

都會區空氣污染物沉降對水庫水質之影響

駱尚廉¹ 朱慧安²

摘要

本研究以台北都會區為研究區，研究其空氣污染物質經大氣擴散作用，遷移至鄰近的翡翠水庫上空，再經乾、濕沉降過程進入水體，而對水庫水質造成之負荷量以及貢獻比例。由研究結果可發現濕沉降對水體之污染負荷略大於乾沉降， NH_4^+ 的乾濕沉降均佔翡翠水庫水體總污染量較大的比例，1994年與1996年分別為25.17%以及21.88%；硝酸鹽的貢獻量居中，1994年與1996年分別為2.28%以及1.98%；硫酸鹽的貢獻則較低，1994年與1996年僅為0.20%以及0.17%。若一併考慮間接沉降於集水區之乾濕沉降量的部分，並將 NO_3^- 與 NH_4^+ 合起來計算之，有15.89%~17.63%的影響；在 SO_4^{2-} 方面，受到空氣污染總沉降量之影響為1.01~1.07%。

一、前言

大氣環境中污染物質的沉降，是造成水體水質污染的來源之一。例如美國契色比克海灣(Chesapeake Bay)每年承受之總氮負荷量(包括硝酸氮、氨氮及有機氮)，有30%到40%是來自大氣的沉降(STAC,1994)；美國環保署對美國東岸從緬因州到北卡州各海灣近年來的調查，發現這些水域每年承受的總氮負荷量中，有18%到39%是來自大氣的沉降；Hertel & Skov(1996)指出，荷蘭水域中，總氮的負荷量有30%到40%是來自於大氣的貢獻。Mason *et al.*(1997)也指出大氣是海水及湖泊中汞(Hg)之主要來源。

最近美國聯邦交通研究所(Transportation Research Board,1997)亦開始注意到大氣沉降對公路路面雨水逕流水質的影響，而提出應利用大氣及水污染之資料，用模式分析來估計都會區大氣沉降及交通量對公路逕流水質影響之相對比重，此種資料可用來確定公路機關對於控制路面逕流水質應負多大責任。

然而，測量大氣污染物對水體水質負荷及水環境的影響仍有其不確定性，資料的取得往往也有困難。對於研擬環境管理策略而言，臨時架設測站或採樣有時緩不濟急，而且需要較高的成本和時間。以大台北都會區之空氣污染對翡翠水庫水質影響為例，若能善加利用現有的環境模式，模擬台北都會區與鄰近地區對翡翠水庫之污染潛勢、歷年變化、來源貢獻比例等，並修正模式使其能模擬出合理的值，將其應用於它處，對於防治策略之研擬將有很大的助益。

¹ 國立臺灣大學環境工程學研究所教授兼所長。

² 國立臺灣大學環境工程學研究所碩士

二、研究方法

本研究選用 ISCST3 模式(Industrial Source Complex Short Term Model)，以估算台北都會區（包括台北市、台北縣以及基隆市）之空氣污染物質，經大氣擴散作用，遷移至翡翠水庫上空，再經乾、濕沉降過程進入水體，而對水質造成負荷之量。

首先收集 ISCST3 所需的地形資料、污染源資料以及氣象資料，但由於 ISCST3 無法讀取這些原始資料，故需經過前處理以轉成 ISCST3 可讀的格式。此外，受體點以及部分的污染源資料無地形高程，故需透過 ArcView 的空間對位功能，將地形資料與受體點以及污染源資料聯結起來。

在執行 ISCST3 模式之前，必須先依需要而選擇適當的參數，然後依此編寫執行 ISCST3 的程式。執行 ISCST3 得到結果之後，需進行敏感度分析，並依敏感度分析之結果修改參數以及程式，如此反覆數次以得到合理的結果。得到結果後，再依實際測站資料作校正，依校正值計算負荷量。

ISCST3 為美國 EPA 公布且認可之模式，在臺灣地區已有應用之實例。ISCST3 本身屬於空氣品質模式中之細選模式，雖然運算過程較為繁雜，需要龐大的資料輸入，也需要較高之操作技巧，電腦運算之時間亦較長，但其模擬結果之誤差較小，結果也更具代表性。同時，ISCST3 模式之使用注意事項及相關規定，均在使用手冊中有詳細規定。

1. 乾沉降計算

ISCST3 模式中包括了粒狀物的乾沉降計算。其演算法是依據 ADOM 模式(Acid deposition and oxidant model, Pleim *et al.*,1984)中之乾沉降計算方法。即以污染物濃度值(g/cm^3)與沉降速度(cm/s)之乘積來計算乾沉降通量：

$$F(x, y)_d = C(x, y) \times v_d \quad (1)$$

乾沉降速度則是由重力沉降速度(Gravitational settling, V_g)、氣動層阻力(Aerodynamic resistance, R_a)以及沉降層阻力(Deposition-layer resistance, R_d)來計算：

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_d + R_a R_d v_g} + v_g \quad (2)$$

其中重力沉降速度 V_g 和微粒的直徑(μm)、形狀以及密度(g/cm^3)有關；氣動層阻力 R_a 和風速、大氣穩定度和表面磨擦尺度(Surface roughness length, cm)有關。因此，以上因素皆為 ISCST3 模式計算乾沉降時所需要輸入之參數。

2. 濕沉降計算

ISCST3 也可計算氣體和微粒之濕沉降。其濕沉降計算採掃除係數法(Scavenging coefficient approach)，即溼沉降通量為掃除率與垂直積分濃度之乘積：

$$F(x, y)_w = \int_0^{\infty} AC(x, y, z) dz \quad (3)$$

在 ISCST3 中，使用者需輸入每一個不同微粒大小的掃除係數。掃除係數則與微粒粒徑有關(Jindal & Heinold,1991)。

3. ISCST3模式模擬之限制

ISCST3 模式中，任一程式至多僅可輸入 300 個污染源以及 1200 個受體點。且輸入污染源和受體點的數目和模式執行時間成正比。而由於 ISCST3 模式採高斯煙流模式，故有一些基本假設，也是模式模擬時的限制：假設為狹窄煙流；只能模擬非反應性的污染物；模擬的濃度為平均濃度，而非瞬間濃度；假設為均勻流場，即同一高度的風速、風向均不隨時間而改變。

此外，而若無特別設定，模式會採用預設值來作大氣擴散的計算：考慮煙囪下洗；最終煙流上升；漸變浮力擴散；考慮建築物尾流效應；靜風處理；垂直位溫梯度；適當風剖面係數；考慮一階污染物之半衰期。

三、模式參數之設定

1. 資料搜集與輸入

1. 污染源資料：本研究之污染源資料來自中鼎公司所建立的污染源資料庫，分別為民國 83 年與 85 年之污染源資料。污染源資料主要包括基隆市、台北市以及台北縣之面污染源、線污染源及點污染源，但並無體污染源之資料。資料庫包括的污染源項目有 SO_x、NO_x、Pb 以及 TSP，亦包括相關排放資料如排放高度、溫度、速度以及煙囪口徑等。
由於每一次污染源的輸入數目最多為 300 筆，遠小於污染源的總數，且為了分析方便，故把污染源資料依行政區分為四區，分別為台北市、基隆市、台北縣西區（包括板橋市、三重市、永和市、中和市、新店市、新莊市、樹林鎮、鶯歌鎮、三峽鎮、土城鄉、蘆洲鄉、五股鄉、泰山鄉、林口鄉、八里鄉以及烏來鄉的污染源資料）以及台北縣東區（包括淡水鎮、汐止鎮、瑞芳鎮、深坑鄉、石碇鄉、坪林鄉、三芝鄉、石門鄉、平溪鄉、雙溪鄉、貢寮鄉、金山鄉以及萬里鄉的污染源資料）。
2. 氣象資料：ISCST3 需要逐時的氣象資料來定義煙流上升、傳播、擴散以及沉降的狀況。使用的氣象資料為民國 80 年至 87 年之台北氣象站逐時地面氣象資料，經前處理程式(isc2met1.exe) 以及自行輸入混合層高度(700m)處理後，得到時間、地面風速與風向、地面溫度以及穩定度高度等資料，再利用另一個氣象前處理程式(main0312.exe)處理後得到摩擦速度(Friction velocity)與曼寧-赫夫尺度(Monin-Obukov length)。
3. 受體點資料：分為兩部分，一是網格受體點，為一整塊範圍內的網格座標；另一則是敏感受體點，為某些特殊點的座標。網格受體點設計成涵蓋整個翡翠水庫集水區(utm_e:300-328km; utm_n3000-3016km，網格解析度: 2km×2km)。網格受體點得到的結果代表空氣污染物沉降至整個集水區的總量。
敏感受體點包括翡翠水庫 9 個採樣點、台大環工所 1 點、台大醫學院 2 點，以及北部地區空氣採樣站 16 點。空氣品質監測站 16 點的結果是用來和測站的實測值比對，以對網格受體點得到的結果做校正。台大環工所與台大醫院的結果則可和實測值比對。翡翠水庫 9 點的結果則可代表空氣污染物「直接」沉降至水體的部分。
4. 地形資料：為北部地區 DTM 資料，網格解析度為 1km*1km。但考慮到輸入過程的複雜以及模式的運算時間，本研究僅輸入污染源與受體點的地形資料，並未輸入完整的地形資料。沒有地形高程資料之處，可由 ISCST3 就現有的地形資料作內插而得。在資料前處理的過程中，由於受體點以及部分線污染源資料缺乏高程資料，故亦利用 ArcView 中「空間對位(Geocoding)」的功能將兩者資料作串聯，以得到受體點以及部分線污染源的高程資料。

2. 模式控制參數之選擇

在 ISC 輸入檔案撰寫過程中，以模式控制參數的設定最為困難，而模式控制參數選擇之考量，主要在於使用者的需求。ISCST3 模式的參數分為 CO (Job Control)、SO (Source)、RE (Receptor)、ME (Meteo.)以及 OU (Output)五個主要部分，分述如下：

1. Control (CO)：CO 表“控制”模式主要的選項，包括是否使用內設值（參數為 DEFAULT）、要跑何種污染物(包括 SO₂、NO_x、PM₁₀、TSP 或是 OTHER 等參數)、採都市(URBAN)或是鄉村(RURAL)擴散、需要跑出濃度(CONC)、乾沉降(DDEP)或是濕沉降(WDEP)、是否要使用乾沉降削減(DRYDPLT)或是濕沉降削減(WETDPLT)、地形型式(FLAT 或是 ELEV)為何。

在本研究中，擴散計算選擇使用內設值(DEFAULT)以及都市(URBAN)擴散二個參數。由於研究對象為氮和硫的負荷，探討的污染物包括二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)以及總懸浮微粒(TSP)，其之半衰期亦採用內設值。地形型式採用複雜地形(ELEV)。

ISCST3 可以計算出微粒的濃度以及乾、濕沉降、但僅能算出氣體的濃度以及溼沉降，無法算出氣體的乾沉降。是故若設 TSP 參數，便可同時選擇 CONC(表濃度)、DDEP(表乾沉降)以及 WDEP(表濕沉降)三個參數，但若選擇 SO₂ 或是 NO_x 參數，則僅能選擇 CONC 以及 WDEP 兩參數。

2. Source (SO)：SO 為輸入污染源資料的參數。包括污染源座標、高程、排放高度、排放率等資訊。在此也需界定清楚污染源是點源(POINT)、面源(AREA)或是體源(VOLUME)。其中點源的排放率內設單位為 g/s，面源的排放率內設單位則為 g/sm²。若前小節在 CO 中選擇了乾沉降(DDEP)或乾沉降削減(DRYDPLT)參數，則必須在此處給定污染物的粒徑(PARTDIAM)、質量分率(MASSFRAX)以及密度(PARTDENS)。而若先前選擇了濕削減(WETDPLT)參數，則需給定污染物的掃除係數，粒狀物的掃除係數參數包括 PARTLIQ(降雨)和 PARTICE(降水)，氣體則為 GAS-SCAV。

粒徑與質量分率的選擇在後節之「敏感度分析」中會有詳細的描述。由於無代表性的參考文獻，微粒的密度皆參考美國 EPA 設為 1 g/cm³ (Schwede and Paumier, 1996)。微粒的掃除係數中，代表降雨作用的 PARTLIQ 係參考 Jindal & Heinold (1991)的圖，代表降雪作用的 PARTICE 則設為 0.0 s⁻¹。氣體的掃除係數則參考 Hertel et al. (1995)的計算結果，SO₂ 採雲內(1.5×10⁻⁵)與雲下(9.5×10⁻⁶)的平均值 1.22×10⁻⁵ s⁻¹；NO_x 則採 NO 與 NO₂ 的平均值 7.95×10⁻¹¹ s⁻¹。

3. Receptor (RE)：RE 則是輸入受體點資料之參數。包括受體點的位置(UTM 座標)與高程(m)。
4. Meteorology (ME)：ME 是輸入氣象資料的參數。在此需輸入氣象輸入檔的路徑(INPUTFIL)以及風速計高度(ANEMHIGHT)。台北氣象站的風速計高度為 27.3 公尺。
5. Output (OU)：OU 為設計輸出檔的參數。包括輸出檔名稱，也可依需要選擇輸出平均值、第一大值或是第二大值。

四、參數敏感度分析

Schwede and Paumier (1996)曾針對煙流削減、質量分率、掃除係數、粒徑分布、微粒密度以及地形網格影響等參數，探討其對於 ISCST3 模擬濃度以及乾、濕沉降結果之影響，研究結果顯示：

1. 一般而言，任何輸入參數的改變對最大小時沈降量造成之影響，往往大於對最大小時濃度之影響。
2. 大多數的測試中，氣象資料和煙囪高度所造成之影響不大。
3. 煙流削減參數的使用與否對最大小時濃度影響不大，但使用後對於乾、溼沈降量之影響可高達40%。濕度愈大，計算出的濕沈降受煙流削減參數之影響愈大。
4. 煙流質量的粒徑分佈對 ISCST3 之影響很重要，特別是對於最大小時乾沈降量，可高達25%；而對於最大濕沈降的影響僅有10%。
5. 掃除係數直接影響最大濕沈降，和理論的預測相同。
6. 小粒徑的粒子分布所造成沈降量之差別不會超過5%；然而，對大粒徑的粒子而言，不當的粒子分布可能產生沈降量55%之差距。
7. 粒子的密度增加兩倍，最大乾沈降會有20%的增加。
8. 高程資料的使用並不會對最大濃度有很大的影響，而對最大乾沈降的影響亦屬微小。

1. 煙流削減之敏感度分析

本研究首先選擇針對煙流削減參數做敏感度分析，因為根據 Schwede and Paumier (1996)的研究，忽略此因素會造成結果中的濃度、沈降量增加，亦即結果將較保守。又根據她的研究，此參數中的濕沈降削減(Wet depletion)加入後，濃度最大值並不會有多少改變，對於沈降之影響大於對濃度之影響，因濃度最大值通常是出現在很少或沒有降雨時。但臺灣地區的氣象條件不同於 Schwede 的研究區，濕削減參數的影響或許會有出入。

此外，加入乾沈降削減參數與濕沈降削減參數，會影響模式的速度，通常計算時間增加高達10倍以上。因此，有必要對此二參數做敏感度分析，以了解在臺灣地區應用時之影響。

根據比較數次模式對基隆市之污染源的運算結果(表1)，濕沈降削減參數對平均濃度的敏感度平均為43%，最高可達75%；對乾沈降的敏感度平均為39%；對濕沈降的敏感度平均則高達為75%。乾沈降削減參數對平均濃度的敏感度平均為16%，最高可達29%；對乾沈降的敏感度平均為49%；對溼沈降的敏感度平均則僅為9%。

由此可發現對於乾沈降而言，兩參數的影響相當；而乾沈降削減參數對平均濃度以及濕沈降結果的影響較濕沈降削減參數為小；而僅輸入濕沈降削減參數的結果，和二參數同時輸入的結果，相差不大。

再考慮輸入濕沈降削減參數對於模式計算的速度似無影響，輸入乾沈降削減參數卻會明顯增加運算時間，是故選擇輸入濕沈降削減參數，而不輸入乾沈降削減參數。

表1 WETDPLT 與 DRYDPLT 之敏感度

	濕沈降削減 (WETDPLT)		乾沈降削減 (DRYDPLT)	
	平均	最大	平均	最大
平均濃度	-43.22%	-75.00%	-16.10%	-29.00%
乾沈降	-39.30%		-49.66%	
濕沈降	-74.94%		-9.28%	

2. 質量分率之敏感度分析

在計算微粒的乾沉降時，需要輸入微粒的質量分率，亦即不同直徑大小的微粒其質量佔總微粒質量的百分比。此部分的資料已有許多人做過相關的研究，例如宋(1990)、鄭(1992)、簡(1995)、吳(1996)、蔣等(1995~1997)、詹(1996)以及李等(1995)。

由於蔣(1995~1997)的研究期較長，測站地點亦在台北都會區，故本研究採用其研究結果(如表 2)，但為避免資料的代表性不夠，所以設計敏感度分析來測試之。

表 2 北部地區懸浮微粒平均濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)分佈

測 站	期 間	粒 徑 (μm)			
		≥ 10	2.5~10	< 2.5	Total
福 星	83.9~84.4	69.10	17.24	13.66	100.00
	84.8~85.3	41.00	31.86	27.14	100.00
	85.9~86.3	50.00	23.00	27.00	100.00
三 重	83.9~84.4	64.60	18.76	16.64	100.00
	84.8~85.3	41.00	29.50	29.50	100.00
	85.9~86.3	64.00	7.92	28.08	100.00
平均		54.95	21.38	23.67	100.00

另一組比較的質量分率數值係參考 Schwede(1996)對 ISCST3 所作敏感度分析中的一組數據，兩者數據之敏感度分析結果比較如表 3 所示。

選擇 Schwede 這一組數據作比較的主要原因在於，此組的懸浮微粒中，大顆粒的組成較高， $0.8\text{-}20\mu\text{m}$ 的微粒即已佔了 76%，和蔣的數據（大、小顆粒的分佈較平均）不大相同。而由於質量分率主要的影響在於濃度以及乾沉降，故對此二項做敏感度分析。而由表 3 可發現，兩者在其他參數相同，僅 MASSFRAC 參數不同的情況下，得到的結果相差不大，平均濃度的敏感度為 3.19%，乾沉降則為 4.61%。

表 3 不同質量分率之敏感度分析

	蔣 (1995~1997)			Schwede (1996)		
	< 2.5	2.5-10	> 10	< 0.5	0.5-0.8	0.8-20
粒徑範圍(μm)						
中位直徑(μm)	1.575	6.925	15.536	0.31	0.66	12.77
質量分率(%)	23.67	21.38	54.95	13.00	11.00	76.00
平均濃度	2.0559			1.9903		
敏感度				-3.19%		
乾沉降	1.9755			1.8845		
敏感度				-4.61%		

五、翡翠水庫個案分析

1. 模擬結果與校正

任何空氣品質模式之應用都有誤差產生或是模擬不準確之可能。因此，模式預測值應和實際觀測值比較，以確認模式的準確性。在前之模式參數分析中，曾提及將北部地區的測站點設計成敏感受體點，這些點模擬出來的值可與實測值比對，以供校正之參考。圖 1~圖 6 則為其測站濃度值與模擬濃度值之柱狀圖比較。

扣除各組測站／模擬值之最大與最小的極端值，1994 年懸浮微粒的測站濃度與模擬濃度之比值為 1.6、SO₂ 為 1.2、NO_x 為 0.56，1996 年懸浮微粒的測站濃度與模擬濃度之比值則為 1.58、SO₂ 為 0.86、NO_x 為 1.02，顯示模式模擬之誤差尚可接受。而由於新店測站最接近翡翠水庫集水區，故以新店測站作為校正之依據，新店測站 1994 年懸浮微粒的測站濃度與模擬值之比值為 0.85、SO₂ 為 1.23、NO_x 為 0.70，1996 年懸浮微粒的測站與模擬值之比值為 0.97、SO₂ 為 0.88、NO_x 為 1.25。其他的受體點的濃度，以及乾、濕沉降結果，皆依此六值修正之。新店測站兩年各污染物的校正值則列於表 4。

表 4 新店測站各污染物之校正值

污染物	年	測站值	模擬值	校正值
TSP	1994	44.84	52.47	0.85
	1996	40.20	41.27	0.97
SO ₂	1994	4.46	3.64	1.23
	1996	2.80	3.18	0.88
NO ₂	1994	21.66	31.11	0.70
	1996	17.40	13.89	1.25

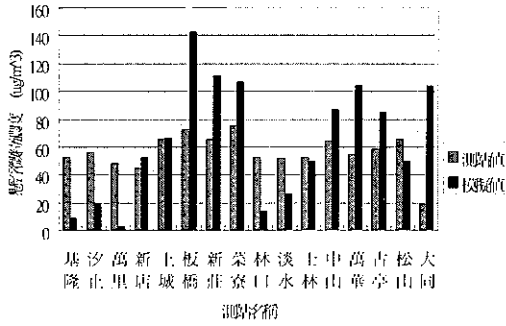


圖 1 1994 年懸浮微粒測站值與模擬值之比較

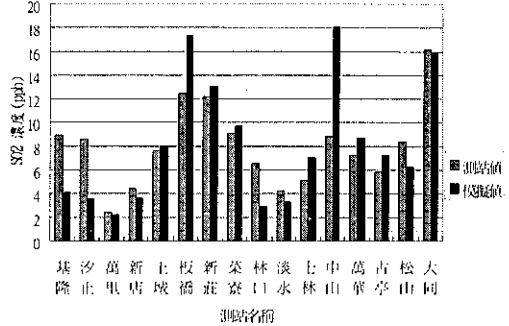


圖 2 1994 年 SO2 模擬值與測站值之比較

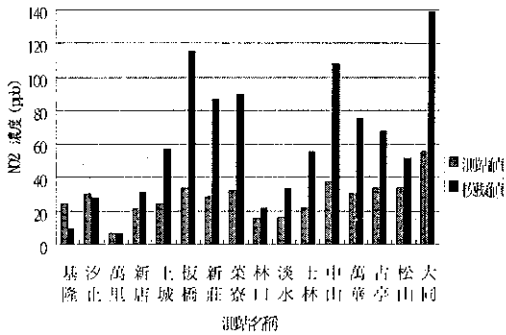


圖 3 1994 年 NO₂ 模擬值與測站值之比較

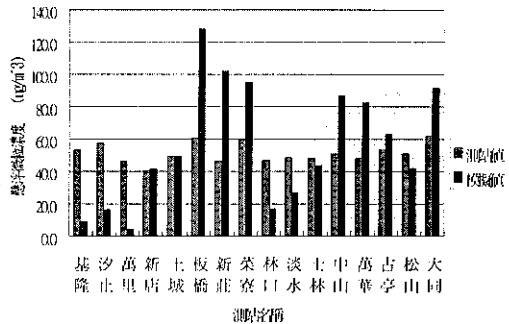


圖 4 1996 年懸浮微粒測站值與模擬值之比較

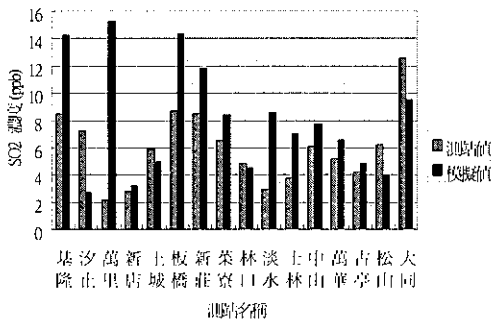


圖 5 1996 年 SO₂ 模擬值與測站值之比較

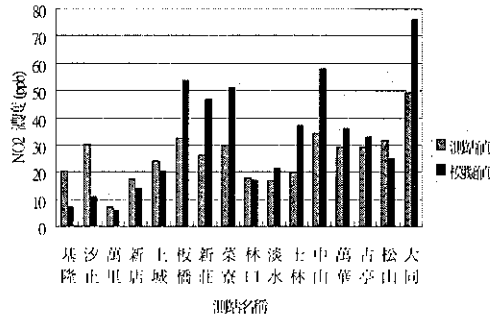


圖 6 1996 年 NO₂ 模擬值與測站值之比較

雖然新店測站的模擬值與實際測站值相當接近，但在其他測站卻有極值出現，例如萬里測站兩年 TSP 的測站值與模擬值的比值均相當大(15.47 以及 10.59)，SO₂ 的極值出現在汐止測站(2.40 以及 2.69)，NO₂ 的極值則出現在基隆測站(2.61 以及 2.77)。推究其原因，發現此三測站地理位置均位於東北角且靠海，而由玫瑰風圖可知台灣北部地區盛行東風。因此，以 ISCST3 模擬大氣污染物的擴散時，由於此三測站位於相對於其它測站的上風處，而此三測站的上風處則為鄰近海域，卻缺乏海面的污染源資料，測站的地理位置以及缺乏上風處之污染源資料造成了較實施值低估的情形。

2. 沉降量計算

在沉降量的計算中，乾沉降完全來自 TSP，濕沉降則包括 TSP、SO₂ 及 NO_x 的沉降。

1. 乾沉降計算：對一水體而言，大氣污染物沉降分為沉降於水體上的直接沉降，以及沉降於集水區的間接沉降。也因此，本研究設計涵蓋整個翡翠水庫集水區的網格受體點，以其得到的結果代表空氣污染物“間接”沉降至整個集水區的總量。敏感受體點中的結果則可代表空氣污染物“直接”沉降至水庫水體的部分。

- (1). 直接沉降：由 ISCST3 模式推得，翡翠水庫淹沒區(代表直接沉降水體的部分)在 1994 年 TSP 的乾沉降平均值為 8.64g/m²。而由之前的校正，得知應在此處乘上校正值 0.85。同理，翡翠水庫淹沒區 1996 年 TSP 的乾沉降平均值為 6.27g/m²，校正值為 0.97。根據鄭(1996)之研究，SO₄²⁻佔 TSP 質量濃度的 8.0%，NO₃⁻為 5.3%，NH₄⁺則為 3.0%。所以 1994 年以及 1996 年 SO₄²⁻、NO₃⁻以及 NH₄⁺的直接乾沉降平均值分別如下：

$$1994 \text{ 年 } \text{SO}_4^{2-} \text{ 的直接乾沉降} = 8.64 \times 0.85 \times 8.0\% = 0.59 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1996 \text{ 年 } \text{SO}_4^{2-} \text{ 的直接乾沉降} = 6.27 \times 0.97 \times 8.0\% = 0.49 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1994 \text{ 年 } \text{NO}_3^- \text{ 的直接乾沉降} = 8.64 \times 0.85 \times 5.3\% = 0.39 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1996 \text{ 年 } \text{NO}_3^- \text{ 的直接乾沉降} = 6.27 \times 0.97 \times 5.3\% = 0.32 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1994 \text{ 年 } \text{NH}_4^+ \text{ 的直接乾沉降} = 8.64 \times 0.85 \times 3.0\% = 0.22 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1996 \text{ 年 } \text{NH}_4^+ \text{ 的直接乾沉降} = 6.27 \times 0.97 \times 3.0\% = 0.18 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

- (2). 間接沉降：由 ISCST3 模式推得，翡翠水庫全集水區 1994 年 TSP 的乾沉降平均值則為 6.45g/m²。而由之前的校正，得知應在此處乘上校正值 0.85。同理，翡翠水庫全集水區 1996 年 TSP 的乾沉降平均值則為 5.05g/m²，校正值為 0.97。1994 年以及 1996 年 SO₄²⁻、NO₃⁻以及 NH₄⁺的間接乾沉降平均值分別如下：

$$1994 \text{ 年 } \text{SO}_4^{2-} \text{ 的間接乾沉降} = 6.45 \times 0.85 \times 8.0\% = 0.44 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1996 \text{ 年 } \text{SO}_4^{2-} \text{ 的間接乾沉降} = 5.05 \times 0.97 \times 8.0\% = 0.39 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1994 \text{ 年 } \text{NO}_3^- \text{ 的間接乾沉降} = 6.45 \times 0.85 \times 5.3\% = 0.29 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1996 \text{ 年 } \text{NO}_3^- \text{ 的間接乾沉降} = 5.05 \times 0.97 \times 5.3\% = 0.26 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1994 \text{ 年 } \text{NH}_4^+ \text{ 的間接乾沉降} = 6.45 \times 0.85 \times 3.0\% = 0.16 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1996 \text{ 年 } \text{NH}_4^+ \text{ 的間接乾沉降} = 5.05 \times 0.97 \times 3.0\% = 0.15 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

2. 濕沉降計算：

- (1). 直接沉降：由 ISCST3 模式推得，翡翠水庫淹沒區(代表直接沉降水體的部分)1994 年 TSP 的濕沉降平均值為 12.91g/m²，此值亦須乘上校正值 0.85；1996 年則為 10.15g/m²，此值則須乘上校正值 0.97。依與乾沉降計算相同的方法，SO₄²⁻、NO₃⁻以及 NH₄⁺的濕沉降平均平均值如下：

$$1994 \text{ 年 } \text{SO}_4^{2-} \text{ 的直接濕沉降} = 12.91 \times 0.85 \times 8.0\% = 0.88 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

$$1996 \text{ 年 } \text{SO}_4^{2-} \text{ 的直接濕沉降} = 10.15 \times 0.97 \times 8.0\% = 0.79 \text{ (g/m}^2\text{)}$$

1994 年 NO_3^- 的直接濕沉降 = $12.91 \times 0.85 \times 5.3\% = 0.58 \text{ (g/m}^2\text{)}$

1996 年 NO_3^- 的直接濕沉降 = $10.15 \times 0.97 \times 5.3\% = 0.52 \text{ (g/m}^2\text{)}$

1994 年 NH_4^+ 的直接濕沉降 = $12.91 \times 0.85 \times 3.0\% = 0.33 \text{ (g/m}^2\text{)}$

1996 年 NH_4^+ 的直接濕沉降 = $10.15 \times 0.97 \times 3.0\% = 0.30 \text{ (g/m}^2\text{)}$

此外，由 ISCST3 所推得 1994 年 SO_2 的直接濕沉降量為 0.15 g/m^2 ，乘上校正值 1.23 後為 0.18 。 NO_x 卻為 0.00 g/m^2 ，推斷原因，應是其掃除係數太小之故。1996 年 SO_2 的濕沉降量為 0.17 g/m^2 ，乘上校正值 0.88 後為 0.15 。 NO_x 依然為 0.00 g/m^2 。

(2) 間接沉降：由 ISCST3 模式推得，翡翠水庫全集水區 1994 年 TSP 的濕沉降平均值則為 8.83 g/m^2 ，此處應乘上校正值 0.85。1996 年 TSP 的溼沉降平均值則為 7.12 g/m^2 ，校正值為 0.97。1994 年以及 1996 年 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 以及 NH_4^+ 的間接濕沉降平均值分別如下：

1994 年 SO_4^{2-} 的間接濕沉降 = $8.83 \times 0.85 \times 8.0\% = 0.60 \text{ (g/m}^2\text{)}$

1996 年 SO_4^{2-} 的間接濕沉降 = $7.12 \times 0.97 \times 8.0\% = 0.55 \text{ (g/m}^2\text{)}$

1994 年 NO_3^- 的間接濕沉降 = $8.83 \times 0.85 \times 5.3\% = 0.40 \text{ (g/m}^2\text{)}$

1996 年 NO_3^- 的間接濕沉降 = $7.12 \times 0.97 \times 5.3\% = 0.37 \text{ (g/m}^2\text{)}$

1994 年 NH_4^+ 的間接濕沉降 = $8.83 \times 0.85 \times 3.0\% = 0.23 \text{ (g/m}^2\text{)}$

1996 年 NH_4^+ 的間接濕沉降 = $7.12 \times 0.97 \times 3.0\% = 0.21 \text{ (g/m}^2\text{)}$

所推得 1994 年 SO_2 的間接濕沉降量為 0.13 g/m^2 ，乘上校正值 1.23 後為 0.16 。 NO_x 亦為 0.00 g/m^2 。1996 年 SO_2 的間接濕沉降量為 0.22 g/m^2 ，乘上校正值 0.88 後為 0.19 。 NO_x 依然為 0.00 g/m^2 。

3. 總沉降量計算：依上述乾、溼直接沉降量計算結果，再乘上翡翠水庫淹沒區總面積 (10.24 km^2)，即可得到翡翠水庫乾、濕沉降總量中直接由大氣沉降而來的部分。而經過計算之後，1994 年由懸浮微粒而來之 SO_4^{2-} 的總乾沉降量為 6.0 ton/yr ，總濕沉降量為 9.0 ton/yr ； SO_2 總濕沉降量為 1.9 ton/yr ，換算成 SO_4^{2-} (乘以 $96/64$) 則為 2.8 ton/yr ，是故 SO_4^{2-} 的總濕沉降量共為 11.8 ton/yr 。 NO_3^- 的總乾沉降量為直 4.0 ton/yr ，總濕沉降量為 6.0 ton/yr ； NH_4^+ 的乾沉降量為 2.3 ton/yr ，總濕沉降量為 3.4 ton/yr 。

1996 年由懸浮微粒而來之 SO_4^{2-} 的總乾沉降量為 5.0 ton/yr ，總濕沉降量為 8.1 ton/yr ； SO_2 總濕沉降量為 1.6 ton/yr ，換算成 SO_4^{2-} (乘以 $96/64$) 則為 2.3 ton/yr ，是故 SO_4^{2-} 的總濕沉降量共為 10.4 ton/yr 。 NO_3^- 的總乾沉降量為直 3.3 ton/yr ，總濕沉降量為 5.3 ton/yr ； NH_4^+ 的乾沉降量為 1.9 ton/yr ，總濕沉降量為 3.0 ton/yr 。

而沉降至翡翠水庫集水區之空氣污染物，可能間接流入水庫水體，其乾、濕沉降之計算和上述直接沉降於水體的方法相同，只是需改乘以翡翠水庫總集水面積 (303 km^2)。然考慮到間接沉降多由逕流流入水體，故應再乘上一逕流係數。根據平均係數法 (Average coefficient)，若依流域面積之一般性質，翡翠水庫應屬「未開發地區」，逕流係數為 $0.1 \sim 0.3$ ，取其平均值 0.2 。結果整理如表 5。

由表 5 並可發現直接沉降約為間接沉降之 22%，而翡翠水庫淹沒區佔全集水區面積僅 6.73%。

表 5 翡翠水庫乾、濕沉降計算結果

			直接沉降 (ton / yr)	間接沉降 (ton / yr)	直接/間接
SO ₄ ²⁻	乾 沉 降	1994	6.0	26.6	22.6%
		1996	5.0	23.7	21.0%
	濕 沉 降	1994	9.0	36.4	24.7%
		1996	8.1	33.5	24.1%
	濕 沉 降 (from SO ₂)	1994	2.8	14.8	19.2%
		1996	2.3	17.6	13.3%
NO ₃ ⁻	乾 沉 降	1994	4.0	17.6	22.6%
		1996	3.3	15.7	21.0%
	濕 沉 降	1994	6.0	24.1	24.7%
		1996	5.3	22.1	24.1%
NH ₄ ⁺	乾 沉 降	1994	2.3	10.0	22.6%
		1996	1.9	8.9	21.0%
	濕 沉 降	1994	3.4	13.6	24.7%
		1996	3.0	12.6	24.1%
				平均	22.1%

3. 負荷量計算

表 6 為 1994 年翡翠水庫之污染物總量。水體的總負荷量為總水量乘上污染物的平均濃度，此處以翡翠水庫集水區的總進水流量代表總水量，而以翡翠水庫代表平均水質。由於無法取得 1996 年的資料，故以 1994 年代替。

表 6 1994 年翡翠水庫集水區之污染總量

進水量 (m ³ /yr)	污染物	平均水質 (mg / L)	水體總污染負荷量 (ton / yr)
9.72 × 10 ⁸	SO ₄ ²⁻	9.2	8942.4
9.72 × 10 ⁸	NO ₃ ⁻	0.45	436.4
9.72 × 10 ⁸	NH ₄ ⁺	0.02	22.4

表 7 則整理出不同污染物種，其「直接」乾、濕沉降污染量分別佔總水體污染量的比例，並算出其兩者之和所佔總水體污染之比例。由這些結果可發現，濕沉降對水體之污染負荷略大於乾沉降，1994 年的污染負荷亦高於 1996 年。而其中，NH₄⁺的乾濕沉降均佔翡翠水庫水體總污染量較大的比例，1994 年與 1996 年分別為 25.17% 以及 21.88%；硫酸鹽的貢獻則偏低，1994 年與 1996 年僅為 0.20% 以及 0.17%。此結果和駱(1997)之研究結果相似，但數值較小。

表 8 則整理出不同污染物種，其「間接」乾、濕沉降污染量分別佔總水體污染量的比例，並算出其兩者之和所佔總水體污染之比例。由這些結果發現，濕沉降對水體之污染負荷仍略大於乾沉降，1994 年的污染負荷也高於 1996 年。值得注意的是，1994 年 NH₄⁺之總大氣沉降量高於 100%，1996 年也高達 95.99%，其原因可能有二：一為「間接」沉降雖已乘上逕流係數 0.2，可能仍有高估的情形，也顯示大氣污染物沉降至水體

之外的地區而對水質影響之部分，仍難以估算；另一為 NH_4^+ 在翡翠水庫之硝化速率頗快，因此單以 NH_4^+ 沉降負荷之比較，難以表達其對水質的影響，國外也多以對總氮之影響來表之。

因此，若以 NO_3^- 與 NH_4^+ 合起來計算之，並同時計算直接與間接之乾濕沉降量，則如表 9 所示，在 SO_4^{2-} 方面，受到空氣污染總沉降量之影響為 1.01~1.07%；在 NO_3^- 與 NH_4^+ 方面，則有 15.89%~17.63% 的影響。

表 7 「直接」乾濕沉降對水體水質之污染負荷

污染物	年	總污染量 (ton/年)	乾沉降量 (ton/年)(%)	濕沉降量 (ton/年)(%)	總大氣沉降量 (%)
SO_4^{2-}	1994	8,942.4	6.0 (0.07)	11.8 (0.13)	0.2
	1996	8,942.4	5.0 (0.06)	10.4 (0.12)	0.2
NO_3^-	1994	436.4	4.0 (0.91)	6.0 (1.36)	2.3
	1996	436.4	3.3 (0.76)	5.3 (1.22)	2.0
NH_4^+	1994	22.4	2.3 (10.1)	3.4 (15.1)	25.2
	1996	22.4	2.0 (8.4)	3.0 (13.5)	21.9

表 8 「間接」乾濕沉降對水體水質之污染負荷

污染物	年	總污染量 (ton/年)	乾沉降量 (ton/年)(%)	濕沉降量 (ton/年)(%)	總大氣沉降量 (%)
SO_4^{2-}	1994	8,942.4	26.6 (0.30)	51.2 (0.57)	0.9
	1996	8,942.4	23.7 (0.27)	51.1 (0.57)	0.8
NO_3^-	1994	436.4	17.6 (4.04)	24.1 (5.52)	9.6
	1996	436.4	15.7 (3.60)	22.2 (5.08)	8.7
NH_4^+	1994	22.4	10.0 (44.6)	13.6 (61.0)	105.6
	1996	22.4	8.9 (39.8)	12.6 (56.2)	96.0

表 9 直接與間接乾濕沉降對水體水質之污染負荷

污染物	年	水體總污染 (ton/yr)	乾沉降量 (ton/yr)	(a) (%)	濕沉降量 (ton/yr)	(b) (%)	總大氣沉降量 (a+b)(%)
SO_4^{2-}	1994	8,942.4	17.8	0.20	77.8	0.87	1.07
	1996	8,942.4	15.4	0.17	74.8	0.84	1.01
$\text{NO}_3^- +$	1994	458.8	15.8	3.39	65.3	14.24	17.63
NH_4^{+1}	1996	458.8	13.5	2.95	59.4	12.94	15.89

4. 來源貢獻比例之探討

由於乾沉降與濕沉降皆由平均濃度估算而得，故僅就平均濃度之來源貢獻比例加以探討。結果顯示，各地區於 1994 年與 1996 年對 TSP 濃度貢獻比例並無太大差異。台北市為 36%與 34%、基隆市為 6%與 5%、台北縣東區為 19%與 17%，只有台北縣西區由 39%增至 44%。

然而對於 SO_2 而言，台北縣東區於兩年間之變化程度遠較其他地區為大，由 32% 降至 12%，至於其他地區 1994 年與 1996 年之濃度貢獻比例則沒有太大的改變幅度，台北市為 18%與 25%、基隆市為 25%與 30%、台北縣西區為 25%與 33%。

對於 NO_x 之濃度貢獻，台北市與基隆市於 1994 年與 1996 年對 NO_x 濃度貢獻比例並無太大差異，台北市為 36%與 39%，基隆市為 7%與 5%，而台北縣東區與台北縣西區的變化較為顯著，台北縣東區由 29%降至 18%，台北縣西區由 28%增至 38%。

還有一個值得注意的現象，即基隆市在 TSP 以及 NO_x 的貢獻比例都不大，但在 SO_2 的貢獻比例中卻超過台北市，甚至在 1996 年超過台北縣東區的貢獻量。

六、結 論

1. 濕沉降削減參數在乾燥少雨的地區並不重要，但在潮濕多雨的台灣卻為很重要的參數，影響模擬結果甚大。根據敏感度分析的結果，濕沉降削減參數對平均濃度的敏感度平均為 57.22%，最大為 75%；對乾沉降的敏感度平均為 56%；對濕沉降的敏感度平均則高達為 83%。
2. 翡翠水庫之 SO_4^{2-} 的總乾沉降量為 5.0-6.0 ton/yr，總濕沉降量共為 10.4-11.8 ton/yr； NO_3^- 的總乾沉降量為 3.3-4.0 ton/yr，總濕沉降量為 5.3-6.0 ton/yr； NH_4^+ 的乾沉降量為 1.9-2.3 ton/yr，總濕沉降量為 3.0-3.4 ton/yr。
3. 若以 NO_3^- 與 NH_4^+ 合起來計算之，並同時計算直接與間接之乾濕沉降量，則在 SO_4^{2-} 方面，受到空氣污染總沉降量之影響為 1.01~1.07%；在 NO_3^- 與 NH_4^+ 方面，則有 15.89%~17.63% 的影響。
4. 針對不同的污染物，比較 1994 年與 1996 年台北市、基隆市、台北縣東區以及台北縣西區之來源對平均濃度的貢獻比例，發現 TSP 以及 NO_x 各地區於 1994 年與 1996 年對 TSP 濃度貢獻比例並無太大差異，然而對於 SO_2 而言，台北縣東區於兩年間之變化程度遠較其他地區為大。此外，基隆市在 TSP 以及 NO_x 的貢獻比例都不大，但在 SO_2 的貢獻比例中卻超過台北市，甚至在 1996 年超過台北縣東區的貢獻量。

參考文獻

1. Hertel, O., J. Christensen, and E. H. Runge, (1995) "Development and Testing of A New Variable Scale Air Pollution Model-ACDEP," *Atmospheric Environment*, vol. 29, no. 11, pp. 1267-1290.
2. Hertel, O. and H. Skov, (1996) "Evaluation of the aerosol contribution to the Nitrogen Load to Danish Coastal Water 1984-94," *Journal of Aerosol Science*, Suppl. 1, pp. 559-560.
3. Jindal, M. and D. Heinold, (1991) "Development of Particulate scavenging coefficients to Model Wet Deposition from Industrial Combustion Sources," *84th Annual Meeting - Exhibition of AWMA*, Vancouver, BC, June 16-21.

4. Mason, R. P., N. M. Lawson and K. A. Sullivan, (1997) "The Concentration, Speciation and Sources of Mercury in Chesapeake Bay Precipitation," *Atmospheric Environment*, vol. 31, no. 21, pp.3541-3550.
5. Pleim, J., A. Venkatram, and R. Yamartino, (1984) *ADOM/TADAP model development program*. vol. 4., The Dry Deposition Module. ERT Document P-B980-520, pp. 110.
6. Schwede, D. B., and J.O. Paumier, (1996) "Sensitivity of the Industrial Source Complex Model to Input Deposition Parameters," *Journal of Applied Meteorology*, vol.36, pp. 1096-1106.
7. Wu, Y. L., C. I. Davidson and A. G. Russell, (1992a) "Controlled Wind Tunnel Experiments for Particle Bounceoff and Resuspension," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 245-262.
8. Wu, Y. L., C. I. Davidson, D. A. Dolske and S. I. Sherwood, (1992b) "Dry Deposition of Atmospheric Contaminants: the Relative Importance of Aerodynamic, Boundary Layer, and Surface Resistances," *Aerosol Sci. Technol*, vol. 16, pp. 65-81.
9. Transportation Research Board, (1997) "Environmental Research Needs in Transportation," National Research Council, Washington, D.C., March.
10. STAC, (1994) "Atmospheric Loadings to Coastal Areas: Resolving Existing Uncertainties", A Report of the Atmospheric Loadings Workshop, Baltimore, Maryland.
11. 蔣本基、王竹方、楊末雄、望熙榮、張勝祺、樓基中等, (1995-1997) 「台灣地區懸浮微粒空氣污染問題及防治研究」, EPA-86-FA42-09-19, 行政院環保署。
12. 鄭光宏(1996), 「大氣懸浮微粒的粒徑分佈及乾沉降量測」, 國立中興大學環境工程學研究所碩士論文。
13. 鄭福田、杜悅元、陳錦煌、曾文興、照今荃、陳文興、許攻蘭(1997), 「台灣地區酸性沉降物之調查研究」, EPA-86-FA44-09-47, 行政院環保署。
14. 駱尚廉、余嘯雷、王根樹、吳忠信、郭昭吟、官文惠、傅千育、謝淵琳、陶韻智、朱慧安(1997), 「都會區空氣污染沉降量調查評估研究—空氣品質管理對水體非點源污染負荷之影響研究」, EPA-86-FA42-09-91, 行政院環保署。
15. 鄭福田、杜悅元、吳義林(1995), 「台灣地區酸性沈降調查與採樣方法評估—子題一(第六年)期末報告」, EPA-84-E3F1-09-08。