

研究報告

森林集水區對酸性與非酸性沈降之水化學變化 —以台灣北部文山林場為例

王秋嫻^{1,*} 劉瓊霽² 陸象豫¹ 林介龍¹ 蔡貞珍¹

【摘要】本試驗於文山林場將2009年3月至2012年2月三年期間所收集的雨水，分為酸性沈降 ($\text{pH} \leq 5.0$) 與非酸性沈降 ($\text{pH} > 5.0$)，以探討二種沈降雨水經過樹冠層(穿落水)、土壤層(土壤水)至溪流水的水化學變化。經由47場有效降雨之分析結果顯示，非酸性沈降的雨水含有較高濃度的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等鹼性離子，但雨水沈降至穿落水及15、30 cm深土壤水時，二沈降的離子濃度除了F以外並無明顯差異，說明此森林冠層對酸性沈降有極大的緩衝效能。然而，60 cm深之土壤水，非酸性沈降者含有較高濃度的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 及總陰、陽離子。非酸性沈降者之溪水其 Mg^{2+} 濃度高於酸性沈降者， Cl^- 和 NO_3^- 之濃度則以酸性沈降者較大，推測造成溪水離子的差異可能為溪水量及大氣沈降所致。由上述結果顯示，此區60 cm深土壤水及溪流水的水化學性質與沈降的水化學性質有很大的相關性。

【關鍵詞】酸性沈降、穿落水、土壤水、溪流水、水化學

Research paper

Changes of Water Chemistry for Acid and Non-Acid Precipitation at A Forested Watershed—A Case Study of The Wenshan Forest Station in Northern Taiwan

Chiu-Hsien Wang^{1,*} Chiung-Pin Liu² Shiang-Yue Lu¹ Chieh-Lung Lin¹ Chen-Chen Tsai¹

【Abstract】 This study grouped rainfall and water samples which were collected from March 2009 to February 2012 at Wenshan Forest Station into acid precipitation ($\text{pH} \leq 5.0$) and non-acid precipitation ($\text{pH} > 5.0$) two categories for investigating changes of water chemistry after it passing through canopy (throughfall), soil layers (soil solution) and draining into stream. Results from 47 valid events indicated that samples from non-acidic precipitation category contained a higher concentration of Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- and other alkaline ions. Except for concentration of F, there was no significant differences of ions

-
1. 行政院農委會林業試驗所集水區經營組，100臺北市南海路53號
Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nan-Hai Rd., Taipei 100, Taiwan.
 2. 國立中興大學森林系，台中市國光路250號
Department of Forestry, NCHU, 250 Kuokwang Rd., Taichung, Taiwan.
- * 通訊作者Corresponding author. E mail: wangch@tfri.gov.tw

concentrations between these two categories in throughfall, soil solution of 15, 30 cm depths and this phenomenon illustrated that this forest ecosystem had great buffering capacity for acid precipitation. However, soil solution at 60cm depth had higher concentrations of Ca^{2+} , HCO_3^- , anions and cations for non-acid precipitation. Samples of streamwater of non-acid precipitation category contained higher Mg^{2+} concentration but lower Cl^- and NO_3^- concentrations in comparison with those of acid precipitation category. We speculated that differences in ions of streamwater may be affected by discharge of streamflow and characteristics of atmospheric precipitation. Results from above indicated that water chemical properties of soil solution at 60cm depth and streamwater have close relationship with those of gross rainfall in this area.

【Key words】 Acid precipitation, Throughfall, Soil solution, Streamwater, Water chemistry

一、前言

「酸性沈降」(acid precipitation) 可分為「濕沈降」與「乾沈降」兩大類，前者指的是所有氣狀污染物或粒狀污染物，隨著雨、雪、霧或雹等降水型態而落到地面者，後者則是指在不下雨的日子，從空中降下來的落塵所帶的酸性物質而言。科學界對酸性沈降的重視，乃自1960年代開始，發現歐美的降水有過酸的現象，許多地區的pH值介於3~4之間，當時認為此現象可能與歐美兩洲使用石化燃料有關，其後發現，酸雨籠罩區日益擴大，而北歐國家(丹麥、挪威、瑞典)發現湖泊、溪流與河川酸化可能也因酸沈降所致，此酸性降水與使用石化燃料，釋放 SO_2 及 NO_x 有關(金恆鏞及黃良鑫，1983)。1980年以來，加拿大已有8500個湖泊酸化，美國至少有1200個湖泊酸化，成為死湖(劉曉華，2010)。然而，酸雨不僅危害湖泊、溪流，更危害森林。1970年代，德國境內的森林突然大規模死亡，學者認為此可能是酸沈降所造成的危害，且許多研究均指出，森林枯萎與酸沈降的嚴重性有關(高清，1996；劉禎祺，1999)。根據統計，歐洲中部約有100萬公頃的森林因酸雨的傷害枯萎死亡；義大利北部有9000多公頃的森林因酸雨而死亡；在中國大陸的四川盆地和貴州省受酸雨傷害之森林面積分別達28萬公頃和14萬公頃(劉曉華，2010)，顯示酸雨已成為一個國際間重視的環境問題。

行政院環保署已將雨水pH值達5.0以下

時，正式定義為「酸雨」，即確定受到人為酸性污染物的影響。台灣地區在1979年開始發現酸雨(孫岩章及吳瑞鈺，1980)，後經調查發現，酸雨發生的頻率與酸性亦相當嚴重(金恆鏞，1987；鄭福田，1992)。另依據中央氣象局酸雨監測資料顯示，近年來台灣北部(如基隆、台北、陽明山鞍部等測站)雨水酸化的程度均較中南部顯著。台灣在1995年實施徵收空污費政策後，硫排放已經大幅減少，但來自韓國、日本及中國大陸等工業產能較大的國家，其人為的酸性排放物，於東北季風盛行時，很容易將此等污染物長程輸送至台灣，推測此為北台灣酸雨持續嚴重的原因之一(金恆鏞等，2003；Lin *et al.*, 2000)。

本研究選擇易發生酸雨的臺灣北部國立中興大學實驗林場—文山林場為試驗地，分析雨水經森林冠層(穿落水)至森林土壤(土壤水)，最後至溪水之水化學變化，加以探討酸性沈降($\text{pH} \leq 5.0$)與非酸性沈降($\text{pH} > 5.0$)下水樣中陰、陽離子的差異。

二、材料與方法

(一) 試驗地概況

本試驗地為國立中興大學實驗林場—文山林場，位於北緯 $24^{\circ}54'50.7''$ 至 $24^{\circ}55'23.2''$ ，東經 $121^{\circ}32'58.3''$ 至 $121^{\circ}33'34''$ 之間，其位置圖如圖1，林場總面積為117.91 ha，本試驗之取樣點在第1林班，第1林班面積13.26 ha。本林場位於新店溪上游北勢溪與南勢溪匯流處之

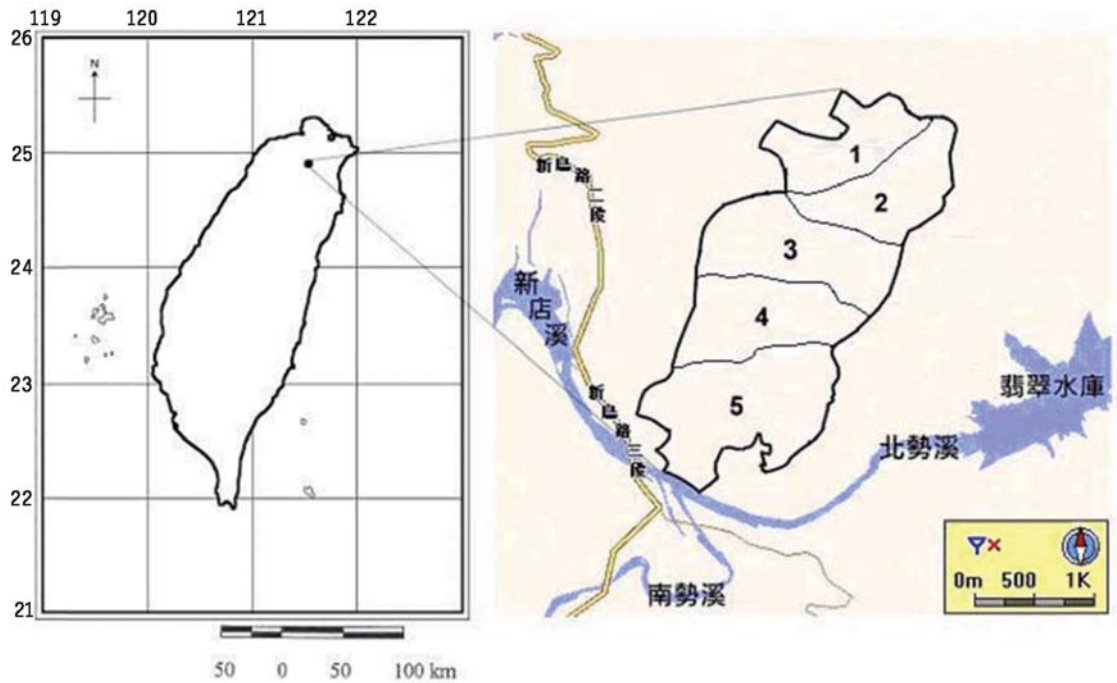


圖1. 文山林場位置圖 (數字1, 2, … 5表林場各林班，本試驗之取樣點在第1林班)。

Fig. 1. Site of the Wenshan Forest Station (The number in the map indicates forest compartment and the sampling locations of this study are in the first forest compartment.).

北面，座北面南，屬淡水河系，山勢極傾斜，最高山峰為直潭山，海拔高732m。本區屬水源保護特定區之保育林地，為限制伐採之林業用地。由於該林場未設氣候觀測站，根據翡翠水庫氣候站之資料統計，平均溫度21.8°C，平均最高氣溫26.1°C，平均最低氣溫18.8°C，年降雨量2,545 mm，平均相對濕度84%。林相構成主要以闊葉樹天然林為主，間雜有柳杉及杉木等針葉樹人工林，闊葉樹主要為相思樹、楠木類、木油桐及其它雜木 (資料來源：國立中興大學實驗林管理處網站http://exp-forest.nchu.edu.tw/forest/html/farm_4.html)。

(二) 取樣方法

本試驗自2009年3月至2012年2月為期三年，每月至少收集一次較大的場雨，合計共收集了47場雨水水樣。

1. 林外雨及穿落水的取樣：選擇林外開闊

地設置林外雨收集桶，於林內設置6個穿落水收集桶。收集桶材質為PP (聚丙烯, polypropylene) 塑膠桶，桶頂上方裝置3組直徑為19公分的收集漏斗，為長年開口容器 (漏斗中放置濾網防止落葉或昆蟲掉入)，收集物兼容乾濕沉降 (即混沉降)。所收集之雨水裝入500 mL PE (聚乙烯, polyethylene) 瓶，並儘速帶回實驗室分析。

2. 溪水的取樣：每次收集林外雨及穿落水的同時，亦於試驗林之集水區上游處，以漂淘法收取溪水。所取得之水樣裝入500 mL PE瓶中，並儘速帶回實驗室分析。

3. 土壤水的取樣：在試驗林內不同深度土層 (15、30及60 cm) 各埋入3組自製之土壤水收集裝置 (將可維持0.1 MPa之壓力的陶瓷杯接於適當長度之硬質塑膠管上)。每次收取土壤水時，利用幫浦將上述裝置抽至壓力70

kPa，使土壤水滲入其內，再行抽取收集並裝入500 mL PE瓶中，儘速帶回實驗室分析。

(三) 化學分析

水樣自收取後運送至實驗室均不超過6小時，水樣抵達實驗室後，馬上測定電導度 (WTW LF 340, Germany) 及pH 值 (Metrohm 691, Switzerland)，其餘水樣經0.45 μm 濾膜 (GN-6) 過濾後，濾紙以105°C烘乾後稱重以定量懸浮質 (Suspended Solids, SS) 濃度。濾液則置於恆溫箱 (4°C) 以備測定陽離子 (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) 和陰離子 (F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-)。其中陰、陽離子除了 HCO_3^- 是以0.005 N H_2SO_4 滴定到pH 4.52 定量外 (APHA, 1995)，其他則以離子層析儀 (Metrohm 820, Switzerland) 測定之。

三、結果與討論

(一) 林外雨

本研究於三年試驗期間，共收集了47場雨水，其中17場雨水達到酸雨 (pH \leq 5.0) 之標準，約占36%，此17場酸性沈降與30場非酸性沈降的雨水pH中值分別為4.4和6.0 (如圖2所示)。另由酸雨發生之季節分佈可知，酸雨多發生於冬季和春季 (合計占77%)，乃因此試驗地位於東北季風之迎風地帶，故此季節發生酸雨的機率特別高。由表1林外雨的水化學分析結果顯示，電導度和懸浮值在二種沈降間有明顯差異，但由標準偏差可發現酸性沈降的測值皆較集中，而非酸性沈降的測值變化頗大。

酸雨的形成受大氣環境中污染物之種類、濃度與傳輸過程的直接影響，並受氣象條件與地形特性的間接影響 (資料來源：台灣酸雨資訊網<http://acidrain.epa.gov.tw/understand/05.htm>)。由表1分析結果顯示，大部份的陰、陽離子在二種沈降間有明顯的差異，非酸性沈降明顯含有較高濃度的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^-

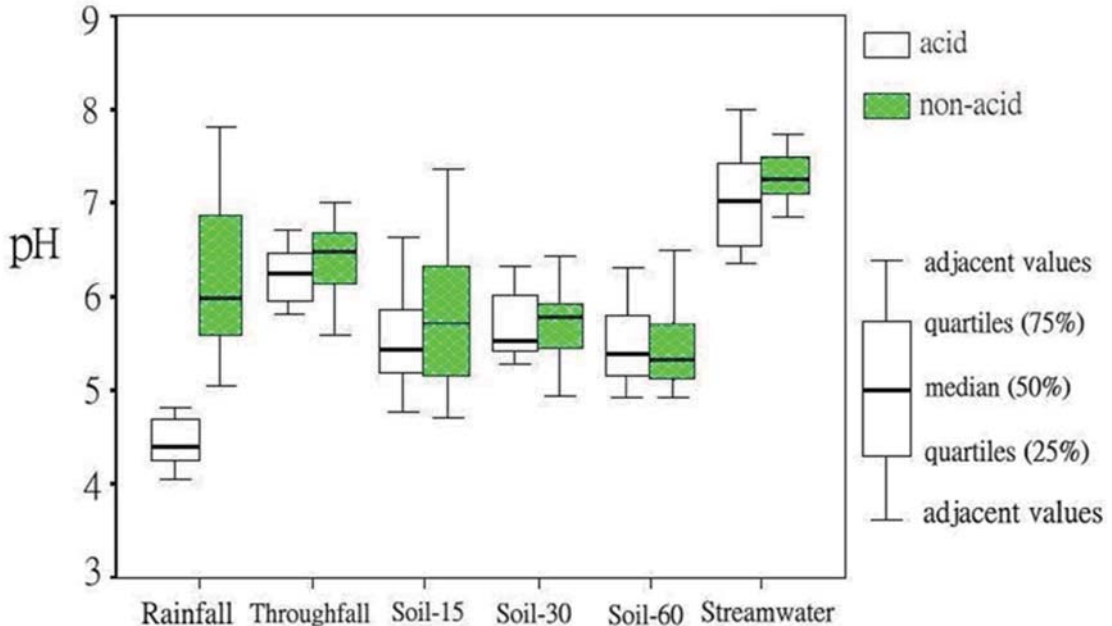


圖2. 文山林場林外雨、穿落水、土壤水、溪流水在酸性沈降和非酸性沈降之pH中值變化

Fig. 2. Changes of medium pH values of rainfall, throughfall, soil solutions at 15, 30, 60 cm depth and streamwater for acid precipitation and non-acid precipitation categories in the Wenshan Forest Station.

表1. 文山林場酸性沈降與非酸性沈降之林外雨的水化學

Table 1. Water chemistry of gross rainfall for acid precipitation and non-acid precipitation categories in the Wenshan Forest Station.

	酸性沈降	非酸性沈降	p值
Conductivity, $\mu\text{S cm}^{-1}$	36.9 \pm 13.0	30.6 \pm 27.1	0.002 **
SS, mg L^{-1}	6.0 \pm 4.6	10.8 \pm 9.0	0.044 *
pH	4.5 \pm 0.3	6.2 \pm 0.8	0.000 ***
Na^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	57.9 \pm 44.3	58.8 \pm 72.8	0.031 *
NH_4^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	22.7 \pm 16.8	18.8 \pm 28.8	0.270 NS
K^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	14.5 \pm 10.4	20.2 \pm 11.1	0.495 NS
Ca^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	47.6 \pm 62.6	118.8 \pm 128.2	0.018 *
Mg^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	26.3 \pm 10.9	50.0 \pm 59.4	0.014 *
F^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	1.6 \pm 1.8	0.9 \pm 0.7	0.011 *
Cl^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	60.3 \pm 30.1	63.1 \pm 64.3	0.010 **
NO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	36.7 \pm 19.7	17.9 \pm 18.4	0.866 NS
SO_4^{2-} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	75.3 \pm 33.1	60.0 \pm 51.4	0.076 NS
HCO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	27.8 \pm 38.7	141.3 \pm 148.8	0.003 **
Cation, $\mu\text{eq L}^{-1}$	209.7 \pm 100.6	268.3 \pm 218.3	0.050 *
Anion, $\mu\text{eq L}^{-1}$	202.3 \pm 78.0	284.3 \pm 207.6	0.014 *

註：數值為平均值 \pm 標準差，p值為T檢定（雙尾檢定）之統計分析結果，NS表示未達顯著水準；*表示達0.05顯著水準；**表示達0.01顯著水準；***表示達0.001顯著水準，以下同。

等鹼性離子，此些離子在非酸性沈降的標準偏差頗大，表其濃度變化極大。二種沈降的總陰、陽離子以非酸性沈降者明顯大於酸性沈降者。酸性沈降的陽離子以 Na^+ (占28%)、 Ca^{2+} (占23%) 為主，非酸性沈降的陽離子亦以 Ca^{2+} (占44%)、 Na^+ (占22%) 為主；酸性沈降的陰離子以 SO_4^{2-} (占37%)、 Cl^- (占30%)、 NO_3^- (占18%) 為主，非酸性沈降的陰離子以 HCO_3^- (占50%)、 Cl^- (占22%)、 NO_3^- (占21%) 為主。一般而言， SO_4^{2-} 及 NO_3^- 為主要的致酸物質，由硫化物與氮氧化物轉化而來。在人為污染排放方面，前者與使用化石燃料（如火力電廠）、含硫有機物燃燒有關；後者主要源自工廠高溫燃燒過程，及交通工具排放廢棄等因素。此林場的降水與同樣在台灣北部的福山闊葉林（金恆鏞等，2003）相比，其受海鹽飛沫影響的程

度雖不若福山嚴重，但其所含的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 遠高於福山，顯示此區受塵土懸浮微粒的影響較大。此外，此區亦含有高濃度的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- ，由於此林場位於無工業污染的森林區域，推測沈降中的致酸物 SO_4^{2-} 可能來自長程輸送的結果，至於沈降中的 NO_3^- 是否來自台北都會區之交通工具排放，仍有待進一步研究確認。綜合上述，雖然此林場有高濃度的致酸物（ SO_4^{2-} 和 NO_3^- ），但因其亦含有較高的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 等鹼性離子（尤其是 HCO_3^- ），故其整體的pH中值（5.6）不若福山（4.6）低。

(二) 穿落水

森林冠層是大氣沈降攜帶各種物質進入森林生態系的第一個介面，由圖2各水樣的pH中值變化可知，當酸性沈降與非酸性沈降之林外雨（pH中值分為4.4和6.0），通過森林冠層成

為穿落水後，pH中值則分別提高至6.3和6.5，二者數值相近，顯示其致酸物質大部分被截留或置換於樹冠層，表示此闊葉樹天然林為主的森林冠層對酸性沈降具有極大的緩衝能力。大部分的研究指出，森林中和酸雨的能力與林相組成有關，一般而言，進入闊葉林（包括落葉林）的酸雨，皆被中和成非酸性（Crona and Reiners, 1983），例如福山（金恆鏞等，2003）、關刀溪（Liu and Sheu, 1999）等闊葉林；針葉林則不僅不能中和酸雨，即使是非酸性沈降，一旦與針葉林分接觸，水質亦將酸化（King *et al.*, 1994）。一般闊葉林能中和酸沈降是因為降水淋洗葉片表面的鹼性堆積物與葉內的鹽基離子交換的結果（Crona and Reiners, 1983）；而針葉林會使降水酸化的主因為其釋出較多種類及較高濃度之有機酸所致（Liu and Sheu, 2003）。

由表2分析結果顯示，二種沈降的穿落水其陰、陽離子皆未達顯著差異，亦即酸性沈降

穿過森林冠層時，自林冠淋洗、淋溶或交換出大量的鹼性離子並中和之，使其穿落水之pH值與非酸性沈降之穿落水相差不大。此外，二者穿落水之懸浮值、電導度亦未達顯著差異。

比較穿落水與林外雨之平均陽離子濃度可發現，大部分的陽離子皆增加，表示 H^+ 被吸收並交換出其他的陽離子，酸性沈降下的穿落水陽離子中以 Ca^{2+} 的增加最多，非酸性沈降的穿落水則以 K^+ 增加最多；另比較穿落水與林外雨的陰離子可知，大部份的陰離子（ Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- ）皆增加，顯示樹冠淋溶並交換出大部份的陰離子，或為保持陰陽離子之平衡而伴隨釋出，二種沈降的穿落水皆以 HCO_3^- 增加最多，其次為 Cl^- 。由上述亦可知，森林冠層中和酸雨並不是因為吸附 SO_4^{2-} 和 NO_3^- ，而是經由淋洗出 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等鹽基陽離子，而達到緩衝酸雨之功效（黃正良等，2012）。此與福山的森林冠層可吸收酸雨中的 NO_3^- （但對 SO_4^{2-} 無

表2. 文山林場酸性沈降與非酸性沈降之穿落水的水化學

Table 2. Water chemistry of throughfall for acid precipitation and non-acid precipitation categories in the Wenshan Forest Station.

	酸性沈降	非酸性沈降	p值
Conductivity, $\mu S\ cm^{-1}$	49.3 \pm 19.1	45.7 \pm 15.7	0.472 NS
SS, $mg\ L^{-1}$	19.3 \pm 14.6	35.3 \pm 22.6	0.071 NS
pH	6.3 \pm 0.4	6.4 \pm 0.4	0.925 NS
Na^+ , $\mu eq\ L^{-1}$	76.8 \pm 30.6	64.9 \pm 49.8	0.092 NS
NH_4^+ , $\mu eq\ L^{-1}$	31.6 \pm 17.2	28.1 \pm 18.3	0.665 NS
K^+ , $\mu eq\ L^{-1}$	109.2 \pm 63.4	134.7 \pm 66.3	0.349 NS
Ca^{2+} , $\mu eq\ L^{-1}$	163.9 \pm 138.9	146.6 \pm 70.8	0.289 NS
Mg^{2+} , $\mu eq\ L^{-1}$	84.4 \pm 32.9	83.4 \pm 30.3	0.419 NS
F^- , $\mu eq\ L^{-1}$	1.7 \pm 0.9	1.5 \pm 1.0	0.755 NS
Cl^- , $\mu eq\ L^{-1}$	103.9 \pm 49.6	89.5 \pm 65.8	0.721 NS
NO_3^- , $\mu eq\ L^{-1}$	45.1 \pm 33.0	36.7 \pm 27.6	0.681 NS
SO_4^{2-} , $\mu eq\ L^{-1}$	108.6 \pm 52.1	75.1 \pm 38.0	0.074 NS
HCO_3^- , $\mu eq\ L^{-1}$	180.6 \pm 178.9	203.5 \pm 100.3	0.555 NS
Cation, $\mu eq\ L^{-1}$	468.3 \pm 188.2	458.6 \pm 146.4	0.357 NS
Anion, $\mu eq\ L^{-1}$	446.6 \pm 183.8	416.2 \pm 139.6	0.441 NS

甚大反應) (金恆鏞等, 2003), 以中和雨水之酸度顯然不同, 然而其中和酸性的結果亦會釋放其他的鹽基陽離子 (如 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+)。

無論酸性或非酸性沈降之穿落水, 其陽離子皆以 $\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ (如圖3), 陰離子則以 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ (如圖4)。穿落水中之 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 除了來自乾沈降的淋洗, 亦來自林冠層的淋溶和離子交換釋出。一般認為 K^+ 在森林生態系流動快速且能藉由樹冠交換並大量淋溶回歸於林地 (Lovett and Linberg, 1984; Johnson *et al.*, 1991), 並證實 K^+ 主要來自冠層的淋溶, 而非乾沈降的淋洗 (劉瓊霖, 2000)。在穿落水中的 HCO_3^- 亦大幅增加, 其可能也導因於雨水會淋溶或淋洗葉表面的碳酸氫鹽類, 而導致穿落水的pH值提高及 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等陽離子濃度增加 (Cronan and Reiners, 1983)。另有研究指出 HCO_3^- 的輸入主要來自大氣中 CO_2 溶於水中或微生物活動旺盛的結果, 是許多溫帶及熱帶森林生態系的一天然淋溶物質 (Johnson *et al.*, 1977), 且在低pH的水樣下, HCO_3^- 易與 H^+ 結合為碳酸, 而減少 HCO_3^- 的量。林外雨之 Na^+ 和 Cl^- 濃度比例相當, 但穿過林冠後穿落水中之 Cl^- 濃度遠大於 Na^+ , 尤其是酸性沈降的穿落水中其 Cl^- 的濃度更達 Na^+ 的1.4倍, 學者推測森林冠層可能會截留 HCl 及少量的 NH_4Cl , 然後吸收 NH_4^+ 並釋出 Cl^- , 在同一過程中, Cl^- 可能與 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及少量的 Na^+ 結合, 並被淋洗出來 (Neary and Gizyn, 1994)。

(三) 土壤水

酸性沈降與非酸性沈降經森林冠層及樹幹後進入枯枝落葉層, 再進入土壤層, 二者在土壤水的pH中值變化近似 (圖2), 在15、30及60 cm深分別為5.4、5.5、5.4及5.7、5.7、5.3。因土壤水的離子濃度可反應出一生態系的改變, 因此可作為監測生態系受到重大干擾所影響的有利工具 (Johnson and Lindberg, 1992)。如表3分析結果顯示, 二種沈降的離子濃度在15cm深土壤水間並無顯著差異, 推測由於酸性沈降

在穿過此森林冠層時已被中和成接近中性, 故其對表層土壤水 (15cm深) 的無機離子影響不大。至30cm深土壤水時 (表4), 酸性沈降與非酸性沈降之土壤水中除了 F^- 之濃度有明顯差異外, 其餘的離子間亦無明顯差異, 一般土壤水中 F^- 的含量極微。然而, 至60 cm深之土壤水 (表5), 其非酸性沈降者的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 及總陰、陽離子濃度皆明顯高於酸性沈降者, 其餘離子則無明顯差異。造成酸性沈降及非酸性沈降在60cm深土壤水之離子差異, 是否因該土壤水往下移動, 長時間累積所致, 仍有待進一步收集資料分析。

由圖3和4酸性沈降和非酸性沈降土壤水之離子組成顯示, 不論是15、30和60 cm深之土壤水, 其陽離子皆以 Ca^{2+} 為主, 其次為 Mg^{2+} 或 Na^+ , 陰離子之組成在15 cm深以 NO_3^- 為主, 在30和60 cm深則以 HCO_3^- 為主。由於表土和枯枝落葉層含有較高的有機質和氮, 經淋溶作用的帶出, 使得表層土壤水含有較高濃度的 NO_3^- , 又因 NO_3^- 不易被吸附到土粒表層, 故多溶於土壤水中並隨之移動。此外, 土壤水中主要的陽離子 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 為維持陰陽離子的平衡, 一般會伴隨 HCO_3^- 或是 SO_4^{2-} 一起輸出 (鍾欣芸等, 2008)。

(四) 溪流水

溪流水的來源包括直接降水、地表逕流、地中逕流及深層地下水。故酸性沈降除了會影響土壤水, 亦會影響溪流水。酸性沈降與非酸性沈降的溪流水pH中值分別為7.0和7.3 (如圖2), 較林外雨及土壤水的pH值大為提高, 但二者間並無明顯差異 (如表6)。另由表6的溪水水化學分析可知, 溪水中的 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 NO_3^- 在二種沈降間有顯著的不同, 即非酸性沈降之溪水其 Mg^{2+} 濃度高於酸性沈降者; Cl^- 和 NO_3^- 之濃度則以酸性沈降者較大。影響溪流水水化學的因子包括流量、大氣沈降、土壤與地質、植被、溫度及人為活動等 (陸象豫等, 2010), 由於二沈降之土壤與地質、植被、溫度及人為活動皆近似, 故推測造成溪流水 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 NO_3^-

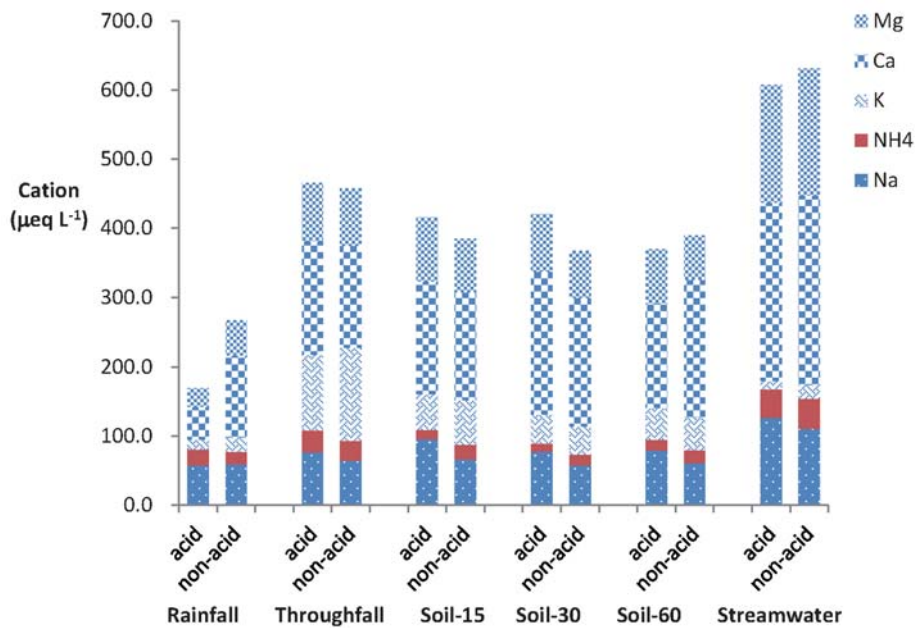


圖3. 文山林場酸性沉降及非酸性沉降各水樣陽離子的組成

Fig. 3. Composition of cation of water samples for acid precipitation and non-acid precipitation categories in the Wenshan Forest Station.

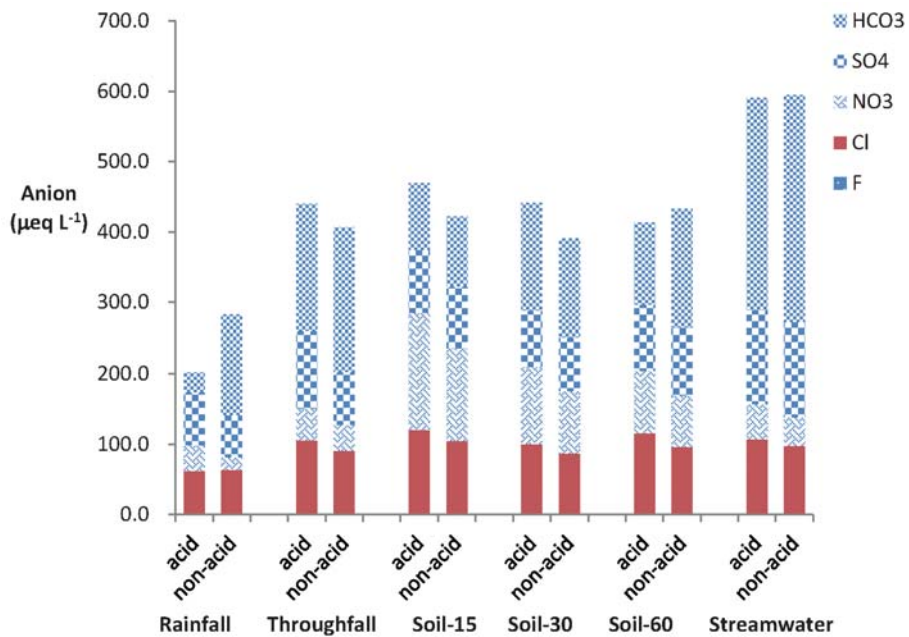


圖4. 酸性沉降及非酸性沉降各水樣陰離子的組成

Fig. 4. Composition of anion of water samples for acid precipitation and non-acid precipitation categories in the Wenshan Forest Station.

表3. 文山林場酸性沈降與非酸性沈降之15 cm深土壤水的水化學

Table 3. Water chemistry of soil solution at 15 cm depth for acid precipitation and non-acid precipitation categories in the Wenshan Forest Station.

	酸性沈降	非酸性沈降	p值
Conductivity, $\mu\text{S cm}^{-1}$	54.4 \pm 16.4	49.2 \pm 19.2	0.497 NS
SS, mg L^{-1}	6.0 \pm 3.1	6.0 \pm 3.3	0.778 NS
pH	5.5 \pm 0.5	5.8 \pm 0.7	0.075 NS
Na^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	95.4 \pm 62.5	66.3 \pm 63.6	0.669 NS
NH_4^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	13.5 \pm 25.6	21.5 \pm 25.7	0.703 NS
K^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	51.5 \pm 23.1	63.9 \pm 59.9	0.235 NS
Ca^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	162.9 \pm 87.2	155.7 \pm 85.7	0.920 NS
Mg^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	92.1 \pm 37.5	77.4 \pm 36.1	0.778 NS
F^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	2.1 \pm 1.1	1.6 \pm 0.7	0.082 NS
Cl^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	118.2 \pm 50.8	103.0 \pm 67.0	0.220 NS
NO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	164.7 \pm 81.6	130.5 \pm 136.4	0.080 NS
SO_4^{2-} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	89.4 \pm 26.8	87.2 \pm 23.6	0.621 NS
HCO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	95.6 \pm 57.9	99.7 \pm 106.4	0.146 NS
Cation, $\mu\text{eq L}^{-1}$	422.1 \pm 126.7	389.8 \pm 164.6	0.245 NS
Anion, $\mu\text{eq L}^{-1}$	471.0 \pm 151.1	423.0 \pm 193.4	0.331 NS

表4. 文山林場酸性沈降與非酸性沈降之30 cm深土壤水的水化學

Table 4. Water chemistry of soil solution at 30 cm depth for acid precipitation and non-acid precipitation categories in the Wenshan Forest Station.

	酸性沈降	非酸性沈降	p值
Conductivity, $\mu\text{S cm}^{-1}$	47.6 \pm 11.4	39.8 \pm 10.7	0.957 NS
SS, mg L^{-1}	5.6 \pm 2.8	4.6 \pm 3.2	0.721 NS
pH	5.7 \pm 0.4	5.7 \pm 0.4	0.795 NS
Na^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	77.4 \pm 52.8	57.4 \pm 45.1	0.643 NS
NH_4^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	11.7 \pm 20.4	16.1 \pm 21.3	0.185 NS
K^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	42.3 \pm 17.8	40.0 \pm 18.5	0.792 NS
Ca^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	205.9 \pm 147.5	185.7 \pm 175.1	0.813 NS
Mg^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	83.7 \pm 22.4	68.4 \pm 20.9	0.961 NS
F^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	1.9 \pm 1.8	1.4 \pm 0.5	0.030 *
Cl^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	98.0 \pm 37.6	85.6 \pm 40.5	0.568 NS
NO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	109.7 \pm 56.1	88.1 \pm 63.1	0.527 NS
SO_4^{2-} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	78.9 \pm 12.6	76.9 \pm 12.6	0.729 NS
HCO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	153.1 \pm 134.1	139.1 \pm 153.8	0.577 NS
Cation, $\mu\text{eq L}^{-1}$	424.3 \pm 137.3	371.2 \pm 197.2	0.317 NS
Anion, $\mu\text{eq L}^{-1}$	442.0 \pm 137.1	391.3 \pm 195.5	0.241 NS

表5. 文山林場酸性沈降與非酸性沈降之60 cm深土壤水的水化學

Table 5. Water chemistry of soil solution at 60 cm depth for acid precipitation and non-acid precipitation categories in the Wenshan Forest Station.

	酸性沈降	非酸性沈降	p值
Conductivity, $\mu\text{S cm}^{-1}$	48.7 \pm 9.0	47.3 \pm 15.2	0.100 NS
SS, mg L^{-1}	4.1 \pm 2.0	3.4 \pm 2.6	0.400 NS
pH	5.5 \pm 0.4	5.6 \pm 0.6	0.308 NS
Na^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	78.5 \pm 54.0	60.4 \pm 49.5	0.847 NS
NH_4^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	16.6 \pm 25.1	19.0 \pm 23.4	0.990 NS
K^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	45.2 \pm 13.9	48.1 \pm 31.0	0.289 NS
Ca^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	150.7 \pm 79.6	197.6 \pm 202.1	0.020 *
Mg^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	78.8 \pm 19.2	64.7 \pm 22.0	0.918 NS
F^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	1.5 \pm 0.6	1.3 \pm 0.3	0.150 NS
Cl^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	114.5 \pm 50.0	94.7 \pm 42.6	0.182 NS
NO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	88.0 \pm 48.4	73.7 \pm 65.4	0.490 NS
SO_4^{2-} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	92.5 \pm 16.3	95.3 \pm 18.1	0.907 NS
HCO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	117.2 \pm 83.0	168.1 \pm 236.4	0.014 *
Cation, $\mu\text{eq L}^{-1}$	375.4 \pm 95.1	395.6 \pm 228.2	0.021 *
Anion, $\mu\text{eq L}^{-1}$	413.9 \pm 104.7	433.2 \pm 246.2	0.022 *

表6. 文山林場酸性沈降與非酸性沈降之溪水的水化學

Table 6. Water chemistry of streamwater for acid precipitation and non-acid precipitation categories in the Wenshan Forest Station.

	酸性沈降	非酸性沈降	p值
Conductivity, $\mu\text{S cm}^{-1}$	65.4 \pm 10.2	66.0 \pm 20.0	0.094 NS
SS, mg L^{-1}	5.4 \pm 2.6	5.2 \pm 5.0	0.104 NS
pH	6.9 \pm 0.7	7.1 \pm 1.0	0.859 NS
Na^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	126.4 \pm 85.3	110.9 \pm 101.3	0.266 NS
NH_4^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	41.3 \pm 68.1	43.3 \pm 60.6	0.062 NS
K^+ , $\mu\text{eq L}^{-1}$	12.2 \pm 4.8	19.9 \pm 37.0	0.138 NS
Ca^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	257.5 \pm 103.9	273.3 \pm 76.3	0.072 NS
Mg^{2+} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	170.2 \pm 35.7	184.2 \pm 72.2	0.031 *
F^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	1.9 \pm 0.3	1.8 \pm 0.4	0.252 NS
Cl^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	105.5 \pm 5.0	96.4 \pm 28.7	0.028 *
NO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	49.2 \pm 7.2	40.5 \pm 17.6	0.016 *
SO_4^{2-} , $\mu\text{eq L}^{-1}$	132.3 \pm 27.6	133.3 \pm 50.0	0.063 NS
HCO_3^- , $\mu\text{eq L}^{-1}$	301.7 \pm 98.3	322.5 \pm 96.0	0.931 NS
Cation, $\mu\text{eq L}^{-1}$	608.3 \pm 127.9	638.0 \pm 157.4	0.548 NS
Anion, $\mu\text{eq L}^{-1}$	591.1 \pm 113.3	595.7 \pm 162.1	0.248 NS

之差異，主要可能源自流量及大氣沈降的不同所致，由於本次試驗並未測定流量，故其間的相關性有待收集更多資料來加以驗證。

不論酸性沈降或非酸性沈降下之溪流水，其離子組成皆與60cm深的土壤水相似(如圖3和4)，陽離子皆以 Ca^{2+} 之濃度最高、 Mg^{2+} 次之，再其次為 Na^+ ；陰離子亦以 HCO_3^- 之濃度最高，其次為 SO_4^{2-} ，再其次為 Cl^- 。由於溪流水的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 含量遠大於林外雨，一般推測大部分是由岩石風化而來(鍾欣芸等，2008)，溪流中 SO_4^{2-} 的來源除了雨水外，另一重要來源可能是含硫化鐵岩石風化作用所產生(Hornbeck *et al.*, 1997)，或是來自土壤有機硫貯積的釋出(Houle and Carignan, 1995)，在垂直流經森林生態系的過程中，常與 Ca^{2+} 以硫酸鈣鹽流到溪流中，因此也提高 Ca^{2+} 在溪流水中的濃度，間接證明森林集水區對酸沈降的緩衝效能。此外， HCO_3^- 對溪水呈鹼性有極大的貢獻，在森林集水區土壤的風化過程亦會產生大量的 HCO_3^- ，故 HCO_3^- 可以做為溪流水的酸中和能力和地區性土壤礦物風化程度的指標。若根據Sharpe *et al.* (1984)曾定義地面水的 HCO_3^- 濃度若小於 $200 \mu\text{eq L}^{-1}$ 為酸沈降敏感區域，而本研究中溪水之 HCO_3^- 濃度已超過 $300 \mu\text{eq L}^{-1}$ ，表此區對酸沈降尚有緩衝之能力。

若比較總陰、陽離子在此森林的輸入和輸出的濃度，林外雨的總陽離子和總陰離子的輸入在非酸性沈降下明顯大於酸性沈降，但穿落水、15和30 cm深土壤水及溪水在兩沈降間皆無明顯差異(僅60 cm深土壤水亦以非酸性沈降的濃度較高)，此再次證明酸性沈降並未造成此森林生態系養分的輸出增加，亦即此森林生態系對酸雨尚有極大的緩衝潛能。

四、結論

由上述結果顯示，此區60 cm深土壤水及溪流水的水化學性質與沈降的水化學性質有很大的相關性，此外，本區的酸性沈降雖含有致酸物質 SO_4^{2-} 和 NO_3^- ，但因其亦含有高濃度的鹼

性離子(如 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^-)，使得酸度對此林場的影響並不嚴重，加上穿落水及表層土壤水在二種沈降間並無明顯差異，顯示此森林生態系(尤其是森林冠層)對酸性沈降尚有極大的緩衝效能。雖然短期內酸性沈降並未造成此區總養分的輸出濃度增加，但如長期在酸雨的威脅下，情況又會如何？仍有待長期的監測和研究方能有定論。

五、引用文獻

- 金恆鏞、黃良鑫(1983)酸性降水對森林生態系之影響。中華林學季刊16(1)：79-90。
- 金恆鏞(1987)台北市連續六年來的雨水性質。第四屆空氣污染控制技術研討會論文集。P. 155-173。
- 金恆鏞、劉瓊霏、夏禹九、黃正良(2003)福山天然闊葉林生態系對降水水化學的交互作用。臺灣林業科學 18(4)：363-373。
- 高清(1996)酸雨破壞森林原因之探討。農政與農情 49：44-47。
- 孫岩章、吳瑞鈺(1980)台灣地區的酸雨。科學發展月刊 8(5)：420-434。
- 黃正良、陳明杰、曹崇銘、廖學誠、黃志堅、傅昭憲(2012)蓮華池試驗集水區杉木人工林及天然闊葉林水化學之比較研究。中華林學季刊 45(1)：67-80。
- 劉禎祺(1999)酸雨對環境生態的影響。科學農業 47：186-190。
- 陸象豫、劉瓊霏(2010)影響溪流水水化學的因子。林業研究專訊 17(4)：64-66。
- 劉曉華(2010)酸雨的形成及對環境的危害。赤峰學院學報(自然科學版) 26(5)：96-97。
- 劉瓊霏(2000)雨水流經關刀溪三種林分水化學的變化。國立中興大學森林系研究所博士論文。
- 鄭福田(1992)台灣地區酸性沈降物之調查研究。環保署研究報告。
- 鍾欣芸、林鴻忠、王秋嫻、劉瓊霏(2008)苗圃育苗作業對水化學的影響。中華林學季刊

- 41(2) : 199-209。
- APHA (1995) Standard methods for the examination of water and wastewater. A.D. Eaton, L. S. Clesceri, and A. E. Greenberg, eds. 19th edition. United Book Press, Baltimore, MD.
- Cronan C. S. and Reiners W. A. (1983) Canopy processing of acidic precipitation by coniferous and hardwood forests in New England. *Oecologia* (Berlin) 59: 216-223.
- Hornbeck, J. W., Bailey, S. W., Buso, D. C. and Shanley, J. B. (1997) Stream chemistry and nutrient budgets for forested watershed in New England: variability and management implications. *Forest Ecology and Management* 93: 73-89.
- Houle, D. and Carignan, R. (1995) Role of SO₄ adsorption and desorption in the long-term S budget of a coniferous catchment on the Canadian Shield. *Biogeochemistry* 28: 161-182.
- Johnson, D. W., Cole, D. W., Gessel, S. P., Singer, M. J., and Minden, R. V. (1977) Carbonic acid leaching in a tropical, temperate, subalpine, northern forest soil. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 9: 329-343.
- Johnson, D. W., Van Miegroet, H., Lindberg, S. E., Todd, D. E., and Harrison, R. B. (1991) Nutrient cycling in red spruce forests in the Great Smoky Mountains. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 769-787.
- Johnson, D. W. and Lindberg, S. E. (1992) *Atmospheric Deposition and Forest Nutrient Cycling*. Springer, New York.
- Lovett, G. M. and Linberg, S. E. (1984) Dry deposition and canopy exchange in a mixed oak forest as determined by analysis of throughfall. *Journal of Applied Ecology* 21: 1013-1027.
- King H. B., Hsia Y. J., Liu C. P., Lin T. C., Wang L. J., Hwong J. L. (1994) Chemistry of precipitation, throughfall, stemflow and streamwater of six forest sites in Taiwan. In: Peng C. I., Chou C. H., editors. *Proceeding of the International Symposium on Biodiversity and Terrestrial Ecosystems*, Taipei, Taiwan, ROC. Institute of Botany: Academia Sinica P. 355-362.
- Lin, N. H., Lee C. T., Chan C. C., Lin W. L., Chang M. B., Hsu, W. C., Hong C. A., King H. B., Hsia, Y. J. (2000) A preliminary analysis of chemical characteristics of atmospheric pollutants and their deposition budget on the Fu-Shan forest in Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean Science* 11(2): 481-500.
- Liu, C. P. and Sheu, B. H. (1999) Distribution and chemical characteristics of nutrients in throughfall and stemflow of three different stands. *Quarterly Journal of Forest Research* 21(2): 51-59.
- Liu C. P. and Sheu B. H. (2003) Dissolved organic carbon in precipitation, throughfall, stemflow, soil solution, and stream water at Guandaoshi subtropical forest in Taiwan. *Forest Ecology and Management* 172: 315-325.
- Neary, A. J., and W. I. Gizyn (1994) Throughfall and stemflow chemistry under deciduous and coniferous forest canopies in south-central Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 1089-1100.
- Sharpe, W. E., D. R. DeWalle, R. T. Liebfried, R. S. Dinicola, W. G. Kimmel and L. S. Sherwin (1984) Causes of acidification of four streams on Laurel Hill in southwestern Pennsylvania. *Journal of Environmental Quality* 13: 619-31.