

火山地質與火山活動調查與監測

Investigation of Volcanic Geology and Monitoring of Volcanic Activity in Metropolitan Taipei

主管單位：經濟部中央地質調查所

宋聖榮¹

Song, Sheng-Rong

楊燦堯¹

Yang, Tsanyao

江協堂²

Jiang, Hsieh-Tang

¹ 國立臺灣大學地質科學系

² 國立臺灣大學海洋研究所

摘要

大屯火山群由於地緣上與大台北都會區的關係非常密切，因此其地質上的活動往往備受關注。由於大屯火山已被定義為休眠中的活火山，在完善保障人民的生活安全前提下，增設多元的監測方法以達成有效的監測工作是必要的。

火山噴氣氣體和溫泉水氣成分的變化和火山活動有重大的關連，藉由火山噴出氣體可以推斷出此一火山的岩漿性質和活動性。許多國外研究都指出在火山噴發前，其噴發之氣體成分會有明顯的異常變化。1940年在夏威夷的 Mouna Loa 噴發前的一個月，Payne and Ballard 便觀察到火山噴氣中增加了大量的 H₂S；Casadevall et al. (1983) 發現 Mt. St. Helens 在噴發前，噴氣中的 CO₂ 含量減少；而根據對 Ohshima 火山噴氣中的 SO₂ 連續監測的結果，Noguchi and Kamiya (1963) 在火山噴發前的三個月，發現噴氣中的 SO₂ 明顯增加。由以上的各個研究都顯示火山噴氣與溫泉水氣的變化與火山活動有明顯的關係，因此火山噴氣和溫泉水氣中之成份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。而往往各個地區的火山活動，皆有不同的氣體成份異常變化；也因此要先了解一個地區噴氣氣體和溫泉水氣成分的來源與變化，才能用以作為往後長期監測火山活動的重要資訊。

在火山噴氣氣體的部份，大油坑在本研究中有最高的氦同位素比值，已經非常接近（甚至超過）鄰近地區（如日本、菲律賓）現生火山地區噴氣的氦同位素比值，顯示出本研究區域中，大油坑含有較多岩漿系統來源之噴氣。同時大油坑在本研究採樣點中顯示出含有最高的氦氣濃度比值，也同時印證了上述所推論之結果，證明了相較於其餘採樣區域，大油坑地區的噴氣有相當程度的岩漿源噴氣混染其中。唯各地區之氦同素比值成份，以及主要火山氣體成分隨時間的連續觀測結果，大致上都未隨著時間有顯著的變化，表示在過去數年來，本地區底下的逸氣系統相當的穩定。

八煙土壤氣體連續監測站是繼小油坑地熱區後在大屯火山群內第二座監測站，自 2012 年底起開始累積連續資料，至今二氧化碳逸氣濃度峰值平均約為 30%，與世界上其他活火山地區之分析結果相當；值得配合其他監測結果持續觀察其變化。

針對大屯火山群中四個溫泉連續監測點，進行每天最少四次的連續長期監測研究，監測溫泉的水質，以及氯離子，硫酸根離子和碳酸氫根離子，結果顯示其顯現相對穩定，無明顯火山流體向上增加的趨勢。

本委託案為監測大屯火山區菁山、擎天崗和龜山島地溫井之井內溫度變化，監測結果發現菁山站各深度的溫度都有長期下降的趨勢，從 2006 至今各深度溫度下降 0.05-1.38°C 不等，井下 0-100 公尺的溫度受到降雨影響變化較大，地溫梯度以深度 100 公尺為界主要可分成兩段，上段 0-100 公尺約 2.1 °C/100m，下段 100-190 公尺約 0.5 °C/100m。擎天崗站各深度溫度與前一年相比，溫度增加 0.01-0.68°C，深部的溫度增加較大，地溫梯度於井下 0-200 公尺約 3.5°C/100m，200-470 公尺約 29.1 °C/100m，井下 10 公尺的溫度是所有觀測溫度中，唯一具明顯年變化週期，振幅約 0.05°C，此外，亦具有更長週期之趨勢，2007 年至 2012 溫度下降約 0.85°C，其原因有待進一步討論，470 公尺的溫度有長期上升趨勢，2009-2014 年累計上升約 1.83 °C，後續需加以注意。由菁山和擎天崗兩測站之地溫梯度推測此區域地下水可能有一個厚度約 200 公尺的對流包。龜山島測站是 3 個測站中同深度溫度最高者，顯示龜山島的熱源可能比大屯山淺，深度 210-240 公尺的地溫呈顫抖現象，可能跟該深度的地層裂縫發生變化有關。地溫梯度於井下 0-100 公尺約 -1.5°C/100m，100 公尺以下的梯度約 9.7°C/100m。本站在 2004-2009 年夏季期間發現數個與颱風有關的熱脈衝事件，是否颱風的低氣壓影響龜山島岩石的應力，進而造成地層中孔隙水發生位移，導致地溫產生細微的變化，值得進一步討論。

關鍵詞：火山地質、監測、地質圖、火山氣體、溫泉 地熱監測

Abstract

Tatun Volcano Group geopolitical relationship with the Taipei metropolitan area is very close, so the geological activity on its often concern. Since Tatun Volcano has been defined as dormant volcano in comprehensive protection of people living under the premise of safety, the creation of multi-monitoring methods to achieve effective monitoring is necessary.

Changes and volcanic activity volcanic gases and hot water volcanic gas composition has significant related, by volcanic gases can infer the nature of this magma and volcanic activity. Many foreign studies have pointed out before the eruption, the eruption of gas composition changes will be obvious abnormalities. 1940 Mouna Loa in Hawaii a month before the eruption, Payne and Ballard has seen increased volcanic volcanic gas in a lot of H₂S;. Casadevall et al. (1983) found that Mt St Helens before the eruption, the volcanic gas CO₂ content. decrease; according to Ohshima volcano volcanic gas continuous monitoring of SO₂ results, Noguchi and Kamiya (1963) in the three months before the eruption, the volcanic gas was found in SO₂ increased

significantly. By each study are shown above the volcano and hot spring water vapor volcanic gas change and volcanic activity has a significant relationship, so fumaroles and hot springs water vapor in the ingredients used to investigate - as magmatic activity and monitoring volcanic activity of the most effective methods . And often in various regions of volcanic activity, there are different gas composition anomalies ; therefore important to understand the source and change a regional volcanic gas and hot water gas composition in order to important information as future long-term monitoring of volcanic activity .

In the majority of volcanic gas volcanic gas , large oil pit has the highest helium isotope ratios in the present study, it has been very close to (or even exceed) neighborhood (such as Japan , the Philippines) extant volcanic gas of helium isotope ratios of volcanic areas , showing the study area, large oil pit containing more magma sources volcanic gas system. While large oil pit in the present study showed a considerable degree of sampling points in the magma contains the highest concentration ratio of helium , and also confirms the results of the above reasoning , proved compared to the rest of the sample area, the volcanic gas has large oil pit area source of contamination which volcanic gas. Only the ratio of helium with prime ingredients , as well as major volcanic gas composition of each region with continuous observations of time, generally neither change significantly over time , which means that in the past few years, the area under the outgassing system is quite stable .

Baying soil gas stations following the Hsiaoyukeng geothermal area in the Tatun Volcano Group , continuous data accumulated since the beginning of the end of 2012 , so far the outgassing of average highest carbon dioxide concentration values were about 30% , with the analysis of other regions of the world's active volcanoes results are quite ; worth continuing with other monitoring to observe the changes .

We collected a sample per month from 7 spots of hot springs in the Tatun Volcano Group to monitor the physical properties, i.e. pH, temperature, TDS and conductivity in the field, and to analyze the chemical compositions, i.e. cations and anions in the laboratory. They show some variations in the time spectrum of the years of 2004 and 2007. Those variations are probably related to the microseismicity in the Tatun Volcano Group. However, they show relatively stable, except the TDS, thermal conductivity and temperature of Tijeku springs, and no increasing the activity of volcanic fluids in this year.

Three geothermal wells, Chinshan, Chinteingan and Kueishantao have been monitored the borehole temperature in this project. The results show that the borehole temperatures were decreased 0.05-1.38°C in Chinshan wells during the observation period. The thermal gradient is 2.1 °C/100m between 0 and 100 meters and 0.5 °C/100m between 100 and 190 meters subsurface. Compare to the data of previous year, the

temperature increase 0.01-0.68°C in the Chinteingan well. The thermal gradient of Chinteingan well is 3.5 °C/100m between 0 and 200 meters and 29.1 °C/100m between 200 and 470 meters subsurface. The annual variation with amplitude 0.05 °C at 10 meter is significant and also has decreased 0.85 °C from 2007 to 2012 with a long term trend. However the temperature have increased 1.83°C at 470 meter from 2009 to 2014. According to the thermal gradient of Chinshan and Chinteingan well, we propose a 200-meter thickness of convection cell of ground water in Tatun volcano area. The borehole temperature show that the heat source at Kueishantao is the shallowest of the three monitoring wells. The thermal gradient is -1.5 °C/100m between 0 and 100 meters and 9.7 °C/100m below 100 meters subsurface. Several heat pulses related to the visits of Typhoon have been found in the summer from 2004 to 2009. It was interpreted that the temperature may be changed by the movements of pore water in the rock which the stress varies affected by the low atmosphere pressure.

Keywords : volcanic geology, monitoring, geologic map, volcanic gas, hot spring, geothermal monitoring.

一、前言

火山所造成的危害，是僅次於地震和洪水對人類社會威脅的自然災害，翻開過去火山災害史，造成人類傷亡和財產損失，也不計其數，令人觸目驚心。所以研究火山的目的是，除了要瞭解火山形成的機制和噴發的行為外；另一主要的目的，是希望藉由對火山的瞭解，能預測火山的噴發及降低因火山噴發所造成的災害。所以，國際火山學會在幾年前配合聯合國推動二十世紀最後十年(1990~1999)的國際自然災害防災十年計畫(International Decade for Natural Disaster Reduction)，選定全世界16個未來十年最有可能再噴發、具破壞性的火山為十年火山(Decade Volcanoes)，進行有系統的研究與監測，期望藉由監測與研究，把火山噴發對火山區域所造成的災害減低到最小的程度。

從過去的火山噴發紀錄和定年研究，大屯火山群和龜山島活火山的定義(Szakacs, 1994)應歸為活火山。大屯火山群目前沒有立即噴發的危險，但種種地質跡象仍顯示有再活動的可能讓科學家擔憂，需要未來長期觀測。大屯火山群的地質年代仍屬年輕，許多證據均顯示最近一次噴發年代落於國際活火山定義的一萬年內，且地殼深部仍有高溫的岩漿存在，因此根據國際火山學的定義，可以歸類為「休眠的活火山」。對於活火山的各種現象定義，包含岩漿庫存在範圍的界定，熱液活動通道、火山地化特性變化原因、火山地區電磁特性、地殼變形特性及微震活動機制，由於研究的時間週期太短，至今仍無法掌握長週期之狀況。因此大屯火山群還需要更多持續的科學觀測證據，才能證明究竟它是否有再爆發活動可能的「活火山」，且持續的觀測也是火山防災必要之工作。故地調所前期相關計畫已針對大屯火山群

及宜蘭龜山島地區進行基本普查研究，建立區域地質及火山活動背景資料，並設置數類監測站持續觀測，所得到的數據提供監測環境的背景資訊，但對於調查及監測到變動的數據，尚無法辨別其發生機制。

本計畫預定以4年為期，進行台灣北部火山地區的火山活動資料蒐集工作。先期計畫已存在設置的各式環境背景監測站，包含火山氣體、火山溫泉及火山地溫；維持目前主動連續記錄及人工記錄點位(每月量測或收取資料1次)。計畫目的是監測地底下岩漿庫的可能活動情形，以判定大屯火山群未來活動的可能性。本年度為第二年的監測工作。

二、研究地區與研究方法

本計畫工作主要為火山活動監測，工作包括火山氣體、溫泉和地溫的量測等監測工作。

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，並可以進一步預言即將到來的爆發。主要的研究方法為於大屯火山區進行每月定期之火山氣體採集及成分蒐集，成分蒐集項目包含 N_2 、 O_2 、Ar、 CH_4 、 C_2H_6 、CO、 H_2 、He、HCl、 H_2S 、 SO_2 、 CO_2 、 $^3He/^4He$ 同位素比值等，採樣範圍：包括火山氣體徵兆區以及本所於前期計畫建置之固定式火山氣體監測站，全區至少3個採樣點。

大屯火山地區有相當多處的噴氣孔以及溫泉地熱區，本研究團隊自1999年起便定期於地熱谷、硫磺谷、龍鳳谷、中山樓、小油坑、冷水坑、馬槽、大油坑、八煙、四磺坪、煥子坪、大埔等處收集火山噴氣和溫泉氣泡，分析其氣體成份。採樣地點分別如圖1所示。去年度定期採樣位置為小油坑、大油坑、以及八煙，今年度定期採樣位置除了延續過去的三個採樣點外，另新增了四磺坪及硫磺谷。採樣時間最少維持約每月一次。

水樣採集的密度，以一個月為一採樣基準進行分析。在自然湧出的溫泉露頭，利用攜帶式量測溫度、電導度、pH值和TDS的儀器，量測溫泉水的溫度、電導度、pH值和TDS等。採獲的水樣攜回實驗室後，對其水體中的鈉離子(Na^+)、鉀離子(K^+)、鎂離子(Mg^{++})、鈣離子(Ca^{++})、矽離子(Si^{4+})、鋁離子(Al^{3+})、鐵離子(Fe^{++})、鈦離子(Ti^{4+})、錳離子(Mn^{++})、和銅離子(Cu^{++})等陽離子，以及氟離子(F^-)、氯離子(Cl^-)、溴離子(Br^-)、硝酸根離子(NO_3^-)、硫酸根離子(SO_4^{2-})、磷酸根離子(PO_4^{3-})等陰離子，進行分析實驗。陽離子用感應耦合電漿—原子發射光譜儀(ICP-AES)分析，而陰離子則用離子層析儀(IC)分析。至於碳酸氫根離子(HCO_3^-)則是利用酸鹼滴定法測量之。

採用感應耦合電漿—原子發射光譜儀和離子層析儀的原因，是此二儀器的分析速度快，且其偵測極限低又精準度高，能達到偵測本地區水體中的濃度要求、濃度變化範圍、以及需分析樣本多的要求。

本年度研究計畫共採集大屯火山群的溫泉水七處。大屯火山群七處溫泉，從元月起每月採集一個樣本，目前每一處共12個樣本，其採樣地點分布如圖2。

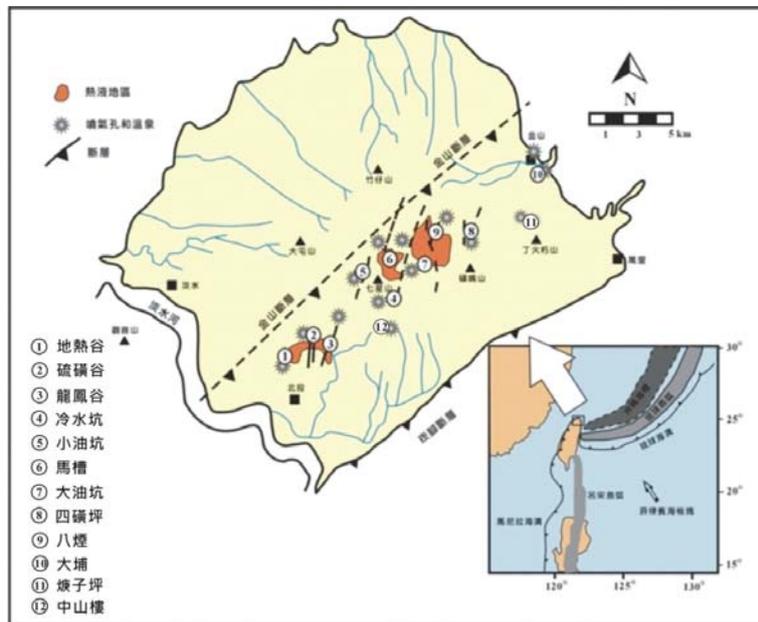


圖1：大屯火山噴氣分布圖。本計畫氣體採樣位置為小油坑、大油坑、八煙、四磺坪及硫磺谷。

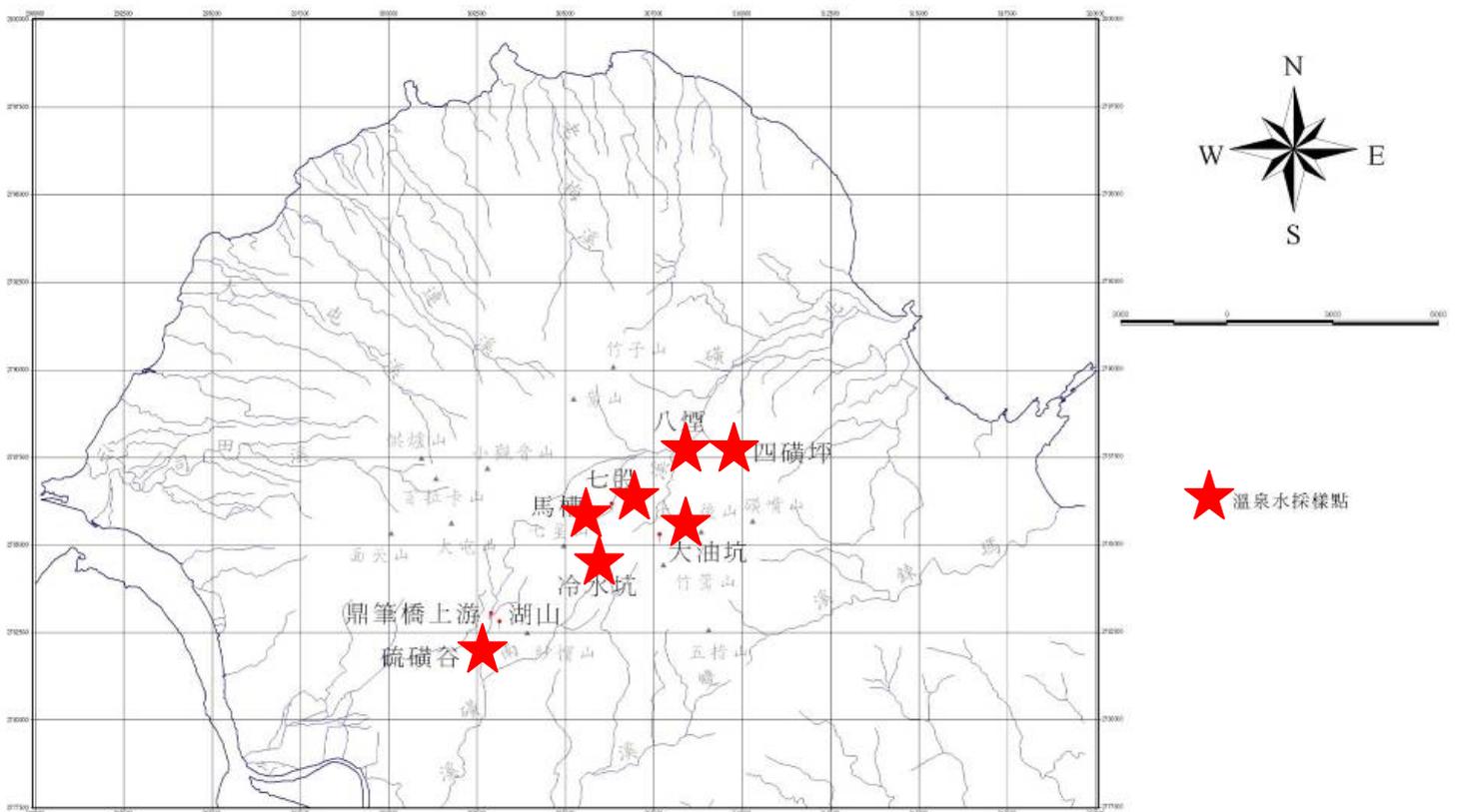


圖2：大屯火山群溫泉採集地點分布圖。

本案所委託執行的地溫井監測井共有 3 口，其中 2 口位於大屯火山區，分別是陽明山菁山生態保育中心（菁山站）和擎天崗風景區（擎天崗站）（圖 3），菁山站監測井井深為 200 公尺，2005 年初開始監測，擎天崗站監測井井深為 480 公尺，2007 年 6 月起開始監測；另 1 口監測井位於宜蘭外海的龜山島上（龜山島站），井深為 280 公尺，自 2006 年 7 月開始監測。本委託案執行單位需不定期前往該 3 監測站收集井下溫度資料，資料經處理、分析後，彙整交付委託單位。

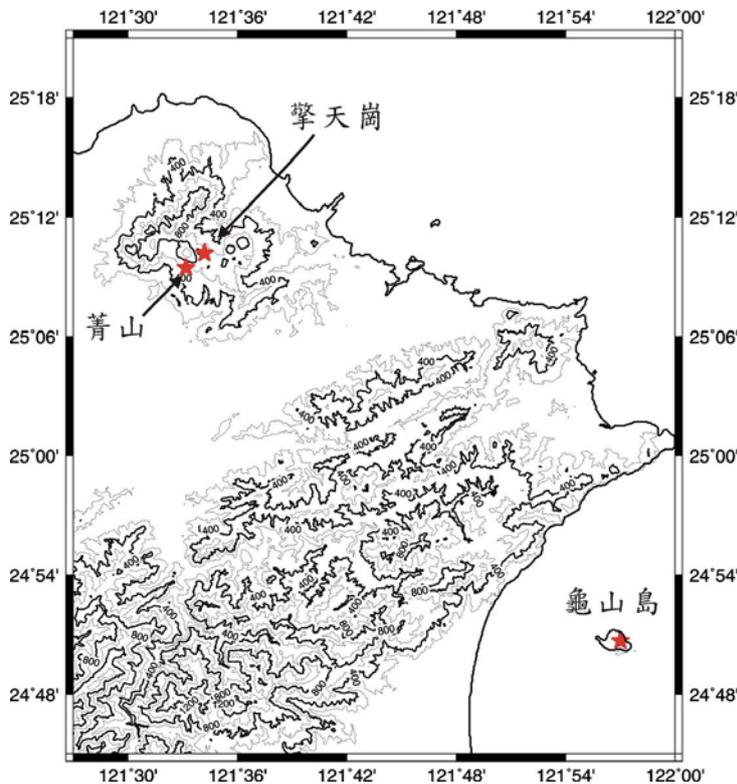


圖 3: 龜山島站、菁山站和擎天崗站 3 口地熱監測站位置圖。位於龜山島站龜山島龜頸附近，擎天崗站位於擎天崗遊客中心機車停車場旁，菁山站位於大屯山菁山生態保育中心。

本委託案量測溫度所用的儀器為台灣大學海洋研究所研發的小型熱探針，圓柱狀的小型熱探針長度為 24 公分，直徑為 2.2 公分，材質為鈦合金，可在強酸（pH 小於 2）和高壓（水深 4000 公尺以上）環境下工作，熱探針內部主體為一電路板和一顆 3 號電池，針頭內含一顆 PT100 白金電阻，白金電阻可反應周圍的溫度，並經由電路板儲存以及讀取溫度資料，熱探針之取樣頻率設為三分鐘一筆，記錄的資料包括熱探針編號、熱敏電阻值、儲存檔案個數、記錄筆數、記錄起迄日期和時間、電阻轉換成電壓之原始資料等，熱探針在製作完成後經實驗室內恆溫槽溫度校正，校正後溫度準確度約為 0.01°C，解析度約 0.0001°C，熱探針約每兩年校正一次。熱探針內之資料係以 RS-232 傳輸方式，使用 xtalk 軟體下載至手提電腦中，其內部電路板上的快閃記憶體可記錄約 32 萬筆資料，以 3 分鐘之取樣頻率，可連續儲存資料約兩年（Chang and Shyu, 2011）。

三、研究成果

3.1 氣體監測

由時間上的變化來看，圖4整理自1999以來至今，此五個採樣點的大屯山地區主要噴氣口之氣體樣品經過校正後之氦同位素比值結果。由圖4中可以看出，大油坑在本研究中有最高的氦同位素比值(長期平均值約為 $6.61R_a$)，已經非常接近(甚至超過)鄰近地區(如日本、菲律賓)現生火山地區噴氣的氦同位素比值，顯示目前大油坑地區的噴氣已接近岩漿源噴氣的氦同位素組成。而本研究其餘採樣地區(小油坑、八煙、四磺坪、硫磺谷)之 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值則稍低(約落於 $5\sim 6R_a$)，顯示這些地區岩漿源噴氣並不若大油坑如此活躍，而是以熱液系統來源的噴氣為主。

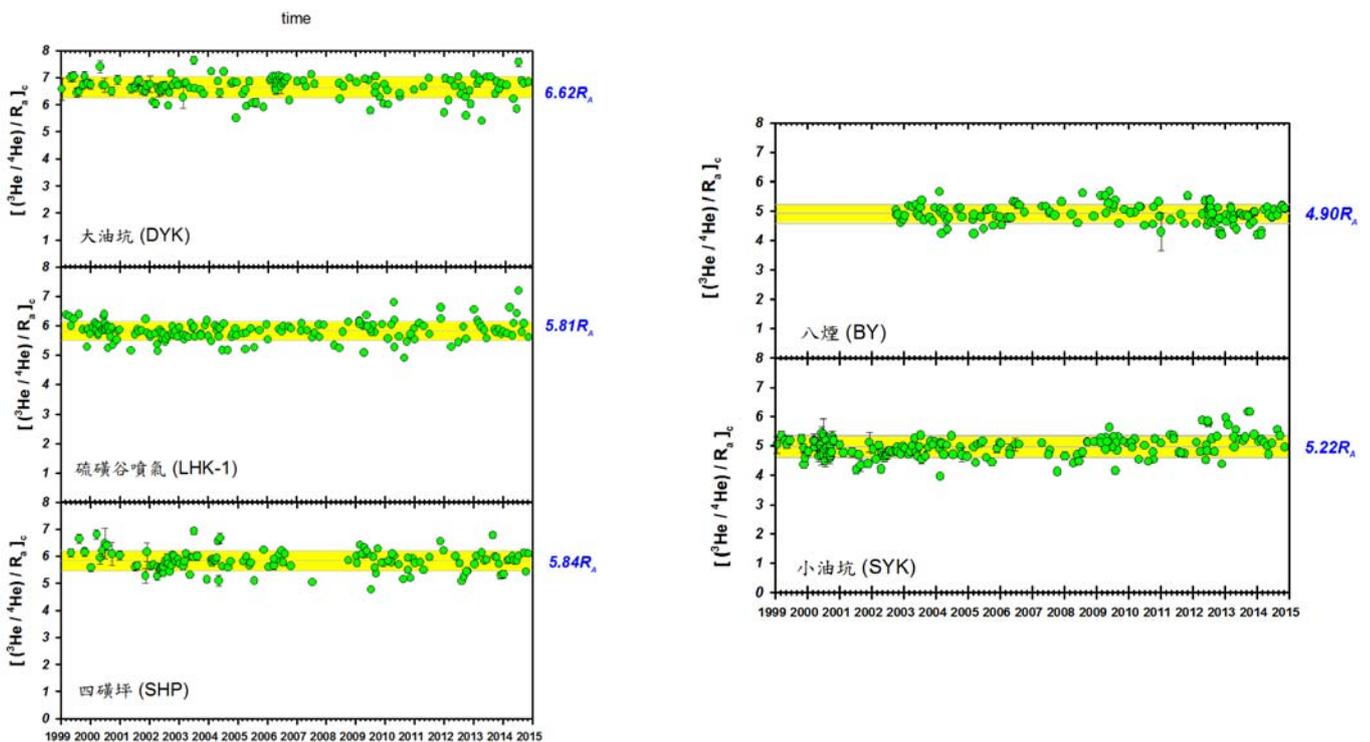


圖4：採樣點噴氣之氦同位素比值隨時間變化

此外，根據各採樣點噴氣於不同主要火山氣體成分上的分析結果，顯示相同的變化趨勢，我們選擇大油坑採樣點來做進一步的說明：

由圖5中可以看出在各噴氣口中，大油坑含有最高的HCl濃度，這指示了此區域可能含有較高的深源訊號。以長期趨勢來看，在2004年之前大屯火山地區的氣體樣本中含有較少的HCl含量，且 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S} < 1$ 。大油坑的氣體樣品中HCl含量以及 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比值從2004年8月起有明顯的增加，但 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比值在2011年後又重新下降。此外以今年之變化來看，在2014年2月至4月份之間，大油坑之HCl濃度有大幅增加之變化，於2月份最高可達58,778 ppm，此數字為2003年以來之最高值。而在經過3個月的高值之後，HCl濃度於5月份又降回該區域之背景濃度。在此異常發生期間，大油坑之

氮同位素比值、噴氣口溫度與Total S/CO₂並未產生同步變化，顯示此變化可能與深源氣體增加與否較無關係，可能僅為一外在高氮來源加入或區域通道之改變。

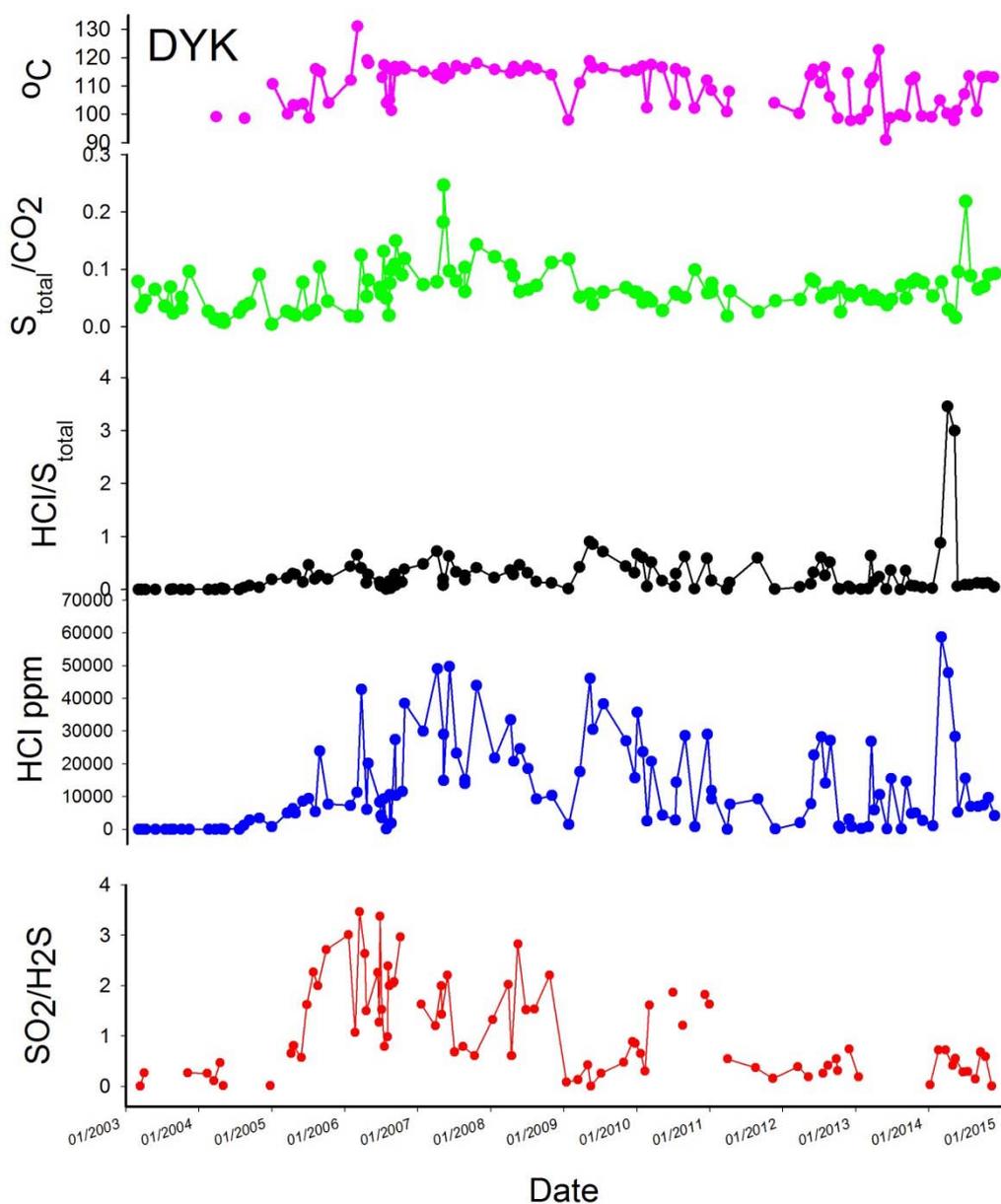


圖5：大油坑噴氣孔氣體成份隨時間的連續變化圖。

3.2 溫泉水監測

根據各溫泉採樣點於野外水質直接量測和實驗室陰、陽離子成分上的分析結果，顯示在不同採樣點都有相同的變化趨勢，故選擇硫磺谷採樣點為代表做進一步的說明：

圖 6 是結合 2004 至 2014 年，在野外所量測到的 TDS、pH、導電度和溫度等資料，繪成隨時間的變化圖。從圖中可知，硫磺谷溫泉在 2004 年 9 月以後，上述所量

測的數據有很大的下降變化至 2004 年 12 月，然後持穩後至 2009 年中，又有較大的震盪。TDS 在 2006 年 5 月、2009 年 6 和 8 月有異常高的變化，高於平均值 2 倍的標準差；pH 值在 2006 年 7 月後下降至 9 月達到最低，另外，在 2009 年 5、6 和 8 月都低於平均值 2 倍的標準差；而溫度在 2009 年 8 月則有異常高的變化，高於平均值 2 倍的標準差。本年度則相對穩定，除了溫度在今年 8-9 月有稍低之外。

圖 7 是陰離子分析結果，結合 2004 至 2014 年所量測到的資料，繪成隨時間的變化圖。圖 8 是陽離子分析結果，結合 2004 至 2014 年所量測到的資料，繪成隨時間的變化圖。從圖中可知，硫磺谷溫泉(圖 7)的 SO_4^{2-} 在 2004 年 4 月、2008 年 2 月和 2009 年 8 和 9 月有異常高的變化，高於平均值 2 倍的標準差； Cl^- 在 2009 年 6 月和 8 月有異常高的變化，高於平均值 2 倍的標準差； NO_3^- 也是在監測期間有較大的浮動，但在某些時段內有偏高或偏低於平均值 2 倍的標準差出現。而陽離子(圖 8) K^+ 在 2004 下半年至 2005 上半年、和 2006 年 5 月至 2008 年 2 月有較大的浮動，且有偏高或偏低於平均值 2 倍的標準差出現，其他時段則較平穩； Na^+ 、 Ca^{++} 和 Mg^{++} 和在 2004 年和 2007 年間有較大的浮動，且某些時段內有偏高於平均值 2 倍的標準差出現； Si_4^+ 則 2007 年以後有較大的浮動，且某些時段內有偏高於平均值 2 倍的標準差出現。一般而言，從 2009 年下半年至 2013 年，都呈現相對穩定的狀態。本年度也呈現相對穩定。

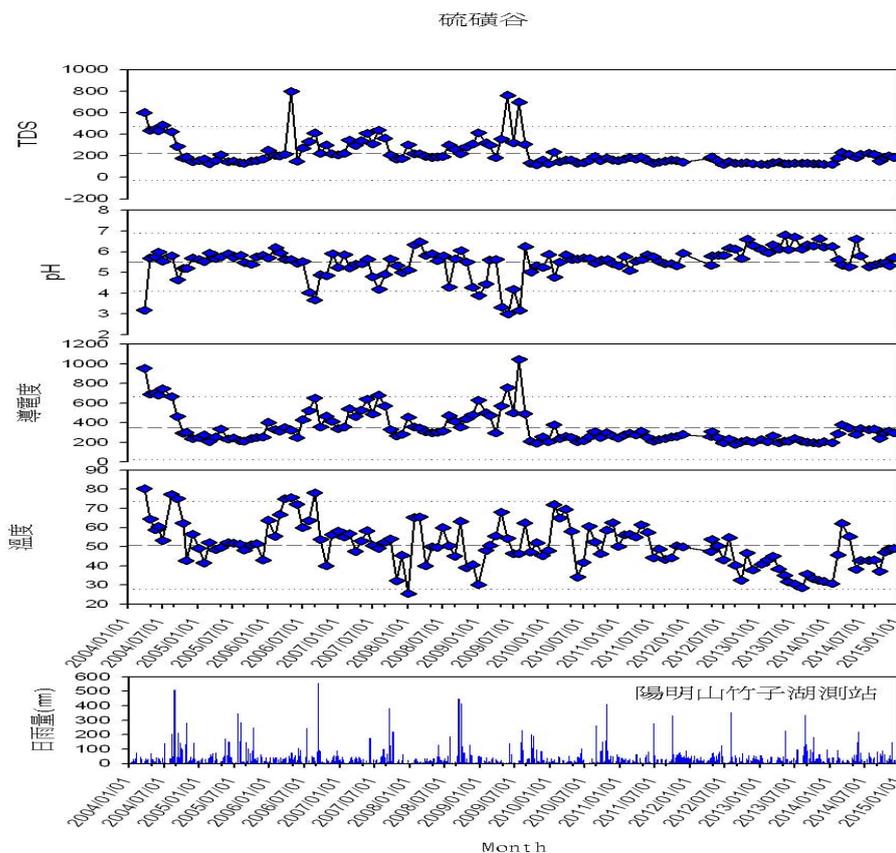


圖 6：硫磺谷溫泉 TDS(ppm)、pH、導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)、溫度($^{\circ}\text{C}$)和日雨量，2004 至 2014 年月變化趨勢圖。

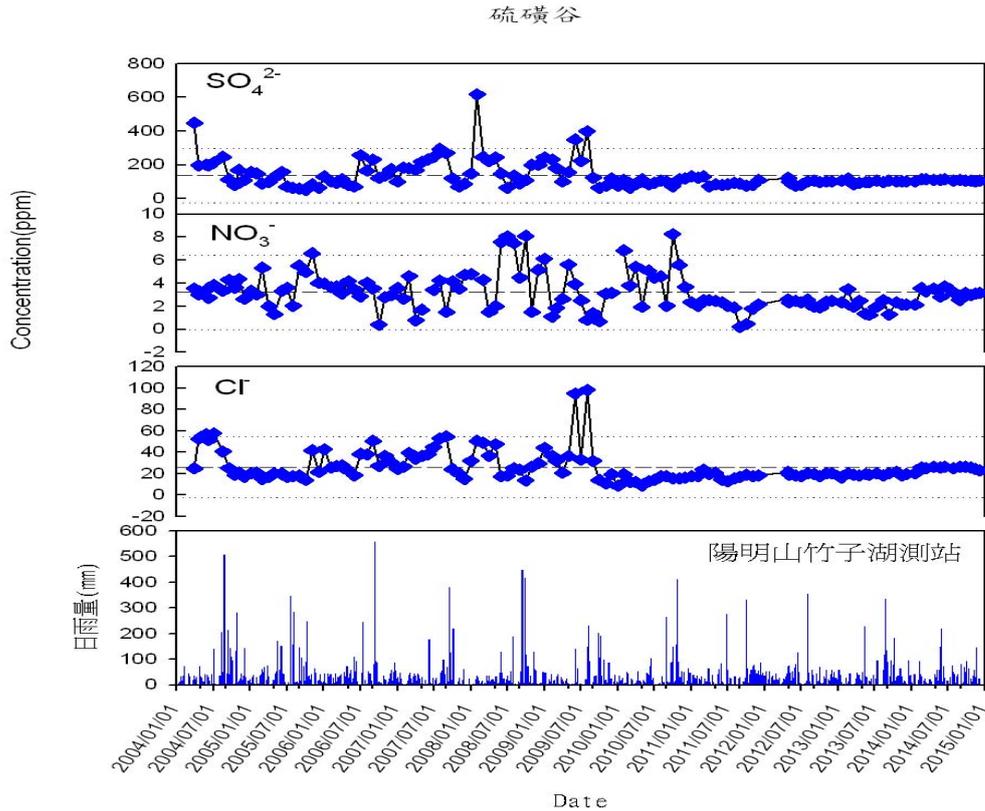


圖 7：硫磺谷溫泉陰離子濃度，2004 至 2014 年月變化趨勢圖。

3.3 地溫監測

根據各地溫監測點的結果，顯示在不同地點都有相同的變化趨勢，故選擇擎天崗站為代表做進一步的說明：

本測站記錄資料從2007年4月11日至2014年11月15日（圖9），各熱探針監測結果如下：

1. 今年度深度10公尺至470公尺，最低溫度17.89℃，最高溫106.53℃，與前一年相比，溫度增加0.01-0.68℃，深部的溫度增加較大，應注意觀察其溫度變化。
2. 深度10公尺的溫度呈現明顯的年變化週期，振幅約0.05℃，且溫度具長期下降趨勢，2007年至2012下降約0.85℃，但2013年以後出現上升趨勢，此現象非常奇特，是所有觀測溫度中，唯一一個具明顯年變化週期，以及更長週期之趨勢，其原因有待進一步討論。
3. 深度100公尺至250公尺的溫度剛開時有3-4個月快速升高現象，這是鑽井完後地層的回溫現象，一般回溫時間需數天至個月，回溫曲線與地層熱學參數有關，地層回溫後，溫度似乎有慢慢升高趨勢。
4. 井底470公尺的溫度有長期上升趨勢，因溫度較高，水壓較大，記錄器故障率較高，今年6/29重新製作一具記錄器後，已連續取得5個多月的資料。此深度溫度2009-2014年累計上升約1.83℃，後續是否會繼續上升需加以注意。

5. 垂直地溫剖面在200公尺附近有一轉折點，大約以深度200公尺為界可分為上下兩層，上層的地溫梯度約 $3.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ，下層的地溫梯度約 $29.0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。200公尺以上的低地溫梯度現象與菁山測站情形相同，如果低地溫梯度是熱對流效應所引起的，則可推測本區域地下水可能存在一個200公尺厚度的對流包，地下水可能存在於火成岩體的裂隙，這些裂隙可能發育於岩漿冷卻過程或後來的地殼抬升運動。
6. 2007-2014年深度10~470公尺的背景平均溫度為 $18.09\sim 105.35^{\circ}\text{C}$ ，各深度溫度變化的標準差為 $0.1575\sim 0.6457^{\circ}\text{C}$ 。

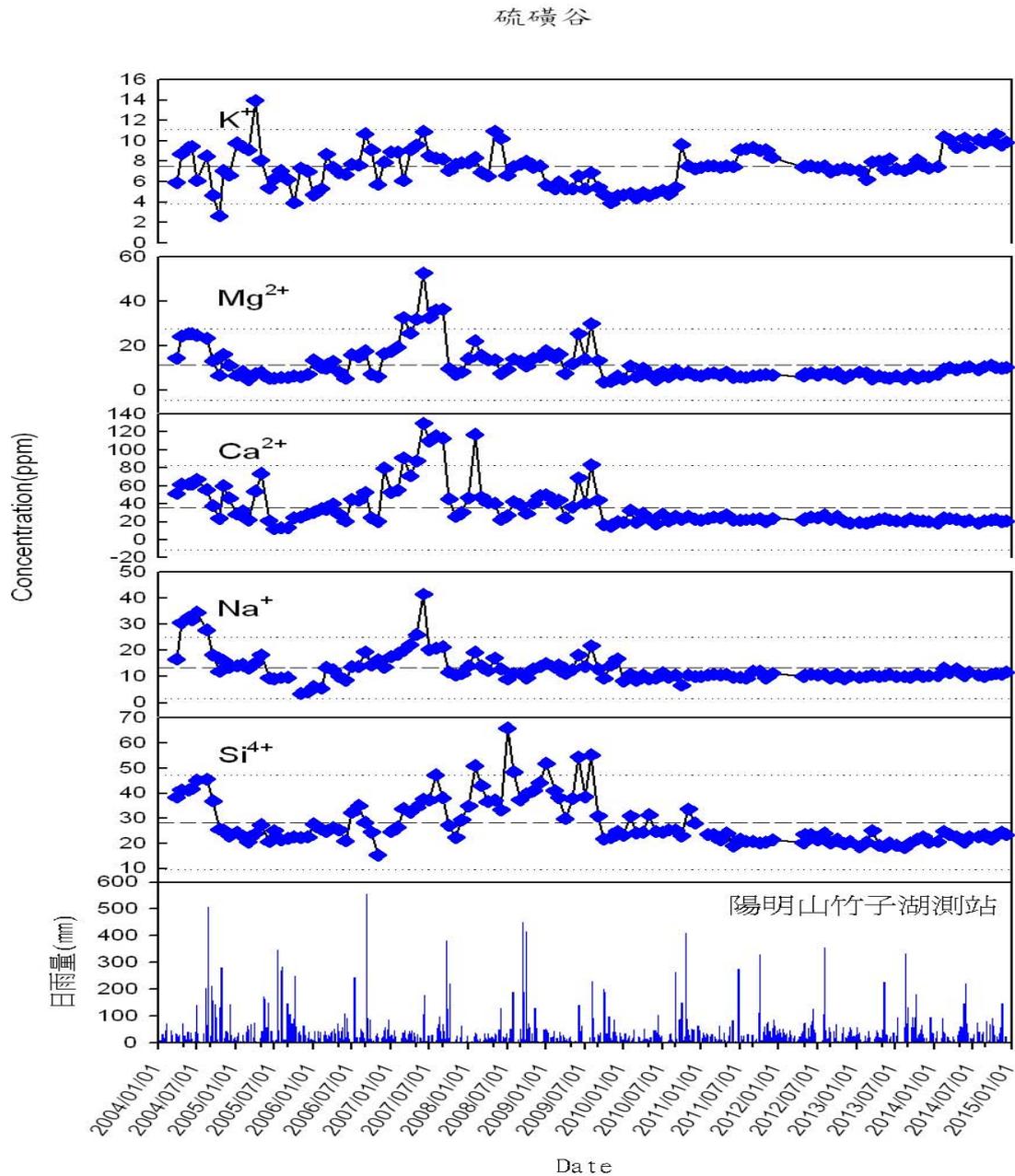


圖 8：硫磺谷溫泉陽離子濃度，2004 至 2014 年月變化趨勢圖。

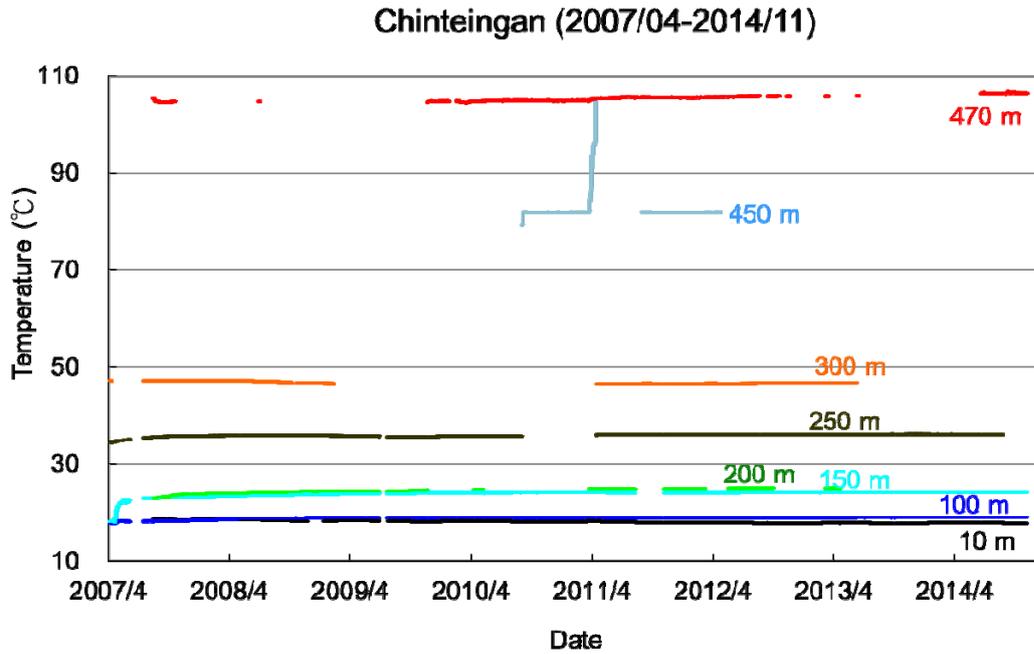


圖 9：擎天崗測站 2007 年 4 月 11 日至 2014 年 11 月 15 日各深度溫度變化圖。

3.4 0212 士林地震與火山的關係

由圖 10 可以看出在 HCl 濃度在地震過後時間上的變化。首先根據地理位置分布而言，位在偏西南方的小油坑和硫磺谷基本上並沒有受到地震影響，而位於東北方的大油坑、八煙和四磺坪都出現了明顯變化。然而值得注意的是，小油坑是最靠近震央位置的採樣點，但是卻沒有明顯的變化，這部分可能和底下的逸氣通道相關，需要進一步去釐清。根據 Murase et al. 在 2014 年發表的文章中指出，小油坑和大油坑底下分別顯示了一個收縮源和膨脹源，而且流體在通往大油坑的通道也相對順暢（圖 11），或許可以用來解釋小油坑和大油坑在這次地震過後在 HCl 濃度變化上相異的原因。

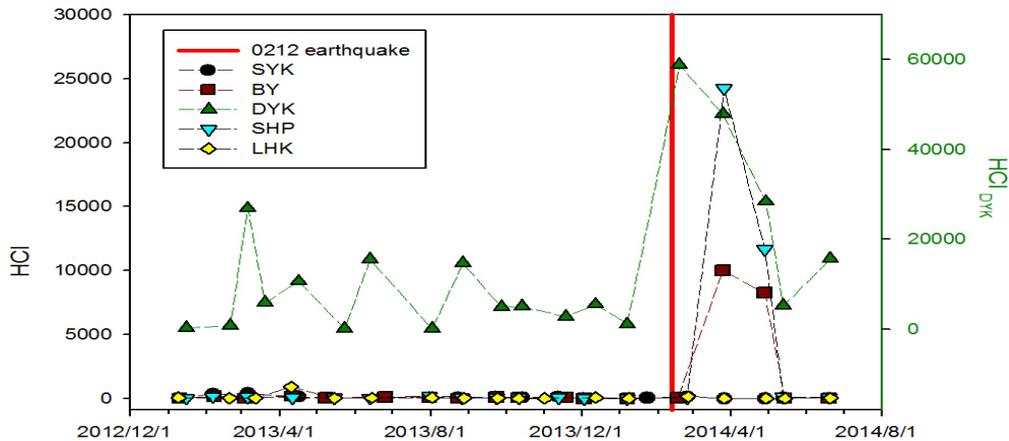


圖 10：0212 地震前後五個固定採樣噴氣孔的氣體組成成分中 HCl 濃度變化。

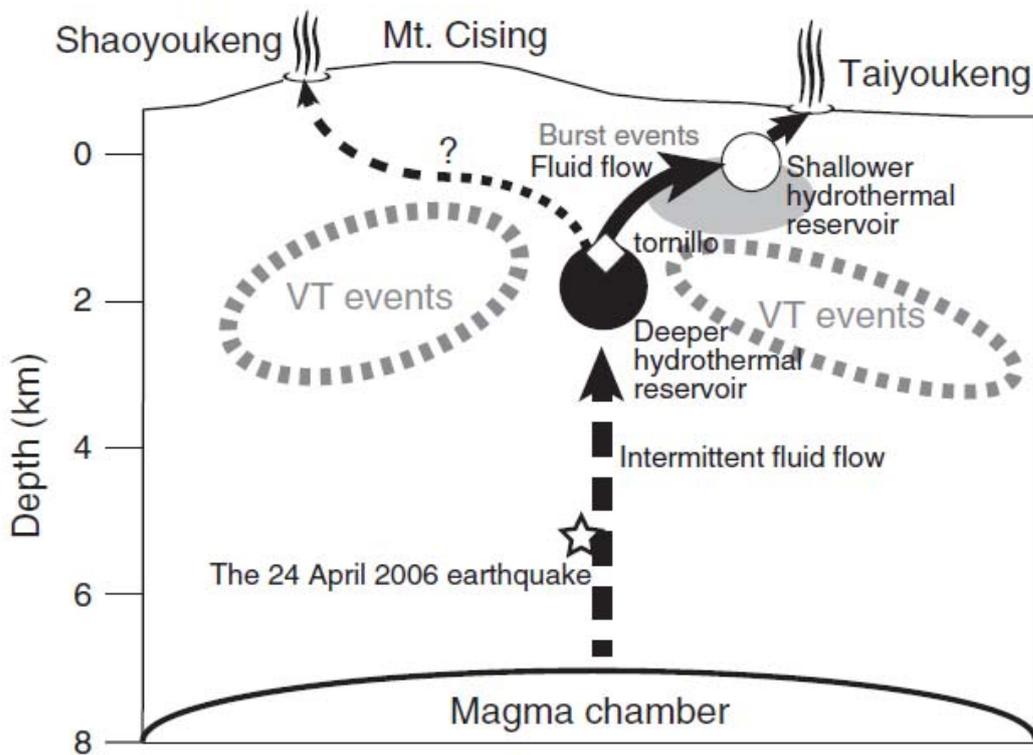


圖 11：Murase et al. 在 2014 年的發表文章中提出七星山底下的構造示意圖。黑色圓圈和白色圓圈分別代表收縮源和膨脹源，黑色箭頭指示流體通道。

另一個重點是，由圖 10 可以看出在地震過後，3 個點中離震央最近的大油坑的 HCl 濃度是馬上就有改變，而八煙和四磺坪則是三月之後才開始有變化(2 月 18 採樣時八煙和四磺坪中的 HCl 還沒有變高)。鄒惠雯(2011)碩士論文中利用硫同位素來區分大屯火山群區內各個採樣點的不同來源，從她建立的示意圖(圖 12)中可以看出大油坑、八煙和四磺坪可能是同一個來源，而小油坑和硫磺谷則明顯為另一個來源，這或許也可以解釋這幾個地點在 HCl 濃度有這樣的不同變化發生。HCl 濃度增加的原因有兩種：1) 在溫度突然升高的情況下，或是 2) pH 值急遽降低。HCl 雖然溶解度相當大，但若是在 pH 值過小的的情況下反而會從水中被釋出。大油坑溫泉水的 pH 值比起其他地方相對要低，溫度也高，因此會影響到 HCl 溶解在水中的狀況。過去在 2004 年大油坑也發生了 HCl 濃度增加的現象，之後大油坑的 HCl 濃度相較其他地方便一直高居不下。我們曾提出在大屯火山群底下應該存在不只一處的水體，至少有一深部的熱水系統和一淺部的熱水系統存在。當岩漿中的氣體在上升過程中經過較深部的熱水系統時，大多數的酸性氣體便溶解其中，因此若是有較多深部流體進入淺部的熱水系統時便會影響到噴氣中的組成成分改變。前文提到了根據氫同位素和 St/CO_2 這兩個比值顯示並沒有岩漿物質加入，然而士林地震的深度僅有 6 公里，極大的可能影響了兩處熱水系統，造成通道順暢的大油坑、八煙和四磺坪地區在 HCl 上的變化。而且 HCl 的突然增加僅有兩個月時間便回復正常，可能是

地震過後深部熱液上湧到淺部，造成 pH 值突然改變，HCl 短時間內被大量釋出，之後系統恢復穩定，HCl 濃度隨即恢復正常。

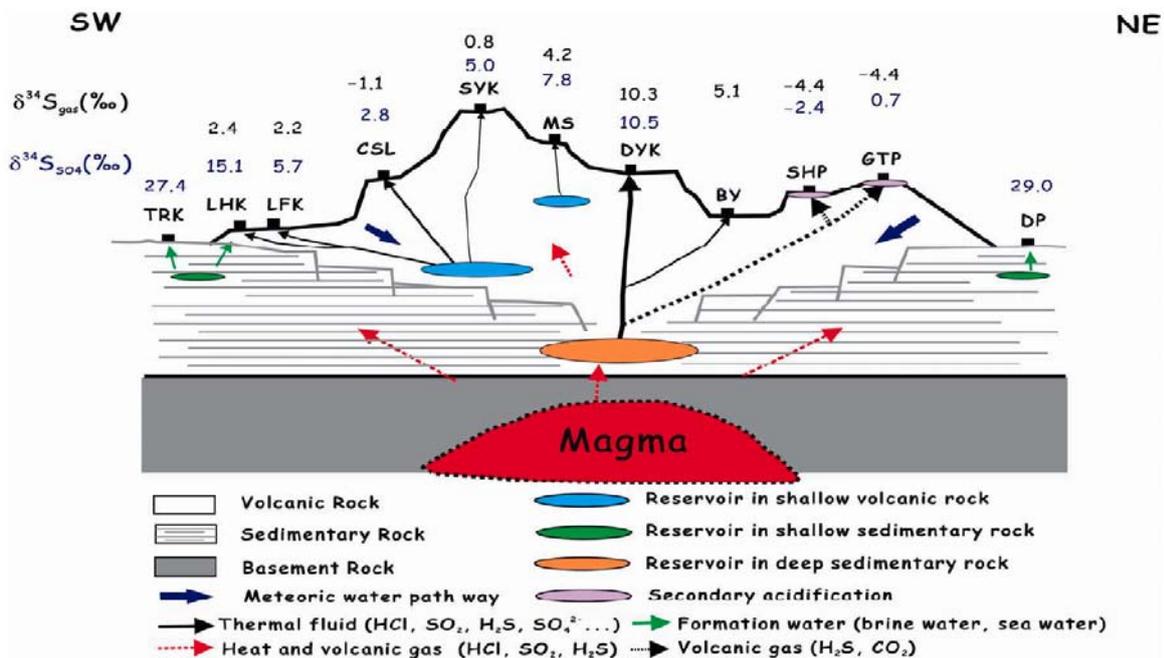


圖 12: 鄒惠雯(2011)碩士論文中利用硫同位素建構的大屯火山群火山噴氣和溫泉形成模式圖。

四、結論與建議

- 1、火山噴氣和溫泉水氣中之成份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。本研究中，大屯山各地區噴氣口火山氣體之氮同素比值成份，以及主要火山氣體成分隨時間的連續觀測結果，大致上都未隨著時間有顯著的變化，少數的HCl濃度突增現象也在短時間內即回歸穩定。表示在過去數年來，本地區底下的逸氣系統相當的穩定。
- 2、2014年3 至4月份間，大油坑、八煙及四磺坪之HCl濃度有突增之趨勢，唯三者之氮同位素比值、噴氣口溫度與Total S/CO₂等其餘參數並未產生同步變化，顯示此事件初步排除了深處岩漿性來源氣體有質或量方面的改變，可能僅為一區域性高氯成分侵入地層，而並非是整個大屯火山區全域的、深源的火山氣體成分變化。
- 3、八煙土壤氣體連續監測站是繼小油坑地熱區後在大屯火山群內第二座監測站，並自2012年底起開始累積連續資料。但由於火山地區特殊的環境條件下導致舊型的氮氣分析儀不符使用，在經過2013年整年的維修、測試無效後，本年度(2014)年初嘗試替換了新式的氮氣分析儀-RAD 7。經過9個多月左右的測試之後，目前八煙監測站已可穩定的分析土壤中氮氣以及二氧化碳濃度變化，並藉由雲端系統回傳資料來加以即時監測。

- 4、本年度至今為止，氬氣濃度以及二氧化碳濃度變化大致穩定。氬氣濃度平均約為40,000 kBq，而二氧化碳濃度日峰值平均約為20~30 %。兩者在大時間尺度上與大氣溫度、降雨等參數無明顯相關變化，惟兩者同樣都有日周期的變化，在正午的時候兩者濃度均達到當日最高，半夜的時候則反之降至最低。
- 5、中央氣象局本年度於陽明山地區共發布了三起的地震，規模分別為4.2、2.7與2.6。但此三起地震在與土壤氣體濃度資料比對之後，發現地震震前與震後並沒有觀察到明顯的氬氣或二氧化碳變化。雖然在2月12日的地震之後二氧化碳逸氣通量有明顯增加，但因後續兩起地震並沒有觀察到相同的現象，因此難以斷定此通量變化就是因該起地震所造成，兩者關係仍需再加以觀察、釐清。
- 6、大屯火山群中的溫泉水質和陰陽離子濃度隨時間有變化，其控制因素可能與地下的流體活動有關。大屯火山群中的溫泉水質和陰陽子濃度本年度相對穩定，變化不大。
- 7、大屯火山群中的四個溫泉水連續監測站之水質和水化學呈現相當穩定的狀態，隨時間的變化不大。
- 8、本委託案為監測大屯火山區菁山、擎天崗兩口地溫井和龜山島一口地溫井之井內溫度變化，溫度監測結果發現，菁山站、擎天崗站和龜山島站各井內深度溫度分佈分別介於約17.17~21.46°C、17.72~106.02°C和20.54~34.26°C，各深度溫度變化之標準差分別約0.0093~0.7166°C、0.2321~0.7139°C和0.0166~0.2757°C。
- 9、菁山站各深度地溫普遍呈現緩慢下降趨勢，各深度溫度下降0.1-0.7°C不等，但2009年以後逐漸緩和，這個緩和現象是否跟深部溫度變化有關，值得後續持續觀測。0-100公尺的地溫變化較大，係受到降雨影響。地溫梯度以深度100公尺為界主要可分成兩段，上段0-100公尺約2.3 °C/100m，下段100-190公尺約0.5 °C/100m。
- 10、擎天崗站的井底溫度約106°C，顯示本測站可能較靠近大屯火山區的熱源。深度10公尺的溫度呈現明顯的年變化週期，振幅約0.05°C，且溫度長期下降趨勢不變，2007年至今已下降約0.85°C，原因有待進一步討論，但井底470M處呈現長期上升的趨勢。地溫梯度以深度200公尺為界大致可分為上下兩段，上段約3.5 °C/100m，下段約29.0°C/100m，下段的高地溫梯度可能是因離熱源較近。大屯山兩個測站淺於200公尺的地溫梯度都偏低，可能是受地下水循環的影響，因此推測本區地下水有一厚度約200公尺的對流包。
- 11、龜山島測站各深度溫度變化顯示整口井溫度有慢慢下降趨勢，值得持續監測以探討其機制。地溫梯度大致可分兩段，淺於100公尺的梯度約-1.5°C/100m，100公尺以下的梯度約9.7°C/100m，下段可能比較靠近熱源，因此地溫梯度比較高。深度210-240公尺的地溫顫抖情形越來越明顯，顫抖的地溫可能跟該深度的地層裂縫發生變化有關。本站在2004-2009年觀測到與颱風有關的熱脈衝事件，溫度變化約-0.023~0.015°C溫度，是否颱風的低氣壓影響龜山島岩石的應力，進而造成地層中孔隙水發生位移，導致地溫產生細微的變化，值得進一步討論。
- 12、大屯火山觀測站已在大油坑、小油坑和菁山保育中心設置地溫監測資料即時回

傳系統，建議委託單位也可以考慮採該種監測方式，可即時取得所需數據。

參考文獻

- 鄒惠雯 (2011) 台灣北部地區大屯火山群火山噴氣之硫同位素分析: 碩士論文, 國立台灣大學地質科學研究所, 共 85 頁。
- Chang, H. I., Shyu, C.T., 2011. Compact high-resolution temperature loggers for measuring the thermal gradients of marine sediments, *Marine Geophysical Researches*, DOI 10.1007/s11001-011-9136-y.
- Murase M., Lin, C.H., Kimata, F., Mori, H. and Pu, H.C. (2014) Volcano-hydrothermal activity detected by precise leveling surveys at the Tatun Volcano Group in Northern Taiwan during 2006-2013. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* Doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.09.001.
- Szakacs, M. (1994) Redefining active volcanoes: a discussion. *Bull Volcano.* 56, 321-325.