

# 知識天地

## 大氣沈降物質觀測重要性：對生態環境之影響

許世傑副研究員 (環境變遷研究中心)

### 摘要

本文扼要介紹大氣沈降物質對環境生態之多種可能影響，包含酸沈降、沙塵顆粒及其攜帶的鐵沈降、氮沈降及汞沈降，橫跨陸域及水(海)域生態環境。亞洲地區是目前全球大氣污染物排放最多的區域，其中又以中國大陸為最，東北季風期間臺灣位處亞洲大陸的下風處，銜接最大海洋-太平洋，因此提供一絕佳地理位置進行相關研究，尤其是長期系統性跨領域整合研究。

### 前言

一般大眾對空氣懸浮微粒及污染性微量氣體之關切，基本上是由於這些成分對空氣品質及大眾健康密切相關，大家也能從環保署空氣品質監測網快速獲悉即時監測資料。然而與環境生態較直接關連的，並非這些大氣成分的濃度，而是這些物質有多少沈降至這個環境或生態系統中。

大氣顆粒及微量氣體主要藉由乾、溼沈降作用從大氣中移除。所謂乾沈降作用，簡言之，即在沒有降雨情況下，懸浮微粒及微量氣體沈積至環境或生態系統中(受體)之表面，影響因素複雜，主要包括大氣擾動程度、沈降物種之物理性及受體表面性質等。所謂濕沈降作用是大量物質被大氣中凝結水汽(包含雲霧滴、雨、雪)清除後，再降至地面的自然移除作用。以下將介紹幾種主要大氣沈降物質對環境生態之重大影響，涵蓋陸域及海域生態環境；普遍而言，大氣沈降大多對生態環境造成負面效應，但也有少數是正面的，以下將分別介紹酸沈降、沙塵顆粒(又稱礦物顆粒)及其攜帶的鐵沈降、氮沈降及汞沈降。

### 酸沈降

酸沈降泛指酸性成分之乾、濕沈降，主要有硝酸及硫酸氣，以及懸浮微粒中的硝酸鹽及硫酸鹽所貢獻。大家耳熟能詳的酸雨，亦即酸性物質之濕沈降。由於大氣中的二氧化碳溶解於雨水中，氣液相平衡後之雨水酸鹼值約為5.6，過往亦將此值做為界定酸雨之門檻；然近年來，科學界理解到氮氧化物及硫氧化物酸性氣體亦能由自然源產生，如高層閃電生成氮氧化物，火山作用排放二氧化硫，有研究重新評估酸雨定義，認為應將酸鹼值下修至5.0。根據我國環保署之監測結果顯示，臺灣地區降雨以中壢、宜蘭及臺北之酸鹼值為最低，介於4.00與4.99間，明顯受外來污染物影響。根據本實驗室在本院地球所頂樓長期觀測結果顯示，在2007至2010年間(圖一)，月平均酸鹼值大多低於5.0，冬季、晚春及初夏時較低，初秋及初春較高，但二者原因並不同，初春時，常有富含碳酸鈣亞洲沙塵的中和效果，而初秋時主要是颱風雨，颱風雨酸鹼值往往高於5.6，反應正常雨水成分。

一個生態系統所能承受酸沈降量之最大極限，稱之酸沈降臨界負荷值，當酸沈降量超過此負荷值時，將對敏感生態系統造成巨大危害，甚至長久難以恢復；此值高低與降水成分、降水量、地表徑流量及成分與土壤成分等因素有關。酸沈降導致生態系的衝擊涵蓋相當廣，包括森林衰退、湖泊酸化、水中魚蝦不易生存、生物多樣性降低、造成土壤酸化貧瘠、毒性重金屬(包括鉛)溶出累積、農作物欠收、對古蹟和藝術品之侵蝕毀壞。

### 沙塵顆粒及鐵沈降

科學家由深海沉積物及極區冰芯成份分析發現，地質史中數個冰期、間冰期週而復始變化中引人入勝特徵之一，即是冰期低表水溫及低大氣二氧化碳時，沙塵多大幅增加，其攜帶的鐵大幅促進了大洋(尤其是高營養鹽低葉綠素海域)藻類生長被認為是重要的原因之一，據此海洋科學家約翰·馬丁 (John Martin)提出著名的『鐵假說』

(Iron hypothesis)。因此，瞭解大氣沙塵來源及鐵的溶解控制因子，成為國際科學界重視之議題，此亦提供大洋鐵施肥實驗(Iron fertilization)之可行性根基，且為未來寄予希望的地球工程法中碳移除可能方法之一。圖二為利用模式模擬並經觀測資料驗證之北太平洋大氣沙塵沈降量之分佈圖。這些由大氣長距離傳輸來而沈降於大洋的沙塵顆粒，最終沈積於大洋海床上成為深海沈積物，藉由分析堆積量之成分、多寡及速率(配合定年)，便能推測過去地質史中氣候及環境的變遷。

再由陸域生態之角度來看，沙塵顆粒可能為大洋海島帶來植物所需之養分，幫助生物演化。根據研究顯示，夏威夷島土壤中的磷主要來自風化的火山岩石及大氣輸送來的亞洲礦物顆粒，大氣沈降影響夏威夷島之生物地球化學及生態系統至鉅。再者，有『地球之肺』之稱的亞瑪遜雨林，據研究顯示由撒哈拉沙漠傳送來的沙塵，供應了它所需的絕大部分營養，孕育雨林之生生不息。

## 氮沈降

大氣氮沈降主要來自硝酸氣、硝酸鹽、氨氣及氨鹽的貢獻。自工業革命後，全球氮氧化物及氨氣排放量分別遽增3和1倍以上，氮氧化物的主要人為來源包含石化燃料燃燒、交通排放及生質燃燒，而氨氣的主要來源為農業肥料、畜牧業(動物排遺)及生質燃燒。其在酸沈降方面之環境生態效應在前已有所說明，由於氮在許多生態系中往往是生長限制因子，此章節將著重於氮沈降在生態環境中之營養效應。由於大量的氮沈降，已導致溫帶及寒帶森林土壤、河水酸化，土壤陽離子流失，從氮限制改變為磷限制，植物多樣性降低，可能增加碳吸收及儲存，但在亞熱帶及熱帶森林，碳移除的效應變得較複雜。大氣沈降提供生態環境額外的營養鹽，易導致偏遠水域環境優養化；尤其高緯度與高山地區生態對氮沈降相當敏感，森林植物、水中生物與土壤微生物族群都可能因多餘的氮沈降而改變。再者，從觀測結果發現，中國大陸太湖的藍綠藻藻華，可能肇因於過量大氣氮、磷沈降，此影響居民用水品質至甚。根據模式研究結果，因為大氣氮沈降，全球海洋約增加3%新生產力(相當於0.3 Pg C/y，約海洋吸收人為排放CO<sub>2</sub>量的十分之一)，但同時增加N<sub>2</sub>O(很強的溫室氣體)生成(1.6 Tg/y)，大幅抵消碳吸收效益。

## 汞沈降

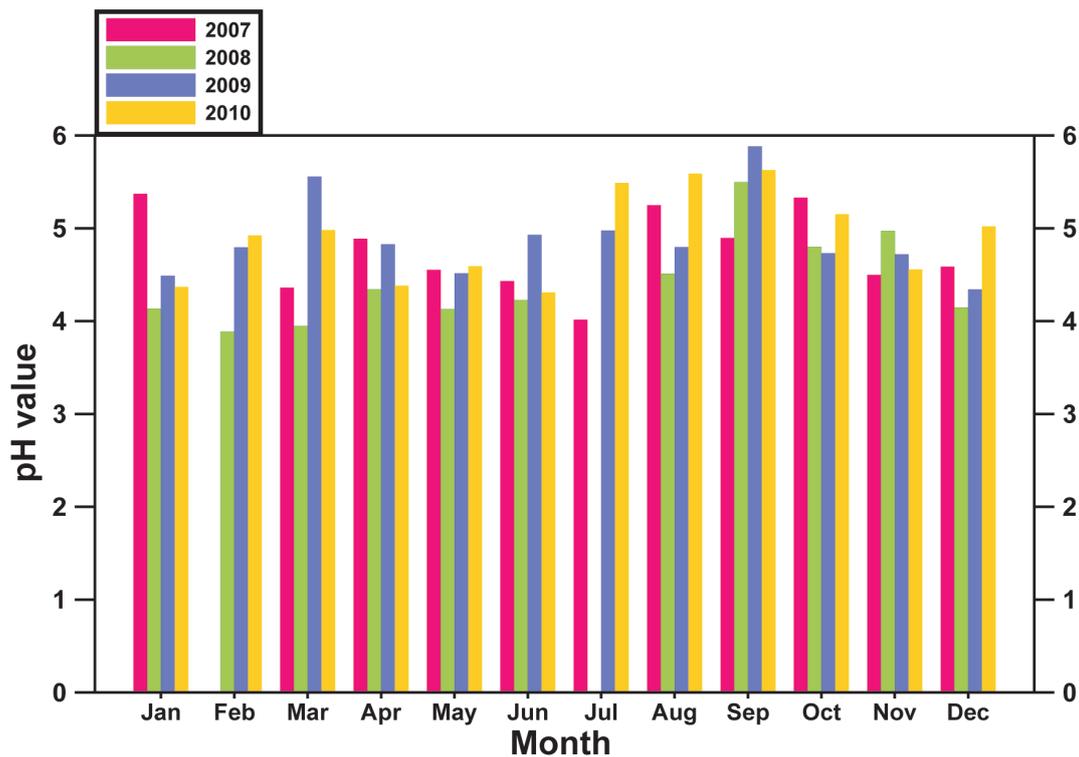
眾所皆知汞具有劇毒，各物種的汞中又以甲基汞毒性為最，累積於生物體內會對大腦及神經系統造成嚴重損害，史上有名重大的汞中毒事件，當屬60年代發生於日本熊本縣水俣市附近，爾後多將汞中毒病徵稱為水俣病。大氣中汞的主要來源包含自然與污染源，自然源主要有火山、森林大火及海洋揮發等；人為污染源有石化燃料及都廢燃燒，尤以燃煤為最。工業革命後人為排放急劇增加，大氣中汞濃度已增加數倍；由格陵蘭及南極冰芯紀錄發現，汞濃度已由150年前1-4 ng/l增加至近期20 ng/l，這些極區的汞絕都從大氣傳輸、沈降而來。由於其揮發性極高，沈降後仍極易再度揮發回到大氣中，使得其影響得以在時間尺度上延續，亦能在空間尺度上擴大。

氧化性二價汞沈降至生態系中後因為微生物作用之後得以轉變為甲基汞，該汞物種極易被水生生物體所吸收而蓄積於組織。這些持久性毒物或污染物在生態系中由低階生物攝食吸收後在身體中累積(生物累積，Bioaccumulation)，隨後再被高階生物捕食，這些物質濃度便在食物鏈生物體中逐漸增加，稱為生物放大作用(Biomagnification或Bioamplification)。因此，許多深海魚類，尤其是獵食性魚類往往容易累積較多的汞及重金屬，健康組織及醫生因而常呼籲孕婦及嬰兒避免攝食過多深海魚。

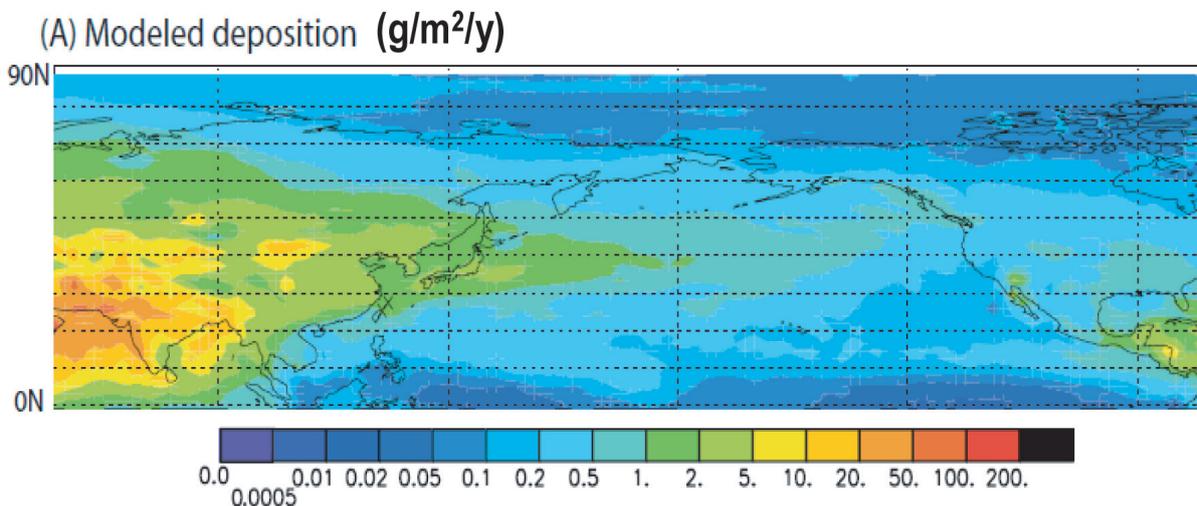
## 結語

由於大氣沈降對環境生態有著各方面不同程度之影響，美國體認其重要性，最早於1978年起進行全國性大氣沈降觀測計畫(National Atmospheric Deposition Program, NADP)，著重於降雨化學成分及其沈降量，並研究其對環境之衝擊，該計畫經過不斷演變並擴大，後續有汞及氨的觀測網加入，至今規模約莫已達四百個觀測站。我國環

保署於民國七十九年開始建構『臺灣酸沈降監測網』，執行酸雨觀測計畫，至今亦獲得許多結果，然觀測點似乎仍有所不足(目前僅有10-15個常態採樣站，且限於濕沈降)。譬如，電視新聞中常有所聞，農畜漁民常將無故突發的損害，歸咎於鄰近工廠或工業區排放污染物沈降所致毒害結果，卻多無法證明，倘有更多沈降觀測則可補其不足。再者，目前中國大陸SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>及NH<sub>3</sub>之人為排放量仍高居不下，分別達30、15及10 Tg，各獨佔全球比例近25%、20%及15%；而2000年亞洲地區汞的排放量超過全球一半(54%)，中國大陸亦獨佔近30%。由於預期亞洲各種大氣污染物排放仍將持續增加，而全球大氣化學模式模擬結果亦顯示，臺灣及鄰近海域是許多大氣污染物質沈降之熱點，包括酸物質、氮、汞及某些重金屬(如銅)等污染物皆然；因此對位處亞洲大陸與太平洋之間的臺灣而言，系統性大氣沈降長期觀測計畫相當需要，除瞭解大氣沈降量之時空變化外，亦應同時監測各種環境生態，以建立這些物質之生化循環模式及審慎評估其產生之環境生態效應。



圖一：2007至2010年間本實驗室在本院地球所頂樓長期觀測之雨水酸鹼值月變化



圖二：以大氣數值模式模擬並經觀測資料驗證之北太平洋大氣沙塵沈降量分佈圖