

東亞地區硫化物之長程輸送： (第一部份) 氣流軌跡線之應用

林能暉 彭啓明 陳進煌

國立中央大學大氣物理研究所

(中華民國八十七年十月十五日收稿；中華民國八十七年十一月二十四日定稿)

摘 要

本文的主要目的乃應用氣流軌跡探討東亞硫化物的長程輸送，並利用到達台北地區之氣流軌跡、東亞硫排放量及氣流之運動路徑定義一個新的定量污染指標，以了解東亞各區域對台北可能的污染潛力。研究結果顯示影響台北地區的 850hPa 氣流來源，於東北季風型降水時期，以大陸東南沿岸的江蘇、浙江一帶為主，青康藏高原東側四川、雲南地區的氣流輻合區以及河南、陝西次之；春季及梅雨季鋒面型降水時期，氣流以來自台灣西南方向的福建、廣東地區為主，同時並延伸至中南半島；秋冬季鋒面降水時期則以台灣西方由福建延伸至大陸內地的四川、雲南地區為主。污染潛力以東北季風降水時期最高，分布區域較廣，春季及梅雨季鋒面型次之，秋冬季鋒面型最小，然其分布範圍與東北季風型相近。1990-1995 年之總污染潛力指標顯示大陸東南沿岸地區對台灣污染潛力最高，四川附近次之，大陸對台灣的影響潛力不僅限於鄰近東南沿海，其內陸之硫排放量亦可隨大尺度環流輸送而來。

關鍵字：硫化物，長程輸送，後推軌跡線，污染潛力指標。

一、前 言

近年來，由於東亞地區經濟的快速發展，應運而生的空氣污染問題日益嚴重，其所排放之污染物的長程輸送亦漸為各國所重視。Merril et al. (1989) 指出影響日本地區的硫化物主要源區為大陸的東北地區及南韓，而影響南韓的主要源區則為大陸的東北及渤海灣沿岸。Kotamarthi and Carmichael (1990) 曾估計東亞地

區的酸沈降量，並指出酸性污染物長程輸送對局部酸沈降扮演相當重要的角色。Murao (1993) 估計日本地區的酸沈降量經由大陸地區之長程輸送的影響於冬季最高，特別是在日本海附近，長程輸送的貢獻高達 79-89%。根據 Akimoto and Narita (1994) 的估算，東亞地區 (大陸、台灣、香港、日本及韓國) 的 SO_2 及 NO_2 排放量，分別佔亞洲總排放量的 81% 及 70%，而大陸排放的

SO₂及NO₂又分別佔東亞地區總排放量的86%及68%，顯示東亞地區為亞洲污染物的主要貢獻來源，而大陸又為東亞污染物的主要來源。Ayer and Yeung (1996) 的研究顯示，隨著大陸地區經濟的快速發展，大陸地區的SO₂排放量於2010年將到達48.8 Tg S yr⁻¹，約為目前的一倍以上。因此，威信亞洲地區的酸沈降之跨國輸送問題，將會是21世紀東亞各國間必須面對的環境課題之一。

Lin et al. (1998) 整合1990-1995期間環保署之酸雨監測網(林與陳, 1997; 鄭, 1998), 林業試驗所之高山酸雨站(King et al., 1995)及大桃園酸雨監測網(Lin et al., 1998, Chang et al., 1997)之資料, 計算全國酸雨的分布及酸性污染物(硫酸根及硝酸根離子)之沈降水量, 結果發現北台灣地區降水pH值之年平均值約為4.5, 與美東地區相仿, 雨水酸化情形相當普遍。北部硫酸沈降水量在100公斤/公頃/年以上, 桃園地區更高達130公斤/公頃/年, 為美東最大值的兩倍以上。此外, 北台灣各站在發生酸雨(定義為降水pH<5.0)的總日數當中, 東北季風與鋒面系統降水型態合計達50%以上, 在此降水系統下, 污染物自源區排放後, 可以隨氣團運動, 經由長程輸送影響降水組成; 反之, 局部性降水型態則不超過30%。硫酸沈降水量在東北季風及鋒面型降水的貢獻約佔80%左右, 因此可以推知酸性污染物的長程輸送對台灣地區的酸沈降應扮演相當重要角色。故在探討酸性污染源與受體的關係上, 綜觀天氣型態與其伴隨之氣團運動是首要解析之要素。

至於鄰近區域國家對台灣影響的研究中, 陳等(1995)指出大陸海岸的污染物無法由低層直接穿越台灣海峽輸送至本島, 但高於邊界

層的西風可輕易且快速地將大陸上空的污染物傳送至台灣上空。Lin et al. (1996) 指出在東北季風盛行時, 韓國所釋放的硫化物, 約48小時便可傳送且沈降至台灣地區; 大陸東北地區所釋放的硫化物, 約72小時後逐漸傳送至台灣地區。柳(1995)亦指出台灣位居東亞大陸與西太平洋交界, 東亞與中國大陸的污染排放, 將順著冬季東北季風與夏季西南季風, 抵達台灣地區。相反地, 在大陸地區的相關研究中, 例如, Huang et al. (1995) 則指出大陸地區的硫化物對外輸送至其他地區的比例並不大, 其他地區反而會對大陸地區進行輸送, 這種論點與一般性理解不符, 更與上述本地研究結論相衝突, 顯見未來跨國輸送將成為區域性潛在爭論的問題。

在探討大氣污染物的傳送問題上, 模式模擬是最主要的研究方式之一, 例如 RADM (Regional Acid Deposition Model, Chang et al., 1987) 或 ADOM (Acid Deposition and Oxidant Model, Venkatram et al., 1988) 的三維 Eulerian 網格空氣品質模式, 但此種三維模式須大量的電腦時間及資料儲存空間, 一般多用於個案的探討上, 對於區域性的互動關係或較長時間的範圍尺度的應用上不若氣流軌跡模式的便利。氣流軌跡模式可應用在氣流來源與降水化學特性研究 (Galvin et al., 1978, Miller et al., 1978, Samson 1980), 或是應用於污染源與受體間定量的探討 (Cheng et al., 1993, Carmichael et al., 1993)。然而其在源與受體關係探討中涉及複雜的氣象及化學反應, 在定量上目前仍有許多待改進之處。

本文乃修改美國國家海洋與大氣中心之氣流軌跡整合模式, 使其適用於東亞地區, 用以計算在1990-1995年期間伴隨東北季風及鋒面型酸性降水事件中之氣流軌跡, 並探討硫化物(造

成酸雨之主要前驅物)之長程輸送，據此定義一個新的污染指標以量化東亞各區域對台灣可能的污染潛力，俾益於瞭解台灣酸沈降源與受體的關係，作為釐清跨國輸送責任歸屬之科學依據。

二、研究方法

以下介紹本研究所使用之氣流軌跡模式及用以探討污染源與受體關係之污染潛力指標。

(一) 氣流軌跡整合模式

本研究所使用之氣流軌跡整合模式 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories, HY-SPLIT) 為美國國家海洋與大氣中心 (US National Oceanic and Atmospheric Administration) 最新發展的軌跡模式，用以探討污染物之長程輸送 (Draxler, 1993)。模式最主要特色乃以 Lagrangian 方法計算粒子的平流與擴散作用，而以 Eulerian 方法處理輸入的氣象資料，故稱為氣流軌跡整合模式。原先模式設計為針對北美中高緯度地區使用，使用極座標投影 (Polar stereographic projection)，為應用於東亞地區，吾人將其修改為適用於中低緯度的藍伯特投影 (Lambert stereographic projection)。氣象資料採用 EC/TOGA 資料，其為 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的網格資料，吾人使用 Bessel 十六點內差法將資料內差為 $1^\circ \times 1^\circ$ 。模式區域為 $90^\circ \text{E} - 155^\circ \text{E}$ ， $5^\circ \text{S} - 50^\circ \text{N}$ ，共有 65×55 個網格。模式模擬 1990 至 1995 年每日 00UTC 之台北在 850 hPa 等壓面之五日後推氣流軌跡線。一般而言，探討污染物傳送問題時，經常採用 850 hPa 等壓面，主因是氣塊位於大氣邊界層之上，污染物在此層容易隨自由大氣進行傳送，並與雲系混合，且污染物濃度較不

因垂直運動而被稀釋。一般而言，做氣流分析研究時，若假設空氣塊沿著等熵面作絕熱運動而得到等熵面氣流軌跡線，若假設空氣塊沿等壓面運動則得到等壓面軌跡線，其中因等熵面有考慮到氣流的垂直運動，較接近真實的大氣狀況。陳 (1995) 針對二者進行個案比較，發現相差不大，但因計算等熵面的氣流軌跡時，由於需要解析度較高的氣象資料以求取等位面，然而，EC/TOGA 資料在低層解析度較差，故吾人使用等壓面計算氣流軌跡，以代表污染物在此層上之傳送行為。

(二) 網格氣流軌跡頻率函數

由模式所計算之氣流軌跡為氣流的逐時位置(經度與緯度值)的連結，因此，本研究所使用之 850 hPa 等壓面五日後推軌跡有 120 組經度與緯度值代表該氣流軌跡之路徑。如圖 1 所示，當氣流經過任一 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格 (x, y) 時，因其在 850 hPa 的風速約為 $10 - 20 \text{ m s}^{-1}$ ，氣流軌跡會在此 $1^\circ \times 1^\circ$ 網格內停留約數小時。吾人定義由上節所計算出來到達台北的所有氣流軌跡通過網格

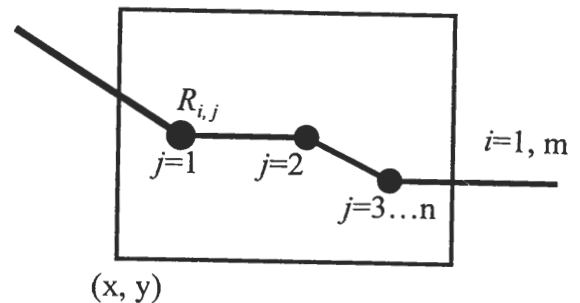


圖 1 到達台北氣流軌跡 i 通過網格 (x, y) 時之示意圖， (x, y) 代表該網格之中心位置， j 代表氣流在網格內每小時停留的位置， $R_{i,j}$ 則為氣流 i 實際由其位置 j 沿氣流軌跡運動至台北 $(0, 0)$ 之積分路徑。

(x, y) 的逐時累積次數 $f(x, y)$ 為該網格之氣流軌跡頻率函數 $F(x, y)$ ，其表示方式如下

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^m f_i(x, y) \quad (1)$$

其中 (x, y) 代表該網格之中心位置， i 為某氣流軌跡線，共有 m 條，如表一所示在東北季風型降水時共有 62 條軌跡線(即對應 62 個降水事件)。在模式範圍內，共 65×55 個網格點。若不考慮該網格之污染物排放量， $F(x, y)$ 越大則代表氣流軌跡通過該網格的累積頻率越高，亦即氣流在該網格停留的時間越長，即表示該氣流能攜帶該網格所排放的污染物的量越多，對台北的污染潛力相對越高。

(三) 污染潛力指標

酸雨的前驅物主要為 SO_2 ，其在大氣中可轉化成 H_2SO_4 成硫酸鹽，或可藉由雲進行化學反應成為硫酸根離子，繼而可經由乾、濕沈降過程，最後降至地表。硫酸鹽由於生命期較長，輸送尺度可達數百公里遠甚至超過 1000 公里，通常可作為長程輸送的指標。Uedar and Carmichael (1993) 研究顯示， NO_2 於 24 小時內便經由 HNO_3 的乾沈降形式而被洗除了 50%，而相同時間內， SO_2 僅被移除約 20%。為探討氣流經過不同網格源區而攜帶其所排放的硫化物對台北地區造成的污染潛力，吾人假設該網格源區之硫排放量在沿氣流至台北之積分路徑傳送時，會因沈降或其他作用自大氣中移除，其衰減率與路徑成反比，據此，吾人定義該網格 (x, y) 對台北產生之污染潛力指標 (PPI, Pollution Potential Index) 為：

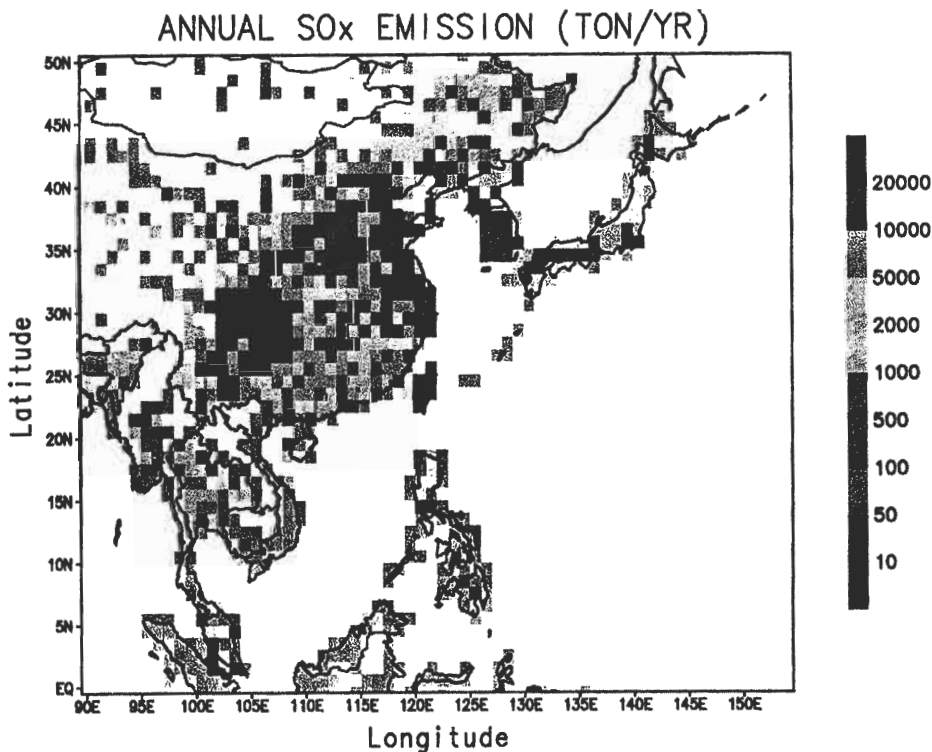


圖 2 1987 年東亞地區 $1^\circ \times 1^\circ$ 之硫化物排放量(參見 Akimoto and Narita, 1994)。

$$PPI(x, y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{E(x, y)}{R_{i,j}(x, y)} \quad (2)$$

其中 $E(x, y)$ 為該網格的硫化物排放量，採用 Akimoto and Narita (1994) 所估算的東亞 $1^\circ \times 1^\circ$ 硫化物之年排放量，如圖2所示，東亞地區的高硫化物排放量以大陸地區的東部沿岸、東北、四川為主，韓國及日本也是高硫化物排放區。在此，假設網格源區之每日排放量是均等的。 $R_{i,j}(x, y)$ 則為氣流 i 實際由網格 (x, y) 內之位置 j (共 n 個，見圖1) 沿軌跡運動至台北 $(0, 0)$ 之積分路徑。

三、結果與討論

(一) 台北地區酸沈降與伴隨之降水系統

Lin et al. (1998) 利用聚類分析 (cluster analysis) 探討台北地區降水化學組成的可能污染源，並指出東北季風及鋒面型降水事件與雨水中含高硫濃度有高度相關，顯示硫化物隨天氣系統運動而行長程輸送。圖3 (a) - (c) 分別為典型東北季風、春季及梅雨季鋒面、秋冬鋒面型降水的地面天氣圖。我們分析台北酸雨站 (參見林，1998；鄭，1998) 自 1990 - 1995 所有降水事件歸屬於上述三類降水型態之化學組成，如表一所列雨水中主要致酸因子的硫酸根離子 (SO_4^{2-}) 與硝酸根離子 (NO_3^-)，以及二者之比值。 SO_4^{2-} 主要由 SO_2 自排放源排放進入大氣後，經一連串氧化過程而先形成硫酸鹽，其生命期可由數小時至數日 (Seinfeld, 1986)，期間可以作為雲之凝結核 (in-cloud scavenging) 或被雨水刷洗自大

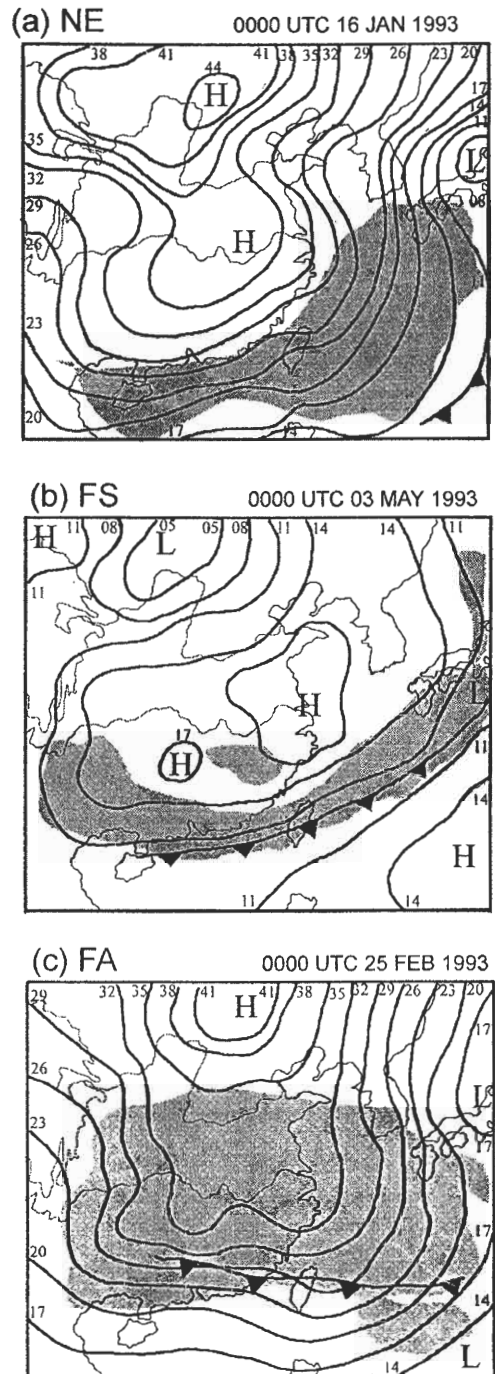


圖3 三類降水事件對應之典型地面天氣圖，(a)東北季風型(NE)，(b)春季及梅雨季鋒面型(FS)，(c)秋冬季鋒面型(FA)，顏色較深區域表由衛星雲圖所觀測之雲系分布，

氣中移除 (below-cloud scavenging)，而溶於雲水或雨水中而成離子狀態，一般可視為長程輸送的重要指標之一。然而， NO_3^- 為其前驅物 NO_x 經光氧化反應生成硝酸氣體或硝酸鹽類，經降水溶解而成離子狀態。但因上述氣固相硝酸類易因乾、溼沈降作用而自大氣中去除，生命期約數小時至 1-2 日左右，不易脫離大氣邊界層至自由大氣，所以，一般視為局部污染物之指標。因此，若當地無明顯之硫污染排放源，雨水中 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 之比值越高則表示受長程輸送影響相對越高，反之，則局部生成之硝酸類經雲下攔截 (below-cloud scavenging) 作用溶入雨水中，主控其中之酸度。

由表一可以明顯看出三種降水型態中，以東北季風型降水之 SO_4^{2-} 濃度最高，約比其他二種降水高出 50% 左右；二種鋒面型則相差不大。然而，三者之 SO_4^{2-} 遠大於 NO_3^- ，其比值 ($\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$) 大約等於 3.0 左右，顯示硫之長程輸送必定具相當之貢獻。表一中另列有夏季當太平洋高壓主控台灣地區時所形成之對流性降水之化學，吾人可以觀察到其 SO_4^{2-} 與鋒面型降水相當，但 NO_3^- 卻為後者兩倍以上，而其 ($\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$) 之比值僅 1.4，顯示局部對流性降水迅速將台北盆地內累積之硝酸類污染物自大氣中刷洗掉而溶於雨水中，形成重要之致酸因子。

表一 台北酸雨站 1990-1995年東北季風、春季及梅雨季鋒面、秋冬季鋒面及太平洋高壓主控時降水事件之雨水化學資料。

降水型態	事件數 ^a	pH	SO_4^{2-} ^b	NO_3^- ^b	$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$
東北季風	62	4.29±0.45 ^c	151.5±154.4	47.4±56.0	3.2
春季及梅雨季鋒面	47	4.47±0.49	108.4±70.1	36.1±29.3	3.0
秋冬鋒面	40	4.39±0.45	94.0±62.8	31.5±31.5	3.0
太平洋高壓	24	4.88±0.94	107.6±63.6	74.8±46.6	1.4

a. 每一降水事件為自每日 00UTC 起 24 小時採樣。

b. 單位為 $\mu\text{eq} \cdot \text{l}^{-1}$ 。

c. 平均值±標準方差。

因此，吾人將特別針對以上三種伴隨硫長程輸送之降水天氣型態作氣流軌跡追蹤，利用第二章所定義的新方法，應用於追蹤硫之潛在污染源區，並定量估算各源區之於台北地區之污染潛力。

(二) 台北地區之氣流頻率函數

圖4 為吾人利用 HY-SPLIT 計算1990-

1995年台北三類降水事件所對應之氣流軌跡線，結果顯示東北季風型降水事件時之氣流軌跡主要源自大陸東北、韓國及大陸東部沿岸(如圖4a)，源自大陸東南的氣流軌跡次之。雖然由地面天氣圖與衛星雲圖判別當日降水型態為東北季風形式，但由於所計算的為850 hPa 等壓面的氣流軌跡，較接近西風帶，因此氣流較地面的東北風向偏西。林等 (1994) 研究各季節氣流頻率

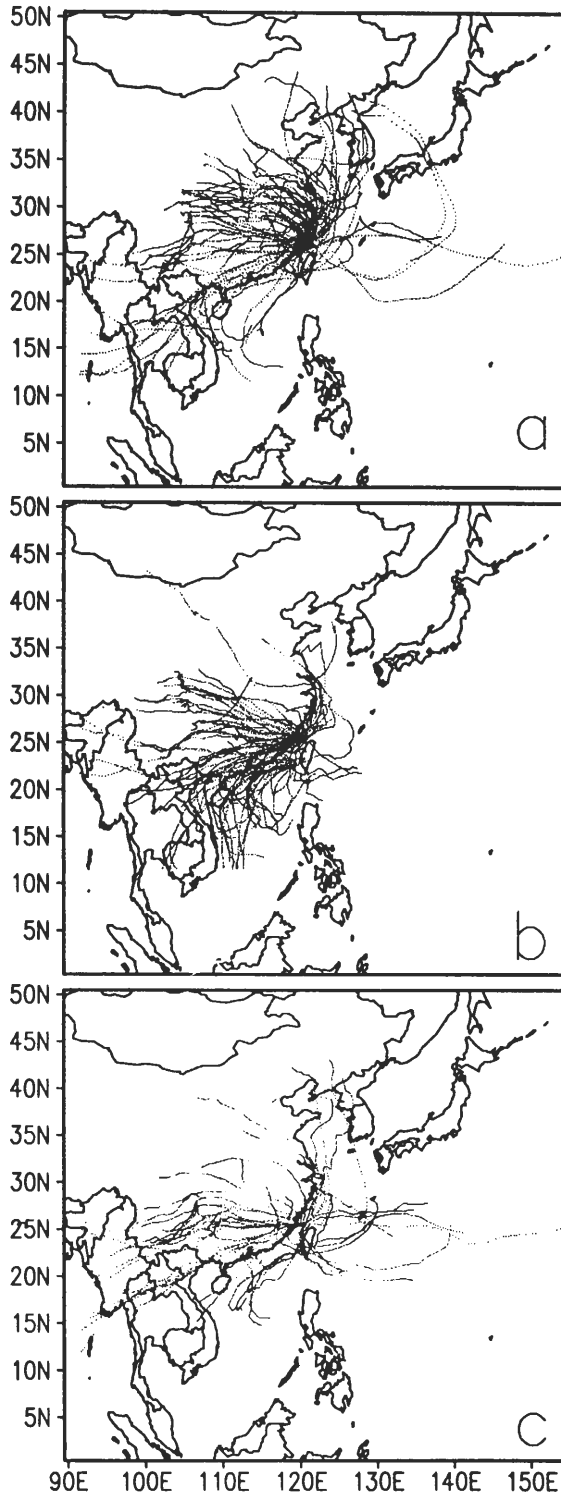


圖 4 台北地區於 1990-1995 年對應於 (a)東北季風型, (b)春季及梅雨鋒面型, (c)秋冬季鋒面型, 三類降水事件 850 hPa 等壓面五日後推氣流軌跡線。

分布,發現台灣冬季受東北季風影響的高度並不高,氣流主要源自台灣的西南方向,東北方向次之。由於其所計算的高度較高,為 700-850 hPa。相對於其結果,本研究使用 850 hPa 等壓面,高度較低,故當東北季風主宰時為盛行東北風,反之,受到西風帶影響,則為西風或西南風。因此在東北季風時期,若以 850 hPa 等壓面為污染物排放傳送的高度時,氣流來源將不限於東北地區,亦可觀察到經過大陸內陸的氣流行長程輸送至台灣地區。進一步觀察氣流累積頻率函數 $F(x, y)$ (圖5a),可看出氣流頻率最高的地方分布於台灣北部附近的大陸沿海福建、浙江、江蘇至東海一帶,整個大陸東南亦屬氣流頻率分布的區域。

另外,圖4(a)亦顯示對應東北季風型降水之氣流軌跡分布可擴及南海至中南半島附近,甚至太平洋洋面亦有少許分布,似與東北季風時期的氣流型態概念有所差異。此差異可能為氣流軌跡後推時間是以每日上午八時(00 UTC)配合每日降水收集時間開始後推,但實際降水肇始時間在過去二十四小時內任何時刻皆有可能發生,故部份後推氣流軌跡無法完全反應當時的降水之氣流來源,或為採樣時之人為記錄誤差等因素所造成。所以,軌跡有偏東或偏南的結果。

春季及梅雨季鋒面型雲系主要於大陸長江一帶生成(參見圖3b),隨系統運動移至台灣地區。由於鋒面所處的位置為西南氣流與東北氣流的輻合區,北台灣常位於鋒前的西南氣流地區,此輻合現象在地面至 850 hPa最顯著。此類降水系統所對應之氣流軌跡(圖4b所示)主要源自台灣的西至西南方向,屬鋒前的氣流,東北方向次之,為鋒後的氣流,並有少部份來自東南方。氣流頻率函數較高地區分布在(圖5b)台灣

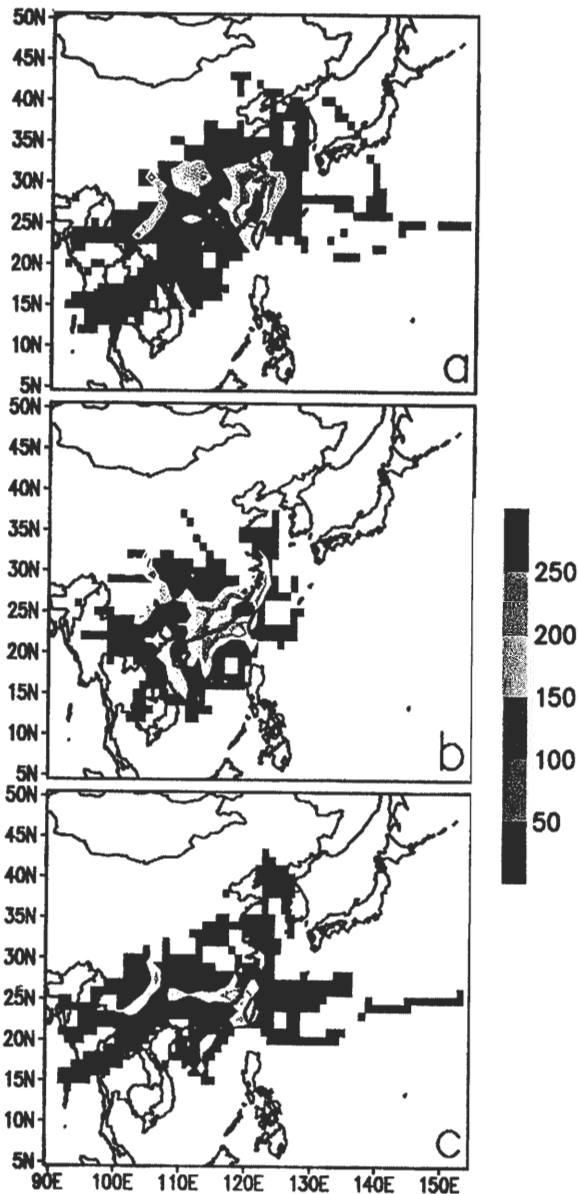


圖 5 三類降水事件對應之氣流頻率函數 $F(x, y)$ 分布: (a)東北季風型, (b)春季及梅雨鋒面型, (c)秋冬季鋒面型。

的西側至大陸福建沿海,並延伸至廣東東南沿海地區。Chen (1994) 分析台灣的梅雨季鋒面結構,指出在850 hPa常有低層噴射氣流,其氣流主軸位於鋒面之南側,因此,雲系很容易自大陸

華南地區直接隨氣流移動至台灣地區。Yu et al. (1997) 研究亦顯示大陸福建廈門地區的鋒面,通常為西南-東北走向,然後東移經台灣海峽進入台灣地區,與本地的降水為同一個系統。由於雲系為直接隨鋒面東移,正與氣流頻率函數以台灣海峽至福建沿海最為顯著的分布情形相吻合。

至於秋冬季鋒面型之氣流軌跡分布,則較春季及梅雨季鋒面型為廣,主要源自台灣的西南方、西方及北方(圖4c),分別對應鋒前、鋒內或鋒後的大氣環流特性所致。此外,如圖5c所示,氣流頻率函數以福建以西至青康藏高原東側、台灣西南經台灣海峽至南海及大陸東部沿岸之浙江、江蘇地區最高。與春季及梅雨季鋒面型相較,源自韓國、大陸東北區域氣流軌跡較多,整體分布區域較廣,與東北季風型類似。此乃春季及梅雨季鋒面大多由大陸東南延伸至日本,滯留時間長達數日之久,而秋冬季鋒面移動較為快速,在鋒面過境台灣後即轉變為東北風,因而使由大陸東北而來的氣流明顯加強。台灣地區秋冬季時期的降水,主要是東北季風與鋒面型降水,二者在高層氣流環流場特性接近,故氣流來源分布上較為相似。

為進一步探討與比較以上三種降水事件之氣流頻率分布之區域,吾人將各網格之氣流頻率按照大小依次加以排序,並圈選出佔氣流總累積頻率之前25%及50%之網格涵蓋區域。結果如圖6所示,紅色區域為各網格內之氣流頻率總和佔總氣流頻率之25%,黃色區域為50%,即代表所有氣流在空間上通過機率的前25%及50%的區域分布。對東北季風型而言(圖6a),前25%之氣流頻率函數主要集中於浙江與江蘇沿海一帶,而前50%則由前述區域擴大乃

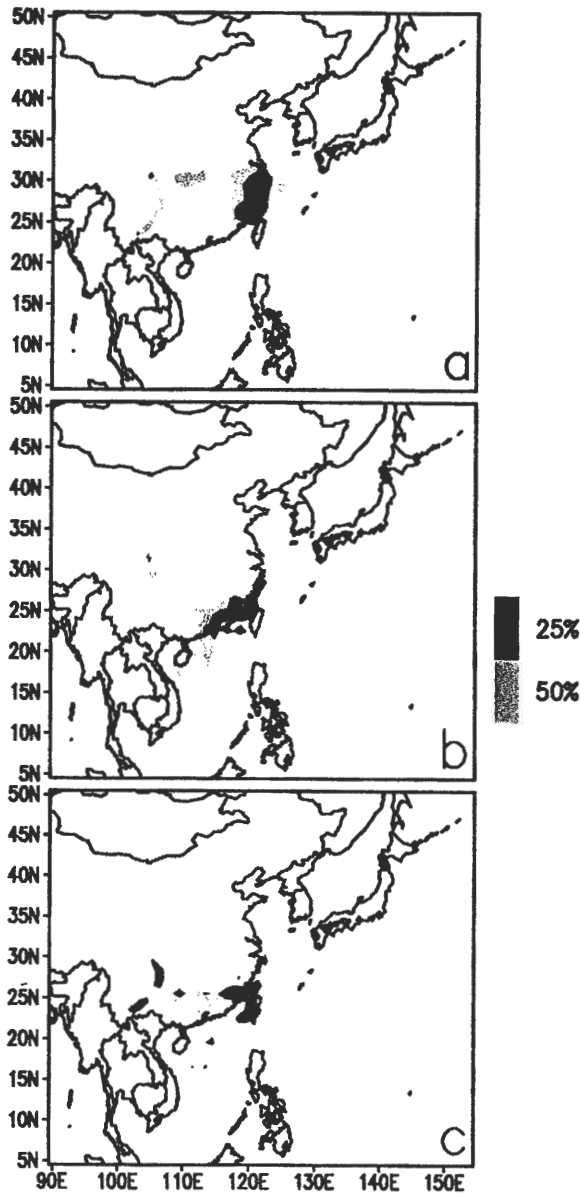


圖 6 三類降水事件對應之氣流頻率函數佔氣流總累積頻率之前 25%及 50%之網格涵蓋區域：(a)東北季風型，(b)春季及梅雨季鋒面型，(c)秋冬季鋒面型。

至東海地區，另外青康藏高原東側與四川亦有少量分布。春季及梅雨季鋒面型（圖6b）的前 25% 主要分布於大陸福建、廣東沿海而向南延伸；秋冬季鋒面型（圖6c）雖然亦以福建、浙江沿海為

主要集中帶，但較為零落，並擴及台灣的西南洋面上，並在青康藏高原東側的輻合區另有一明顯的集中區域。

表二比較此三者前 25%及 50%氣流頻率函數在所屬區域內之網格平均值與空間分布機率，三種降水型態中以春季及梅雨季鋒面型之氣流頻率空間分布最小，約為東北季風型之 80%左右，但平均值較高，顯示該天氣型態下氣流來源較為集中且固定於某些特定區域。東北季風型與秋冬季鋒面型分布較為接近，皆相當廣泛，然秋冬季鋒面型平均頻率較小，僅為東北季風型平均頻率之 50%左右，其整體氣流頻率值分布較為平均，不若東北季風型與春季及梅雨季鋒面型之各網格頻率值有明顯之差異。

(三) 東亞各區域對台北之污染潛力

假設當氣流通過高污染排放區時，將自該區攜帶較多量的污染物進行長程輸送至台北地區，故此排放區將對台北地區形成較高污染潛力（即與排放量成正比），但污染物濃度亦會隨長程輸送路徑加大而衰減（即與距離成反比），如第二章中所定義之污染潛力指標 PPI 。吾人以此探討在三類降水事件下，東亞各區對台北之相對貢獻，所計算得到之各區域網格 PPI 值如圖7所示。

東北季風時期，低層氣流大多源自大陸東北、韓國，經黃海、東海至台灣地區，氣流經過的大陸沿岸區域如江蘇、浙江皆為高硫化物排放區，其 PPI 值明顯偏高（見圖7a），為高污染潛力區，韓國次之。大陸內地的四川、雲南一帶亦有相當的污染潛力。相較於其他降水型態，東北季風型下，對台灣有污染潛力的區域分布較廣且較遠，主因東北季風盛行時，因邊界層高度較

表二 各降水型態之氣流頻率函數 $F(x, y)$ 及污染潛力指標 PPI 之總累積值前 25%、50%之網格平均值及其在模式範圍 (90° E-155° E, 5° S-50° N) 之空間分布機率(%)。

		東北季風型		春季及梅雨季鋒面型		秋冬季鋒面型	
		網格平均值	空間分布機率	網格平均值	空間分布機率	網格平均值	空間分布機率
$F(x, y)$	25%	204	0.73(27格)	217	0.67(25格)	107	0.81(30格)
	50%	115	2.59(96格)	137	2.13(79格)	65	2.67(99格)
PPI	25%	2421468	0.13(5格)	2236987	0.10(4格)	78061	0.13(5格)
	50%	1345260	0.48(18格)	1626173	0.29(11格)	433678	0.48(18格)

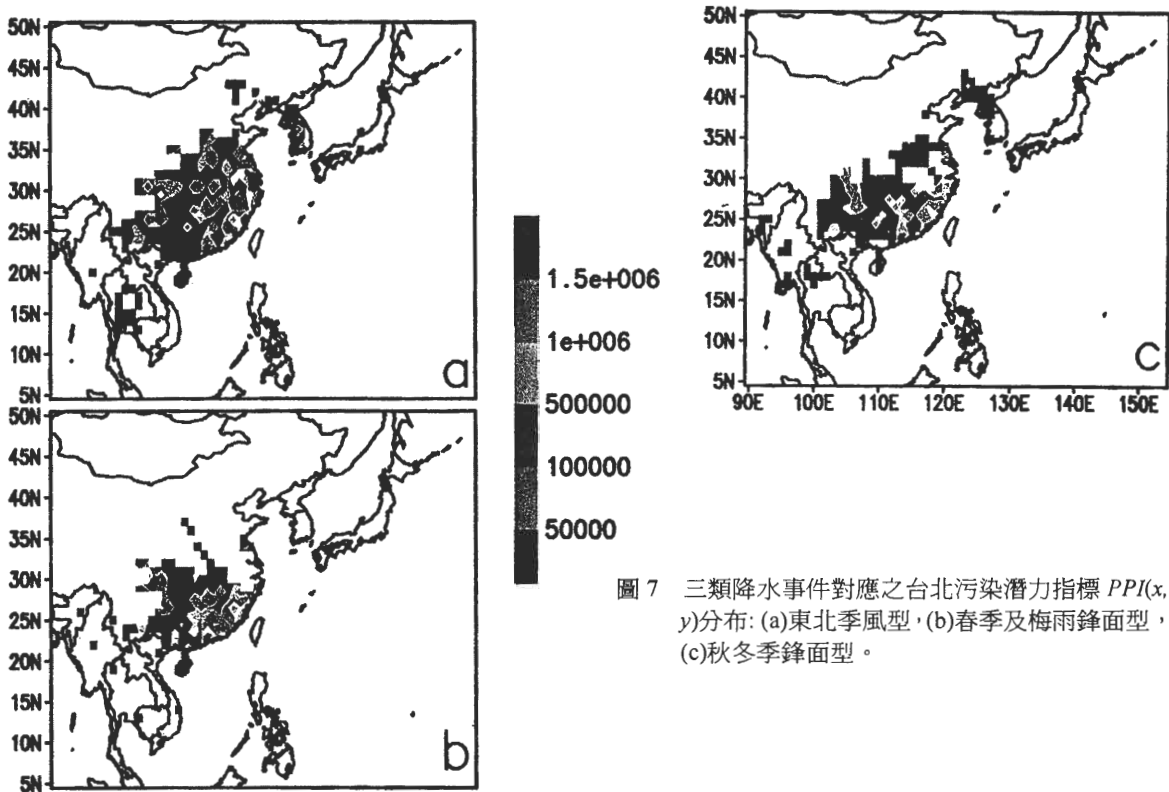


圖 7 三類降水事件對應之台北污染潛力指標 $PPI(x, y)$ 分布: (a)東北季風型, (b)春季及梅雨鋒面型, (c)秋冬季鋒面型。

低，污染物很容易經由大尺度的環流場，行長程輸送至台灣地區。春季鋒面型(圖7b)則以大陸東南沿海區域包括廣東、福建、浙江及江蘇為污染潛力最高的區域，此乃因鋒面雲系多由大陸東南直接出海至台灣產生降水，因此，台灣常位於鋒面前緣，西南氣流及隨雲系東移之氣流明顯集中於台灣的西方至西南方，故以大陸東南為主要污

染潛力區域。相對於春季鋒面，秋冬季鋒面型(圖7c)對台灣有污染潛力影響之區域顯得較為寬廣，與東北季風型相近。大陸東南沿岸的福建、浙江、江蘇一帶是污染潛力最高之處，大陸內陸的四川附近次之，韓國亦有相當的污染潛力。

為便於探討與比較以上三種降水事件之污染潛力分布區域，吾人將各網格之 PPI 值加以

排序，並圈畫出佔PPI值總和前 25%及 50% 之網格涵蓋區域，如圖8 所示，表二則進一步比較前 25% 及 50% 之PPI值總和所對應之網格平均值及空間分布機率。由於各網格之PPI值與距離成反比，換言之，距離台北越遠之網格PPI值相對越小，因此，網格間的PPI值差異甚大，最大值與最小值相差將近1000倍，故對應三類降水型態之前 25%及 50%之PPI值總和涵蓋區域會呈集中現象，分別約佔4-5及11-18網格面積，這些區域即代表總量之 25%及 50%，凸顯這些區域對台北污染潛力的重要性。東北季風型之前 25%高污染潛力分布集中在江蘇、浙江，其餘各網格之污染潛力值普遍較小，春季及梅雨季鋒面型及秋冬季鋒面型則集中在福建一帶。比較前 25%之PPI值總和時，以東北季風型之平均PPI值較高，春季及梅雨季鋒面次之，然二者數值相差不大，秋冬季鋒面則僅佔前二者之 30%。三種降水型態之污染潛力分布區域則以春季及梅雨季鋒面型較小，東北季風型與秋冬季鋒面型較廣，此與前所述之氣流頻率分布結果類似。由以上討論可得知三者之污染潛力以東北季風型最高，分布區域較廣，秋冬季鋒面最小，然其分布範圍與前者相近。如前節的討論，東北季風型降水之 SO_4^{2-} 濃度最高，約比其他二種降水型態高出 50%左右，三者之 SO_4^{2-} 遠大於 NO_3^- ，其比值 ($\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$) 大約等於 3.0左右，與高污染潛力區域(高硫排放區域或高氣流頻率函數區域)相互對應，顯示其與硫之長程輸送必定具高度之相關性。以上的比較顯示在不同降水型態下，其不同污染潛力地區之硫化物的長程輸送，對台灣地區的降水化學組成應具密切的相關性，此對未來進一步探討源與受體關係的研究，已有初步釐清。

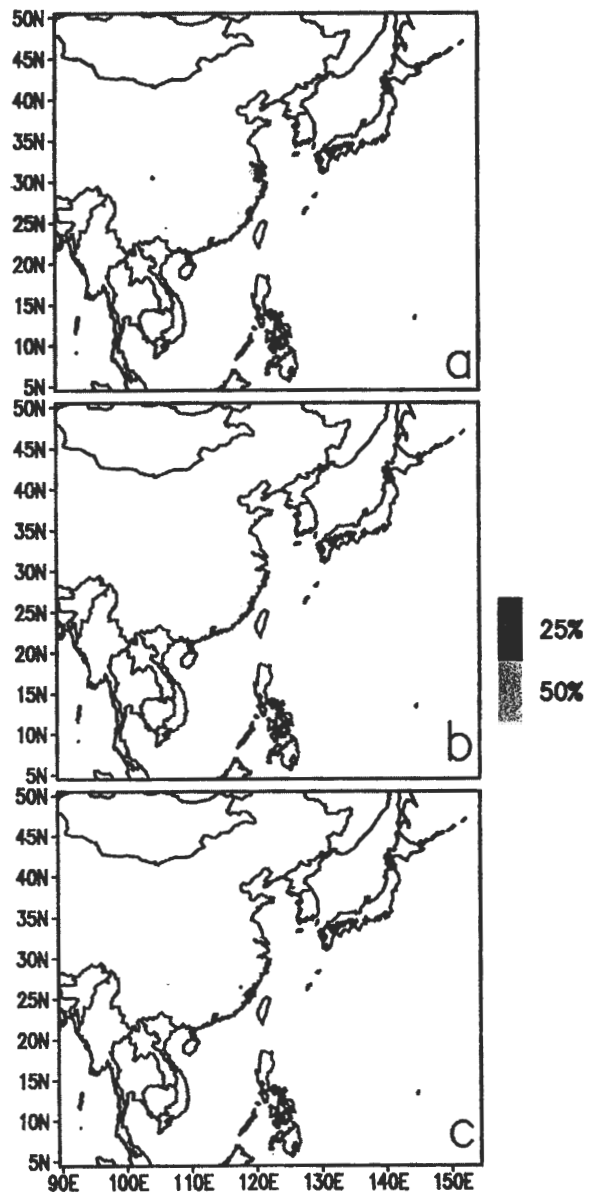


圖 8 三類降水事件對應之總PPI值的前25%及50%的網格涵蓋區域：(a)東北季風型，(b)春季及梅雨季鋒面型，(c)秋冬季鋒面型。

在不考慮特定降水或天氣型態下，我們對 1990 至 1995 年每日的氣流軌跡作一綜合探討，以了解東亞地區對台灣的污染潛力影響。如圖 9a 所示，氣流頻率分布相當廣泛，最南至 12°

N 左右，整個西太平洋皆是氣流軌跡分布的區域，其中以離台灣地區最近的福建、浙江氣流頻率函數總和涵蓋範圍，其分布仍以台灣附近洋面至大陸東南沿岸為主。污染潛力指標(圖 9b) 以大陸東南沿岸較高，四川附近次之，顯示出對台灣的影響潛力不僅限於附近大陸東南沿海，大陸內陸之硫化物亦可隨高層西風傳送至台灣地區。圖 10b 則顯示出大陸沿岸人口稠密之江蘇、浙江、福建及內陸之四川為前 25% PPI 值總和分布區域，為影響台灣地區污染潛力最高之區域。

綜合以上的結果，表三比較各降水型態下，對應高污染潛力之區域，對東北季風型而

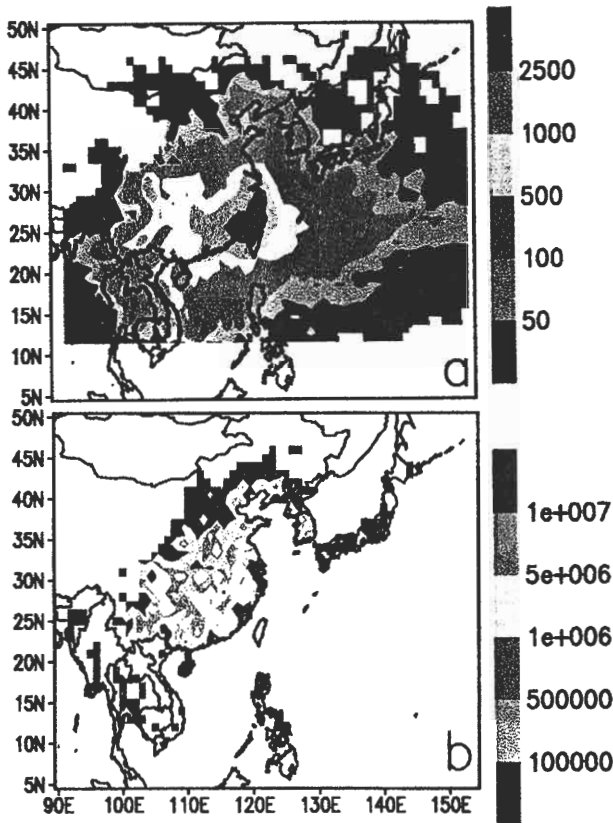


圖 9 1990-1995 年台北之(a)總氣流頻率函數分布(b)總污染潛力指標分布。

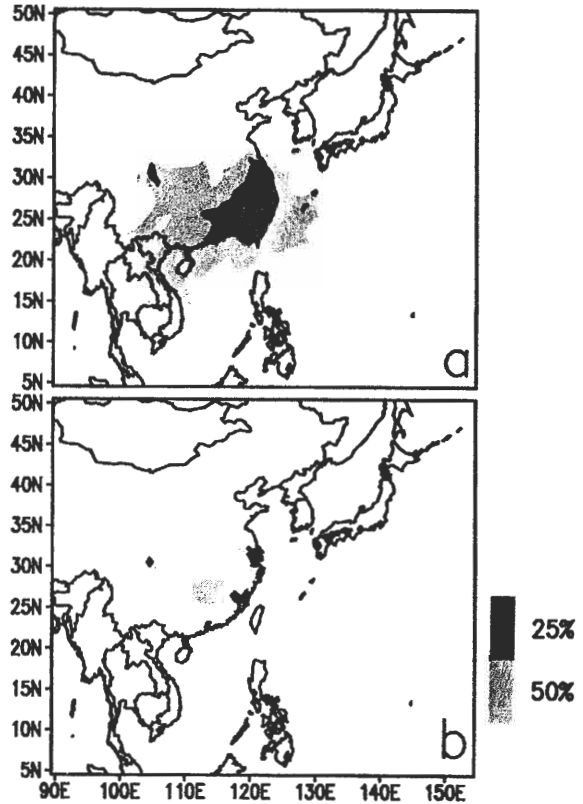


圖 10 1990-1995 年台北之(a)總氣流頻率函數的前 25%及 50%之涵蓋區域及(b)總污染潛力指標的前 25%及 50%之涵蓋區域。

言，以浙江、江蘇對一帶對台北有較高之污染潛力，四川附近亦有零星分布，大致上，影響區域在長江以南；鋒面型時期的主要影響區域集中在福建沿海一帶；整體而言，江蘇、浙江、福建、廣東及四川地區則對台北有較高之污染潛力。

以上的探討為應用氣流軌跡計算並定義出一個新的氣流頻率函數與污染潛力指標，並界定出對台北之潛在污染區域。然氣流軌跡之計算仍有其不確定性，主因目前氣象資料為每 12 小時一次，空間上仍為 2.5° x 2.5°，所計算的逐時氣流軌跡均為經過氣象資料的客觀分析及時間內差所求得，尤其是積分時間較長時，的確有其

表三 不同降水系統下，影響台北地區之主要污染潛力區域。

降水型態	區域分布
東北季風型	江蘇、浙江、四川次之
春季及梅雨季鋒面型	福建、廣東、浙江、江蘇
秋冬鋒面型	福建、江蘇、四川
1990-1995年(365日x 6年)	江蘇、浙江、福建、廣東、四川

潛在的誤差，然而近來的研究指出 (如 Barbara, 1996, Draxler, 1991)，較精緻的氣流軌跡模式的結果與觀測實驗相驗證下，已可有較佳之準確性，僅在天氣系統在短時間變化較劇烈時表現較差。氣流頻率函數代表是氣流在某一網格停留之時間機率，在停留期間是否能完全攜帶走該區域之污染物並累積平流至下一網格仍有其不確定性。實際上，污染物擴散與雲雨交互作用乃是另一連串複雜之過程，有賴更進一步且細緻的處理方式，以降低其中不確定性。儘管如此，本文成功地應用一個新指標，已將影響台北地區降水化學的硫化物長程輸送的潛在污染源區域描繪出來，定性描述出源與受體的對應關係。

四、結 論

本研究利用 1990-1995 年台北的氣流軌跡探討東亞硫化物的長程輸送，定義一個新的污染潛力指標，用以探討在不同降水系統之降水化學與可能源區之相對關係，以了解東亞各區域對台灣可能的污染潛力，主要發現如下：

於東北季風型降水時期，到達台北地區的氣流主要源自大陸東南沿岸的江蘇、浙江一帶，

青康藏高原東側四川、雲南地區的氣流輻合區，河南、陝西次之。於春季及梅雨季鋒面型降水事件下，氣流以來自台灣西南方向的福建、廣東地區為主，並延伸至中南半島，亦有部份源自青康藏高原東側之輻合帶，來自大陸北方的氣流較少。對應秋冬季鋒面型降水的氣流則源自福建延伸至大陸內地的四川、雲南地區，南海至中南半島附近次之。

利用氣流頻率分布、源區之硫排放量及氣流軌跡積分路徑所定義之污染潛力指標，可以看出對台北的污染潛力以東北季風時期最高，分布區域較廣且較遠，以江蘇、浙江、韓國貢獻最大。東北季風盛行時，邊界層高度較低，污染物很容易經由大尺度的環流場，行長程輸送至台灣地區。春季及梅雨季鋒面型之污染潛力次之，以大陸東南沿海區域包含廣東、福建、江浙一帶最大。秋冬季鋒面型相對為小，以福建、江浙地區為主，四川次之。

就1990-1995年之總污染潛力指標之計算，顯示大陸東南沿岸地區對台北污染潛力最高，四川、朝鮮半島附近次之，大陸對台灣的影響潛力不僅限於附近東南沿海，其內陸之硫化物亦隨高層環流輸送至台灣。

軌跡線的計算會因氣象資料之時間及空間上的解析度不足，而產生潛在的誤差。而氣流頻率函數代表是氣流在某一網格停留之時間機率，在停留期間是否能完全攜帶走該區域之污染物並累積平流至下一網格仍有其不確定性。實際上，污染物擴散與雲雨交互作用乃是另一連串複雜之過程，有賴更進一步且細緻的處理方式，以降低其中不確定性。然在探討源與受體關係時，在考量便利性及成本上，氣流軌跡是最容易使用的研究方法，本文主要乃在探討“污染潛力”，

所以深具“機率”的涵意，所以儘可能才取較長資料(例如，季或年)以求取統計上之顯著性。因此，本研究進行不同天氣型態下氣流來源的分析及所得到的潛在污染潛力區域，將有助於未來台灣地區中尺度空氣污染動力模式模擬個案之選取與驗證。

本文的結果顯示吾人定義的一個定量污染指標能夠定性描述東亞區域對台北地區較具硫化物污染潛力之可能源區，並提供探討硫化物長程輸送之源與受體關係釐清之一有效工具，吾人的結論亦可作為日後在界定硫化物(酸雨)跨國輸送責任歸屬上的有力之科學依據。至於在定量上計算長程輸送與局部排放之相對貢獻，將是吾人未來努力的目標。

誌 謝

本研究在行政院環保署計畫 EPA-85-E104-09-03、EPA-86-FA44-09-47 及 NSC 87-EPA-P-008-003；國科會計畫 NSC86-2111-M-008-034-AP3、NSC87-2111-M-008-028-AP3 之資助下完成，美國國家海洋與大氣總署 Dr. Draxler 提供 HY-SPLIT 原始程式，謹此誌謝。

參考文獻

- 林松錦、王君賢、王作台及胡志文，1994：氣象環流對背景大氣成份傳送影響-第二部份：台灣地區氣流軌跡之氣候統計，大氣科學，22，565-584。
- 林能暉，1998：酸沈降之源與受體關係之研究-氣流軌跡分析及降水系統影響，行政院環境保護署計畫報告，N SC 87-EPA-P-008-003。
- 林能暉與陳景森，1997：酸沈降之源與受體關係之研究：氣流軌跡分析及降水系統影響，行政院環境保護署計畫報告，EPA-86-FA44-09-47。
- 陳景森、林能暉及黃清勇，1995：台灣地區酸性污染物擴散與輸送之研究，行政院環境保護署計畫報告，EPA-84-E3F1-09。
- 陳進煌，1995：氣流軌跡模式在大氣污染物長程輸送上之運用，國立中央大學碩士論文。
- 柳中明，1995：結構化「全球氣候變遷對我國之衝擊與因應研究」，全球氣候變遷對台灣之影響與因應研究規劃研討會，台北。
- 鄭福田，1998：台灣地區酸性沈降物之調查研究，行政院環境保護署計畫報告，NSC 87-EPA-P-008-001。
- Akimoto, H. and H. Narita, 1994, Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1° × 1° resolution, *Atmos. Environ.*, **28**, 213-225.
- Ayers, G. P. and K. K. Yeung, 1996: Acid deposition in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, **30**, 1581-1587.
- Barbara, J. B. S., 1996: An assessment of the quality of forecast trajectories, *J. Appl. Meteor.*, **35**, 1319-1331.
- Carmichael, G., et al., 1993: Acid rain and emissions reduction in Asia: An international collaborative project on acid rain in Asia. *International Conference on Climate Change in East Asia*, Nov.30-Dec.3, Taipei. 23-29.
- Chang, J. S., R. A. Brost, I. S. A. Isakaen, S. Madronich, P. Middleton, W. R. Stockwell, and C. J. Walcek, 1987: A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation. *J. Geophys. Res.*, **92**, 14681-14700
- Chang, M. B., N.-H. Lin, H.-M. Lee and Y.-C. Lo, 1997: Rainwater contamination and sources in Taoyuan County, Taiwan, *J. Environ. Sci. Health*, **A32(6)**, 1641-1653.

- Chen, Y.-L., X.-A. Chen, and Y.-X. Zhang, 1994: A diagnostic study of the low-level jet during TAMEX IOP 5. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 2257-2284.
- Cheng, M. D. and P. K. Hopke, 1993: A receptor-oriented methodology for determining source regions of particulate sulfate observed at Dorset, Ontario. *J. Geophys. Res.*, **98**, 16839-16849.
- Draxler, R. R., 1991: The accuracy of trajectories calculated using dynamic modek analyses versus rawinsonde observations. *J. Appl. Meteor.*, **30**, 1446-1467.
- Draxler, R. R., 1993: Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories (HYSPLIT): Version 3.0 – User's guide and model description. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-195, 26 pp.
- Galivin, P. J., P. J. Samson, P. E. Coffey, and D. Ramano, 1978: Transport of sulfates to New York state, *Environ. Sci. Technol.*, **12**, 580-591.
- Huang, M., Z. Wang., D. He., H. Xu, L. Zhou., 1995: Modeling studies on sulfur deposition and transport in east Asia, *Water, Air and Soil Pollut.*, **85(4)**, 1921-1926.
- King, H. B., et al., 1995: Chemistry of precipitation, throughfall, stemflow and streamwater of six forest sites in Taiwan. In Biodiversity and Terrestrial Ecosystems (C.-I Peng and C.-H. Chou eds.), *Institute of Botany, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, Monograph Series No. 14*, 335-362.
- Kotamarthi, V. R. and Carmichael, G.R., 1990: The Long Range Transport of Pollutants in the Pacific Rim Region, *Atmos. Environ.*, **24A**, 1521-1524.
- Lin, N.-H., J.-H. Chen, and C.-M. Peng, 1996: Modeling the long-range transport of sulfur compounds over the eastern Asia: case studies, Proceedings of the International Conference on Acid Deposition in East Asia., May.28-30, Taipei, 216-224.
- Lin, N.-H., H.-M. Lee, and M.-B. Chang, 1998: Evaluation of the characteristics of acid precipitation in Taipei, Taiwan using cluster analysis. *Water Air Soil Pollut.* (in press).
- Lin N.-H., C.-S. Chen, C.-M. Peng, F.-T. Jeng, H.-B. King, C.-B. Lieu, S.-W. Chen and S.-H. Feng, 1998: Acidic deposition in Taiwan and the relationship with associated weather patterns. *J. Geophys. Res.* (in revision).
- Merrill, J. T., W. Viezee, R. D. Hake, Jr., R. D. and R. T. H. Collis, 1989: Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific, *J. Geophys. Res.*, **94**, 8584-8595.
- Miller, J. M., J. N. Galloway, and G. E. Likens, 1978: Origin of air masses producing acid precipitation at Ithaca, New York: a preliminary report, *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 757.
- Murao, N. N. Katatani, Y. Sasaki, S. Okamoto and K. Kobayashi, 1993: A modeling study on acid deposition in east Asia, Proceedings of the International Conference on Regional Environment and Climate Changes in East Asia, Nov.30-Dec.3, Taipei, 305-309.
- Samson, P. J., 1980: Trajectory analysis of summertime concentrations in the northeastern United States, *J. Appl. Meteor.*, **19**, 1382-1389.
- Seinfeld, J. H., 1986: *Atmospheric Physics and Chemistry of Air Pollution*, Academic, San Diego.
- Uedar, H. and G. R. Carmichael, 1993: Long range transport of air pollutions in eastern Asia, Proceedings of the International Conference on Regional Environment and Climate Changes in East Asia, Nov.30-Dec.3, Taipei, 11-16.
- Venkatram, A., B. E. Ley, and S. Y. Wong, 1988: A statistical model to estimate long-term concentrations of pollutants associated with long-range transport. *Atmos. Environ.*, **16**, 249-257.

Yu, S., C. Gao., Z. Cheng., X. Cheng., S. Cheng., J. Xiao. and W. Ye., 1998: An analysis of chemical composition of different rain types in 'Minnan Golden Triangle' region in the southeastern coast of China. *Atmos. Res.*, **47**, 245-269.

Long-range Transport of Sulfur Compounds in East Asia: Part I-Application of the Trajectory of Air Mass

Neng-Huei Lin Chi-Ming Peng Chin-Huang Chen

Department of Atmospheric Sciences, National Central University

(Manuscript received 15 October 1998 ; in final form 24 November 1998)

ABSTRACT

In this paper we define a new index (pollution potential index, *PPI*) to study the long range transport of sulfur compounds in East Asia and further to elucidate the source/receptor relationship between source regions and Taipei, based on the integrated path of the backward trajectory arriving at Taipei and the source strength of sulfur compounds. As a consequence, the 850hPa trajectories primarily originated from the southeastern coastal areas of Mainland China for rain events during the northeast monsoon seasons. For the frontal passage in spring, the air mass mainly derived from Fu-Cheng and Kuan-Tung areas. In addition, the source regions of air mass can extend to the inland of Mainland China for the rain events associated with frontal passage in fall. According to 1990-1995 dataset, the region along the southeast coast of Mainland China had the highest pollution potential on Taipei. Meanwhile, Si-Chuan was another major region of high *PPI* as well, indicating that sulfur compounds can be possibly carried to Taipei via the long-range transport.

Key words: Sulfur compounds, Long-range transport, Backward trajectory, Pollution Potential Index.