

臺灣中部山區降雨水質及酸性沉降

薛美莉

行政院農業委員會特有生物研究保育中心 南投縣集集鎮民生東路1號

摘要

本研究從1998年2月至1999年5月於臺灣中部烏石坑試驗站(海拔1,000m)收集降雨並分析其水質。發現雨水pH值之加權平均為5.04，最高為6.93，最低為3.78(1998年2月)，全年雨水pH值低於5.6的頻率為86%，低於5.0為40%，低於4.2為26.7%。春夏雨水pH值最低，而冬季最高。雨水各離子當量濃度，陽離子依序為 $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ；陰離子依序為 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 。雨水pH值與 NH_4^+ 、 F^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 當量濃度有顯著負相關，尤其是 NO_3^- 與 SO_4^{2-} 最顯著，顯示 NO_3^- 與 SO_4^{2-} 是烏石坑雨水pH值降低之主要因素。與雨水酸化最有關的 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 沉降量分別為24.11及31.13 kg/ha/year。長期而言，氮、硫的沉降量對於烏石坑地區生態影響是值得注意的問題。

關鍵詞：降水化學、酸沉降、臺灣中部

收件日期：1999年11月8日

接受日期：2000年1月11日

緒言

酸雨 (acid rain) 此名詞自1872年Robert Angus Smith 提出以來，已成為世界所共同關注的議題 (Wellburn 1988)。一般未經污染的雨水，由於大氣中的二氧化碳溶於水中形成弱酸性碳酸，部分解離成碳酸氫根及氫離子，故雨水是酸性而其pH值可低到5.6。當雨水的pH值低於5.6，則稱為酸性降水 (acid precipitation) (Kennedy 1986; Wellburn 1988)。但是大氣自然循環中也會釋放硫化氫 (H_2S)、硝酸根 (NO_3^-) 及氨 (NH_3) 等物質，因此若無人為因素干擾，自然雨水之pH值亦可能降至5.0左右 (金與黃 1983; Wellburn 1988; 陳與柯 1990)，因此所謂酸雨有pH值5.6及5.0之兩種界定值 (袁 1986; 程 1996)。

酸雨對植物會造成角質層破壞和枝葉枯萎等直接影響 (Keller 1983; Kennedy 1986; Parker 1990)，更由於酸性物質沉降量增加，引起離子循環不平衡、土壤陽基離子流失、降低土壤緩衝能力、影響植物營養吸收及森林的衰退等連鎖反應 (Lucier and Haines 1990; Essmann and Zimmermann 1991; Austin and Vitousek 1998)，並造成湖泊、河流域環境酸化及重金屬累積，進而危害整個水域生物，對生態系造成嚴重且連續性的衝擊 (Wright *et al.* 1975; Kennedy 1986; 金 1988; 陳與洪 1991)。

近來酸沉降 (acid deposition) 對生態系所造成的危害逐漸顯現，對硫、氮及氫離子等致酸物質之沉降量在生態系中收支情形及所能承載量是重要的議題 (Binkley *et al.* 1989; Chadwick and Kuylenstierna 1991)。在臺灣對

森林生態系所進行之酸沉降研究已有十年以上(林等 1998)，長期研究區域分布在北、中、南之林區。烏石坑試驗站是臺灣少數保有中低海拔森林原始林相之地區，因此本研究主要分析烏石坑地區之降雨化學及各種離子透過雨水輸入量(flux)，尤其是硫、氮的沉降量。

材料與方法

一、試驗地概述

本研究試驗地位於臺中縣和平鄉自由村烏石坑(北緯 $24^{\circ}18'$ ，東經 $120^{\circ}55'$ ，圖1)，為行政院農業委員會特有生物研究保育中心低海拔試驗站範圍內。區內海拔由650m至1,834m之山椒山(Mt. Shan-chiao)山頂，地形由東南向西北遞降，主要河川有西界之烏石坑溪(Wushyrkeng Creek)及東界之乾溪(Kan Creek)，兩溪於北方合流匯入大安溪。

根據中央氣象局雙崎測候站1995-1997年之氣象資料，本區因位處山區受山勢阻擋其風勢較弱，全年平均風速為0.5 km/hr。年平均氣溫為 20.0°C ，7月分最高(24.7°C)，1月分(13.4°C)最低。全年雨量為2,509 mm，雨季及乾季區別明顯，4月到8月為雨季，其降雨量占全年之83%，10月至翌年1月為乾季，其月降雨量低於60 mm。在氣候分類上本區屬臺灣典型之夏雨型氣候(Su 1984)。區內植被可分為草生地、造林地、次生林及原始林等植物群落，天然林之植群型可分為山香圓-白匏子、長葉木薑子-江某、錐果櫟-台灣杜鵑三種林型(賴與林 1997)。

二、雨水取樣與化學分析

雨水收集由1998年2月1日起至1999年5月31日止，以每一場雨(event)為採樣單位。雨水的採樣器設置於烏石坑試驗站之氣象站周圍，共設置3組雨水收集器。每組有直徑19

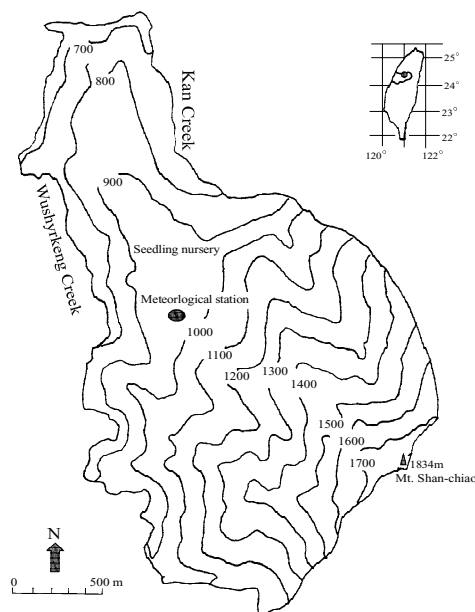


圖1. 研究樣區及雨水採樣站。

Fig. 1. The study area and rainfall sampling station (solid circle) (lines with numbers, elevations in meter).

cm之塑膠漏斗(TPX材質)3個，以水管接至25,000 ml容量之塑膠筒(HDPE材質)，由於漏斗為常年開口，因此收集物為乾沉降及濕沉降混合之混沉降(bulk precipitation)。每次採樣同時量測收集筒中的雨水，換算為降雨量。雨水現場採樣後於當地測定電導度及pH值，電導度以電導度計(WTW LF537)測定，pH值以玻璃電極(WTW pH95)測定，然後雨水樣品立即冷藏儘速攜回實驗室。在實驗室雨水樣品以 $0.45\ \mu\text{m}$ 之濾膜過濾後以離子分析儀(DIONEX 100)測定，其中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 以陽離子管柱測定， F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 以陰離子管柱測定。 HCO_3^- 的測定以 $0.01\ \text{N}\ \text{H}_2\text{SO}_4$ 滴定水樣至pH值為4.52為止，水樣pH值低於4.60以下者，則不滴定。各種離子濃度以mg/l及將其換算為離子

當量濃度(microequivalent concentration, $\mu\text{eq/l}$)來表示。每次採樣雨水分析值與其雨量換算為容積加權平均值(volume weighted mean)。年輸入量(annual flux)則由1998年2月至1999年1月底之總雨量再與各離子濃度計算。

雨水pH值之季節性差異採用變異數分析(analysis of variance), 並以鄧肯分析(Duncan's multiple range test)檢測其變異是否顯著。雨水各成分之相關性採用皮爾森相關強度分析(Pearson correlation analysis)。

結果

一、雨量與降水型態

自1998年2月至1999年5月底止共收集30場雨水88個樣品(其中第一次及第二次只取2個樣品, 以後為3個樣品), 各月分之雨量詳如圖2。烏石坑地區降水高峰期分別為2月到3月之春雨期、5月至6月之梅雨期(降水量高達400 mm)和夏秋之際因太平洋高壓氣團所形成地形雨及颱風過境所引發強盛西南氣流所帶來的降雨。自11月起進入乾季, 其間每月降雨量低於80 mm, 一直到翌年的三月分春雨開始雨量漸增。1998年全年降雨量為2,295 mm, 若與前三年(1995-1997年)平均2,509 mm 相較, 本年度之雨量略為偏低, 然而2月及3月分雨量較以往三年的平均值高出二倍。

二、雨水pH值之季節變化

烏石坑地區不同季節雨水pH值與酸雨出現之頻率列於表1。以整體而言, 烏石坑地區雨水pH值之加權平均為5.04, 最高6.93, 最低3.78。若以pH值5.6及5.0以下之兩種值界定酸雨及低於4.6為嚴重污染(程 1996), 烏石坑地區之雨水pH值低於5.0的頻率為40%, 也就是說每年在本區所下的雨中每100次有40次為酸雨, 若用pH5.6為酸雨的標準值則高達86%。

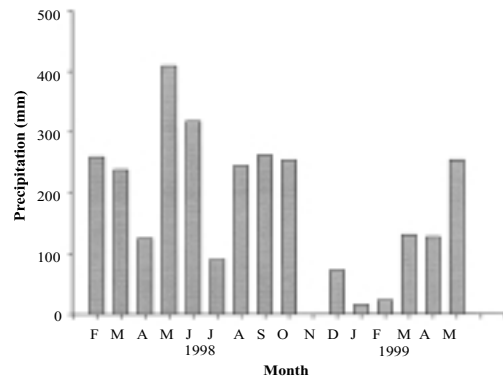


圖2. 烏石坑地區調查時期之月雨量, 由1998年2月至1999年5月。

Fig. 2. Monthly variation in precipitation in the Wushykeng area, February 1998 to May 1999.

雨水pH值低於4.6的比率達26.7%, 顯示在烏石坑地區的降雨有部分時間受到嚴重的污染。最酸雨水出現在1998年2月4日pH值為3.78。在1998年9月29日楊恩颱風來襲時其雨水pH值6.93為最高。

雨水pH值之季節變化為在春季(3月到5月)、夏季(6月至8月)兩季較低, 酸雨之頻率亦較高, 冬季(12月至2月)、秋季(9月至11月)兩季pH值較高, 分別為5.45及5.86。冬季降雨pH值低於5.0的機率為0。將1998年2月之雨水pH值資料去除, 再進行變異數分析, 結果顯示春季與秋、冬兩季均有顯著差異($P < 0.05$), 然與夏季無顯著差異, 而夏季則只與冬季有顯著差異, 秋季與冬季無顯著之差異(表1)。

三、雨水pH值及主要離子濃度之月變化

雨水pH值及各種離子濃度之月變化詳如圖3。由圖3中可見烏石坑地區之雨水pH值由1998年12月至翌年2月有一高峰期, 而9月則因颱風雨亦使pH值升高, HCO_3^- 的濃度變化與pH值一致。主要陽離子 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 以1999年

表1. 烏石坑地區雨水(混沉降)pH值之季節變化

Table 1. Frequency and seasonal variation in pH values of rainfalls (bulk precipitation) in the Wushyrkeng area, February 1998 to May 1999

| | Mean \pm SD ^{2/} | Range | pH<5.6 (%) | pH<5.0 (%) | pH<4.6 (%) | Sample Size |
|----------------------|-------------------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| Winter ^{1/} | 4.92 \pm 0.65 | 3.78-6.00 | 80 | 70 | 50 | 10 |
| Spring | 4.75 ^c \pm 0.47 | 4.21-5.73 | 94 | 72 | 50 | 18 |
| Summer | 5.12 ^{bc} \pm 0.53 | 4.27-5.87 | 80 | 33 | 20 | 15 |
| Autumn | 5.45 ^{ab} \pm 0.81 | 4.39-6.93 | 67 | 33 | 20 | 15 |
| Winter | 5.86 ^a \pm 0.51 | 5.04-6.45 | 22 | 0 | 0 | 9 |
| Spring | 4.99 ^c \pm 0.65 | 3.89-6.34 | 81 | 57 | 14 | 21 |
| Total | 5.04 | 3.78-6.93 | 86 | 40 | 27 | 88 |

^{1/} February 1998.

^{2/} Different letters (a-c) between seasons indicate significant difference at 5% level ($p < 0.05$).

表2. 烏石坑地區降雨化學成分之容積加權平均、全距及輸入量, 1998年2月至1999年5月

Table 2. Volume weighted means and ranges of chemical components of rainfalls and their annual fluxes in the Wushyrkeng area, February 1998 to May 1999

| | Concentration | | Concentration | | Flux kg/ha/year |
|-------------------------------|---------------|-------------|--------------------|--------------|--------------------|
| | mg/l Mean | Range | μ eq/l Mean | Range | |
| H ⁺ | 0.01 | 0.0001-0.17 | 9.05 | 0.116-164.63 | 0.39 |
| Na ⁺ | 0.23 | 0.03-3.62 | 9.68 | 1.16-155.70 | 2.67 |
| NH ₄ ⁺ | 0.46 | 0.00-2.48 | 27.30 | 0.00-137.17 | 7.61 |
| K ⁺ | 0.14 | 0.00-1.26 | 3.59 | 0.00-31.60 | 2.34 |
| Mg ²⁺ | 0.16 | 0.00-2.10 | 13.45 | 0.00-171.95 | 2.57 |
| Ca ²⁺ | 1.08 | 0.00-16.39 | 52.92 | 0.00-803.20 | 15.52 |
| F ⁻ | 0.18 | 0.00-5.69 | 9.42 | 0.00-295.62 | 4.61 |
| Cl ⁻ | 0.64 | 0.00-2.94 | 17.85 | 0.00-82.40 | 12.32 |
| NO ₃ ⁻ | 1.40 | 0.00-7.97 | 22.42 | 0.00-127.57 | 24.11 |
| SO ₄ ²⁻ | 1.79 | 0.00-11.99 | 35.74 | 0.00-239.84 | 31.13 |
| HCO ₃ ⁻ | 1.49 | 0.00-19.71 | 22.92 | 0.00-315.31 | 31.90 |

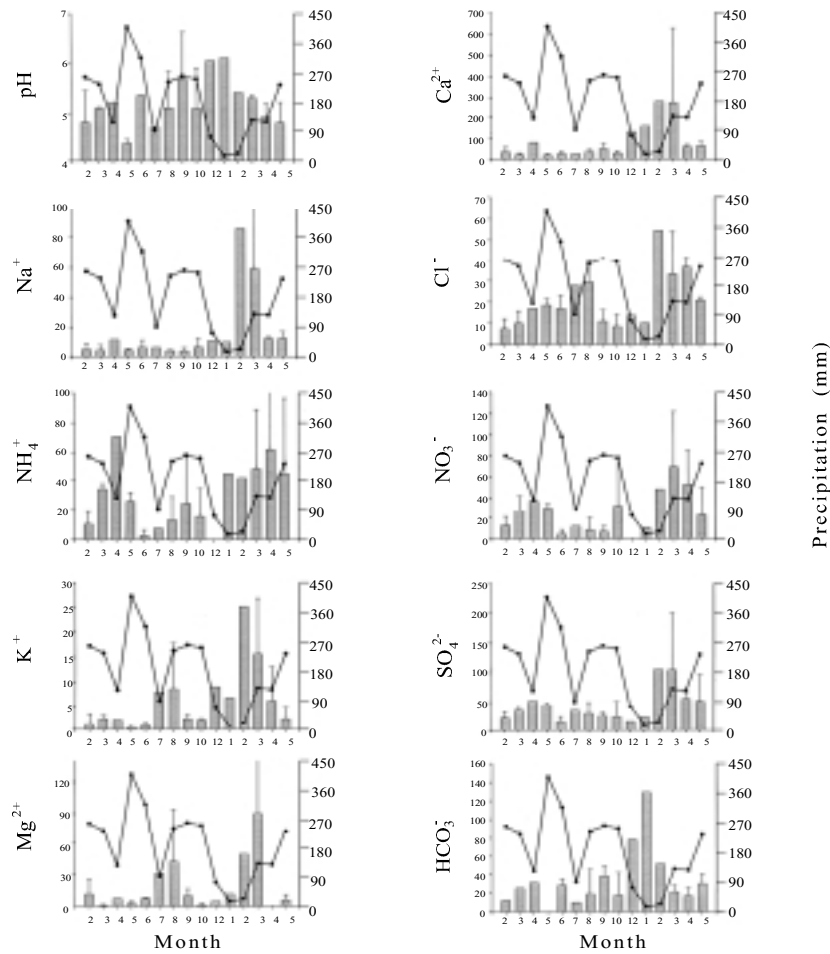


圖3. 烏石坑地區降雨pH值及離子當量濃度之月變化，由1998年2月至1999年5月。

Fig. 3. Monthly variation in pH values and chemical components ($\mu\text{eq/l}$) of rainfalls in the Wushyrkeng area, February 1998 to May 1999.

2月及3月最高， NH_4^+ 則在1998及1999年的4月分各有一高峰期， Cl^- 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 的當量離子濃度以1999年之2月至4月最高。由於所蒐集之監測資料只有16個月，目前在月變化上尚無明顯之趨勢。

四、雨水化學成分及營養鹽輸入

烏石坑地區中降水之化學成分詳如表2，陽離子以 Ca^{2+} 之當量濃度最高，而後依序為 $\text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ 。陰離子的濃度依序為 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ 。營養鹽的輸入在陽離子以 Ca^{2+}

輸入量15.52 kg/ha/year為最高， NH_4^+ 為7.61 kg/ha/year次之；陰離子輸入量多於20 kg/ha/year者的有 HCO_3^- (31.90 kg/ha/year)、 SO_4^{2-} (31.13 kg/ha/year)及 NO_3^- (24.11 kg/ha/year)。

五、雨水成分間之關係

表3是烏石坑雨水pH值、電導度與各種離子當量濃度之相關矩陣表。因電導度代表離子之總量與pH值為負相關，但除 Mg^{2+} 外與各種離子間都有顯著正相關，其中與 Ca^{2+} 、 NH_4^+

表3. 雨水化學成分之相關矩陣表

Table 3. A correlation matrix for chemical components of rainfalls in the Wushyrkeng area, February 1998 to May 1999

| | CD (1) | pH (2) | Na ⁺ (3) | NH ₄ ⁺ (4) | K ⁺ (5) | Mg ²⁺ (6) | Ca ²⁺ (7) | F ⁻ (8) | Cl ⁻ (9) | NO ₃ ⁻ (10) | SO ₄ ²⁻ (11) | HC ₃ O ⁻ (12) |
|------|-----------|-----------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--|
| (1) | 1.000 | | | | | | | | | | | |
| (2) | -0.243* | 1.000 | | | | | | | | | | |
| (3) | 0.392** | -0.017 | 1.000 | | | | | | | | | |
| (4) | 0.501** | -0.220* | 0.299** | 1.000 | | | | | | | | |
| (5) | 0.333** | 0.262* | 0.740** | 0.111 | 1.000 | | | | | | | |
| (6) | 0.110 | 0.025 | 0.759** | 0.126 | 0.584** | 1.000 | | | | | | |
| (7) | 0.450** | 0.240* | 0.756** | 0.236* | 0.622** | 0.738** | 1.000 | | | | | |
| (8) | 0.259* | -0.255* | 0.094 | -0.059 | 0.057 | 0.118 | 0.086 | 1.000 | | | | |
| (9) | 0.358** | -0.150 | 0.613** | 0.294** | 0.515** | 0.527** | 0.485** | 0.021 | 1.000 | | | |
| (10) | 0.519** | -0.386** | 0.629** | 0.651** | 0.295** | 0.459** | 0.428** | 0.041 | 0.514** | 1.000 | | |
| (11) | 0.567** | -0.278** | 0.813** | 0.550** | 0.513** | 0.684** | 0.734** | 0.100 | 0.604** | 0.821** | 1.000 | |
| (12) | 0.304** | 0.611** | -0.037 | -0.059 | 0.168 | -0.038 | 0.424 | 0.053 | -0.019 | -0.332** | -0.138 | 1.000 |

* Significance at 5% level (P<0.05).

** Significance at 1% level (P<0.01).

、NO₃⁻、SO₄²⁻的相關係數達0.45以上。pH值與NH₄⁺、F⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻有顯著負相關，其中以NO₃⁻的相關係數最高，SO₄²⁻的相關係數次之，顯示在烏石坑地區此兩種離子是雨水pH值降低的主要因子。K⁺、Ca²⁺及HCO₃⁻則與pH值呈顯著正相關，其中以HCO₃⁻的相關係數最高。由於HCO₃⁻是鹼度的主要因子，當水中HCO₃⁻濃度高時可與雨水中之酸性物質中和，因此對pH值有很大的影響。陽離子中K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺間均有極顯著的相關性，表示其為同一來源。NH₄⁺與其他陽離子的相關性不高，但與NO₃⁻、SO₄²⁻的相關係數達0.55以上。NO₃⁻、SO₄²⁻與其它離子除了F⁻以外均呈顯著相關，其中NO₃⁻與SO₄²⁻間的相關係數高達0.82，表示兩者間有密切的關係。

討論

一、雨水pH值之空間及季節變化

酸雨的形成，除受大氣中污染物種類及濃度的影響，氣象及地形條件也是重要因素 (Lucier and Haines 1990; King *et al.* 1994)。由臺灣整體而言，北部地區之雨水因雨水中Ca²⁺及Mg²⁺離子濃度偏低，雨水較南部偏酸 (陳與柯 1990)。雨水pH值以臺北、高雄兩大都會最低，在竹東及蘇澳則因石灰岩礦之開採，雨水pH值有偏高之趨勢 (鄭等 1986)。King *et al.* (1994)比較臺灣六個林區發現在北部雨水最酸(平均pH值4.8，最低3.49)，中部酸化程度居中(平均pH值4.9到5.5)，南部及東南部平均pH值6.4。

袁(1986)調查臺灣中部山區，其雨水pH

值低於5.6之機率為38%，此一數據若與本次調查相較，烏石坑地區雨水pH值低於5.6之機率為86%，已提高48%，顯示自1986年至今臺灣中部上空污染的情形更為嚴重。將烏石坑與中部山區數個監測點之資料相較(表4)，除位於最偏僻的畢祿溪外，各個測站雨水pH值均出現過4以下，與烏石坑海拔高接近的關刀溪及溪頭兩處之雨水平均pH值分別為4.42及4.78，顯示在山區雨水亦有嚴重酸化的現象。

就季節性而言，臺灣地區雨水酸化情形在春季最為嚴重，秋季較輕微(袁 1986)。許等(1994)調查溪頭的雨水在3月至9月均屬酸雨之範圍。在大陸閩南地區雨水酸化程度則呈現春季>冬季>夏季>秋季的趨勢(程 1996)。春季雨水酸化嚴重是因為春季日照強、濕度大

造成污染物反應成致酸物質，夏季雖然亦光照強但因降雨較多而稀釋，因此酸化不若春季嚴重。冬季則因雨量少，空氣中懸浮之鹼性物質會消耗雨水的H⁺離子，所以雨水之pH值較高(袁 1986)。陳與柯(1995)認為臺灣之空氣受到長距離傳輸的影響，因此春季雨水酸化嚴重可能與大陸華南酸性物質之傳送有關。陳與柯(1990)將臺灣地區的降水系統分為七類，其中以春季鋒面雨、夏季陣雨、梅雨三種最酸，秋、冬鋒面、颱風雨及高壓迴流較不酸(雨水pH值>5.0)。颱風源於海洋，因此颱風降水會挾帶大量鹽類，使雨水較鹼；位於西太平洋的斐濟及印度之雨水監測亦發現因氣旋風(cyclone)及季風(monsoon)帶來大量的無機鹽，使雨水之pH值增高(Khemani *et al.* 1985; Waterloo *et al.* 1997)。

表4. 烏石坑與各地雨水化學性質之比較表

Table 4. A comparison of conductivity (CD, $\mu\text{S}/\text{cm}$), pH and ionic concentrations ($\mu\text{eq}/\text{l}$) of precipitation in the Wushyrkeng area with those from other areas of central Taiwan, Kaoshiung city, Taiwan average, Puerto Rican rainforest and Eastern Amazonia

| | central Taiwan | | | | Kaoshiung city | Taiwan average | Puerto Rican rainforest | Eastern Amazonia | |
|-------------------------------|----------------|------------|---------------------------|---------------------------|----------------|----------------|-------------------------|------------------|-------------------------------|
| | Wushyrkeng | Guandaushi | Piluchi | Lienhauchi | | | | | |
| | (This study) | (劉與許 1999) | (King <i>et al.</i> 1994) | (King <i>et al.</i> 1994) | (陳與柯 1990) | (陳與柯 1990) | (袁 1986) | (McDowell 1998) | (Holscher <i>et al.</i> 1998) |
| CD | 15.06 | 17.62 | 24.80 | 27.30 | -- | -- | -- | -- | -- |
| pH | 5.04 | 4.42 | 6.41 | 5.51 | 4.86 | 4.69 | 4.91 | -- | 5.03 |
| H ⁺ | 7.52 | 37.50 | 0.39 | 3.07 | -- | 20.50 | 12.23 | 5.00 | 9.25 |
| Na ⁺ | 9.68 | 7.60 | 18.06 | 21.07 | 53.10 | 73.30 | 85.27 | 78.70 | 44.29 |
| NH ₄ ⁺ | 27.30 | 15.50 | 33.79 | 40.44 | 41.40 | 33.70 | 35.86 | 1.40 | -- |
| K ⁺ | 3.59 | 2.40 | 56.50 | 37.50 | 8.15 | 8.74 | 9.09 | 3.40 | 3.25 |
| Mg ²⁺ | 13.45 | 4.30 | 8.20 | 9.84 | 16.30 | 28.20 | 35.04 | 20.10 | 12.30 |
| Ca ²⁺ | 52.92 | 18.10 | 38.22 | 46.06 | 111.30 | 68.40 | 64.54 | 18.60 | 11.27 |
| F ⁻ | 9.42 | 10.60 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| Cl ⁻ | 17.85 | 14.30 | 63.84 | 47.04 | 49.10 | 56.10 | 76.60 | 97.00 | 61.04 |
| NO ₃ ⁻ | 22.42 | 15.20 | 9.28 | 29.76 | 30.60 | 14.40 | 11.52 | 2.40 | -- |
| SO ₄ ²⁻ | 35.74 | 32.40 | 28.80 | 61.40 | 141.24 | 72.90 | 57.63 | -- | 5.00 |
| HCO ₃ ⁻ | 22.92 | 2.80 | 106.88 | 24.16 | -- | -- | -- | -- | -- |
| Sampling period | 1998-1999 | 1996-1997 | 1991-1993 | 1990-1993 | -- | -- | 1984/1987 | 1984/1985 | 1992-1993 |
| Elevation (m) | 1000 | 1100-1700 | 2350 | 760 | -- | -- | -- | -- | -- |

烏石坑地區雨水酸化程度則出現春季>夏季>秋季>冬季之趨勢(表1)；在春季酸雨頻率最高，冬季降雨之pH值<5.0的機率為零，春季的雨水pH值與秋、冬兩季有顯著差異。在調查期間雨水最高pH值為6.93，出現在1998年9月底楊恩颱風來襲之時，與上述之研究結果極為符合。

二、雨水成分與營養鹽輸入

臺灣位處亞熱帶且雨量豐沛，因此透過雨水輸入的養分是陸地生態系重要來源。降水中營養鹽的來源可分為海洋及非海洋(陸域及人類污染)，其中來自海洋的包括 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 等；來自陸域的有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 及 SO_4^{2-} 等(Hewitt and Davidson 1991; Mamane and Gottlieb 1991; Ovalle and Filho 1991; Waterloo *et al.* 1997; Wellburn 1988)。李與羅(1991)認為在臺灣南部雨水污染源之貢獻量百分比為海水飛沫與塵土39.9%、農業活動23.9%、酸因子9.1%及未鑑定27.1%。在各種營養鹽中以 Na^+ 及 Cl^- 受海洋之影響最大，但 Cl^- 會受到人類工業活動而改變，因此可以由雨水中 Na^+ 的含量來評估雨水之化學元素來自海洋的比率(Ovalle and Filho 1991)。鄭等(1987)調查臺灣地區之雨水，發現雨水中 Na^+ 及 Cl^- 的濃度與離海距離呈顯著相關，在離海0.5公里的觀測站 Na^+ 及 Cl^- 的濃度即顯著下降，至1公里左右即穩定。金等(1992)調查全臺灣六處試驗林區亦發現海洋飛沫對東北部林區雨水化學性質有顯著影響。雨水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 的主要來源是自然岩石風化及土壤， NH_4^+ 則與農業施肥有密切關係，因此在農業區雨水中 NH_4^+ 之濃度會於春、秋兩季劇增(袁 1986; Wellburn 1988)。

烏石坑地區在雨水中 Na^+ 及 Cl^- 的濃度分別為 $9.67 \mu eq/l$ 及 $17.87 \mu eq/l$ (表2)較臺灣雨水平均值 $85.27 \mu eq/l$ 及 $76.6 \mu eq/l$ (袁 1986)低很多，此乃因烏石坑地區離海較遠，受海洋飛沫之

影響較小。 Ca^{2+} 為雨中濃度最高的陽離子，且 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 之相關性極為顯著，相關係數0.740以上，顯示烏石坑雨水中的陽離子主要是來自岩石風化與陸地塵土。此外，受鄰近苗圃及果園施肥之影響，雨水中 NH_4^+ 的濃度亦頗高。

三、雨水致酸物質之沉降量

酸雨的形成與石化燃料燃燒所產生的二氧化硫及氮氧化物致酸物質排入大氣中有密切相關(Wellburn 1988; Kennedy 1986)，因此在工業發達之城市雨水中 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 濃度較高，占陰離子總量之比例亦隨之增高(鄭等 1987; Japan Environment Agency 1990; Ovalle and Filho 1991; 程 1996)。金(1987)分析臺北市1980年到1986年之雨水，認為雨水中之 H^+ 離子濃度主要受到 SO_4^{2-} 的影響。張等(1991)分析臺北市1980年至1990年之雨水，其pH值與各化學物質濃度之相關係數皆低於0.4，認為雨水pH值受到各種化學物質的綜合影響，而非由單一化學物質所決定。因此酸性沉降對生態環境的影響，應由酸性沉降量來判定，而非僅由降水中pH值的大小而定。而在酸性沉降中以硫酸及硝酸對雨水酸度的影響最大(Kennedy 1986)。

在巴西調查發現從低開發地區亞馬遜原始林至高度開發城市雨水中 NO_3^- 及 SO_4^{2-} 占陰離子之比率由34%增加到93%(Ovalle and Filho 1991)。若雨水中酸度主要是來自 NO_3^- 及 SO_4^{2-} ，依其當量濃度比可以呈現兩者對雨水之重要性(陳與柯 1991)。臺灣地區 SO_4^{2-} 雨水酸度之貢獻為 NO_3^- 之1.6倍到5倍(陳與柯 1995)。烏石坑雨水 SO_4^{2-} 及 NO_3^- 之貢獻比為1.6:1，其比值與臺灣東部的雨水比值接近。

烏石坑地區雨水之 NO_3^- ($22.42 \mu eq/l$)及 SO_4^{2-} ($35.74 \mu eq/l$)分別占陰離子當量濃度總量之20%及33%。而 SO_4^{2-} 的濃度與其它測站比較(表4)，可以看出在中部山區雨水中 SO_4^{2-} 之當

量濃度均低於臺灣的平均值，亦遠低於高雄市之雨水；但 NO_3^- 之當量濃度只較高雄市及蓮花池低。根據臺灣歷年的空氣污染年均值濃度，自1982年到1994年空氣中二氧化硫(SO_2)濃度均維持在0.026 ppm左右，氮氧化物(NO_x)則微呈上升趨勢(程 1996)，此氮氧化物的增加應與公路運輸量之增加有極大的關係。

烏石坑地區每年經由降雨輸入之 H^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 離子的沉降量分別為0.39, 24.11, 31.13 kg/ha/year。同在太平洋區的斐濟每年 NO_3^- (1.9-3.8 kg/ha/year)及 SO_4^{2-} (12-16 kg/ha/year) (Waterloo *et al.* 1997)，二者相較烏石坑的酸性沉降量高出許多。然而各地區對於酸沉降卻因環境條件(如母岩、土壤性質、土地利用及雨量)及生物反應不同，其生態容忍極限值 (critical loads)會有所差異。Carmichael *et al.* (1993)將整個亞洲之硫化物沉降量之生態容忍極限值分為五級，最大上限為2000 eq-S/ha.yr (約32 kg-S/ha/year)，臺灣的中部及東部森林硫沉降量之容忍極限值在3.2到8 kg-S/ha/year。Chadwick and Kuylenstierna (1991)對歐洲酸沉降量之評估，認為當 SO_4^{2-} 的沉降量達到25 kg/ha/year時對淡水魚的族群量會有危害，因此將20 kg/ha/year的 SO_4^{2-} 輸入量設定為生態環境容忍極限，而較敏感的地區只容許10-15 kg/ha/year。烏石坑每年31.13 kg/ha/year的 SO_4^{2-} 沉降量在臺灣雖屬低沉降量，已超過生態環境容忍極限。

雖然 NH_4^+ 及 NO_3^- 等無機氮的沉降短期而言對於森林有施肥效果，但是輸入過量的氮將會使土壤形成氮飽和狀況，造成林地土壤的陽基離子大量釋出、增加有機物分解，使植物生長過速，而引發植物物候及碳分配等一連串改變 (Nillson 1983; Currie *et al.* 1999)。 NH_4^+ 雖然不是造成酸雨的主因，但是過量的 NH_4^+ 沉降至土壤中，因硝化作用產生 H^+ 使土壤pH值下降 (Myrold 1990)，與森林衰退亦有

密切之關係(林等 1998)。Chadwick and Kuylenstierna (1991)曾提及Van Dijk and Roelofs (1988)將N沉降之生態環境容忍極限定為20 kg/ha/year，但是Liljelund and Torstenson (1988)評估不同地區的研究發現當立地中N的沉降量在20 kg/ha/year時對植生的組成有所影響，因此將N沉降之生態環境容忍極限定為15 kg/ha/year，而較敏感的生態系則設定在10 kg/ha/year。烏石坑地區 NO_3^- 及 NH_4^+ 每年的輸入量分別為7.61及24.11 kg/ha/year，無機氮(NO_3^- -N+ NH_4^+ -N)之輸入量為11.35 kg/ha/year，若加上其他氮源，其輸入量亦頗為可觀。長期而言，氮、硫的沉降量對於烏石坑地區生態影響是值得注意的問題。

結 論

本文謹就烏石坑地區一年四個月的降雨資料分析，初步結果顯示烏石坑降雨平均pH值5.02，雖未低於酸雨臨界值(pH值5.0)，但是由每年26%的降雨pH值低於4.6的數據來看，烏石坑地區雖位處山區也受到酸雨的威脅。然而更加值得注意的是因人為污染輸入到區內過量的硫與氮，對於生態系所引發的負面影響。雖然目前烏石坑地區之森林尚無衰退之情形發生，或許是森林本身對酸沉降具有緩衝機制。以長期監測的觀點而言，降雨在流經不同森林及林地，經過淋溶、淋洗、吸收及置換的過程，所產生營養鹽重新分配，則是未來監測之重點。

誌 謝

本文的完成要感謝蔡佳發博士的悉心指正及對文章之校閱。林壯威先生協助野外樣品收集，孔淑梅及劉湘蓮小姐對實驗之協助，均在此一併致謝。

引用文獻

- 李崇德、羅明政。1991。臺灣地區酸性沉降控制策略及酸化綜合評估之研究。行政院環境保護署空氣品質保護及噪音管制處研究計畫成果摘要。EPA-80-F101-09-31。
- 林登秋、金恆鑣、夏禹九、王立志。1998。福山試驗林硫酸根與無機氮沉降之探討。中華林學季刊31(2): 153-164。
- 金恆鑣、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): 79-89。
- 金恆鑣。1987。臺北市連續六年來的雨水性質。第四屆環境污染控制技術研討會論文集 175-191頁。臺灣大學環境工程研究所。
- 金恆鑣。1988。酸雨對水域環境的影響。臺灣植物資源與自然保育研討會論文集 16~4-16~24頁。
- 金恆鑣、漆陞忠、黃正良、薛美莉。1992。酸性沉降物對森林影響之研究大尺度空氣污染調查及防治策略研究。行政院環保署八十一年計畫成果。
- 袁中新。1986。臺灣地區雨水水質特性研究。國立臺灣大學環境工程研究所碩士論文。
- 張裴章、金恆鑣、陳彥璋。1991。臺北市雨水pH值與離子關係。國立臺灣大學農學院研究報告31(4): 88-98。
- 許世宏、魏聰輝、姚榮鼎、陳信雄、郭幸榮、陳明杰。1994。溪頭地區降雨與林內穿落雨的pH值及鹽基離子濃度。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告8(3): 83-97。
- 陳景森、柯文雄。1990。臺灣地區酸性沉降調查評估研究計畫子題(六) 酸性沉降大氣輸送模式之研究期末報告。國立中央大學大氣物理研究所。
- 陳景森、柯文雄。1991。臺灣地區酸性沉降調查評估研究計畫子題(六) 酸性沉降大氣輸送模式之研究。行政院環境保護署空氣品質保護及噪音管制處研究計畫成果摘要。EPA-80-F101-09-30。
- 陳景森、柯文雄。1995。臺灣地區酸雨調查評估與防制之規劃子題(二) 空氣污染區域、跨國輸送與酸雨形成關係之研究。行政院環境保護署。EPA-84-E3F1-09-08。
- 陳鎮東、洪佳章。1991。酸雨對臺灣自然水域酸化及土壤酸化之影響研究--臺灣地區酸性沉降調查評估研究計畫子題(四)。國立中山大學海洋地質研究所。
- 程萬里。1996。酸雨調查及國際合作研究-東亞空氣污染與酸雨之長期演變暨酸雨國際研討會(3)東亞空氣污染與酸雨現況和未來趨勢。行政院環境保護署。EPA-85-1003-09-15。
- 劉瓊霖、許博行。1999。幹流水和穿落水的水量及水質在三種林分的變化。林業研究季刊 21(2): 51-59。
- 鄭福田、蔣本基、杜悅元、袁中新。1986。臺灣地區雨水水質特性研究。第三屆空氣污染控制技術研討會論文專輯 21-34頁。
- 鄭福田、蔣本基、莊東漢、杜悅元、林勝男。1987。臺灣地區酸雨調查研究(三)期末報告。國立臺灣大學環境工程學研究所。
- 賴國祥、林旭宏。1997。烏石坑森林植群型及優勢樹種演替趨勢之探討。中華林學季刊30(3): 257-268。
- Austin, A. T., and P. M. Vitousek. 1998. Nutrient dynamics on a precipitation gradient in Hawai'i. *Oecologia* 113: 519-529
- Binkley, D., C. T. Driscoll, H. L. Allen,

- P. Schoeneberger, and D. McAvoy. 1989. Acid deposition and forest soils: Context and case studies of the southeastern United States. Springer-Verlag, New York.
- Carmichael, G. R., M. Amann, A. Azimi, S. C. Bhattacharya, R. M. Shrestha, M. Chadwick, J. Kuylenstierna, J.P. Hettelingh, L. Hordijk, J. Shah, M. P. Singh, D. Streets, N. Bhatti, and D. Zhao. 1993. Acid rain and emissions reduction in Asia: An international collaborative project on acid rain in Asia. *In: Proceedings of international conference on regional environment and climate changes in East Asia*, Taipei, pp. 328-333.
- Chadwick, M. J., and J. C. I. Kuylenstierna. 1991. Critical loads and critical level for the effects of sulphur and nitrogen compounds. *In: James W. S. L. (ed). Acid deposition origins, impacts and abatement strategies*. pp. 279-315. Springer-Verlag, Berlin.
- Currie, W. S., J. D. Aber, and C. T. Driscoll. 1999. Leaching of nutrient cations from the forest floor: Effects of nitrogen saturation in two long-term manipulations. *Canadian Journal of Forest Research* 29 (5): 609-620.
- Essmann H., and W. Zimmermann. 1991. New forest damages in central Europe: Development, causes and policies. *In: James W. S. L. (ed). Acid deposition origins, impacts and abatement strategies*. pp. 215-225. Springer-Verlag, Berlin.
- Hewitt, C. N., and B. Davidson. 1991. Oceanic sources of sulphur and their contribution to the atmospheric sulphur budget: A review. *In: James W. S. L. (ed). Acid deposition origins, impacts and abatement strategies*. pp. 33-50. Springer-Verlag, Berlin.
- Hölscher, D., T. D. Deasa, R. F. Moller, M. Denich, and H. Folster. 1998. Rainfall partitioning and related hydrochemical fluxes in a diverse and in a mono specific (*Phenakospermum guyannense*) secondary vegetation stand in eastern Amazonia. *Oecologia* 114: 251-257.
- Japan Environment Agency. 1990. Acid precipitation in Japan: The report of phase I survey. Japan Environment Agency.
- Kennedy, I. R. 1986. Acid soil and acid rain: The impact on the environment of nitrogen and sulphur cycling. Research Studies Press, Letchworth, Hertfordshire, England.
- Khemani, L. T., G. A. Monin, M. S. Naik, P. S. Prakasarao, R. Kumar, and B. H. V. Ramana Murty. 1985. Impact of alkaline particulates on pH of rain water in India. *Water, Air, Soil Pollution* 25: 365-376.
- Keller, T. 1983. Air pollutant deposition and effects on plants. *In: Ulrich B. and J. Pankrath (eds). Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems*. pp. 285-294. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- King, H. B., Y. J. Hsia, C. B. Liou, T. C. Lin, L. J. Wang, and J. L. Hwong. 1994. Chemistry of precipitation, throughfall, stemfall, and streamwater of six forest sites in Taiwan. *In: Peng C. I. and C. H. Chou (eds). Biodiversity and terrestrial ecosystems*. pp. 355- 362. Institute of Botany, Academia Sinica Monograph Series No. 14. Taipei.
- Lucier, A. A., and S. H. Haines. 1990. Overview and synthesis. *In: Ulrich B. and J. Pankrath (eds). Mechanisms of forest response to*

- acidic composition. pp. 1-9. Springer-Verlag, New York.
- Mamane, Y., and J. Gottlieb. 1991. Chemistry of precipitation in Haifa, Israel, 1981-1989. *In*: James W. S. L. (ed). Acid deposition origins, impacts and abatement strategies. pp. 3-12. Springer-Verlag, Berlin.
- McDowell W. H. 1998. Internal nutrient fluxes in a Puerto Rican rain forest. *Journal of Tropical Ecology* 14: 521-536.
- Myrold, D. D. 1990. Effects of acidic deposition on soil organisms. *In*: Ulrich B. and J. Panksath (eds). Mechanisms of forest response to acidic composition. pp. 163-187. Springer-Verlag, New York.
- Nillson, S. I. 1983. Effects on soil chemistry as a consequence of proton input. *In*: Ulrich B. and J. Panksath (eds). Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystem. pp. 105-112. Springer-Verlag, New York.
- Ovalle, A. R. C., and E. V. S. Filho. 1991. Acid precipitation research in Brazil: A short review. *In*: James W. S. L. (ed). Acid deposition origins, impacts and abatement strategies. pp. 51-59. Springer-Verlag, Berlin.
- Parker, G. G. 1990. Evaluation of dry deposition, pollutant damage, and forest health with throughfall studies. *In*: Ulrich B. and J. Panksath (eds). Mechanisms of forest response to acidic composition. pp. 10-61. Springer-Verlag, New York.
- Su, H. J. 1984. Studies on climate and vegetation type of the natural forest in Taiwan: (2) Latitudinal vegetation zones in relation to temperature gradient. *Quarterly Journal of Chinese Forestry* 17 (4): 57-73.
- Waterloo, M. J., J. Schelleken, L. A. Bruijnzeel, H. F. Vugts, P. N. Assenberg, and T. T. Rawaqa. 1997. Chemistry of bulk precipitation in southwestern Viti Levu, Fiji. *Journal of Tropical Ecology* 13: 427-447.
- Wellburn, A. 1988. Air pollution and acid rain: the biological impact. Longman Scientific & Technical, Essex, England.
- Wright, R. F., T. Dale, E. T. Gjessing, G. R. Hendrey, A. Henriksen, and M. J. P. Muniz. 1975. Impact of acid precipitation on freshwater ecosystems in Norway. The SNSF Project, Norway, Fr 3/75.