

陽明山國家公園鹿角坑及馬槽之雨水化學

黃冠中¹，王巧萍²，黃誌川³，林登秋^{1,4}

¹國立臺灣師範大學生命科學系；²行政院農委會林業試驗所；³國立臺灣大學地理環境資源學系；

⁴通訊作者 Email: tclin@ntnu.edu.tw

[摘要] 酸雨對生態環境具有嚴重的危害，陽明山國家公園境內因火山活動之故雨水 pH 值經常低於 5.0。隨東北季風帶來的境外污染物特別是硫氧化物與氮氧化物對大氣沉降有明顯影響，可能進一步影響雨水化學性質並造成更嚴重的酸化，進而影響環境與生物多樣性。本研究於鹿角坑生態保護區及馬槽地區進行雨水化學性質的監測，探討不同季節間的變化。結果顯示雨水在四個季節間的 pH 值平均值皆低於 5.0 且無明顯差異。Na⁺、Cl⁻、Mg²⁺、SO₄²⁻的濃度在東北季風影響的秋冬季時顯著較高。但雨水並未因東北季風的影響而有更酸的現象，顯示海鹽飛沫與火山活動為主導雨水化學組成的主要因素，而這也是因子分析法所萃取的兩個因子。和同樣位在臺灣北部的福山自然保留區相比，陽明山雨水中各種離子的濃度較高，又因研究期間降雨量較大，故隨離子雨水輸入生態系的量較福山自然保留區高數倍，顯示火山活動，可能會使當地的物質輸入乃至循環與一般生態系有很大差異，其對生態系的生地化影響值得深入研究。

關鍵字：雨水化性、東北季風、陽明山國家公園

Precipitation Chemistry in Lujiaokeng and Macao of the Yangmingshan National Park

Guan-Zhong Huang¹, Chiao-Ping Wang², Jr-Chuan Huang³ and Teng-Chiu Lin^{1,4}

¹Department of Life Science, National Taiwan Normal University; ²Taiwan Forestry Research Institute;

³Department of Geography, National Taiwan Normal University; ⁴Corresponding author Email: tclin@ntnu.edu.tw

ABSTRACT Acidic precipitation has important impacts on the environment. Due to the volcanic activities, the pH of precipitation in Yangmingshan National Park is rarely higher than 5.0. Air pollutants, SO_x and NO_x coming along with the Northeastern Monsoon in the winter may play an important role on atmospheric deposition and further acidify precipitation. This study monitored the precipitation chemistry in Lujiaokeng Ecological Protected area and Macao area. The results show that the mean pH were lower than 5.0, with no significant seasonal differences for most ions. The concentrations of Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺ and SO₄²⁻ were higher in the Northeast Monsoon season but they did not lead to further acidifying of precipitation. Thus, precipitation chemistry was mainly affected by sea-salt aerosols and materials from volcanic eruptions and the role of the two factors on regulating precipitation chemistry was confirmed by the two factors extracted from factor analysis. Compared to the Fushan Natural Reserve, which also located in northern Taiwan, input of ions through precipitation was several times

higher at the Yangminshan National Park due to both greater precipitation during the study period at the Yangminshan National Park and the much higher concentrations of ions. The results indicate that volcanic activities have major effect on material input such that biogeochemistry of the affected ecosystems could be distinctively different ecosystems not affected by volcanic activities. The effects of volcanic activities on ecosystems should be explored further.

Keywords: precipitation chemistry, northeastern monsoon, Yangmingshan National Park

前言

酸雨對生態系的影響在環境變遷的研究中相當受到重視，工業發展與農業活動使許多地區的硫氧化物以及氮氧化物濃度增加，進入大氣中與雨水結合造成酸雨而進入生態系中，酸性沉降對生態系的影響層面相當廣，如使土壤和水體的 pH 值降低與物質循環的改變等 (He *et al.* 1999, Driscoll *et al.* 2001, Driscoll *et al.* 2003, Dentener *et al.* 2006)。國內外已有相當多研究探討人為引起的酸沉降對生態系的影響。在物質循環方面，酸雨帶來的高濃度氫離子易置換植物及土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 、等帶正電的離子 (Lin *et al.* 2000, Haynes and Swift 1986)。對森林生態系而言，陽離子的置換釋出雖可中和雨水的酸度，但長期的酸沉降容易使植物及土壤營養流失，增加土壤中游離態鋁、鐵等離子含量並與磷酸根結合而沉澱成植物難以吸收的化合物，減少土壤中可利用的磷從而限制植物的生長 (Cronan *et al.* 1989, Tomlinson 2003)。在溪流生態系中，水中的生物除了可能因 pH 值下降而直接受到影響外，還會受到因酸化而淋溶出來的有毒物質 (如 Al^{3+} 、 Fe^{2+} 等) 影響，導致繁殖能力降低、微生物相改變、生物多樣性降低等 (McKnight and Feder 1984, Baker *et al.* 1996, Dey *et al.* 2009)。

臺灣位於環太平洋火山帶上，地形地質的形塑與火山活動有密切的關聯。陽明山國家公園的大屯火山群，雖約於 20 萬年前停止劇烈的火山活動，但後火山活動仍使陽明山地區有許多噴氣孔持續釋放出硫化物 (SO_2 、 H_2S) 與

HCl 等氣體，為陽明山地區降雨酸化的主要原因之一 (李曉芬 2004)。根據行政院環境保護署對於陽明山雨水酸鹼值的監測 (<https://erdb.epa.gov.tw/ERDBIndex.aspx>)，陽明山在 2016 年所有的降雨日中 81.8% 的降雨 pH 低於 5.0 (行政院環境保護署陽明測站)。在長期酸雨的影響下，陽明山國家公園境內的植被組成與生物多樣性仍未見明顯生長衰退或群聚改變 (賴明洲 1991, 邱文良 2009)，然而近年來隨東北季風而來的境外污染物亦對大氣狀況有顯著影響。近年來臺灣北部地區的大氣中懸浮微粒的濃度有明顯的增加，K、As、Se、Pb、Mn 及其他硫化物與氮氧化物的濃度在東北季風盛行的期間也較其他季節高，進而影響到雨水的化學性質 (Chang *et al.* 2000, Lin *et al.* 2005, Lin *et al.* 2007, Hsu *et al.* 2009)。不同於原本火山活動的影響，隨東北季風而來的境外污染在工業活動發展後才明增加，其對雨水化學性質的改變可能增加環境水質惡化的風險。此外陽明山國家公園境內設有鹿角坑溪生態保護區，以往維持良好著的生態環境，溪水更作為臺北地區的自來水水源之一。雨水化學性質的變化可能引起保護區內環境生態改變，且有影響溪水水質之虞，但相關研究仍少。因此探討火山活動與東北季風對雨水的交互影響更顯重要，本研究針對鹿角坑生態保護區內及近大油坑的馬槽地區的雨水化學進行監測，以探討兩地雨水在火山活動及東北季風交互作用下的化學性質的異同。

材料與方法

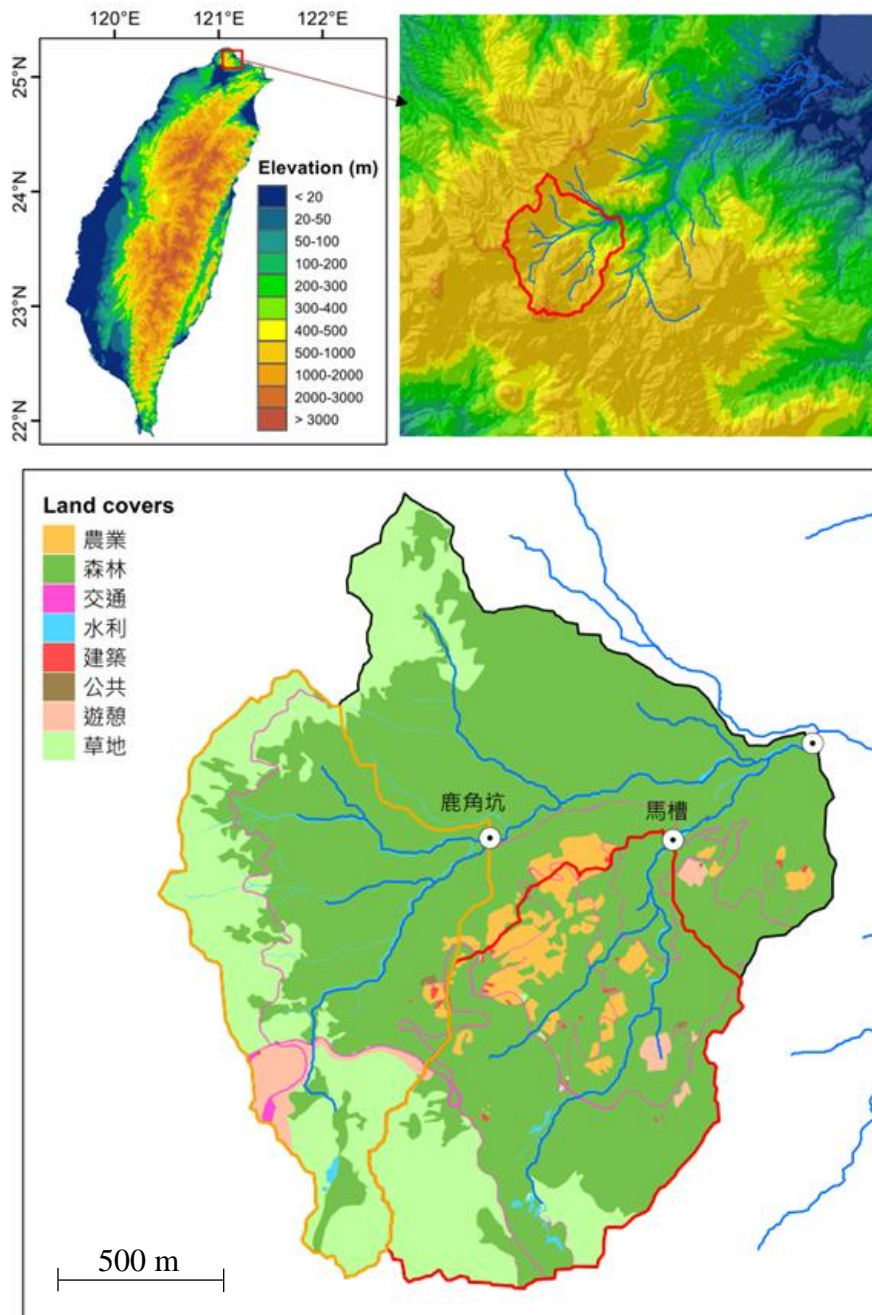


圖 1. 研究位置及雨水採集點為 (鹿角坑及馬槽)

研究於臺灣北部陽明山國家公園鹿角坑生態保護區內的鹿角坑溪自來水加壓站旁 (TWD97 座標：X-306356，Y-2786940)及馬槽溪上的翠林橋 (TWD97 座標：X-307254，Y-2786328)，架設雨水收集器進行雨水採集(圖 1)。雨水收集器以直徑 20 公分的聚丙烯塑膠漏斗連接雙層的聚丙烯水桶組成，收集桶容量

為 15 L，收集時以電極法在現地測定未過濾雨水之酸鹼值 (pH 3210, WTW-Xylem Inc)。採集時間從 2016 年 12 月 30 日至 2017 年 12 月 26 日，每週將收集到的雨水以容量 500 毫升之聚乙烯塑膠瓶取樣，當雨水收集桶雨水內超過 500 mL，先將雨水充分混和後採集 500 mL，不足 500 mL 時則全部收取。樣本於 6 小時內

帶回實驗室以孔徑 0.45 μm 之濾膜 (GN-6 Metrical MCE Membrane Disc Filters, Pall corporation, New York, USA)進行抽氣過濾,取 100 mL 以聚乙烯塑膠瓶冷藏於 4 °C,一個月內以離子層析儀 (883 Basic IC plus, Metrohm AG, Herisau, Switzerland)分析 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 濃度。另取 100 mL 以聚乙烯塑膠瓶冷凍於-4 °C,六個月內以感應偶合電漿-原子放射光譜儀 (ICP-AES, JY 2000, HORIBA Jobin Yvon Inc., New Jersey, USA) 分析 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 濃度。根據雨水採集的時間,將樣本分為冬季 (12、1、2 月, $n = 12$)、春季 (3、4、5 月, $n = 13$)、夏季 (6、7、8 月, $n = 10$)及秋季 (9、10、11 月, $n = 12$)。

資料分析

以單一因子變異數分析分別比較兩個取樣地不同季節間平均週雨量的差異,以廣義線性模型 (General linear model)進行統計分析檢測各種離子在同一地點(鹿角坑或馬槽)濃度在季節間的差異,並以 Tukey's test 進行事後檢定。另以成對 T 檢定比較各離子在兩取樣地之間的差異。影響雨水化學組成的因素很多,一般常用因子分析或主成分分析法找出主要影響因子。此類分析法的基本原理為受相同來源影響的離子,其濃度高低變化應有某種程度的一致性,故可利用較少的變數(即主成分或因子)解釋原有資料的結構(在此即為各週雨水中各種離子濃度的高低)(Johnston 1978)。本研究採因子分析法進行分析,分析過程中先以主成份分析法萃取能解釋資料大部分變異量的特徵向量,由於因子分析法的目的在於用少數變因解釋資料結構,因此萃取的主成份或因子,不宜太多。本研究以特徵值 (eigenvalue) 大於 1,且解釋變異量超過 5%為標準篩選主成份,之後再利用最大變異轉軸法 (varimax rotation)將所萃取之主成份轉換為能明顯區隔且易反映特定意義的因子 (Bridgman 1992, 張仲德等 2002)。一般而言,當某一離子在某一因子的負荷值超過 0.7 即可視為與此一因子

有高度相關,0.5-0.7 為中度相關 0.3-0.5 則為輕度相關 (Shevlin and Miles 1998)。本文中各項統計分析皆以 JMP version 10 (SAS Institute Inc., North Carolina, USA)進行。

結果

鹿角坑地區與馬槽地區的雨水在各個季節的 pH 平均值皆低於 5.0,且均在夏季有較大變動,而不同季節間皆無顯著差異 (鹿角坑 $P = 0.57$; 馬槽 $P = 0.78$) (圖 2),降雨量是秋冬高於春夏(圖 3)。兩個取樣地之間,在所分析的 9 種離子及雨量中,僅 Cl^- 、 SO_4^{2-} 以及 K^+ 有顯著差異且均是馬槽高於鹿角坑(圖 4)。在季節上,離子濃度部分兩地區在不同季節的差異狀況相似, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 的濃度有顯著季節差異。 Cl^- 、 Na^+ 的濃度秋冬兩季較春夏高。 SO_4^{2-} 的濃度以冬季最高夏季最低(圖 5)。 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 濃度在雨水中都相當低(皆低於 0.1 ppm)(圖 5),除了鹿角坑地區的 Al^{3+} 濃度在秋季時顯著較低外 ($P = 0.0028$),其他則無顯著差異。在離子的沉降量上,除了 K^+ 、 Fe^{3+} 及 Al^{3+} 之外在四季間無顯著差異外,其餘離子在兩地都是秋冬的沉降量高於春夏(圖 6),且無論是鹿角坑或者馬槽兩地雨水中各離子的濃度變化皆可用兩個特徵值大於 1 的因子解釋其變化量超過 60% (表 1)。在兩地 Cl^- 、 Na^+ 以及 Mg^{2+} 等皆對第一個因子有高的負荷量(0.93-0.98),第二個因子在鹿角坑有高負荷量的離子為 NO_3^- 、 Ca^{2+} 及 Fe^{3+} ,在馬槽則為 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 及 Al^{3+} 。第一個因子因可歸為海洋飛沫,第二個因子或與火山活動有關 (Parnell and Burke 1990, Bridgman 1992, Ozeki et al. 1995, Raper et al. 1996, Sriwana et al. 1998, Heath and Huebert 1999, Huebert et al. 1999)。或因受火山活動影響略為較小,故鹿角坑部分與火山活動相關的離子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 以及 K^+)在第二個因子中的負荷量未達 0.70。

討論

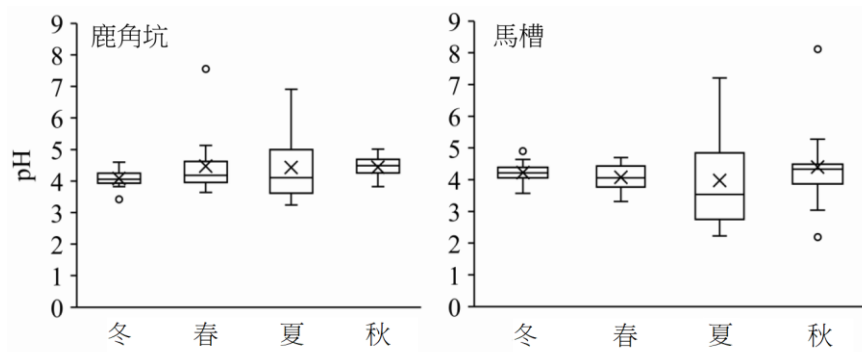


圖 2. 2016 年 12 月 30 日至 2017 年 12 月 26 日，鹿角坑及馬槽地區各季節雨水 pH 值之盒狀圖
 冬季：12-2 月(n = 12)；春季：3-5 月(n = 13)；夏季 6-8 月(n = 10)；秋季：9-11 月(n = 12)。

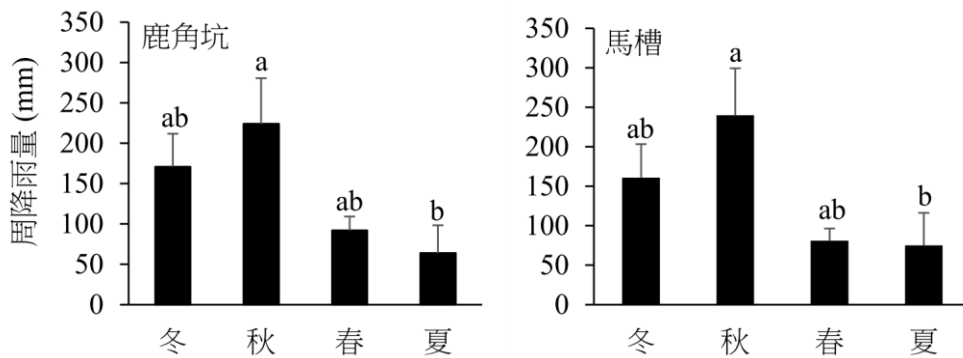


圖 3. 2016 年 12 月 30 日至 2017 年 12 月 26 日，鹿角坑及馬槽地區各季節之周降雨量。冬季：12-2 月(n = 12)；春季：3-5 月(n = 13)；夏季 6-8 月(n = 10)；秋季：9-11 月(n = 12)。同一季節有相同字母標記表示在 $\alpha = 0.05$ 下 Tukey's test 事後檢定無顯著差異。

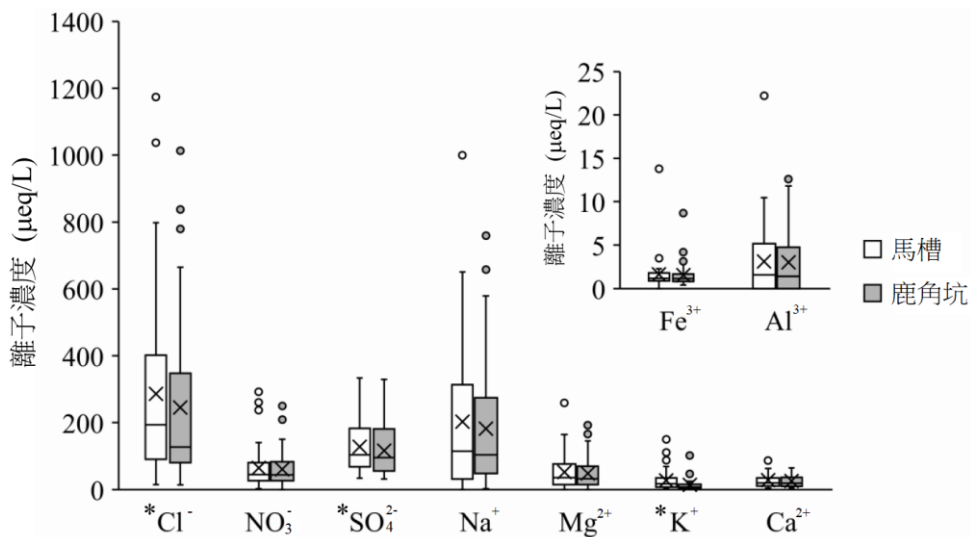


圖 4. 2016 年 12 月 30 日至 2017 年 12 月 26 日，鹿角坑與馬槽兩地各離子週平均濃度之盒狀圖。
 * 表示兩地之間在 $\alpha = 0.05$ 下平均濃度有顯著差異。

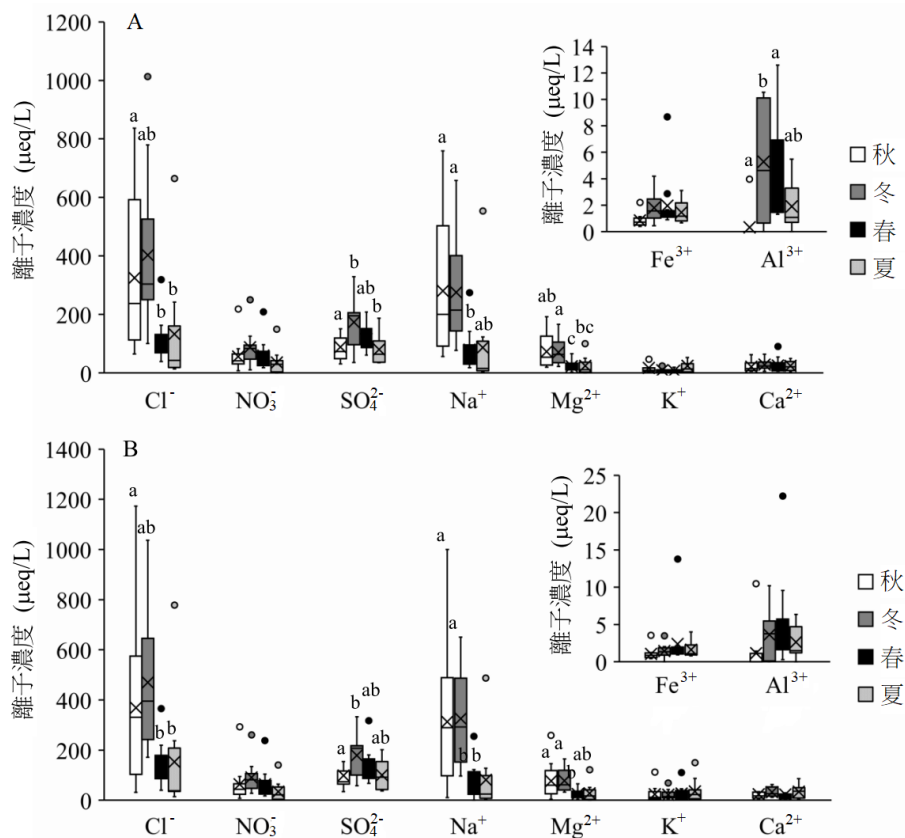


圖 5. 2016 年 12 月 30 日至 2017 年 12 月 26 日，鹿角坑(A)與馬槽(B)地區四個季節雨水中的離子濃度之盒狀圖。同一離子有相同字母標記表示在 $\alpha = 0.05$ 下 Tukey's test 事後檢定無顯著差異。冬季：12-2 月(n = 12)；春季：3-5 月(n = 13)；夏季 6-8 月(n = 10)；秋季：9-11 月(n = 12)。

一、鹿角坑與馬槽間的差異

在所分析的 9 種離子(及 pH 值)中僅 Cl^- 、 SO_4^{2-} 以及 K^+ 於鹿角坑與馬槽之間有顯著差異(圖 4)，這應是因為兩個取樣地相距僅 500 公尺，故雨水組成應大致相同。而 Cl^- 、 SO_4^{2-} 以及 K^+ 均是火山噴發物常見的物質 (Fegley 2000)，故三者馬槽雨水中有較高的濃度，主要應是反映陽明山火山活動對局部地區雨水化學的影響。馬槽的雨水監測點距離主要火山噴氣孔(大油坑)約為 2.2 公里，且馬槽地區受火山地質影響顯著，不僅有硫磺泉類之溫泉，馬槽溪溪水也含有高濃度的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 與較低的 pH 值 (宋聖榮 2005, 賴昱劭 2011)。相對的，鹿角坑的雨水監測點距離主要火山噴氣孔略遠(約為 2.8 公里)，且保護區內植被完整、溪流水水質良好，受火山地質影響較小。因此距離火山活動應是兩地在 Cl^- 、 SO_4^{2-} 以及 K^+ 的

濃度上有所差異的原因，但因兩地相距不遠故雖然在這三種離子的濃度上顯著差異，但此差異量並不大 (Cl^- : $1.44 \mu\text{eq/L}$ ， SO_4^{2-} : $0.57 \mu\text{eq/L}$ ， K^+ : $0.50 \mu\text{eq/L}$)。而由兩地之間的雨水 pH 並無太大差異，整體都低於 5.0，再由兩地化學組成與季節變化也相似來看 (圖 5)，地區性火山活動釋出的酸性物質可能才是主導雨水 pH 的主要因子。

二、季節性離子濃度及輸入量差異

由於陽明山距東、西以及北部海岸均不到 15 公里 (圖 1)，在秋冬季節時雨水中較高的 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 濃度 (圖 5)，顯示東北季風帶來的海洋飛沫對陽明山地區的降雨化學性質有明顯的影響，使雨水中屬於海洋性鹽類的濃度增加 (Keene *et al.* 1986)。而 SO_4^{2-} 在冬季的濃度較高，或許與來境外的長程傳送有關，但

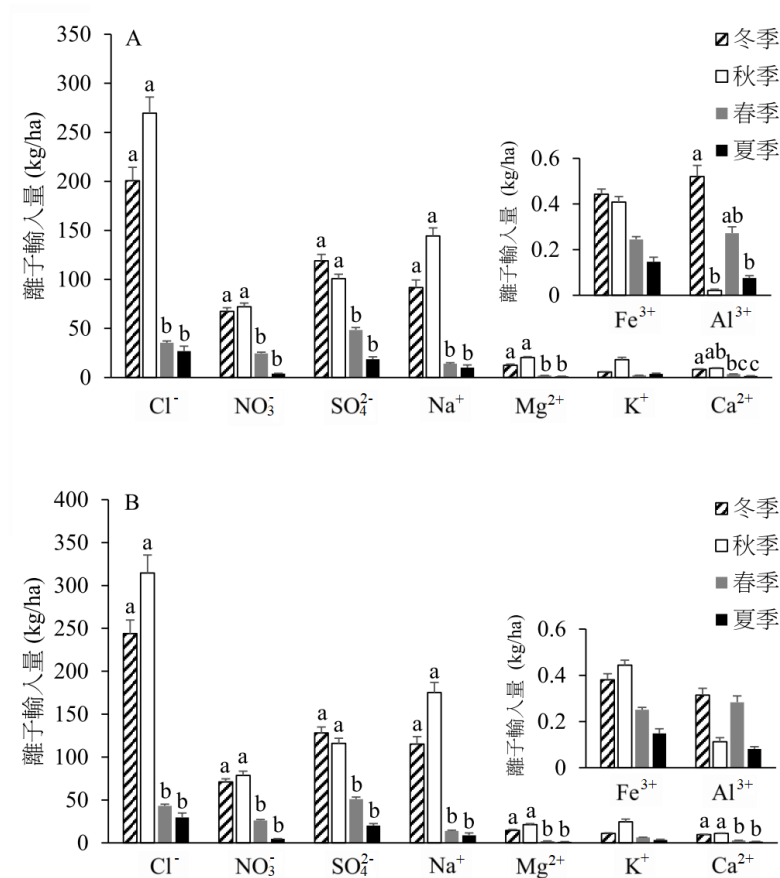


圖 6. 2016 年 12 月 30 日至 2017 年 12 月 26 日，鹿角坑(A) 與馬槽(B)地區各季離子經由雨水的輸入量。同一離子有相同字母標記表示在 $\alpha = 0.05$ 下 Tukey's test 事後檢定無顯著差異。冬季：12-2 月(n = 12)；春季：3-5 月(n = 13)；夏季 6-8 月(n = 10)；秋季：9-11 月(n = 12)。

表 1. 最大變異法轉軸後之因子分析。Eigenvalue 為特徵值，%VE 為解釋變異量。粗體數字為因子負荷量 (loading，大於 0.7 者才列於表中)。括號內數字為因子分數 (factor score)。

	鹿角坑		馬槽	
	因子1	因子 2	因子1	因子 2
Cl ⁻	0.932 (0.194)	(-0.919)	0.956 (0.386)	(-0.785)
NO ₃ ⁻	(-0.089)	0.785 (0.386)	(0.009)	0.751 (0.174)
SO ₄ ²⁻	(-0.091)	(-0.1)	(-0.085)	(0.149)
Na ⁺	0.971 (0.25)	(-0.409)	0.984 (0.372)	(0.161)
Mg ²⁺	0.954 (0.698)	(1.156)	0.961 (0.312)	(0.393)
K ⁺	(-0.001)	(0.019)	(0)	(0.035)
Ca ²⁺	(-0.05)	0.742 (0.214)	(0.003)	0.720 (0.101)
Fe ³⁺	(-0.08)	0.828 (0.304)	(-0.023)	0.926 (0.275)
Al ³⁺	(-0.045)	(0.06)	(-0.11)	0.905 (0.415)
Eigenvalue	4.96	1.66	5.73	1.98
%VE	37.01	25.39	40.23	38.75
可能來源	海洋飛沫	火山活動	海洋飛沫	火山活動

雨水的 pH 值並未在冬季顯著較低，顯示隨東北季風帶來的境外汙染物並不會造成陽明山地區降雨進一步酸化。Hsu 等 (2009)指出隨東

北季風帶來的懸浮微粒會使 K⁺的含量增加，然而在陽明山地區的雨水中 K⁺的濃度並未與其他季節有明顯差異，同樣顯示東北季風對陽

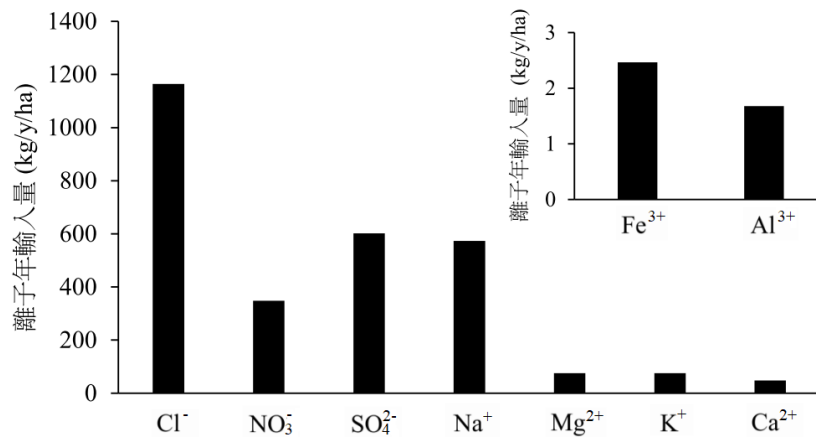


圖 7. 各離子經由降雨的年輸入量

明山雨水化學性質的影響有限，當地火山活動的影響才是雨水偏酸及主導雨水離子組成的主要原因。而此一結果也受到因子分析萃取出海洋飛沫及火山活動兩個解釋因子的結果所支持 (表 1)。

由於各離子的濃度在不同季節若不是沒有顯著差異，就是秋冬兩季高於春夏兩季 (圖 5)，而秋冬季的雨量是顯著高於春夏季的 (圖 3)，因此兩取樣地的離子輸入量都是秋冬高於春夏 (圖 6)。亦即對原本濃度在不同季節間就以秋冬高於春夏的離子而言，季節間離子透過雨水輸入量的差異，是同時受到降雨量以及濃度的影響，而對在不同季節間濃度沒有顯著差異的離子而言，秋冬較高的輸入量主要是這兩個季節降雨量較高所造成。

三、颱風的影響

在研究期間中央氣象局 (<https://www.cwb.gov.tw/>) 發布警報的颱風包括尼莎 (NESAT)、海棠 (HAITANG)、天鴿 (HATO)、谷超 (GUCHOL) 及泰利 (TALIM)，然而除了海棠颱風外皆未對陽明山地區造成強降雨事件，海棠颱風帶來的降雨也並非研究期間中最大的降雨事件 (圖 3)。Lin 等 (2011) 的研究指出颱風夾帶著大量海洋性顆粒的降雨可對福山試驗林貢獻將近 20% 的全年 Na⁺、Cl⁻ 總輸入量。然而在陽明山地區發生海棠颱風

的夏季這兩個離子的濃度並未高於其他季節，且夏季降雨亦未較秋冬高，因此研究期間颱風對陽明山地區 Na⁺、Cl⁻ 等離子輸入量的貢獻並不大。這可能與陽明山比福山更靠海，即使在非颱風期間海鹽飛沫的影響就非常，再加上研究期間颱風降雨有限，因此颱風對包括 Na⁺、Cl⁻ 在內的各離子貢獻量相對有限。

四、離子年輸入量

同樣位在臺灣北部的福山自然保留區每年每公頃的 Cl⁻、SO₄²⁻ 輸入量分別約為 50~80 公斤及 50~70 公斤 (Lin *et al.* 2011, Chang *et al.* 2017)，然而鹿角坑地區的輸入量卻分別為 530 公斤及 290 公斤，馬槽地區分別為 630 公斤及 320 公斤，其他離子的輸入量也遠高於福山試驗林許多 (圖 7)。如此高的輸入量除了與本研究期間降雨量高達近 6976 mm，為 Lin 等 (2001) 所報導 1994-1996 平均年降雨量 4090 mm 的 1.70 倍，Lin 等 (2011) 所報導 1994-2000 平均年降雨量 4450 mm 的 1.56 高出甚多外，取樣地較福山自然保留區離北部及東北部海岸更近，東北季風帶來的海洋飛沫及境外污染物可能也較高。但降雨量高及海洋飛沫與東北季風帶來的境外污染物仍難解釋本研究地各離子透過雨水的輸入量為福山試驗林數倍到近十倍之多。因此，推測更重要的可能是火山活動所釋出的物質為多種離子的重要來源。以

硫酸根為例火山活動所釋放出的 H_2S 與 SO_2 ，可能才是馬槽的 SO_4^{2-} 輸入量高達 290 kg/ha/yr 的主要原因。本研究結果說明火山活動，可能會使當地的物質輸入乃至生地化循環與一般生態系有很大差異。

結論

本研究結果顯示陽明山地區雨水之化學性質主要受到火山活動影響而長期低於 pH 5.0，並含有較高濃度與輸入量的離子（如 SO_4^{2-} ），研究地離海近故海鹽飛沫對雨水化學及 Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 等的輸入亦有重大影響。而研究地雖位在東北季風影響臺灣的前端，隨東北季風而來的境外汙染物並未造成雨水進一步的酸化。陽明山國家公園和同樣位在臺灣北部的福山自然保留區相比，雨水中各種離子的濃度較高，且降雨量較大，故隨離子雨水輸入生態系的量相對於福山自然保留區高了數倍，顯示火山活動，可能會使當地的物質輸入乃至循環與一般生態系有很大差異，惟其對生態系的生地化影響尚待進一步研究。

誌謝

本研究在陽明山國家公園 106 年度研究生研究計畫經費支持下完成，感謝陽明山國家公園管理處同仁協助各項行政工作，使研究得以順利進行。

引用文獻

- 李曉芬。2004。大屯火山區火山氣體成份及其冷凝水之氫氧同位素組成。臺灣大學地質科學研究所學位論文: 1-83。
- 邱文良。2009。陽明山國家公園全區植物多樣性調查-巴拉卡公路以南，陽金公路以西地區。陽明山國家公園管理處研究報告 B0051 號。
- 張仲德、林登秋、薛美莉。2002。以因子分析

探討彰化市雨水中成份來源。地理學報 32:41-54。

賴明洲。1991。陽明山國家公園鹿角坑溪生態保護區植物生態調查。陽明山國家公園管理處研究報告 B0013 號。

- Baker J, Van Sickle J, Gagen C, DeWalle D, Sharpe W, Carline R, Baldigo B, Murdoch P, Bath D, and Krester W. 1996. Episodic acidification of small streams in the northeastern United States: Effects on fish populations. *Ecological Applications* 6:422-437.
- Bridgman HA. 1992. Evaluating rainwater contamination and sources in southeast Australia using factor analysis, *Atmospheric Environment* 26A:2401-2412
- Chang CT, Wang LJ, Huang JC, Liu CP, Wang CP, Lin NH, Wang Lixin, and Lin TC 2017. Precipitation controls on nutrient budgets in subtropical and tropical forests and the implications under changing climate. *Advances in Water Resources* 103, 44-50.
- Chang KH, Jeng FT, Tsai YL, and Lin PL. 2000. Modeling of long-range transport on Taiwan's acid deposition under different weather conditions. *Atmospheric Environment* 34(20):3281-3295.
- Cronan CS, April R, Bartlett RJ, Bloom PR, Driscoll CT, Gherini SA, Henderson GS, Joslin J, Kelly J, and Parnell RA. 1989. Aluminum toxicity in forests exposed to acidic deposition: the ALBIOS results. *Water, Air, and Soil Pollution* 48:181-192.
- Dentener F, Drevet J, Lamarque J, Bey I, Eickhout B, Fiore AM, Hauglustaine D, Horowitz L, Krol M, and Kulshrestha U. 2006. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation. *Global biogeochemical cycles* 20.
- Dey S, Kharbuli S, Chakraborty R, Bhattacharyya S, and Goswami U. 2009. Toxic effect of environmental acid-stress on the sperm of a hill-stream fish *Devario aequipinnatus*: A scanning electron microscopic evaluation. *Microscopy research and technique* 72:76-78.
- Driscoll CT, Driscoll KM, Mitchell MJ, and Raynal DJ. 2003. Effects of acidic deposition on forest and aquatic ecosystems in New York State. *Environmental Pollution* 123:327-336.
- Driscoll CT, Lawrence GB, A. Bulger J, Butler TJ, Cronan CS, Eagar C, Lambert KF, Likens GE, Stoddard JL, and Weathers KC. 2001. Acidic Deposition in the Northeastern United States: Sources and Inputs, Ecosystem Effects, and Management Strategies: The effects of acidic deposition in the northeastern United States include the acidification of soil and water, which stresses terrestrial and aquatic biota. *BioScience* 51:180-198.

- Fegley Jr. B, and Zolotov MY. 2000. Chemistry of sodium, potassium, and chlorine in volcanic gases on Io. *Icarus* 148:193-210.
- Haynes R, and Swift R. 1986. Effects of soil acidification and subsequent leaching on levels of extractable nutrients in a soil. *Plant and Soil* 95:327-336.
- He Z, Alva A, Calvert D, Li Y, and Banks D. 1999. Effects of nitrogen fertilization of grapefruit trees on soil acidification and nutrient availability in a Riviera fine sand. *Plant and Soil* 206:11-19.
- Heath JA and Huebert BJ. 1999. Cloudwater deposition as a source of fixed nitrogen in a Hawaiian montane forest. *Biogeochemistry* 44(2):119-134.
- Hsu SC, Liu SC, Huang YT, Chou CCK, Lung SCC, Liu TH, Tu JY, and Tsai F. 2009. Long-range southeastward transport of Asian biomass pollution: Signature detected by aerosol potassium in Northern Taiwan. *Journal of Geophysical Research* 114:D14301
- Huebert B, Vitousek P, Sutton J, Elias T, Heath J, Coeppicus S, Howell S, Blomquist B. 1999. Volcano fixes nitrogen into plant-available forms. *Biogeochemistry* 47:111-118.
- Johnston RJ. 1978. *Multivariate Statistical Analysis in Geography*. Longman, New York.
- Keene WC, Pszenny AA, Galloway JN, and Hawley ME. 1986. Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 91(D6):6647-6658.
- Lin CY, Liu SC, Chou CCK, Huang SJ, Liu CM, Kuo CH, and Young CY. 2005. Long-range transport of aerosols and their impact on the air quality of Taiwan. *Atmospheric Environment* 39(33):6066-6076.
- Lin CY, Wang Z, Chen WN, Chang SY, Chou CC, Sugimoto N, and Zhao X. 2007. Long-range transport of Asian dust and air pollutants to Taiwan: observed evidence and model simulation. *Atmospheric Chemistry and Physics* 7(2):423-434.
- Lin TC, Hamburg SP, King HB and Hsia YJ. 2000. Throughfall patterns in a subtropical rain forest of northeastern Taiwan. *Journal of Environmental Quality* 29(4):1186-1193.
- Lin TC, Hamburg SP, Lin KC, Wang LJ, Chang CT, Hsia YJ, Vadeboncoeur MA, McMullen CMM, and Liu CP. 2011. Typhoon disturbance and forest dynamics: lessons from a northwest Pacific subtropical forest. *Ecosystems* 14(1):127-143.
- McKnight DM, and Feder GL. 1984. The ecological effect of acid conditions and precipitation of hydrous metal oxides in a Rocky Mountain stream. *Hydrobiologia* 119:129-138.
- Ozeki T, Koide K and Kimoto T. 1995. Evaluation of sources of acidity in rainwater using a constrained oblique rotational factor analysis. *Environmental Science and Technology* 29:1638-1648.
- Parnell RA and Burke KJ. 1990. Impacts of acid emissions from Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on selected terrestrial and aquatic ecosystems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 42:69-88.
- Raper DW and Lee DS. 1996. Wet deposition at the sub-20 km scale in a rural upland area of England. *Atmospheric Environment* 30:1193-1207.
- Shevlin, M., & Miles, J. N. (1998). Effects of sample size, model specification and factor loadings on the GFI in confirmatory factor analysis. *Personality and Individual Differences* 25:85-90.
- Sriwana T, Van Bergen M, Sumarti S., De Hoog J, Van Os B, Wahyuningsih R and Dam M. 1998. Volcanogenic pollution by acid water discharges along Ciwidey River, West Java (Indonesia). *Journal of Geochemical Exploration* 62:161-182
- Tomlinson GH. 2003. Acidic deposition, nutrient leaching and forest growth. *Biogeochemistry* 65:51-81.