臺灣地區酸雨現況與防制策略

Acid Rain Status and Control Strategy in Taiwan Area

陳 淨 修
Jing-Shiou Chen

行政院環境保護署
Bureau of Air Quality Protection and Noise Control
Environmental Protection Administration

摘 要

依80年度（ 79.4.～80.4. ）台灣地區的酸雨調查資料顯示台灣地區酸雨的幾項特性，條列如后：

1. 酸雨現象已普遍存在，除嘉義(5.51)、墾丁(5.26)及澎湖(5.07)外，其餘7站皆低於5.0，表示台灣地區雨水已受到人爲污染。
2. 春季滯留鋒雨，冬季鋒面雨爲台灣地區較易發生酸雨的兩種降水型態。
3. 酸雨分布與土壤酸鹼度分布有關。
4. 台灣地區酸雨發生頻率(pH<5.0)約爲70%。
5. 雨水致酸的物質主要來自硫酸，硝酸其次，前者對雨水酸度的影響約爲後者3倍，顯示台灣地區二氧化硫總量的偏高亟須加以削減。

降低油中含硫量，加嚴廢氣排放標準及進行SO_2、NO_x總量管制爲目前台灣地區所採行之策略，然爲制訂更詳盡之酸雨防制計畫，有關之酸雨調查評估研究仍必須進行，以利未來決策制定。

關鍵詞：酸雨、鋒面雨、酸鹼值、總量管制

ABSTRACT

Based on 1991 precipitation data from sample stations set by Environmental Protection Administation, the characteristics of acid rain in Taiwan area were summarized as follows:

1. Acid rain problem was common in whole Taiwan area and some regions, except stations such as Chiayi (5.51), Kungtin (5.26), and Penghu (5.07), were quite serious with pH value less than 5.0. It indicated that precipitation in Taiwan area suffered mankind pollution.
2. Two precipitation types, stationary front rain in Spring and front rain in Winter were apt to the occurrence of acid rain.
3. The relationship between the soil pH value and pH value of acid rain was found. The lower pH value of rain was found in the area of high soil pH value.
4. The frequency for the occurrence of acid rain was about 70%.
5. The average value of sulfate to nitrate ratio of acid rain was about 3 for all stations indicating that SO_2 emission must be reduced.

Reduced sulfur content in fuel, *rigid* emission standard in exhaust gas and planed SO_2 and NOx total emission were the control strategies currently adopted in Taiwan area. In order to draft acid rain control program more thoroughly, the study on survey and assessment of acid rain need to be carried out in the near future.

Key words: Acid rain, front rain, pH value, total emission control

前　言

由於酸性沉降(即通稱酸雨)對生態環境的影響具有廣域性（大範圍）、循環性（酸性沉降可海陸空大循環）、長期性（其危害徵候不是立現）、毀滅性（一旦出現災害徵候，已不是人力可挽回），因此，近年來酸性沉降對於生態系的影響已躍升爲世界眾所矚目的問題而爲全球性環境危機的警訊之一，如何減少酸性沉降危害（透過SO_2、NOx之減量排放）即爲美國布希總統之空氣清淨計畫中重要項目之一。酸性沉降至地面，對於生態環境之平衡及人類的健康是一種嚴重的威脅，酸雨可使湖泊水域酸化，影響水中生物的生存，亦可酸化土壤、破壞森林及毀損建築物，其影響的對象包羅萬象，幾乎是無所不在，無所不括。

酸性沉降在歐洲、美東、加拿大東南部、及大陸等地區皆已非常明顯，台灣地區亦不可或免，尤其是酸性沈降對歐洲及美東的危害，包括農業、森林、土壤、湖泊水域等自然資源及生態環境所造成之不良影響已是不爭之事實，唯其形成原因，影響程度、範圍、隨各國各區地理背景、污染特性等不同，而有見仁見智的看法。

本文擬就酸雨形成原因，過程、影響及台灣地區酸雨現況略爲引述，並研擬台灣地區酸雨防制策略，供爲施政參考。

酸雨形成原因

酸雨的產生主要是酸性物質和雨水作用的結果，而這些酸性物質部分爲自然產生，部份

爲人爲產生。前者如火山爆發噴出的硫化物、水域排放的硫化氫及動植物分解產生的有機酸等；後者爲二氧化硫及氮氧化物，一旦排放進入大氣後，隨即受大氣許多因子的影響，這些因子包括風速、風向、氣溫、幅射、雨量等；本身亦不斷和其他化學物質發生化學反應，而產生硫酸鹽、硝酸鹽等粒狀物懸浮於空氣中，對人體健康有極不良的影響，有時逸入雲層內而造成雲層酸化，最後皆隨雨水降至地表。

最值得我們注意的是，雨水酸化强度雖和空氣中的酸化物質如二氧化硫、氮氧化物的排放量（濃度）有關，亦和其他氧化物例如臭氧、過氧化氫、氫氧根等有密切關係。因爲在二氧化硫、氮氧化物反應成硫酸鹽、硝酸鹽的過程中，氧化物的足夠與否扮演著關鍵性的角色。此外，大氣中中和物質例如氨、鈣、鎂等的多寡，也可明顯影響雨水的酸化。因此，一個地區酸雨是否嚴重，端視當地二氧化硫、氮氧化物及中和物質的多寡及氣象條件而定。

台灣地區降水化學組成分析

一般言之，雨水之化學元素組成之分析，包括pH、導電度、NO_3^-、SO_4^{-2}、Cl^-、NH_4^+、K^+、Na^+、H^+、Ca^{+2}、Mg^{+2}等，而雨水中各離子之濃度大小受空氣污染及地區環境特性之影響很大，其中Ca^{+2}、Mg^{+2}、K^+大部份來自土壤、塵埃、水泥廠排放之懸浮粒及少部份來自鹽沫，NH_4^+來自有機物質之腐化與土壤性質有很密關係；NO_3^-主要由汽機車排放物NOx轉化而成；SO_4^{-2}則來自人爲污染源（SO_2、H_2S轉化而成）及海水鹽沫；N^{a+}、Cl^-絕大部份皆來自海水鹽沫。

80年度行政院環保署曾於台灣地區設置了十個雨水採樣站，其地點分別爲台北、龜山、中壢、台中港、嘉義、小港、墾丁、麻里、羅東，各採樣站之詳細地理位置如圖 1 所示，本文擬以十個一般地區酸雨採樣站於79年4月～80年4月所測一年資料（各離子成份濃度）鄭和杜 (1991) 進行各項分析，嚐試尋求台灣地區酸雨形成之可能原因、來源等以了解台灣地區酸性雨的特性，供爲未來建立雲雨化學模式輸入之資料及結果驗證之基礎。茲將部份分析結果詳述如下列各節。

1. 各站各離子成份濃度之季變化特性

圖 2 爲台灣地區雨水中各離子（除Cl^-、K^+外）四季及年平均濃度比較，由圖中可知離子濃度的季變化相當明顯，每一離子濃度大致皆以冬季最高而以夏季最低。此外，離子濃度的變化皆呈現出酸性因子（SO_4^{-2}、NO_3^-、H^+）、塵土因子（Ca^{+2}、NH_4^+），海洋因子(Na^+、Mg^{+2})的一致性，同時四季中各測站大都以SO_4^{-2}、Na^+的濃度最高而以NO_3^-濃度爲最低。似顯示台灣爲海島及二氧化硫排放量偏高之特性，且硝酸鹽前驅物NO_x，對台灣地區酸雨的影響程度尚不及SO_2顯著。

2. 硫酸、硝酸對雨水酸度的相對重要性

如果雨水中酸度主要源自硫酸、硝酸，則雨水中硝酸根離子與硫酸根離子莫耳濃度或當量濃度比應可呈現二者對雨水之相對重要度，且隨地區不同而異。例如日本東京郊區雨水中硝酸根離子與硫酸根離子當濃度比大致爲0.79(Tsurumi et al. 1990)，美國東北部

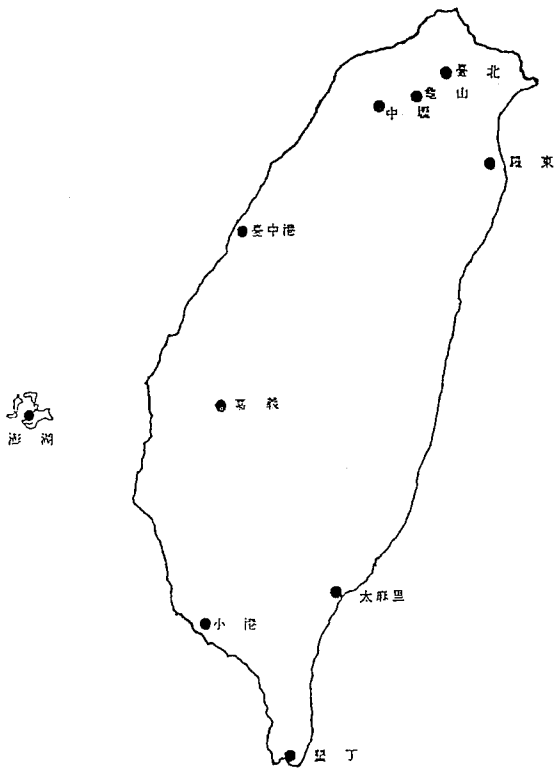


圖 1 酸沈降採樣站地理位置

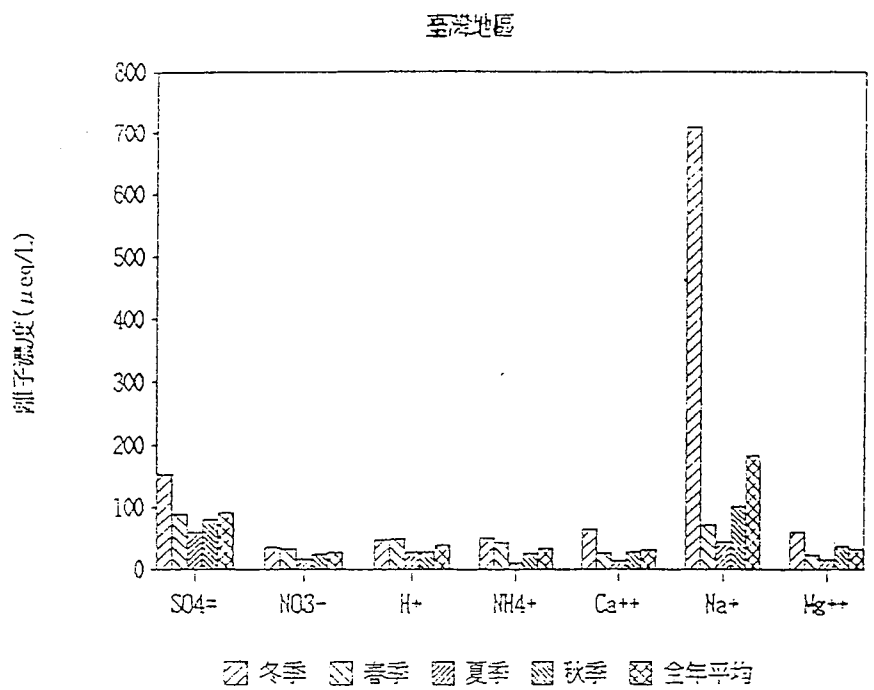


圖 2 台灣地區各離子(除Cl^-、K^+外)濃度之季平均分佈

爲0.25～0.50 (Munger and Eisenreich 1983)，歐洲爲0.14～0.61 (Lightowlers and Cape 1988)，中國大陸爲0.05～0.24 (Zhao *et al.* 1988)，美洛杉磯爲0.75(Munger and Eisenreich 1983)，而台灣地區各站NO_3^-與SO_4^{-2}之當量濃度比，依表1所示大約爲0.08～0.42，平均爲0.31，與美國東北部、歐洲相當，亦即台灣地區硫酸對雨水酸度之貢獻比約爲硝酸的2.4～12.5倍。台北、龜山、羅東、台中港、嘉義、澎湖等六站雨水中酸度的貢獻大致爲硝酸的三倍（2.5～3.4)，而墾丁站硫酸的貢獻則爲硝酸的12.5倍，太麻里站硫酸的貢獻爲硝酸的2.4倍，中壢、小港兩站硫酸的貢獻爲硝酸的4倍（3.74～4.3），亦即硫酸、硝酸對雨水中酸度之相對貢獻率隨地區的不同而不同，北部地區大致爲3比1，南部地區約爲4比1，東部地區約爲2比1。顯示台灣地區雨水中酸度主要來源爲硫酸，削減SO_2排放總量對於酸雨發生的減少，極有助益。

表1. 各測站主要離子當量濃度(μ eq／l)比

離子／地名	H/SO_4	H/SN	HNH_4/SN	HNHCA/SN	HNHCM/SN	HNHCMK/SN	Na/Cl	NO_3/SO_4	SO_4/Ca	NH_4/NO_3	NH_4/SO_4	Ca/SO_4
台　北	0.43	0.36	0.60	0.37	1.18	1.18	1.03	0.32	0.89	0.98	0.31	0.35
龜　山	0.65	0.50	0.71	0.89	1.28	1.28	0.68	0.29	1.22	0.96	0.28	0.23
中　壢	0.45	0.35	0.55	0.75	1.10	1.10	1.29	0.27	0.97	0.93	0.25	0.26
小　港	0.38	0.31	0.60	0.83	1.02	1.02	1.32	0.22	1.25	1.54	0.36	0.29
墾　丁	0.05	0.04	0.55	1.36	5.22	5.22	0.97	0.08	0.64	6.98	0.56	0.88
大麻里	0.34	0.23	0.52	0.79	1.70	1.70	0.92	0.42	1.10	1.00	0.42	0.38
羅　東	0.38	0.28	0.58	0.80	2.78	2.78	0.74	0.34	1.28	1.17	0.39	0.31
台中港	0.38	0.28	0.74	0.85	1.24	1.24	0.57	0.40	3.87	1.80	0.61	0.61
嘉　義	0.04	0.03	0.66	0.90	1.09	1.09	1.21	0.32	2.64	2.24	0.88	0.33
澎　湖	0.10	0.08	0.24	0.77	2.09	2.09	0.95	0.31	0.31	0.67	0.22	0.70
十站平均	0.42	0.32	0.60	0.85	1.50	1.50	1.14	0.29	1.11	1.20	0.37	0.33

註：　SN：〔SO_4^{-2}〕+〔NO_3^-〕，HNH4：〔H^+〕+〔NH_4^+〕
HNHCA：〔H^+〕+〔NH_4^+〕+〔Ca^{+2}〕
HNHCM：〔H^+〕+〔NH_4^+〕+〔Ca^{+2}〕+〔Mg^{+2}〕
HNHCMK：〔H^+〕+〔NH_4^+〕+〔Ca^{+2}〕+〔Mg^{+2}〕+〔K^+〕

3. 硫酸對雨水酸度之貢獻

若雨水中硫酸根離子的來源全來自硫酸且未被其他物質中和，則氫離子與硫酸根離子之當量濃度比應爲1，但從表1可知台北、龜山、中壢、小港、太麻里、羅東、台中港等七站〔H^+〕／〔SO_4^{-2}〕介於0.38～0.65間，表示部份（少量）氫離子爲其他物質所中和或有少量硫酸根離子來自其他物質如$(NH_4)_2SO_4$、$CaSO_4$，而墾丁、嘉義

、澎湖三站的〔H^+〕/〔SO_4^{-2}〕分別爲0.05、0.04、0.10，顯示大量氫離子爲其他物質所中和或硫酸根離子除來自硫酸外，尙有其他重要來源如硫酸鈣、硫酸銨等，從該三個站銨離子與硫酸根離子當量濃度比及鈣離子與硫酸根離子當量濃度比值，遠大於其他七站，可獲佐證。

4. 雨水中鈉、氯離子濃度比

鈉離子、氯離子一般皆來自海鹽，近海岸處其莫耳濃度比值，大約爲0.8～0.9(Shen *et al.* 1990)，愈近內陸，其值變化愈大，從表1各站之〔Na^+〕/〔Cl^-〕之比值來看，可知除墾丁（0.97）、太麻里（0.92）、澎湖（0.95）等三站因濱海特性外，其餘近內陸測站者，其〔Na^+〕/〔Cl^-〕之比值變化較大。

5. 降水pH值變化之指標

依3.2節之分析，可知台灣地區陸水中酸度〔H^+〕之主要來源爲硫酸根離子，而從表1知台灣地區大部份地區主要中和離子爲Ca^{+2}、NH_4^+，因此，理論上雨水中氫離子濃度或稱酸度與SO_4^{-2}濃度成正比而與Ca^{+2}、NH_4^+之濃度和成反比，亦即pH值的大小與SO_4^{-2}濃度成反比而與Ca^{+2}、NH_4^+之濃度成正比。圖3所示爲各站冬季平均pH值與〔$NH_4^+ + Ca^{+2}$〕/〔SO_4^{-2}〕之關係，由圖中可知二者之空間分佈相當一致，亦即各站皆呈〔$NH_4^+ + Ca^{+2}$〕/〔SO_4^{-2}〕增加，pH值增加，〔$NH_4^+ + Ca^{+2}$〕/〔SO_4^{-2}〕得知，亦即降水中NH_4^+、Ca^{+2}及SO_4^{-2}之相對濃度可爲降水pH值大小之指標，而NH_4^+、Ca^{+2}之多寡與土壤性質有關，是以，台灣地區的降水pH值似與土壤pH值分佈有關，而降水中SO_4^{-2}之來源則與SO_2之氣、液相反應有關。

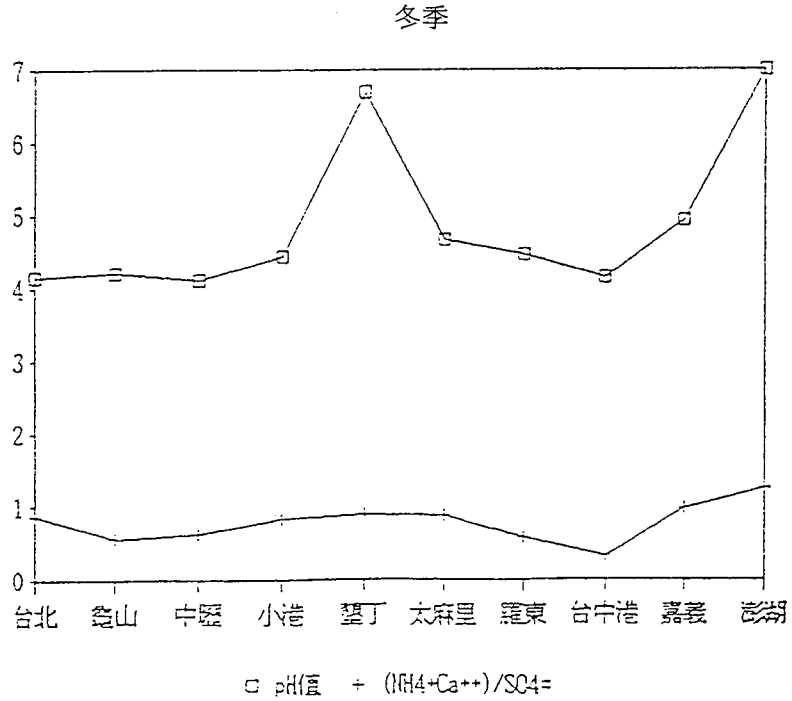


圖 3 各站冬季pH值與（$NH_4^+ + Ca^{+2}$）/（SO_4^{-2}）值之分佈圖

6. pH值與降水系統之關係

降水中pH值除與空氣中酸鹼物質之含量有關外，更與氣象條件有密切關係。因此，探討降水pH值與天氣系統、降水型態的關係，亦爲研究酸雨產生機制，輸送過程者所特別關注。台灣地區的降水系統大致可分成六類，即春雨（降水系統由華南移出，包含鋒面）、低壓雨、梅雨、夏季（雷）陣雨（含西南氣流）、颱風雨、東北季風型（含鋒面雨），並將一年中10站所有的降水資料依降水系統分別歸類並加以平均，表2所示，即爲各類降水系統發生之場次及算術平均pH值，從表中可知最酸的雨爲春雨，pH值爲4.24，其次爲冬季的鋒面雨，pH值爲4.34，最不酸的雨爲颱風雨，pH值爲5.32，其次爲夏季午後陣雨，pH值爲4.58，顯示春季滯留鋒雨，冬季的鋒面雨爲台灣地區容易發生酸雨之兩種降水型態。

表2 台灣地區各站酸雨pH值分布

降水型態	春雨	低壓雨	冬雨	梅雨	夏季陣雨	颱風雨
pH值	4.24	4.70	4.34	4.47	4.58	5.32
樣品數（場）	81	56	107	33	40	12

7. 酸雨的發生頻率分布

酸雨對環境的影響除視其酸度外，還須了解其發生頻率。在本次調查採樣的10站計329場降水中，到底有多少場的降水pH值低於5.0，又各站發生酸雨機會如何？皆值得吾人關切。圖4所示爲台灣地區降水平均pH值累積頻率分布圖，由圖中可知台灣地區（含澎湖）發生酸雨之機會（pH值小於5.0）約有70％。圖5所示爲各站雨水中年平均pH值分布，由圖中可知北部較南部嚴重，其中以嘉義pH值爲5.51最爲特殊，與中和物質有關。

台灣地區酸雨的防制

由於酸雨具有下列特性：1. 二次污染物酸雨的產生是由二氧化硫、氮氧化物在大氣中經氧化而形成硫酸鹽，在大氣中經歷的時間可從數小時至數星期，行經範圍可從數十公里至數百公里，視其化學性質、天氣狀況及其他污染物的影響而定。2. 影響層面相當廣，幾乎環境中任何受體皆可能受它的影響，目前酸雨對湖泊水域、森林、土壤、稻作、人體健康、地下水、建物等具不良影響，已無庸置疑，惟其對酸雨敏感度皆有所不同。3. 跨域污染特性使酸雨的防制，困難度較局部性防制高。

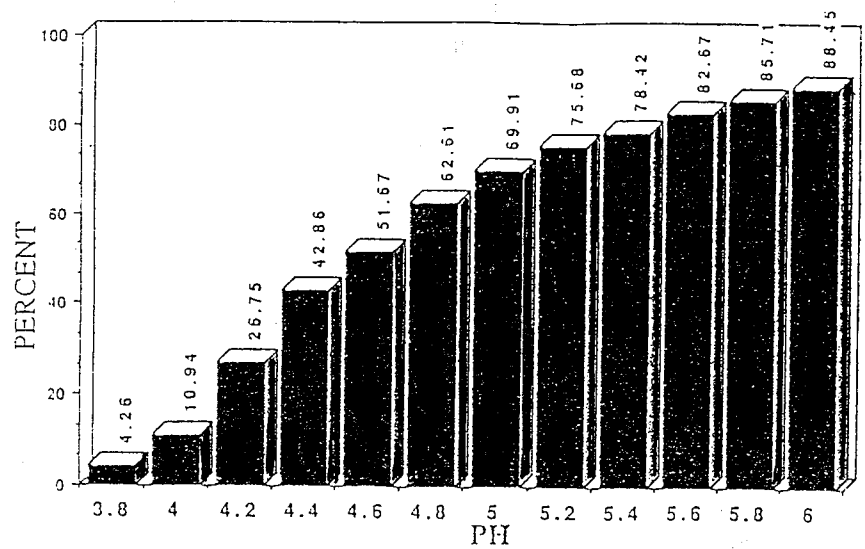


圖 4　台灣地區雨水中pH值之累積頻率分佈

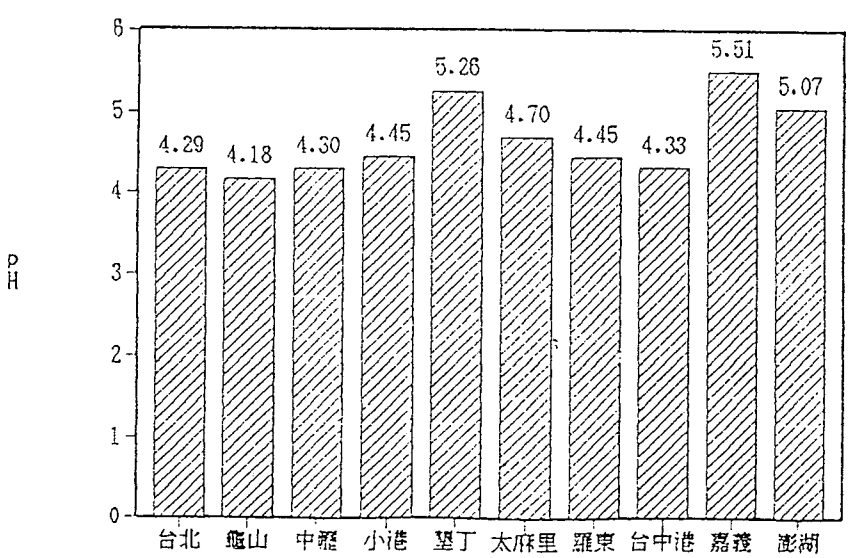


圖 5　民國79年(76.4.～80.4.)台灣地區各站酸雨pH值分佈

因此，即使空氣品質標準能達成亦僅能確保人體健康，但仍不足以保護生態環境。故台灣地區空氣品質（含酸雨）的改善應分二階段分期進行，第一階段積極進行下列各項策略以期大幅降低空氣中SO_2、NOx排放量，達成空氣品質標準爲目標。

1. 繼續推動低硫油政策，降低燃料油的含硫量，以減少因燃燒排放的硫氧化物。

   目前台灣地區使用的重油，油中含硫量爲1.5％，82年將再降至１％，惟爲確保未來空氣品質，二氧化硫不致惡化，油中含硫量宜再下降至0.5％。

2. 訂定嚴格管制標準，以迫使污染源採行排煙脫硫及排煙脫硝的設備。

   目前SO_2之煙囪口排放標準爲750 ppm，NOx則視燃料不同而異，82年SO_2排放標準將再降至500 ppm，未來將再降爲更低，以使污染源裝置污染設備。

3. 引進最佳可行控制技術，以減少硫氧化物、氮氧化物及碳氫化合物的排放。

   儘速規範各種空氣污染防制技術之等級，俾要求業者依防制區之規定裝設最佳可行控制技術。

4. 改善工業鍋爐的燃燒技術及設備，以減少氮氧化物的排放。

   由政府成立基金加强空氣污染控制技術研發以使技術生根，除改善空氣品質外，還可創造業者營運的空間。

5. 加嚴排放標準以減少汽機車的氮氧化物及碳氫化合物的排放。

   使用汽油新配方以減少VOC之排放及淘汰二行程機車，使用電動車、瓦斯車、甲醇車等減少交通工具NOx、HC之排放。

   第二階段則制訂台灣地區酸雨防制計畫，建立保護生態環境免於酸雨危害的指標，據以重新訂定SO_2、NOx及HC之總量削減計畫，包括實施減量地區、實施時機，減量方法及減量策略之經濟分析及控制成本等內容。

結　　論

酸雨爲科技文明的產物，也是大地反擊的一種現象。老天賜給萬物雨水以生養不息，然人類卻還以「顏色」，所呈現的意義，尤值得我們深思。

此外，質量不滅定律在酸雨的陸海空循環亦表露無遺，雨水雖能減除空氣中污染物，但污染物卻並未消失，而是以另一種型式—酸雨—回歸人類，尤其台灣地區多雨、高溫、潮濕的特殊氣象條件，酸雨防制的腳步尤應加快。

引用文獻

鄭福田　杜悅元. 台灣地區酸性沈降物調查研究（II），EPA-80-F3F1-09 -26，行政院環境保護署，民國80年 7 月間.

Munger J.W. and S.J. Eisenreich 1983. Continental Scale Variations in Precipitation Chemistry. Envir. Sci. Technol. 17, 32A-42A.

Lightowlers, P.J. and J.N. Cape. 1988. Sources and Fate of Atmospheric HCL in the U.K. and Western Europe. Atmospheric Environment. 22: 7-15.

Zhao, D., J. Xiong, Y. Xu and W.H. Chen. 1988. Acid Rain in South-western China. Atmospheric Environment. 22: 349-358.

Shen, Z., M. Huang, Y. Wu and E. He. 1990. An Analysis of Acidity and Chemical Composition in Cloudwater and Rainwater in the Shanghi Area. Chinese J. of Atmosp. Sci. Vol. 13.

Tsurumi M., A. Takahash and M. Ichikuni. 1990. Origin of Soluble Chemical Species in Bulk Precipitation Collected in Tokyo, Japan. Statistical Evalution of Source Materials, Atmospheric Environment. 24a: 1493-1500.