

冬季層狀雲之雲微物理及化學特性觀測

彭啓明 林能暉
國立中央大學
大氣物理研究所

摘要

本研究旨在探討冬季經過台灣北部層狀雲之雲微物理與化學特性，於1997年1至2月，在竹子山區(約1100公尺)進行地面觀測，獲得鋒面及東北季風雲系個案。所量取的參數包含雲滴波譜、雲水含量及雲水化學組成等。觀測結果發現雲微物理及化學參數之时序變化可以反應出冬季鋒面在通過台灣北部山區之演化過程。鋒面前端雲系之雲滴粒徑較大，約為20 μm ，液態水含量可高達1 g m^{-3} 以上。當鋒面過境時，雲滴數迅速增長三倍，約為600 cm^{-3} 以上，雲滴粒徑減小至約10-15 μm ，後隨鋒面之遠離雲滴數迅速遞減。此現象代表鋒面中有兩種混合作用，分別為雲滴粒徑變化過程(均勻混合)與雲滴濃度變化過程(不均勻混合)。雲水化學成份在不均勻混合過程時，離子濃度明顯增大，雲水pH值降低， $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 出現明顯高值，為空氣與雲滴混合，雨除效率增強所致。雲中海鹽濃度佔總離子濃度60%以上，具有海洋性層積雲之特性。硫酸濃度次之，約佔16%，其值明顯高於台北地面雨水濃度達三倍以上，但硝酸濃度並無顯著差異，顯示雲水並未受局部硝酸鹽污染之干擾，而其中之硫化物可經由雲系移動進行長程輸送至台灣。

一、前言

雲與大氣之交互作用中，雲的微物理及化學結構扮演很重要的角色。例如雲對短波輻射有較強之散射作用，對長波輻射有吸收作用，不同雲滴對不同波長的輻射有迥異的作用，因此若要估算雲對輻射的影響，較必須對雲微物理及化學特徵有正確的了解。再者，透過降雨的過程，雲是大氣污染物有效的清除者(scavenger)，大氣污染物亦會在雲內被轉化或重新分配。根據林等(1995)於在冬季時期於陽明山國家公園竹子山頂進行的觀測，發現當地形雲生成時，雲水的pH值可低達3.0以下，同時雲水主要的化學成份為硫酸根離子及海鹽離子，顯示大氣污染物與雲之交互作用。

台灣地區的地理位置相當特殊，在地形上有兩個特點：(1)台灣地區由海岸至高山僅數十至百公里；(2)台灣由南至北有四大主要山脈群，其有100座山超過3000公尺。在此種特殊條件下，地形雲生成之機率相當多，對地形雲的研究有相當好的條件，尤以在台灣北部山區，於冬季東北季風時期陽明山區常籠罩在雲內，雲底高度低達600公尺，根據過去的先期實驗經驗，可持續數天之久，每年有超過200天有雲之生成。在這種條件，有利於進行地面觀測，可了解冬季層狀雲之雲物理及化學參數及其演進過程。本研究即進行雲物理觀測實驗以探討冬季經過台灣北部層狀雲

之雲微物理與化學特性，

二、觀測實驗

實驗於1997年一月至二月進行，關於測站地點與實驗設備簡述如下：

1. 實驗地點

觀測為測點竹子山站，竹子山(又名嵩山)，位於大屯山脈北緣，標高1103公尺。因七星山位於其東南側，在冬季東北季風盛行時，氣流會因渠道作用沿竹子山及七星山之間的山谷流入，而在竹子山的南側產生一輻合場。經過東海的東北季風挾帶著豐沛的水氣，在上述輻合場垂直上升，因而成雲降水的機率相當高。另外，由於基隆市的工業及交通發展不若台北縣市成熟，污染物的排放濃度較低，因此上述流入竹子山與七星山之間的氣流，其所含的污染物濃度亦相當低，不致污染雲內之組成。本研究之雲物理觀測項目與應用儀器如表1所示。雲物理參數如雲滴分佈、粒徑大小、總數、雲水含量之初步計算，並建立同時期氣象資料之收集與分析，包含衛星雲圖，探空資料及北部局部環流風場，並建立雲系分類方法。因受限於儀器設備與觀測高度，無法做冰相雲之觀測。但表列之雲物理參數已包含研究液相雲必備之基礎，頗適合進行地面觀測。在觀測期間，採全天候觀測，

實驗站研究人員日夜輪班，針對每一雲事件 (Cloud event) 做詳實紀錄。雲事件定義 (Saxena and Lin, 1990; Lin and Saxena, 1991) 為自雲的發生 (Onset) 至消散 (dissipation)，採觀測員之主觀判斷。各事件必須間隔半小時以上，否則視為同一事件。雲之發生以測站鄰近之固定參考點被雲所籠罩開始記錄，運轉儀器，雲水之收集以一小時為基準，視情形增減；雲之消散以測站鄰近之固定參考點 (參考點為相距約 50 公尺之發射台，約 30 公尺高) 不再被雲所籠罩，呈現良好能見度，結束該事件之觀測。每一雲事件所採集之雲水，現場立即測試其酸鹼值，並密封存入冰箱，待送回化學實驗室進行分析，以了解其組成。有關化學分析可參見林 (1996)。配合觀測，在實驗期間，同步收集綜觀天氣圖、板橋探空資料及衛星資料，以供觀測人員參考。並於事後，收錄彭佳嶼、基隆、淡水、台北、鞍部及竹子湖氣象站資料，以了解局部環流形態。觀測實驗所獲得的雲物理資料將按雲之屬性做整理、分類並歸納出其特性。

三、觀測結果討論

1. 鋒面個案 (1/24~1/25)

鋒面自 1/23 日 19 時，開始大陸東移至台灣北部，如圖 1a 所示，雲霧開始在台灣北部生成，此時為鋒面的前端雲系，在台灣北部地區測站均有降雨，如圖 2，雲滴粒徑約為 20-25 μm ，液態水含量約為 0.5-1.0 g m^{-3} ，雲滴數普遍偏少，由雲滴粒徑譜顯示 (見圖 3)，雲滴分布較為寬廣，雲滴粒徑分布相當平均。至 1/24 日 12 時，前一較強鋒面雲系已移走，持續又有隨之鋒面雲系移入，至 1/25 日 8 時結束，此時雖有降雨，然不若前一鋒面強，雲滴粒徑約為 10-15 μm ，雲滴粒徑則迅速增多至 600 cm^{-3} 以上，液態水含量則為 0.5-1.0 g m^{-3} ，雲滴粒徑較為集中在 12 μm 左右。比較此二階段的液態水含量變化趨勢，可發現雖然在此兩階段液態水含量甚為相近，約為 0.5-1.0 g m^{-3} ，然前一階段為大粒徑、少雲滴數，液態水含量變化趨勢與粒徑變化趨勢相近，後者則為較小粒徑、多雲滴數，液態水含量變化趨勢與雲滴數變化趨勢相近，此與 Arend et al. (1994) 於德國 Kleiner Feldberg 之雲物理觀測實驗結果相近，此二階段分別為均勻混合 (homogeneous mixing) 及非均勻混合 (inhomogeneous mixing)。均勻混合之液態水含量與雲滴粒徑變化有關，部份雲滴受蒸發所影響，粒徑有較多變化，雲滴數則較無變化，非均勻混合時，雲滴數與液態水含量有關，雲滴可能因與外界空氣混合造成整體雲滴的蒸發，因此雲滴數或粒徑皆有明顯的變化。二者的差異為雲的氣象條件所造成，例如因垂直運動或穩定度所造成空氣逸入 (entrainment) 的作用，或為不同雲系的雲物理特性。雲水化學成份在不均勻混合過程時，離子濃度明顯增大，雲水 pH 值降低， $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 出現明顯高值，為空氣與雲滴混合，雨除效率增強所致。而離子濃度的極值發生在均勻混合轉變為非均勻混合過

程中，其中雲水 pH 值低達 2.91，DeFelice (1997) 指出當雲水酸度低達 3.5 時，即會對森林生態健康造成影響，此種數小時極端值的變化，值得吾人加以重視。

2. 東北季風個案 (1/25~1/27)

此東北季風個案雲系為接續前一鋒面系統，至 1/27 日 10 時結束。雖為東北季風時期，台灣北部地面風場均為北風或東北風，由探空資料及觀測測站氣象塔資料顯示，高度約 1 公里以上即轉為西風，雲系多由大陸福建、廣東一帶而來，亦伴隨著低層東北季風環流所產生於陽明山區之地形雲。與鋒面系統相較，如圖 1b，雲系顯得較為零散，雲滴粒徑與雲滴數隨著連續數小時持續不斷的雲系經過與消散變化甚大。雲滴粒徑約為 15-20 μm 之間，雲滴數變化甚大，隨雲系的強度變化幅度可由 200 至 600 cm^{-3} ，液態水含量變化與雲滴數變化趨勢相近，普遍而言，液態水含量高於前一鋒面時期，約為 1.0-1.5 g m^{-3} 之間。均勻混合與非均勻混合的情形亦在 1/26 至 1/27 日發生，造成雲水離子濃度有明顯變化，然變化幅度不若鋒面系統明顯，雲水 pH 值皆在 3.5 以上。

整體而言，由雲水化學分析中 (見表 2)，雲水中海鹽濃度佔總離子濃度 60% 以上，具有海洋性層積雲之特性。硫酸濃度次之，約佔 16%，其值明顯高於台北地面雨水濃度達三倍以上，但硝酸濃度並無顯著差異，顯示雲水並未受局部硝酸鹽污染之干擾，而其中之硫化物可經由雲系移動進行長程輸送至台灣。相較於國外雲微物理及化學的地面觀測觀測實驗，如美國的 MCCP (Mountain Cloud Chemistry Project, Saxena and Lin, 1990)，加拿大的 CHEF (Chemistry of High Elevation Fog, Schemenauer et al, 1995)，歐洲地區的 GCE (Ground-base Cloud Experiment) 的 EUROTRAC (European Experiment on Transport and Transformation of Environmentally Relevant Trace Constitution in the Troposphere) 分別對義大利 Po Valley (Fuzzi et al., 1992)，德國的 Kleiner Feldberg (Wobrock et al., 1994)，英國的 Great Dun Fell (Choularton et al., 1997) 所進行的實驗。台灣地區的層積雲顯然有其獨特性，例如，在台灣北部地區，冬季可區分為三種雲系，此雲系分別來自不同地區並有不同的動力及熱力機制，鋒面雲系係自大陸東南東移或南移至台灣地區，東北季風雲系分別有直接來自福建一帶或自東海南移而來，地形雲為微弱的東北季風下所產生。同時受地形作用，雲系都受到地形抬升影響而增強雲系之發展，在多種不同氣象特性下，分別有不同的雲物理及化學特性，或可代表東亞地區季風時期不同雲種的特徵。此外在雲水化學濃度上，台灣北部山區所收集到雲水離子濃度明顯偏高，平均值僅低於義大利 Po Valley。Po Valley 為高度空氣污染地區，與美國東部 MCCP 實驗於污染氣流來源發生時之平均濃度接近。在地理環境上，英國 Great Dun

Fell 與本實驗相似，皆為明顯之海洋性層積雲及地形雲，然 Great Dun Fell 地區之離子主要為硫酸根離子、銨根離子及硝酸根離子，台灣北部所量測到雲水中海鹽濃度佔總離子濃度 60% 以上，具有海洋性層積雲之特性，此與美西 CACHE-1 實驗以飛機收集到的海洋性層積雲組成類似(Vong et al., 1997)。但台灣北部收集到之硫酸根離子濃度卻佔 16%，雲水 pH 值明顯較低。在台灣北部山區，無降雨之雲事件，可代表單純之地形雲作用下，雲水 pH 值有 50% 上機率小於 3.5，此種顯著高海鹽、高硫酸根離子濃度的特性，卻非當地污染源所貢獻所導致，值得進行深入探討。

四、結論

觀測資料可利用於理論研究和模式結果分析的驗證，但相對地對於觀測儀器的解析能力及完整性也必須加以嚴格要求，對於雲物理觀測才剛起步的台灣而言，有效觀測資料的建立實為一大課題。本研究在竹子山區(約 1100 公尺)進行地面觀測，獲得鋒面及東北季風雲系個案。所量取的參數包含雲滴波譜、雲水含量及雲水化學組成等。觀測結果發現雲微物理及化學參數之时序變化可以反應出冬季鋒面在通過台灣北部山區之演化過程。同時亦區分出不同雲系之雲微物理及化學特性，未來將持續進行觀測，並利用雲模式進行理論上的探討。

參考文獻

林能暉，陳景森，林民生，李崇德(1995) 地面造雨期間之雲物理觀測。CWB-84-2M-11。

林能暉(1996) 局部大氣環流對大氣污染物濃度分布之影響(II) NSC-85-2111-M-008-014。

林能暉，陳正平，林民生(1996) 發展台灣地區長期人造雨計畫：雲物理觀測實驗(一)，中央氣象局期末報告。

Arend, et al., 1994: Microphysics of clouds at Kleiner

Feldberg, *J. Atmos. Chem.*, **19**, 59-85.

Choularton, et al., 1997: The Great Dun Fell Cloud experiment 1993: An overview. *Atmospheric Environment*, **31**, 2393-2405.

DeDelice, T. P., 1997: Investigation of wet acidic deposition episodes capable of damaging Red Spruce in the Mt. Mitchell State Park. *Atmospheric Research*, **43**, 325-344.

Fuzzi, et al., 1992: The Po Valley fog experiment: A overview. *Tellus* **44B**, 448-469.

Lin, N.-H., and V. K. Saxena, 1991: Interannual variability in acidic deposition on the Mt. Mitchell area forest. *Atmospheric Environment*, **25A**, 517.

Saxena, V. K., and N.-H. Lin, 1990: Cloud chemistry measurements and estimates of acidic deposition on an above cloudbase coniferous forest. *Atmospheric Environment*, **24**, 329.

Schemenauer, R. S., C. M. Banic, and N. Urquizo, 1995: High elevation fog and precipitation chemistry in southern Quebec, Canada. *Atmospheric Environment*, **29**, 2235-2252.

Vong, et al., 1997: Ionic and trace element composition of cloud water collected on the Olympic Peninsula of Washington State. *Atmospheric Environment*, **31**, 1991-2001.

Wobrock, et al., 1994: The Kleiner Feldberg cloud experiment 1990: An overview. *J. Atmos. Chem.*, **19**,

表1、實驗所使用之儀器及量測參數

儀器名稱	量測參數
雲霧水收集器 (ASRC passive collector)	雲霧水
二階雲霧水收集器	二階粒徑雲霧水
氣溶膠譜儀 ASASP	氣溶膠譜
雲滴譜儀 FSSP-100	雲滴譜
雨滴譜儀 GBPP	雨滴譜
PVM (Particulate Volume Monitor)	液態水含量
Denuder	氣體成份
地面氣象塔	氣象參數

表2、鋒面個案及東北季風個案之雲水離子平均值 (unit: conductivity in $\mu\Omega\text{ cm}^{-1}$, ion concentration in $\mu\text{eq l}^{-1}$)

Event	pH	Cond. u	BCl ⁻	qNO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Total ions	
Front													
	μ	4.14	154.1	669.9	84.3	332.0	89.0	608.7	105.4	22.3	112.0	94.1	2117.6
	σ	0.59	151.5	1036.0	173.7	434.2	105.3	991.4	155.6	33.3	145.2	183.0	
	Max	6.43	798.0	8850.2	1130.7	2661.9	575.4	9065.2	885.0	206.3	785.7	1177.4	
	Min	2.91	5.7	12.3	0.0	5.8	0.2	7.1	0.0	0.0	2.5	0.0	
	% of sum			31.6	4.0	15.7	4.2	28.7	5.0	1.1	5.3	4.4	
Monsoon													
		3.79	251.3	1383.0	102.4	455.5	164.9	1230.4	174.0	30.8	197.3	103.5	3841.8
		0.49	200.0	1580.8	128.6	428.6	146.1	1340.0	320.6	40.6	241.2	222.7	
		5.96	768.0	6803.0	690.0	1937.8	776.3	4880.2	1783.0	214.5	1212.9	1298.2	
		2.63	27.7	30.1	6.7	54.9	1.3	22.1	0.0	0.9	0.6	0.5	
				36.0	2.7	11.9	4.3	32.0	4.5	0.8	5.1	2.7	
Total		4.08	182.3	795.4	87.5	353.7	102.3	718.1	117.4	23.8	127.0	95.8	2420.9
		0.59	172.3	1179.6	166.6	435.1	116.9	1085.0	196.1	34.8	168.9	190.3	
		6.43	798.0	8850.2	1130.7	2661.9	776.3	9065.2	1783.0	214.5	1212.9	1298.2	
		2.63	5.7	12.3	0.0	5.8	0.2	7.1	0.0	0.0	0.6	0.0	
				32.9	3.6	14.6	4.2	29.7	4.9	1.0	5.2	4.0	

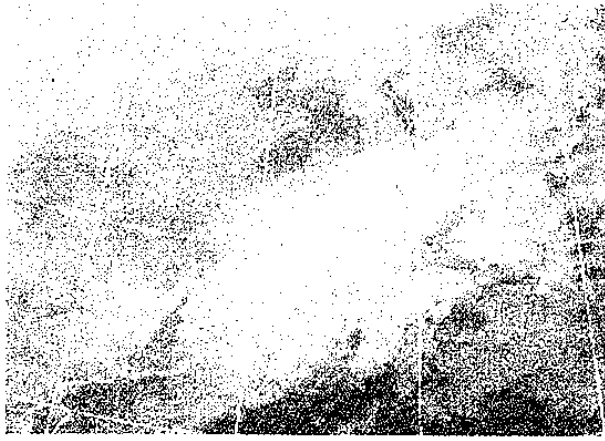


圖 1a、1997 1/24 日 04 時鋒面個案之紅外線衛星雲圖。



圖 1b、1997 1/27 日 04 時東北季風個案個案之紅外線衛星雲圖。

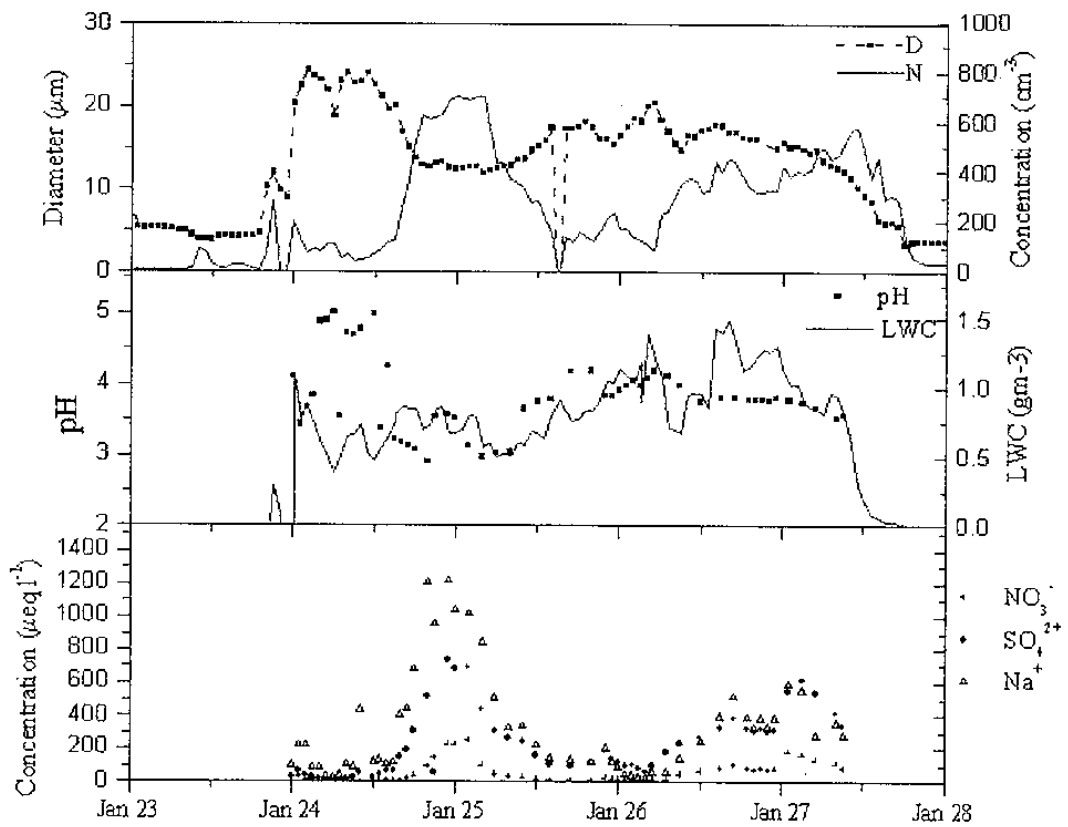


圖 2、觀測期間之雲滴平均粒徑、雲滴數、液態水含量、pH 值及主要離子時序變化。

Cloud Droplet Spectrum 970124-970127

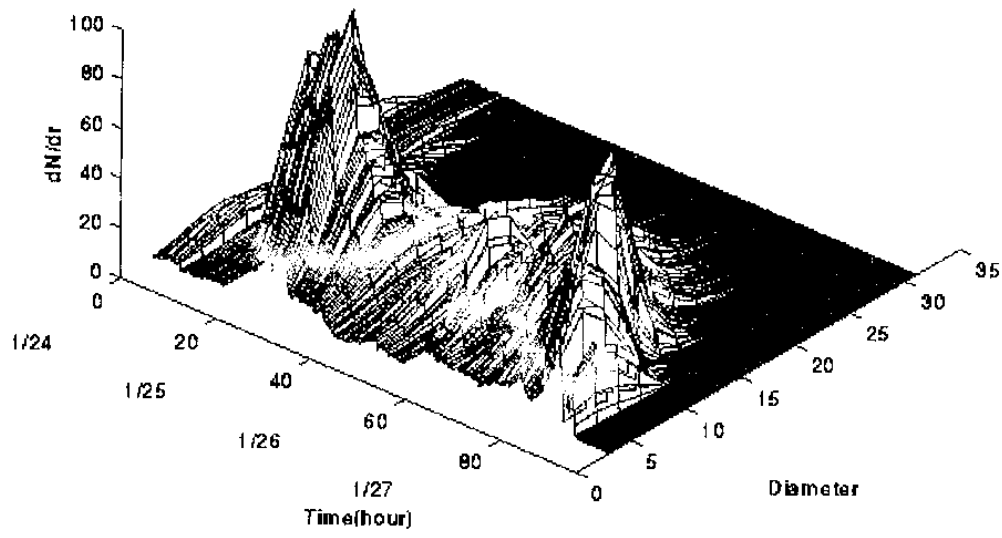


圖 3、觀測期間雲滴粒徑譜時序變化。