

# 火山災害潛勢評估及觀測技術強化 (3/4)

## Potential Assessment and Observation Technology Enhancement of Volcanic Hazards (3/4)

主管單位：經濟部中央地質調查所

林正洪<sup>1</sup> 陳建志<sup>2</sup> 馬士元<sup>3</sup> 陳昱霖<sup>4</sup> 洪國騰<sup>5</sup> 許鈞傑<sup>5</sup> 李柏村<sup>5</sup> 陸挽中<sup>5</sup>  
Lin, Cheng-Horng<sup>1</sup> Chen, Chien-Chih<sup>2</sup> Maa, Shyh-Yuan<sup>3</sup> Chen, Yu-Lin<sup>4</sup>  
Hong, Guo-Teng<sup>5</sup> Hsu-Chun-Jhieh<sup>5</sup> Lee, Po-Tsun<sup>5</sup> Lu, Wan-Chung<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 中央研究院地球科學研究所 <sup>2</sup> 國立中央大學地球科學系 <sup>3</sup> 社團法人臺灣防災產業協會 <sup>4</sup> 中興測量股份有限公司 <sup>5</sup> 經濟部中央地質調查所

### 摘要

本計畫投入臺灣北部火山活動徵兆監測工作，以瞭解臺灣北部大屯火山群及龜山島火山岩漿庫或熱液活動，作為火山災害潛勢評估及火山防救災政策制定依據。內容包括火山微震、地球化學、地表變形監測及地球物理探測等。綜合 111 年各項監測資料，與往年相較，大屯火山區與龜山島之火山活動仍處於穩定狀態。此外，111 年完成之磺嘴及竹子山火山亞群火山災害潛勢圖資，可供各機關火山災害防救計畫後續運用。大屯火山地區二連續測站之自然電位長期變化可作為火山地區熱液活動之觀察標的。以 2022 年群震事件紀錄對比其對應時段的自然電位功率譜比值變化為例，在群震發生前後，經常出現低頻段功率譜比值變異。馬槽地熱區之近地表電性構造特性顯示，在馬槽地熱區噴氣孔下方的極低電阻率分布零散，代表馬槽地熱區地下缺乏類似於大油坑的集中型裂隙系統發育。

**關鍵詞：**臺灣北部、火山監測、火山地質、火山災害

### Abstract

This project invests in monitoring the signs of volcanic activity in northern Taiwan to understand the Tatun Volcano Group and Guishan Island volcanic magma reservoir or hydrothermal activity in northern Taiwan, as a basis for volcanic disaster potential assessment and volcanic disaster prevention and relief policy formulation. The contents include volcanic microseismic activities, geochemistry, surface deformation monitoring, terrestrial spontaneous potential observation and geophysical detection, etc. Based on the monitoring data in 2022 and compared with previous years, the volcanic activity in the Tatun Volcanic Area and Guishan Island is still in a stable state. In addition, the volcanic hazard map of Mt. Huangzui and Mt. Zhuzi volcanic subgroups completed in 2022 can be used for subsequent use of volcanic disaster prevention and rescue plans of various agencies.

Taking the 2022 earthquake swarm event records and comparing the spontaneous potential

power spectrum ratio changes in the corresponding period as an example, before and after the swarm earthquakes, there are often variations in the low-frequency power spectrum ratio. The near-surface electrical structural characteristics of the Matsao geothermal area show that the extremely low resistivity distribution below the fumaroles in the Matsao geothermal area is scattered, which means that the underground of the Matsao geothermal area lacks a concentrated fracture system similar to the Dayoukeng fumarole.

**Keywords** : Tatun Volcano Group; Volcanic Monitoring; Volcanology; Volcanic Hazard Map

## 一、前言

本項調查之執行策略包含持續性之火山活動觀測資料收集與測站維護，新型觀測技術方法之開發調查及研究，並導入災害潛勢評估工作。前期計畫已在臺灣北部火山地區建立了火山活動觀測站網，包括溫泉水質、火山氣體、地下溫度觀測站以及地表變形衛星連續追蹤站等。本計畫將持續進行觀測資料收集，並加設火山影像觀測及地球化學觀測站，增加測點密度，同時強化資料即時傳輸能力，掌握火山活動徵兆變化。

臺灣北部火山微震觀測利用目前設置於地表的地震儀持續周及火山微震訊號，並適度增加或調整觀測站之個數，可全面性同時監測大屯火山地區及宜蘭龜山島等兩處火山地區微震及火山活動地動訊號，偵測可能之火山微地動(Volcanic tremors)，試圖辨識火山主要活動位置與深度，並接收地震網外之區域地震，期望能清楚判釋火山地區底下可能主要岩漿活動之位置，同時利用震波層析成像之方法，嘗試獲得更仔細之速度構造模式。期望對火山可能岩漿之存在形貌或其活動行為可有進一步瞭解，達到多重學術與防災之目的。

根據鄰近國家的經驗，火山在噴發之前會造成明顯的地表變形現象，本計畫將引入火山地區地表變形觀測工作，彙整地表衛星連續追蹤站網的資料，適時加設觀測站，並利用永久性散射體雷達差分干涉(PSInSAR)技術、次聲波與井下傾斜計配合火山地區精密水準測量綜合瞭解火山地區地表變形的趨勢，並作為火山活動的評估依據。在災害潛勢評估調查方面，本計畫將進行火山地質調查與歷史災害資料蒐集，彙整現有的火山災害潛勢調查成果，分析致災因子並評估火山災害可能影響範圍，並分年繪製出版火山災害潛勢圖。

整體計畫將逐年建置更新火山活動徵兆以及災害潛勢相關資料庫，並透過資料公開平台提供災防管理單位以及民眾查閱，達到資料公開的政策目標，並協助災害防救計畫研擬執行。同時，定期辦理火山活動與災害評估說明會，向民眾及各級政府宣導火山觀測成果以及資料查詢方式，滿足民眾知的權利，並提升對自家周遭環境的認知。本計畫主要工作項目包括：(1)持續建置火山氣體、溫泉水質、地溫及微震活動等即時監測站，

掌握火山活動現況，評估火山活動狀態。(2)臺灣北部火山地區地表變形觀測，利用永久散射體差分干涉法影像分析、次聲波與井下傾斜計配合衛星連續追蹤站以及水準測量了解火山地區地表變形情形。(3)火山災害潛勢研判分析及火山災害潛勢圖資更新，結合多種地球物理探測技術精進火山地區地下構造調查成果，配合過往火山活動影響範圍分布調查資料研判火山災害可能影響範圍與災害潛勢。(4)更新地球化學分析設備及新建火山氣體站、地震站，提高火山活動徵兆值變化判釋精度及分析效率。(5)持續更新及公開火山活動觀測資料，提供火山觀測資訊，並推動火山防災知識教育推廣。

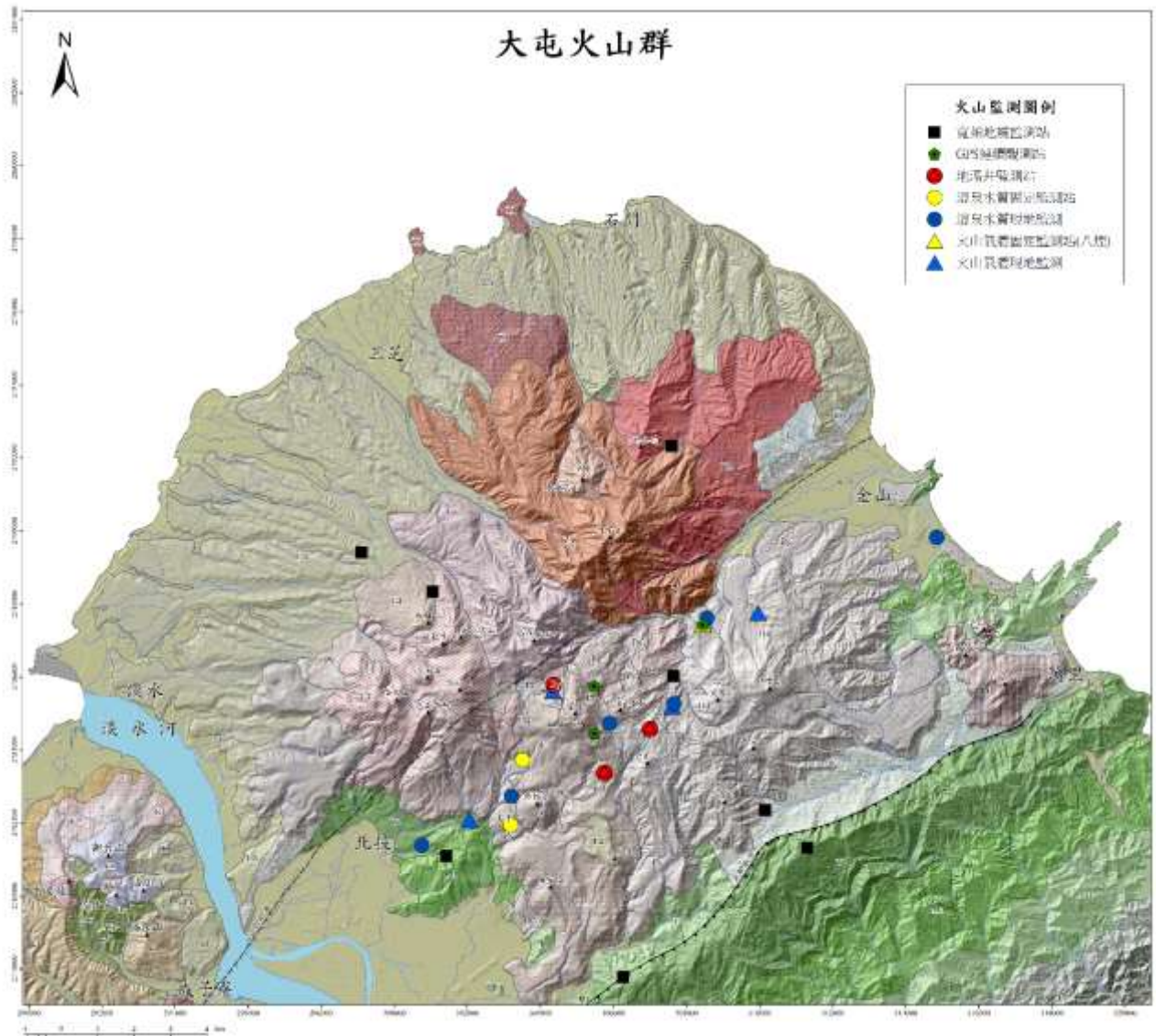


圖 1 本所於大屯火山群所建置的火山觀測站網。

## 二、臺灣北部火山地區地震、地球化學與地表變形監測

本所與大屯火山觀測站合作進行大屯火山與宜蘭龜山島地區之火山活動徵兆觀測，其中包括地震活動、火山氣體與溫泉水質收集分析、地表變形觀測與分析，以及地震、GPS、火山土壤氣體與溫泉水質監測站運作維護。

本計畫之測震網採用高解析度的數位式地震記錄器，並以高效能、PC-Based 的資料擷取系統作分析研究。本計畫所架設的臨時地震觀測網皆為寬頻測站，採用寬頻段的三向量速度型感應器，能記錄大地震及鄰近區域的微小震動，野外測站使用儀器包含同時具備感應器及紀錄器功能的 Galrup(6TD)及日本東京測震公司發展之地震記錄器搭配感應器等，將感震器的地動信號詳實記錄並數位化儲存，存放資料的記憶體是硬碟，其容量高達 20 Gigabyte。硬碟優點在於連續資料的資料量龐大，高容量硬碟可減少前往蒐集資料的次數。觀測微小地震是本監測網的主要任務，為避免在監測的過程中漏失任何有用的資訊，連續記錄方式就成為較佳的選擇。具有 24 位元的解析度，取樣率最高可達 100 次/秒。

地震測站維護部分，共計維護大屯火山區域及龜山島各八處寬頻地震測站的運轉，包含定期派員至現地下載原始紀錄資料，資料格式轉換外，並不定期巡視檢查並排除各項現地、儀器狀況、即時訊號接收等問題。所維護的地震站分別為 YML01(國軍墓)、YML02(萬里)、YML07(土地公廟)、YML09(北新庄)、YMC05(倒照湖)、YMC08(明溪街)、YMC10(北投溫泉)、YMS17(磺溪頭)，IL01(三貂角)、IL02(大里)、IL03(大溪)、IL04(頭城)、IL17(三星)、IL18(冬山)及龜山島 IL11、IL12 兩處，測站分佈如圖 2、圖 3。

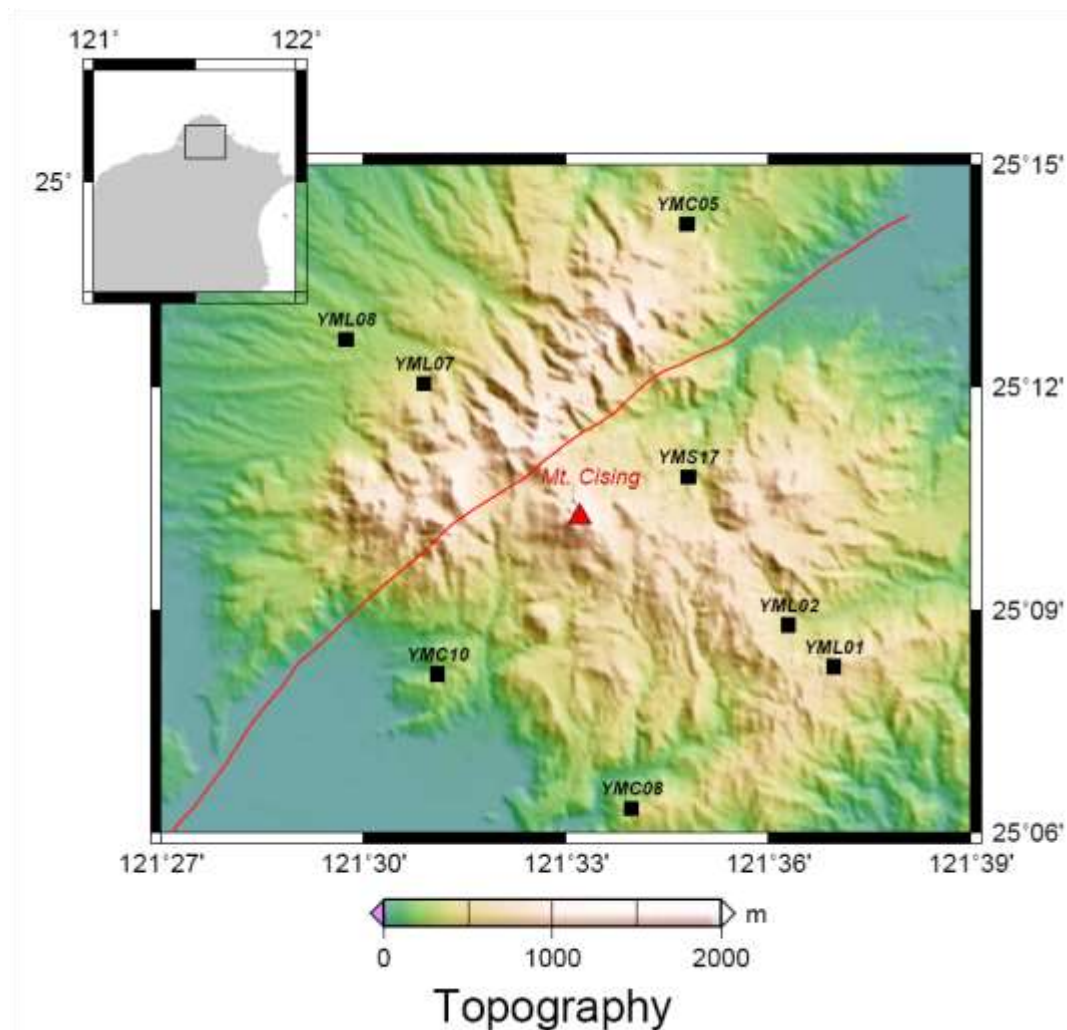




圖 2、大屯火山區域寬頻地震測站分佈圖。

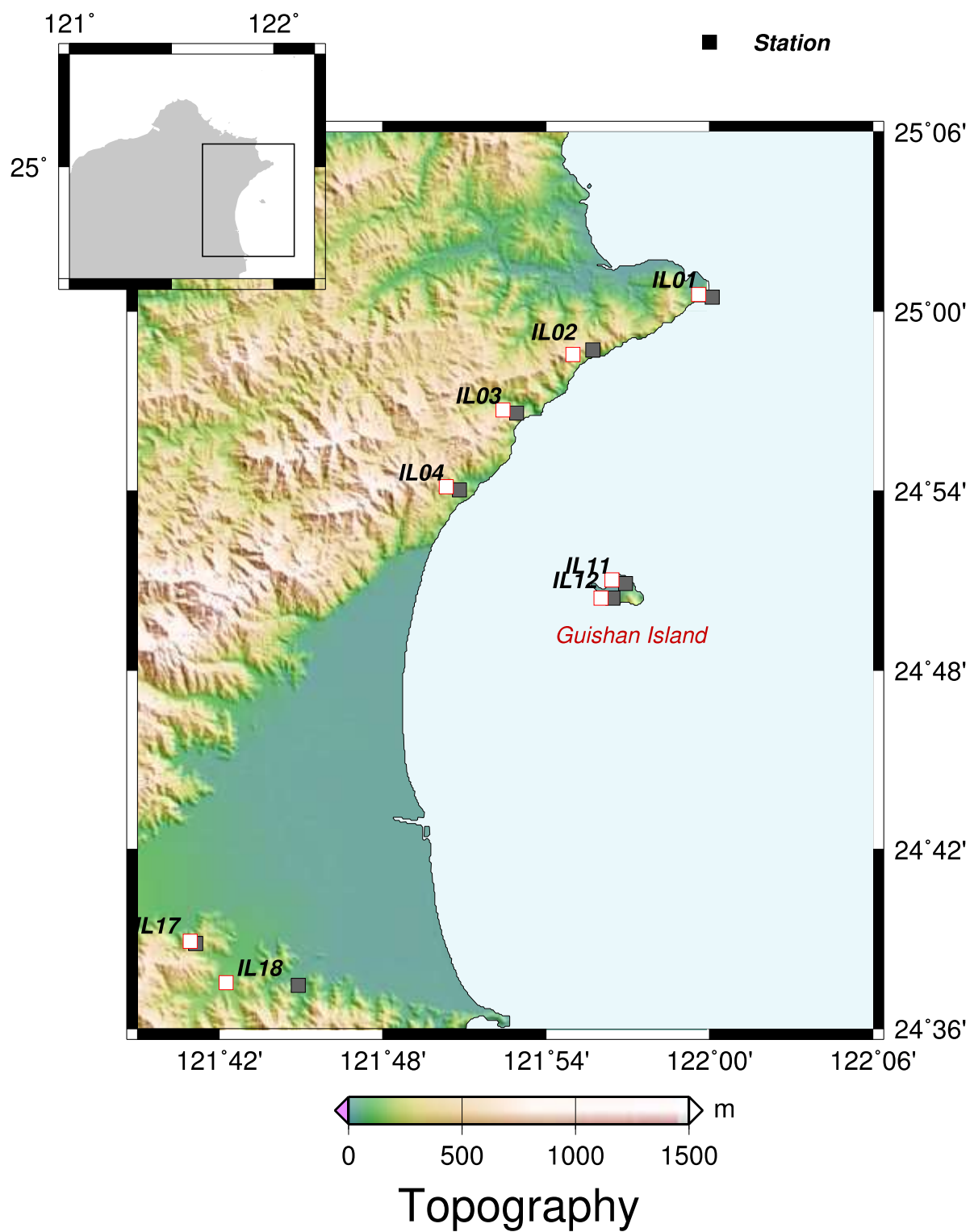


圖 3、宜蘭區域寬頻地震測站分佈圖。

大屯火山區域過去數年的背景微震活動度，每年平均微震數量為 2,000 起至 2,500 起，而 2022 年 1 月至 12 月地震總數 3,158 起明顯較歷年年平均地震數量增加，其中 10 月大尖後山地震序列單一事件地震數量達 923 起，排除該地震序列後，2022 年地震活動與背景地震活動度一致。2022 年地震活動度從 1-3 月數量偏低，後數月地震數量增加，至年底地震活動又急遽降低，每月地震數量有相當大的差異，其中數量最多的 10 月，主要反映大尖後山地震序列，當月地震總數達 1,087 起，為 2022 年地震數量最多的月份，而 2 月及 11 月地震數量僅 74 起及 75 起，地震數量遠低於歷年單月平均值。比較 2022 年每月地震數量，變化超過 10 倍，顯示本年度地震活動度的變化明顯，類似的數月地震活動度增加情形，過去曾經多次發生，為反映短期的區域應力變化，各月微震數量詳細數值整理於表 1。

2022 年微震分布(圖 4)與背景地震活動度一致，震央集中在大屯火山區域地震活動性較高區域，三個區域分別為七星山、大油坑、八煙至磺嘴山，於圖上 CIS、DYK 及 BY 標示。上述地震集中的三個區域地震活動度明顯隨時間變化，大致為：

- (1) 七星山區域: 6 月至 9 月地震活動度明顯增加，特別在 6 月及 9 月在七星山西南側發生大量地震，但多為小規模地震。4 月地震活動度也較高，於該區域發生群震。對比上述期間地震活動增加的西南側，多為小規模地震，七星山東南側區域靠冷水坑區域，則零星出現規模較大的地震，包含 1 月、3 月都發生過規模 2.0 地震。
- (2) 大油坑擎天崗區域，今年地震活動時期非常集中，主要發生在 4 月至 7 月，其他時間地震活動相對低。
- (3) 八煙磺嘴山地區，該區域地震活動時期都非常短暫，與七星山及大油坑數月的週期變化，變化趨勢明顯不同。多數時期僅有零星地震發生，但會短期發生地震活動度增加的情形。今年 10 月的大尖後山地震序列，皆是數天內地震急劇增加後，快速降低。今年 6 月至 9 月有數次群震發生，顯示該區域地震活動明顯增加，而至 10 月發生大規模的大尖後山地震序列。

上述各地區的時間變化可由對應的每月微震數量可知。另外計算各區域地震數量的比例，可了解三個區域的集中性，比值愈高表示當月地震具明顯集中性。3 月近 50% 地震發生在七星山，4 月至 5 月約 50% 地震發生在大油坑。6 月開始，八煙整體的地震活動度增加，地震總數比例從 10% 增加至 20%，8 月已有超過 50% 地震發生在這個區域。10 月更是因為大尖後山的地震序列，該區的地震數量高達近 90%。其餘地震活動度較低的時期多是平均分布在七星山與大油坑，而八煙僅為零星分布。

表 1 大屯火山區域每月微震數量及各分區微震數量表

Time	Number of Micro-Earthquake			
	Tatun Volcano Group (TVG)	Mt. Cising (CIS)	Dayoukeng (DYK)	Bayen (BY)
2022/01	120	45	46	11
2022/02	74	23	24	8
2022/03	155	72	36	26
2022/04	242	92	119	8
2022/05	195	40	115	22
2022/06	345	152	73	79
2022/07	193	60	71	39
2022/08	396	100	43	203
2022/09	253	117	34	55
2022/10	1087	26	22	963
2022/11	75	27	29	14
2022/12	23	9	10	3

2022

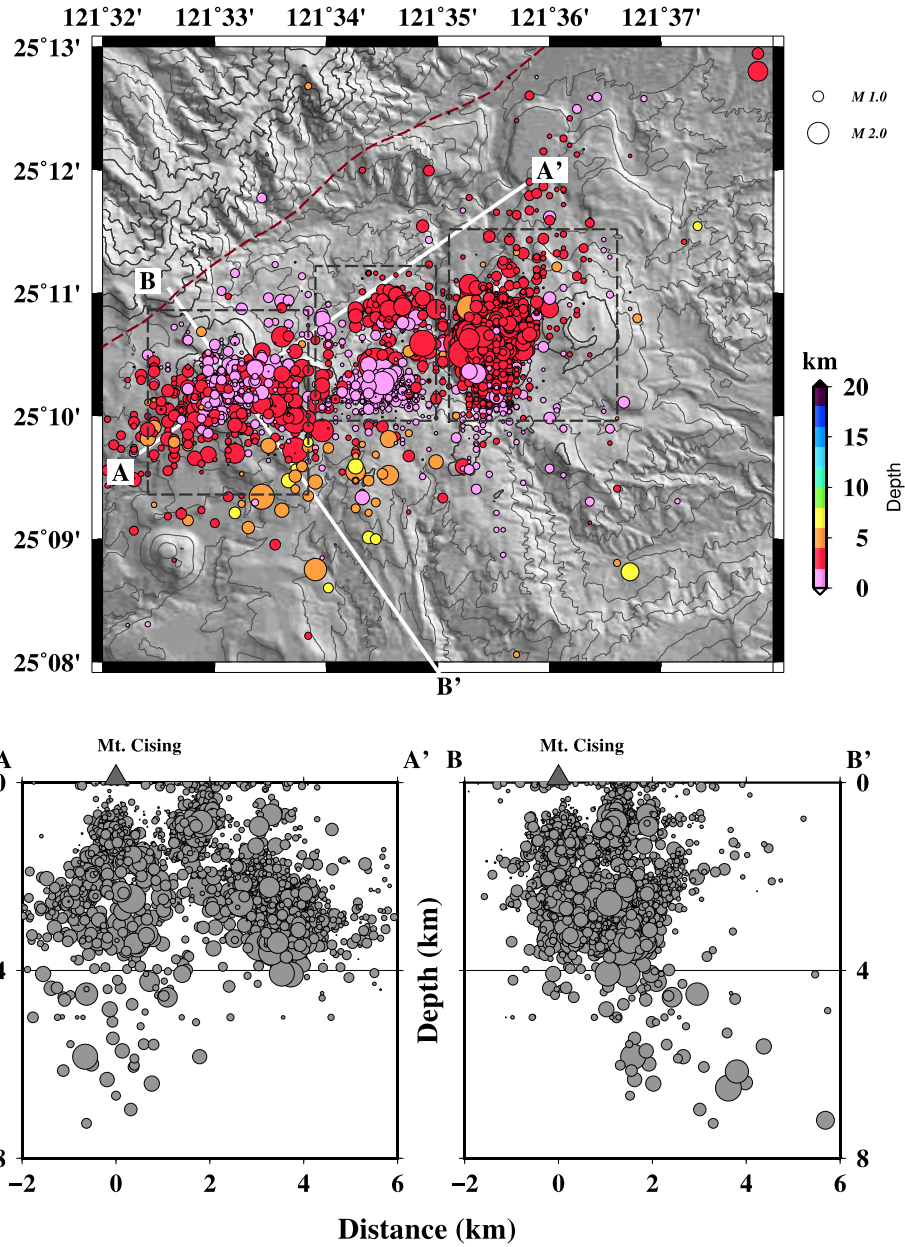


圖 4 大屯火山區 2022 年地震活動分布，圓圈代表震源（大小表示規模，顏色表示深度），灰三角為七星山。AA' 為東北—西南向剖面，BB' 為西北—東南向剖面。（單位：公里）



大屯火山群整體研究區域微震數量統計(圖 5)，及七星山、大油坑及八煙各別區域的微震數量統計(圖 6、圖 7、圖 8)皆可清楚顯示整年度地震活動度的趨勢。2022 年大屯火山群整體的地震活動前數個月與下半年變化明顯，1 月至 2 月地震活動低，至 3 月中旬開始逐步增加，在 8 月及 10 月多出現地震大幅增加的趨勢，兩個峰值都反映八煙至大尖後山區間的群震及地震序列。

分區的統計圖，可清楚看出每個區域的地震活動度隨時間變化情形，與區域變化特性，其中以八煙地區變化最為明顯，10 月出現高峰，8 月初及 6 月中旬也有兩個較小的峰值，其餘時間地震活動度都相對低。由八煙的地震數量統計圖可知該區域背景地震活動為三區中較低，而發生型態會以密集地震序列或群震方式，伴隨大量微震，但區域的活動時間非常短，僅為一至兩天時間，值得注意該區發生較大規模地震時，伴隨的餘震數量都較發生於七星山及大油坑數倍之多，且多為數個大規模地震組成。今年 10 月 8 日規模 3.1 的大尖後山地震，整個地震序列包含前震及餘震，三天的地震序列共計地震數量達 923 起，對比 4 月 3 日規模 3.2 的大油坑地震序列，兩天的地震序列僅 34 起地震，兩者差異非常多，應與兩區域的發震機制及區域構造有關，兩主震的對應震源機制將於後討論。

大油坑的微震數量統計圖，則顯示有數月的週期變化，1 月至 3 月地震數量較少，於 4 月第一週發生較大規模地震序列後，地震活動持續，至 5 月初出現峰值反映群震活動後，地震活動雖然較為趨緩，但至 7 月初仍有零星小區域地震增加。整體而言，大油坑區域自 4 月至 7 月初期間地震活動增加，而其他時間地震活動度皆不高，該持續 2 至 3 個月的地震活動增加特徵，過去數年在大油坑都有觀測到相同週期變化，但每年峰值出現的時間則不同。

而七星山區域，2022 年變化幅度較 2021 年大，峰值特徵較為明顯，包含 4 月底及 6 月初的群震，整體而言自 2 月底地震增加後，持續至 9 月末活動度較高，期間包含多起七星山群震，而 10 月至 12 月地震數量則偏少。

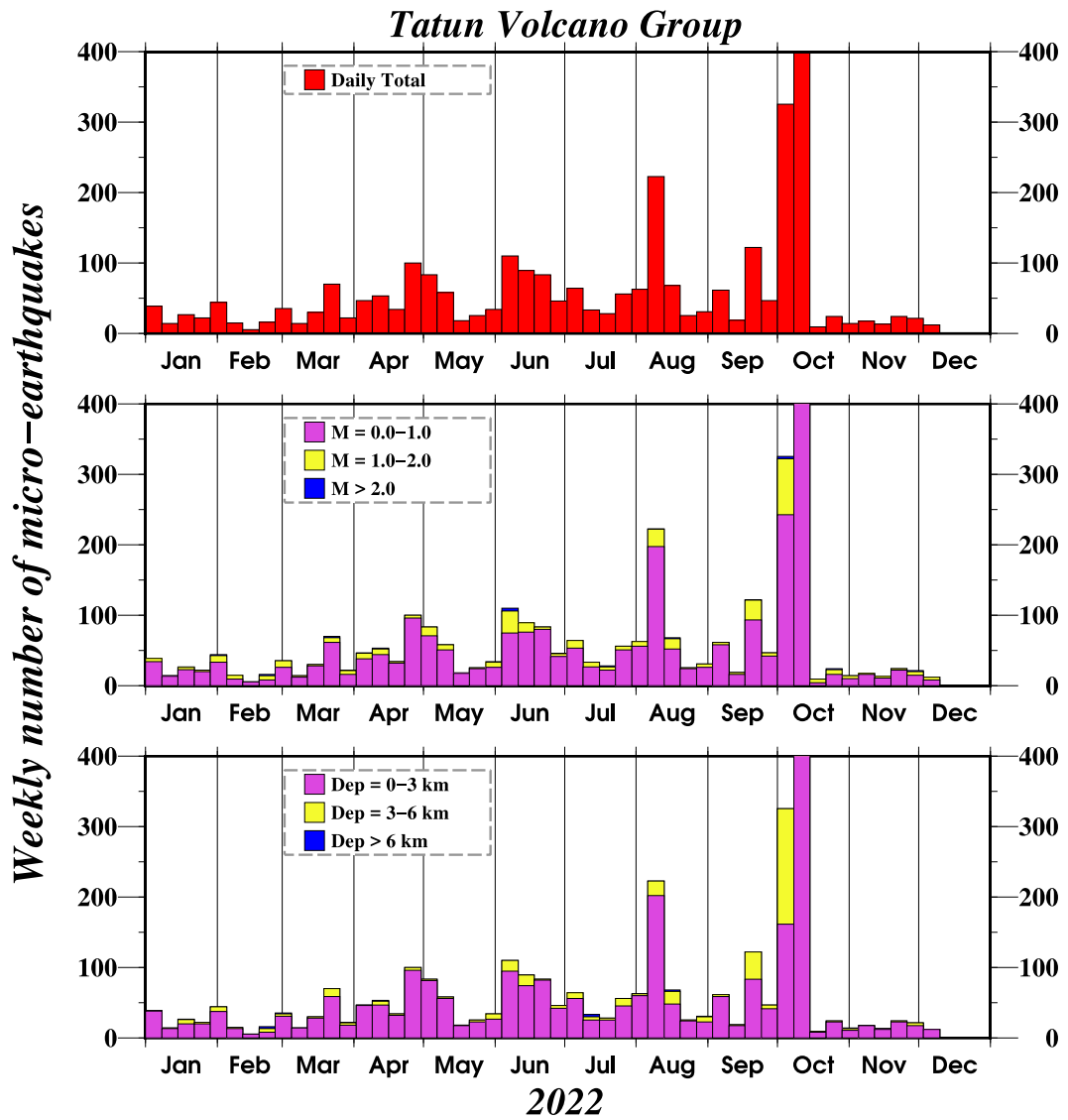


圖 5 大屯火山群區域每週微震數量統計圖

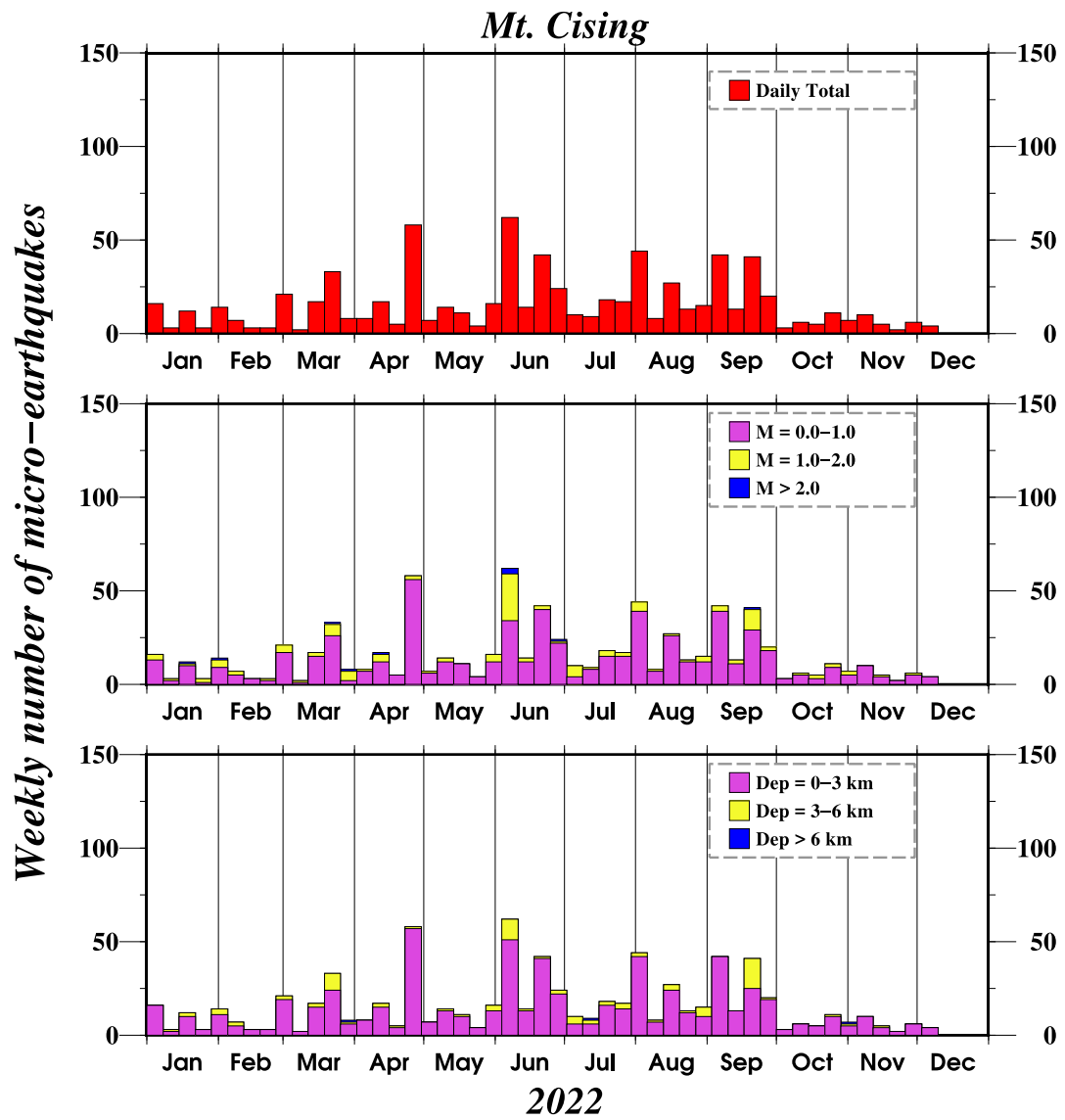


圖 6 七星山區域每週微震數量統計圖。

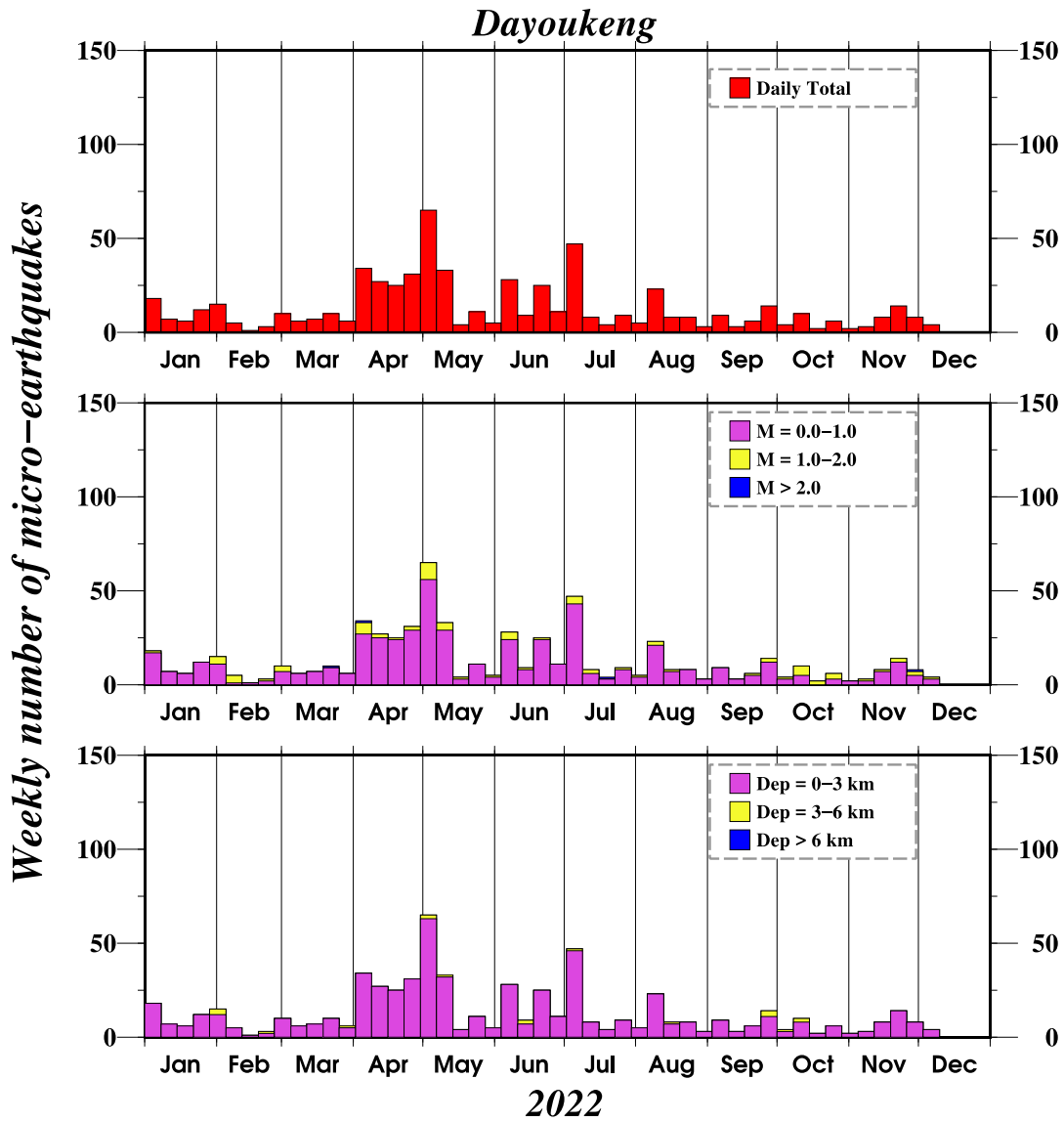


圖 7 大油坑區域每週微震數量統計圖。

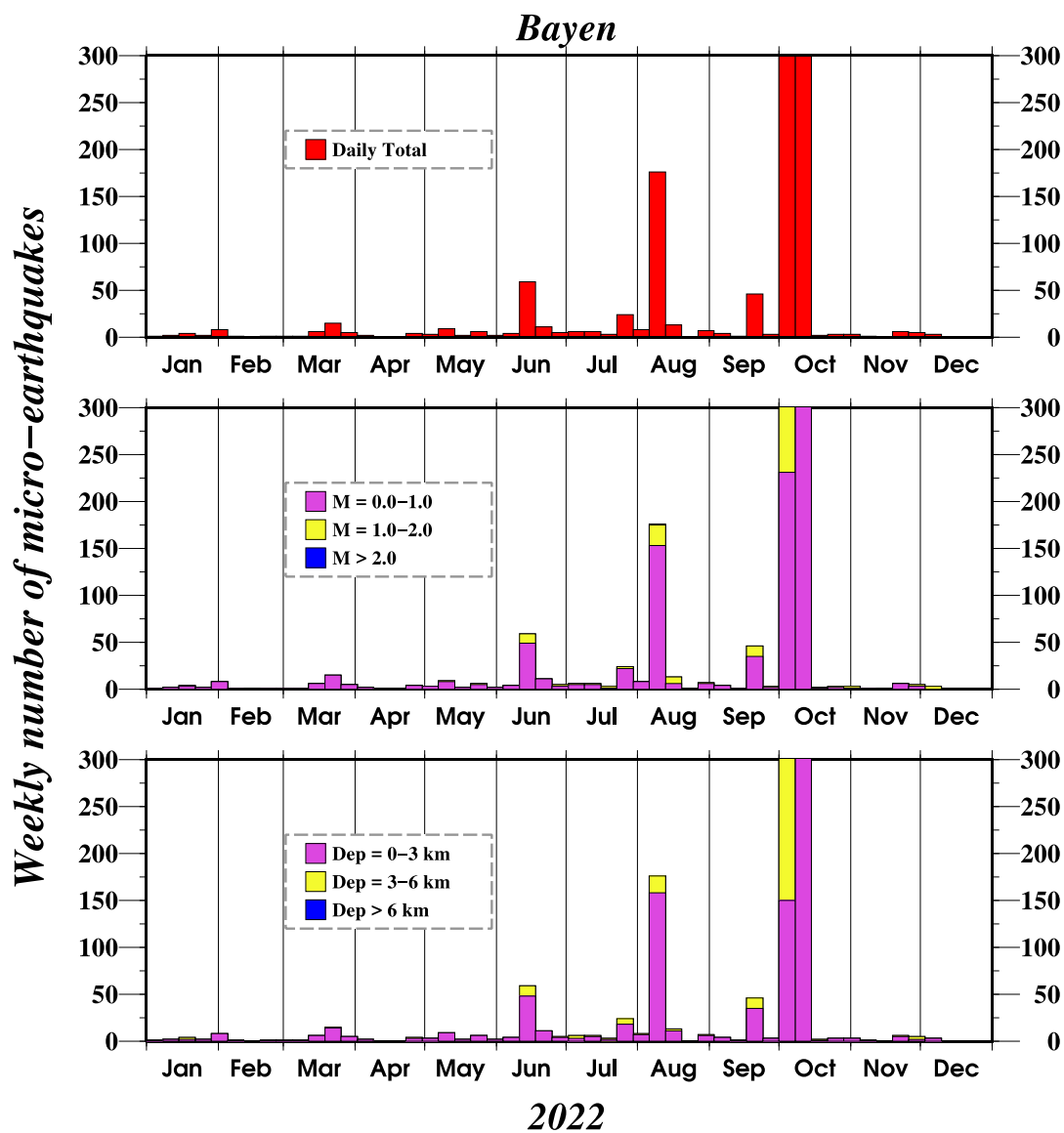


圖 8 八煙區域每週微震數量統計圖。

宜蘭與龜山島區域近年地震數量，每年地震總數約為 2,300-2,500 起，2021 年地震總數達到過往背景值的 2 倍之多。2022 年至 11 月地震總數達 9,407 起，幾乎為過去年平均數量的 3-4 倍，顯示近年宜蘭及龜山島區域地震活動性有逐漸增加的趨勢。2022 年雖整體地震數量大幅增加，但隨時間變化幅度相當大，1 月地震



總數為 268 起，至 2 月增加至 512 起後更逐步增加，4 月地震總數已達 1,247 起，雖然 5 月微幅降低，但 6 月地震數量又達 1,241 起，至 7 月更高達 2,232 起，為年度高峰值，亦為過去數年記錄到最高數值。而後從 8 月開始，地震數量逐步減少 (8 月 1,338 起)，至 11 月 (265 起地震) 已和 1 月數值相當，顯示從 3 月開始逐步升高的地震活動已漸趨緩。

除地震大量增加，總數為過去觀測值的近 4 倍外，在宜蘭平原或龜山島區域地震震央皆更為集中。2022 年宜蘭及龜山島微震空間分布(圖 9)，主要集中在龜山島鄰近區域及宜蘭平原南側，對比背景地震活動度，龜山島鄰近區域的地震分布相似，但宜蘭平原南側區域地震活動大幅增加，該區域的活動性至 2021 年增加後，2022 年仍持續高活動性，特別在上半年，該區域也數起較大規模地震發生。今年地震數量皆明顯增加且分布集中。

除地震大量增加，總數為過去觀測值的 2 倍外，在宜蘭平原或龜山島區域地震震央皆更為集中，主要集中在龜山島鄰近區域及宜蘭平原南側。對比背景地震活動度，龜山島鄰近區域的地震分佈相似，但宜蘭平原南側區域地震活動則大幅增加。

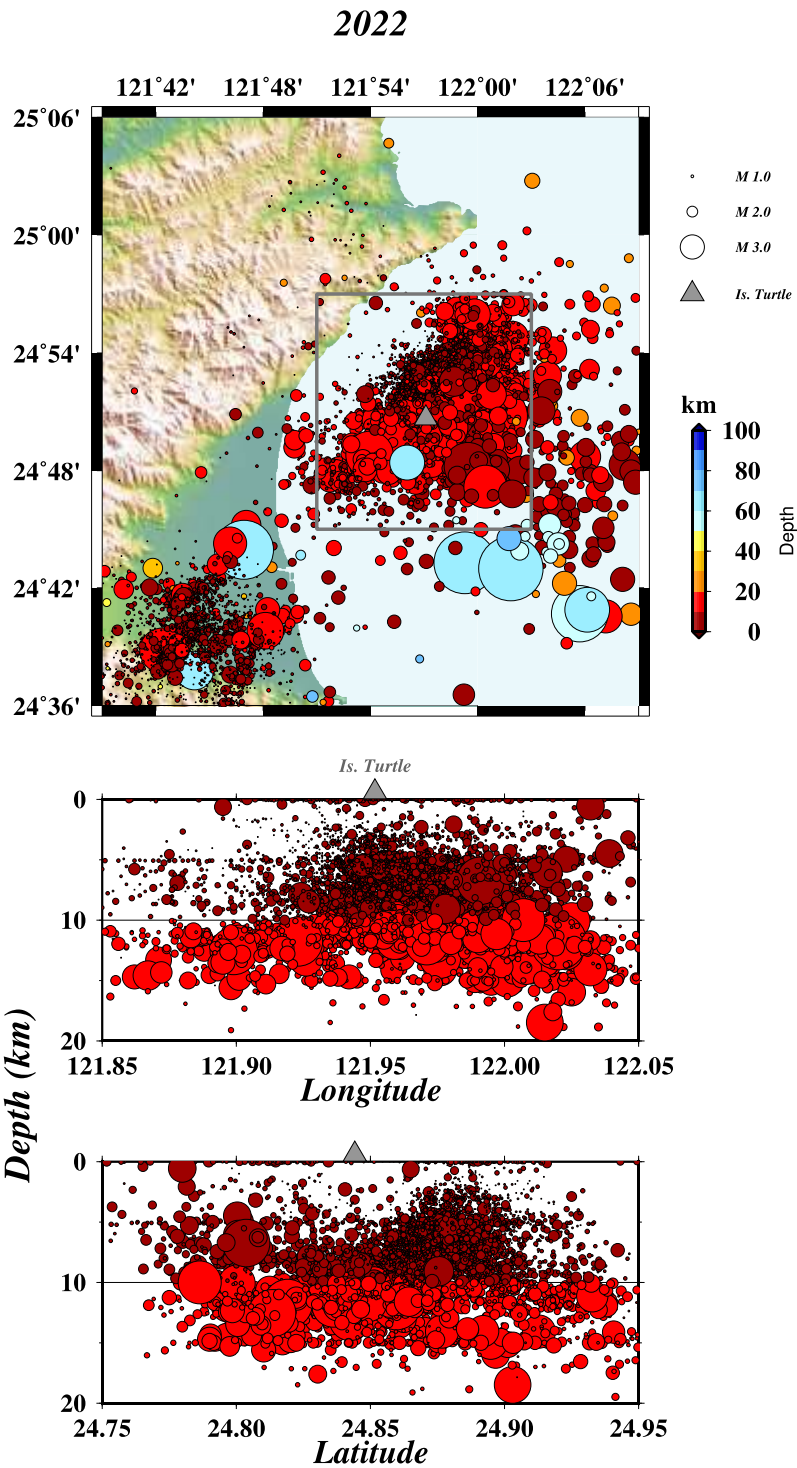


圖 9 宜蘭及龜山島微震分布及深度剖面圖(龜山島剖面)。

火山噴氣氣體成分的變化常用來作為探討岩漿活動與監測火山活動最有效的方法之一。藉由火山噴出的氣體變化可以推斷出此一火山的岩漿性質和活動性。許多研究指出在火山噴發前，噴氣中的某些氣體成份會突然增加或是減少，或是同

位素值會有所改變等等。因此調查火山的氣體成分及同位素變化可以監測火山運動，並可以進一步預測可能到來的爆發。

本計畫定期採樣位置為小油坑、大油坑、八煙、硫磺谷和煖子坪。採樣時間最少維持每月一次。利用氣體成分  $N_2$ -He-Ar 三角圖(圖 10)顯示，2022 年的結果明顯分為兩個部分，上半年時氦氣成分略有異常，下半年則回到背景值的趨勢。由  $CO_2$ -HCl- $S_{total}$  三角圖(圖 11)來看，2022 年上半年標本落點在岩漿與熱液活動之間來回波動，到了下半年幾乎都落熱液活動為主的區域，特別是煖子坪與大油坑最明顯。自 2019 年以來大油坑的  $SO_2/H_2S$  比值有升高的趨勢，其他區域的  $SO_2/H_2S$  也顯示有些微增加的趨勢。雖然  $S_{total}/CO_2$  雖然看起來略有下降，不過硫化物中的  $SO_2$  和  $H_2S$  分別代表岩漿和熱液環境，在這段時期  $SO_2/H_2S$  是呈現增加的趨勢，顯示這時期應該有更深部的岩漿性物質上湧。同時間的氦同位素並沒有觀察到有明顯變化(圖 12)，顯示岩漿庫目前可能為穩定狀態。

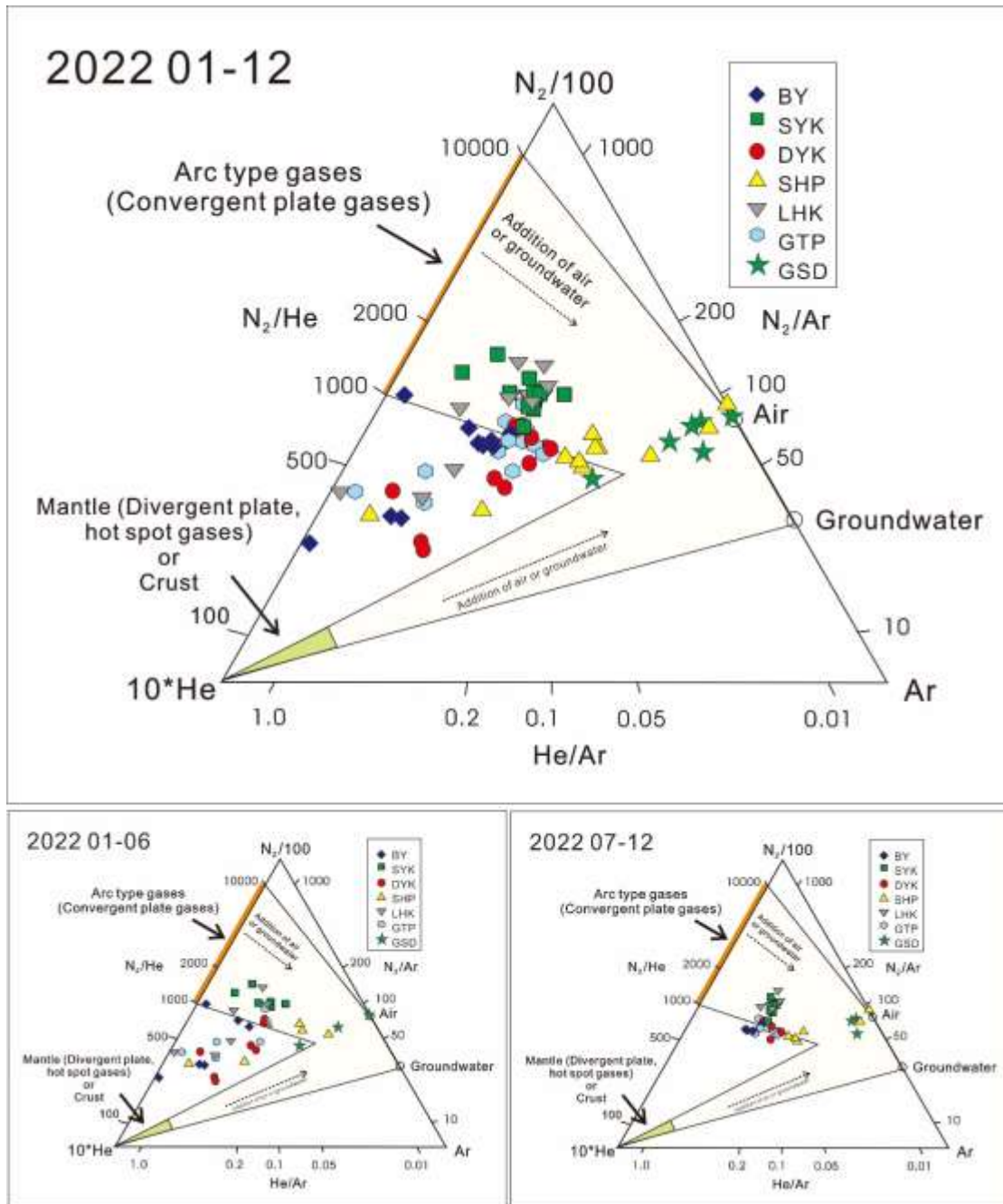


圖 10 N<sub>2</sub>-He-Ar 三角圖。上半年和下半年的分析結果有明顯不同；上半年標本落點較分散，而下半年分析結果則和背景值類似並且沒有明顯變動。

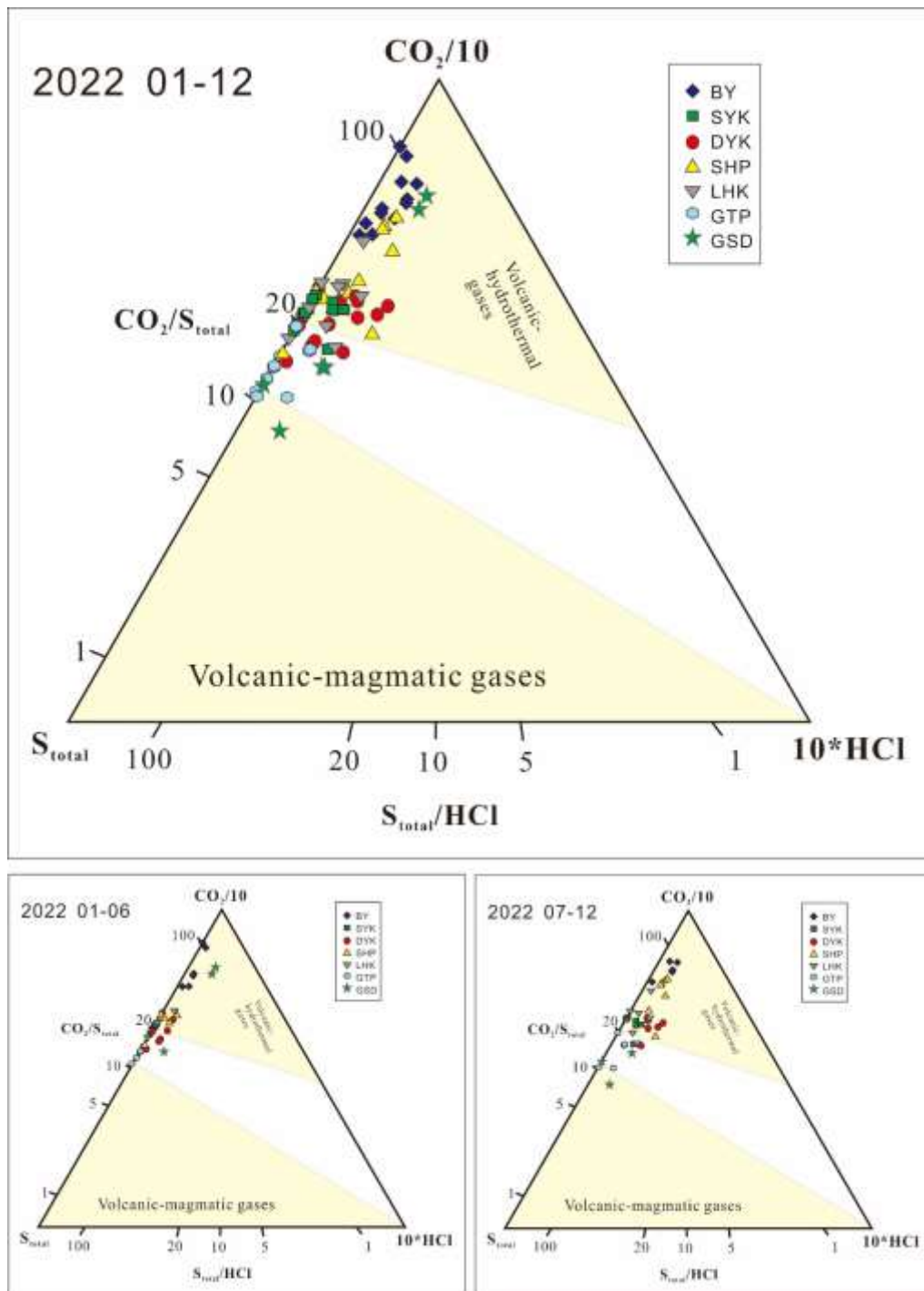


圖 11  $CO_2$ -HCl- $S_{total}$  三角圖。同樣上半年和下半年的有明顯不同；上半年標本落點較分散，而下半年集中在熱液活動為主的區域。



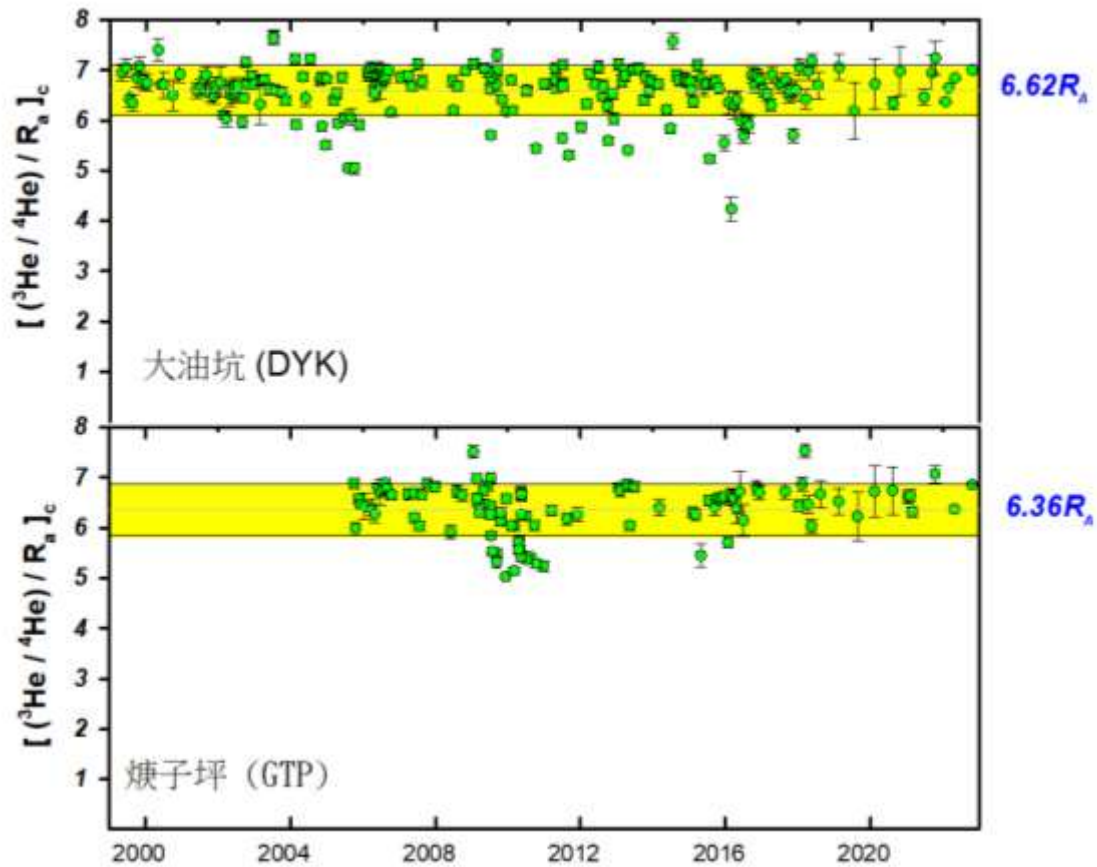


圖 12 2022 年大屯火山區大油坑 DYK、煥子坪 GTP 火山氣體氦同位素比值與地表大氣同成分的比值  $R_A$ ，值越大，代表氣體的岩漿組成比例越高。2022 年大屯火山地區氦同位素比值與往年相比無明顯變化，顯示岩漿活動可能為穩定狀態。

分析 2013 年至 2022 年 10 月北部地區 GPS 速度場結果發現，扣除長期時間序列於 2020 年開始相當活躍的大油坑站(YM09)與測站東側有嚴重之植物遮蔽導致資料接收度不佳的菁山站(YMN2)外，以 YM03 為參考點，整體水平位移速度值介於 1.26 mm/yr 至 5.41 mm/yr，以八煙的 GS95 測站有最大的水平位移，其次為位於七星山的 YM07 測站，但整體而言水平位移速率均差異不大，並且所有測站相對 YM03 都是以向西為移動方向。垂直運動速度方面，明顯可以觀察到整個測區可分為東西兩區，東邊的大油坑區域以抬升為主，而西邊的七星山區域則以下陷為主。

本計畫同時結合地調所與中研院之 GPS 站網，將測站區分為橫越七星山地區與磺嘴山地區之 GPS 基線連續變化。以橫越七星山地區水平基線分析初步結果顯示，均是以向小油坑測站(YM07)壓縮的運動方式。整體而言，七星山北側區域往小油坑站(YM07)及馬槽(YM06)方向的測站之間較無明顯的相對伸張或壓縮；菁山

的 YMN2 測站相對七星山站(GS93)有較明顯的壓縮行為，而七星山站(GS93)相對與小油坑及八煙兩站呈現下陷特徵。

橫越磺嘴山地區水平基線分析初步結果則顯示，若以磺嘴山西北方的 GS95 測站為參考點，位於大油坑的 YM09 測站與萬里的 YM03 測站(基線編號 6 及 7)都呈現伸張的運動方向，其斜率值分別為-4.0 及-2.2 mm/yr。但由於 GS95 測站於 2018 年 4 月後才有資料，並且整體而言接收資料相對較差，對於基線計算較不可信。因此另改選鄰近的中研院測站八煙站(YMN4)為參考點，於分析時間段(2018/01~2022/10)其斜率值分別為 2.4 及 1.0 mm/yr，表示兩個測站都以向參考站 YMN4 壓縮的運動行為，並且又以萬里站(YM03)與八煙站(YMN4)之間的壓縮量較為明顯。

### 三、臺灣北部火山地區大地自然電位觀測

本計畫(111 年度)順利完成預計工作，完成的成果如下：

1. 士林地電站與磺嘴山地電站 2021 年 12 月至 2022 年 11 月之自然電位時序資料檢視與功率譜分析。
2. 五個集膚深度所對應的頻率點的功率譜時間序列檢視。
3. 四個目標地震事件與地電功率譜之相關性分析。
4. 大屯火山地區的馬槽地區至少 1200 公尺的地電阻剖面施測。

在自然電位的部分，本計畫根據四個目標地震事件與自然電位功率譜、降雨量、溫度、磁暴指數的比較分析，在排除掉降雨量、溫度、磁暴指數造成的自然電位功率譜變化，發現目標地震前後通常伴有低頻段的自然電位功率譜之異常。這與過去 109 年度、110 年度的報告結果一致。故未來建議應設法量化地震與低頻段自然電位的關係，有助於利用自然電位作火山監測。

除了自然電位的分析之外，另一方面，本計畫利用地電阻剖面法研究大屯火山地區的馬槽地區一帶的近地表電性構造，並與過去 110 年度在大油坑進行的地電阻探勘結果進行對比。研究結果指出，馬槽地區的極低電阻率分布較為零散；而在大油坑地區，極低電阻率的分布較為集中。推測造成這些極低電阻率分布的差異之原因與噴氣孔的活躍度有關，而噴氣孔的活躍度又直接影響其地下熱氣通道的活動度。除了在兩場址發現了噴氣孔活躍度與極低電阻率在分布上的關係外，本計畫也觀察到在噴氣孔附近的電阻率特徵呈一上覆低阻、下伏高阻的電阻率特徵(圖 13)，這提供了未來本計畫在找尋噴氣口的判斷依據之一。

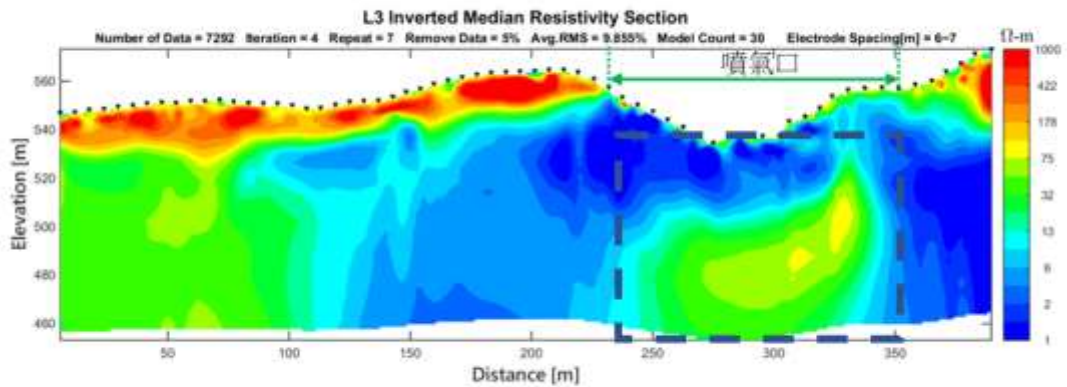


圖 13 大油坑 L3 測線之中位數地電阻剖面資訊整合圖。黑色虛線方框指出一個上覆低電阻率和下伏高電阻率的電性構造特徵，可協助了解噴氣口下方構造，並有助於評估噴氣口位置。

#### 四、臺灣大屯火山地區精密水準測量

火山活動或瀕臨噴發時，近地表處常因為岩漿庫體積變化或流體遷移而有規模不等的徵兆，反映於局部地形上，因此，針對火山地區地表變形行為進行長期監測(圖 14)，是最為直接的觀察手段，並能進一步研判其災害潛勢與影響範圍。

本所延續前一年度於大屯火山地區建置的精密水準測量測線，環繞陽金公路、七星山登山步道、中湖戰備道等，行經小油坑、七星山、冷水坑、擎天崗、大油坑、八煙等(圖 15)，共計 34 處新設施測點位，及另 12 處由本所、內政部、陽明山國家公園管理處於 108 年度以前設立，合計 46 處之精密水準點位。

本年度完成精密水準測量規劃、監測點位清查，並於 2022 年 4 月及 8 月分別完成了 2 次的精密水準測量工作。在依照內政部頒訂「一等水準測量作業規範」施作下，經過環線閉合差分析、水準網平差計算檢核，並與過去進行的精密水準測量結果比較。

資料比對結果發現，2022 年 5 月及 2021 年 8 月多數點位高程差均呈現負值，僅少數點位 (Y3 測線之 GI38、GI39、GA92、BM01 及 G140) 高程差呈現正值；2022 年 8 月及 2022 年 5 月多數點位高程差呈現負值，僅 Y3 測線上之點位多呈現正值。2022 年 5 月及 2021 年 8 月整體高程變動情形為負，僅小油坑周圍之變動為正；2022 年 8 月及 2022 年 5 月整體高程變動情形多為負，而東部小油坑及七星山步道周圍之變動多為正(圖 16)。由於自 109 年建立大屯火山地區精密水準測線以來，目前僅有 5 次之水準測量觀測成果現有觀測數據過少，尚無法有明確的系統性分析，有待後續持續進行，尚須累積多次觀測資料以利進一步判斷水準點位之高程變動因素。





圖 14 精密水準測量野外作業。



圖 15 本年度精密水準測量施測路線圖。

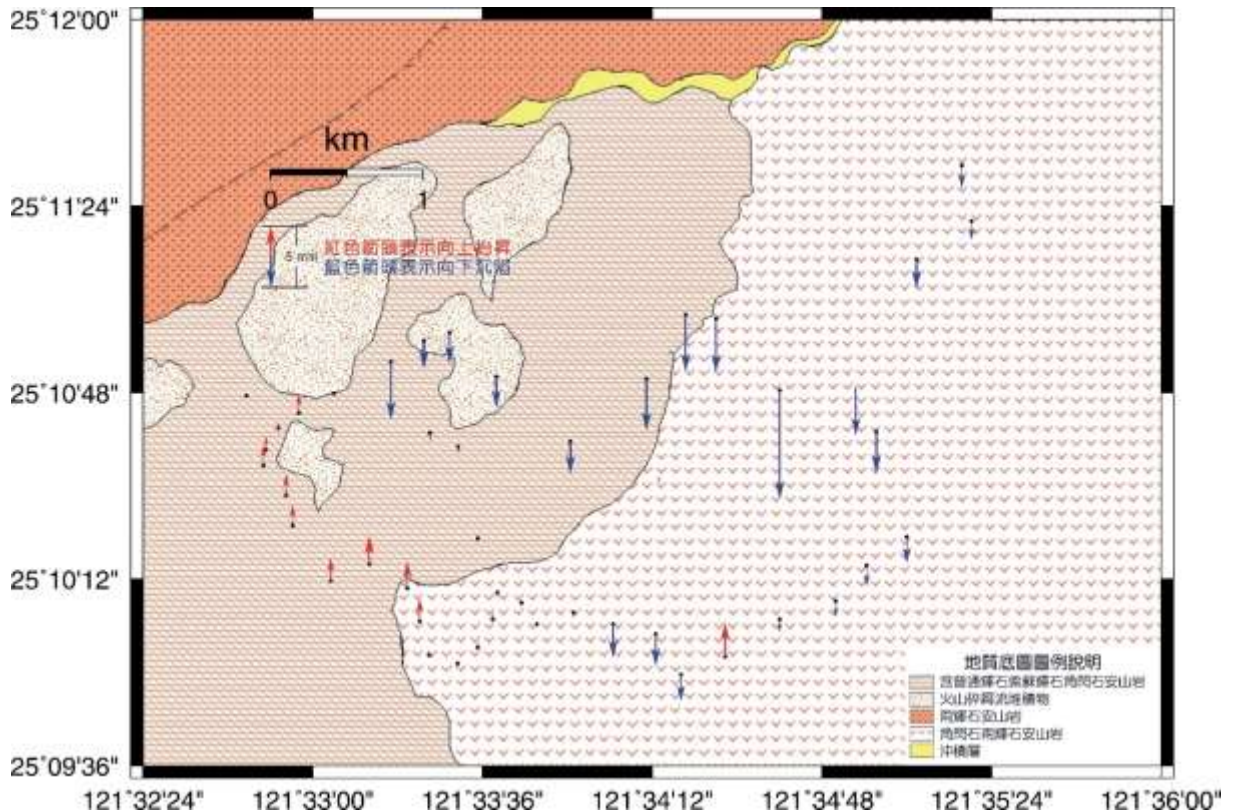


圖 16 大屯火山地區精密水準點位高程較差圖（2022 年 8 月及 2022 年 5 月）。由圖中可見於西半部之點位變動多為正，東半部之點位變動則多為負值。

## 五、臺灣北部火山地區火山災害潛勢資料蒐集與調查分析

本工作以 4 年為期，進行臺灣北部火山地區火山災害潛勢資料蒐集與調查分析工作，範圍包括臺灣北部大屯火山地區、龜山島及宜蘭地區與臺灣北部海域火山。本年度針對磺嘴山、竹子山火山亞群以及丁火朽山，分析可能發生之火山相關災害類型並進行致災因子調查、評估火山災害潛勢可能影響範圍、火山災害避災設施設置及交通管制措施評估建議，並更新火山災害潛勢圖資、製作說明摺頁，期能使民眾清楚瞭解臺灣北部地區火山活動可能造成的災害種類以及影響範圍。

分析竹子山、磺嘴山及丁火朽山亞群火山地區之可能致災因子，配合現地調查及區域地質圖綜合評估，熔岩流及火山泥流為上述三區之主要火山危害，同時考量火山噴發特性，碎屑流及火山灰雖於現地調查中並未能找到明顯露頭，但仍因納入致災因子評估之中。且因保全對象主要分布位址皆鄰近海岸，因此影響範圍較遠之熔岩流及火山泥流，成為本年度計畫區域之重點分析目標。

惟配合中央氣象局 1990 至 2021 年地震分布及中央地質調查所之溫泉露頭分布資料（圖 15），可發現地震及溫泉主要分布位置，集中於崁腳斷層與山腳斷層中間區域，而丁火朽山亞群，除其鄰近區域較少溫泉露頭及地震，推測目前並無顯



著岩漿活動，且其噴發歷史較早，如今火山地形與主峰較為完整，推測於主噴發之後便鮮見後續火山活動，因此評估丁火朽山致災因子時，僅評估其火山泥流發生可能，而不針對岩漿流、火山碎屑流及火山灰模擬。

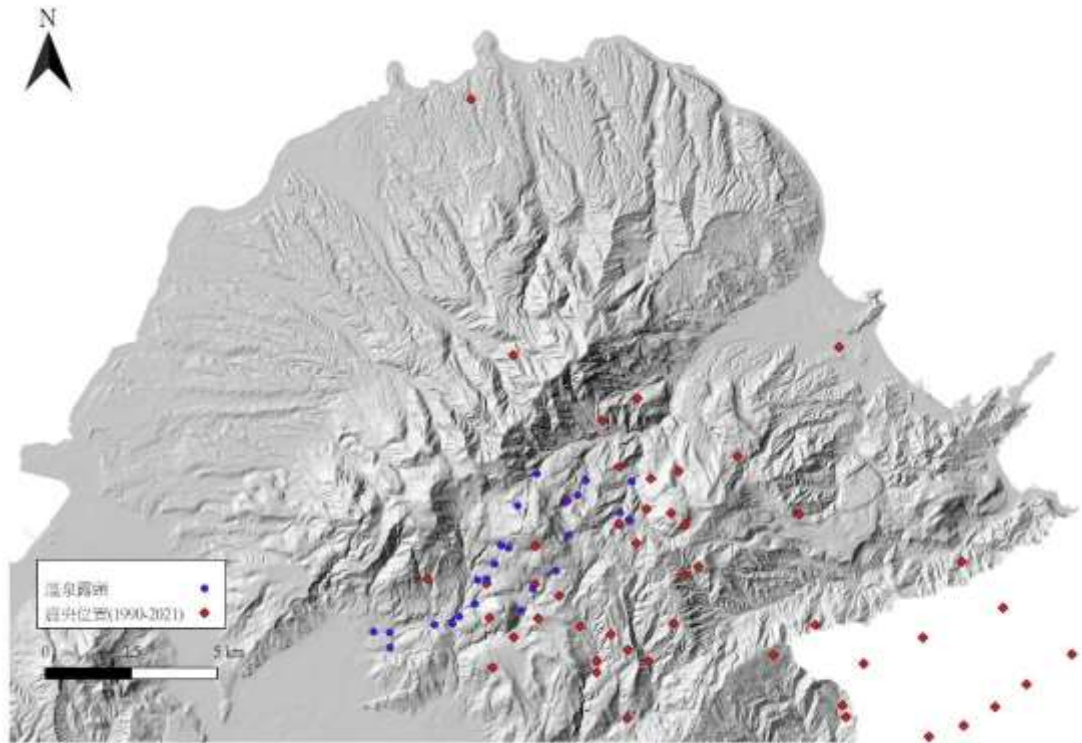


圖 17 臺灣北部 1990-2021 年震央(紅點)與溫泉露頭(藍點)位置，地震資料取自中央氣象局，溫泉露頭資料取自經濟部中央地質調查所。

經分析磺嘴山火山亞群、竹子山火山亞群及丁火朽山火山亞群之致災因子後，熔岩流、火山碎屑流、火山灰及火山泥流四個致災因子，對於磺嘴山及竹子山火山亞群的影響較需優先評估，而丁火朽山則需注意火山泥流之發生可能性。配合現地觀察而得之致災因子邊界表現，及地質圖之紀錄，輔佐確認模擬結果之合理性。

火山災害致災因子分析，與火山口位置息息相關。地形評估舊火山口為一有效做法。火山錐體為火山噴出物於火山口四周堆積而成之錐狀地形，其外型與岩漿性質有關，高黏滯性岩漿形成之火山錐較具陡度，並呈現上凸型火山錐斜坡；而低黏滯性之岩漿則會形成低平的盾狀火山台地。陳文山等 (2007) 經分析以 LiDAR 製作之 2 公尺x2 公尺之 DTM，指出大屯火山群之火山錐坡度約落於 20° 至 40°，且大部分錐體坡度都大於 30°，火山錐斜坡呈現上凸型，由此可知大屯山火山群為高黏滯性熔岩流，且藉由地形可分辨火山錐體位置，並得以指出可能的火山口位置，因此今年度之火山口以上述方式，選擇竹子山、磺嘴山及大尖後山三座火山，優先進行分析。

火山碎屑流可以以兩種不同的方式形成，包含火山口坍塌(dome collesp)：於火山噴發時，火山口因噴發而坍塌，重力使炙熱之火山碎屑與火山氣體向低處流

動，形成火山碎屑流；與煙柱坍塌(column collapse)：噴發產生由火山灰及火山碎屑構成之垂直煙柱，部分煙柱會因重力而下落，並形成火山碎屑流。本次潛勢範圍使用 Energy Cone Model，由 Malin and Sheridan(1982)提出，以煙柱坍塌為火山碎屑流之形成原理進行模型設計。考量火山碎屑流為含有無內聚力顆粒之重力流，運動模式符合白努力方程式，而不像熔岩流需考慮流體黏滯度，得符合本模型應用條件。本模型將流體最遠邊緣以斜直線連結回流體開始移動的位置，也就是火山碎屑向上噴發後，開始下落將位能轉換為動能的位置，在恆定的能量耗散率之下，構成「能量線」(energy line)，並以相同斜率環繞所有角度，形成「能量錐」(energy cone)，呈似同心圓包絡狀，指示火山碎屑流可能影響區域。能量線可能受地形阻擋，反映火山碎屑流與地形互動情形，如圖 18 所示。

磺嘴山之模擬結果，其火山碎屑流影響範圍，主要由火山口向東北方向延伸，最遠約距火山口 2 公里；大尖後山之模擬結果，則較磺嘴山更加受地形影響，順著火山口西側之磺溪溪谷，向北延伸最遠約距火山口 2 公里；竹子山模擬結果受限於山脈稜線向東北—西南方向延伸，致使火山碎屑流自火山口順西北—東南向延伸，但影響範圍同樣不遠於 2 公里。

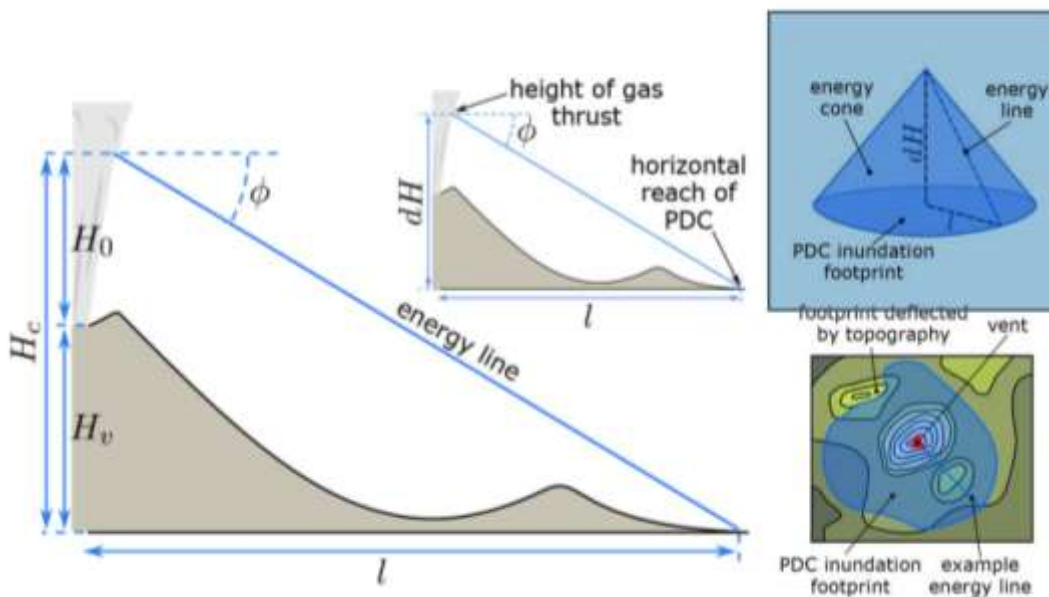


圖 18 火山碎屑流能量錐示意圖 (左圖說明能量線之建立方式，右上圖說明能量線構築成之能量錐，右下圖說明與地形互動情形。

其中  $H_c = dH$  為預估潰散高度， $H_v$  為火山相對高度， $H_0$  為煙柱潰散高度， $l$  為火山碎屑流向外延伸之直線距離， $\phi$  為能量線與水平線之夾角。 Clarke et al., 2020)

熔岩流為具有黏滯性，並有降伏強度 (yield strength) 之液體，因此考量其流動方向時，並非僅參考地形之陡度評估，更要考慮其側向流動，可能突破地形高低起伏的情形。本次潛勢範圍選用 Felprto et al. (2001) 提出之模型，以通道化 (channelized) 之 'a'ā 種類岩漿於空間中流動情形為模擬基礎，藉由地形高低評

估熔岩流動方向，並於 DEM 之中，藉由疊代法（iterative approach）進行計算，配合既有地質紀錄評估熔岩流動距離極限。選用此模型，因考量‘a’ā 種類岩漿之流動性較佳，故對受影響區域以最糟假定做模擬，希望以較大範圍的熔岩流侵害做情境設定，藉以彌補大屯火山地區未有現今噴發紀錄輔佐之劣勢。

火山熔岩流的模擬則是透過阿姆斯特丹自由大學於 2016 年發表，QGIS 之外掛模擬軟體 Q-LavHA，搭配內政部 2004 年 5 公尺解析度之 DEM 地形資料進行模擬。本軟體除依循 Felprto et al. (2001) 之模型，並於原始公式基礎中，優化部分判定基準。

模擬結果順應地形而得，因此其分布多近似於溪流外型，與現地調查所見之舌狀外形有一定差異。惟因模擬結果無法呈現熔岩流厚度，因此模擬結果為呈現受熔岩流影響之可能區域。模擬結果之邊緣區域，多為機率 10% 以下，推測因為模型

之計算特性，可能因路線多元致使機率下降，因此不建議將低機率區排除於發生可能之外。而地形狹窄區域，其中心區域機率偏高，可達 30% 以上，顯見地形對熔岩流之影響深遠，且可成為熔岩流潛勢預測之重要因素。

磺嘴山之模擬結果主要分成兩種可能路徑：一為圍繞大尖後山周圍之低谷區域，最後順著北磺溪向金山平原方向流動，另一則為沿清水溪向東發展至平原地區，兩條主要路線之間雖有一定之地形障礙，但仍有跨越之可能。因可能路徑較為複雜，因此模擬結果之流經機率整體皆偏低，且以目前之流動情形而言，較未影響至金山平原地區等民眾聚集區。大尖後山之模擬結果則較為單一，主要順著磺溪溪谷向北往金山平原方向，但鄰近火山口區域，因地形屏障難以阻擋其跨越趨勢，因此熔岩流之可能路線幾乎涵蓋整個大尖後山西邊山頂。竹子山則主要順延老梅溪與八連溪，往三芝及石門地區延伸，但皆未進入人口密集區域，僅對山區交通影響較為嚴重。

而針對潛勢圖製備，考量到熔岩流對鄰近區域可能產生燒灼並造成火災，因此參考 2021 年西班牙之 Cumbre Vieja volcano 之噴發情形，其熔岩流之高溫對地表建物破壞，以剛流出火山口之位置進行評估，受災區域約寬 200 公尺左右的寬幅。依據上述研究，本計畫於進行熔岩流潛勢範圍評估時，依軟體模擬結果，再往周圍各推展 100 公尺進行環域分析。

火山灰的災害模擬則是選用 Tephraprob 軟體，根據火山噴發柱各高度、各粒徑之火山灰質量以及風場等資訊，評估火山灰的堆積範圍，並根據冬季與夏季的風花圖分別評估夏季與冬季時的火山灰可能堆積範圍，並提供做為情境設定的參考依據。

火山泥流的部分，除丁火朽山之火山泥流潛勢範圍之外，研擬其他火山口之火山泥流影響潛勢，考量其為火山碎屑、火山灰與水份混合並向低處滑動之現象，因此選以台灣較為熟悉且研究豐富之土石流作為模擬依據，參考行政院農業委員會水土保持局之土石流潛勢溪流劃設作業手冊，配合地形決定溢流點後，搭配修正過後之池谷浩經驗公式計算其堆積部長度。惟因土石流與火山泥流之流動



性應有所不同，且其料源也有所差異，無法直接使用土石流相關公式及係數，應配合地質紀錄進行調整，因此本工作主要分成3階段決定影響潛勢範圍：火山泥流歷史紀錄重建、池谷浩公式改寫、碎屑量體推估。

要評估和管理火山風險，首先要先評估火山災害，即確認火山過去的行為，並藉此推斷火山爆發中的行為，故火山危害評估之目的主要是預測下一次噴發的性質，透過這些資訊來降低危險區域的發展，並確定火山噴發時的安全區域及疏散路線來降低火山災害風險，火山災害評估除了可以為火山噴發期間的決策提供幫助外，亦可為民眾教育及火山災害訊息提供指南，讓民眾瞭解其面臨的火山危害。

相關火山災害潛勢圖資已完成修正更新(圖 19、20)，各項火山災害潛勢圖資將透過現有資料公開平台公布，並提供中央及地方災防機關作為火山災害防救計畫規劃執行參考。

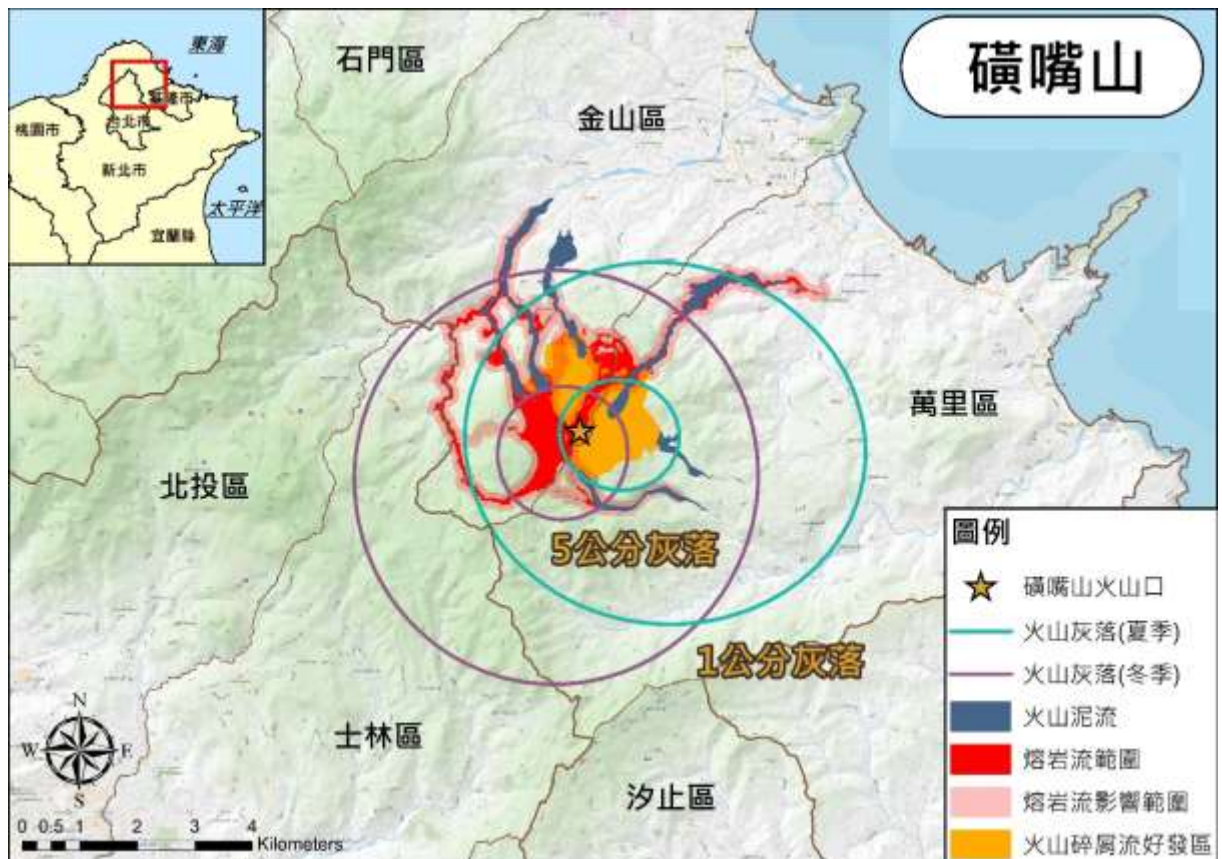


圖 19 磺嘴山火山災害潛勢圖。



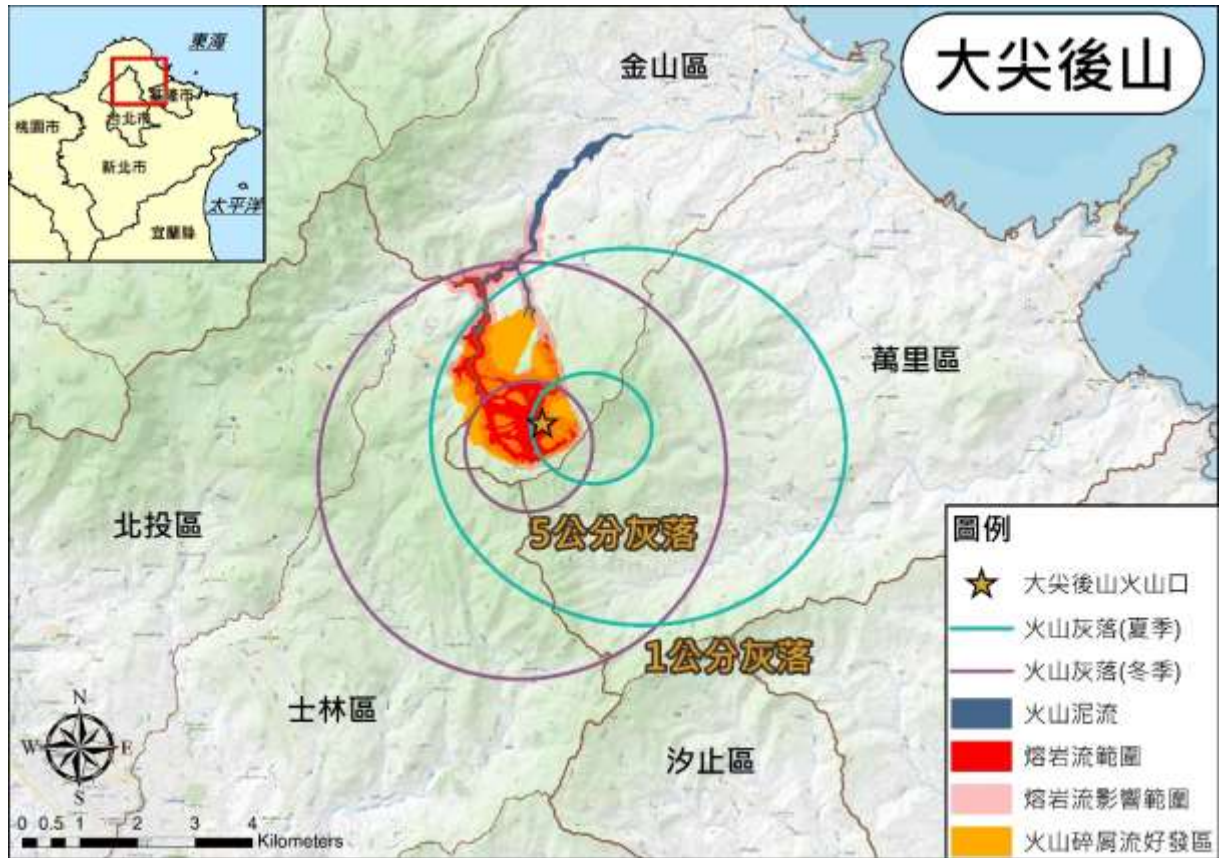


圖 20 大尖後山火山災害潛勢圖

## 七、結論與建議

本所累積多年觀測資料，根據學術定義確認大屯火山群及龜山島為活火山。過往的火山災害評估皆以地質研究角度出發，本計畫首度導入災害管理概念，根據最新火山地質研究成果及鄰近國家相近規模火山背景資料推估，若七星山或大屯山等火山或噴氣口發生火山噴發，可能產生的火山災害種類與影響範圍，研究成果可帶動國內火山災防產業發展。本計畫所引進的新型探測技術，可協助研判火山活動的規模以及岩漿庫可能的位置，配合本所長期針對火山進行的連續監測資料，包含火山地區地溫、火山氣體、溫泉水等變化建立火山異常活動指標，持續更新評估地質災害特性之北臺灣火山及斷層環境資料庫，發布各項調查監測數據，作為社會大眾及政府決策者之交流共享平台。

本所長年累積各項火山觀測資料的背景值，在火山活動有疑似異常的通報或報導時，可根據近期觀測資料以及現場人員調查研判火山活動是否異常活躍。本計畫逐年公開更新火山災害潛勢圖資，協助中央災害防救業務計畫以及地區災害防救計畫修訂。藉由與火山業務相關機關訪談，以及舉辦相關的利害關係人說明會，瞭解火山災害潛勢資料應用需求(圖 21)。



圖 21 與慈濟人文志業基金會防災作業小組人員進行訪談，瞭解火山災害潛勢資訊需求，推廣火山災防知識。

本計畫執行基本的設備、理論、技術等已有相當良好之基礎，將持續收集紀

錄各項科學數據，建立基本地質資料庫，並運用統計分析解析監測數據，地質環境因子之趨勢和關聯性，以建立預測和評估模式；此外除了實際的監測調查外，應以學術理論應用於監測技術，發展火山活動監測之高精度與高準確度之理論與技術，及時更新數據資料及訊息，提供各界查詢，為防災減災策略及實施計畫之依據。預計於未來持續對於火山地區進行調查與觀測計畫，除維護及擴充現有監測設備外，另外參考更多國際火山地區調查研究策略及方法，提升現有的監測技術及工作成效。以期我國在完成初期火山環境背景資訊了解後，能夠繼續深入探討可能岩漿庫存在位置及活動型態，對於火山活動的特性能更進一步掌握，以確保國人生命財產之安全。

國內的火山在歷史上雖無噴發紀錄，但仍具活動特性。根據國外火山觀測的技術與經驗，設置多種的火山活動觀測站，藉由不同面向的調查觀測方法，瞭解火山活動的動態。本所將持續進行火山觀測工作，並引進遙感探測技術、大地自然電位連續觀測技術，同時增進野外觀測站的自動化與資料回傳技術，讓火山活動觀測資料能更即時傳遞，增進資料的品質與數量。

因應災害防救法將火山項目列為法定災害項目之一，本所未來將依法持續維持火山觀測能量，研判火山災害潛勢區域、建立相關圖資並公開火山災害潛勢資料，以利各級政府及相關公共事業機關(構)於推動火山災害防救措施及設置重要設施時，能據以考量各區域之災害潛勢，有效降低災害發生之損失與傷亡。本所將進行臺灣北部火山地區火山災害潛勢資料蒐集與調查分析工作，瞭解灣北部地區火山活動可能造成之災害種類及影響範圍，並加強災害教育宣導，提升全民災害應變能力。同時，加強與中央及地方政府、學研與災防單位密切交流合作，分享資訊。

## 八、參考文獻

1. 丁禕 (2016)。反思龜山島火山引發海嘯災害可能性—以日本雲仙岳為鑑。中興工程：132 期，49 - 55。
2. 內政部營建署陽明山國家公園管理處 (1987)。陽明山國家公園馬槽橋災變及其鄰近地區之環境地質研究報告。
3. 內政部營建署陽明山國家公園管理處 (1994)。陽明山國家公園內古火山環境及噴發史的研究報告。
4. 內政部營建署陽明山國家公園管理處 (2007)。火山監測與應變體系建置模式之先期研究報告。
5. 火山災害防救業務計畫 (2020)。中央災害防救會報。
6. 王价巨主編 (2017)。災害管理：13 堂專業的必修課程。臺北市：五南，初版。
7. 地質遺跡地質敏感區劃定計畫書 H0010 龜山島火山碎屑堆積層 (2015)。經濟部。

8. 何孝恆 (2001)。台灣北部地區大屯火山群火山噴氣來源之探討。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，台北市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/243x6m>
9. 何春蓀 (1969)。臺灣北部公館凝灰岩之地層研究。臺灣省地質調查所彙刊，20，5-13。
10. 何春蓀 (1986)。臺灣地質概論—臺灣地質圖說明書。增訂第二版，經濟部中央地質調查所。共 163 頁。
11. 吳政忠 (2008)。應用 PUFF 數值模式於台灣與鄰近地區火山灰傳送及沉降分布之研究。臺北市立教育大學自然科學系碩士班碩士論文，臺北市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/gqwbpr>
12. 宋聖榮 (2004)。澎湖的火山故事。澎湖研究第三屆學術研討會論文輯。澎湖縣文化局。
13. 宋聖榮 (2006)。臺灣的火山。臺北縣：遠足文化。
14. 宋聖榮 (2007)。東北角的火山島—龜山島。地質，26-3，37-48。
15. 李寄嶼 (1994)。澎湖地區玄武岩類與福建地區基性脈岩之定年學與地球化學研究兼論中生代晚期以來中國東南地函之演化。國立臺灣大學地質學研究所博士論文，台北市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/9k33x5>
16. 林朝榮 (1967)。臺灣外島之地下資源。臺灣銀行季刊，18-4，257-268。
17. 邵文佑 (2015)。利用鋳石鈾鉛定年與鉛同位素組成探討台灣東部火成岩之岩石成因。國立臺灣大學地質科學研究所博士論文，台北市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/5rbz4g>
18. 胡明城、魯福，1993，現代大地測量學，上冊；測繪出版社。
19. 莊文星、陳汝勤 (2008)。北臺灣火山地形多樣性之探討。經濟部中央地質調查所彙刊，21，107-142。
20. 莊文星、陳汝勤、姜國彰 (2005)。臺灣東部海岸山脈蘭嶼及綠島火山頸柱狀節理之地質與地形景觀探討。經濟部中央地質調查所彙刊，18，107-148。
21. 許民陽、王郁軒 (2018)。火山：探訪地球之窗。臺北市：臺北市立大學，初版。
22. 陳中華、林朝宗 (2006)。從台北盆地中初生火山灰來推斷大屯火山群近期噴發。中國地質學會 95 年度學術研討會論文集 (摘要)。65。
23. 陳文山,楊志成,楊小青,劉進金,詹瑜璋,謝凱旋,謝有忠.(2007). 從 LiDAR 的 2 公尺×2 公尺數值模擬地形分析大屯火山群的火山地形.經濟部中央地質調查所彙刊,20,101-128。
24. 陳正宏 (1990)。臺灣地質系列第 1 號：臺灣之火成岩。臺北縣：經濟部中央地質調查所。
25. 陳建元、李依容 (2013)。大屯火山噴發後泥流影響範圍模擬。地質。經濟部中央地質調查所。32-3，80-83。
26. 陳棋炫。以國際經驗探討我國火山調查及防災策略 (簡報)。經濟部中央地質調查所。



27. 陳進源 (2017)。富士山火山疏散避難機制介紹。消防月刊。2017.10, 17-24。
28. 陳福隆 (2015)。眾望所「龜」—探討龜山島之生態旅遊策略。佛光大學管理學系碩士論文, 宜蘭縣。取自 <https://hdl.handle.net/11296/t6498m>
29. 陳慧鵬 (2014)。多期空載光達資料於龜山島地形變遷之研究。明新科技大學土木工程與環境資源管理系碩士班碩士論文, 新竹縣。取自 <https://hdl.handle.net/11296/sd5p27>
30. 陽明山國家公園管理處 (2008)。大屯火山群地底岩漿庫之調查與監測 - 土壤氣體之觀測調查研究報告
31. 曾清涼、楊名、劉啟清, 2003, 一等二級水準網測量督導查核工作總報告書; 內政部。
32. 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
33. 經濟部中央地質調查所 (2004)。大台北地區地質災害調查與監測 - 地質和地球化學調查與監測 (1/4)。
34. 經濟部中央地質調查所 (2005)。大臺北地區特殊地質災害調查與監測: 地質和地球化學調查與監測 (2/4)。
35. 經濟部中央地質調查所 (2006)。大臺北地區特殊地質災害調查與監測: 地質和地球化學調查與監測 (3/4)。
36. 經濟部中央地質調查所 (2007)。大臺北地區特殊地質災害調查與監測: 地質和地球化學調查與監測 (4/4)。
37. 經濟部中央地質調查所 (2009)。大臺北地區特殊地質災害調查與監測第二期: 火山地質與火山活動調查與監測 (1/4)。
38. 經濟部中央地質調查所 (2009)。大臺北地區特殊地質災害調查與監測第二期: 火山地質與火山活動調查與監測 (2/4)。
39. 經濟部中央地質調查所 (2010)。大臺北地區特殊地質災害調查與監測第二期: 火山地質與火山活動調查與監測 (3/4)。
40. 經濟部中央地質調查所 (2011)。大臺北地區特殊地質災害調查與監測 (二) 火山地質與火山活動調查與監測四年總結報告。
41. 經濟部中央地質調查所 (2011)。大臺北地區特殊地質災害調查與監測第二期: 火山地質與火山活動調查與監測 (4/4)。
42. 經濟部中央地質調查所 (2015)。台灣北部火山活動觀測研究-台灣北部火山活動地區密集陣列觀測研究 (4/4)。
43. 經濟部中央地質調查所 (2016)。大屯火山地區岩石定年研究 (1/2) 報告。
44. 劉聰桂主編 (2018)。普通地質學 (上) (下)。臺北市: 國立臺灣大學。
45. 鄭世楠 (2019)。臺灣歷史海嘯與災害。108 年海洋防災演習種子教師研習營 (簡報)。
46. 鄭世楠 (2020)。基隆歷史災害: 1867 年古海嘯回顧及海嘯防災宣導。基隆市文化局「109 年館舍人員暨導覽志工研習」(簡報)。

47. 鄭程輔 (2016) 。大臺北火山防災策略擬定之探討-以日本火山防災機制為借鏡。  
銘傳大學都市規劃與防災學系碩士班碩士論文，台北市。取自  
<https://hdl.handle.net/11296/4f7cuw>
48. Aizawa, K., Yoshimura, R., Oshiman, N., Yamazaki, K., Uto, T., Ogawa, Y., et al. (2005). Hydrothermal system beneath Mt. Fuji volcano inferred from magnetotellurics and electric self-potential. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1–2), 343–355.
49. Alberico I, Lirer L, Petrosino P, Scandone R. (2008) Volcanic hazard and risk assessment from pyroclastic flows at Ischia Island (southern Italy). *J Volcanol Geotherm Res.* 2008;171:118 – 36.
50. Allen and Smith (1994) . Eruption styles and volcanic hazard in the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Geosci. Repts. Shizuoka Univ.*, 20 (Mar., 1994) , 5-14
51. Ang, P. S., Bebbington, M. S., Lindsay, J. M., and Jenkins, S. F. (2020) . From eruption scenarios to probabilistic volcanic hazard analysis: An example of the Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106871.
52. Angelier, J. (1986). Geodynamics of the Eurasian-Philippine sea plate boundary; preface. *Tectonophysics*, 125, (1-3), IX-X.
53. Behncke B., Marco Neri. (2003). The July–August 2001 eruption of Mt. Etna (Sicily). *Bull Volcanol* 65:461–476.
54. Belousov, A., Belousova, M., Chen, C.-H., & Zellmer, G. F. (2010). Deposits, character and timing of recent eruptions and gravitational collapses in Tatun Volcanic Group, Northern Taiwan: Hazard-related issues. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 191(3), 205–221. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2010.02.001>.
55. Brown S.K., Susanna F. Jenkins, R. Stephen J. Sparks, Henry Odbert, Melanie R. Auken.(2017). Volcanic fatalities database: analysis of volcanic threat with distance and victim classification. *Journal of Applied Volcanology*,6(15).
56. Clarke B., Pablo Tierz, Eliza Calder, Gezahegn Yirgu.(2020). Probabilistic Volcanic Hazard Assessment for Pyroclastic Density Currents From Pumice Cone Eruptions at Aluto Volcano, Ethiopia.*Frontiers in Earth Science*,8(348).
57. De Vita, S., Sansivero, F., Orsi, G., Marotta, E., and Piochi, M. (2010) . Volcanological and structural evolution of the Ischia resurgent caldera (Italy) over the past 10 ky. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap*, 464, 193-239.
58. Dietterich H.R., Einat Lev, Jiangzhi Chen, Jacob A Richardson, Katharine V Cashman.(2017). Benchmarking computational fluid dynamics models of lava flow simulation for hazard assessment, forecasting, and risk management. *Journal of Applied Volcanology*,6,9-22.
59. Dobson, P., Gasperikova, E., Spycher, N., Lindsey, N. J., Guo, T. R., Chen, W. S., et al. (2018). Conceptual model of the Tatun geothermal system, Taiwan. *Geothermics*, 74, 273–297. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.01.001>.

60. Eftaxias, K., Kapiris, P., Polygiannakis, J., Peratzakis, A., Kopanas, J., Antonopoulos, G., & Rigas, D. (2003). Experience of short term earthquake precursors with VLF? VHF electromagnetic emissions.
61. Finizola, A., Sortino, F., Lénat, J.-F., & Valenza, M. (2002). Fluid circulation at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy) from self-potential and CO<sub>2</sub> surveys. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116(1–2), 1–18.
62. Geshi N., Jun'ichi Itoh.(2018). Pyroclastic density currents associated with the 2015 phreatomagmatic eruption of the Kuchinoerabujima volcano. *Earth, Planets and Space*,70(119).
63. Huang Hsin-Hua, E-S. Wu, C-H. Lin, J. Y-T. Ko, M-H. Shih & I. Koulakov. (2021). Unveiling Tatun volcanic plumbing structure induced by post-collisional extension of Taiwan mountain belt. *Scientific Reports*, 11:5286.
64. J. N. Hayashi,S. Self.(1992). A comparison of pyroclastic flow and debris avalanche mobility. *Journal of Geophysical Research*,97,9063-9071.
65. INGV-DPC-V3. Ricerche sui vulcani attivi, precursori, scenari, pericolosità e rischio, UR Orsi (Campi Flegrei and Ischia). Roma: Internal Report, INGV; 2005-2007.
66. Kilburn C.R.J.(2015). Lava Flow Hazards and Modeling. *The Encyclopedia of Volcanoes*,Second Edition, 957-969.
67. Kukkamaki, T. J., 1980, Error Affecting Leveling, NAD Symposium, Ottawa, CIS, p.1-10.
68. Kukkamaki, T. J., 1983, Uber Die Nivellitische Refraktion, Finn. Geod. Inst., Helsinki, Finland, No. 25, 48 pages.
69. Kuri M.(2016). Science Communication of Hazards with Scientific Uncertainty:In the Cases of Volcanic Activity. *Journal of Disaster Research*,11,707-719.
70. Lin, C. H. (2016) . Evidence for a magma reservoir beneath the Taipei metropolis of Taiwan from both S-wave shadows and P-wave delays. *Scientific reports*, 6, 39500. <https://doi.org/10.1038/srep39500>
71. Lin, C. H., & Pu, H. C. (2016). Very-long-period seismic signals at the Tatun volcano group, northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 328, 230–236.
72. Lin, C. H., Konstantinou, K. I., Liang, W. T., Pu, H. C., Lin, Y. M., You, S. H., & Huang, Y. P. (2005a). Preliminary analysis of volcanoseismic signals recorded at the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 32(10).
73. Lin, C. H., Konstantinou, K. I., Liang, W. T., Pu, H. C., Lin, Y. M., You, S. H., & Huang, Y. P. (2005b). Preliminary analysis of volcanoseismic signals recorded at the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 32(10). <https://doi.org/10.1029/2005GL022861>.
74. Lin, C.-R., Kuo, B.-Y., Liang, W.-T., Chi, W.-C., Huang, Y.-C., Collins, J., & Wang, C.-Y. (2010). Ambient Noise and Teleseismic Signals Recorded by Ocean-Bottom

- Seismometers Offshore Eastern Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 21(5), 743–755.
75. Lin, C. H., Lai, Y. C., Shih, M. H., Lin, C. J., Ku, J. S., & Pu, H. C. (2018). Extremely Similar Volcano Sounds from Two Separated Fumaroles at the Tatun Volcano Group in Taiwan. *Seismological Research Letters*, 89(6), 2347–2353.
  76. Lindsay, J. M. (2010). Volcanoes in the big smoke: a review of hazard and risk in the Auckland Volcanic Field. In *Geologically Active. Delegate Papers of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)*.
  77. Lombardi A.M. , Pierdomenico Del Gaudio, Zhengfu Guo, Maoliang Zhang,Guoming Liu, Vincenzo Sepe, Jiaqi Liu,Guido Ventura.(2020). Scenario-Based Pyroclastic Density Current Invasion Maps at Poorly Known Volcanoes: A Case Study from Changbaishan (China/North Korea).*Applied Sciences*,10(7),2622.
  78. Malin M.C., Michael F. Sheridan.(1982). Computer-Assisted Mapping of Pyroclastic Surges. *Science*,217,637-640.
  79. Miller, C. D., Mullineaux, D. R. & Crandell, D. R. ( 1981 ) . Hazards assessments at Mount St. Helens. Lipman, P. W. & Mullineaux, D. R. ( Eds. ) , U.S. Geological Survey Professional Paper , 1250, p. 789-802.
  80. Molist, J. M. ( 2017 ) .Assessing Volcanic Hazard: A Review. *Oxford Handbooks Online*. Retrieved 29 Jul. 2020, from <https://www.oxfordhandbooks.com/view/10.1093/oxfordhb/9780190699420.001.0001/oxfordhb-9780190699420-e-32>.
  81. Mossouxa S.,Mathijs Saey, Stefania Bartolini, Sam Poppe, Frank Canters,Matthieu Kervyn.(2016). Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. *Computers & Geosciences*,97,98-109.
  82. Murase, M., Ono, K., Ito, T., Miyajima, R., Mori, H., Aoyama, H., & Takeda, T., 2007, Time-dependent model for volume changes in pressure sources at Asama volcano, central Japan due to vertical deformations detected by precise leveling during 1902–2005. *Journal of volcanology and geothermal research*, 164(1-2), 54-75.
  83. Murase, M., Ishikawa, K., Lin, C., Lin, J., Pu, H., Kimata, F., Miyajima, R., Nakamichi, H. and Suzuki, A., 2007, Estimated pressure source and vertical deformation in Tatun volcano group, Taiwan, detected by precise leveling in June 2006-August 2007. In *AGU Fall Meeting 2007*, abstract V11C-0740.
  84. Myers, B. M., and Brantley, S. R. ( 1995 ) . Hazardous phenomena at volcanoes ( No. 95-231 ) . US Geological Survey.
  85. Newhall C., Stephen Self ,Alan Robock.(2018). Anticipating future Volcanic Explosivity Index (VEI) 7 eruptions and their chilling impacts. *Geosphere*,14,572-603.
  86. Pu, H.-C., Lin, C.-H., Huang, Y.-C., Chang, L.-C., Lee, H.-F., Leu, P.-L., et al. (2014). The Volcanic Earthquake Swarm of October 20, 2009 in the Tatun Area of Northern



- Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 25(5), 625.  
[https://doi.org/10.3319/TAO.2014.04.11.02\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2014.04.11.02(T)).
87. Pu, H.-C., Lin, C.-H., Hsu, Y.-J., Lai, Y.-C., Shih, M.-H., Murase, M., & Chang, L.-C. (2020). Volcano-hydrothermal inflation revealed through spatial variation in stress field in Tatum Volcano Group, Northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 390, 106712. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106712>.
  88. Pu H. C, Lin C. H, Lai Y. C, Shih M. H, Chang L. C, Lee H. F, Lee P. T, Hong G. T, Li Y. H, Chang W. Y, Lo C. H. Active Volcanism Revealed from a Seismicity Conduit in the Long-resting Tatum Volcano Group of Northern Taiwan.(2020). *Scientific Reports*,10,1-11.
  89. Sbrana A, Toccaceli RM (2011) . Carta Geologica della Regione Campania - Foglio 464 - Isola di Ischia, Progetto GARG Regione Campania - Assessorato Difesa del Suolo, Litografia Artistica Cartografica, Firenze. 216 pp + 1 carta: 10.000.
  90. Self S. & George P.L. Walker (1991). Clouds: Characteristics Of Eruption Columns. *Volcanic ash and aviation safety*, 65-74.
  91. Shin, T.-C., Chang, C.-H., Pu, H.-C., Lin, H.-W., & Leu, P.-L. (2013). The Geophysical Database Management System in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 24(1), 11–18.
  92. Smith C.M., Alexa R. Van Eaton,Sylvain Charbonnier,Stephen R. McNutt,Sonja A. Behnke,Ronald J. Thomas,Harald E. Edens,Glenn Thompson.(2018). Correlating the electrification of volcanic plumes with ashfall textures at Sakurajima Volcano, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*,492, 47–58.
  93. Song, S. R., Yang, T. F., Yeh, Y. H., Tsao, S., & Lo, H. J. (2000). The Tatum volcano group is active or extinct? *Jour. Geol. Soc. China*, (43), 521–534.
  94. Sugiura, M. (1964). Hourly values of equatorial Dst for IGY. *Annals of the International Geophysical Year*, 35, 9–45.
  95. Suzuki, T.(1983). A theoretical model for dispersion of tephra, in: D. Shimozuru and I. Yokoyama (eds) *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, Terra Scientific Publishing, Tokyo, 95-116.
  96. Takayuki KANEKO, Keiko SUZUKI-KAMATA.(1991). Energy Line/Cone Simulations of the 1991 Pyroclastic Flows of Unzen Volcano. *Bulletin Of The Volcanological Society Of Japan*,37,35-46.
  97. Tsai Yu-Wei, Song Sheng-Rong, Chen Huei-Fen, Li Shu-Fen, Lo Ching-Hua, Lo Wei, Tsao Shuh jong.(2010). Volcanic Stratigraphy and Potential Hazards of the Chihsingshan Volcano Subgroup in the Tatum Volcano Group, Northern Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*,3,587-598.
  98. Williams G.T., Susanna F. Jenkins, Daniel W. J. Lee, Shi Jun Wee.(2021).How rainfall influences tephra fall loading — an experimental approach. *Bulletin of Volcanology* 83:42

99. Yasui M., Takehiro Koyaguchi. (2004). Sequence and eruptive style of the 1783 eruption of Asama Volcano, central Japan: a case study of an andesitic explosive eruption generating fountain-fed lava flow, pumice fall, scoria flow and forming a cone. *Bull Volcanol* 66:243–262.