

1995年3月12日台灣北部黃雨個案分析

林宗嵩¹ 余嘉裕²

¹景文技術學院環境管理系

²中國文化大學大氣科學系

(中華民國九十四年二月十六日收稿；中華民國九十四年六月二十五日定稿)

摘 要

由於春季亞洲沙漠地區鋒面系統十分活躍，導致沙塵暴最為頻繁強烈，嚴重影響源地和下游地區的空氣品質。1995年3月12日下午台灣北部出現「黃雨」現象是環保署自1993年9月建立現代化空氣品質監測網後，迄今最嚴重的沙塵污染事件，本文針對此事件進行詳細個案分析，以瞭解沙塵暴輸送至台灣地區的過程。

研究結果顯示，造成1995年3月12日下午台灣地區嚴重沙塵污染事件起源於3月10日午後發生在戈壁和黃河河套的大範圍沙塵暴。首先，乾燥的大氣環境和地面強風是形成此次大範圍沙塵暴的原因；其次，地面分裂高壓南下和源地上空西北強風提供沙塵暴系統長程輸送所需的動力。TAQM 模擬以及 HYSPLIT 逆軌跡線分析進一步證實，3月12日起低層東北風增強將位於東海上沙塵往南輸送至台灣地區是造成此次嚴重沙塵污染事件的原因，其中分裂高壓出海緯度低是關鍵因素。

關鍵詞：沙塵暴、強氣壓梯度、分裂高壓、沙塵污染事件

一、前 言

沙塵暴發生需要三個條件配合：沙源、強風、與不穩定大氣。亞洲沙源主要位於35°N-45°N/105°E-80°E間之沙漠或乾旱地區，包含新疆（南疆塔里木盆地和北疆準格爾盆地）、戈壁、以及黃河河套三個地區，其中塔里

木盆地和準格爾盆地主要為沙漠所覆蓋，包括南疆之塔克拉瑪干沙漠和北疆之古爾班通古特沙漠；戈壁除少部分地區為沙漠所覆蓋（如巴丹吉林沙漠和騰格里沙漠）外，則多為沙礫地表；黃河河套則為深厚的細顆粒黃土所覆蓋，因此又有「黃土高原」之稱。由於亞洲沙源在

春季時鋒面系統特別活躍，鋒面後強風提供沙塵暴形成有利條件，因此春季(3~5月)為亞洲沙塵暴發生頻率最高、強度最大之季節。另外若以大氣穩定度條件來看，午後太陽輻射加熱沙源地程度到達最大，因此大多數沙塵暴都發生在午後至傍晚之間。

沙塵暴為亞洲沙源區春季相當活躍天氣現象之一，但伴隨有沙塵長程輸送現象的沙塵暴系統僅占全年的一小部份。余等(1997)分析1986至1995年日本氣象廳天氣圖集資料顯示，東亞地區總共發生了78次大範圍的沙塵暴現象，其中50%屬於不動的滯留型沙塵暴(多數位於東經95度以西之新疆地區)，28%屬於輕微移動的滯留移動型沙塵暴，22%屬於移動型沙塵暴。

沙塵暴系統是否具有長程輸送條件和綜觀尺度氣象場配置有密切關係。在新疆地區形成之沙塵暴由於往往位於亞洲地面冷高壓西側，多數屬於滯留型，影響範圍侷限於鄰近地區(余等2003)；但在戈壁和黃河河套形成的沙塵暴，由於經常位於亞洲冷高壓東側，當冷高壓和前緣之鋒面系統往東移動時，常伴隨著冷鋒系統東移而往下游輸送。在戈壁形成的沙塵暴，其沙塵輸送緯度較高，主要影響朝鮮半島、日本、甚至於遠達夏威夷和美洲西岸地區(Ing 1972; Iwasaka et al. 1983; Zhao and Yu 1990, 余等1997)；黃河河套形成的沙塵暴，其沙塵輸送緯度較低，可影響華中、華南、甚至台灣和香港地區(余等1997; 余等2002)。由此可知，沙塵暴強度對並非衝擊台灣地區春季空氣品質之關鍵，反倒是沙塵暴源地以及綜觀天氣條件二者才是決定是否有大量沙塵輸送至台灣地區上空之重要因素。

沙塵輸送距離和沙塵顆粒大小有密切關

係，根據夏與楊(1995)研究顯示，地面11級風(30m/s)吹拂下，粗沙(直徑0.5-1mm)可飛離地面數十厘米，細沙(直徑0.125-0.25mm)可飛起地面2公尺高，粉沙(直徑0.05-0.005mm)可達1.5公里的高空。因此當沙塵暴發生後，顆粒較大的粒子(粗沙和細沙)受重力沈降作用，影響範圍侷限於源地或鄰近地區。顆粒較小的粒子(粉沙)可以向上傳送到850hPa高空(相當於1500公尺)，往往可以輸送至遠處，因此影響朝鮮半島、日本、和台灣地區之沙塵應多屬於直徑0.05-0.005mm之粉沙為主。

由於1995年3月12日下午起影響台灣地區空氣品質的沙塵現象是環保署自1993年9月建立全島自動化空氣品質監測網後所發現最嚴重的個案，當時北台灣有多數測站最高 PM_{10} 時濃度超過 $500 \mu g/m^3$ ，基隆甚至出現「黃雨」現象，因此本文選定該個案利用地面空氣品質和天氣測站資料、三維大氣網格資料、軌跡線分析、以及數值模擬來進行詳細個案分析，以瞭解造成台灣北部「黃雨」的沙塵暴在源地形成之背景綜觀天氣特徵、輸送路徑、以及影響範圍等。

本文第二節介紹研究所使用之空氣品質和大氣資料，以及包括HYSPLIT軌跡線模式和TAQM空氣品質模式在內之數值模式，第三節討論此次沙塵暴個案形成及沙塵輸送的過程，第四節探討有利於此次沙塵暴個案形成和輸送的背景綜觀天氣條件，第五節將利用TAQM模擬結果和前二節分析結果進行比對，以瞭解此次沙塵暴影響台灣的完整始末。第六節將總結並討論本文主要結果和發現，以作為未來氣象和環保部門對沙塵暴影響台灣空氣品質預報之參考。

二、資料與模式介紹

(一) 資料來源

本文使用資料包括環保署空氣品質監測站逐時資料、日本氣象廳東亞地面天氣圖、以及美國國家環境預報中心(NCEP)三維大氣網格點資料。NCEP 資料空間解析度 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 經緯網格，每日提供四筆(00、06、12、18UTC)包含 7 種地面氣象觀測場以及 14 層標準等壓面上 6 種高空氣象觀測場。本文僅採用 850hPa 和 700hPa 高空風場和相對濕度資料，並取日平均值以分析沙塵暴個案形成之背景綜觀天氣場。

本文也使用東亞地區地面氣象觀測站

FGGE 電碼，作為監測陸地上沙塵輸送過程之輔助資料。FGGE 電碼提供完整天氣觀測，但本文僅讀取電碼中之沙塵現象以及其他如霾(∞)、和吹煙($\sim$)等視障天氣現象以供分析。沙塵現象包含了四級不同強度之沙塵現象，依能見度高低分級，由弱至強分別為：「塵象」(S)、「揚沙」($\$$)、「沙塵暴」($\$$)、和「嚴重沙塵暴」($\$$)。本文採用之 FGGE 電碼在東亞地區提供超過 1000 地面站資料，在沙塵暴源地也有將近 100 站資料(見圖 1)，在空間和時間解析度上足以提供沙塵暴系統發展和之後長程輸送所需之地面觀測資訊，但海面上 FGGE 資料缺乏是其缺點。

FGGE Surface Stations

NUMS=1385

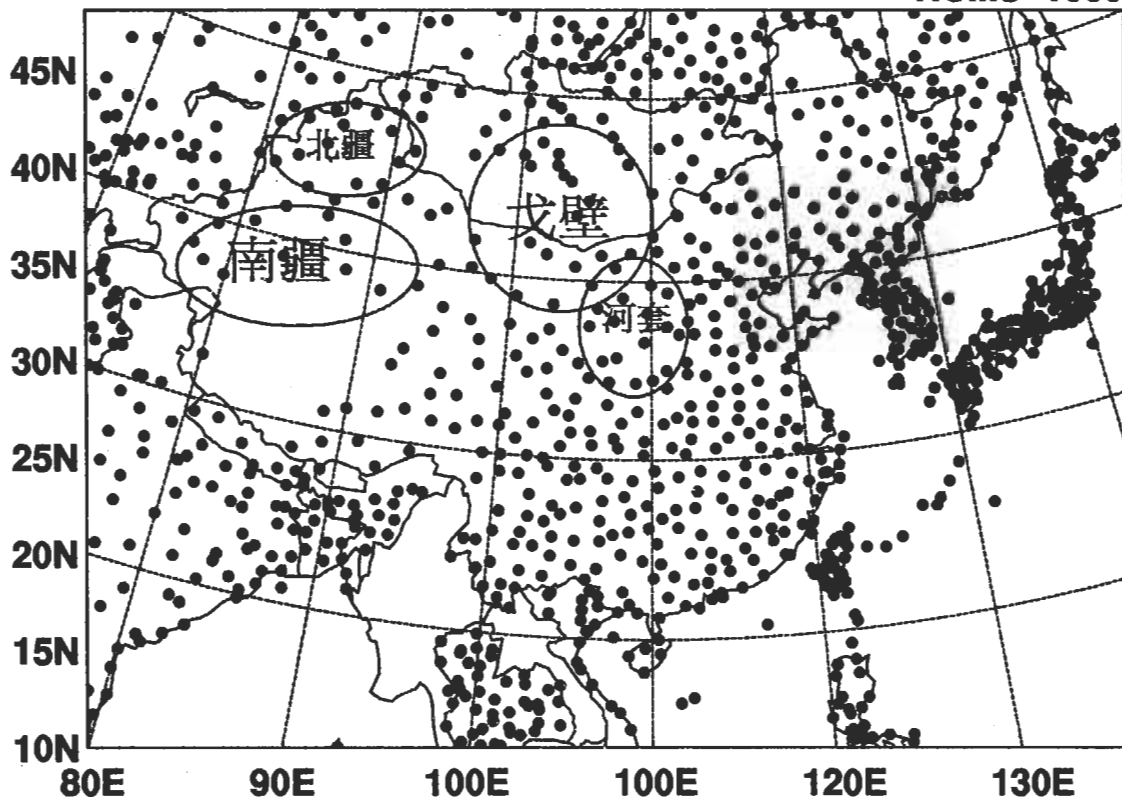


圖 1 亞洲沙塵暴源地和東亞地區 FGGE 地面 1385 個測站空間分佈。

為瞭解台灣地區沙塵污染物確切來源，本文也使用 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 軌跡線模式推估台灣地區沙塵污染可能來源。HYSPLIT 模式由美國國家海洋大氣總署 (NOAA) 發展用來計算單一氣塊軌跡線之最新模式，可以使用網路瀏覽器進行交談式模式執行和繪圖工作，經常被使用來推估污染物軌跡線。

(二) 模式介紹

為了定量探討沙塵輸送過程和對台灣的影響，本研究商請台灣大學大氣科學系陳正平教授利用「台灣空氣品質模式」(Taiwan Air Quality Model, 簡稱TAQM) 對產生台灣北部地區「黃雨」沙塵報個案進行模擬。TAQM主要由空氣品質模式、中尺度氣象模式、以及起沙模組三個部分所組成，分別簡述如下：

(a) 空氣品質模式

空氣品質模式考慮化學物種的排放源、水平與垂直傳送、擴散、沉降、雲的對流傳送及液態化學等。模式垂直採用 σ 座標，並使用巢狀網絡技術，可同時模擬大尺度輸送過程和區域影響。空氣品質模式中也加入沙塵的物理機制，包含了起沙源、水平與垂直傳送，擴散及乾濕沉降機制。在乾沉降方面，模式最低層以外只有重力沉降，最低層則另外包含了其他乾沉降作用；濕沉降則只考慮雲下的洗除過程。

(b) 中尺度氣象模式

區域性空氣品質模式所需的三度空間氣象場使用MM5(Penn State/NCAR Mesoscale Model, version 5)模式輸出，MM5為美國國家大氣科學研究中心/賓州州立大學合作發展之第五代中尺度非靜力模式，垂直採用 σ 座標，使用四維同

化技術，並具有多重巢狀網絡架構。MM5所需的氣象初始場與邊界條件則由NCEP(美國國家環境預報中心)全球數值模式所提供。

(c) 起沙模式

起沙模組採用Wang et al. (2000) 的起沙機制，其起沙強度和模式的地面摩擦速度、近地面相對溼度、以及是否鋒面過境有關。當以上條件滿足起沙門檻條件時，起沙強度 S 如下的公式計算：

$$S = C_1 C_2 u_*^2 (1 - RH) W$$

其中起沙強度 S 的單位為 $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ， C_1 為不同地表的權重， C_2 為經驗值，設為 2.9×10^{-11} ， u_* 為地表摩擦速度， RH 為最近地表層的相對溼度， W 是起沙源地粒徑分布權重百分比，其中沙塵粒徑由 0.13 至 $20.13\ \mu m$ 共分12類。

本文使用TAQM模式模擬沙塵報個案的範圍涵蓋整個中國大陸與台灣，模式水平解析度為81公里，垂直採用15層 ω 座標，在近地面層的垂直解析度約40公尺，詳細模式介紹和討論見陳等(2002)。

三、沙塵輸送分析

(一) 台灣地區 PM_{10} 濃度變化

在討論沙塵輸送之前，先看1995年3月12日北部黃雨個案在台灣地區所造成的 PM_{10} 濃度變化，本文選取台灣北、東、中、南部各4個背景測站資料進行分析(16個測站背景說明請見表一)。圖2為3月11日~3月13日間16個背景測站 PM_{10} 濃度隨時間逐時變化曲線，北部地區四個測站3月12日上午 PM_{10} 濃度均維持在 $50\ \mu g\ m^{-3}$ 以下，但自下午14時起，萬

表一 本文所採用之 16 個環保署空氣品質背景站基本資料。

區域	站名	測站緯緯度	測站環境總高度	採樣口高度
北部	陽明	25°11'13"N / 121°30'51"E	3 公尺	4.66 公尺
	萬里	25°10'52"N / 121°40'52"E	27 公尺	28.34 公尺
	觀音	25°02'07"N / 121°59.44"E	11 公尺	12.54 公尺
	馬祖	24°26'10"N / 118°18'21"E	12 公尺	14 公尺
中部	新竹	24°48'31"N / 120°57'39"E	11 公尺	12.78 公尺
	沙鹿	24°13'38"N / 120°32'54"E	10 公尺	11.74 公尺
	線西	24°08'00"N / 120°27'38"E	13 公尺	19 公尺
	台西	23°57'15"N / 120°30'23"E	15 公尺	19.24 公尺
南部	橋頭	22°45'31"N / 120°17'52"E	15 公尺	17.01 公尺
	小港	22°33'56"N / 120°20'15"E	18 公尺	19 公尺
	林園	22°28'53"N / 120°24'12"E	10 公尺	11.43 公尺
	恆春	21°57'24"N / 120°46'49"E	3 公尺	4.5 公尺
東部	宜蘭	24°45'12"N / 121°44'46"E	14 公尺	15.51 公尺
	冬山	24°38'00"N / 121°47'09"E	10 公尺	11.71 公尺
	花蓮	23°58'23"N / 121°35'29"E	8 公尺	9.6 公尺
	台東	22°45'22"N / 121°08'32"E	11 公尺	4.66 公尺

里、淡水和觀音站 PM_{10} 濃度開始驟升，最高濃度發生在下午 18 時，三個站皆超過 $500 \mu\text{g m}^{-3}$ 以上，其中觀音站更超過 $600 \mu\text{g m}^{-3}$ 。陽明站 PM_{10} 濃度驟增時間略晚，最高 PM_{10} 濃度亦達 $100 \mu\text{g m}^{-3}$ 以上，遠高於之前的背景值。

中部地區 4 個測站 PM_{10} 濃度驟增時間約在下午 16 時左右，新竹和台西站最高濃度發生在下午 19 時， PM_{10} 濃度皆超過 $450 \mu\text{g m}^{-3}$ ；沙鹿和線西站最高濃度發生在 21 時， PM_{10} 濃度達 $350 \mu\text{g m}^{-3}$ 左右。

東部地區宜蘭、東山和花蓮站 PM_{10} 濃度在下午 17 時也有顯著增加趨勢，最高濃度發生

在下午 21~24 時之間，但台東站 PM_{10} 濃度增加不明顯，無法顯示為局部或外來污染源。

南部地區除恆春站之外，橋頭、小港和林園站 PM_{10} 濃度自 3 月 13 日起開始顯著上升，最大濃度發生時間在 3 月 13 日 03~11 時之間，其濃度皆超過 $250 \mu\text{g m}^{-3}$ ，林園站更超過 $350 \mu\text{g m}^{-3}$ 以上。不過南部地區在 3 月 11 日和 3 月 12 日白天 PM_{10} 濃度也曾高達 $150 \mu\text{g m}^{-3}$ 以上，顯示局部污染相當嚴重，和外來污染並不易分離。

為進一步瞭解此波沙塵影響台灣地區的時空分佈，表二整理各測站受沙塵污染起始和結束時間以及 PM_{10} 最高濃度發生時間和強度，

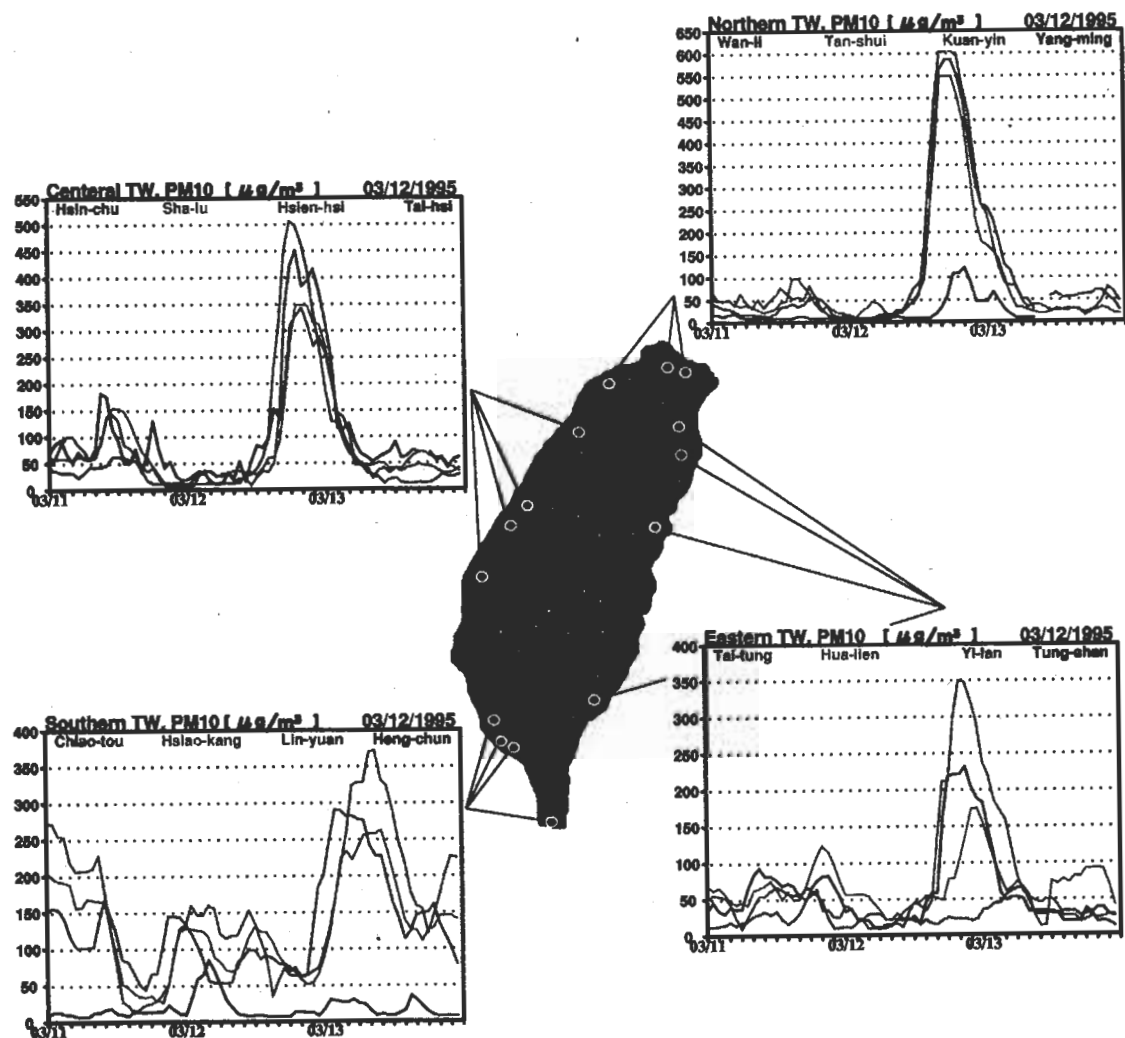


圖 2 台灣北部、中部、南部、東部地區共 16 環保署測站 (見表一) PM_{10} 濃度 (單位: $\mu g/m^3$) 在 1995 年 3 月 12 日前後變化情形。

沙塵污染起始和結束時間依楊等 (1997) 定義¹。其中台東和恆春站因未達沙塵起始和結束標準，且不易分離外來和局部污染源，因此不列入比較；陽明站雖未達沙塵起始和結束標準，

但因為外來影響容易判別，因此將最高濃度列入以供參考。表二搭配表一各測站地理位置清楚顯示高 PM_{10} 濃度污染有從北往南、由西往東依序蔓延的趨勢，影響時間約在半天左右，顯示此波污染可能來自於西北部大陸沙塵暴系統。

¹ 楊等 (1997) 將「沙塵污染起始 (結束) 時間」定義為：觀測 PM_{10} 濃度大於 (小於) $125 \mu g/m^3$ ，且其值為前一小時值的二倍以上 (1/2 以下)，同時前 (後) 一小時值小於 $125 \mu g/m^3$ ，且後一小時值持續上升 (下降) 的時間。

表二 1995年3月12日沙塵污染事件 PM_{10} 濃度變化基本資料，‘+’表資料為3月13日。

地區	測站	起始時間	結束時間	最高濃度時間	最高濃度
北部	萬里	15 時	+4 時	18 時	$586 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	淡水	15 時	+3 時	18 時	$549.8 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	觀音	14 時	+2 時	18 時	$603.9 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	陽明	NA	NA	21 時	$121.6 \mu\text{g} / \text{m}^3$
中部	新竹	16 時	+3 時	19 時	$506 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	沙鹿	18 時	+3 時	21 時	$348.9 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	線西	17 時	+4 時	21 時	$342.8 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	台西	16 時	+5 時	23 時	$451.5 \mu\text{g} / \text{m}^3$
南部	橋頭	23 時	+21 時	+3 時	$290.3 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	林園	+2 時	+24 時	+10 時	$372.4 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	小港	+3 時	+24 時	+11 時	$262.6 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	恆春	NA	NA	NA	NA
東部	宜蘭	17 時	+5 時	21 時	$350.2 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	冬山	18 時	+2 時	22 時	$231.8 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	花蓮	23 時	+2 時	24 時	$174.8 \mu\text{g} / \text{m}^3$
	台東	NA	NA	NA	NA

(二) 地面沙塵報告

圖 3 為 1995 年 3 月 9 日~3 月 12 日 06UTC (1400LT) FGGE 地面沙塵報告。3 月 9 日新疆地區出現沙塵報告，該沙塵現象為新疆地區春季特有之非移動型沙塵現象，並不影響東亞地區。值得注意的是 3 月 10 日 06UTC 起，戈壁沙漠（外蒙、內蒙）出現了大規模的沙塵現象，沙塵暴系統範圍超過 100 萬平方公里。3 月 11 日 06UTC 沙塵資料顯示沙塵暴系統已經離開源地，往東南移動至河套、華北、華中地區，同時其影響範圍也有擴大趨勢。3 月 12 日 06UTC，沙塵前緣已經出海，影響範圍由日本和韓國南方地區，往西經江浙沿海再延伸至陝甘地區。

往南福建沿海也出現沙塵報告，台灣地區出現全島性的視障天氣--霾。

比較圖 3 的 FGGE 地面沙塵輸送和台灣地區 PM_{10} 濃度變化（圖 2）發現台灣地區 PM_{10} 濃度驟增時間和沙塵影響時間相近，顯示 3 月 12 日下午台灣地區高 PM_{10} 濃度污染事件是受到大陸沙塵暴系統的影響。

(三) 逆軌跡線分析

為進一步瞭解 3 月 12 日台灣地區沙塵污染確切源地，圖 4 利用 NOAA/HYSPLIT 模式做不同高度的四天逆軌跡分析（back-trajectory analysis），起始時間為 3 月 12 日 06UTC，起始

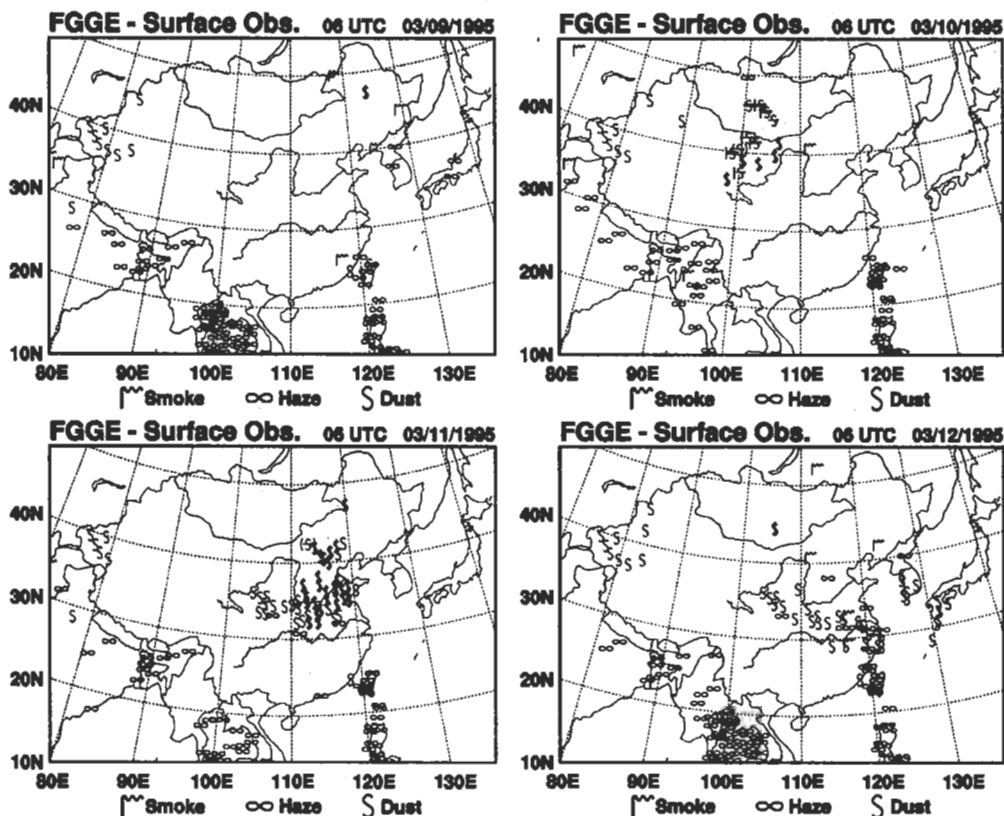


圖3 東亞地區地面氣象測站 FGGE 電碼提供之沙塵天氣現象報告，由左到右由上到下依序為 1995 年 3 月 9 日~3 月 12 日每日 06UTC (14LT) 資料。除了沙塵報告(S 型符號)之外，炊煙(smoke)和霾(haze)也顯示在圖上以供參考。

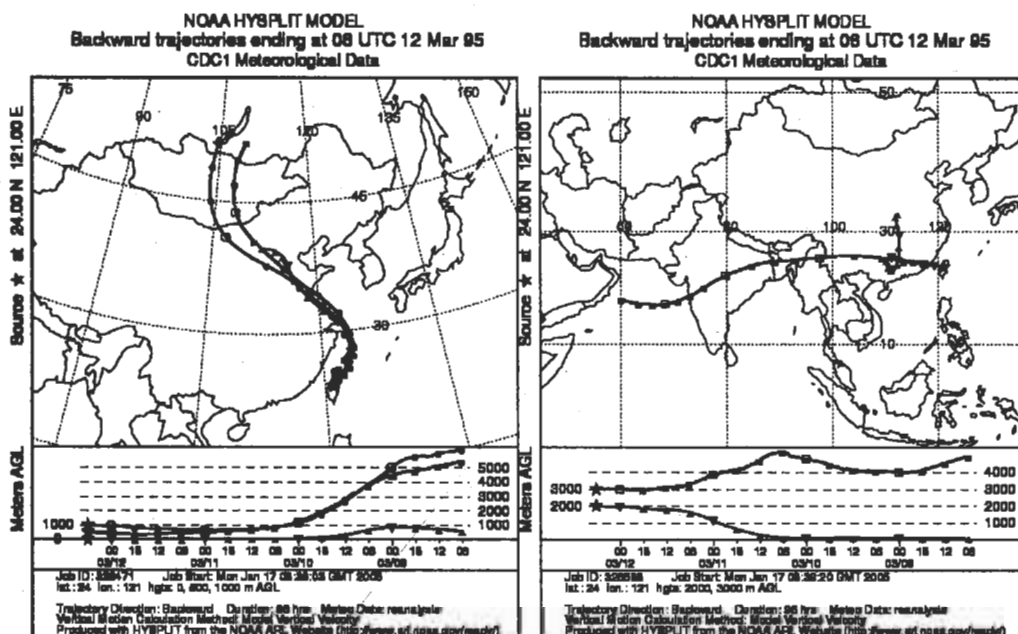


圖4 1995 年 3 月 12 日由台灣北部地區往後推估三日之軌跡線分析，後推起始點高度採用地面、500 和 1000 公尺(左圖)，以及 2000 和 3000 公尺(右圖)。軌跡線分析採用 NOAA/HYSPLIT 軌跡線模式，該模式採用 MM5 輸出三維風場推導軌跡線。

地點為 $24^{\circ}\text{N}/121^{\circ}\text{E}$ 。逆軌跡線分析顯示台灣地區 3 月 12 日 06UTC 高濃度 PM_{10} (沙塵) 源自於位於戈壁地區，其中台灣上空 500 和 1000 公尺高度沙塵源自於戈壁沙漠上空 3000~4000 公尺處，地面沙塵則源自於河套地區東南部(圖 4 左)。但由 2000 公尺和 3000 公尺逆軌跡線分析(圖 4 右)也發現 2000 公尺以上高空氣流源自華南/華中和印度/巴基斯坦地區，並非來自沙塵暴源地，顯示台灣所受到的沙塵污染主要為 2000 公尺以下的沙塵輸送所致。

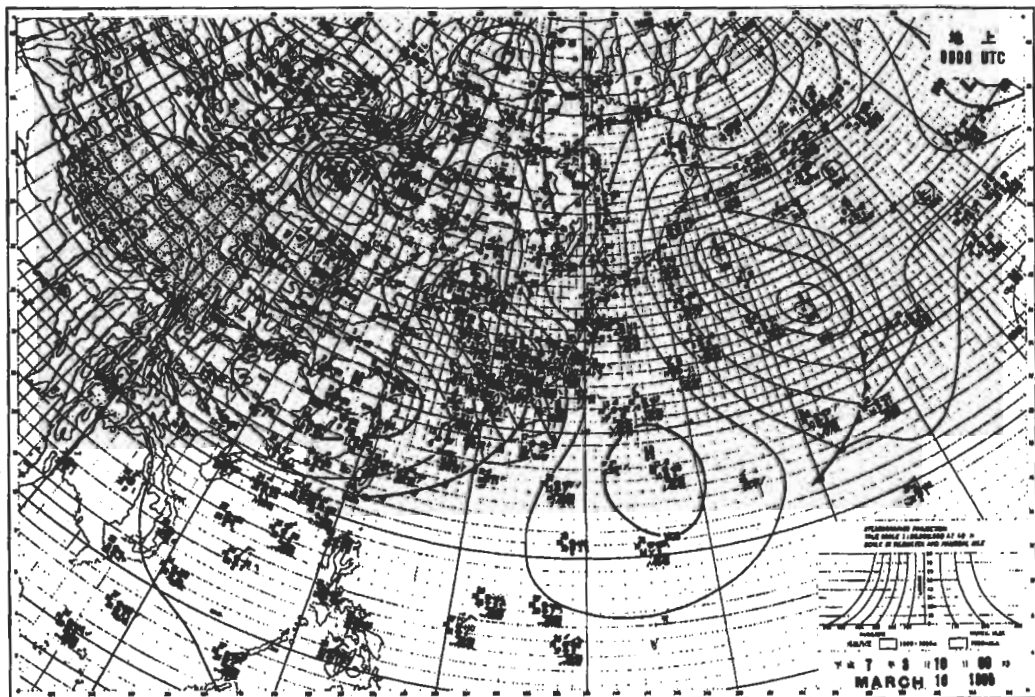
雖然 HYSPLIT 逆軌跡線分析可以證實台灣地區沙塵源自於戈壁和黃土高原，但我們也發現沙塵由源地輸送到台灣地區需要 3 天左右時間，和 FGGE 沙塵報告(圖 3)比較，大約差了一天。由於沙塵輸送主要是由氣象模式產生的氣流場所驅動，此結果也顯示 HYSPLIT 模式使用之中尺度氣象模式(MM5)雖然能精

確地模擬沙塵輸送軌跡，但所模擬的鋒面和分裂高壓系統的移動速度較實際為慢。

四、背景綜觀天氣分析

(一) 地面天氣圖與衛星雲圖

圖5上為大範圍沙塵暴系統發生前6小時(3月10日00UTC)東亞地面天氣圖。大陸冷高壓中心位於 $52^{\circ}\text{N}/90^{\circ}\text{E}$ 附近，中心氣壓1042mb，低壓中心位於 $47^{\circ}\text{N}/105^{\circ}\text{E}$ 附近，中心氣壓1010mb，高低壓中心間等壓線密集並呈東北西南走向，地面吹北風至西北風，等壓線密集處位於戈壁上空。這波冷高壓所攜帶之空氣相當乾燥，這點可由地面溫度露點差值皆在 10°C 以上得到證明。河套附近有一分裂高壓，中心氣壓1022mb，此地區溫度露點差值更達 15°C 到 20°C 之間，空氣極為乾燥，沙塵暴源地(戈壁和河套)地面風速在5到10m/s之間。



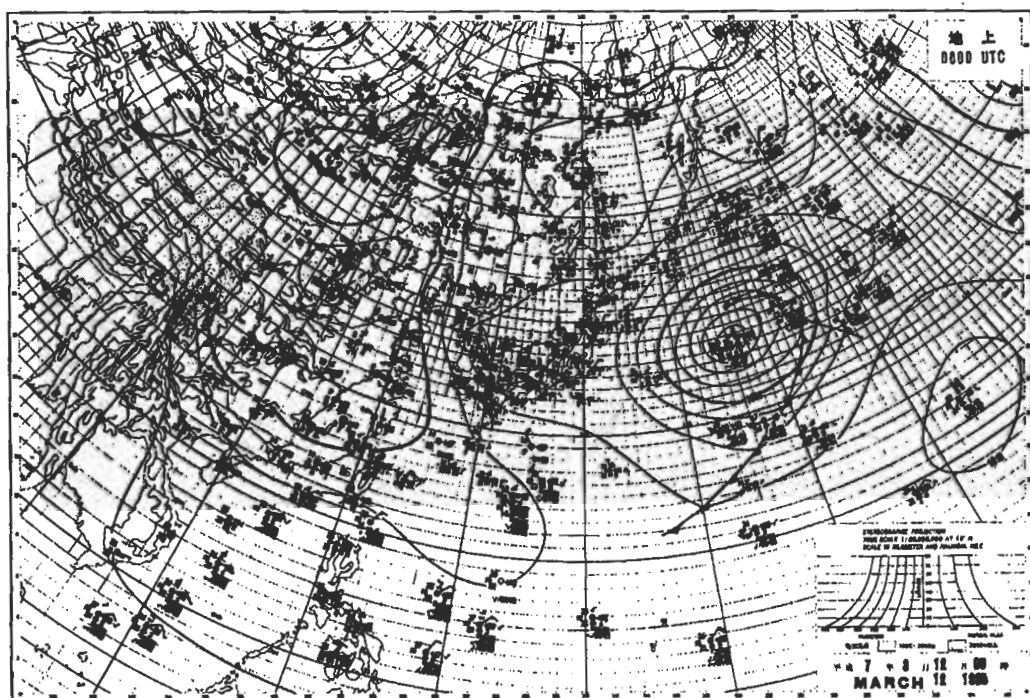
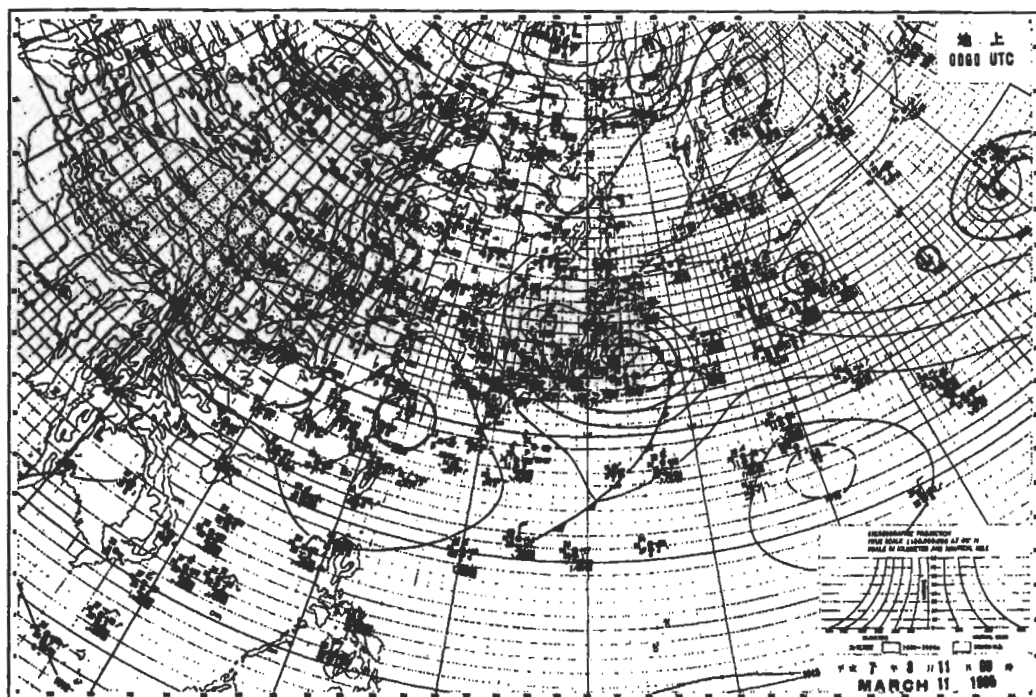


圖 5 日本氣象廳東亞地面天氣圖分析，由上至下分別為 1995 年 3 月 10 日、3 月 11 日、3 月 12 日 00UTC (08LT) 天氣圖，地面天氣圖上出現沙塵天氣地區以 S 符號顯示。

3月11日00UTC地面天氣圖(圖5中)顯示,隨著低壓中心東移以及分裂高壓南下,等壓線密集帶也移至大陸河套地區上空,沙塵暴系統影響強度和範圍到達最大,地面天氣圖上有五個測站有沙塵報告出現,其中重度 2個、中度 1個、輕度 2個。3月12日00UTC地面天氣圖(圖5下)發現分裂高壓中心已經移到浙江沿海,位於高壓前緣之沙塵暴系統已經出海,朝鮮半島南端釜山市開始出現沙塵現象,且鄰近測站如濟州島和日本四國南方海島上有視障天氣現象(霾)出現。此時台灣地區則在高壓外圍影響下,盛行風向轉為東北風。

圖6為3月12日0733LT(比3月12日00UTC早27分鐘)可見光衛星雲圖,圖中顯示鋒面雲系前沿已經通過台灣地區並到達台灣南部海域,沙塵跟隨在鋒面雲系之後移動,地面沙塵報告發

現沙塵最南端已經到達長江出海口附近($28^{\circ}\text{N}/122^{\circ}\text{E}$)而且和鋒面雲系混合在一起,此次沙塵輸送過程中伴隨豐富水汽量,是造成台灣北部泥雨主要原因。由於洋面上除了少數島嶼外缺乏氣象觀測站,由地面天氣圖或FGGE資料已經無法完整描述沙塵暴系統出海後之範圍,我們將在後面利用數值模擬分析沙塵出海後之情形。

(二) 高空氣流與濕度

為瞭解沙塵暴形成和輸送過程背景大氣狀況,圖7顯示3月9日~3月12日850hPa高空風和相對濕度分佈。3月9日沙塵暴源地($100^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}/35^{\circ}\text{N}\sim 45^{\circ}\text{N}$,亦即戈壁和黃土高原)上空已經出現大範圍的乾燥區($\text{RH}<40\%$),上空風向為西風到西南風,但風速不大(10~15 knots),有利沙塵暴生成條

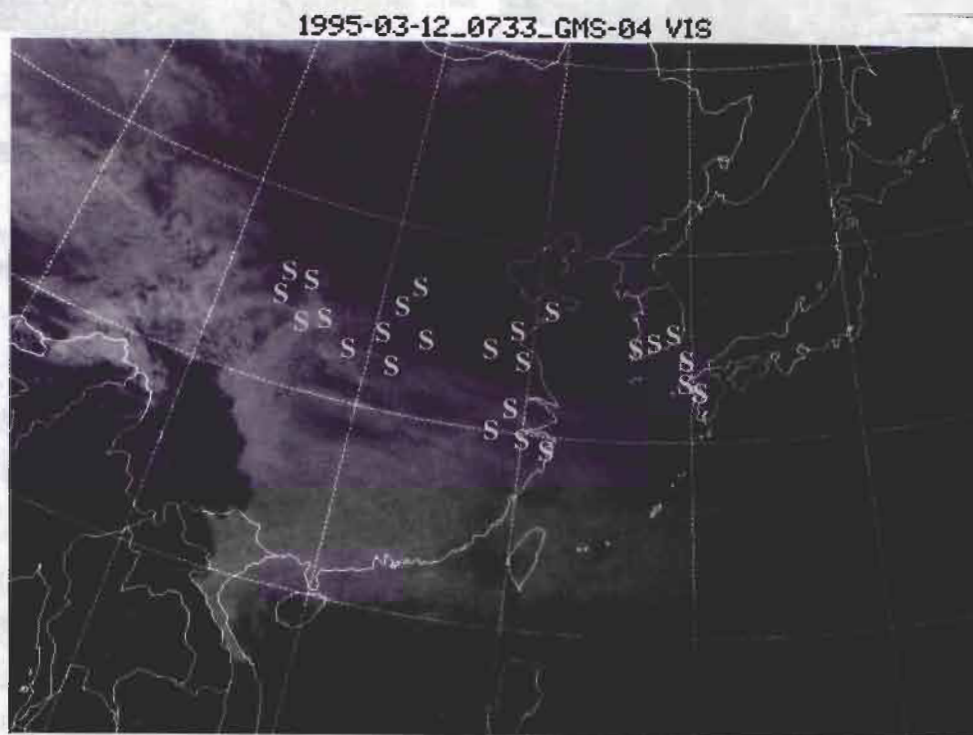


圖6 1995年3月12日0733LT東亞地區可見光衛星雲圖,圖中同時標上0800LT沙塵現象位置。

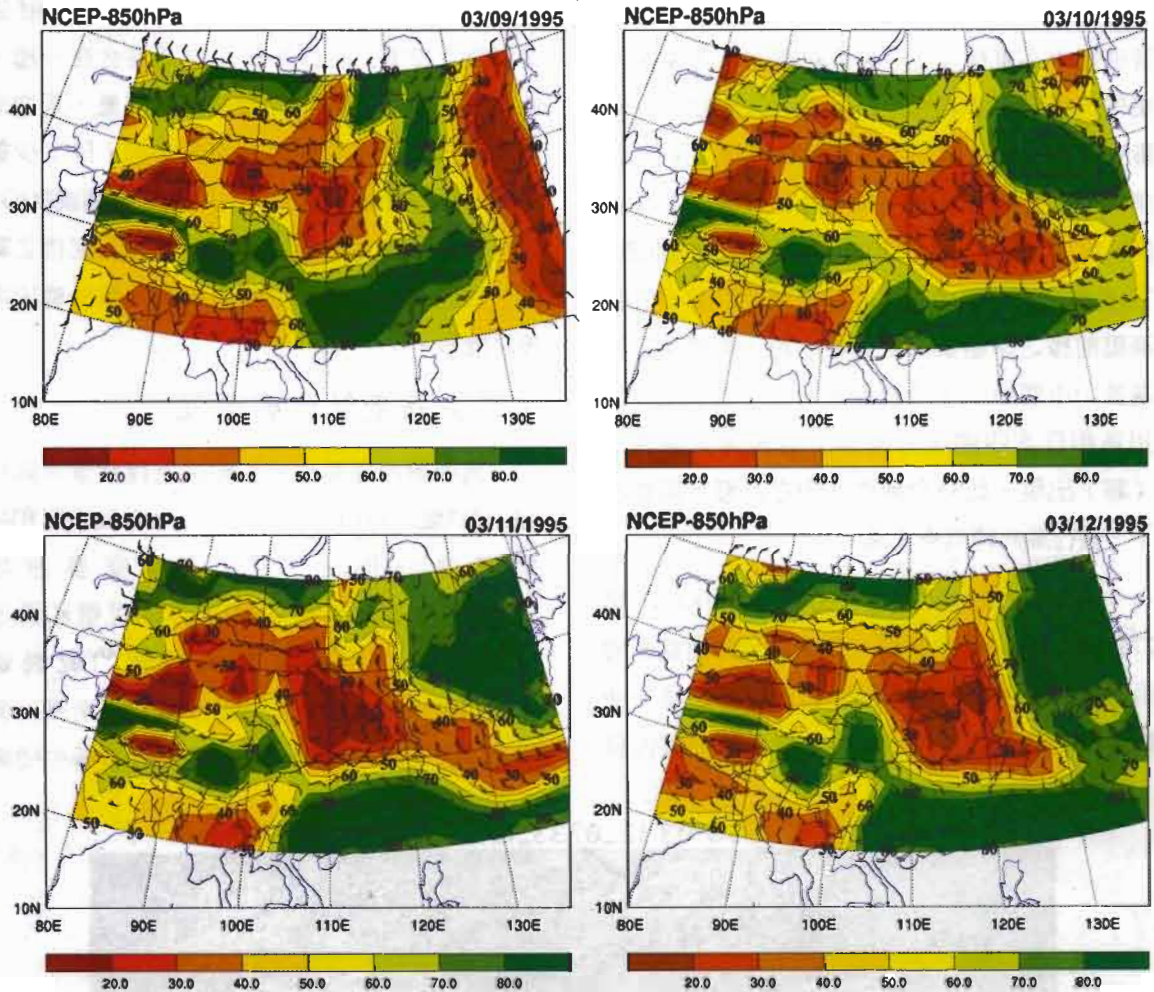


圖7 850hPa 高空氣流（以風標表示，單位為 knots）和相對濕度（以彩色等值線表示，單位為%）分佈，由左到右由上到下依序為 1995 年 3 月 9 日~3 月 12 日，採用 NCAR/NCEP 日平均資料。

件尚未出現。3月10日起沙塵暴源地上空風向轉為西風到西北風，風速也大幅增強(>30 knots)，提供沙塵暴形成的有利條件。3月11日乾燥區和強風帶往東南移至長江和黃河流域之間，極乾燥區(RH<30%)前緣已經接觸到江蘇省沿岸地區，3月12日起更出海並影響到日本和韓國南方海面上。我們也注意到3月12日時，乾燥區南緣最靠近台灣北部地區，此時台灣北方海面吹北風，有利於將乾燥區之沙塵往南輸送至台灣

地區。將圖7和FGGE沙塵報告(圖3)比較發現，850hPa西北強風和乾燥區移動路徑和FGGE沙塵輸送路徑相當一致，顯示850hPa為此次沙塵輸送主要高度之一。

700hPa高空風和相對濕度分佈(圖8)顯示，在3月9日沙塵暴源地上空極為乾燥(RH<20%)，3月10日起沙塵暴源地上空風速增強，乾燥區隨著高空風往東輸送，由3月11日和3月12日高空風和濕度分佈可知，此次沙塵暴

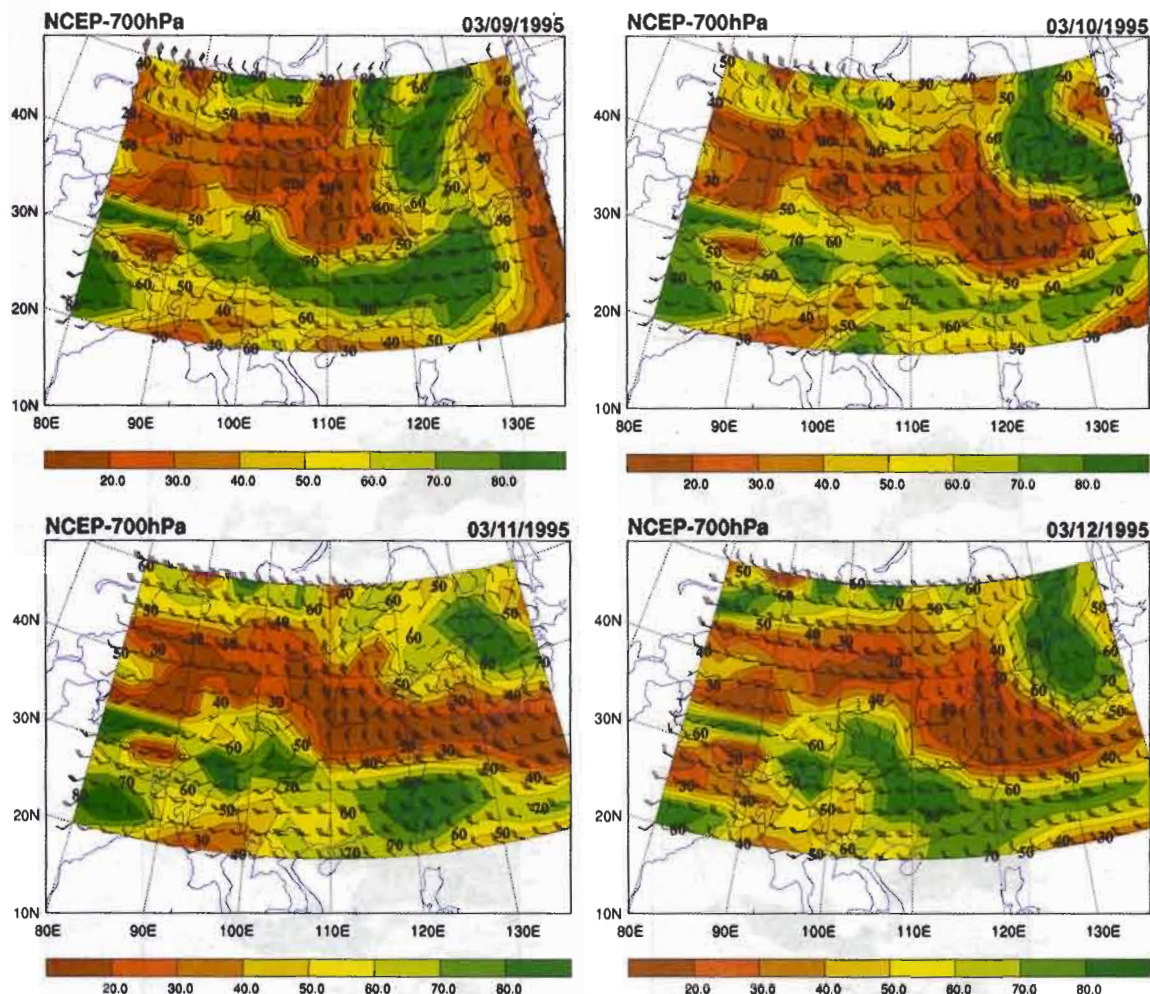


圖 8 同圖 7，但為 700hPa 高空氣流和濕度場分佈。

700hPa 輸送緯度較 850hPa 高，主要輸送帶在 30°N~40°N 之間，且台灣北方海面吹西風，並不有利於沙塵往台灣地區輸送。此結果顯示台灣地區 3 月 12 日起所發生的高濃度沙塵現象應該來自於 850hPa 以下的沙塵輸送，和逆軌跡線分析結果一致。

五、TAQM 數值模擬結果

圖 9 為 TAQM 針對 1995 年 3 月 12 日台灣北部地區黃雨事件之模擬地面風場和沙塵濃

度，模擬起始時間（起沙時間）為 3 月 10 日 18UTC。6 小時後（3 月 11 日 00UTC）模擬結果顯示沙塵輸送沿著地面鋒面後呈線型分佈，主要高濃度沙塵範圍由河北往西南延伸至河套地區。在未來 18 小時當中，沙塵系統隨著鋒面繼續往東南移動，沙塵系統強度稍微減弱，高濃度沙塵 ($300\sim400\mu\text{g}/\text{m}^3$) 於 3 月 11 日 18UTC 已經移至朝鮮半島南部地區。隨後沙塵系統由朝鮮半島南方往東南移至日本四國，於 3 月 12 日 12UTC 起，主要沙塵系統已經移至日本南方

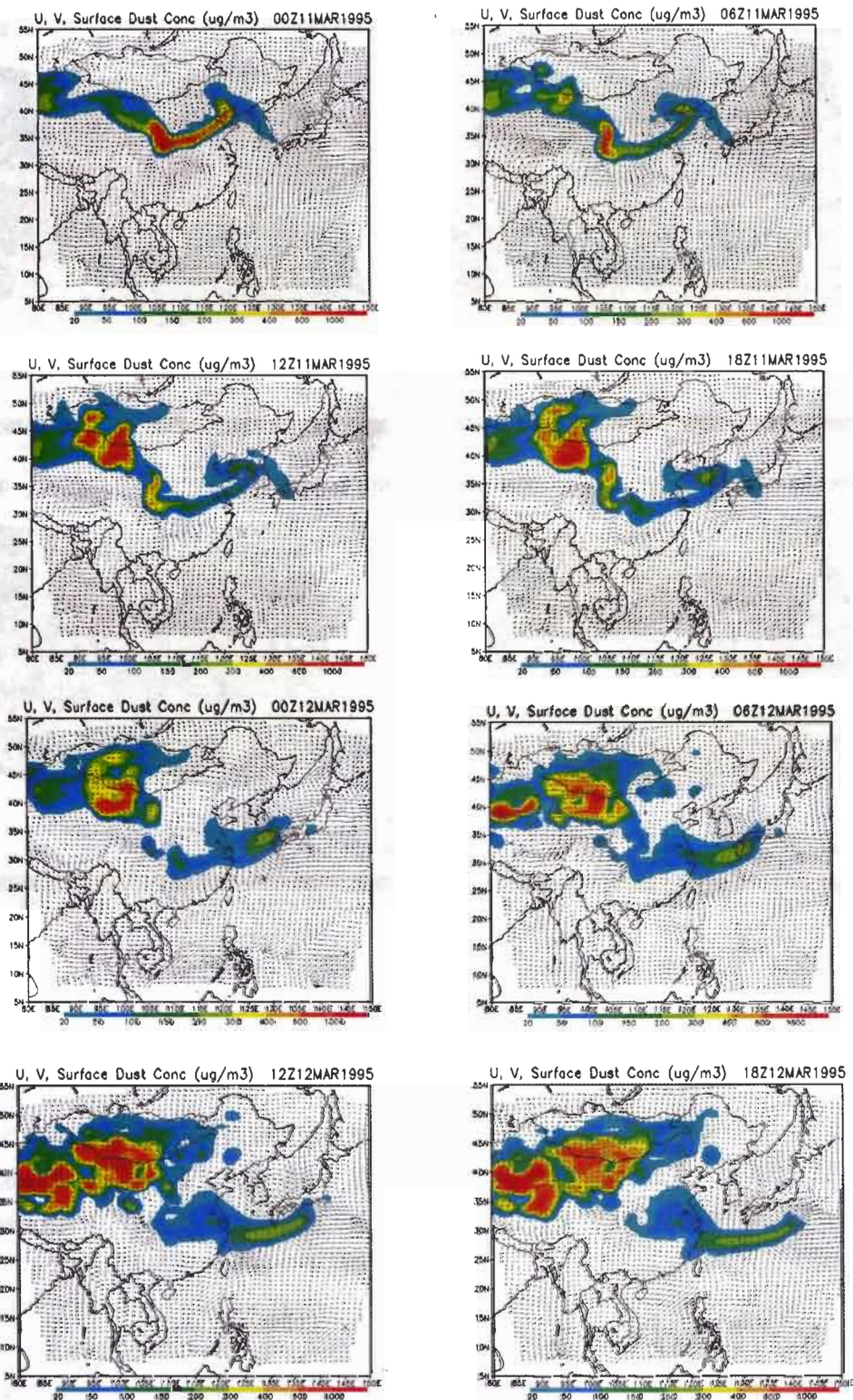


圖9 1995年3月11日00UTC~3月12日18UTC TAQM模擬每6小時沙塵濃度(單位 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)和地面風場分佈。

海面，但沙塵最高濃度仍然維持在 $300\sim400\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間。將 TAQM 模擬結果與同時時間 FGGE 沙塵報告（圖未附）比較發現，除了模擬沙塵較為集中且呈線型分布外，沙塵隨時間輸送位置和 FGGE 觀測大致上相當吻合。

如果進一步分析 TAQM 模擬結果（圖 9），我們發現從 3 月 12 日 06UTC（14LT）起，台灣北方海面東北風增強，主要沙塵系統有往台灣北部地區輸送趨勢，但模擬結果顯示主要沙塵系統並未直接影響台灣地區。圖 10 為台灣附近地面風場觀測，顯示台灣鄰近地區東北風於 3 月 12 日 00UTC 起加強，其中福建沿海觀測到超過 20 knots 以上風，台灣地區東北風於 06UTC 和 12UTC 時達到最強，海邊觀測到最大風速都超過 50 knots 以上。TAQM 模擬台灣鄰近海域東北風增強時間和觀測非常接近，由於東北風是將海面上沙塵輸送至台灣地區關鍵，此結果顯示，TAQM 模擬沙塵輸送過程在時間上掌握的相當準確；但另一方面，TAQM 模擬的地面沙塵濃度偏低，例如台灣地區地面測站已經可觀測到超過 $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之 PM_{10} 濃度（觀音站），但模式中沙塵出海後之最高濃度（出現在東海海面上）也僅在 $300\sim400\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，台灣北部地區模擬地面沙塵濃度僅在 $50\sim100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，我們認為模式起沙量不足可能是此次個案模擬沙塵濃度偏低之主因。

六、結果與討論

沙塵暴是亞洲中緯度沙漠地區春季相當頻繁的一種天氣現象，其中在戈壁和河套形成的沙塵暴系統經常伴隨著天氣系統往東或東南輸送，日本和韓國恰位於亞洲沙塵暴主要輸送路徑上，嚴重沙塵污染事件頻繁，已成為當地環

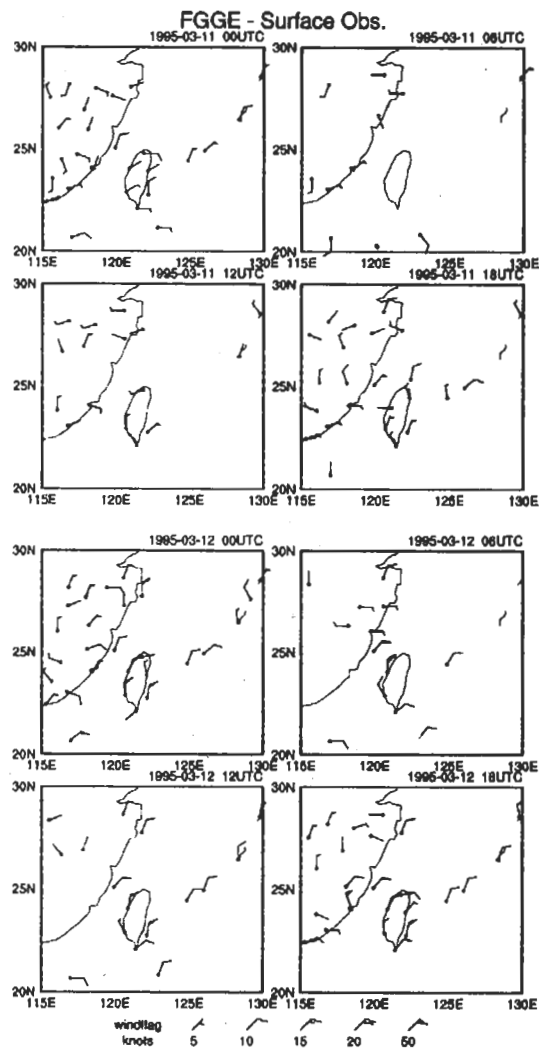


圖 10 1995 年 3 月 11 日~3 月 12 日每 6 小時台灣附近地面風場（以風標表示，單位為 knots）分析。

保單位空氣品質預報的重點。台灣雖然不在亞洲沙塵暴主要輸送路徑上，但仍偶見較為嚴重沙塵污染，其中以 1995 年 3 月 12 日下午造成台灣北部地區「黃雨」現象的沙塵暴個案最為嚴重，該個案是環保署自 1993 年 9 月建立現代化全台空氣品質監測網後，到目前為止最為嚴重的沙塵污染事件，本文以此個案進行詳細分

析，以瞭解大量沙塵輸送至台灣地區始末和關鍵因素，做為未來類似事件的預報參考。

分析地面天氣圖、高空圖、以及 FGGE 資料結果顯示，造成 1995 年 3 月 12 日下午台灣地區嚴重沙塵污染事件的起源是 3 月 10 日午后起發生於戈壁和河套的沙塵暴。當時西伯利亞冷高壓南下和前方低壓間的強氣壓梯度區正好位於戈壁和河套上方，強氣壓梯度伴隨的地面強風形成大範圍（面積超過 100 萬平方公里）的沙塵暴系統。高空大氣條件（850hPa 和 700hPa）同時顯示，沙塵暴源地上空非常乾燥並伴隨有強盛的西北風，整體條件非常有利於沙塵進行長程輸送。

由地面天氣圖來看，分裂高壓南下是推動沙塵往下游輸送的關鍵；但從高空圖上來看，低壓槽後的西北風是提供沙塵高空輸送的動力。此次分裂高壓出海緯度低（高壓脊線出海位置低於 30°N ），使得高空槽後的西北風得以南下至較低緯度，應是此次台灣地區受到較為嚴重沙塵污染的重要因素。

本文也利用 TAQM 模擬沙塵暴長程輸送過程，一般而言 TAQM 模擬在沙塵位置掌握相當準確；但由於模式起沙量偏低，模擬的地面沙塵濃度顯然偏低。模式模擬結果也告訴我們，3 月 12 日起台灣鄰近地區低層東北風增強現象是將徘徊於東海海面上沙塵輸送至台灣地區的關鍵。逆軌跡線分析也證實 1995 年 3 月 12 日台灣地區地面至 1000 公尺間沙塵是源自戈壁和河套上空，出海後再往南輸送至台灣地區。

事實上此次沙塵暴形成的綜觀天氣條件和其他沙塵暴個案並無太大差異，但此次台灣地區受到嚴重沙塵污染關鍵在於分裂高壓緯度較

低，使得原本位於韓國、日本上空的典型沙塵輸送路徑南移到東海海面上，此時一旦台灣鄰近海域東北風增強，就有可能將大量沙塵輸送到台灣地區上空，造成高 PM_{10} 濃度的污染事件。因此未來台灣地區預報沙塵污染程度除了視源地沙塵暴強度外，還必須考慮輸送過程中天氣系統配置，特別是分裂高壓出海的緯度，以這次個案而言，高壓脊出海緯度低於 30°N ，台灣就受到嚴重衝擊。

致 謝

本文由國科會計畫 NSC92-2111-M-034-002 部分支助所完成，研究所需氣象資料由中央氣象局、國科會大氣資料庫、以及文化大學氣象資料庫所提供；空氣品質資料由環保署提供；計算機設備由文化大學大氣科學系提供。作者特別感謝台大陳正平教授提供 TAQM 模擬結果，文化大學研究生林瑋翔先生協助部分繪圖和製表，使本文得以順利完成。

參考文獻

- 夏訓誠、楊根生，1995：黑風暴，科學出版社，32pp。
- 余嘉裕、劉廣英、俞家忠，1996：台灣地區空氣污染物與大陸地區沙塵暴長程輸送關係之研究，行政院環境保護署期末報告，EPA-85-1301-09-12。
- 楊之遠、李侃翰、柳中明，1997：長程傳送黃沙與本地污染之空氣品質監測比較：1995 年 3 月 12 日～16 日資料分析，環境保護，20，1-38。
- 余嘉裕、陳永祺、劉廣英，1997：台灣地區空氣品質監測與東亞沙暴關係之氣候與地球化學分析，行政院環境保護署期末報告，EPA-86-L102-03-20。
- 陳正平、蔡富容、王自發，2002：大陸沙塵暴氣象條件之分析與建立預警制度之研究，

行政院環境保護署期末報告，EPA-91-U1L1-02-108。

余嘉裕、卓盈旻、涂建翊，2003：東亞沙塵暴的時空特徵分析，*環境保護*，**25**，178-197。

Ing, G. K. T., 1972：A dustorm over central China in April 1996. *Weather*, **27**, 136-145.

Iwasaka, Y., H. Minoura, and K. Nagaya, 1983：The transport and special scale of Asian dust-storm clouds: A case study of the dust-storm event of April 1979 *Tellus*, **35B**, 189-196.

Wang, Z., H. Ueda, and M. Huang, 2000: A deflation module for use in modeling long-range transport of yellow sand over East Asia. *J. Geophy. Res.*, **105(D22)**: 26947-26960.

Zhao, B. and X. Yu, 1990：On eastern Asian dust storm. *Advanced Atmospheric Sciences*, **7**, 11-26.

A Case Study of the "Yellow Rain" Occurred in Northern Taiwan on March 12, 1995

Tsung-Sung Lin¹ Jia-Yuh Yu²

¹Department of Environmental Management, Jin Wen Institute of Technology

²Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University

(Manuscript received 16 February 2005 ; in final form 25 June 2005)

ABSTRACT

Spring frontal systems over Asian deserts bring active dust storms, causing the worst air quality in both origins and downstream areas. The "Yellow Rain" occurred in the afternoon of March 12th, 1995 over northern Taiwan had marked the most serious dust pollution event ever since the establishment of modern air monitoring network over Taiwan in September of 1993. In this paper, we examine this case in details to understand the process responsible for transporting dusts over to Taiwan.

Our study indicates that the serious dust pollution event on March 12th, 1995 resulted from a massive dust storm system generated over Gobi and The Great Bend of Yellow River in the afternoon of March 10th, 1995. Firstly, Dry atmosphere and strong winds are the cause of the dust storm formation. Secondly, the southward movement of split High and strong upper northwesterly provide the needed power for long-term dust transportation. TAQM simulation and HYSPLIT back-trajectory analysis also confirm that the southward transportation of dusts from East China Sea by the strong northwesterly beginning on March 12th is the cause of the serious dust pollution event. Southward shift of the Split High path while moving out of the mainland is the key for serious dust pollution.

Key words: Dust storm, Strong pressure gradient, Split high, Dust pollution event