地理學報　第三十三期：77-90(2003)
JOURNAL OF GEOGRAPHICAL SCIENCE (33) : 77-90(2003)

彰化市與臺中市酸沈降之比較研究

Comparisons of Acid Deposition between Changhua City and Taichung City

張仲德* 林登秋** 薛美莉***
Chung-Te Chang Teng-Chiu Lin Mei-Li Sheu

Abstract

Air pollution and acid rain have been extensively studied in heavily populated major cities. In contrast, comparable studies are relatively rare for cities adjacent to major cities. Changhua City is a satellite city of Taichung City but its air quality is often worse than the Taichung City. We conducted a comparative study of precipitation chemistry in Taichung City and Changhua City between May 2001 and April 2002. The annual volume weighted mean pH of precipitation was lower in Changhua City (4.97) than in Taichung City (5.40). Deposition of major acidic pollutants, NO_3^- (13.3 kg/ha in both cities) and SO_4^{2-}, (26.9 and 23.9 kg/ha in Changhus City and Taichung City, respectively) was comparable between the two cities indicating that acid deposition in satellite cities could be as high as in the adjacent major cities. Concentrations of ions in precipitation were lower in months with higher precipitation and could be attributed to dilution effect. In months with

* 國立彰化師範大學地理研究所碩士
Graduate student, Department of Geography, National Changhua University of Education.
** 國立彰化師範大學地理系教授
Professor, Department of Geography, National Changhua University of Education.
***行政院農委會特有生物保育研究中心副研究員
Associate Researcher, Taiwan Endemic Species Research Institute.

lower precipitation, the dilution effect was small and pollutants accumulated in the air. The accumulation is more prominent for Ca^{2+} as a result, while the pH of precipitation is higher in dry months. It could also explain the observed higher precipitation pH in Taichung City where the content of Ca^{2+} in precipitation was higher. Although seawater contains considerable amount of SO_4^{2-}, the contribution of seawater on SO_4^{2-} deposition on both cities were lower than 10% indicating that much of the SO_4^{2-} was from terrestrial human activities. The amount of NO_3^- and SO_4^{2-} measured in this study was lower than that reported by EPA in 1996 (NO_3^- 40-50 kg/ha; SO_4^{2-} 40-70 kg/ha) and could be contributed to the effort of EPA on controlling emission of SO_2 and NO_x in the last decade.

Keywords: Taichung City, Changhua City, acid deposition, calcium.

摘　要

大都市人口多商業發達，空氣污染及酸雨常成爲許多環境研究的重點，然環保署所公布的空氣品質資料顯示，大都市附近城鎮的空氣汙染問題未必較大都市爲輕，但相關的研究則明顯較少。本研究收集並分析臺中市及彰化市 2001 年 5 月至 2002 年 4 月的降雨並比較其差異，彰化市全年降雨 pH 加權平均值爲 4.97 小於臺中市的 5.40，屬於酸雨的範圍。造成酸雨主要的物質 NO_3^-、SO_4^{2-}在彰化市 (分別爲 13.3 及 26.3 kg/ha) 的沈降量與臺中市 (分別爲 13.3 及 23.9 kg/ha) 相當，顯示衛星都市的酸雨問題未必較大都市爲輕。兩地逐月雨水中污染物的濃度與該月分雨量有負面關係，降雨越多污染物受到稀釋故濃度低，降雨少的月分，污染物在空氣中累積故濃度高，而鹽基陽離子鈣的累積情形更爲明顯，故降雨少的月分雨水之 pH 明顯較高，而雨水中鈣含量較高的臺中市 pH 也較彰化市爲高。雖然海水硫酸根的含量相當可觀，但對兩地雨水中硫酸根的貢獻量皆不達 10%，顯示臺中市及彰化市的酸性污染物主要是來自陸地上人類活動所排放。本研究所測得之硫酸根及硝酸根的沈降量遠低於環保署 1996 年所公布之酸性污染物沈降等值圖中所標示之量 (NO_3^- 40-50 kg/ha; $SO4^{2-}$ 40-70 kg/ha) ，證諸環保署長期監測之空氣品質資料，此差異應是近十年來政府致力於二氧化硫及氮氧化物排放管制之成效。

關鍵詞：臺中市、彰化市、酸沈降、鈣離子

前　言

酸雨問題在全世界已有非常豐富的研究成果，一般認爲二氧化硫 (SO_2) 及氮氧化物 (NO_x) 是造成酸雨的主要原因。二氧化硫及氮氧化物主要是源自燃煤火力發電廠、機動車輛及工業製程的排放 (環保署，1998)。高度工業化國家的大都市，機動車輛數多電力需求大，故二氧化硫及氮氧化物的排放量亦高，因此普遍面臨嚴重的酸雨問題，而成爲許多研究的焦點。臺灣最大的二個城市臺北市及高雄市是臺灣空氣污染最嚴重的兩個地區，也有許多研究人員對兩地的酸雨進行調查研究 (金恆鑣等，1994；吳德源，1996)。但若從污染物在大氣中傳輸及沈降的特性 (Beverland *et al.*, 1998; Bulter *et al.*, 2001) 以

及臺灣地區大都市及其鄰近市鎮的工商分工情形來看，大都市附近的城鎮，其空氣污染及酸雨問題未必不若大都市嚴重。

首先就污染物的傳輸及沈降特性而言，雖然污染物在傳輸的過程中，濃度會隨著離排放源的距離增加而下降，但許多研究顯示，在多雨的臺灣區，雨水的攔截仍是污染物沈降最主要的途徑 (Lin *et al.*, 2000)，因此在排放源附近的污染物若未及時被雨水攔截，仍會隨著氣流向外移動。若大都市附近的城鎮降雨的機率較高 (例如鄰近臺中市的南投降雨的機會就明顯高於臺中市)，則其污染物的沈降量可能反高於大都市。

其次就臺灣地區的工商分工情形來看，大都市常是商業中心，而基於地價及其它因素，工業多集中在大都市的鄰近城鎮，例如緊鄰臺中市的臺中縣及彰化縣分別有潭子及彰濱工業區。而由環境保護署 2000 年及 2001 的監測資料來看看，臺中市的 CO、O_3 及 NO_x 的濃度只略高於彰化市而 SO_2 及懸浮微粒 (PM_{10}) 則反而是彰化市高於臺中市 (環保署，1996、2002b；表 1)。

表 1　2000 及 2001 年彰化市及臺中市空氣品質之比較

	年別	SO_2	CO	O_3	PM_{10}	NO_X
		ppb	ppm	ppb	$\mu g/m^3$	ppb
彰化市	2000	3.99	0.81	18.50	69.64	38.73
	2001	4.89	0.73	21.42	68.73	36.18
臺中市	2000	3.26	0.97	21.04	64.58	44.22
	2001	2.87	0.93	22.14	60.10	42.43

資料來源：整理自環保署，2002b。

彰化市爲臺中市的衛星都市，人口及商業均不及臺中市發達，我們之前對臺中地區空氣品質的分析研究發現，彰化市二氧化硫的月平均濃度常較臺中市高 (張仲德等，2001)。然而在我們開始研究彰化市的空氣品質之前，幾乎未見任何有關彰化市空氣污染及酸雨的研究，基於我們先前的研究基礎 (張仲德，2001；張仲德等，2001；張仲德等，2002) 及前述的污染物在大都市及鄰近地區的排放、傳輸及沈降特色，乃在臺中市及彰化市同時進行酸沈降的監測，除了希望對於彰化市的酸性沈降問題有進一步的了解之外，也希望能對臺灣地都會區酸沈降的空間特色有初步的了解，以做爲空氣污染及酸沈降管制的參考。

研究地點及方法

(一) 研究地點

本研究自 2001 年 5 月至 2002 年 4 月收集彰化市及臺中市的雨水 (圖 1)，彰化市雨水採樣地點設置於國立彰化師大地理學系樓頂氣象觀測站，其經緯度位置爲 24°4' 55.94" N，120°32' 57.77" E，高度爲 20.5 公尺。彰化市南邊爲八卦臺地，西北距省道臺一線及臺化工廠約 700 公尺、距高速公路約 2 公里，北部及東北 2 公里外地區則爲農田及丘陵地。臺中市雨水採樣地點設於民宅屋頂，高約 10 公尺，以鐵架支撐，收集桶開口 30° 內無障礙物，其位置距忠明南路 50 公尺、與中港路的直線距離約 800 公尺。

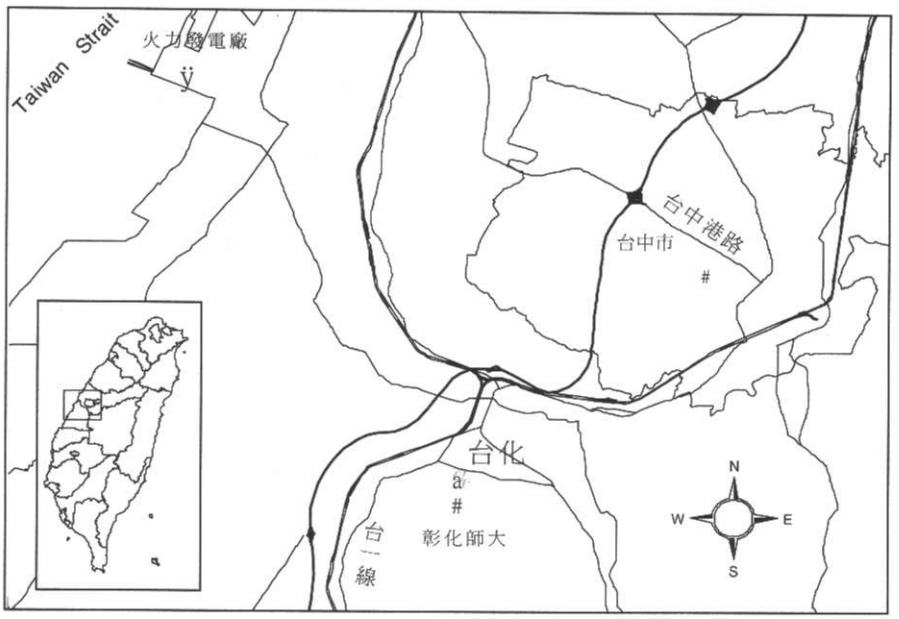


圖 1　研究地點相對位置圖

(二) 雨水採樣、分析及資料篩選

兩地皆以直徑 29.2 cm x深 36.4 cm，截面積 669.3 cm^2 的混沈降收集桶收集雨水，稱爲混沈 乃因無論降雨與否，收集桶均未加蓋，因此除降雨時收到濕沈降外，不降雨時亦收集到乾沈降。收 桶並以鐵架支撐，含收集桶的高度爲 1.35 公尺。以場雨 (rain event) 的方式收集降雨，當累積降雨量 3 mm (>180 ml)，且降雨停止六小時後即爲收集的時機 (林登秋等，1996；Butler and Likens, 1998)。 降雨量不足 3 mm，間隔 12 小時以上並不再降雨時也收集起來以避免干擾下一次的降雨。在連續降 數日時，則於每日早上 9 點收集；而降雨量可能超收集桶高度時 (如颱風) 也進行水樣的收集，以 雨水溢出。雨水收集時將水樣倒入 2000 ml 的量杯中並紀錄時間、降雨量 (mm)、水量 (ml) 等，所 之水樣除一部份用來量測 pH、電導度之用外，其餘分別裝入 250 ml (視水樣多寡可裝入兩瓶，重複分) 及 30 ml 的 PE 塑膠瓶中並註記日期及樣品編號，放置 4 °C 冰箱中冷藏，30 ml 的雨水樣品做爲保 之用至研究結束，250 ml 塑膠瓶水樣則做爲雨水分析之用。收集桶在完成雨水收集後以去離子水洗 並甩乾；塑膠瓶亦於水樣分析結束後以去離子水洗過蔭乾，待下次收集雨水前同樣以去離子水洗過 乾再使用。

雨水收集後 24 小時內即以酸鹼度計及電導度計測量其 pH 值及電導度。之後在二週內送至 投特有生物研究保育中心之水質實驗室以離子層析儀 (Dionex DX-100) 分析雨水中主要陰陽離 (Cl$^-$

、NO_3^-、SO_4^{2-}、Na^+、NH_4^-、K^+、Mg^{2-}、Ca^{2+}) 的濃度。在運送前及運送後分析前，水樣均在冰箱以 4 °C 冷藏。所有水樣均在收集後 45 天內完成所有化學分析，水樣分析前以 0.45 μm 的濾膜過濾。每次水樣分析前，均以已知濃度之水樣先行分析檢度儀器的精確性，若分析所得之濃度與所配製溶液之濃度誤差在 3%以上時，均重新檢查及分析至誤差縮小至 3%以下爲止。此外，本研究並以電導度比 (Conductivity ratio) 作爲雨水資料篩選的標準 (陳郁良，1995; Sequeira and Lung, 1995)。

理論電導度值的估計公式爲：

CC = Calculated Conductivity ($E.C._{cal.}$)

$$=\{[H^+]\times350+[Na^+]\times48.9+[K^+]\times72+[Ca^{2+}]\times52+[Mg^{2+}]\times46.6+[NH_4^+]$$
$$\times72.5+[Cl^-]\times75.9+[NO_3^-]\times71+[SO_4^{2-}]\times73.9+[HCO_3^-]\times43.6\}/1000$$

$$CPD=\frac{CC-\text{量測值}}{\text{量測值}}\times100\%$$ (量測值：Measured Conductivity, $E.C._{mea.}$)

根據 NADP 監測網的選擇標準：

1. 若量測值≦10 μs/cm，則 CPD 介於±0.65 之間。
2. 若 10＜量測值≦30 μs/cm，則 CPD 介於±0.45 之間。
3. 若 30＜量測值≦50 μs/cm，則 CPD 介於±0.3 之間。
4. 若量測值＞50 μs/cm，則 CPD 介於±0.2 之間。

雨水常是結合來自海水及非海水物質一起降至地表，在降雨量高於蒸發散量甚多的臺灣陸地上，不論土壤中或者人類的活動釋出鈉的量非常的稀少，因此可假設 Na^+完全來自海水。而海水中主要離子 Cl^-、Mg^{2+}、Ca^{2+}、K^+及 SO_4^{2-}與 Na^+的比率大約爲 1.2、0.23、0.0436、0.022、0.1205 (林登秋等，1996; Jacob *et al.*, 1985; Avila, 1996; Balestrini *et al.*, 2000)，以此海水比率做爲基準，可以估算海水對其他這些離子的的貢獻量，將之從雨水中扣除之後即可算出陸地排放源對這些離子的貢獻量。

(三) 加權濃度及沈降量之計算

在雨水離子濃度的表示方式上可用 mg/l 及 μeq/l 兩種單位，但若考慮離子的平衡及雨水的電中性，則以 μeq/l 表示較爲恰當 (Ravichandran and Padmanabhamurty, 1994)，並以此做爲比較的基準。而計算月份各種離子的濃度時必須同時考慮每一場降雨的降雨量及各項離子的濃度，由此計算出各離子雨量加權平均值 (volume-weighted mean or V.W.M.) 及年沈降量，計算方式如下 (Sequeira, 1982; Galloway *et al.*, 1984; Farmer *et al.*, 1987)：

1.雨量加權平均值

$$VWM[X]=\frac{\sum_{i=1}^{n}p_i[X]_i}{\sum_{i=1}^{n}p_i}$$

$VWM[X]$：爲該量測離子的雨量加權平均值濃度

P_i ：爲第 i 場降雨的降雨量

$[X]_i$ ：爲第 i 場降雨該項離子的濃度

2.年沈降量

由上述的方式可計算出各月份的平均濃度及降雨量，即可再進一步算出年總沈降量：

$$D = \sum_{i=1}^{12} P_i [X]_i$$

D ：年總沈降量

P_i ：各月份降雨量

$[X]_i$ ：各月份某項離子平均濃度

結　果

依據中央氣象站的資料臺中市及彰化市 2001 年 5 月至 2002 年四月降雨量分別爲 1478、15(mm，其中十至四月臺中市及彰化市的雨量分別只有 39 mm 及 27 mm，兩地主要降雨均發生在五到九 。本研收得臺中市及彰化市的降雨量分別爲 1454 及 1540 mm，收集效率均爲 98% 。在降雨場次方 ，臺中市只有 29 場，彰化市則有 50 場，但彰化市有三次雨水在收集時傾倒，故有雨水化學資料 爲 47 場。其中符合上述電導度比標準的降雨資料，臺中市有 26 場 (3 場不符，共 59 mm)、彰化市有 4 場 (4 場不符，共 52.5 mm)，以下的分析以符合電導度比的資料爲基礎，但各月及全年總沈降量的計 則以各離子的雨量加權平均濃度乘上該月及全年總降雨量以符合實際情況。

(一) 雨水 pH 值

彰化市全年雨量加權平均 pH 爲 4.97 在 43 次的降雨水有 9 次 (21%) 小於一般認定酸雨標 的 5.0 (Galloway *et al.*, 1982)；臺中市全年雨量加權平均 pH 爲 5.40 在 26 次的降雨中只有 2 次小於 5. (7%) (圖 2)，因此就雨水 pH 的表現來看，彰化市的雨水的酸鹼度明顯低於臺中市。兩地雨水 pH 之 節性變化頗爲一致，夏季雨水之 pH 值較低，降雨較少之冬季雨水 pH 較高 (圖 2)。此外，兩地雨水 pH 逐月之變動均有與其它離子一同起伏的現象。

(二) 離子的濃度及沈降量

各離子濃度在不同月份間的變化明顯可以分爲二個階段，在降雨較少的月分 (10-4 月)，各 子的濃度明顯高於雨季 (5-9 月) (圖 3)。其中鹽基陽離子 Ca^{2+} 與 NH_4^+ 甚至高於 SO_4^{2-}、NO_3^-，也使得 水的 pH 上升。此一趨勢不但在不同離子之間頗爲一致，在二個監測地點間也相當一致。雖然乾季時 離子的濃度爲雨季的數倍甚至數十倍，但由於 10-3 月的雨量臺中市只有 39 mm 彰化市只有 26.5 mm 因此各離子的沈降量均是雨季明顯高於乾季 (圖 4)。

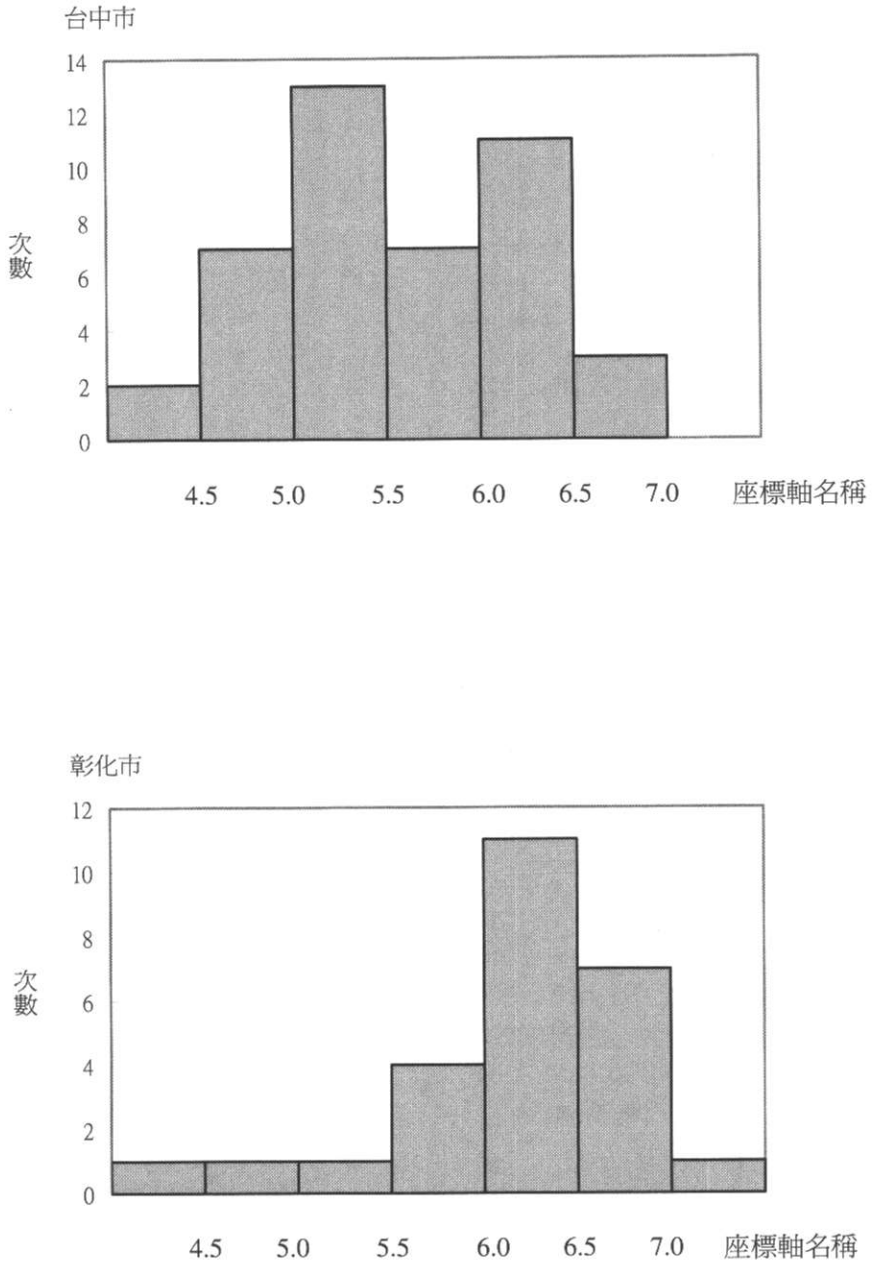


圖 2　台中市及彰化市全年 pH 頻率分布

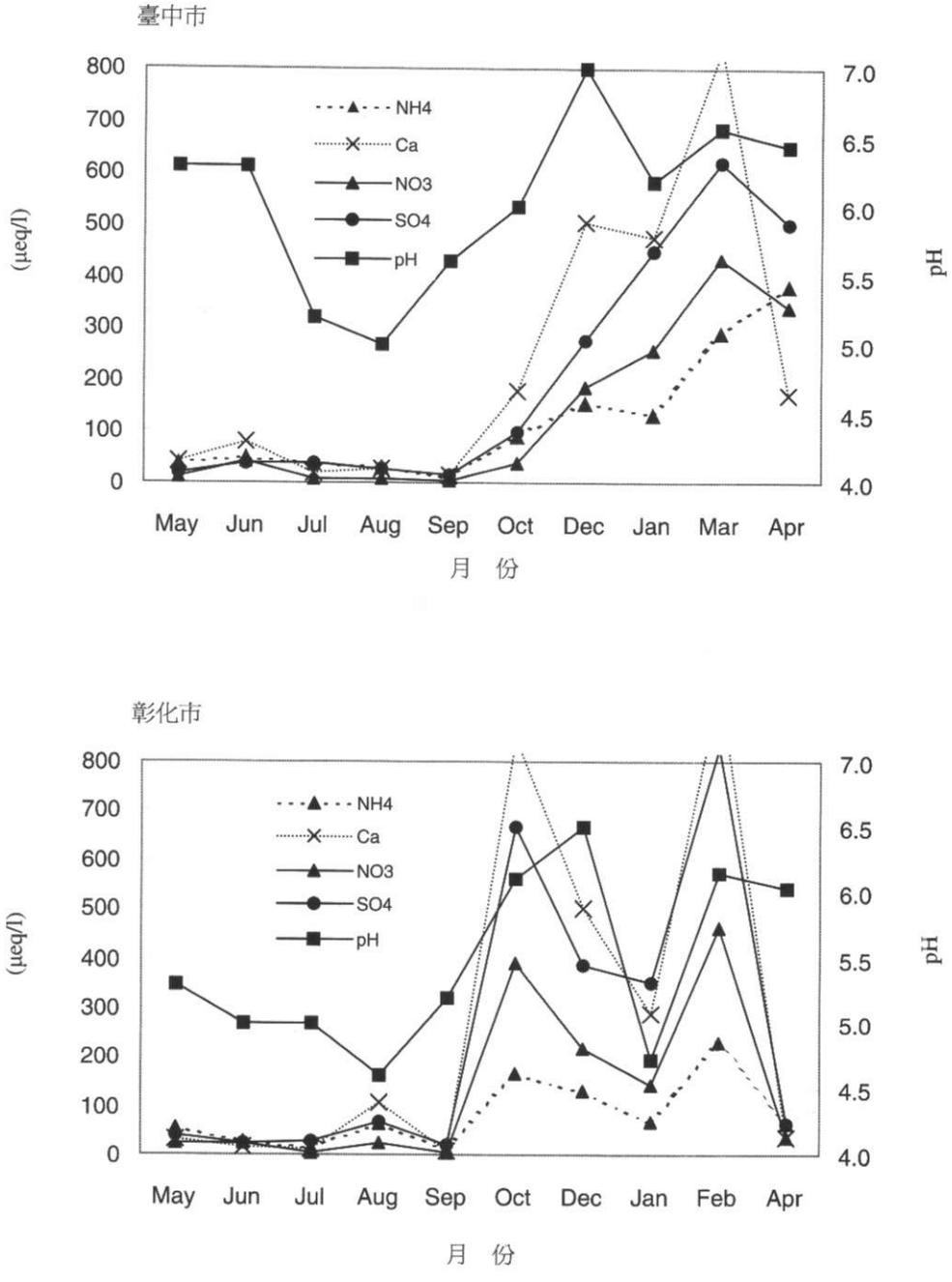
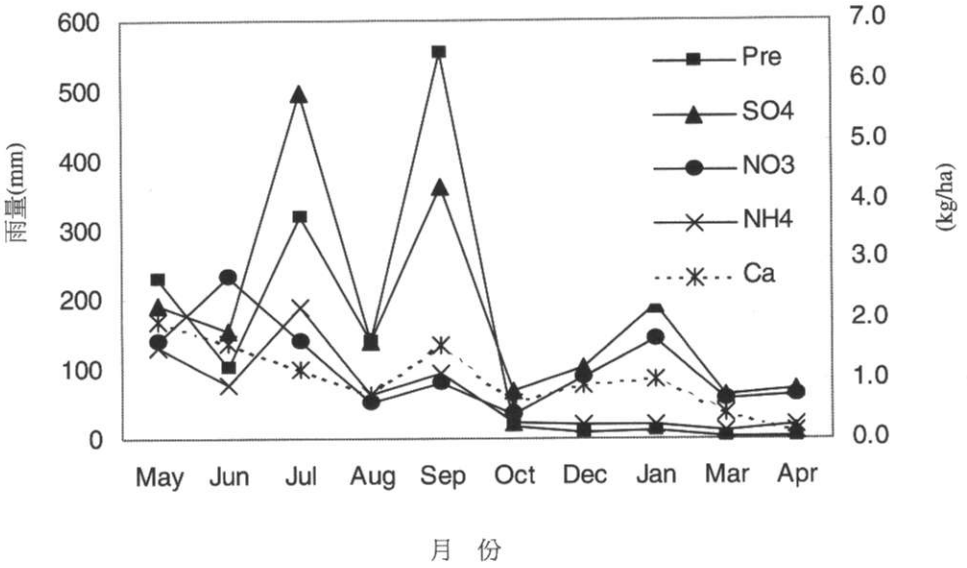


圖 3　台中市及彰化市雨水 pH 及雨水中主要離子月平均濃度

臺中市


600
500
400
300
200
100
0
雨量(mm)
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
(kg/ha)
Pre
SO4
NO3
NH4
Ca
May
Jun
Jul
Aug
Sep
Oct
Dec
Jan
Mar
Apr
月 份

彰化市

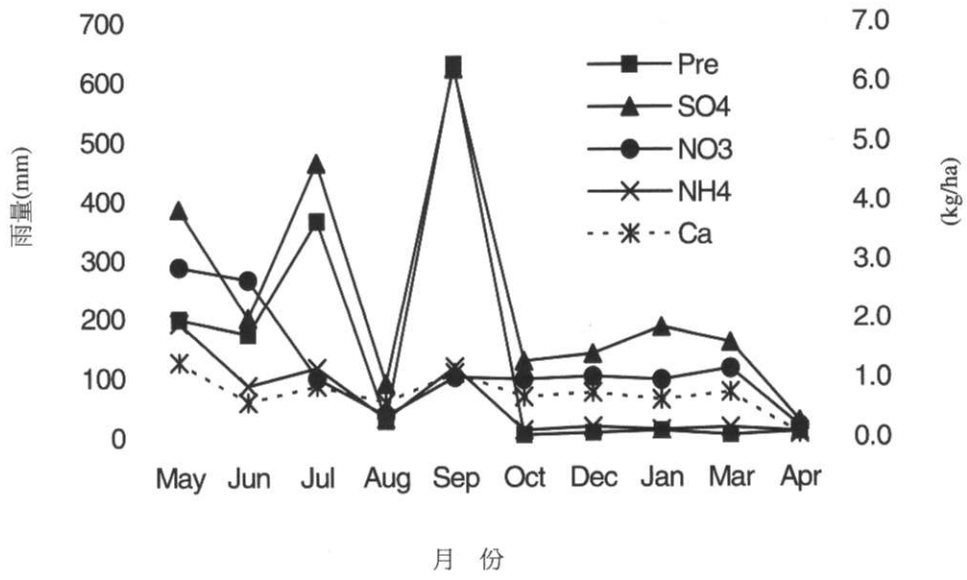

700
600
500
400
300
200
100
0
雨量(mm)
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
(kg/ha)
Pre
SO4
NO3
NH4
Ca
May
Jun
Jul
Aug
Sep
Oct
Dec
Jan
Mar
Apr
月 份

圖 4　臺中市及彰化市逐月降雨量及離子沈降量

比較各項離子濃度的差異，可發現臺中市及彰化市雨水中 Cl^-、Na^+的濃度，都非常接近海水中 Cl^-/Na^+的比率 1.2 (陳鎮東，1994；Granat *et al.*, 1996；Wakamatsu *et al.*, 1996；Balestrini *et al.*, 2000)，可視爲完全來自海水的影響，但彰化市 Cl^-、Na^+的濃度及沈降量卻將近是臺中市的兩倍 (表 2)。扣除海水的影響之後，SO_4^{2-}和 Ca^{2+}的濃度幾無變化。海水對 Mg^{2+}的貢獻量亦相當高在 50%以上。造成雨水酸化的主要物質爲 NO_3^-、SO_4^{2-}，臺中市及彰化市在這兩項離子濃度 (NO_3^-: 14.8、13.8 μeq/l; SO_4^{2-}: 35、34 μeq/l) 及沈降量上非常接近 (NO_3^-: 13.3、13.3kg/ha; SO_4^{2-}: 26.3、23.9 kg/ha)，而鹽基陽離子特別是 Ca^{2+}、NH_4^+等的濃度，臺中市 (依次爲 38.4、32.4 μeq/l) 則是明顯高於彰化市 (25.4、23.8 μeq/l) (圖 4、表 2)。

表 2　臺中市及彰化市 2001 年 5 月至 2002 年 4 月雨水中各項離子平均濃度及沈降量

	濃度（μeq/l）		沈降量（kg/ha）	
	彰化	臺中	彰化	臺中
Pre.(mm)			1565	1478
pH	4.97	5.40	4.97	5.40
Na^+	23.3	14.1	8.4	4.7
NH_4^+	23.8	32.4	6.7	8.5
K^+	3.9 (0.51)	4.0 (3.6)	2.4 (2.2)	2.3 (2.1)
Mg^{2+}	8.9 (2.9)	6.4 (3.2)	1.6 (-0.4)	1.2 (0.5)
Ca^{2+}	25.4 (24.4)	38.4 (37.8)	7.9 (7.6)	11.2 (11.0)
Cl^-	29.1 (1.1)	16.9 (0.02)	16.2 (6.1)	8.7 (3.4)
NO_3^-	13.8	14.8	13.3	13.3
SO_4^{2-}	35.0 (32.2)	34.2 (32.5)	26.3 (25.3)	23.9 (23.3)
Cl^-/Na^+	1.25	1.20		
Anion/Cation	96.1/78.4	99.3/72.7		

1.括號爲扣除海水影響後之數值；

2.anion/cation 中之陰離子加入了濃度低而未列在表中的 HCO_3^-、NO_2^-、F-及 PO_4^{3-}等。

討　論

(一) 硝酸根與硫酸根之沈降

硝酸根最大的來源爲機動車輛引擎的排放，雖然彰化市的工商業不如臺中發達，但是硝酸根的雨量加權濃度只比臺中市 (13.8 Vs. 14.8 meq/l) 略低，而因爲研究期間彰化市的雨量略高於臺中市，致使得兩地沈降量幾乎相同 (13.3 kg/ha)。雖然彰化市爲一較小的城市，但其爲彰化地區的政商中心，致每天有許多鄰近鄉鎮的就業人口，以自用的機動車輛爲交動工具，到彰化市上班。而臺中市固然亦有許多外來的就業人口有類似的機動車輛使用情形，但是其大眾運輸系統較爲完善。此外因爲彰化市土地

面積比臺中市小，故工商業及機關學校集中的情形更爲明顯。凡此均可能使得衛星都市彰化市的硝酸根沈降量可以與主要城市臺中市齊鼓相當，而由環保署監測的資料所顯示彰化市硝酸根濃度略低於臺中市的情形來看 (表 1)，上述的推論顯然值得由兩地交通量的調查比較進一步加以驗證。

機動車輛的引擎亦爲硫酸根的重要排放源，故上述對硝酸根沈降的推論亦可適用於硫酸根，但是臺中地區最大的二氧化硫定點排放源爲臺中火力發電廠。該電廠應對臺中市及彰化市的硫氧化物的沈降有一定程度的影響，本研究結果顯示，硫酸根在兩個都市雨水中的濃度相當，而研究期間彰化市降雨略高於臺中市，故沈降量爲彰化市 (26.3 kg/ha) 略高於臺中市 (23.9 kg/ha)。

我們之前的研究顯示，彰化市空氣中二氧化硫的濃度在冬天當風向有利用將大氣中的物質由北方 (即火力發電廠的方向) 向南方吹送時，明顯高於臺中市 (張仲德等，2001)，而本研究亦發現冬季時彰化市雨水中硫酸根的濃度高於臺中市 (在其它季節則濃度相當，圖 3)。兩項研究一致的結果顯示，臺中火力發電廠對臺中市及彰化市的空氣品質及酸沈降有不同程度的影響，與臺中火力發電廠同樣位在大肚臺地及八卦臺地左側的彰化市較位在臺地右側的臺中市易接收火力發電廠所排放的污染物。此結果與程萬里、白玨玲 (1997) 年所發表「以介入分析探討臺灣中部地區二氧化硫污染源對測站之影響」的發現相似，該研究指出冬季從臺中火力發電廠所排放的二氧化硫，會沿著大肚山平行的方向朝彰化方向傳送，而且受到山的阻風速會減緩，使得汙染物擴散不易，而造成冬季二氧化硫濃度明顯上升，甚至會超過鄰發電廠的地區尤其在風向穩定 (西北風)、低風速時，電廠所排放之污染物對彰化地區的影響最大。

本研究所測得臺中市及彰化市酸性物質的沈降量，硝酸根爲 13.3 kg/ha，硫酸根依序分別爲 23.9、26.3 kg/ha 遠低於環保署所公布的酸沈降量等值圖中所標示的量 (硝酸根爲 40-50 kg/ha，硫酸根爲 40-70 kg/ha; Chen *et al.*, 1996)。環保署所公布的等值圖乃依 1995 年以前所蒐集的資料所製，這幾年環保署在酸性沈降物排放的管制特別是對二氧化硫的管制，有很大的進展，比較環保署 (2002b) 網站上所公布 1994 及 2001 在本研究所在的臺中市忠明地區及彰化市所監測的二氧化硫及氮氧化物濃度的資料可以看出，2001 氮氧化物的排放量在彰化市只有 1994 年的 84%，在臺中市只有 75%，二氧化硫更爲明顯，2001 年在彰化市的排放量只有 1994 年的 62%，在臺中市更是只有 45%。此排放減量顯然是沈降量顯著降低的主要原因。然而若與美國大氣沈降監測網所公布 2000 年的資料來看 (NADP, 2002)，全美酸沈降嚴重的東北地區，其硝酸根與硫酸根的沈降依次分別爲 20 kg/ha 與 29 kg/ha。由此來看，臺中市及彰化市酸沈降特別是硫酸根的沈降量，仍然相當可觀，亦即我們在污染管制上仍有很大的努力空間。

(二) 雨水酸化

純水的 pH 值爲 7.0，但在大氣中二氧化碳溶於水中形成碳酸，會使得未受人爲污染雨水的 pH 值約在 5.6 附近。本研究期間臺中市年平均之 pH 值爲 5.4 相當接這個數值，亦即研究期間臺中市雨水酸化的情形並不明顯。反之彰化市雨水之年平均 pH 值爲 4.97 雨水酸化的情形相當明顯。由前述的結果與討論可知兩地酸性沈降物 (即硝酸根與硫酸根) 的量相差非常有限，因此造成雨水 pH 值差異的成分應是雨水中的鹽基陽離子。在雨水中主要的鹽基陽離子爲鈣離子、鎂離子及銨根離子，臺中市雨水中的鈣離子及銨根離子高出彰化市甚多，二者 (尤其鈣離子) 應是造成臺中市雨水 pH 值高於彰化市的主要原因。此鈣離子對降雨 pH 產生決定性影響的現象在其它地方的研究也常常發現 (Hedin *et al.*, 1994;

Likens *et al.*, 1996; Sha *et al.*, 1996)。

鈣的主要來源爲塵土，自九二一大地震之後，臺中市除了有拆除重建工程之外，並有包括中彰快速道路、中投快速道路、中二高以及臺中市外環道等大型工程在進行，這些工程的進行除了部分直接使用含鈣豐富的石灰外，所有的工程都會增加土壤的擾動，讓塵土飛揚而使得土壤中的鈣有機會進入大氣中，再以乾沈降方式降落或者被雨水所攔截而沈降。反之彰化市在過去幾年內並無重大工程在進行，相對的減少了鈣飛揚及沈降的機會。此外，本研究在臺中市雨水的收集點較靠近交通要道，一般在靠近交通幹道易受乾沈降的影響 (方國權等，2000)，其中顆粒較大的 Ca^{2+}更容易沈降而影響雨的組成 (Raper and Lee, 1996; Kaya and Tuncel, 1997)，這也可能是造成兩地雨水中鈣離子含量差異的原因。然而中央氣象局 (2002) 在網路所提供的臺中雨水監測資料，2001 年全年雨水之平均 pH 值爲 5.4 與本研究之結果完全相同，而其測站並不靠近主要道路 (圖 1)，故靠近道路應非造成本研究所得之鈣離子偏高，而使得雨水較爲不酸的主要因素。

銨根爲臺中市雨水中含量高於彰化市的另一鹽基陽離子，銨根離子的主要來源爲農業活動，如家畜家禽的排遺及肥料。彰化市市郊及鄰近的鄉鎮農業相當發達，臺中市忠明附近則沒有大規模的農業活動，何以臺中市銨根的沈降量高於彰化市值得進一步探究。

降雨是攔截空氣中污染物質最有效的方式 (Furiness *et al.*, 1998)，雲下掃除 (washout) 更是都市環境中主要清除污物的過程 (Poissant and Beron, 1994; Park *et al.*, 1999)，一般在空氣污染越嚴重的地區，降雨中污染物的濃度也越高 (Akimoto and Narita, 1994; Wang *et al.*, 2000)，在空氣中污染物含量相當的情形下，雨量略多的彰化市，污染物被攔截而沈降的量可能較臺中市稍高，但對空氣品質而言，卻可能有淨化的作用。降雨量對雨水組成的影響可以從雨水中各離子濃度的月分變化看出，在降雨較多的月分，污染物受到稀釋故濃度較低 (圖 3)。在降雨較少的月分，污染物在大氣中累積，稀釋作用較不明顯，故離子濃度上升，而鈣離子濃度上升的情形尤爲明顯，因此雨水的 pH 值也比較高。

(三) 海鹽對雨水組成的影響

四面環海的臺灣，海水對雨水中的鈉及氯離子有非常大的影響，雖然焚化爐及稻草的燃燒都可能產生氯，但由本研究兩地雨水中氯離子與鈉離子的比例 (彰化市及臺中市分別爲 1.25 及 1.20) 非常接近海水中此二離子的比例 (約爲 1.2) 來看，海鹽應是兩地雨水中的鈉與氯離子最主要的來源。值得注意的是，雖然兩監測站相距不到 15 公里，臺中市雨水中鈉及氯離子的濃度，只有彰化市的 60% 左右。如此明顯的差異，或許與大肚臺地與八卦臺地的阻隔有關。雖然兩個臺地高度不到 500 公尺，但在對流不旺盛的期間，或已能有效阻礙海鹽物質的傳送。

海鹽中除了鈉離子及氯離子之外，亦含相當量的鎂、鈣、鉀及硫酸根離子，本研究發現海鹽對鎂的貢獻量相當可觀，但對硫酸根的貢獻量在彰化市只有 8%，在臺中市更只有 5%。亦即雨水中絕大部分的硫酸根離子應來自陸地上人類活動。

致　謝

研究進行期間感謝王敬甯及曾麗曄協助雨水的收集，並感謝特有生物保育中心技工吳先生百忙

及本校生物系林忠毅、李奇英老師提供相關儀器。對於匿名審查者的寶貴意見也特此致謝。

引用文獻

方國權、吳玉琛、范煥榮、葉進儀、賴坤助、陳惠鋗 (2000) 應用適當之沈降模式於臺中地區乾沈降之計算，弘光學報，36: 149-159。

中央氣象局 (2002) 臺灣各氣象站累年雨水酸度值年平均資料，http://www.cwb.gov.tw/V3.0/index.htm。

吳德源 (1996) 高雄都會區酸性沈降之調查研究，國立中山大學環境工程學研究所碩士論文。

金恆鑣、張斐章、陳彥璋 (1994) 臺北市酸雨趨勢特性分析，臺灣水利，42 (1) : 7-15。

林登秋、夏禹九、金恒鑣、黃正良、王立志、劉瓊霰 (1996) 福山試驗林雨水成分來源之探討–多變數因子分析，中華林學季刊，29 (1) : 121-132。

陳鎮東 (1994) 海洋化學，臺北市：國立編譯館，頁 190。

陳郁良 (1995) 臺北都會地區酸雨形成機制及採樣方法比較之研究，國立臺灣大學環境工程學研究所。

張仲德、林登秋、薛美莉 (2001) 1994~2000 年彰化市空氣品質特性之探討，地理學報，30: 89-100。

張仲德 (2001) 彰化市 2001 年大氣沈降特性分析，國立彰化師範大學地理研究所碩士論文。

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之來源，地理學報，32: 41-54。

程萬里、白玨玲 (1997) 以介入分析探討臺灣中部地區二氧化硫污染源對測站之影響，東海學報，38: 127-148。

環保署 (1996) 臺灣地區環境資訊。

環保署 (1998) 臺灣地區酸雨調查綜合成果報告。

環保署 (2002a) 中華民國臺灣地區環境保護統計年報，http://www.epa.gov.tw/statistics/。

環保署 (2002b) 空氣品質監測，http://www.epa.gov.tw/monitoring/1-2.htm。

Akimoto, H., and Narita, H. (1994) Distribution of SO_2, Nox and CO_2 emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1 ° resolution, *Atmospheric Environment*, 28:213-225.

Avila, A. (1996) Time trends in the precipitation chemistry at a mountain site in northeastern Spain for the period 1983-1994, *Atmospheric Environment*, 30:1363-1373.

Balestrini, R., Galli, L., and Tartari, G. (2000) Wet and dry atmospheric deposition at prealpine and alpine sites in northern Italy, *Atmospheric Environment*, 34:1455-1470.

Beverland, I. J., Crowther, J. M., Srinivas, M. S. N., and Heal, M. R. (1998) The influence of meteorology and atmospheric transport patterns on the chemical composition of rainfall in south-east England, *Atmospheric Environment*, 32:1039-1048.

Butler, T. J., and Likens, G. E. (1998) Weekly and daily precipitation chemistry network comparsions in the eastern U.S.:NADP/NTN vs MAP3S/AIRMoN, *Atmospheric Environment*, 32: 3749-3765.

Butler, T. J., Likens, G. E., Barbara, J. B., and Stunder, J. B. (2001) Regional-scale impacts of phase I of the clean Air Act Amendments in the USA: the relation between emissions and concentrations, both wet and dry, *Atmospheric Environment*, 35:1015-1028.

Chen, C. S., Lin, N. H., Peng, C. M., and Jeng, F. T. (1996) Acidic deposition on Taiwan and associated precipitation systems, *Proceedings of International Conference on Acid Deposition in East Asia*, Taipei, Taiwan, 28-30 May 1996, pp.124-132.

Farmer, G., Barthelmie, R. J., Davies, T. D., Brimblecomber, P., and Kelly, P. M. (1987) Relationship between concentration and sulphate in precipition, *Nature*, 328: 787-789.

Furiness, C., Smith, L., Ran, L., and Cowling, E. (1998) Composition of emissions of nitrogen and sulfur

oxides to deposition of nitrate and sulfate in the USA by state in 1990, *Environmental Po ution*, 102:313-320.

Galloway, J. N., Likens, G. E., Keene, W. C. and Miller, J. M. (1982) The composition of precipit ion in remote ares of the world, *Journal of Geophysical Research*, 87: 8771-8786.

Galloway, J. N., Likens, G. E., and Hawley, M. E. (1984) Acid precipitation: natural versus anthro genic components, *Science*, 236:1559-1562.

Granat, L., Suksomankh, K., Simachaya, S., and Tabucanon, M. (1996) Regional background acid y and chemical composition of precipitaton in Thailand, *Atmospheric Environment*, 30:1589-1596.

Hedin, L. O., Granat, L., Likens, G. E., Buishand, T. A., Galloway, J. N., Butler, T. J., and Rodhe, H. 1994) Steep declines in atmospheric base cations in regions of Europe and North America, *ature*, 367:351-354.

Jacob, D. J., Waldman, J. M., Munger, J. W., and Hoffmann, M. R. (1985) Chemical composition of fo water collected along the California coast, *Environmental science and Technology*, 19:730-736.

Kaya, G., and Tuncel, G. (1997) Trace element and major ion composition of wet and dry deposi ion in Ankara, Turkey, *Atmospheric Environment*, 31: 3985-3998.

Likens, G. E., Driscoll, C. T., and Buso, D. C. (1996) Long-term effects of acid rain response and reco ery of a forest ecosystem, *Science*, 272: 244-246.

NADP (2002) *Sulfate and Nitrate ion wet deposition*, 2000.http://nadp.sws.uiuc.edu/isopleths/maps200

Park, S. U., In, H. J., and Lee, Y. H. (1999) Parameterization of wet deposition of Sulfate by precipitati n rate, *Atmospheric Environment*, 33: 4469-4475.

Poissant, L., and Beron, P. (1994) Parameterized rainwater quality model in urban environment, *Atmo heric Environment*, 28: 305-310.

Raper, D. W., and Lee, D. S. (1996) Wet deposition at the sub-20 km scale in a rural upland area of En gland, *Atmospheric Environment*, 30: 1193-1207.

Ravichandran, C., and Padmanabhamurty, B. (1994) Acid precipitation in Delhi, India, *Atmo heric Environment*, 28: 2291-2297.

Sequeira, R. (1982) Chemistry of precipitation at high altitudes : inter-relation of acid-base comp nents, *Atmospheric Environment*, 16: 329-335.

Sequeira, R., and Lung, F. (1995) Regional trends in wet deposition of sulfate in United States an SO_2 emissions from 1980 through 1995, *Atmospheric Environment*, 29: 2439-2447.

Sha, Y., Wang, A., Yang, S., and Liu, P. (1996) Correlation of acid rain with the distributions of ac d rain alkaline elements in aerosols, *Nuclear Instruments and Methods on Physics Research B*, 10 /110: 551-554.

Wakamatsu, S., Akira, U., Han, J. S., Atsuko, M., Itsushi, U., and Kiyoshi, U. (1996) Seasonal varia ion in atmospheric aerosols concentration covering northern Kyushu, Japan and Seoul, Korea, *Atmo heric Environment*, 30: 2343-2354.

Wang, T. J., Jin, L. S., Li, Z. K., and Lam, K. S. (2000) A modeling study on acid rain recommended em ission control strategies in China, *Atmospheric Environment*, 34: 4467-4477.

91 年 10 月 23 日　收稿
91 年 12 月 26 日　修正
92 年 1 月 28 日　接受