

中央氣象局酸沉降資料分析

徐光蓉 但唐謨

台大大氣科學系

周淑美 陳偉芬

中央氣象局

一. 簡介:

空氣污染在目前最迫切的問題是光化學污染及酸沉降。這兩個問題都是污染物在大氣中經由化學作用轉化成二次污染物所造成。酸沉降主要是由人為產生的 SO_2 及 NO_x 經氣態及液態反應轉換成硫酸、硝酸，而後沉降生成。而沉降物以硫酸為主佔 70% 以上，只有在像洛杉磯這類 NO_x 排放特別多的地區，硝酸的比重才較大。另外部分靠海地區亦有些許是海水中氯離子作用生成的鹽酸。沉降物依物理特性又可分為乾、濕兩類，這裡指的是濕沉降，亦即酸雨。一般談的酸雨並不是指呈酸性的降水。實際上，空氣中的 CO_2 很容易溶解在水中產生碳酸，使降水呈弱酸性。大氣中目前 CO_2 含量約為 350ppm，當雨水與空氣中的 CO_2 達到平衡時，雨水的 pH 值應該在 5.6 左右。所以一般在討論時只有將 pH 在 ≤ 5 的降水才視作酸雨。

既然酸雨生成是以硫化物氧化為主，硫化物的來源可分為天然與人為產生兩類。天然產硫化物包括由生物腐化生成，或海中生物製造的 COS (carbonyl sulfide), CS_2 (carbon disulfide), $(CH_3)_2S$ (dimethyl sulfide), H_2S (Hydrogen sulfide) 等。佔硫化物總排放量的一半不到 (Houghton J. T., et al, 1992)。最大污染來源是人為燃燒化石燃料或含硫有機物產生的二氧化硫 (SO_2)。雖然各別硫化物的氧化機制，經過許多人不斷努力而日漸明瞭，但是由於各個化學物質的來源及量的分布變化很大，生命期長短不同，反應快慢又受所處環境的 pH，陽離子濃度，空氣中其他污染物存在量之多寡影響；除了化學因子外，大氣的物理條件也非常重要，如大氣中懸浮微粒量的多少，懸浮微粒含水量，大氣含水量，及日照長短、強弱等都會改變硫化物氧化的快慢。整個酸沉降問題因此牽涉很廣，系統變得非常複雜、龐大。直到如今，科學家們尚不能肯定地說對酸雨問題有澈底的了解。但因為實際上酸雨問題對生命、經濟、及環境造成非常嚴重的影響，實在不容忽視；例如發生在 1930 年比利時、1952 年倫敦及 1966 年紐約的幾個事件，使得數十人至上千人喪失生命，均是以硫化物為主的污染所造成。當時為了避免再次在小範圍中累積太高濃度的硫化物，最簡單的處理方式就是加高排煙裝置，因此暫時性地解決了高濃度污染物聚積的問題，但也因此硫化物污染問題由地區性問題演變成國際問題。

破壞水質是酸雨導致的嚴重也是最明顯的後果之一。湖泊河川對酸雨的忍受程度，隨湖泊底土的性質不同有很大差異，堅硬的底土，土壤中鈣性物質不易釋出，緩衝力弱、最容易受降水酸鹼性影響。若底土為軟性土質，由酸沉降帶來許多的氯離子會與土壤產生陽離子交換，所以水中 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 較不經酸沉降影響為多。倘若原本即存在土壤中的有毒物質如 Zn , Ni , Pb , Cd , Al , Mn , Hg 等重金屬被沖洗出之機率會增大。例如常見湖泊因為酸性增加而造成無魚的現象，經過研究發現，主要是因為酸性強的水中，洗出高濃度的鉛離子，影響魚類的呼吸作用而導致魚類死亡，並非水中氯離子太多之故。

沉降物酸化的進展非常快速，在 1950 年左右的紐約州、新英格蘭以及北歐斯堪地納維亞半島尚無所謂酸沉降的問題，短短不到 20 年的時間，降水有明顯的酸化現

象，甚至許多受影響地區湖泊完全沒有肉眼可見的有機物存在。到目前為止，針對紐約州及新英格蘭地區長期變化的許多研究，結果顯示不同地理狀況會影響酸沉降內容物的分布，並且受附近的硫化物污染源影響較大。但對於二氧化硫排放量與觀測到的硫酸根沉降量是否呈線性關係則無法達到定論 (Hidy, G. M. 1984)。

在經歷數十年以經濟為先的臺灣，許多人開始注意到自己生存的環境。就酸雨而言，有許多問題值得思考：(1) 這問題在台灣到底嚴不嚴重？(2) 若是嚴重，什麼是形成酸雨的主因，硫化物或氮化物？(3) 進展程度如何？(4) 污染物的來源在那裡？(5) 污染源的量與酸雨之間的關係如何？最後是 (6) 我們有辦法控制嗎？

中央氣象局很早就開始注意濕沉降的問題。在 1972 年起開始持續地針對雨水及海水的一些特性進行研究，最初開始時只有台北及日月潭兩站，量度對象只有雨水的 pH 及氯離子含量。在 1973-1977 之間增添高雄、恆春、台東、花蓮、基隆等五站，同時也分析雨水及海水成份。彭佳嶼隨著斷斷續續有資料蒐集，1989 年後又陸續增加 8 站：鞍部、新竹、台中、嘉義、阿里山、臺南、成功、及宜蘭等。所以資料在 1988 年以前僅有 8 站資料，分析對象包括 pH, 氯離子, 硫酸根離子, 氮離子, 溪離子, 銅離子, 銻離子, 鈷, 鉀, 鎳, 鈷等陽離子，及電導率測定等。從最早的台北、日月潭資料起迄今日有 20 多年的資料，較新的雨水、海水監測站也有近 4 年的數句，並且業已全部轉成電腦檔案。這些資料可能代表了過去二十年來臺灣各地區酸沉降變化情形。本計劃主要目的是整理這些資料，分析各地區酸沉降變化情形，主要討論對象為 1989 年以前建立的八個站。在 1989 年後新增站由於資料短，代表性不明確，僅在討論一節中最後說明。同時並與其他單位近年在鄰近地點觀測結果比對，並對此項觀測是否繼續進行提出檢討。

以下先簡單介紹氣象局有關雨、海水分析方式及流程，就氣象局過去長期資料中雨水及海水的 pH 值，硫酸鹽含量，整理各站的年趨勢，季節性變化，並做簡單的說明。

二. 工作內容與採樣方式：

I. 工作內容：

(1) 雨水分析：共 16 站：鞍部、台北、新竹、台中、日月潭、嘉義、阿里山、臺南、高雄、恆春、台東、成功、花蓮、宜蘭、基隆、彭佳嶼等站。

內容：pH 值，電導率，陰離子，陽離子。

(2) 海水分析：共 6 站：基隆、高雄、澎湖、恆春、台東、花蓮等站。

內容：pH 值，氯離子，硫酸根。

II. 採樣方式與程序：

(1) pH 值測定：雨水或海水經過濾後，分別以 pH 7 及 pH 4 的緩衝劑校正 pH 儀，而後量測 pH 值，並記錄。從 1972 到 1985 年所使用的 pH meter 是 Hitachi - Horiba F5。1986 年開始改用 Basic 3100A-22AS，直到現在。

(2) 險(陽)離子分析：雨水或海水過濾，取部份樣品以離子層析儀分析，計算結果並記錄之。在以離子層析儀分析雨水前，必須先配製流洗液與再生液，並先輸入標準樣品，找出適當的分析條件，再進行分析。

pH 值測定只有台北、日月潭兩站為實地測度，其餘 14 站，均寄回台北本站分析。測度前先檢驗外站所寄回之雨水是否過濾乾淨，若無則取出過濾之，並登錄其所測之 pH 值，偶爾作抽樣檢測。

III. 台大環工所之採樣方式與程序：

實驗採用自動儀器收集樣品，將乾沉降及溼沉降分開收集。採樣人員在收集雨水時，先過濾，並於現場測 pH 值及雨水溫度。樣品密封後，郵寄至臺大環工所分析中心。分析內容包括：pH 值、電導度、陰離子： Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ；陽離子： NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及有機酸： $HCOO^-$ 、 CH_3COO^- 、 $C_2H_5COO^-$ 等。陰離子、有機酸及陽離子中的鎂根均以離子層析儀分析，其餘鉀、鈉、鈣、鎂等陽離子則以原子吸收光譜儀分析。

IV. 數句的處理：

依定義， $pH = -\log[H^+]$ ，氣象局原始資料提供為 pH 值，在估計標準誤差時，應先將氣象局所提供之原始資料 pH 值轉換成 H^+ 異子濃度，再求平均值，而後再轉換成 pH 值。求 pH 的標準誤差是利用公式：

$$\text{standard deviation of } pH = \frac{\text{standard deviation of } [H^+]}{[H^+]_{\text{mean}}} > 0.434.$$

下面所討論的數句都是用月平均值討論。

三. 結果討論：

(1). 酸鹼度 (pH):

a. 台北：

僅有雨水分析資料，pH 平均值及標準誤差結果列在表一。圖 1 至 3 分別為測量期間 pH 逐年變化，1986 年以後的 pH 逐年變化，以及 pH 平均月變化。圖 1, 2 中虛線部份是線性迴歸所求出之年變化趨勢。圖 3 實線連結為觀測值，線的上下方方塊分別代表一個標準誤差所涵蓋範圍。由圖 1 看來，雨水 pH 值變化很大。從 1972 到 1980 年變化不大，相當平穩。在 1980 年大幅上升，而 1986 年左右又急遽下降，相當於氯離子濃度上升數十倍之多。查過去記錄顯示 1986 年曾使用不同儀器量度，很可能是造成數字急遽變化的原因之一。從 1972 到 1991 的平均值為 5.07 ± 0.92 ，如圖 1 所示，與 CO_2 到達平衡的雨水相似。若僅以 1986 年以後計算，平均值為 4.64 ± 0.56 酸化情況很明顯，見圖 2。

逐年變化計算結果列在表二。若以整個觀測時段分析，臺北 pH 值逐年遞減，雨水酸化在持續中；每年下降約 0.06。若以 1986 年以後結果分析，pH 每年以 0.08 的斜率上升，酸化程度慢慢在減弱。由於收集的數句有限，其他自然或人為因素可能影響，觀測數值起落很大，線性回歸結果不是很理想， r^2 在 0.13 以下。圖 3 為月變化趨勢圖顯示七、八、九三個月 pH 值略高，但並沒有超過標準誤差範圍，表示臺北降水 pH 沒有月變化。

b. 基隆：

以 1977 年到 1991 年的平均值來看，雨水 pH 值也是偏高，平均是 5.05 ± 1.05 ，參見表一。變化情形由 1977 年起經 1980 年上升，1986 年下降二次大輻起落。與台北站所得 pH 變化相似，很可能也是儀器改變或某些特殊因素造成。參見圖 4。線性回歸得年 pH 下降率為 0.12；參見表二。以 1986 到 1991 年來看，平均為 4.08 ± 0.75 與台北站所得值相似。見圖 5。而此段數句的年趨勢為每年下降 0.08。不論取那一段時間數據分析，都顯示酸化情況仍在持續，這點與臺北站所得不同。從圖 6 看，全年而言並沒有特別突出的月份，僅以八月份稍高。海水變化有逐年下降的趨勢，每年下

降 0.08。整年來看，結果與雨水所得正好相反，8 月的 pH 顯著地較其他月份低。見圖 7, 8。

c. 日月潭：

僅有雨水分析，圖 9 顯示，在整個測時段中變化和臺北基隆兩地相似。1972 年至 1980 年為平穩狀態，1980 年起略為上升，而在 1986 年急遽下降。由全時段平均每年 pH 下降 0.08，1972 - 1991 年 pH 平均為 5.77 ± 0.94 ；1986 年後每年 pH 下降 0.01，而平均為 4.70 ± 0.64 ；參見圖 10。以一年為期來看，圖 11 表示七、八月 pH 值最高，可能因天氣熱蒸發迅速，物質濃度上生成造成。本站同時有 SO_2 觀測，結果顯示在六、七月大氣中有較高濃度的 SO_2 。

d. 高雄：

雨水 pH 並無明顯之逐年變化，表二列出 13 年平均值為 6.62 ± 0.48 ，而 1986 - 1991 年平均值亦相差不遠為 6.47 ± 0.52 ；參考圖 12。換不同儀器測量對高雄測得的 pH 並沒有影響，pH 較前三站平均值高出許多，很可能收集的雨水受到海水侵襲起飛沫之影響，而一般海水 pH 值在 8 附近。另一可能的影響因素，是附近龐大的工業區，大量化學物質排放也可能影響所測到的降水。年變化分別用全觀測時段及 1986 年以後考慮，變化量分別為每年降 0.04 及 0.06；見圖 12, 13，可以說幾乎沒有差別。以全年 12 個月來看，夏季常有較低 pH 值的出現，見圖 14。海水 pH 變化則沒有特別高或低的月份，圖 15。海水 pH 每年下降 0.07，平均值為 7.53 ± 0.55 較台東稍高。見圖 16。

e. 恆春：

雨水 pH 有略為下降的趨勢，若以平均值 6.68 ± 0.54 或 6.47 ± 0.50 來看，均較 CO_2 鮑和之雨水略高。以全部觀測時間分析，每年 pH 約降 0.03；見圖 17。1986 到 1991 年則為每年上升 0.12，見圖 18。海水飛沫可能為主要影響因素，另外，當地與相當盛的畜糞堆可能產生多量 NH_3 ，同時觀測的 Cl^- 含量較高雄、花蓮、台東等地少，顯示海水重要性略低。而 pH 值月變化在 11, 12 月較其它月份高；見圖 19。由於可能因季風強盛帶來較多量的海沫，所以海水的影響在冬季可能比較顯著。

海水：變化在 1980 到 1982 年間變化最大。全部時段中以 1982-1986 間 pH 值較低。從 1977 到 1989 平均每年下降 0.03；平均值在 9.5 左右與其他地區相近。見圖 20。所測海水 pH 值月變化以夏季 6, 7, 8 月較其他月份為低。圖 21。

f. 花蓮：

雨水略有逐年下降之趨勢，平均在不同時段分別為 6.09 ± 0.50 或 6.59 ± 0.46 差別不大；見圖 22, 23。變化在 1987 年左右較大，圖 22；與換用不同儀器量度或許有關，海水在此可能也有相當大的影響。依不同月份來看，pH 值在 10 月左右降至最低，見圖 24。以全部觀測時間分析，雨水每年 pH 約降 0.03；1986 到 1991 年則為每年上升 0.12。海水之 pH 值逐年變化很大，與恆春結果相似，圖 25。在 1980 年到 1982 年間下降最快，而後變化和緩，平均每年下降 0.05。月變化以一、二、及七月有較高值，但都在誤差範圍內，並不顯著，圖 26。

g. 台東：

若用全觀測時段分析，雨水 pH 有逐年下降之趨勢，每年 0.06；見圖 27。1986 年以後資料分析，則為每年上升 0.08；圖 28。變化與恆春、花蓮類似，平均值在不同時段分別為 6.72 ± 0.62 及 6.46 ± 0.67 差別也不大。與 CO_2 鮑和之雨水略高，很可能因為近海緣故，雨水中包含不少海水成份在內所致。另外若以十數年每月數值平均，其結果如圖 29 所示，在標準誤差容許程度下，發現台東降雨水之 pH 值並無與月份無關。

海水 pH 有明顯逐年下降，下降速率為每年 0.05；平均值在 7.35 ± 2.10 。對 30。以數年月平均資料分析，發現五月海水 pH 顯著偏低；圖 31。

h. 彰化興：

位處外島數句較其他站要少，全年變化不大。分不同時段計算年趨勢，pH 都是下降，分別為每年 0.01 及 0.14；見圖 32。平均值 6.72 ± 0.02 或 6.46 ± 0.67 與高雄

恆春等地相似，雨水中 Cl^- 含量為數站中最大，與 SO_4^{2-} 相當，可見絕大部分受海水飛沫影響。圖 33 表示月平均數句差異很大，大體而言，在冬季有較高的 pH 值。

2. 硫酸鹽部分：

氣象局提供資料以雨水以 mg/l 為單位，而海水以 g/l 為單位。部份針對硫酸根的研究是以 $\mu eq/l$ 為量度離子濃度單位，以 SO_4^{2-} 而言， $1 eq$ 相當於 $48\text{ }\mu eq/l = 48\text{ }\mu g/l = 0.048\text{ }mg/l$ ，與其他研究相比時要注意單位的一致性。

a. 台北：

僅有雨水資料，由圖 34 可看出有明顯逐年下降之趨勢。1972 到 1991 年為每年降 $3.20\text{ }mg/l$ ；1986 到 1991 年較緩和，為 $-2.67\text{ }mg/l$ ；參考表一及二。兩者差別不大，都在減少中，這現象與後半時期 pH 的變化一致，表示臺北地區此類污染物有下降的趨勢。

b. 基隆：

雨水硫酸根變化逐年下降，平均較臺北緩，為 $-1.94\text{ }mg l^{-1} yr^{-1}$ ；圖 35a。在 1986 年以後變化較大，為 $-0.58\text{ }mg l^{-1} yr^{-1}$ 。依不同月份看也沒有特徵。圖 35b。海水硫酸鹽變化不大，每年約下降 $0.07\text{ }g/l$ ，也沒有特別突出的月份。圖 35c。

c. 日月潭：

硫酸根資料由 1980 年以後才開始蒐集，其趨勢也是逐年下降：每年下降 $3.19\text{ }mg/l$ ；圖 36a。變化在 1988 年初突增，月變化以春季 3.4 月時最高；圖 36b。

d. 高雄：

雨水在冬季含硫酸根量最高，春天後即下降，變化與基隆相似。雨水無明顯逐年變化，約在 $-0.94\text{ }mg l^{-1} yr^{-1}$ 。若單以 1986 年以後資料分析，每年下降 $8.90\text{ }mg/l$ ；圖 37a。海水逐月資料顯示在 7、8 月較低而春天最高；圖 37b。海水變化較小但逐月變化有類似雨水之變化；圖 37c，顯示附近人為影響日趨重要，海水逐年有略降之趨勢，但較其他各處仍偏高。

e. 恒春：

數句不多變化頗大，平均趨勢都在下降中；圖 38a。月變化在冬季最多；圖 38b。海水硫酸根略有逐年下降，但無明顯月變化；圖 38c。

f. 花蓮：

雨水硫酸鹽含量逐年緩緩下降，趨勢與恒春相似；圖 39a。在秋冬之際有較高之硫酸鹽；圖 39b。海水變化與台東相似，無明顯改變。

g. 台東：

雨水硫酸根月變化在夏季值較低，在秋冬高；圖 40b；年變化上，雨水中 SO_4^{2-} 略有逐年下降的現象，不同時段分別為每年 -4.34 或 $-5.22\text{ }mg/l$ ；圖 40a。即使不同時段所得結果差別也不大，很可能是長距離傳送物質的改變，或是自然變化的一部份。海水中之硫酸根較基隆更缺乏變化，人為影響很小；圖 40c。

h. 彭佳嶼：

年變化非常大，為 $-26.5\text{ }mg/l$ 。但數句常有缺漏不全，可靠性須要再評估；圖 41c。

1989 年起建立的八個測站收集的資料，列在圖 42-49，顯示八站平均 pH 值都相當高， 5.5 到 6.50 之間，表示這些地區並沒有酸化現象發生。除了新竹、宜蘭的 pH 在逐年下降外，其餘六站 pH 都在慢慢上升 — 酸性在減弱中。值得重視的是新竹 pH 下降的速度非常快，每年 0.52 ± 0.28 。硫酸鹽平均值從阿里山站的 $1.68\text{ }mg/l$ 到旗山站的 $11.7\text{ }mg/l$ 。除了鞍部、台南、阿里山外，其餘站測到的硫酸鹽都在增加中，而又以宜蘭站增加最迅速 — 每年 $0.58 \pm 4.25\text{ }mg/l$ 。減少速率以臺南為最大 — 每年 $7.56 \pm 2.23\text{ }mg/l$ 。各站詳細變化列在表二中，以供參考。這些站由於資料收集時間尚短，無法確定這些變化趨勢是代表短時間內偶發的變化，或亦是真正長期的現象。

上述討論有關氣象局 16 地點各站 pH 及 SO_4^{2-} 量的變化及趨勢，就上列數句，我們可比較發現：

- (1) 台北、日月潭兩地不濱海之採樣點，其雨水之 pH 值低於 CO_2 在自然界中溶於水之中之 pH 值，較有可能發生酸雨情形。而濱海點之採樣點，受海水影響很大，而所測得雨水之 pH 平均值均高於 CO_2 溶於水中之 pH 值，故較不可能有酸雨情形。而從 1972 - 1992 年全部數據之變化情形，則可發現自 1986 年附近至 1992 年，雨水中之 pH 值及 SO_4^{2-} ，除高雄、基隆兩地外，均有下降趨勢。但台東在 1986 年有上升趨勢，為較特殊之情形。一般而言，在雨水之 pH 值平均值變化，以冬季幾個月較高，夏季幾個月 pH 值低。
- (2) 在台東、高雄、彭佳嶼等地雨水巾，含 SO_4^{2-} 繩子之濃度較高，基隆、台北、恆春則為次高地區。花蓮、日月潭則較低。由此看出濱海點與內陸點無明顯差異。若就月平均值而言，一般在日月潭以北（三彭佳嶼、基隆、台北），最高值出現之月份不一致，但高雄、恆春、花蓮、台東在冬季有最高值出現。而全部採樣點在夏季中，各有月份平均之最低點產生，與 pH 月變化相當時台、就年度趨勢而言台北、高雄、花蓮、台東等地，在 1986 年後有下降趨勢。
- (3) 分析各採樣點雨水巾含 Cl^- 繩子濃度，以彭佳嶼之 $53.30 \pm 35.45\text{ }mg/l$ 最高，而基隆、高雄、花蓮、台東 $11.07 \pm 11.89 \sim 17.90 \pm 22.63\text{ }mg/l$ 次之。台北、巨尹潭、恆春均低於 $10\text{ }mg/l$ ，全部採樣點在 1972 - 1992 年間無明顯之上升或下降之變化趨勢。而月平均值中沒有相同出現最高值之月份，而在春季，當有該地區月份平均之最低點情形。
- (4) 海水之 pH 值，全部採樣點在 7.35 ± 2.10 至 7.81 ± 3.83 間，以基隆最高，台東最低。在 1977 ~ 1991 年間，基隆為下降，而恆春、台東兩地則有上升現象。海水中之 SO_4^{2-} 濃度沒有特定最高濃度出現之月份，而在夏末秋初時則有較低之濃度，海水中 Cl^- 繩子濃度與 SO_4^{2-} 繩子濃度相同，沒有相同高濃度之月份，但 7、8、9 月份中均有最低值產生。

以上氣象局資料是否具代表性？根據呂世宗等人全省酸雨研究（呂世宗等，1977）發現台北地區雨水之 pH 值最低達 pH 值 3.8。1979 年孫培章、吳瑞 調查台灣地區雨品質（孫培章等人，1980）。結果顯示台陽北部、嘉義、高達、屏東等地區雨水之 pH 值平均在 4.2 左右。1986 年鄭福田等人針對台灣地區雨水酸化作調查亦得 54%，雨水 pH 值低於大氣中 CO_2 溶於水中之 pH 值。依氣象局提供之數據，在 1986 年以前各地區 pH 平均值較上述各值都高出許多，換用不同 pH meter 後有數站數值迅速下降，很可能代表測度方法有系統性誤差。若以 1986 年以後數句為準，則變化趨勢應參照表一中下半數句。

檢驗資料好壞最容易的方式就是與其他研究所得相比較。台大環工研究所受環保署委託由 1990 年中起，在台灣各地觀測酸沉降變化。觀測地點計有：台中港、嘉義、蘿東、澎湖、台北、龜山、中壢、高雄小港、墾丁，及太麻里共十站。其中和中央氣象局觀測站相近的站有 4 站分別為 (a) 台北站，氣象局站位於板橋，而環工所站位於台大環工所系館頂樓。(b) 最南端氣象局站在恆春，而環工所在墾丁取樣。(c) 氣象局台東站與在太麻里環工所站比較，以及 (d) 氣象局嘉義站與環工所嘉義站比較。因為環工所觀測時間短，因此比較只用 1990 年到 1992 年兩種方式均有的觀測結果相互比較。圖 50 至圖 57 分別繪出比較期間中央氣象局及環工所所得的 pH 及 SO_4^{2-} 濃度變化，其中 SO_4^{2-} 濃度以 mg/l 為單位。表四列出這四個地方兩單位研究結果比較：

a. 台北：

圖 50, 51 分別為台北地區 pH 及 SO_4^{2-} 比較， pH 而言中央氣象局所得結果略偏高 0.5，由圖 50 也有類似結果。硫酸根濃度比較在圖 51。發現中央氣象局結果與台大而環工所得不分上下，以平均值而言，環工所得 6.41 ± 6.42 比氣象局所得 4.53 ± 2.25 高，原因是環工所有兩個非常突出的數字，影響平均數大小，並且由其標準差誤差大小，也可以看出數字本身變動大小。基本上 pH 值氣象局所得略高，而 SO_4^{2-} 濃度兩地所得結果一致。

b. 恒春：

圖 52, 53 分別代表在最南端兩單位所得 pH 與 SO_4^{2-} 濃度比較。以 pH 值而言，氣象局結果偏高許多，多 1 左右，相當於十倍多的氫離子； SO_4^{2-} 濃度相差不大，但由於兩單位各有資料不全，在比較上有些困難。

c. 台東：

除了氣象局站，及環工所測站外，另有台灣電力公司在太麻里有收集酸沉降資料。環工所與台電站所得 pH 結果頗為相近，在 5.0 左右，氣象局測站則偏高，多 1.5 左右，見圖 54。硫酸鹽含量部分時間相符，但台東氣象站值有一些突出的數值，所以平均值 10.7 ± 11.7 較其他兩單位平均值高出許多， 2.73 到 3.58 ，見圖 55。這些差異或許因測站地點距海遠近不同，受海沫影響不一所致。

d. 嘉義：

圖 56, 57 分別表示比較氣象局站及台大環工所在嘉義雨水的 pH 及硫酸根含量。圖 56 顯示中央氣象局站有較低的 pH 值，平均值為 4.84 ± 0.47 ，而環工所所得為 6.21 ± 0.92 。環工所的月平均結果較與空氣中 CO_2 饋和的雨水酸性低。因為地處較內陸區域，不應受到海水的影響，除非有大量鹼性物質在附近釋放，這項數字極高，同時與其他地點觀測結果比較，標準誤差大，表示數字變異很大。氣象局的結果應較為可靠。硫酸鹽的比較在圖 57，氣象局站與環工所所得結果互有高低，平均結果相似，分別為 3.19 ± 1.75 及 $3.30 \pm 1.33 \text{ mg/l}$ 。

以上比較發現氣象局資料與其他單位所得雨水結果差異性頗大，並且另兩單位所得結果，在誤差容許範圍內，可說做一致，pH 在 4 左右。而氣象局結果所得 pH 值偏高在 5 ~ 6 上下，依此觀之全島幾無酸雨現象，與一般認知稍有不同。而其中台北地區，標準誤差特別高，在樣本收集或測度方法上可能有問題。海水分析方面，結果與一般海水為弱酸性相符，其中基隆的標準誤差太大，樣本收集或測度或許有問題。

為何同樣方式分析，雨水結果與其他人差別很大而海水資料不會？是否由此可斷定別人資料不可靠？不一定，因為海水含豐富的鹽類，本身即為緩衝液之一種，不易受外界因素改變之影響。是以海水資料比較正確，並不表示雨水結果正確。目前僅就氣象局資料與其他兩單位研究結果對比，顯示氣象局資料與其他結果有明顯差距。至於差距是如何造成，原因安在，在確實釐清前應暫緩雨、海水內容分析，以免徒然浪費精力。

四. 結論

氣象局共計有 10 站的資料，其中 7 站觀測時間較長，均有十年以上資料。另外彭佳嶼斷續續續由 1973 年起有些觀測，其餘 8 站觀測均在 1988 年以後才開始。資料較短。長時間的資料可能有的疑點如：台北、基隆、日月潭三地在 1986 年 pH 值有明顯突然下降的情況。一個可能是這是實在的趨勢變化，另一可能是因為人為因素——量度儀器的改變。過去記錄也顯示 pH Meter 在 1986 年換不同儀器。但這 pH 突降的現象在其他五站並未發生。究其原因，一個可能是換儀器並不影響任何觀測，另一原因是其餘五站均近海，收到的雨水受海水影響很大，本身含高鹽解質，pH 值不易受環境改變。但若以硫酸根含量來看基隆所測得結果不比遼寧花蓮低。若僅以 1986 年以後相比，恆春的結果與日月潭台北相近，這也不大能解釋為濱海地區有較高的離子含量。

若不考慮 1986 年以前資料，我們發觀台北、基隆、日月潭三地 pH 值較低，均在 4.6 ~ 4.7 之間，而酸化程度正在慢慢緩和中，硫酸根的量也漸漸減低中。遼海數站 pH 值不論是否在 1986 年前或後收集，並沒有太大差別。pH 均在 6.0 到 6.7 之間，表示這些地區受海沫影響很大。

比較氣象局觀測與台大環工所在鄰近地區收集資料，顯示部分地區 pH 差別在 0.5 到 1.5 之間，差異可能因觀測地點距海遠近不一，受海水深淺所致。或由於資料收集時間不一致，使得比對不易。其中台東、恆春等地測站結果與其他濱海站相似。台大環工所所得似乎過低。而日月潭與嘉義站之比較，氣象局站所得極度可靠。硫酸鹽含量分析上，兩單位所得差距不如 pH 值大，大多數情況頗一致。

建議：雨水部份：當場取樣分析的結果 - 如台北站，所得的 pH 及 SO_4^{2-} 與台大環工所測得結果相近似，顯示結果有相當不錯的可信度。但是經收集、處理後，再送

回本部分析的資料，則與其他單位量度結果有較大差距。由於酸沉降本身變化很大，時間過去，如何辨定那一組資料較接近實際，非常困難。由於中央氣象局的資料，可能經過許多不同人，依不完全一致的方式處理分析，很可能是該差較大的一方。但若因此遽然中斷累積二十多年的資料，十分可惜。建議直接量度的兩站：台北及日月潭繼續進行觀測，其他站雨水檢測可以停止。

海水部份：由於沒有其它資料可供比對，數句好壞不容易判別。

在往後觀測，應該每年提供趨勢分析，與過去變化之比較，以便確實了解酸沉降變化。另外應該密切注意其他單位同時可能進行的類似研究，隨時互相比對，確保數據的可信度。

致謝：謝謝丁淑玲、楊勝議兩位收集資料、繪圖、幫忙打字、安排等。感謝台大環工所鄭福田教授提供資料比對；並謝謝中央氣象局 CWBS2-2A1-UU 計劃支持。

五. 參考資料：

鄭福田，1986.06，Preliminary study of Acid Rain in Taipei
(paper presented at 1986 Air Pollution Control Association Annual Meeting).

鄭福田，蔣本基等，1985.10，台灣地區酸雨調查研究(一)

鄭福田，蔣本基：75 年 9 月 台灣地區酸雨調查研究，台電研究計劃

鄭福田，1987.07：Characteristic Study of Rain Water in Taiwan
(paper presented at 1987 Air Pollution Control Association Annual Meeting, New York, USA).

鄭福田，1991.05 台灣地區酸性沉降物之調查研究(第二年)

(台灣地區酸性沉降調查評估研究計畫子題(二)，
EPA-80-F3F1-09-26)

Hidy, G. M. [1984] "Source - Receptor relationships for acid deposition: Pure and simple?" J. Air Pollution Control Assoc. 34 518-531

Houghton J. T., B. A. Callander, and S. K. Varney [1992]

"Chimate change 1992, the supplementary report to the IPCC scientific assessment" Inter-governmental Panel on Climate Change Cambridge University Press.

Table 一. 中央氣象局各站蒐集雨水之 pH 與 SO_4^{2-} 平均值及標準誤差

採樣時間	地點	pH ± 標準誤差 (樣本次數)*	SO_4^{2-} ± 標準誤差 (樣本次數)*
1972-1991 1986-1991	臺北	5.67 ± 0.02 (231) 6.46 ± 0.56 (67)	20.16 ± 22.74 (165) 12.10 ± 11.75 (57)
1977-1991 1986-1991	基隆	5.63 ± 1.03 (166) 4.03 ± 0.75 (64)	30.66 ± 22.24 (169) 17.12 ± 21.92 (58)
1972-1991 1986-1991	日月潭	5.77 ± 0.94 (207) 4.70 ± 0.64 (65)	10.38 ± 11.44 (56)
1977-1991 1986-1991	高雄	6.02 ± 0.48 (128) 6.47 ± 0.52 (52)	51.36 ± 38.00 (123) 44.76 ± 44.62 (43)
1977-1991 1986-1991	恆春	6.08 ± 0.54 (99) 6.47 ± 0.50 (37)	33.29 ± 27.72 (93) 10.67 ± 9.14 (27)
1977-1991 1986-1991	花蓮	6.69 ± 0.50 (142) 6.50 ± 0.46 (60)	33.26 ± 28.38 (141) 15.62 ± 16.36 (53)
1973-1991 1988-1991	彭佳嶼	6.46 ± 0.54 (47) 6.47 ± 0.57 (38)	38.35 ± 28.66 (25)
1977-1991 1986-1991	臺東	6.72 ± 0.62 (152) 6.46 ± 0.67 (65)	41.67 ± 36.64 (138) 10.25 ± 10.32 (61)

* 計算時資料均換算月平均值，此處該本數是具有資料的月份數。

Table 一 繼. 中央氣象局各站蒐集雨水之 pH 與 SO_4^{2-} 平均值及標準誤差.

採樣時間	地點	pH ± 標準誤差 (樣本次數)*	SO_4^{2-} ** ± 標準誤差 (樣本次數)
1989-1991	鞍 部	5.75 ± 0.29 (25)	5.34 ± 2.6 (24)
1989-1991	新 竹	5.51 ± 0.75 (23)	10.35 ± 10.23 (23)
1989-1991	宜 蘭	6.42 ± 0.18 (23)	8.41 ± 12.06 (23)
1989-1991	新 港	5.75 ± 0.65 (24)	3.21 ± 1.84 (23)
1989-1991	台 南	5.5 ± 0.43 (25)	6.85 ± 3.65 (13)
1989-1991	台 中	6.05 ± 0.35 (32)	8.2 ± 9.17 (31)
1989-1991	阿 里 山	6.02 ± 0.32 (26)	1.68 ± 0.97 (26)
1989-1991	嘉 義	6.56 ± 0.19 (25)	11.7 ± 6.74 (24)

* 計算時資料均換做月平均計. 此處樣本次數是有資料的月份數.

** 此處硫酸根所使用單位為 mg/l .

Table 二. 氣象局各站雨水之 pH 與 SO_4^{2-} 的逐年趨勢.

採樣時間	地點	pH *	SO_4^{2-} *
1972-1991 1986-1991	臺 北	-0.0595 ± 0.0102 (0.1298) 0.0774 ± 0.0416 (0.0506)	-3.204 ± 0.372 (0.3128) -2.673 ± 1.093 (0.0972)
1972-1991 1986-1991	基 隆	-0.1160 ± 0.0176 (0.2092) -0.0779 ± 0.0596 (0.0268)	-1.937 ± 0.362 (0.1463) -6.555 ± 1.734 (0.2019)
1972-1991 1986-1991	日 月 潭	-0.0768 ± 0.0104 (0.2091) -0.0136 ± 0.0497 (0.0012)	-3.194 ± 1.047 (0.1470)
1977-1991 1986-1991	高 雄	-0.0388 ± 0.0094 (0.1205) -0.0551 ± 0.0438 (0.0307)	-0.945 ± 0.773 (0.0122) -8.809 ± 4.537 (0.0858)
1977-1991 1986-1991	恆 春	-0.0297 ± 0.0118 (0.0610) 0.1197 ± 0.0567 (0.1131)	-2.908 ± 0.572 (0.2209) -2.546 ± 1.431 (0.1124)
1977-1991 1986-1991	花 蓮	-0.0260 ± 0.0092 (0.0538) 0.1163 ± 0.0347 (0.1620)	-2.533 ± 0.466 (0.1752) -4.272 ± 1.417 (0.1513)
1973-1991 1985-1991	彭 佳 嶼	-0.0055 ± 0.0137 (0.0035) -0.1389 ± 0.0599 (0.1301)	-26.481 ± 7.111 (0.3701)
1977-1991 1986-1991	臺 東	-0.0607 ± 0.0108 (0.1726) 0.0807 ± 0.0517 (0.0372)	-4.344 ± 0.612 (0.2702) -5.224 ± 1.252 (0.2279)

* 表中所列數句為在取樣時段內所有月平均資料與年作線性回歸得到的斜率, 及

斜率的標準誤差. 括號中數句代表線性回歸所得相關係數平方 (square of correlation coefficient, r^2).

Table 二 繼. 氣象局各站雨水之 pH 與 SO_4^{2-} 的逐年趨勢.

採樣時間	地點	pH *	SO_4^{2-} *
1989-1991	鞍 部	0.318 ± 0.0747 (.4407)	-0.105 ± 0.941 (.0006)
1989-1991	新 竹	-0.5198 ± 0.2779 (.1428)	4.12 ± 3.68 (.0565)
1989-1991	宜 蘭	-0.0369 ± 0.0648 (.0152)	6.58 ± 4.25 (.1026)
1989-1991	新 港	0.4137 ± 0.2170 (.1418)	0.604 ± 0.698 (.0344)
1989-1991	台 南	0.0259 ± 0.0185 (.0786)	-7.56 ± 2.23 (.5114)
1989-1991	台 中	0.0004 ± 0.0145 (3.2E-6)	2.63 ± 0.943 (.2119)
1989-1991	阿 里 山	0.0175 ± 0.0130 (.0707)	-0.021 ± 0.039 (.0122)
1989-1991	嘉 義	0.0118 ± 0.0069 (.1113)	1.75 ± 2.28 (.0361)

* 表中所列數句為在取樣時段內所有月平均資料與年作線性回歸得到的斜率, 及

斜率的標準誤差. 括號中數句代表線性回歸所得相關係數平方 (square of correlation coefficient, r^2).

Table 三. 中央氣象局海水各項特性分析.

採樣時間	地點	pH (\pm 標準誤差)	SO_4^{2-}	Cl^-	樣本數
1972-1989	基隆	7.81 (3.83)	16.01 (5.16)	2.15 (0.70)	
1977-1989	高雄	7.53 (0.55)	20.39 (4.67)	2.69 (0.37)	
1977-1991	恆春	7.45 (0.83)	2.77 (0.34)	21.19 (3.86)	
1977-1991	花蓮	7.58 (0.70)	20.06 (4.02)	2.64 (1.87)	
1977-1991	臺東	7.35 (2.10)	19.71 (4.78)		

表四. 1990-1992 年 6 月中央氣象局站與其他單位在鄰近地區觀察雨水結果的比較.

地點	研究單位	pH	SO_4^{2-} (mg/l)
台北	CWB *	4.98 \pm 0.54	4.53 \pm 2.25
	NTU-en **	4.48 \pm 0.36	6.41 \pm 6.42
台東	CWB *	6.03 \pm 0.60	10.70 \pm 11.67
	NTU-en **	5.05 \pm 0.38	2.77 \pm 1.20
	TPC ***	5.07 \pm 0.54	3.58 \pm 2.63
恆春	CWB *	6.63 \pm 0.60	4.08 \pm 3.94
	NTU-en **	5.57 \pm 0.49	4.96 \pm 7.53
嘉義	CWB *	6.56 \pm 0.19	11.7 \pm 6.74
	NTU-en **	6.21 \pm 0.92	3.36 \pm 1.33

* CWB: 代表中央氣象局站 (Central Weather Bureau), 其中恆春站這段時間內, 只有 4 筆平均資料; 台東部份硫酸根數值變動很大, 幾筆異常大的數目影響平均數.

** NTU-en: 台大環工所研究, 其中台北站為台大環工所系館樓頂, 台東在太麻里, 墾丁與恆春作比較

*** TPC: 台電公司 (TAI Power Company) 太麻里觀測.

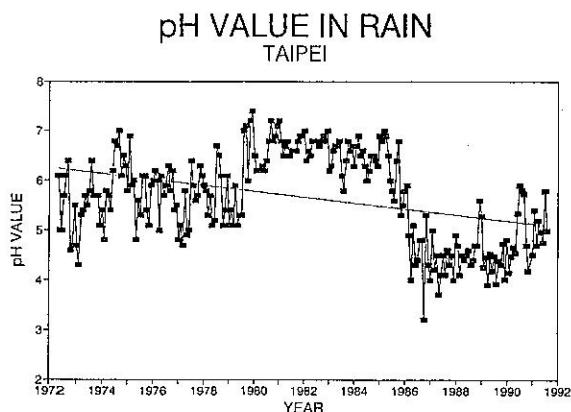


圖 1

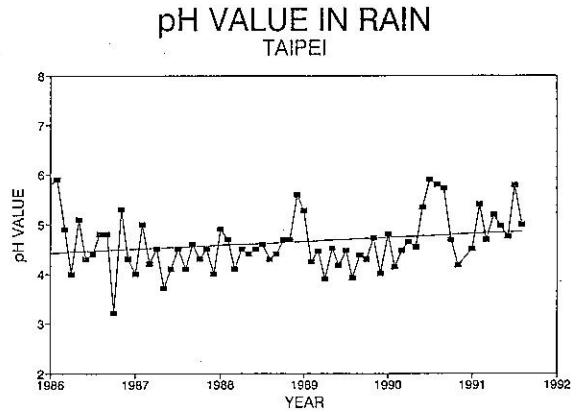


圖 2

pH VALUE IN RAIN
TAIPEI 1972 - 1991

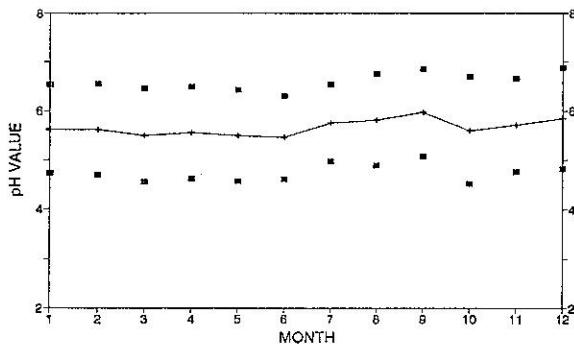


圖3

pH VALUE IN RAIN
KEELUNG 1973 - 1991

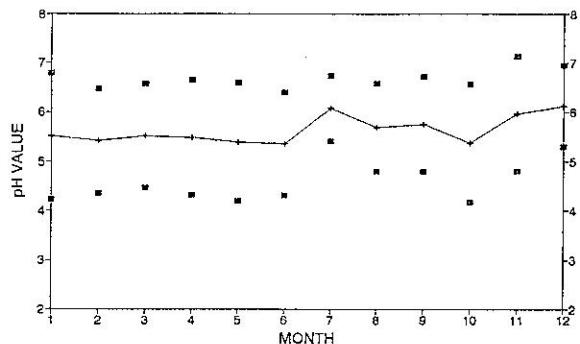


圖6

pH VALUE IN RAIN
KEELUNG

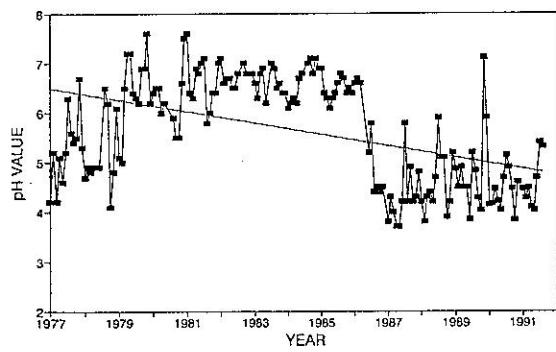
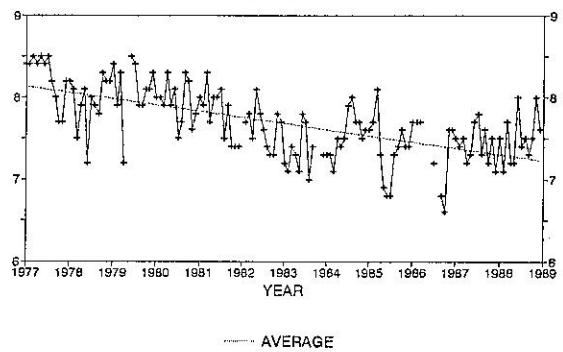


圖4

pH VALUE IN SEAWATER
KEELUNG



— AVERAGE —

圖7

pH VALUE IN RAIN
KEELUNG

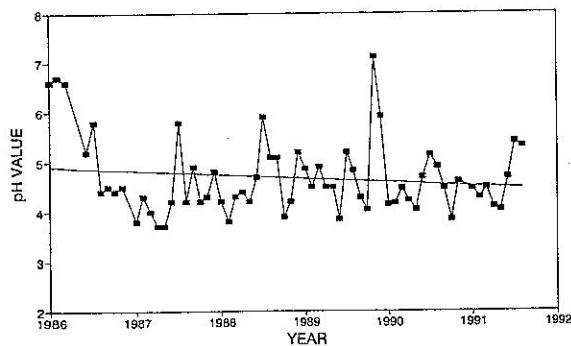


圖5

pH VALUE IN SEAWATER
KEELUNG 1977-1988

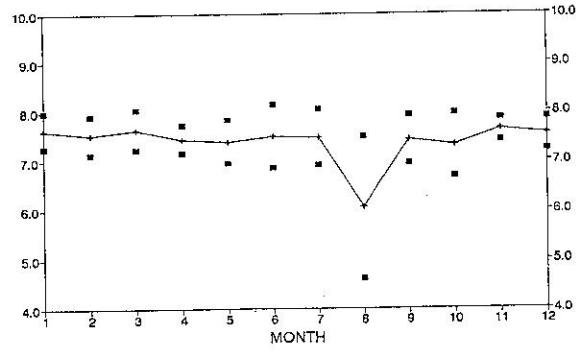


圖8

pH VALUE IN RAIN
SUN MOON LAKE

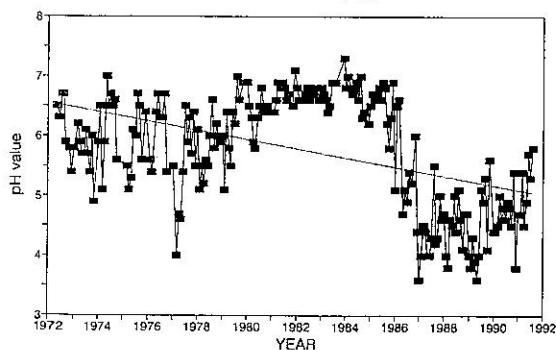


圖9

pH VALUE IN RAIN
KAOSHIUNG

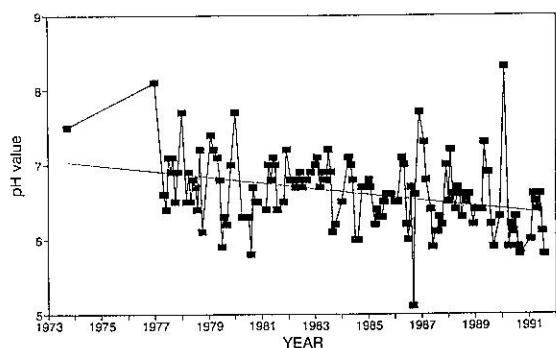


圖12

pH VALUE IN RAIN
SUN MOON LAKE

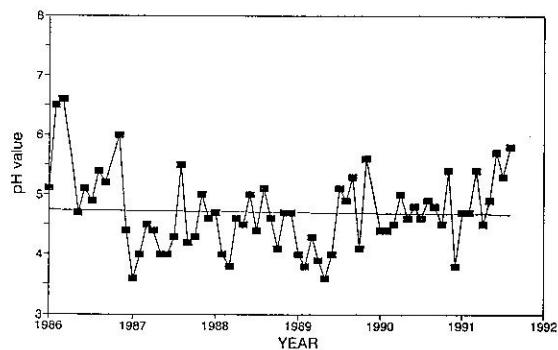


圖10

pH VALUE IN RAIN
KAOSHIUNG

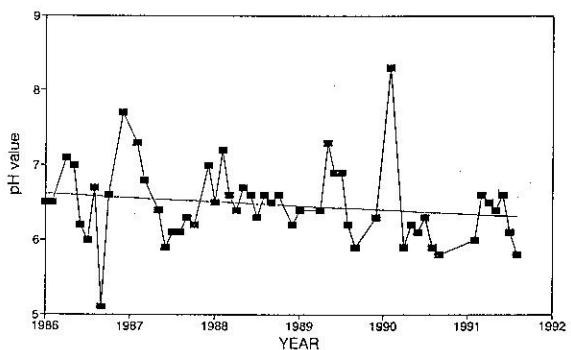


圖13

pH VALUE IN RAIN
SUN MOON LAKE 1972 - 1991

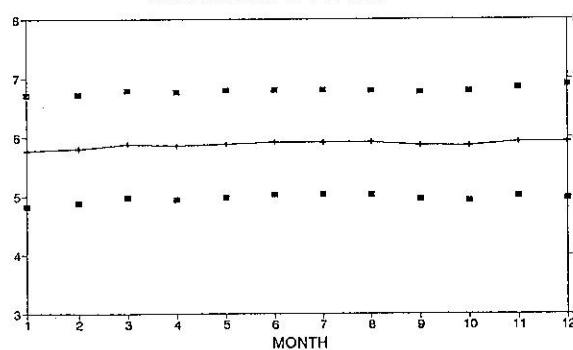


圖11

pH VALUE IN RAIN
KAOSHIUNG 1973 - 1991

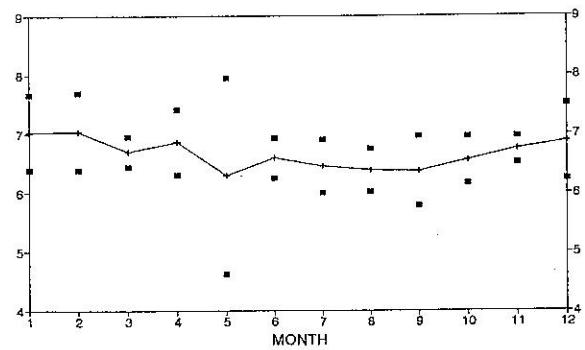


圖14

pH VALUE IN SEA WATER
KAOSHIUNG

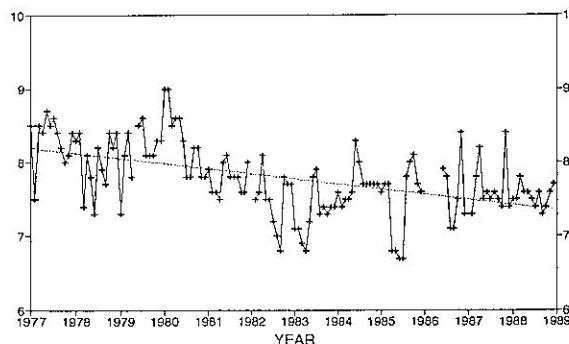


圖15

pH VALUE IN RAIN
HENGCHUN

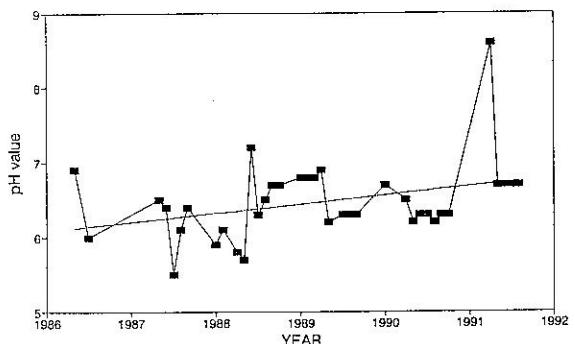


圖18

pH VALUE IN SEA WATER
KAOSHIUNG 1977-1988

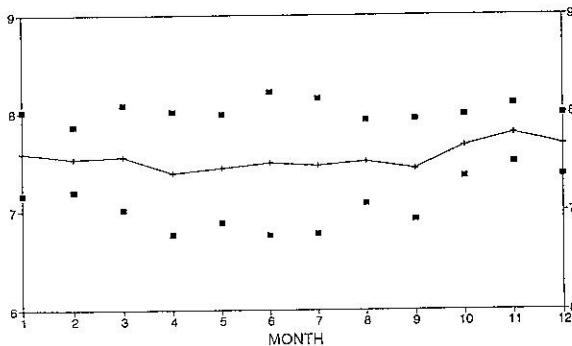


圖16

pH VALUE IN RAIN
HENGCHUN 1973 - 1991

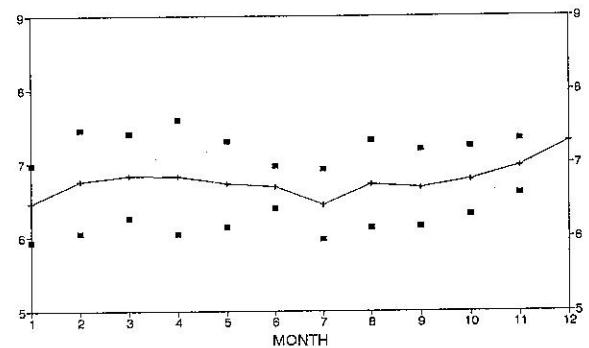


圖19

pH VALUE IN RAIN
HENGCHUN

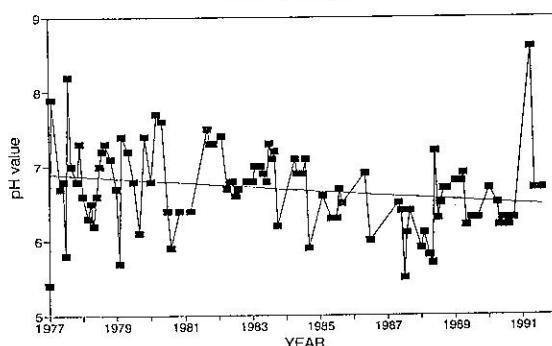


圖17

pH VALUE IN SEAWATER
HENGCHUN

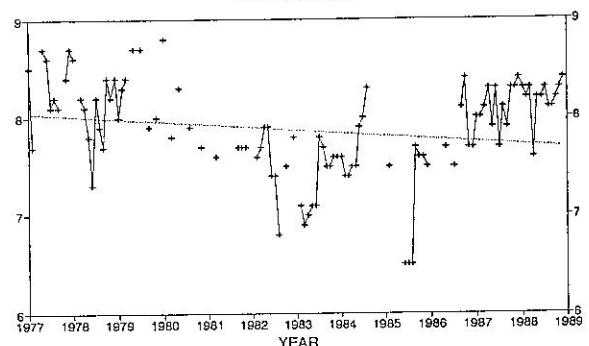


圖20

pH VALUE IN SEAWATER
HENGCHUN 1977-1988

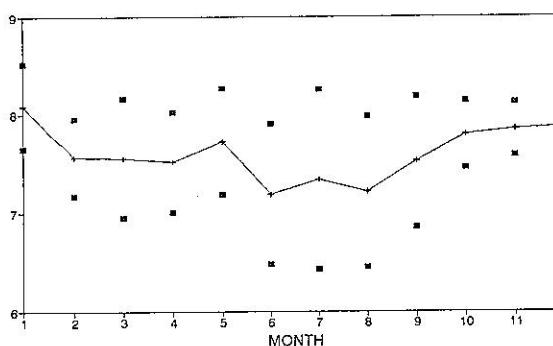


圖 21

pH VALUE IN RAIN
HWALIAN 1973 - 1991

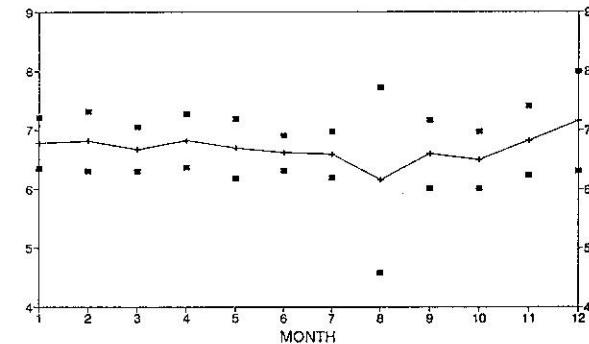


圖 24

pH VALUE IN RAIN
HWALIAN

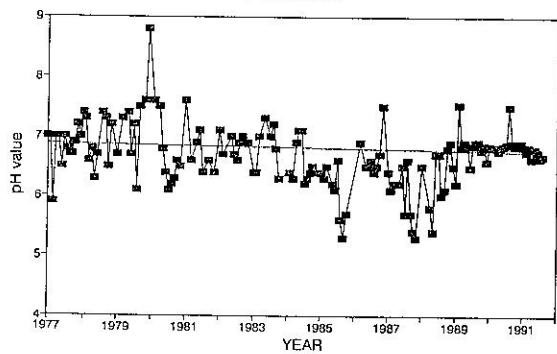


圖 22

pH VALUE IN SEAWATER
HWALIAN

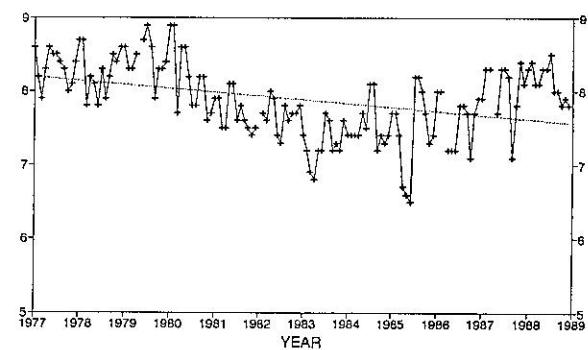


圖 25

pH VALUE IN RAIN
HWALIAN

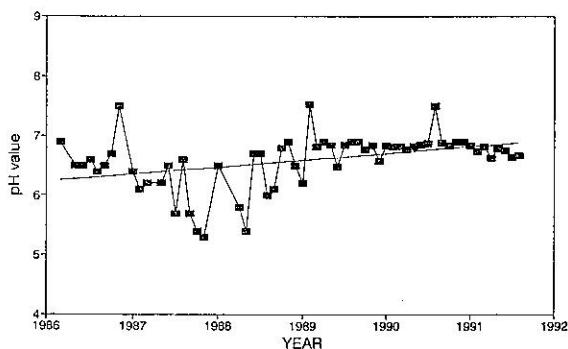


圖 23

pH VALUE IN SEAWATER
HWALIAN 1977-1988

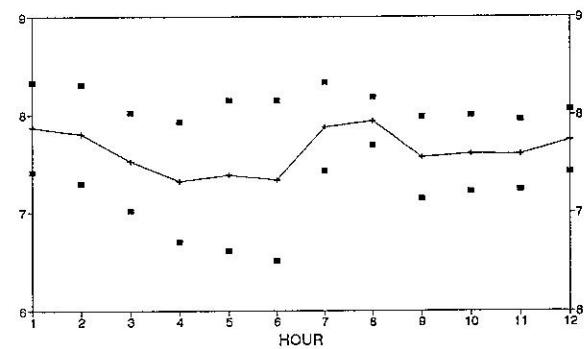


圖 26

pH VALUE IN RAIN
TAITUNG

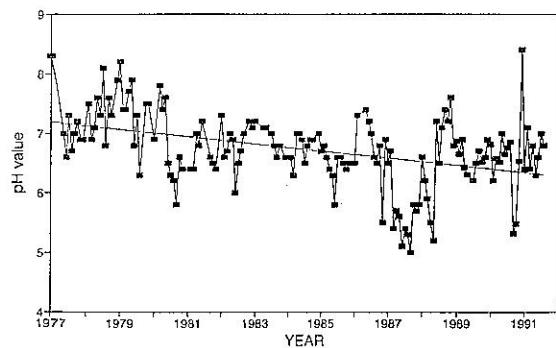


圖 27

pH VALUE IN RAIN
TAITUNG

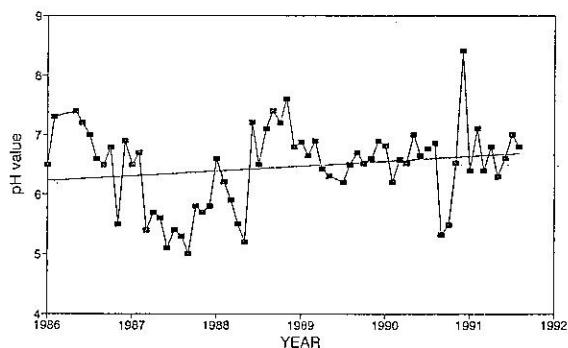


圖 28

pH VALUE IN RAIN
TAITUNG 1973 - 1991

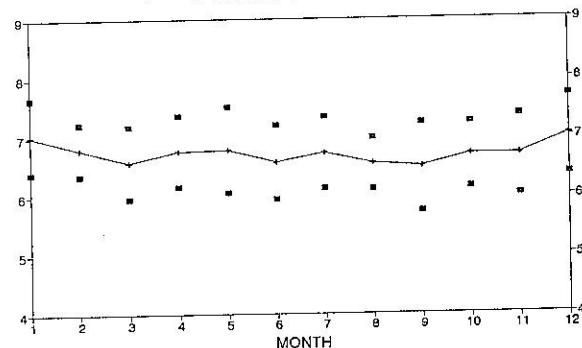


圖 29

pH VALUE IN SEAWATER
TAITUNG

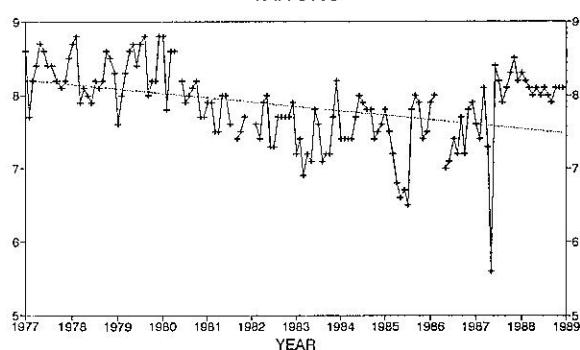


圖 30

pH VALUE IN SEAWATER
TAITUNG 1977-1988

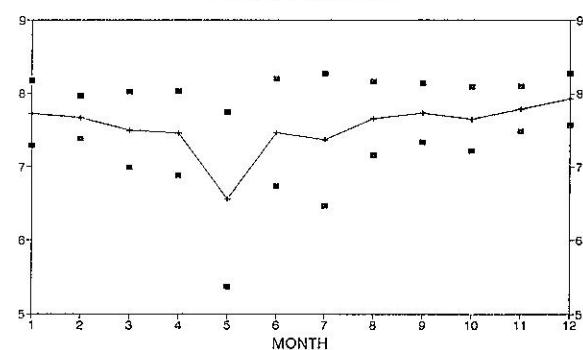


圖 31

pH VALUE IN RAIN
PENG JIA YU

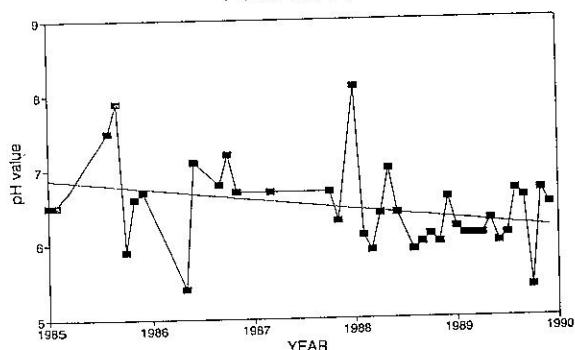


圖 32

SO₄(-2) IN RAIN
KEELUNG

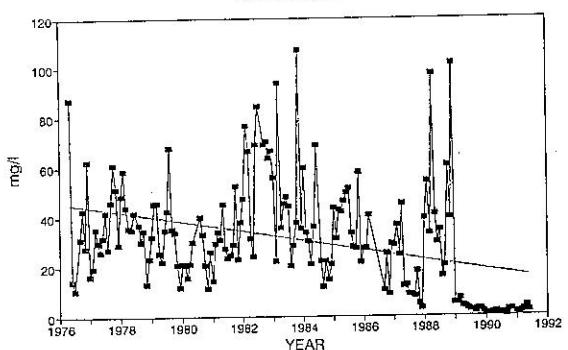


圖 35a

pH VALUE IN RAIN
PENG JIA YU 1973, 1985 - 1989

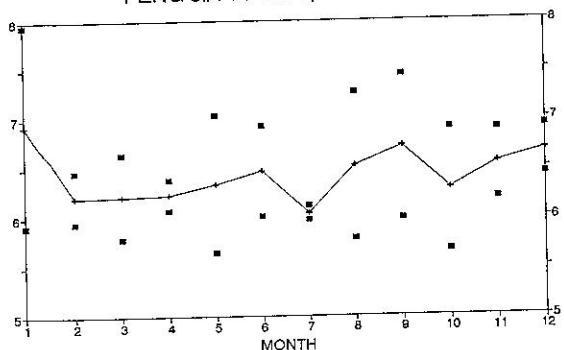


圖 33

SO₄(-2) IN RAIN
KEELUNG 1976 - 1991

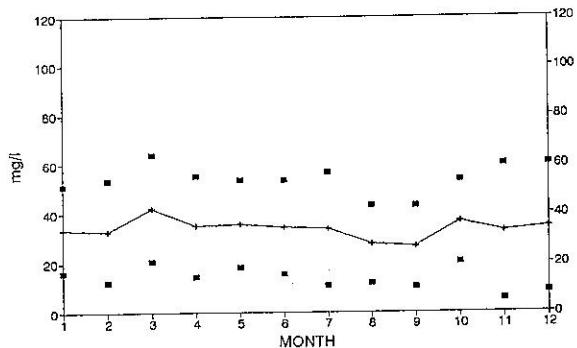


圖 35b

SO₄(-2) IN RAIN
TAIPEI

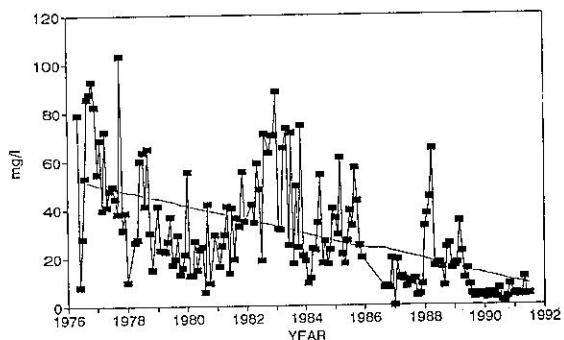


圖 34

SO₄(-2) IN SEAWATER
KEELUNG

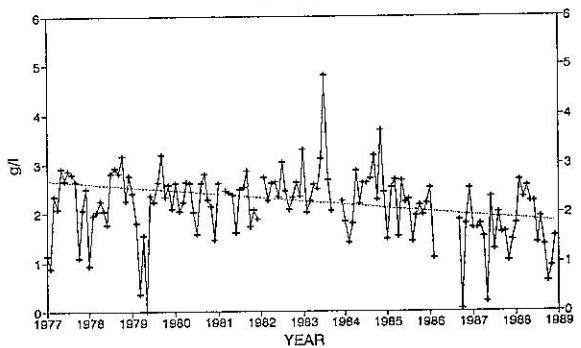


圖 35c

SO₄(-2) IN RAIN
SUN MOON LAKE

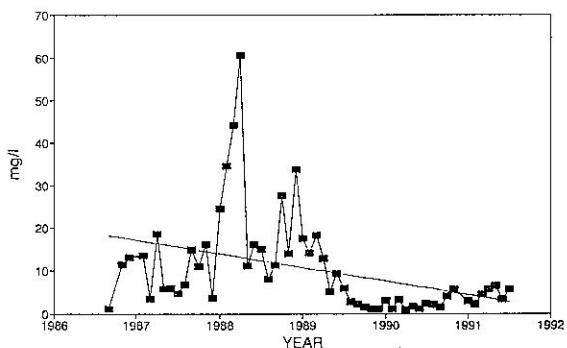


圖 36a

SO₄(-2) IN RAIN
KAOSHIUNG

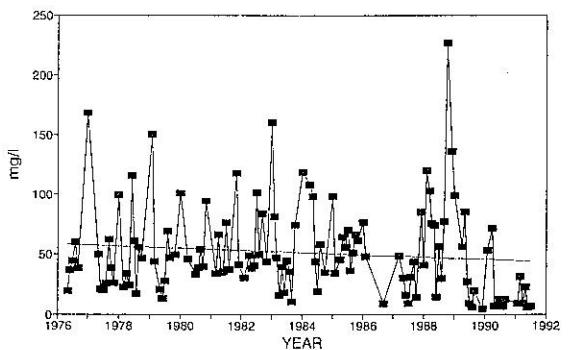


圖 37a

SO₄(-2) IN RAIN
SUN MOON LAKE 1986 - 1991

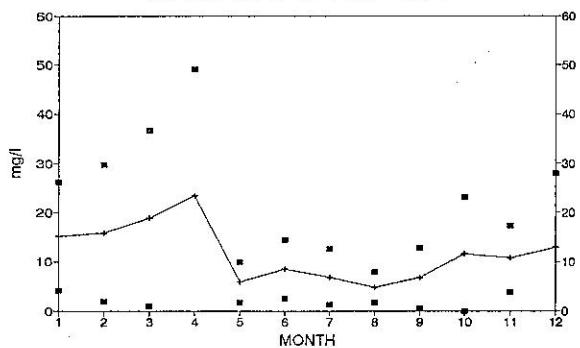


圖 36b

SO₄(-2) IN RAIN
KAOSHIUNG 1976 ~ 1991

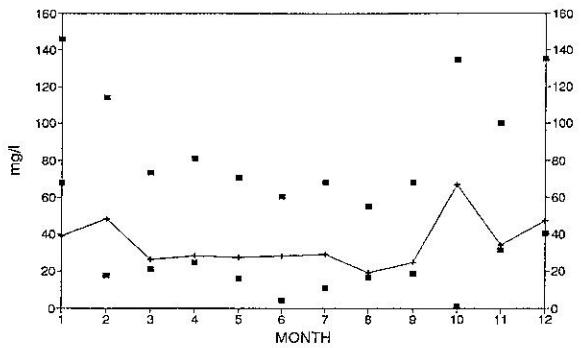


圖 37b

SO₄(-2) IN SEAWATER
KAOSHIUNG

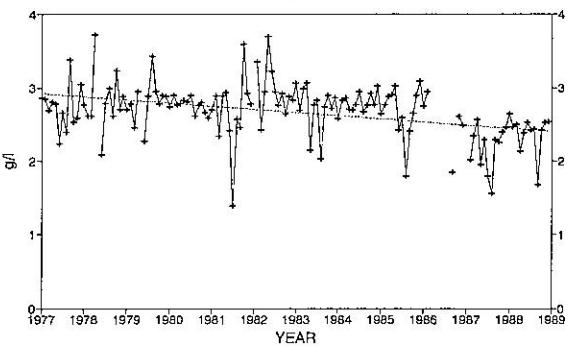


圖 37c

SO₄(-2) IN RAIN
HENGCHUN

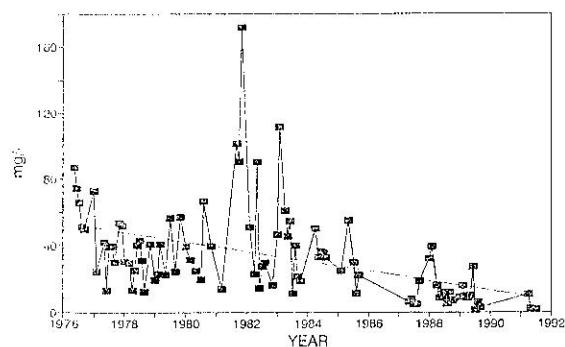


図38a

SO₄(-2) IN RAIN
HENGCHUN 1976 - 1991

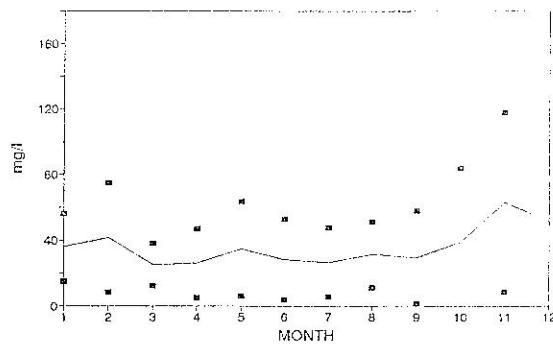


図38b

SO₄(-2) IN SEAWATER
HENGCHUN

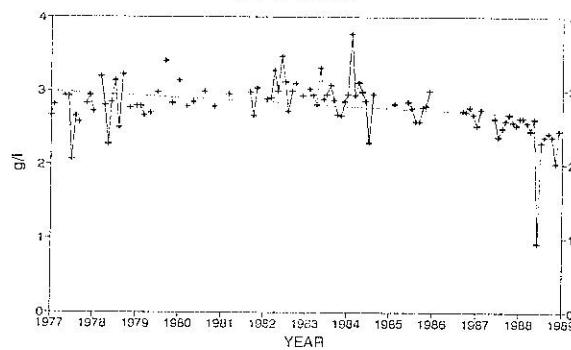


図38c

SO₄(-2) IN RAIN
HWALIAN

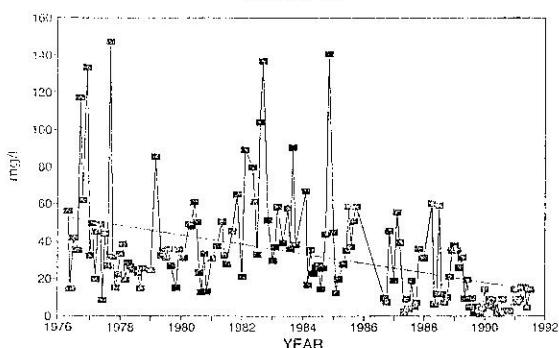


図39a

SO₄(-2) IN RAIN
HWALIAN 1976 - 1991

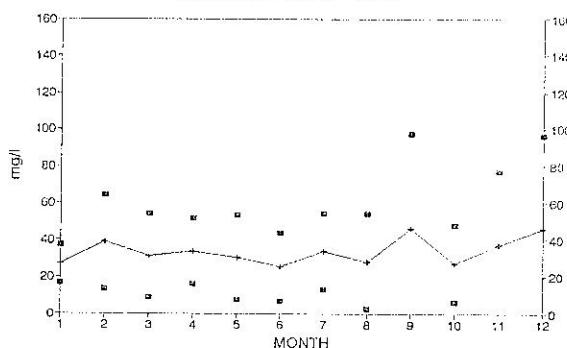


図39b

SO₄(-2) IN RAIN
TAITUNG

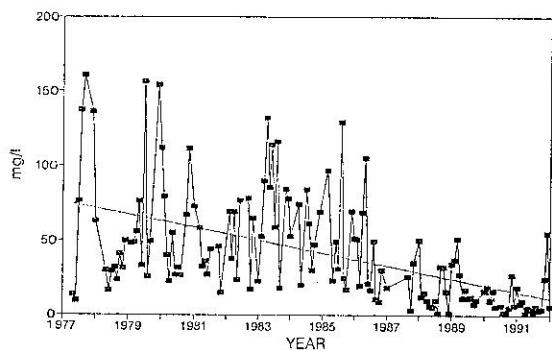


圖 40a

SO₄(-2) IN RAIN
PENG JIA YU

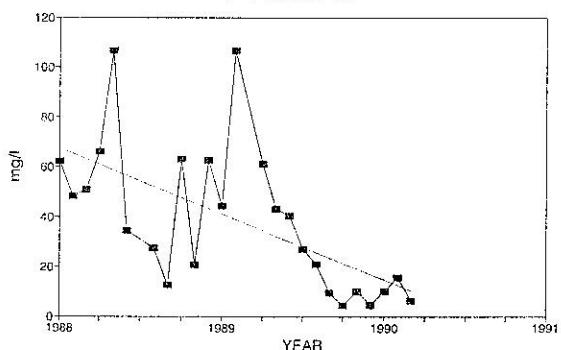


圖 41

SO₄(-2) IN RAIN
TAITUNG 1976 - 1991

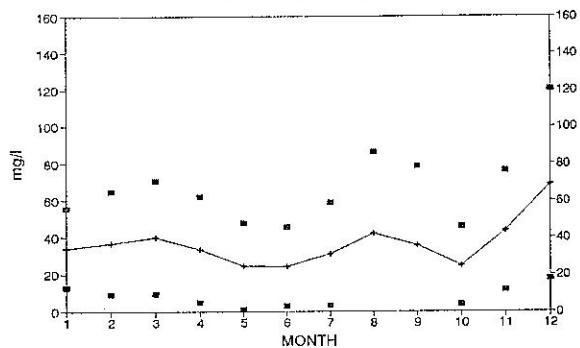


圖 40b

pH VALUE IN RAIN
AN PU

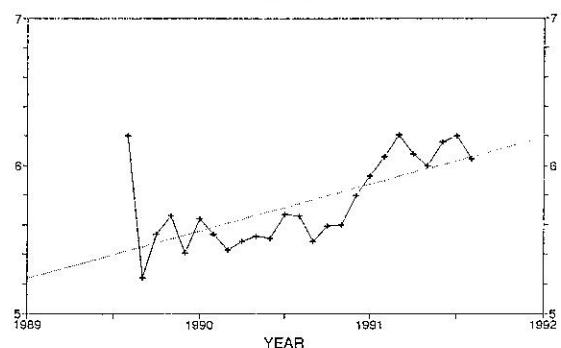


圖 42a

SO₄(-2) IN SEAWATER
TAITUNG

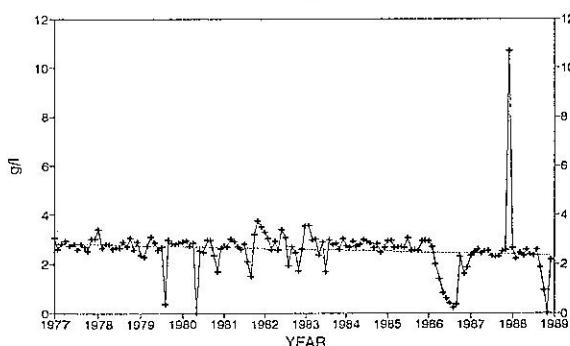


圖 40c

SO₄(-2) IN RAIN
AN PU

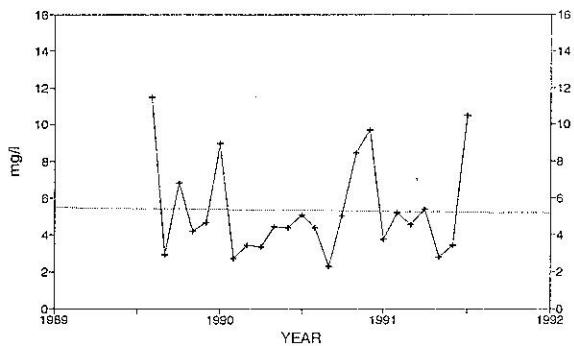


圖 42b

pH VALUE IN RAIN
HSINCHU

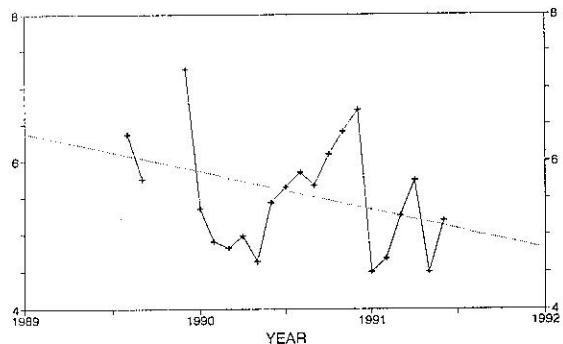


圖 43a

pH VALUE IN RAIN
TAICHUNG

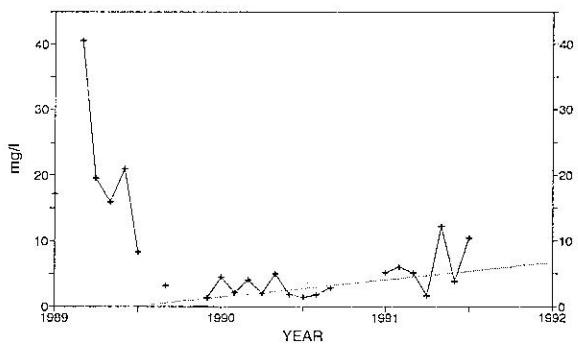


圖 44b

SO₄(-2) IN RAIN
HSINCHU

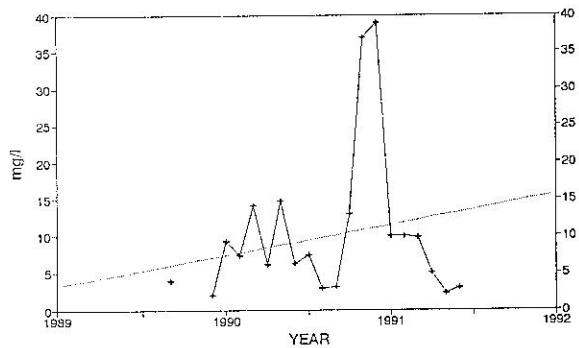


圖 43b

pH VALUE IN RAIN
CHIAYI

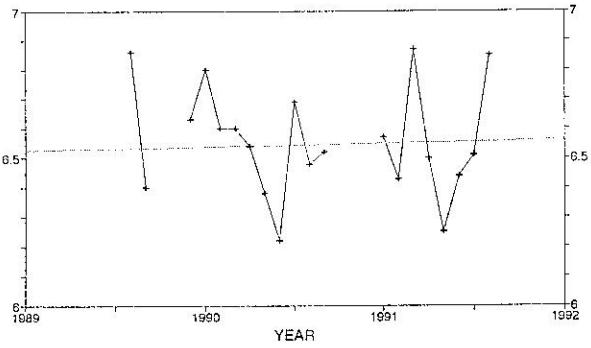


圖 45a

pH VALUE IN RAIN
TAICHUNG

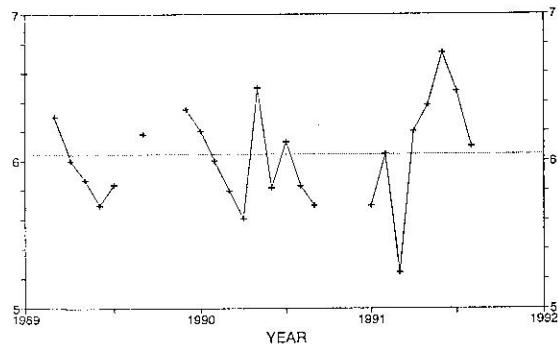


圖 44a

SO₄(-2) IN RAIN
CHIAYI

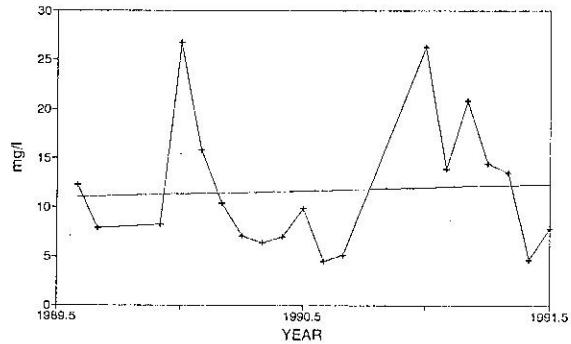


圖 45b

pH VALUE IN RAIN
ALISHAN

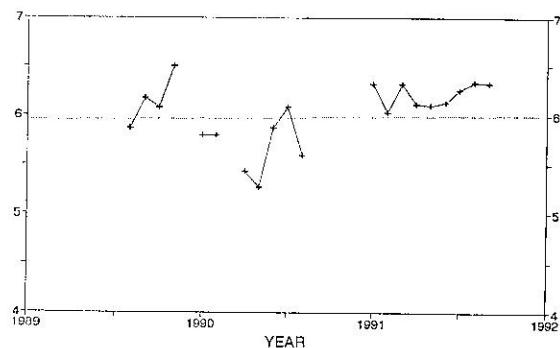


圖 46a

SO₄(-2) IN RAIN
TAINAN

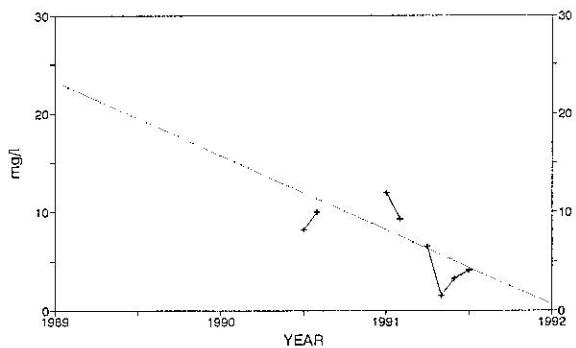


圖 47b

SO₄(-2) IN RAIN
ALISHAN

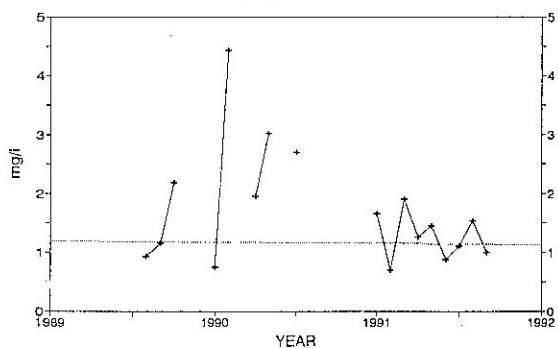


圖 46b

pH VALUE IN RAIN
HSINKANG

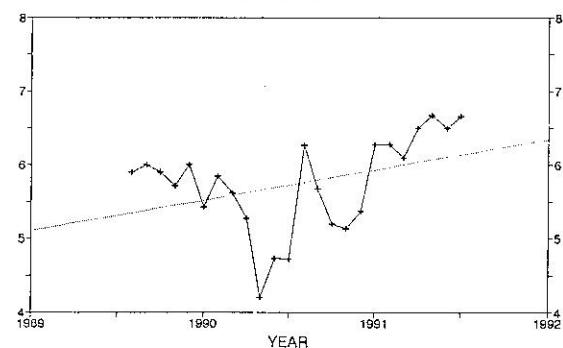


圖 48a

pH VALUE IN RAIN
TAINAN

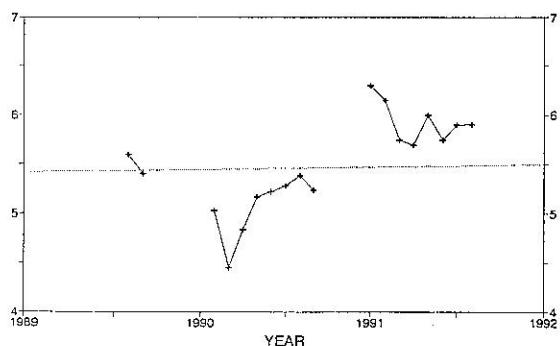


圖 47a

SO₄(-2) IN RAIN
HSINKANG

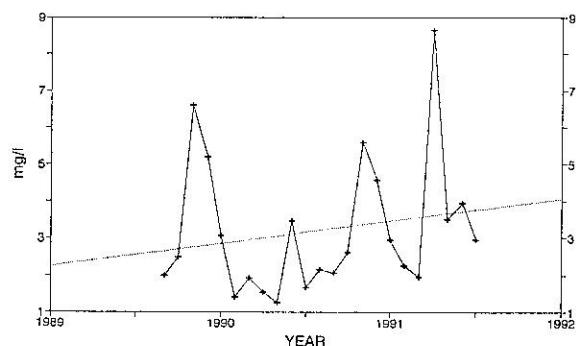


圖 48b

pH VALUE IN RAIN
ILAN

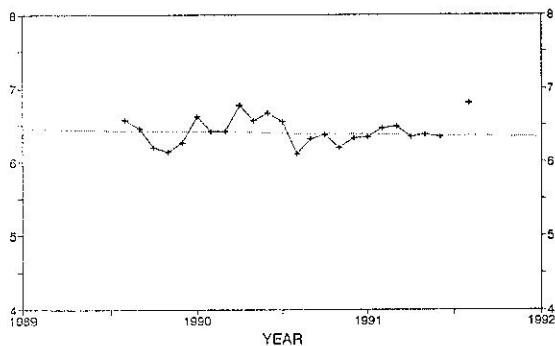


図49a

SO₄(-2) IN RAIN
TAIPEI

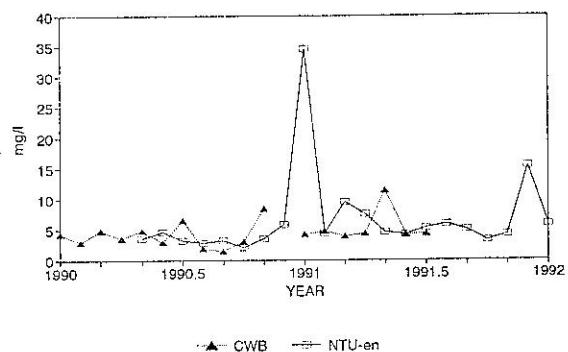


図51

SO₄(-2) IN RAIN
ILAN

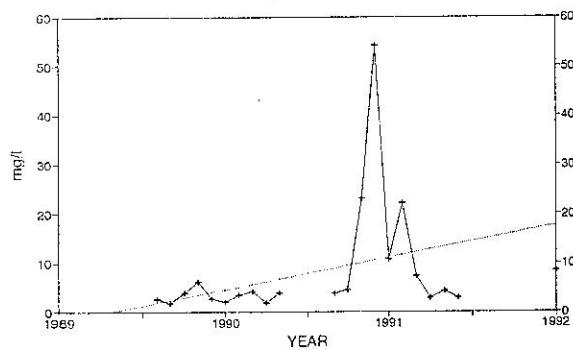


図49b

pH VALUE IN RAIN
HENGCHUN

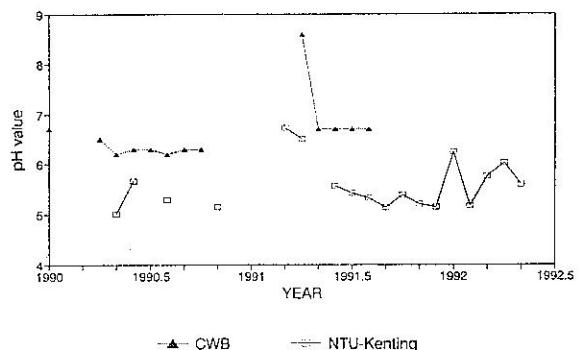


図52

pH VALUE IN RAIN
TAIPEI

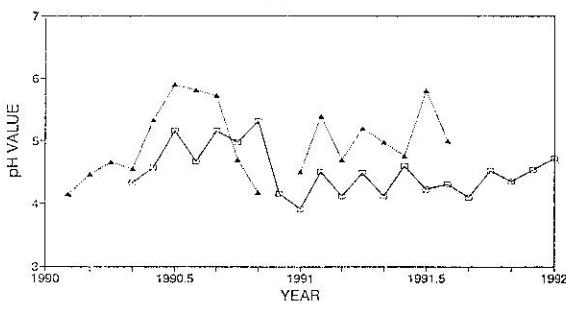


図50

SO₄(2-) in RAIN
HENGCHUN

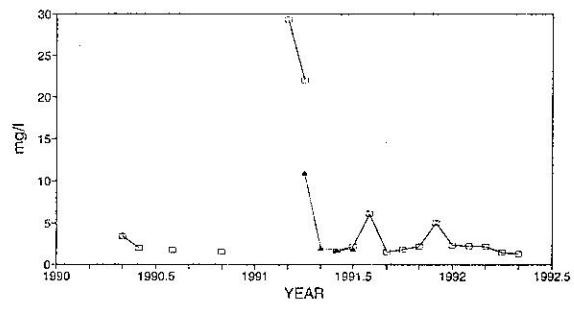


図53

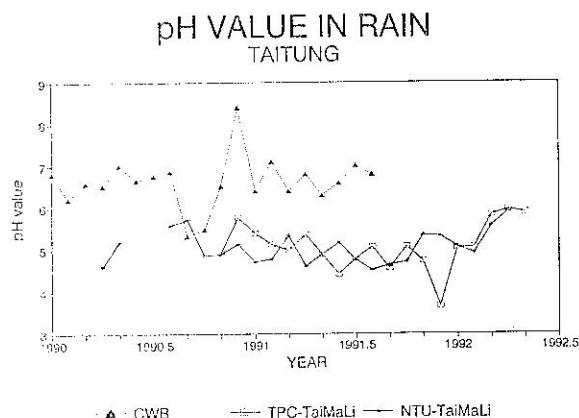


图 54

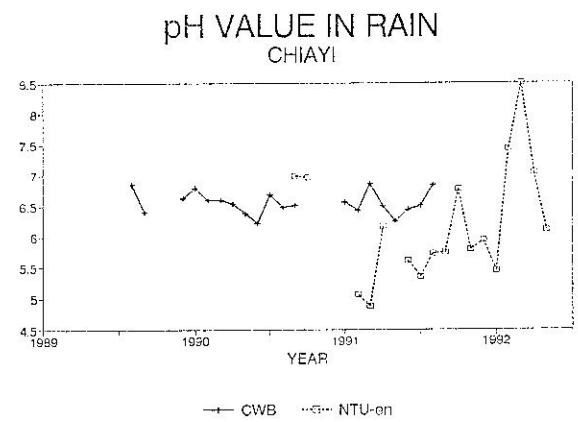


圖 56

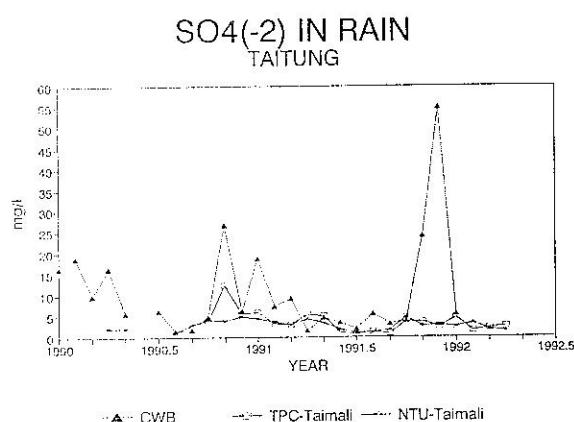


圖 55

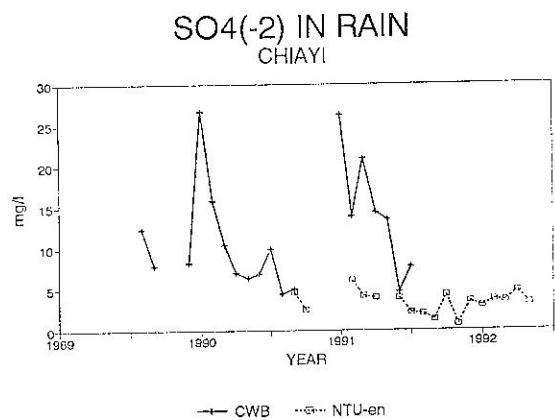


圖 57