20），溫度的變化有明顯的年週期變化，但冬季的溫度（95.7-95.9°C）比夏季（95.2-95.4°C）略高，其原因乃來自地表的氣溫往地底下傳遞的效應，氣溫變化訊號傳遞的速度與岩層的熱傳導係數（或熱擴散係數）有關，並隨深度呈指數衰減（Carslaw and Jaeger, 1959），因此夏季氣溫較高的訊號傳到地底下時會延遲一段時間而產生相位差，氣溫往地底下傳遞的數學式子為：

$$T_{\theta} = T_0 \times \exp(-\varepsilon z) \sin(\omega t - \varepsilon z) \quad (1)$$

式中各參數代表的意義如下：

T_{θ} ：某深度的溫度

T_0 ：地表溫度變化的振幅

ε ：地層熱學參數（ $\varepsilon = (\pi / P\kappa)^{1/2}$ ）

P ：地表溫度變化的週期

κ ：地層熱擴散係數（thermal diffusivity）

z ：深度

ω ：頻率（ $\omega = 2\pi / P$ ）

t ：時間

小油坑深度 40 公分的氣溫影響相位差約半年，從式(1)可得知 $\omega t - \varepsilon z = \pm\pi$ ，因此可估計岩層的熱擴散係數約 $1.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ，此數值比一般岩層 $10^{-7} - 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 小約 2-3 個等級，因此溫度的延遲現象可能不只是跟岩層的熱擴散性質有關，是否有其他地質因素的影響，值得進一步追蹤。然而，2010 年 11 月 2 日至 2011 年 1 月 9 日，兩月期間的溫度從平均約 95.5°C 下降至平均約 94.5°C，溫度降低約 1°C，溫度的變化量也增大到 2.1°C，這段期間雨量並沒有特別增加或減少，1 月 19 日以後，溫度又回到原來分佈的範圍，此現象是否與火山活動有關，值得後續進一步監測。

頻譜分析 2009 年 9 月 18 日至 2011 年 11 月 23 日的資料結果，溫度變化從頭到尾

都一直具有明顯的 12 小時週期，24 小時週期訊號則小很多（圖 21），與竹子湖氣象觀測站之雨量和氣溫資料作比對，發現噴氣孔溫度與雨量相關不大，氣溫則呈長週期之負相關（圖 22 與圖 23）。小油坑噴氣孔的溫度變化無 24 小時週期，顯示地表氣溫日變化訊號往地下傳遞的深度無法到達 40 公分（溫度感應器的位置），此原因可能是表層土的熱導係數很小，氣溫訊號傳至 40 公分深後已變非常微弱，微弱的訊號在頻譜分析中因功率譜太小並無法呈現，另外，噴氣的溫度可能在地表附近形成一高溫區，高溫的熱體使氣溫變化影響的訊號相對減小，也會減弱其頻率域中的功率譜，但地表氣溫較長週期的年變化訊號則會傳到地下 40 公分，符合長週期訊號能穿透較深的原理。至於雨量無法影響噴氣孔溫度的原因，可能是噴氣孔有較高的氣壓，雨水不容易滲入地下，或者是地形上的關係，雨水不容易滲入陡峭的坡面。

研究期間，噴氣孔溫度持續具有 12 小時週期訊號，這是本區噴氣孔溫度變化的一大特徵，過去少有研究發現地溫的變化具此週期，由於 12 小時週期係地潮週期，推測噴氣孔的溫度變化可能跟地潮有關，但其機制目前尚不清楚，有可能是地潮影響地層應力的分佈或者地下水位的起伏，使噴氣孔的大小或噴氣速率產生變化，而引起噴氣溫度的改變，如能長期監測噴氣孔的溫度變化，有機會建立溫度變化與大地應力的關係，則對地底下火山活動的研究有莫大的助益。

大油坑的噴氣孔監測系統於 2010 年 5 月 12 日完成，初期的溫度記錄測試結果一直很不穩定，溫度變化於數小時內升降可達數十度，依小油坑的監測經驗，其原因比較有可能是儀器的問題，而不是噴氣孔本身真的溫度有很大的變化，經不斷的在野外與實驗室之間來回搬運儀器進行測試，發現野外的記錄儀器可能會受現場酸性氣體滲入儀器箱，造成部分電路接點腐蝕，使儀器產生不正常讀值以外，插在噴氣孔的溫度感應器也很容易受到酸性流體的腐蝕而整個損毀，或者感應器封裝位置因溫度應力產生微小裂縫，酸性流體滲入，雖然外型沒被破壞，但內部電路卻已毀損，這些問題在監測期間不斷發生，我們也慢慢克服儀器受現場環境影響的問題，2011 年 9 月，我們再作一具自動回傳型溫度監測系統，從 10 月開始監測至 11 月共 40 餘天，資料都未間斷過，儀器問題似乎可以逐漸掌握了。

大油坑噴氣孔溫度監測結果，我們取 2011/2/11 至 2011/3/31 期間的溫度進行分析，

則發現該時段的溫度變化介於 94.8°C 至 96.7°C 之間，兩個月之內溫度變化約 1.9°C ，溫度變化比小油坑大很多，另外，我們也取 2011/10/13 至 2011/11/23 新設置的自動回傳系統儀器之溫度資料，結果發現則該時段的溫度介於 96.9°C 至 100.9°C 之間，40 天之內溫度變化約 4.0°C （圖 24），溫度的變化似乎有變大的現象，然而，地底下的熱場一般都變化很慢，這種短時間內溫度的變化大都是環境所引起的局部效應，例如降雨量的改變、日溫差、日壓差、風速、地下水位、人為活動等等，溫度資料的頻譜分析結果，發現溫度的變化在過去溫度記錄較穩定的期間並沒有任何明顯的週期性（江協堂，2010），而今年 2011/10/13 至 2011/11/23 溫度變化較穩定期間的資料，也是顯示沒有任何明顯的週期性（圖 25），頻譜分析顯示大油坑噴氣孔的溫度沒有參雜氣候的週期性變化，暗示其溫度的變化主要受控於噴氣，而且噴氣噴發非常強烈，不易受到地表環境因子的干擾，因此，本站的溫度變化比較可以直接指示地表下噴氣流體的活動情形。

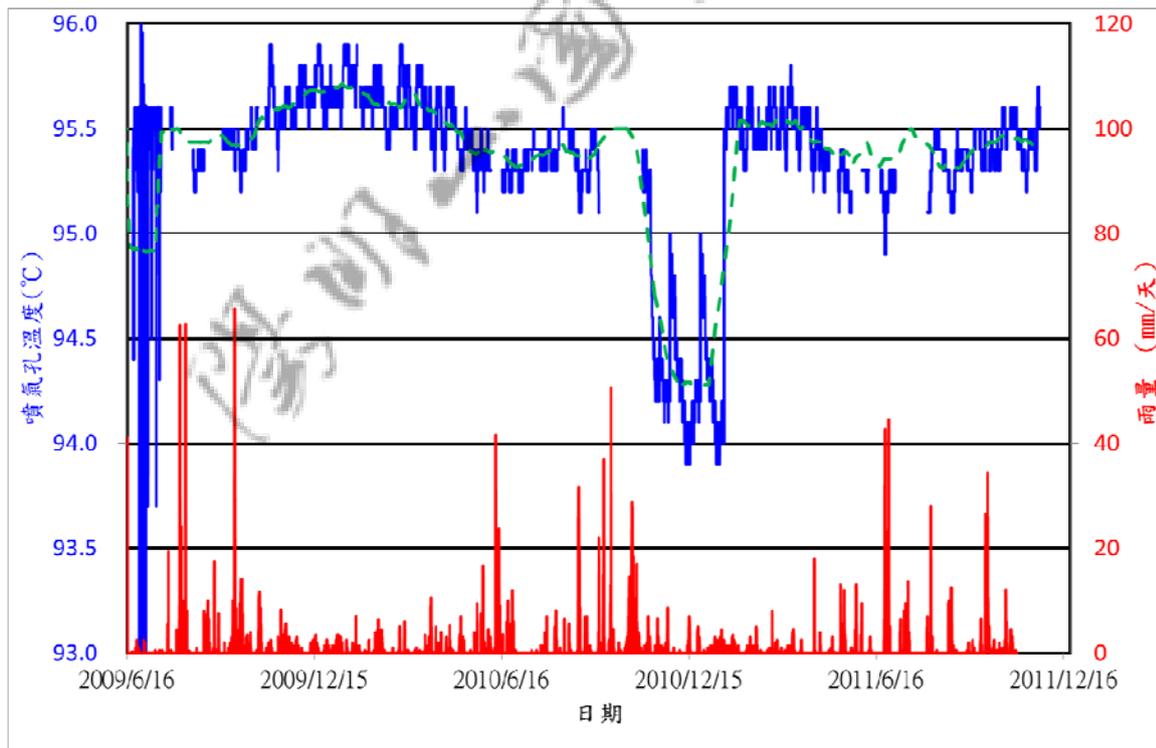


圖 20 小油坑噴氣孔溫度變化。紅色為均溫線，2009 年 8 月以後，儀器漸漸穩定，測得噴氣孔的溫度約 93.9°C - 95.9°C ，冬季的溫度比夏季高，表示岩層熱傳導至 40 公分的相位差約半年。

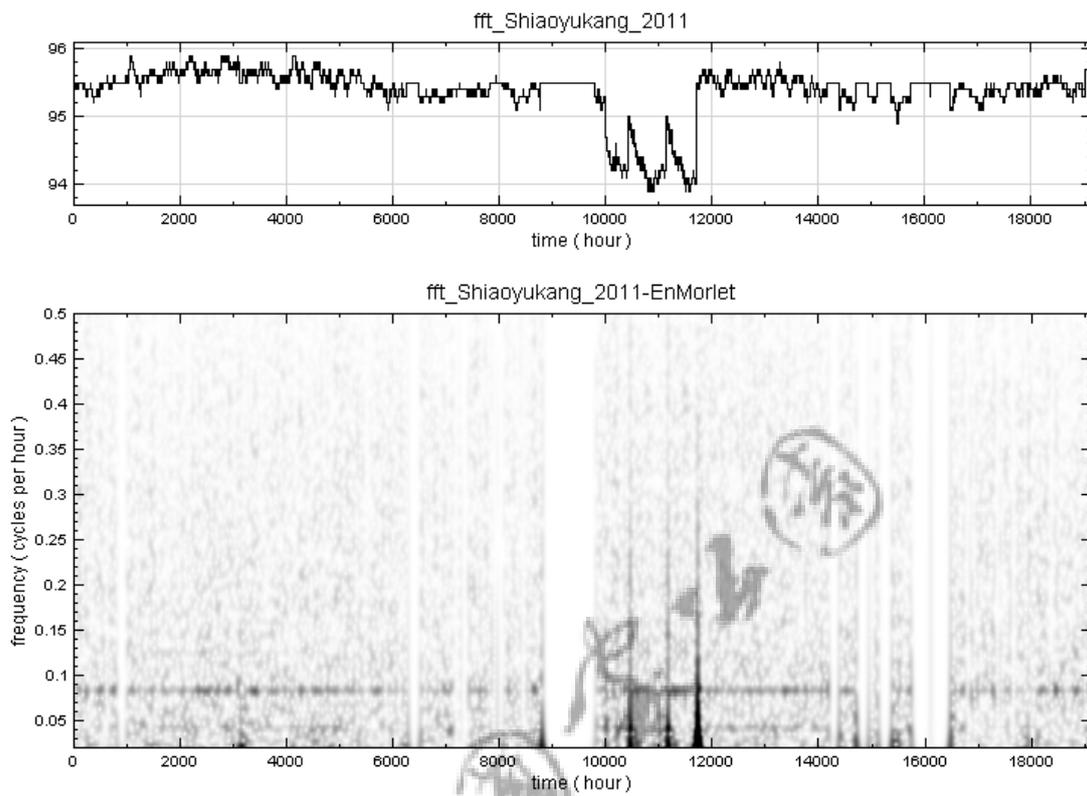


圖 21 小油坑噴氣孔溫度變化之頻譜分析。(a)取 2009/09/18 至 2011/11/23 的資料進行頻譜分析，圖中數段橫向直線資料是儀器斷訊沒有數據。(b)頻譜分析顯示溫度變化在監測期間一直具有 12 小時週期 (0.083 cycle/hour)。

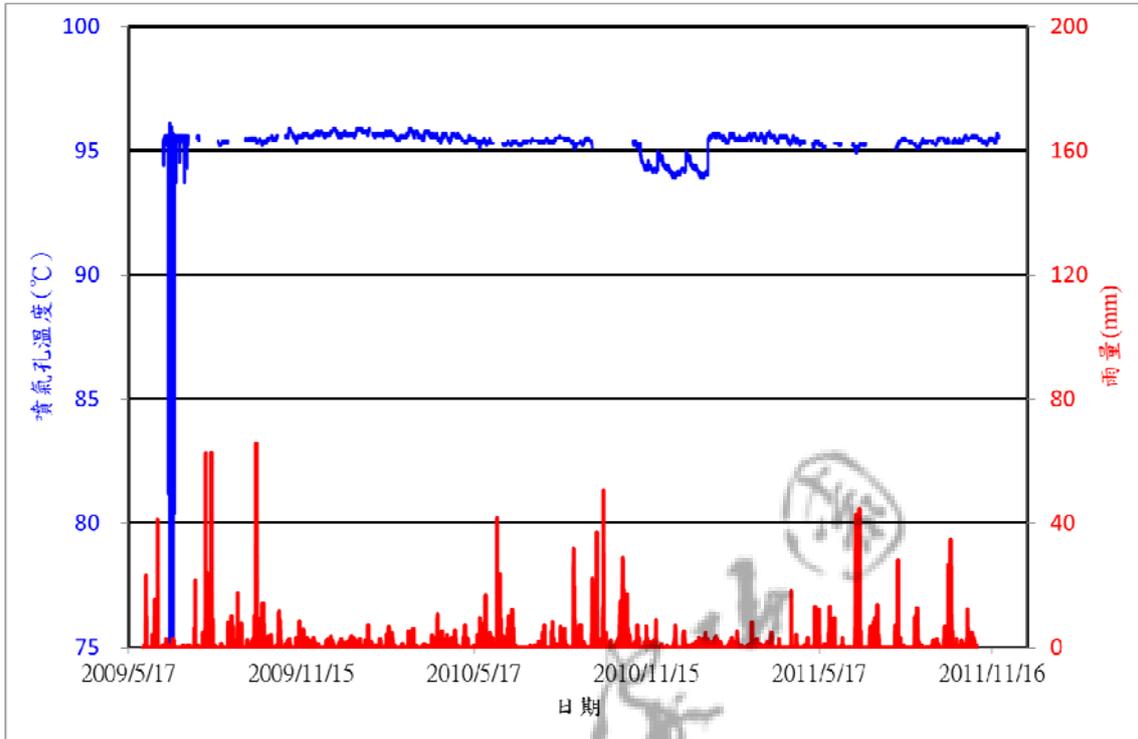


圖 22 小油坑噴氣孔溫度（左側座標）與竹子湖氣象測站之雨量（右側座標）。

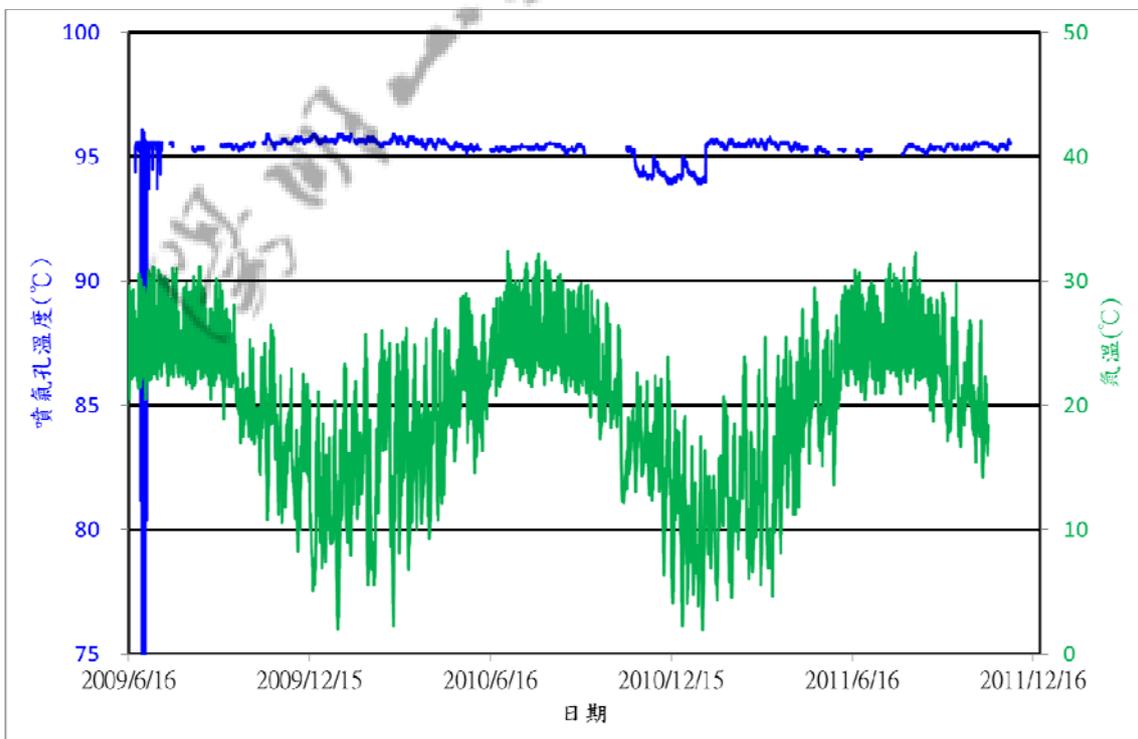


圖 23 小油坑噴氣孔溫度（左側座標）與竹子湖氣象測站之氣溫（右側座標）。

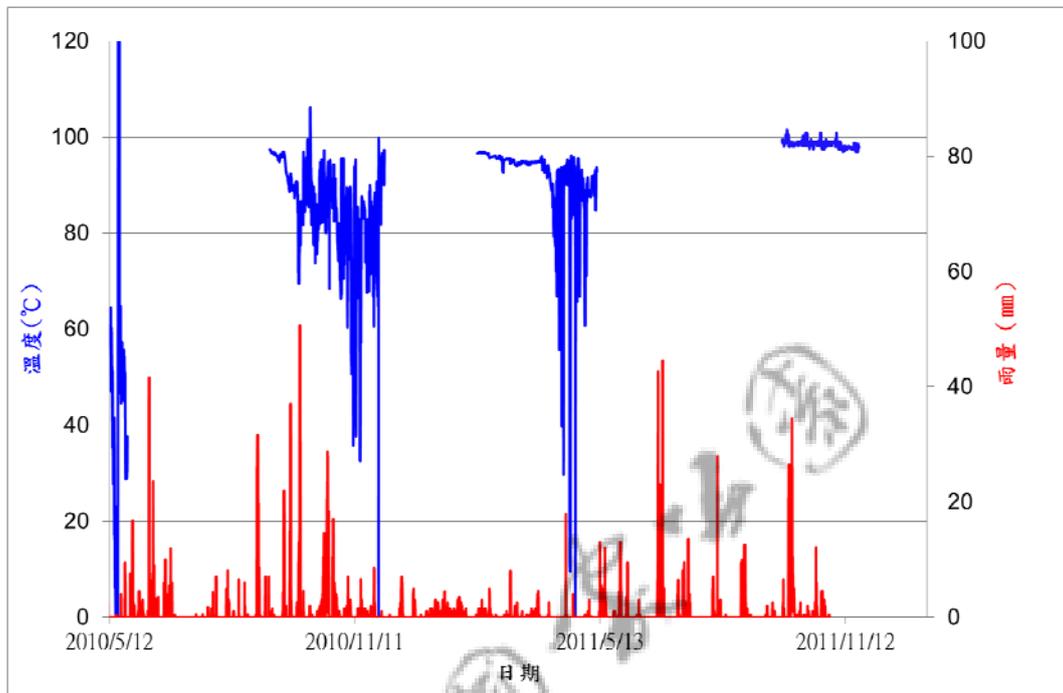


圖 24 大油坑噴氣孔溫度（左側座標）與竹子湖氣象測站之雨量（右側座標）。

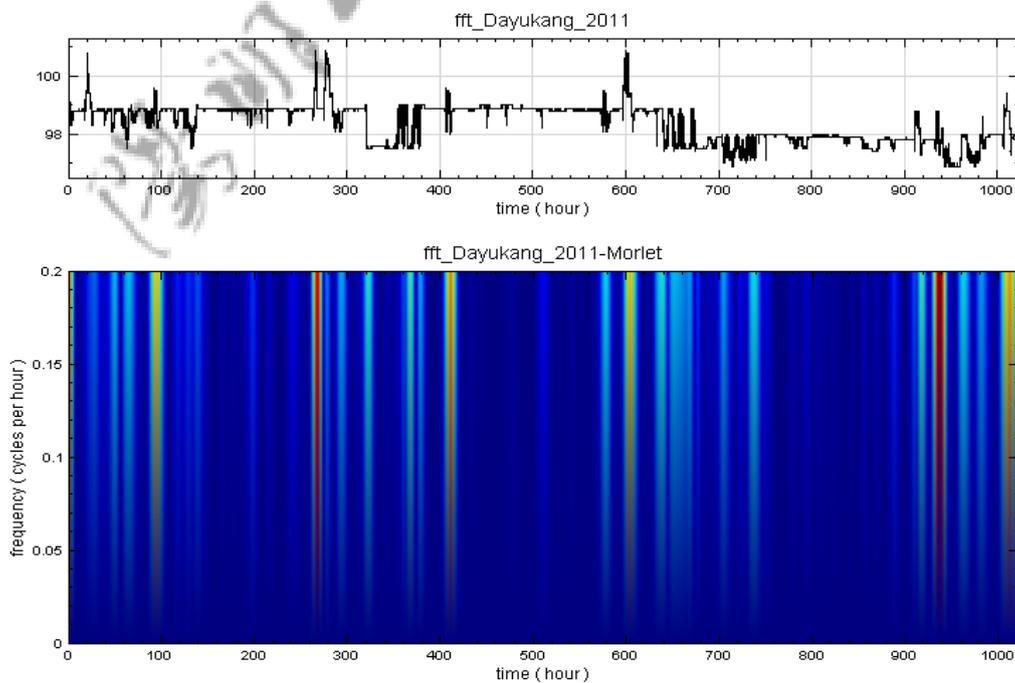


圖 25 大油坑噴氣孔溫度變化之頻譜分析。取 2011/10/13 至 2011/11/23 的資料進行頻譜分析(上圖)。頻譜分析顯示溫度變化無明顯週期(下圖)。

(3) 地表地殼變形監測主要成果:

本年度計劃執行中利用大屯山地區五個地殼變形監測站(YM01 – YM05) (如表二)，來監測陽明山國家公園內之地殼變形。大屯山地區與台灣北部地區，過去十年來每年之平均地殼變形之速度大約以 2 到 3 公分左右向東南方向移動(圖 26)。大屯山地區五個地殼變形監測站觀測之結果在水平地殼變形速度非常相似，過去幾年內垂直地殼變化一般均很小(圖 27)，曾經在 2009 年以後 YM04 測站之垂直地殼變形有明顯的抬升現象，這些現象可能歸咎於下列兩種可能。第一種原因懷疑這是否與水準測量於擎天崗路徑之結果有關係。第二種原因可能是測站附近之樹枝有明顯增高。

比較值得注意是 2009 年八月份莫拉克颱風以後，大屯山地區五個地殼變形監測站觀測之垂直地殼變形，初步結果有明顯的下陷現象(圖 28 至圖 32)，這段時間前後地震活動度似乎也有些變化(圖 33)，但這些現象是否表示火山活動之可能性，仍有待進一步仔細分析，方可確定其真正之含意。雖然目前結果已有些探討之價值，但必須更長期之監測，方能有更可靠之科學意義，故建議政府相關部門與學術單位，能持續進行長期觀測與分析研究，以達火山活動評估與規劃可能災害之準備與應變對策。

為增加即時監測之功能，本計畫於 2011 年四月以來，將 GPS 記錄之衛星訊號即時進行解算，目前已成功將三個站之結果呈現於菁山保育中心之大屯火山觀測站(Taiwan Volcano Observatory-Tatun)。此大屯火山觀測站(TVO)不僅能即時獲得由 GPS 計算之地殼變形(圖 34)，同時也彙集其他火山地震活動監測、火山氣體與溫泉水的化學成份分析調查、地殼變形的量測、地溫監測及噴氣即時影像監測等(如圖 35)。未來正積極規劃加入傾斜儀、重力、地磁、衛星影像等不同方法，以達到更完整之火山監測目的。

表二 大屯山地區 GPS 觀測站

站名	經度(E)	緯度(N)	高度(m)
竹子湖(YM01)	121.53954	25.17888	710
菁山(YM02)	121.56069	25.14838	545
萬里(YM03)	121.60490	25.14661	431
八煙(YM04)	121.58547	25.18760	368
冷水坑(YM05)	121.56548	25.16400	744

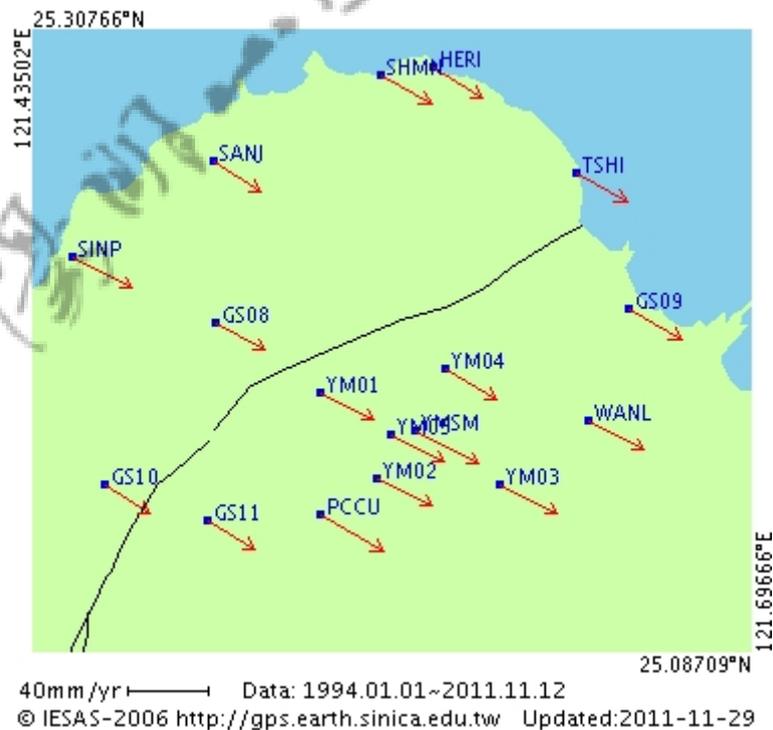


圖 26 大屯山及北臺灣地區 GPS 觀測站求得之地殼水平變形每年之平均速度。

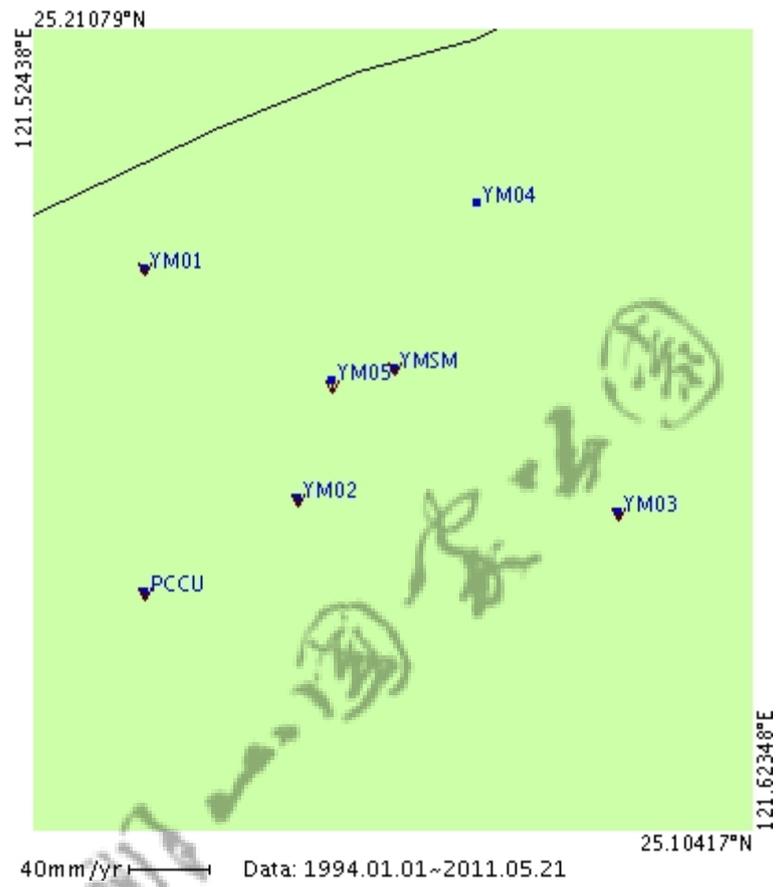


圖 27 大屯山地區 GPS 觀測站求得之地殼垂直變形每年之平均速度。

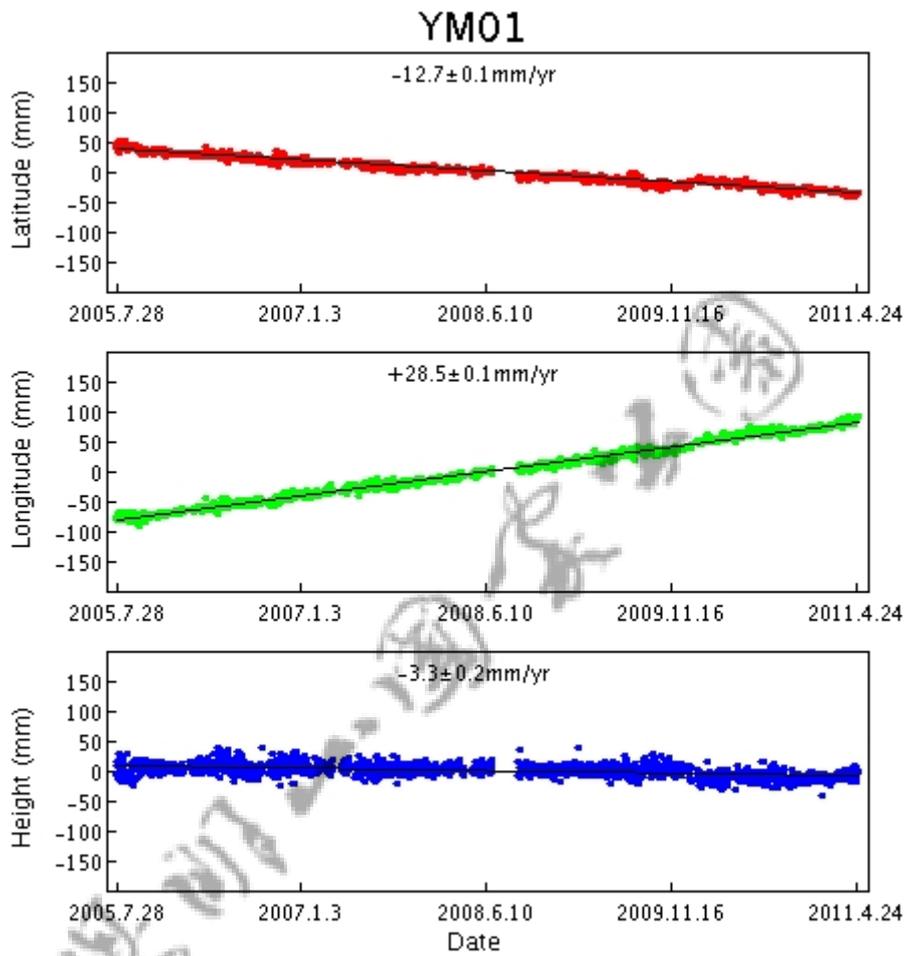


圖 28 大屯山地區竹子湖 GPS 觀測站(YM01)位置隨時間變化情況。

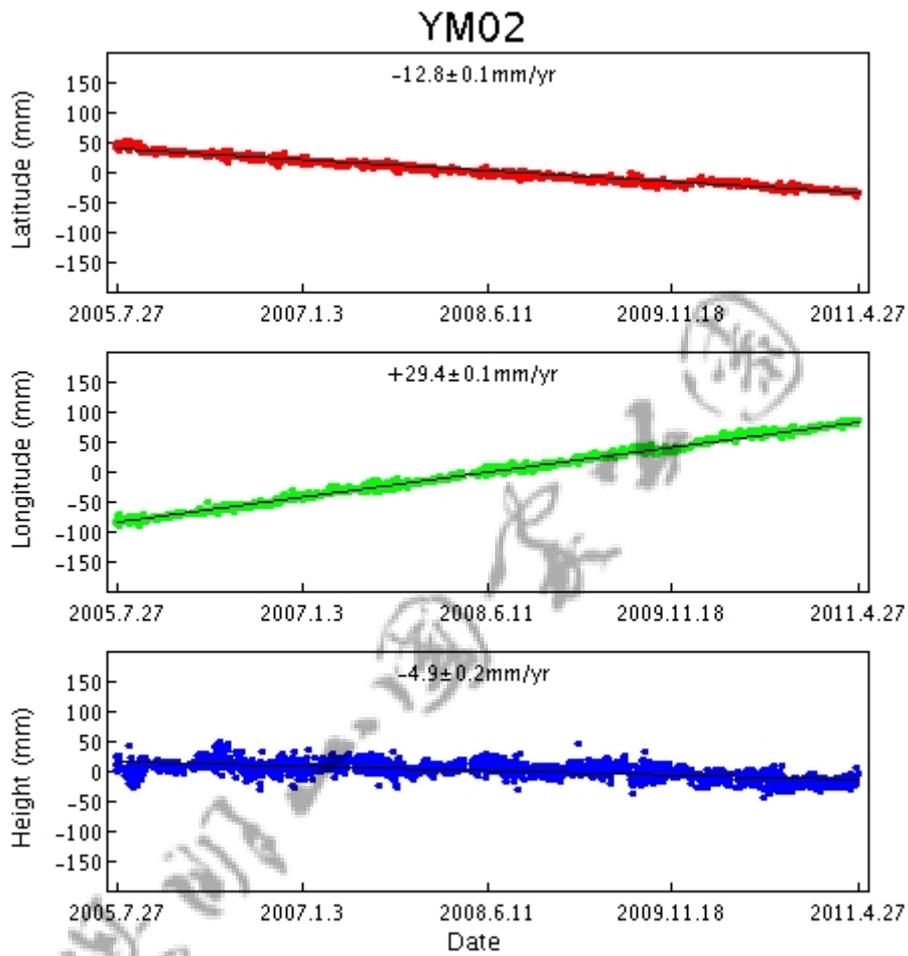


圖 29 大屯山地區菁山 GPS 觀測站(YM02)位置隨時間變化情況。

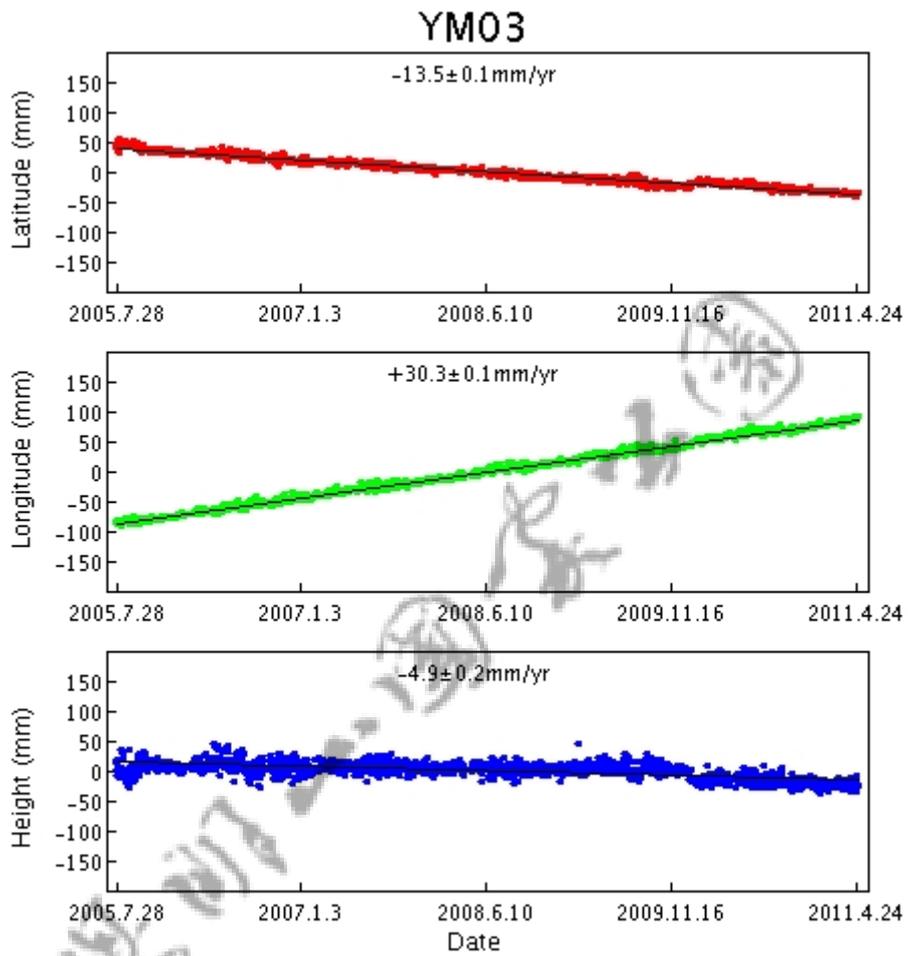


圖 30 大屯山地區萬里 GPS 觀測站(YM03)位置隨時間變化情況。

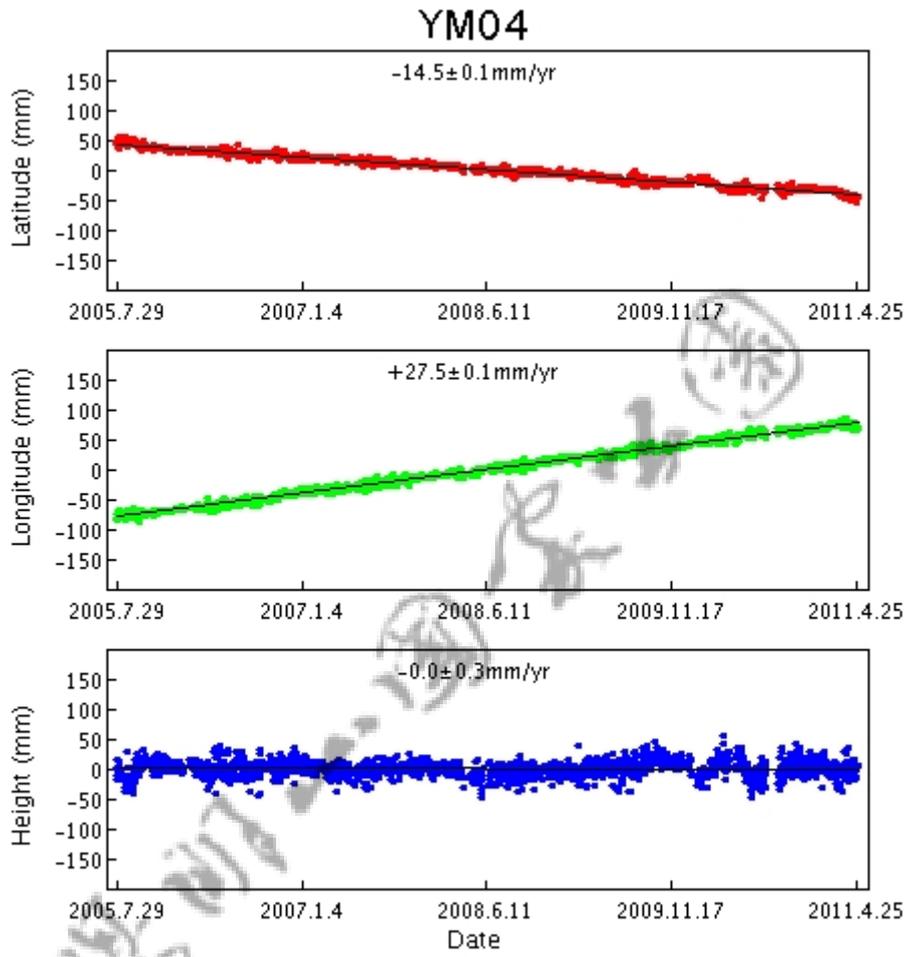


圖 31 大屯山地區八煙 GPS 觀測站(YM04)位置隨時間變化情況。

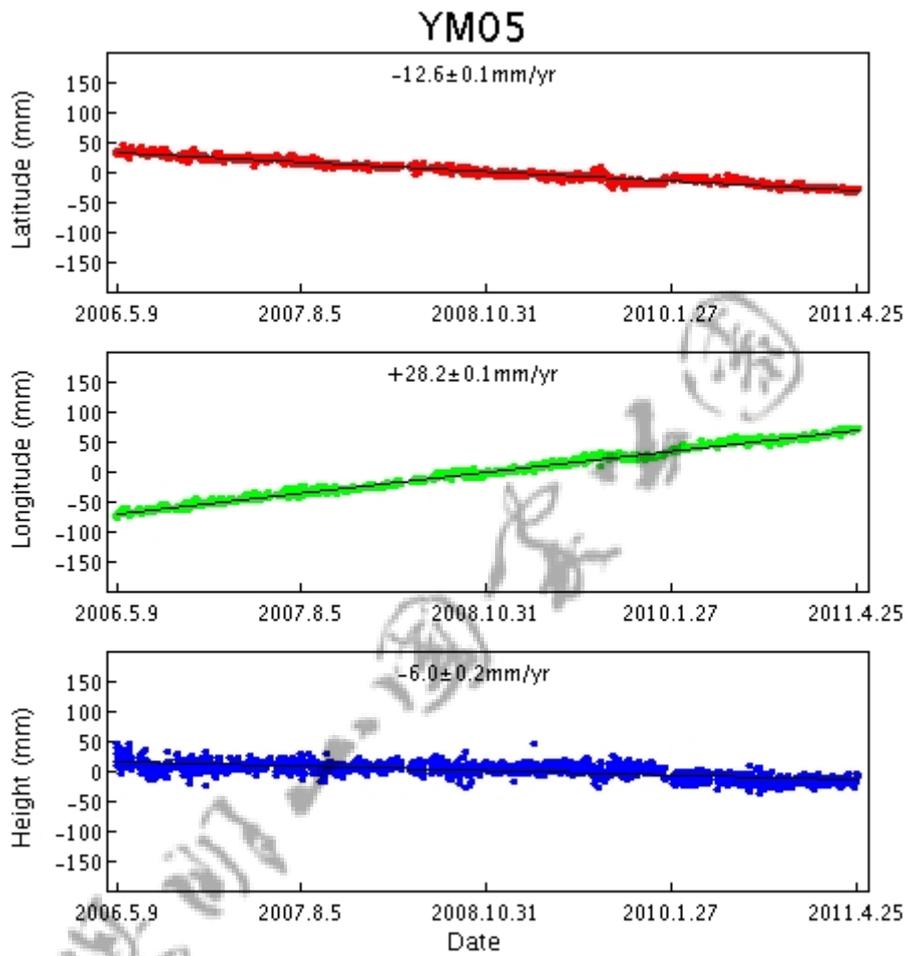


圖 32 大屯山地區冷水坑 GPS 觀測站(YM05)位置隨時間變化情況。

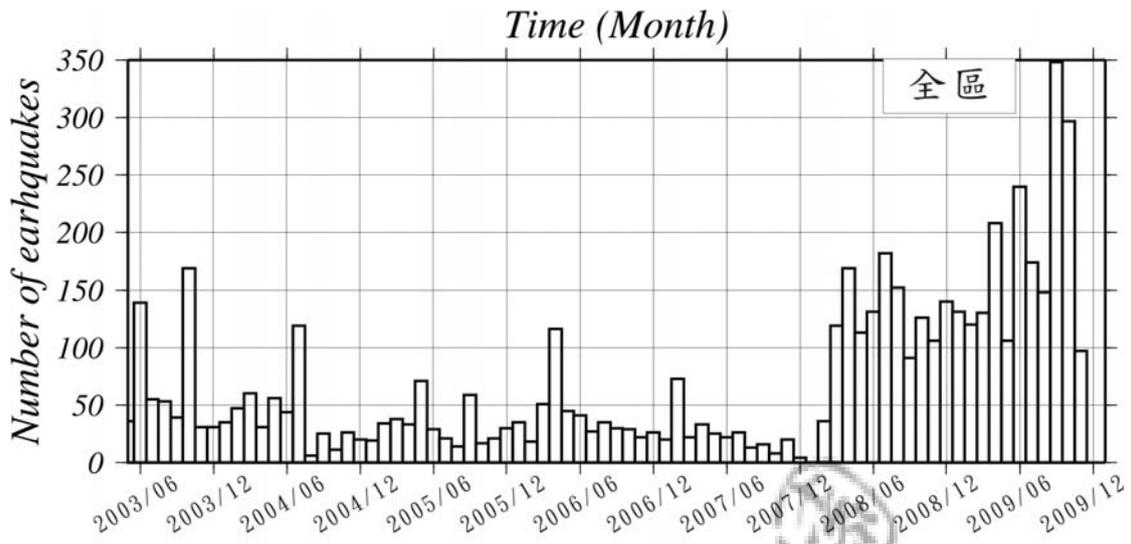


圖 33 大屯山地區的歷年地震活動統計分布圖。

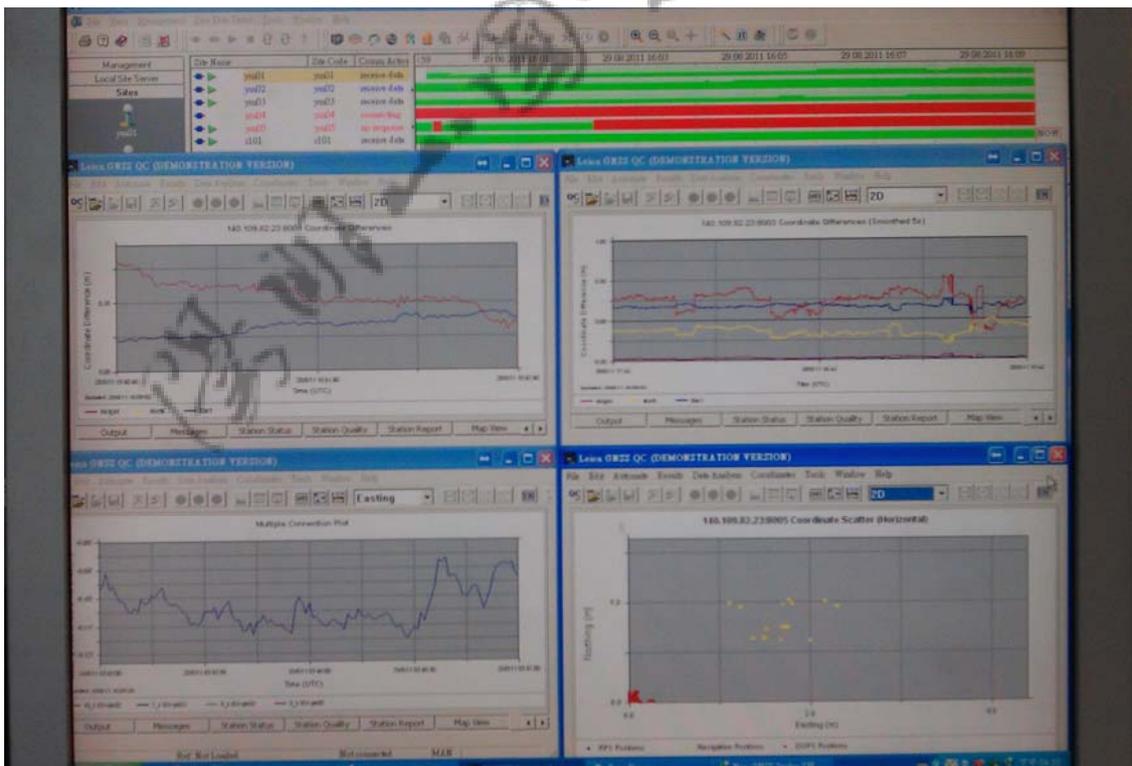


圖 34 大屯山地區 GPS 站即時解算監測系統

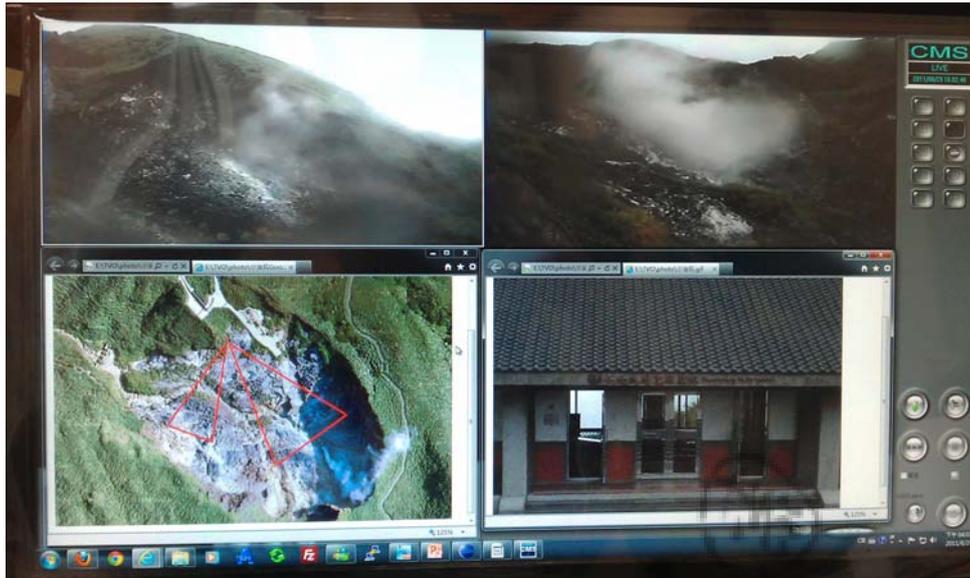


圖 35 大屯火山觀測站火山氣體與噴氣即時影像監測系統

(4) 時間域電磁法主要成果:

在大油坑測區內完成 TEM 法測點共計 36 個 (圖 36 及 37), 共圈施測之 TEM 資料, 通常以視導電率-時間圖展示探勘結果, 早期時域反應淺部導電率而晚期時域代表深部導電率, 圖 38 與圖 39 分別代表大油坑測區 0.02s(ch10)淺部與深部 0.135s(Ch26)之電阻率分佈, 大致呈現電阻率封閉構造, 可能與火成岩體入侵有關, 圖 40 示併合各時域資料所完成測區三維視電阻率屏圖, 更易研判電阻率之 3D 變化。

為進一步了解測區之電阻率之深度變化, 本研究採用一種新演算法逆推可以改進資料展現, 亦即以視導電率-深度展示。雖然此演算法是近似結果, 但是其原理簡單、計算快速, 尤其是不需要設定初始模型, 為其最大優點。此演算法之原理是基於層狀構造, 所以非常適用於水平地質構造, 然而亦適用於確認非無限延伸之異常構造。本視導電率-深度求法中, 視導電率從定義求得(Raiche and Spies, 1981), 深度則取決於最大靈敏度(亦即最大電流)位置(Smith et al.,1994), 再進一步利用視導電率之平滑特性, 估算出其平滑算子, 再據以估算出其反算子, 以應用於平滑之視導電率-深度資料中, 以求得更接近實際地層變化(層狀變化而非平滑變化)之導電率。

逆推各測點之探測深度至少在 100m 以上, 依測點相關位置(依據 GPS

map60CSx, Garmin 紀錄)繪製測點下之電阻率三維屏圖，以便研判測區三維電阻率之變化，圖 41 中約 7m 下東西向之高電阻(藍色)屬岩盤構造，而其上之低電阻(紅色)屬堆積層，是容易崩塌之範圍。圖 42 是大油坑測區 MT(左圖)與 TEM(右圖)施測成果之比較：東西向之二維 MT 剖面長達 8km，而 TEM 三維屏圖範圍僅 100m X 100m X 100m，雖然 TEM 施測範圍不如 MT 深廣，但其對地層之解析度極高，如 TEM 圖中 7m 下之高電阻(藍色)屬岩盤構造而其上之低電阻(紅色)堆積層，屬容易崩塌範圍，這些訊息在 MT 剖面中無法顯示。



圖 36 大油坑測區實況及 TEM 現場施測圖(右圖自左至右依序為太陽板、TEM 接收機、TEM 發射機以及發射線圈等)。

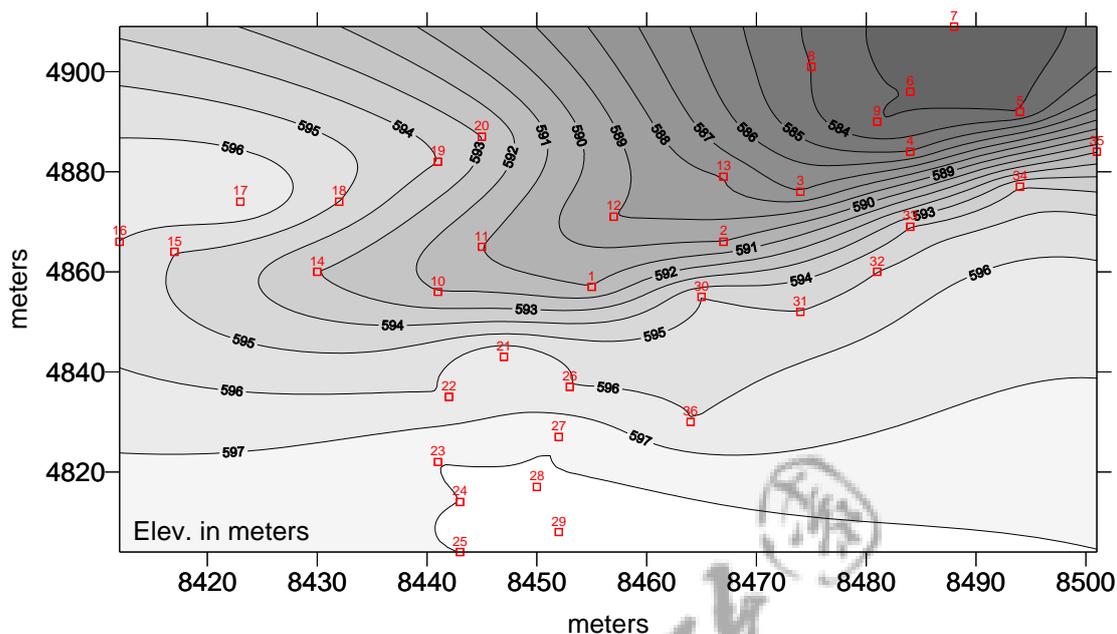


圖 37 TEM 法測點(紅方框及編號)分布圖。地形高程低區以灰色示，座標 (+300000,+2780000)為 TWD67 TM2 投影，共計 36 個 TEM 測點。

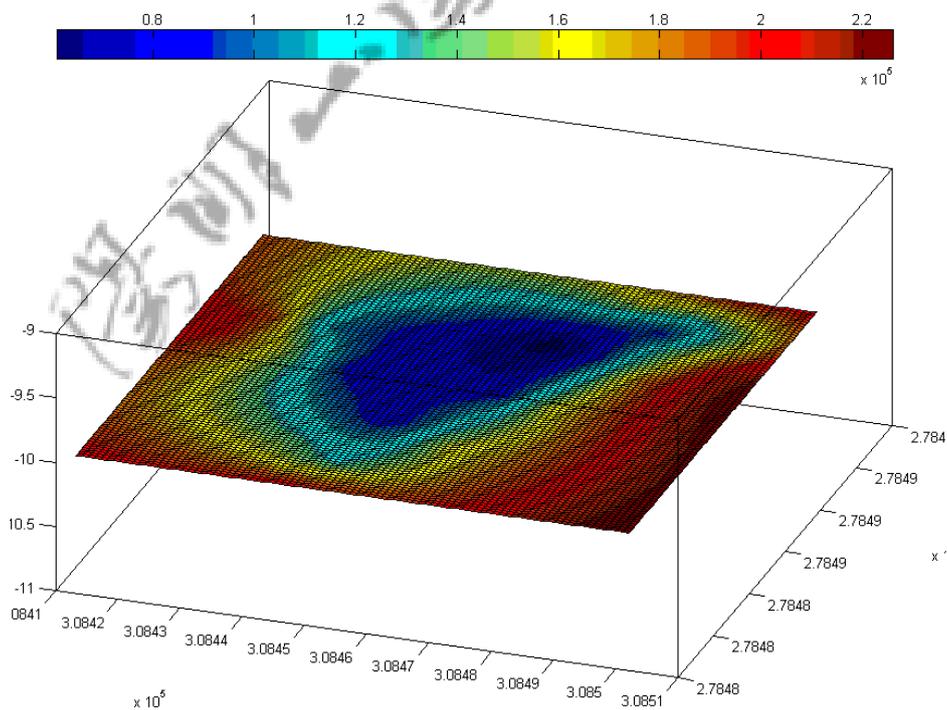


圖 38 大油坑測區 0.02s(ch10)之視電阻率分佈，大致呈現電阻率封閉構造。

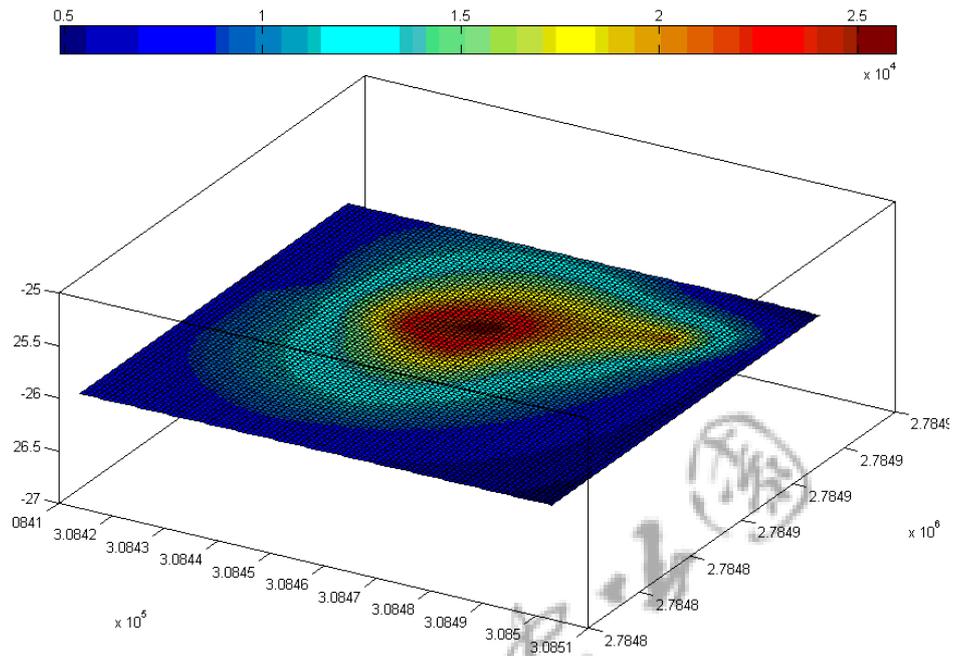


圖 39 代表大油坑測區 0.135s(Ch26)之視電阻率分佈，大致呈現電阻率封閉構造。

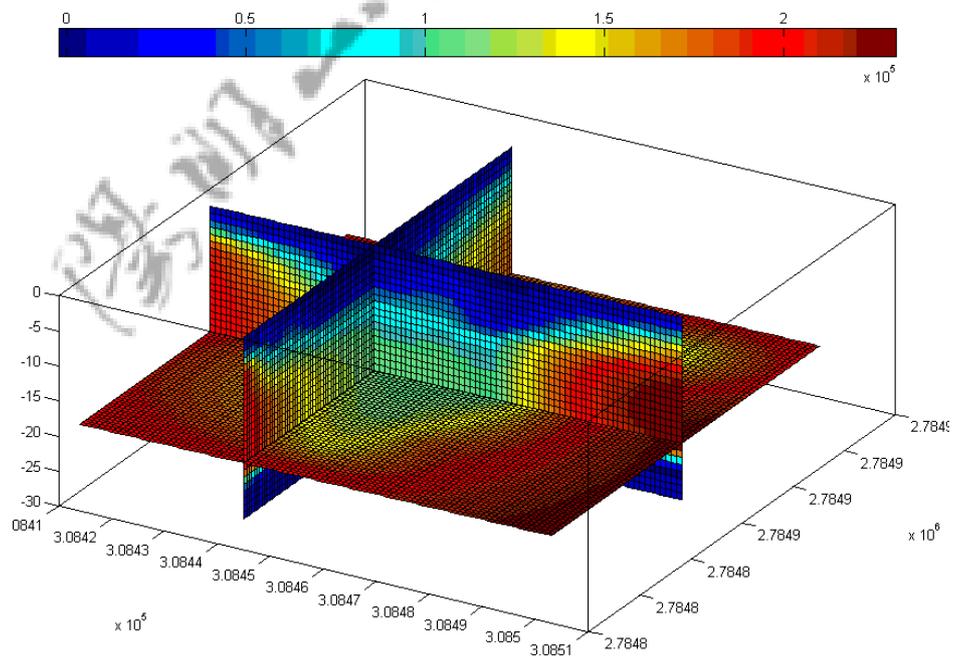


圖 40 併合各時域資料所完成測區三維視電阻率屏圖，電阻率封閉構造清晰可見，可能與火成岩體入侵有關。

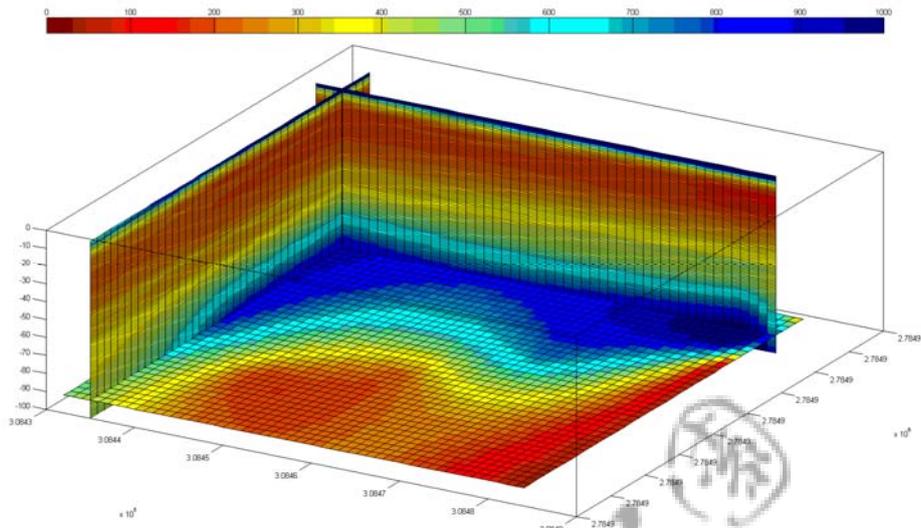


圖 41 大油坑測區 TEM 逆推後之電阻率三維屏圖，進一步提供了測區電阻率深度變化訊息。圖中約 7m 下東西向之高電阻(藍色)屬岩盤構造，而其上之低電阻(紅色)屬堆積層，是容易崩塌之範圍。電阻率單位為 ohm-m，低電阻率以紅色，而高電阻率以藍色表示。

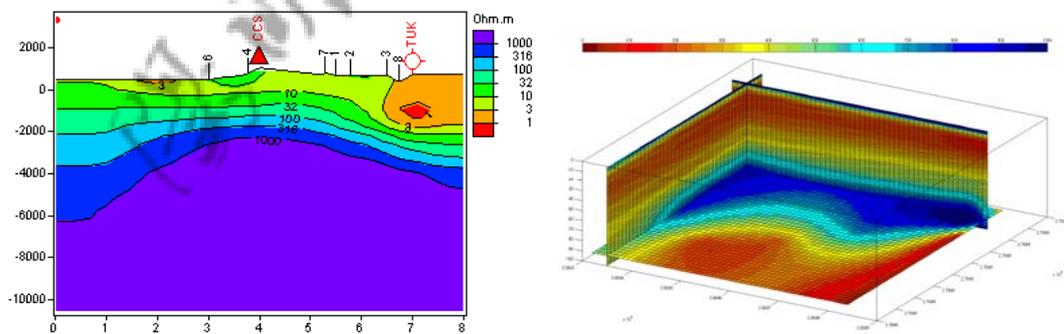


圖 42 大油坑測區 MT(左圖)與 TEM(右圖)施測成果之比較。左圖示七星山(CCS)到大油坑(TUK)之地表下東西向之二維電阻構造剖面，剖面長達 8km(橫座標單位 km; 縱座標單位 m)。右圖係指左圖中 TUK 處 100m X 100m X 100m 範圍之 3D 電阻構造，雖然 TEM 施測範圍不如 MT，但對地層之解析度極高，如左圖中 7m 下之高電阻(藍色)屬岩盤構造而其上之低電阻(紅色)堆積層，屬容易崩塌範圍，這些訊息在 MT 剖面中未顯示。

(5) 土石流潛勢區位移監測:

本計畫為探討陽明山國家公園內火山灰或火山碎屑岩堆積層、土石鬆軟區及坡度陡峭之不穩定地區，在火山地震或颱風暴雨後，是否會引發土石流、山崩及地滑等現象，依據 2010 年利用光達影像及火山碎屑岩堆積層最危險之土石流潛勢區調查結果，評估選擇於竹子湖附近逐年設樁進行位移監測之地點。2011 年度選擇四處園區內危險之土石流潛勢區地點(圖 43)，裝設單頻 GPS 土石流潛勢監測站(圖 44)，進行長期地表位移監測工作。每一測站包括室外天線接受器、記錄器及電磁等裝備(圖 45)。目前正積極處理已記錄之資料，並整合陽明山國家公園內之其他六個雙頻 GPS 之連續記錄資料，未來正積極規劃加入傾斜儀、以期達到長期地表位移監測之目標。

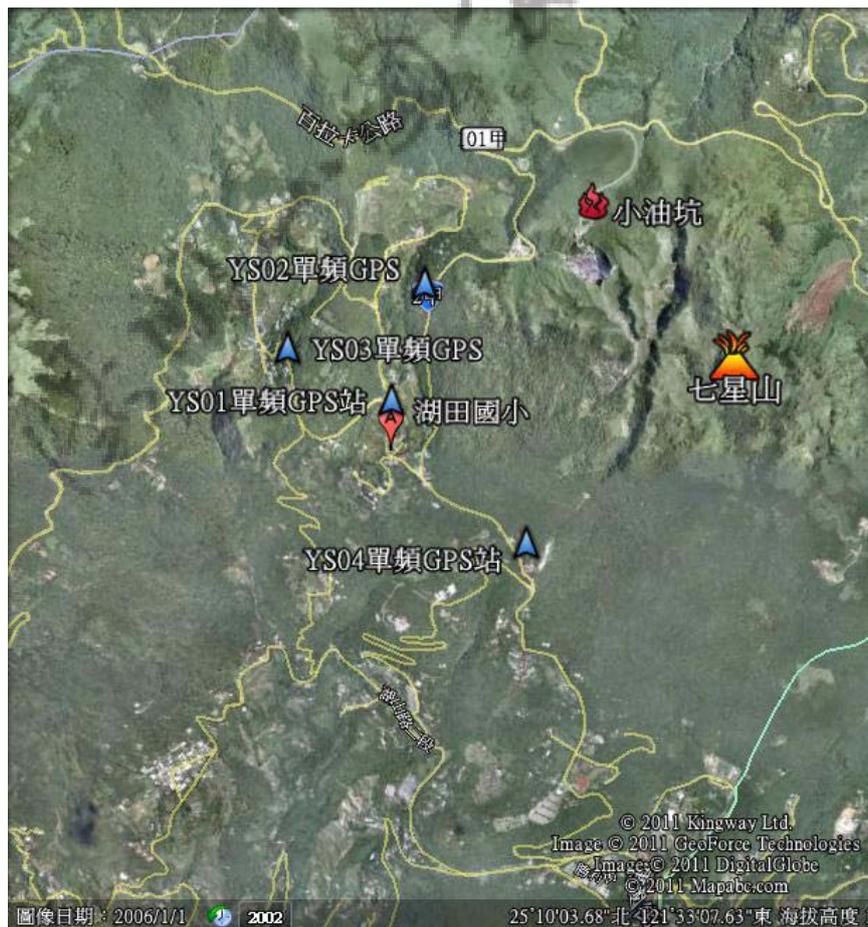


圖 43 陽明山國家公園內竹子湖地區四處(三角形)土石流潛勢監測地點。



圖 44 湖田國小單頻 GPS 土石流潛勢監測站之室外天線接受器。



圖 45 單頻 GPS 監測站之主要設備(包括室外天線接受器、記錄器及電磁等)。

五、結論

本計畫同時利用多項分析與監測方法，對陽明山國家公園內之大屯火山群之可能地質與地震災害進行調查研究。主要方法包括地球化學成份變化、地溫監測、地表地殼變形、時間域電磁法及土石流潛勢區位移監測等法，目前各項結果與討論分別簡單說明如下。

首先小油坑監測站自 2008 年 6 月 20 日至 2011 年 10 月 31 日止連續分析土壤二氧化碳濃度變化，本地區的二氧化碳濃度介於 0.02 %至 48%；經換算得出逸氣通量介於 0.012 至 3350 g m⁻² day⁻¹。推測此一記錄並非代表活山活動的狀態，而是定時抽氣泵未如期啟動將密閉氣罩中的氣體抽離排出，因而造成如此高二氧化碳濃度之紀錄。連續監測三年多的資料顯示著小油坑地區之土壤二氧化碳濃度或是逸氣通量的變異性非常大，暗示著小油坑地區的地熱活動非常不穩定。連續觀測資料中，出現幾次二氧化碳通量異常高值後隨即下降的現象，當時並未有影響當地的有感地震紀錄。推測此變化是受到降雨的影響，過多的雨水向下滲透，將原本存在土壤孔隙中的氣體向上排擠逸散至地表而造成短時間內逸氣通量大量增加，但雨水繼續留在孔隙中使得氣體無法向上逸散而造成通量降低。逸氣通量回復到正常狀況受控於雨水，最近發現不單只是水的影響還有其黏土礦物，隨著雨水進入鐵桿中卻不隨著雨水離開鐵桿，因而導致逸氣不順暢。已於 2011 年 11 月 2 日增加桿徑避免黏土礦物留在桿中。過去小油坑監測的資料是由人工下載所得，無法掌控現地的即時變化；自 2011 年 8 月 2 日起將小油坑監測站的資料利用 3G 網路將數據即時地傳送至網路平台資料庫中，一旦資料出現不尋常的現象時，我們可以迅速到現地進行處理，排除一切非火山熱水活動所造成的影響以資料維護得更完整。

其次小油坑噴氣孔溫度約兩年的監測結果發現，噴氣孔的溫度一直維持在 95.2-95.9 °C，但 2010 年 11 月 2 日至 2011 年 1 月 9 日，兩個月間溫度從平均約 95°C 下降至平均約 94°C，原因不明，時頻分析結果，溫度變化一直都有 12 小時週期訊號，但 24 小時週期訊號不明顯，由於地潮有相同的週期性變化，推測地潮的作用改變地下水位或岩石的應力，使地下噴氣的流速發生變化，進而使噴氣孔溫度產生此週期性變化。大油坑噴氣孔於 99 年 5 月開始監測，監測期間儀器一直不穩定，溫度變化可達數十度，取 2011 年

2月11日至2011年3月31日較穩定的資料進行時頻分析，結果發現溫度資料無明顯的週期訊號，顯示噴氣孔的溫度主要受控於噴氣，而且噴氣噴發非常強烈，不易受到地表氣溫變化的干擾，因此，本站的溫度變化應該可直接指示地表下噴氣流體的活動情形。

同時利用大屯山地區五個地殼變形監測站(GPS)獲知大屯山地區與台灣北部地區，每年之平均地殼變形之速度大約以2到3公分左右向東南方向移動。過去幾年內垂直地殼變化一般均很小，但曾經在2009年YM04測站之垂直地殼變形有明顯的抬升現象，這是否與水準測量於擎天崗路徑之結果有關係，有待進一步追蹤分析。此外，大屯山地區其他地殼變形監測站觀測之垂直地殼變形，初步結果有些下陷現象，這段時間前後地震活動度似乎也有些變化，但是否表示火山活動之可能性，仍舊值得進一步仔細分析，方可確定其真正之含意。從長期地殼變形監測發現有些GPS測點隨時間之有明顯之變化，可能解釋之原因可包括季節性之變化，地震活動度有關及其他未知之因素，這些均有待進一步監測與分析。雖然目前結果已有些探討之價值，但必須更長期之監測，方能有更可靠之科學意義，故建議政府相關部門與學術單位，能持續進行長期觀測與分析研究，以達火山活動評估與規劃可能災害之準備與應變對策。

最後為初步探討區內火山灰或火山碎屑岩堆積層、土石鬆軟區及坡度陡峭之不穩定地區，在火山地震或颱風暴雨後，是否會引發土石流、山崩及地滑等現象，99年度於竹子湖附近之火山碎屑岩堆積層最危險之土石流潛勢區進行選址調查，並評估選擇逐年設樁進行位移監測之地點。100年度選擇4處較危險之土石流潛勢區地點，進行位移監測工作。目前正積極處理已記錄之資料，並整合陽明山國家公園內之其他六個雙頻GPS之連續記錄資料，未來正積極規劃加入傾斜儀，以期達到長期地表位移監測之目標。此外，為調查陽明山國家公園內坡度陡峭之不穩定地區堆積層厚度及其分佈，以時間域電磁法施測，從大油坑施測之成果與經驗顯示，陽明山國家公園內陡峭坡地之不穩定地區堆積層厚度往往大於10m以上，時間域電磁法克服了山區地形之施測限制，有效率而便捷地測得深部資料，應可推廣運用到陽明山國家公園區其他困難地形之探查與監測。

目前政府已於民國一百年底，為了增進我國對於火山觀測之能力及了解大屯火山活動的現況，積極整合現有的研究成果，並加強即時監測的功能，在陽明山國家公園內之菁山保育中心成立了大屯火山觀測站(TVO)。現在主要的火山監測方法包括有(1)火山地

震活動監測、(2)火山氣體與溫泉水的化學成份分析調查、(3)地殼變形的量測、(4)地溫監測及(5)噴氣即時影像監測。未來正積極規劃加入傾斜儀、重力、地磁、衛星影像等不同方法，以達到更完整之火山監測目的。



六、建議

一、立即可行建議

主辦機關：內政部營建署陽明山國家公園管理處解說課

協辦機關：內政部營建署陽明山國家公園管理處保育課

- 火山活動監測更加完善

具體作法：

- 積極增加火山監測方法，並提升監測站功能
- 訓練相關人員進行後續的維護與資料解讀

具體作法：

建議管理處未來能同時訓練相關人員，能夠進行後續的維護與資料解讀，便能夠更有效地長期連續監測本地區的火山活動。

二、中長期建議

主辦機關：經濟部中央地質調查所

協辦機關：經濟部能源局

- 國家公園土地資源暨景觀之管理（指標）

具體作法：

- 國家公園計畫通盤檢討作業之執行（指標）

具體作法：

全球能源逐漸枯竭，而地熱是未來可能加以利用的能源。政府單位通盤考慮於大屯火山區利用地熱能源的可行性。

七、參考書目

- 林正洪, 2006. 大屯火山群潛在岩漿庫及微震觀測網長期監測計畫(四), 內政部營建署陽明山公園管理處委託研究報告。
- 陳正宏, 1990. 台灣的火成岩。經濟部中央地質地質調查所, 共 137 頁。
- 楊燦堯, 2000. 陽明山國家公園大屯火山群噴氣之氦同位素比值研究。國家公園學報, 10(1), 73-94 頁。
- 楊燦堯, 1999. 陽明山國家公園大屯火山群之氦氣及其同位素地球化學之研究, 內政部營建署陽明山國家公園管理處委託計畫。
- 楊燦堯、何孝恆、謝佩珊、劉念宗、陳于高、陳正宏, 2003. 大屯火山群火山氣體成份與來源之探討。國家公園學報, 13(1), 127-156 頁。
- Allard, P., Carbonelle, J., Dajlevic, D., Le Bronce, J., Morel, P., Robe, M.C., Maurenads, J.M., Faivre-Pierret, R., Martin, D., Sabroux, J.C. and Zettwoog, P. (1991) Eruptive and diffusive emissions of CO₂ from Mount Etna. *Nature*, 351, 387-391.
- Belousov, A., Belousova, M., Chen, C.H. and Zellmer, G. (2010) Deposits, character and timing of recent eruptions and gravitational collapses in Tatun Volcanic Group, Northern Taiwan: hazard-related issues. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 191, 205-221.
- Cagniard L., 1953. Basic theort of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, 605-635.
- Carslaw, H.S., and Jaeger, J.C., 1959: *Conduction of Heat in Solids*, 2nd. Oxford University Press, London, 510 pp.
- Chen, C.H. and Nakada S., 1994, Comparison of late Cenozoic basaltic magma generation in Ryukyu arc, Okinawa Trough and adjoining area (NW Kyushu, Japan and N. Taiwan). *1994 8th International Conference on Geochronology*, 54.
- Chen, C.H., 1983, The geochemical evolution of Pleistocene absarokite, shoshonite and high-alumina basalt in northern Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 5, 85-96.
- Chen, C.H., 1990, Igneous rocks in Taiwan. *Central Geol. Surv.*, MOEA, 137pp.
- Chen, C.H. and Lin, S.B., 2002, Eruptions younger than 20Ka of the Tatun Volcano Group as viewed from the sediments of the Sunghshan Formation in Taipei Basin. *Western*

Pacific Earth Sciences, 2, 191-204.

Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B. and Marini, L., 1998, Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Appl. Geoch.*, 13, 543-552.

Constable, S.C., Parker, R.L., and Constable, C.G., 1987, Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52: 289-300.

Gamble, T.D., Goubau, W.M., and Clarke, J., 1979, Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, 18, 605-635.

Giggenbach, W.F., 1996, Chemical composition of volcanic gases. In: Scarpa, R., Tillin, R.I. (Eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcanic Hazards*. Springer, Berlin, pp. 221-256.

Ho, C.S., 1982, Tectonic evolution of Taiwan explanatory text of the tectonic map of Taiwan. Ministry Econ. affairs, ROC. 126pp.

Juang, W.S. and Bellon H., 1984, The Potassium-argon dating of andesites from Taiwan. *Proc. Geol. Soc. China*, 27, 86-100.

Kariya, K.A., and Shankland, T.J., 1983. Electrical conductivity of dry lower crustal rocks. *Geophysics*, 48, 52-61.

King, C.K., King B.S., Evans, W.C. and Zang, W., 1996, Spatial radon anomalies on active faults in California. *Appl. Geochem.*, 11, 497-510.

Klusman, R.W., 1993, Soil gas and related methods for natural resource exploration. Wiley, England, 483pp.

Lan, T.F., Yang, T.F., Lee, H.F., Chen, Y.G., Chen, C.H., Song, S.R. and Tsao, S., 2007, Compositions and flux of soil gas in Liu-Huang-Ku hydrothermal area, northern Taiwan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 165, 32-45.

Lee, H.F., Yang, T.F., Lan, T.F., Chen, C.H., Song, S.R. and Tsao, S., 2008, Temporal variations of gas compositions of fumaroles in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 178, 624-635.

- Lee, H.F., Yang, T.F., Lan, T.F., Song, S.R. and Tsao, S., 2005, Fumarolic gas composition of the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 16(4), 843-864.
- Lin, C.H., Konstantinou, K.I., Liang, W.T., Pu, H.C., Lin, Y.M., You, S.H. and Huang, Y.P., 2005a, Preliminary analysis of volcanoseismic signals recorded at the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, No.10, L10313, doi:10.1029/2005GL022861.
- Lin, C.H., Konstantinou, K.I., Pu, H.C., Hsu, C.C., Lin, Y.M., You, S.H. and Huang, Y.P., 2005b, Preliminary results of seismic monitoring at Tatun volcanic area of northern Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 16, 563-577.
- Lombardi, S. and Reimer, G.M., 1990, Radon and helium in soil gases in the Phlegrean Fields, Central Italy. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 849-952.
- Olhoeft, G.R., 1981, Electrical properties of granite with implications for the lower crust. *J. Geophys. Res.*, 86: 931-936.
- Rodi, W., Mackie, R.L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66, 174-187.
- Raiche, A.P. and Spies, B.R., 1981, Coincident loop transient EM curves for interpretation of 2-layer earth, *Geophysics*, 46, 53-64.
- Schumacher, D., 1991, Soil gas helium concentrations in the vicinity of a uranium deposit, Red desert, Wyoming. *US Geol. Survey open-file report*, 79-975.
- Song, S.R., Lo H.J., Chen, C.H., Tsao, S. and Yang, J.J., 1992, cauldron formation and volcanic eruption of the Tatun volcanic group. *4th Symposium Quaternary of Taiwan*, 45.
- Smith, et al., 1944, An automatic technique for presentation of coincident-loop TEM data, *Geophysics*, 59, 1542-1550
- Song, S.R., Yang, T.F., Yeh, Y.H., Tsao, S.J. and Lo, H.J., 2000, The Tatun volcano group is active or extinct? *J. Geol. Soc. China*, 43, 521-534.
- Sudo, Y and Hurst, A.W., 1998, Temperature changes at depths to 150 meters near the active crater of Aso Volcano: preliminary analysis of seasonal and volcanic effects. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 81, 159-172.

- Suppe, J., 1984, Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 6, 21-33.
- Symonds, R.B., Rose, W.I., Bluth, G.J.S. and Gerlach, T.M., 1994, Volcanic-gas studies: methods, results, and applications. In: Carroll and Holloway (eds.) Volatiles in magmas. *Rev. in Mineralogy*, 30, 1-66.
- Teng, L.S., Chen, C.H., Wang, W.S., Liu, T.K., Juang, W.S. and Chen, J.C., 1992, Plate kinematic model for late Cenozoic arc magmatism in northern Taiwan. *J. Geol. Soc. China*, 35, 1-18.
- Teng, L.S., 1996, Extensional collapse of the northern Taiwan mountain belt. *Geology*, 24, 949-952.
- Teng, L.S., Chen, C.H., Wang, W.S., Liu, T.K., Juang, W.S. and Chen, J.C., 1992, Plate kinematic model for late Cenozoic arc magmatism in northern Taiwan. *J. Geol. Soc. China*, 35, 1-18.
- Tilling, R.I., 1989, Volcanic hazards: Short course in geology, volume 1.28th International Geological Congress, Washington, D.C., 123P.
- Tsao, S.J., 1994, Potassium-argon age determination of volcanic rocks from the Tatun Volcano Group. *Bull. Central Geol. Surv.*, 9.
- Wang, K.L., Chung, S.L. and Chen, C.H., 2002, Geochemical constraints on the petrogenesis of high-Mg basaltic andesites from the Northern Taiwan Volcanic Zone. *Chem. Geol.*, 182, 513-528.
- Wang, K.L., Chung, S.L., Chen, C.H., Shinjo, R., Yang, T.F. and Chen, C.H., 1999, Post-collisional magmatism around northern Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough. *Tectonophysics*, 308, 363-376.
- Wang, W.H. and Chen, C.H., 1990, The volcanology and fission track age dating of pyroclastic deposits in Tatun volcano group, northern Taiwan. *Acta Geol. Taiwanica*, 28, 1-30.
- Yang, T.F., Sano, Y., and Song, S.R., 1999, $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio of fumaroles and bubbling gases of hot springs in Tatun volcano Group, North Taiwan. *Il Nuovo Cimento*, 22c, 281-286.

- Yen, T. P., Tzou, Y. H. and Lin, W. H., 1984, Subsurface geology of the region of the Tatun Volcano Group. *Petrol. Geol. Taiwan*, 20, 143-154.
- Zeni, L., A. Minardo, Z. Petrillo, M. Piochi, R. Scarpa and R. Bernini, 2007, Distributed optical fiber sensors: an approach for monitoring the thermal gradient at the Campi Flegrei caldera, *Geophy. Res. Abs.*, **9**, 04074.

