

東南亞地區春季前推軌跡群集分析及氣候影響

余嘉裕¹ 林能暉² 謝和修¹ 林宗嵩³

¹ 中國文化大學大氣科學系

² 國立中央大學大氣科學系

³ 景文科技大學環境與物業管理系

(中華民國九十七年三月三十日收稿；中華民國九十七年十二月三日定稿)

摘 要

東南亞長久以來就是亞洲最主要的生質燃燒氣膠源區，每年春季在該區所產生的大量煤灰氣膠，不僅對區域空氣品質有顯著衝擊，透過改變大氣輻射平衡，也會影響區域氣候型態。本文利用群集分析法，探討 NOAA HYSPLIT 模式所計算之長期前推軌跡資料，以瞭解春季期間起源自中南半島生質燃燒氣膠之可能傳輸路徑。本文也採用 NCEP/NCAR 大氣資料，分析氣候條件如何影響軌跡傳輸路徑。

研究結果發現，起源自中南半島北部地區的軌跡傳輸範圍相當廣泛，除了高緯度地區外，整個東亞幾乎都在其影響範圍內。另一方面，起源自中南半島南部的軌跡傳輸範圍大多侷限在中南半島附近，對中緯度地區影響較小。進一步分析軌跡傳輸路徑和氣候關係也發現，起源自中南半島北部之軌跡傳輸路徑在強聖嬰年時有明顯偏北趨勢，其中菲律賓東方海面出現反氣旋式距平環流是導致聖嬰年春季軌跡傳輸路徑偏北的主因。

關鍵詞：生質氣膠、群集分析、前推軌跡線

一、前言

「氣膠」(aerosol)或稱「懸浮微粒」(suspended particle)是指漂浮在大氣中個別而微小的固體微粒或液體小滴之總稱，其直徑通常約在 $0.001\sim 10\mu\text{m}$ 間($1\mu\text{m}=10^{-6}$ 公尺)。氣膠的來源分為自然源和人為源二部分：自然源為自然現象產物，如沙漠地區沙塵暴所揚起的沙粒、火山爆發所噴發出的火山灰、及海水蒸發所產生的鹽粒等。人為源為人類活動產物，如燃燒所形成的固體顆粒(含煙、煤灰、工業灰塵、硫酸鹽、硝酸鹽等)、及氮氧化物和碳氫化合物光化學反應所產生的顆粒(二次氣膠)等。高濃度氣膠對於空氣品質、能見度、乃至於氣候(透過吸收太陽短波輻射，改變大氣輻射平衡，進而影響氣候)都有顯著影響(Dickerson et al. 1997; Liao and Seinfeld 1997)，因此瞭解大氣氣膠之生成、輸送、及物理化學反應過程，已成為研究環境變遷不可或缺之一環。

亞洲地區近年來因經濟快速發展以及氣候變遷等因素，產生許多跨區域傳送之大氣污染物，包含：沙塵、酸性污染物、生質燃燒、大氣汞、以及光化學反應後之二次氣膠等(Akimoto 2003; Chang and Lee 2007)。春季是亞洲地區大氣氣膠高峰期，主要來自於沙塵暴和生質燃燒活動。亞洲沙塵暴大多起源自蒙古戈壁和中國西北乾旱區，活躍期通常發生在每年3~5月間，所產生的沙塵大部分沿著中緯度西風帶向東輸送，對中國北方、和韓國、日本等地區有顯著影響(Chung 1992; Fan et al. 1996; Yu et al. 2009)，部分細顆粒沙塵甚至可橫越太平洋到達北美地區(Kotamarthi and Carmichael 1993)。最近有愈來愈多的研究顯示，在特定的天氣系統影響下，部分沙塵可往南方輸送，影響副熱帶地區，包括台灣和香港等(余等 2002; 林和余 2005)。

亞洲地區生質燃燒(biomass burning)活動主要集中在東南亞，活躍期通常發生在每年2~4月間之乾季，主要產物為煤灰(soot)顆粒。東南亞地區大多為開發中國家，對生物能源(煤、肥料、與農廢料等)使用量大，加上習慣以燃燒農地方式整地，或為開拓新農地將林地以燃燒方式清除，因而產生大量生質燃燒氣膠。然而，不像沙塵暴是斷斷續續出現，生質燃燒活動往往可持續整季之久，對於區域環境影響程度往往超越沙塵暴(Streets et al. 2003)。

東南亞生質燃燒活動受氣候因素影響頗大，高峰期出現在中南半島的乾季，其中以春耕時期最為旺盛，因此時鋒面大多位於中國華東沿海一帶，中南半島位於鋒面前緣之暖區，抬升作用有利於將生質燃燒氣膠帶至高空，再藉由高空氣流傳輸至其他地區(Liu et al. 2003)。每年春季，東南亞地區上空經常可見高濃度氣膠徘徊不去，其厚度往往可達2~3公里，國際學界將此霾雲稱為「亞洲褐雲」(Asian Brown Cloud)，認為它對環境、人體健康、區域氣候、甚至生態系，均有顯著的負面影響(Ramanathan et al. 2002)。2001年美國和東南亞鄰近國家曾進行兩個大型實驗計畫：ACE-Asia (Aerosol Characterization Experiment-Asia) 與 TRACE-P (Transport and Chemical Evolution over Pacific) (Seinfeld et al. 2004; Liu et al. 2003)，此計畫所收集的資料，有助於瞭解「亞洲褐雲」對區域環境和氣候之衝擊。

從ACE-Asia和TRACE-P實驗後，有更多學者關注生質燃燒氣膠傳送課題，Bey et al. (2001)使用GEOS-CHEM模式對亞洲地區人為污染物的傳輸進行研究，他們指出亞洲地區污染物的傳輸主要集中在低對流層(2~5km)，由於在地面之氣膠單靠地面風的傳送可能只能傳輸至幾公里

外，但若受到天氣系統的抬升作用，將污染物帶至風速大的高度，污染物就可傳輸至好幾百甚至幾千公里以外。Chan et al. (2003)利用衛星資料、飛機、軌跡追蹤、以及分析香港的臭氧探空資料，發現於春季低對流層有最大的臭氧濃度，並證實是東南亞生質燃燒氣膠藉由西風傳送來至香港所造成。而於台灣中部的鹿林山測站氣膠採樣分析也發現，春季收集的濾紙樣本中，經常發現生質燃燒氣膠蹤跡（黃希爾 2004）。

在過去幾年，台灣學界對外來污染源的研究主要著重於沙塵暴，鮮少對生質燃燒活動的氣候特徵有詳細的分析。本文首次嘗試利用軌跡模式所計算出之大量軌跡資料進行路徑分析，以瞭解春季起源自中南半島地區污染物之可能傳輸路徑，並探討軌跡傳輸路徑和氣候間關係。本文第二節介紹使用的資料來源與研究方法，包含 NOAA HYSPLIT 模式資料、NCEP / NCAR 大氣資料、CMAP 降水資料、MODIS 火點資料、及 TOMS 氣膠指數資料等，以及介紹群集分析法之分類步驟。第三節利用經驗正交函數法，分析東南亞地區生質燃燒活動分佈特徵。第四節針對北越、泰國、及柬埔寨三個源區，探討起源自該處之春季軌跡傳輸型態。第五節討論氣候條件和軌跡傳輸型態間關係，特別是伴隨聖嬰／反聖嬰現象所出現之異常環流如何影響軌跡傳輸路徑。第六節總結並討論本研究主要成果。

二、資料來源與研究方法

(一) 資料來源

本文採用美國 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ARL (Air Resources Laboratory)所發展的 HYSPLIT (HYbrid Single-

Particle Lagrangian Integrated Trajectory)軌跡模式，取 1981~2004 年春季 (2~4 月) 期間，每日 06UTC (1400LT)開始計算之前推軌跡(forward trajectory)，用以建立研究所需之軌跡資料庫。HYSPLIT 模式主要用於大氣污染防治、預警及個案診斷等研究，它可針對氣塊的軌跡、擴散、沉降(含乾、濕沉降)進行模擬，且可使用多種氣象場資料來運算。HYSPLIT 模式以 Lagrangian 方法計算氣塊平流與擴散作用，以 Eulerian 方法處理外界輸入的氣象及污染物排放資料(Draxler 1992；Draxler 1996；Draxler and Hess 1998)。在模式計算軌跡過程中，運動方向是由風場平流(氣流)所決定，因此每一條軌跡事實上是反應當時氣流狀態。

本文也使用 NCEP / NCAR (National Centers for Environmental Prediction / Nation Center for Atmospheric Research)再分析大氣與海溫資料，用以探討軌跡傳輸路徑與背景大氣環境之關係。NCEP / NCAR 資料空間解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，包含地面層大氣及海溫資料，以及 17 層的大氣資料(Kalnay et al. 1996)。雨量資料則採用美國氣候預報中心合併分析降水(Climat Prediction Center Merged Analysis of Precipitation，簡稱 CMAP)資料(Xie and Arkin 1996; 1997)，CMAP 降水資料為測站觀測資料結合五種衛星觀測反演資料以及 NCEP/NCAR 再分析資料所得，其空間解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，涵蓋全球範圍。

為了解東南亞生質燃燒活動之時空分佈，本文另採用 MODIS 衛星火點(fire count)資料和 TOMS 衛星氣膠指數(aerosol index)資料，前者可顯示地面生質燃燒情況，後者可呈現氣膠在高空分佈。TOMS 氣膠指數是由測量光學厚度所得，

而光學厚度又和太陽紫外線穿透大氣程度有關，因此氣膠指數和光學厚度關係與高度有關，相同的光學厚度在低空會得到比高空更小之氣膠指數，因此 TOMS 氣膠指數主要反應的是高空氣膠濃度。在本研究中，MODIS 衛星資料選用 2003 年間，每十日累積火點數資料；TOMS 衛星資料則選用 1979~2001 年間，第八版(Version 8)氣膠指數資料。

(二) 群集分析

群集分析(cluster analysis)為一個多變量統計技巧，用於探索資料的結構，目的是辨識資料的相似性與相異性(Anderberg 1973; Everitt 1980; Dorling et al. 1992)，此法常被用於大量軌跡資料分析(Stohl 2001; Jorba et al 2004)。群集分析法通常依軌跡移動特性區分為不同的群集，再依各群集的比例大小，了解污染物在傳輸過程中對各區域之潛在影響。群集分類方式可依實際需求定之，有客觀方式，也有主觀方式，並無統一方法。本研究所採用之群集分類步驟可簡述如下（見圖 1）：

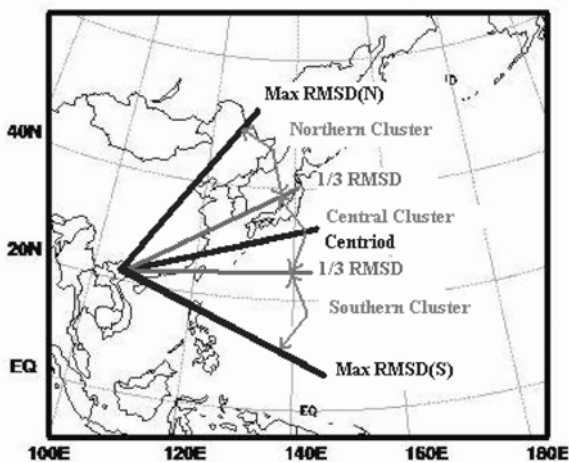


圖 1 本文軌跡群集分析法示意圖。

1. 將所有軌跡作經、緯度平均，先求取一條「平均軌跡」(Centroid)。
2. 利用各軌跡與平均軌跡間緯度差值，求取南、北兩端最大「均方根方差」(Root Mean Square Error)。
3. 以平均軌跡為中心，各取南、北兩端最大方差 1/3 以內的軌跡當作「中支群集」(Central Cluster)。
4. 將中支群集以北之軌跡定為「北支群集」(Northern Cluster)，以南之軌跡定為「南支群集」(Southern Cluster)。

由於軌跡群之緯度分佈通常呈現常態分佈，上述分類方式會使中支群集所佔比例偏高，為其主要缺點。然而，本文探討的是群集比例的變動(亦即異常部分)，上述分類方式將不會影響分析結果。

三、生質氣膠活動與背景大氣環境

(一) 生質氣膠活動

燃燒是產生生質氣膠最主要過程，為瞭解東南亞地區地面生質燃燒活動分佈和季節變化，圖 2 顯示 2003 年間，每 10 日累積 MODIS 火點分佈。從火點分佈可發現，東南亞地區生質燃燒活動以中南半島為主，其次為印尼和婆羅洲等地。生質燃燒活動有明顯的季節變化，中南半島以春季期間(亦即圖 2 之第 5~13 小圖，相當於 2 月中旬到 5 月中旬間)最為旺盛，冬季次之，夏、秋二季非常平靜。印尼和婆羅洲等地之季節變化不同於中南半島，其活躍期集中在秋、冬二季，春季反而非常平靜，不過其強度遠不如中南半島地區。

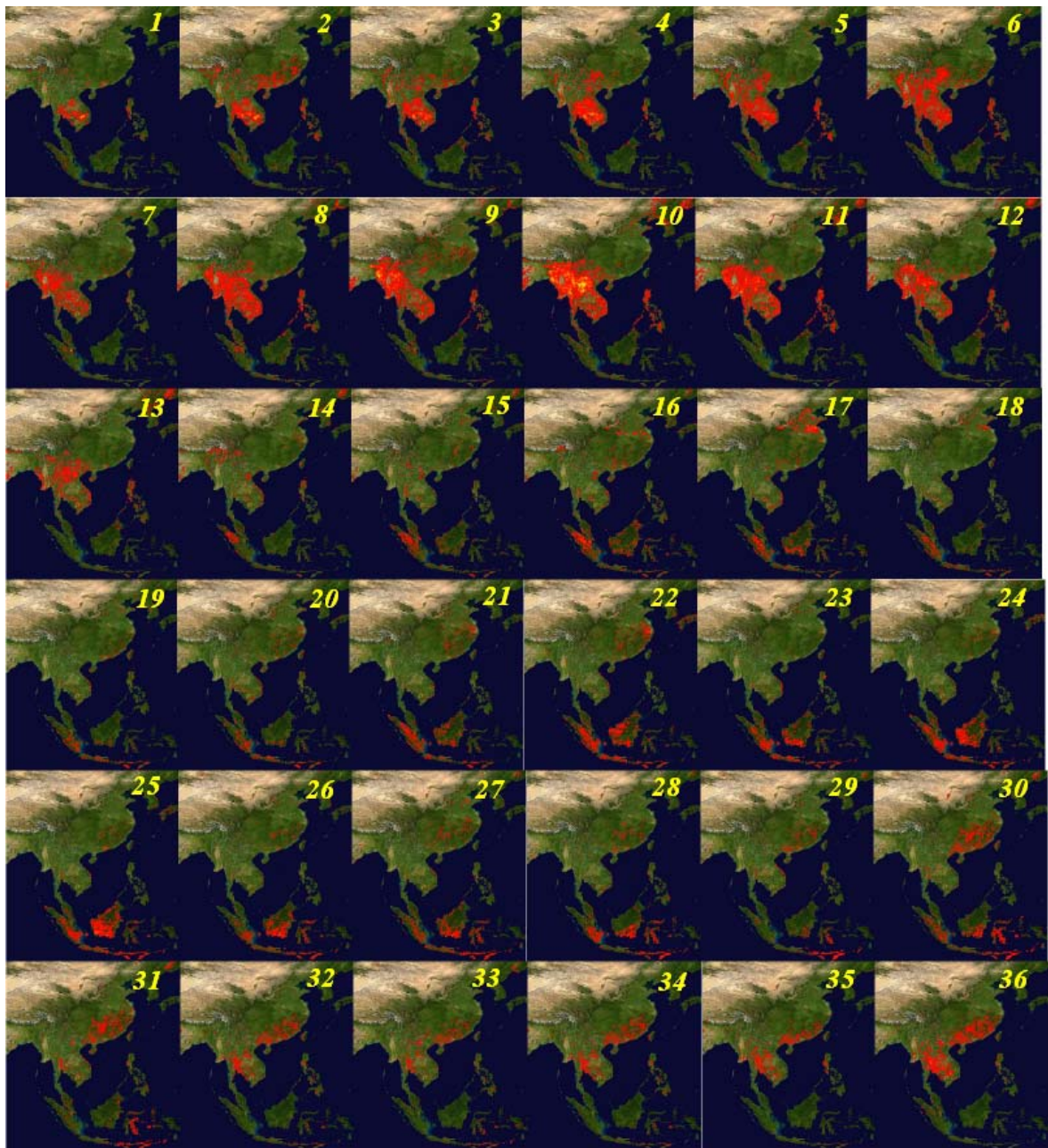


圖 2 2003 年東南亞地區 MODIS 火點分佈之時間變化。每一張小圖代表 10 日累積火點資料，每張小圖右上角數字代表該圖為第幾個 10 日，例如：數字“1”代表第 1~10 日、數字“2”代表第 11~20 日，依此類推。

我們推測上述生質燃燒活動季節變化與東南亞地區乾、濕季分明的氣候特徵有關。冬天至隔年春天屬於中南半島之乾季，有利於生質燃燒活動產生和維持；反之，同時期為印尼和婆羅洲之濕季，不利於生質燃燒活動。當我們進一步檢視其他年份資料也發現，雖然火點強度略有差異，但皆有類似的季節變化特徵，顯見生質燃燒已成為東南亞地區季節性的大氣污染現象。

除火點資料外，我們也將透過分析 TOMS 氣膠指數獲得氣膠在高空分佈特徵。圖 3 為 TOMS 氣膠指數第一個經驗正交函數 (EOF1)，可解釋變異量為總量之 73% 左右。由 EOF1 空間分佈(上圖)可知，主要氣膠濃度變化區分佈在寮國、越南北部和中國廣西、海南島附近上空，呈現東北-西南走向之狹長分佈，此分佈型態與高空氣流傳輸方向有關。主分量時間序列(下圖)顯示，上

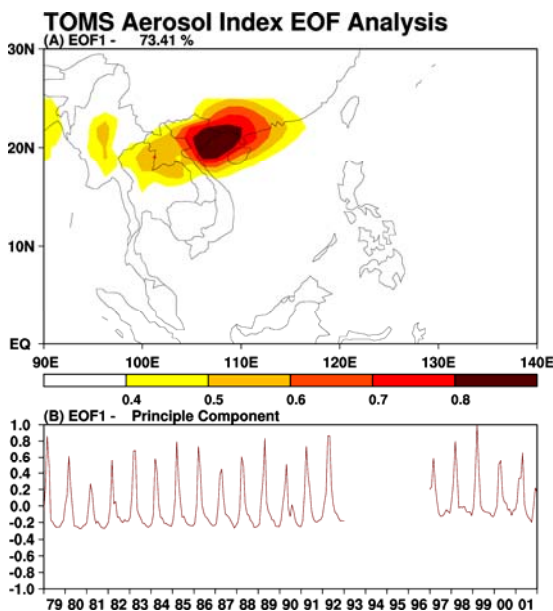


圖 3 1979~2001 年間，東南亞地區 TOMS 氣膠指數第一個經驗正交函數 (EOF1) 分佈。上圖為空間分佈，下圖為主分量時間序列。

述分佈型態似乎非常規律地出現在每年的春天，與 MODIS 火點資料結果相當一致，顯示高空氣膠應該源自於地面的生質燃燒活動。

由於東南亞地區生質燃燒活躍季節集中在春天，因此往後各節將僅針對春季期間(2~4月)資料進行分析。

(二) 背景大氣環境

圖 4 為亞太地區中低對流層(925~500hPa)春季期間平均氣流和降水場分佈。3000 公尺以上高空(700hPa 和 500hPa)受地形影響小，氣流場似乎較為單純，中南半島北部為西風帶所籠罩，南部則在高壓脊影響範圍內，有微弱的東風或東南風。另一方面，低對流層(925hPa 和 850hPa)受地形和熱力因素影響，其氣流場較為複雜，中南半島北部為南風或西南風所籠罩，南部則受東風或東南風影響。

主要降水區分為二部份：其一位於赤道附近(含印尼和婆羅洲)，屬對流性強降水系統；另一位於東亞地區，屬鋒面型降水系統。中南半島位於兩降水區間的乾燥帶，氣候條件有利於氣膠之產生和輸送。這可解釋為何春季中南半島生質燃燒活動特別活躍，而印尼和婆羅洲特別平靜之因(見圖 2 和圖 3)。

為了解春季氣流場對東南亞地區軌跡傳輸路徑影響，圖 5 顯示由泰國(上圖)和柬埔寨(下圖)起源之軌跡傳輸型態。泰國源地(19°N, 100°E)位處於中南半島北部，受西風帶影響，其軌跡傳輸路徑大多往東或東北。另一方面，柬埔寨源地(12.5°N, 106°E)位處於中南半島南部，導引氣流多變(見圖 4)，因此其軌跡傳輸路徑較為多元，除往東北外，也有部份軌跡往西。

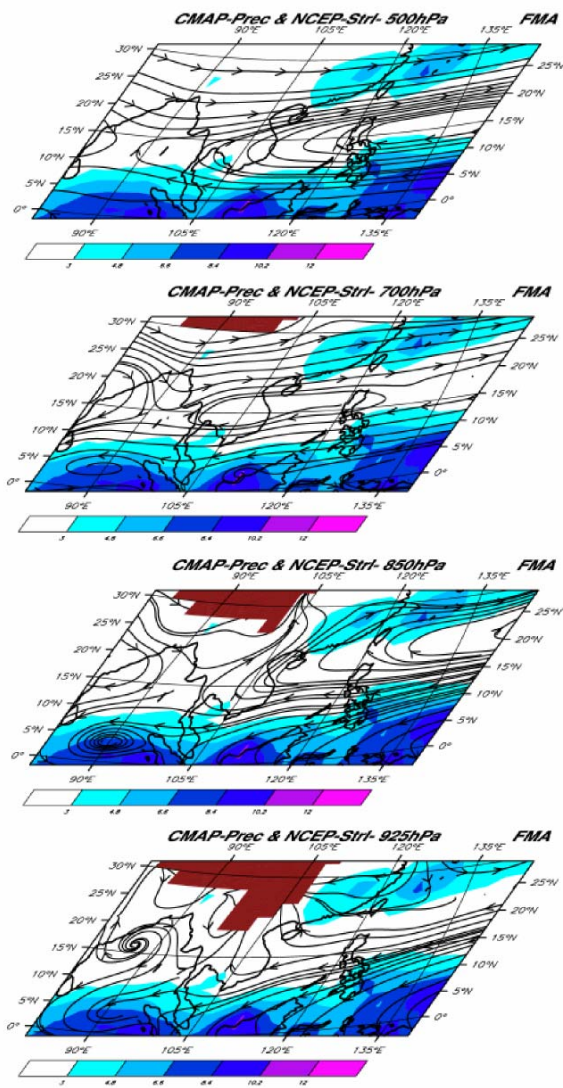
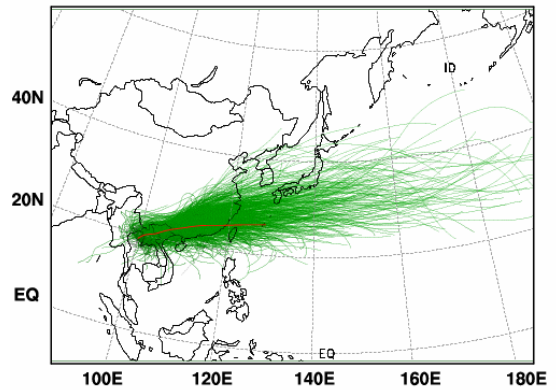


圖 4 1995~2004 年春季 (2~4 月) 平均氣流和降水場。由上至下分別為 500, 700, 850, 925 hPa 等壓面高度, 其中彩色部分為 CMAP 降水資料, 單位為 mm/day, 咖啡色部分為地形。

四、春季期間軌跡群集分析

在探討軌跡傳輸路徑和氣候條件關係之前, 本節先利用群集分析法對起源自中南半島地區之春季軌跡資料進行分類, 以了解軌跡傳輸路徑之定量特徵。由於生質燃燒氣膠溫度通常較環境大

NOAA HYSPLIT MODEL Forward trajectories
Source at 19.0N 100.0E 500m
FMA-1995~2004



Source at 12.5N 106.0E 500m
FMA-1995~2004

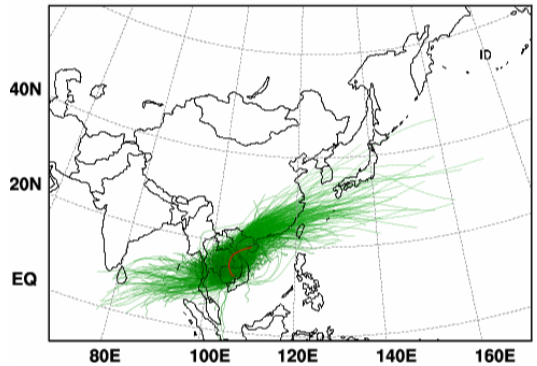


圖 5 泰國 (上圖) 和柬埔寨 (下圖) 境內 500 公尺高度起源之春季軌跡線群分佈。上述軌跡線群由 1995~2004 年春季期間 (2~4 月), 每日 06UTC 開始前推四日所有軌跡線所組成, 其中紅色實線代表軌跡群之平均軌跡 (centroid)。

氣溫度高, 加上春季期間中南半島位於華南鋒面前之暖區, 二條件皆有利於將氣膠在源地生成後, 即抬升至較高之高度, 因此本文選擇 500 公尺作為軌跡計算之初始高度。其他初始高度 (1000 公尺、1500 公尺、3000 公尺) 除傳輸速度較快外, 傳輸型態特徵皆極為相似, 為節省篇幅起見, 此處不予討論。以下分別就北越、泰國、和柬埔寨三個源區之軌跡群集特徵進行討論:

(一) 北越源區 (22°N, 106.5°E)

圖 6 為起源自北越源區之軌跡群集特徵，代表北越境內生質燃燒氣膠之可能傳輸型態。群集分析顯示，北支群集（綠色線）佔全體軌跡 16% 左右，傳輸速度最快、距離最遠、高度也最高，影響範圍包括中國華北、韓國和日本地區。由其平均軌跡（紅色粗實線）推估，污染物傳輸至中國華北上空約需 2 天時間，到達時之平均傳輸高度約 3000 公尺；傳輸至韓國、日本上空約需 3 天時間，到達時之平均傳輸高度約 5000 公尺。中支群集（藍色線）佔全體軌跡 64% 左右，傳輸距

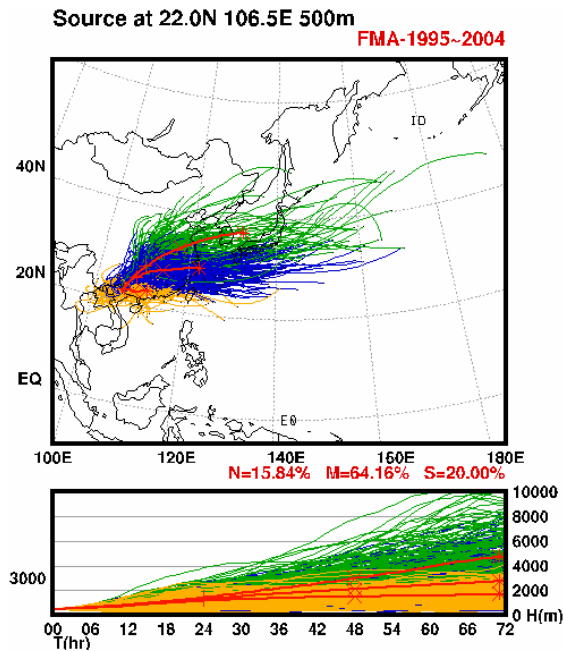


圖 6 北越源區 500 公尺高度起源，春季期間（2~4 月）每日 06UTC 開始前推三日之軌跡群集特徵。上圖顯示水平傳輸路徑，下圖顯示垂直傳輸路徑，橫軸代表時間（小時），縱軸代表高度（公尺）。圖中之「+」、「x」及「*」符號分別代表前推 24、48 及 72 小時後之位置；綠色線、藍色線及橘色線分別代表北支、中支和南支群集；紅色實線代表各群集之平均軌跡 (centroid)。

離和高度皆略遜於北支群集，影響範圍包括中國華中、華南、台灣北部和日本南方。由其平均軌跡（紅色粗實線）推估，傳輸至台灣上空約需 2~3 天時間，到達時之平均傳輸高度約 3000 公尺。南支群集（橘色線）佔全體軌跡 20% 左右，傳輸距離最短、高度最低，主要影響範圍大多集中在源區附近，對台灣中南部也有影響，其平均傳輸高度低於 2000 公尺。

(二) 泰國源區 (19°N, 100°E)

圖 7 為起源自泰國源區之軌跡群集特徵，代表泰國境內生質燃燒氣膠之可能傳輸型態。泰國源區軌跡群集特徵與北越源區相似，北支群集（綠色線）佔全體軌跡 15% 左右，傳輸速度最快、高度最高，主要影響範圍包括中國華中、華北、以及韓國、日本等地區。由其平均軌跡線（紅色實

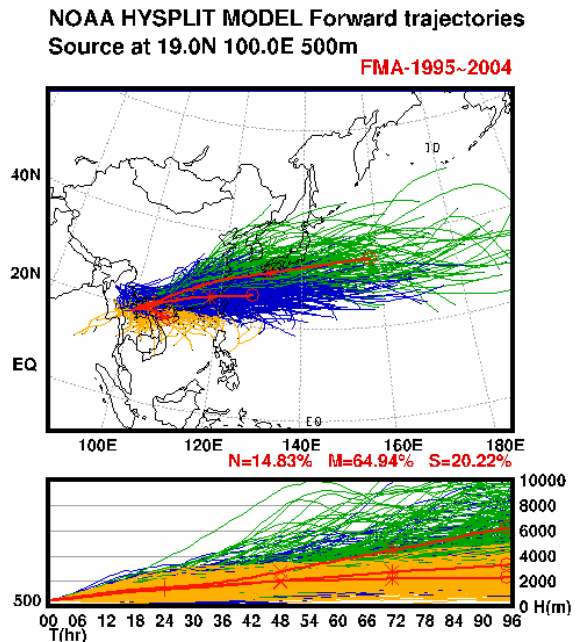


圖 7 同圖 6，但為泰國源區前推四日之軌跡群集特徵。圖中「o」符號為前推 96 小時後之位置。

線)推估, 污染物由泰國輸送至韓國、日本地區約需 3 天時間, 到達時之平均傳輸高度約 5000 公尺。中支群集(藍色線)佔全體軌跡 65%左右, 傳輸距離略短於北支群集, 主要影響範圍包括中國華中、華南、和日本南部及台灣地區。由其平均軌跡線(紅色實線)推估, 污染物由泰國輸送至台灣約需 3 天時間, 到達時之平均傳輸高度約 3000 公尺。南支群集(橘色線)佔全體軌跡 20%左右, 主要影響範圍集中在中南半島地區, 少部分可達台灣及菲律賓北部地區, 其平均傳輸高度在 2000 公尺以下。

(三) 柬埔寨源區 (12.5°N, 106°E)

圖 8 為起源自柬埔寨源區之軌跡群集特徵, 代表柬埔寨境內生質燃燒氣膠之可能傳輸型態。柬埔寨源區軌跡傳輸路徑與前兩者有顯著差異, 主因是該區位於東西風轉換交界處(見圖 4), 氣

流方向變動較大所致。群集分析顯示, 北支群集(綠色線)佔全體軌跡 13%左右, 主要往東北方傳輸, 影響範圍包括中國華南、韓國、日本及台灣北部等地區。由其平均軌跡推估, 污染物傳輸至台灣約需 3 天左右時間, 到達時之平均傳輸高度約 3000 公尺。中支群集(藍色線)佔全體軌跡 76%左右, 主要向北方傳輸, 影響範圍包括中國華南和中南半島北部等地區, 平均傳輸高度低於 2000 公尺。南支群集(橘色線)佔全體軌跡 76%左右, 主要向西方傳輸, 影響範圍包括孟加拉灣、印度洋和斯里蘭卡等地區, 對台灣毫無影響, 其平均傳輸高度低於 1000 公尺。

綜合上述結果可發現, 若單以軌跡分析來看, 春季期間起源自中南半島北部地區的污染物對亞洲地區衝擊最大, 大約 2~4 天左右時間, 其影響即可遍及東亞地區。對台灣地區而言, 雖然三個源區之污染物似乎都有機會傳輸至台灣上空, 但其中以泰國源區影響最大(因其軌跡通過台灣上空比例最高), 北越和柬埔寨源區次之。經由軌跡分析顯示, 污染物傳輸至台灣上空所需時間約 2~3 天左右, 平均傳輸高度在 2000~3000 公尺之間。目前中央大學和環保署合作在鹿林山(120°52'25"E; 23°28'07"N)設有大氣環境背景站, 其海拔高度 2862 公尺, 所處地理位置恰好位於中南半島春季污染物主要傳輸路徑上, 是收集東南亞生質燃燒氣膠絕佳的實驗基地。

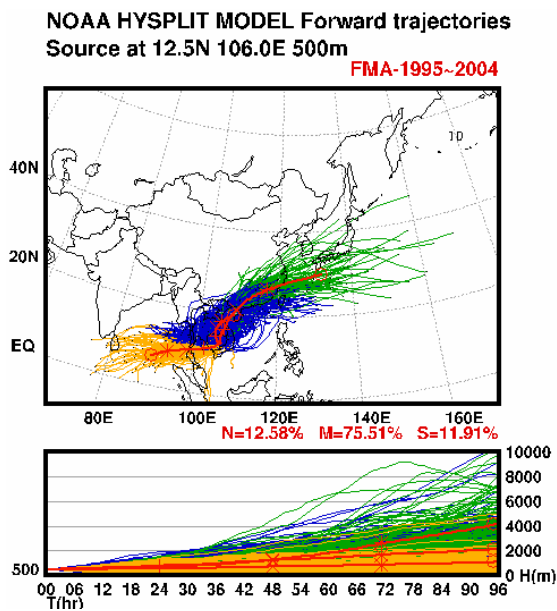


圖 8 同圖 7, 但為柬埔寨源區前推四日之軌跡群集特徵。

五、氣候條件之影響

由於軌跡傳輸型態主要受到環境氣流所影響, 而環境氣流又往往受到氣候條件變化而改變, 本節將透過分析 1981~2000 年中低對流層大氣資料, 以了解起源自中南半島地區軌跡傳輸路徑和氣候條件關係。由於柬埔寨源區軌跡資料在

分析過程中並未通過統計檢定，此處將僅就北越與泰國源區分析結果進行討論。

圖 9 顯示北越和泰國源區 1981~2000 年間各群集累積百分比逐年變化。北越和泰國源區除了少數幾年外（如：1990、1995），大致上有相似的年際變化趨勢，亦即在北支群集所佔比例增加（減少）年份，南支群集比例同時減少（增加）；另一方面，中支群集所佔比例則相對較為穩定。這種

南北支群集負相關特性顯示，軌跡輸送路徑有南北震盪現象，例如 1983、1987、1992、1998 等年，整體軌跡傳輸路徑有偏北趨勢，使得北支群集比例增加，而南支群集比例相對減少。我們預期在這些年份，起源自中南半島地區的生質燃燒氣膠，對中緯度地區的影響可能將更為顯著。

由於上述年份皆屬於氣候上所認定之強聖嬰年（見表一，1995 雖然也是聖嬰年，但其強度較

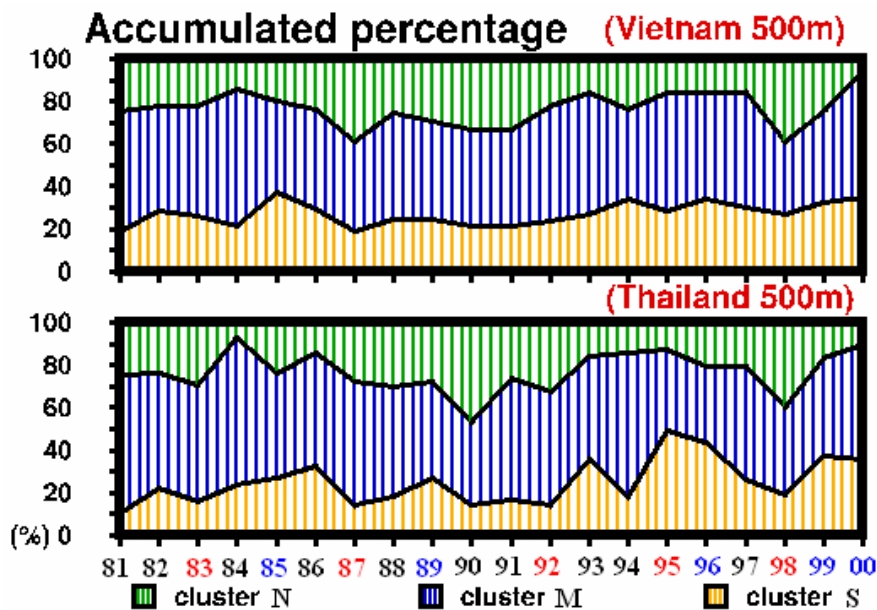


圖 9 北越（上圖）和泰國（下圖）源區各分群集比例逐年變化趨勢。圖中橫軸代表年份，縱軸代表各群集所佔的百分比，其中綠色、藍色、黃色區塊分別代表北支、中支、南支群集所佔的比例。圖下方年份標示紅色者代表該年為聖嬰年，標示藍色者代表該年為反聖嬰年。

表一 1981~2000 年間被判定為聖嬰或反聖嬰之年份。依 Trenberth (1997) 定義，連續六個月 NINO3.4 指數高於 0.4 定義為聖嬰年；連續六個月 NINO3.4 指數低於 -0.4 定義為反聖嬰年。其中連續六個月 NINO3.4 指數高於 1.0 定義為強聖嬰年（打*號者）；連續六個月 NINO3.4 指數低於 -1.0 定義為強反聖嬰年（打*號者）。

聖 嬰 年	1982/83 *、1986/87 *、1991/92 *、1994/95、1997/98 *
反 聖 嬰 年	1984/85、1988/89 *、1995/96、1998/99 *、1999/2000 *

弱)，我們推測軌跡傳輸路徑南北震盪現象可能和聖嬰／反聖嬰交替出現有關。表二列出北越和泰國二源區各群集和 NINO3.4 指數之相關係數，北支群集和 NINO3.4 指數呈現正相關（北越源區為 0.39、泰國源區為 0.466）；反之，南支群集和 NINO3.4 指數呈現負相關（北越源區為-0.451、泰國源區為-0.440）。上述相關性雖通過統計檢定 (t-test, $\alpha=0.05$)，但相關係數並非特別高，顯示軌跡傳輸路徑南北震盪除了和聖嬰事件有關外，也不能排除其他因素。但由於篇幅所限，本文將僅針對聖嬰／反聖嬰事件對軌跡傳輸路徑影響進行討論。

我們從圖 9 也發現，反聖嬰年對軌跡傳輸路徑影響似乎不如聖嬰年來得明顯，因此表 2 中顯示之相關性主要應源自於聖嬰年貢獻。為釐清此差異，圖 10 分析聖嬰／反聖嬰年春季距平環流 (anomalous circulation) 分佈。在聖嬰年春季（上圖），菲律賓東方海面產生一反氣旋式距平環流，此距平環流明顯加強了從中南半島開始，經過台灣到達日本南方之西南風（大多通過統計檢定），產生有利於軌跡傳輸路徑偏北之趨勢。反之，在反聖嬰年春季（下圖），雖然菲律賓上方產生氣旋式距平環流，但此環流在中南半島所引發之東北

表二 北越和泰國源區各群集比例和 NINO3.4 指數間之相關係數（僅列出通過 t-test $\alpha=0.05$ 統計檢驗者），括號中數值代表各群集軌跡所佔之平均百分比。

源區 \ 群集	北支群集	中支群集	南支群集
北越源區	0.390 (15.8%)	Null (64.2%)	-0.451 (20%)
泰國源區	0.466 (14.8%)	Null (65.0%)	-0.440 (20.2%)

NCEP-SST & WNDVEC- 850hPa
El Niño(+1) Composite

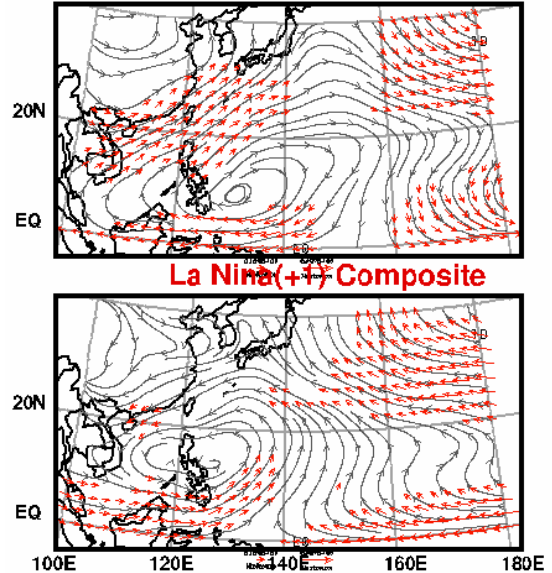


圖 10 聖嬰年（上圖）和反聖嬰年（下圖）亞太地區距平環流分佈。其中風向量（紅色箭頭）僅畫出通過統計檢定 (t-test, $\alpha=0.05$) 之部分。

風距平並不顯著（大多未通過統計檢定），對軌跡傳輸路徑影響較不顯著，此結果可解釋為何聖嬰年對軌跡傳輸路徑影響程度遠超過反聖嬰年。

六、總結與討論

東南亞地區是世界上著名的生質燃燒活躍區之一，中南半島更是亞洲最主要的生質氣膠源地。每年春季（2~4月），是中南半島生質燃燒最旺盛的季節，期間所產生的大量氣膠對下游地區的能見度、空氣品質、甚至於氣候都有顯著之影響。儘管生質氣膠對於區域環境已帶來不小衝擊，但目前仍缺乏完整而長期的東南亞軌跡傳輸分析，本文嘗試透過 HYSPLIT 軌跡模式所計算出的大量軌跡資料，配合 NCEP / NCAR 大氣資料，探討東南亞生質燃燒氣膠之可能傳輸路徑以及可能之氣候影響。

經由軌跡群集分析可知，春季起源自中南半島北部地區（以北越和泰國源區為代表）軌跡傳輸路徑較為單純，大多往東北或東輸送。其中北支群集往東北傳輸，因所處緯度較高，傳輸距離最遠，影響範圍包括中國華北、東北、和日、韓等地；中支群集所佔比例最高（>60%），主要往東傳輸，影響範圍包括中國華中、華南、和台灣等地；南支群集傳輸方向多變，傳輸距離短，影響範圍大多侷限在中南半島附近。

春季起源自中南半島南部（以柬埔寨源區為代表）軌跡傳輸路徑顯然較為分歧，其中北支群集傳輸方向偏東北，影響範圍包括中國華南、和台灣、日、韓等地；中支群集所佔比例最高（>75%），其傳輸方向偏北，影響範圍在中南半島北部附近；南支群集傳輸方向偏西，沿著東風帶往西傳輸至北印度洋，對陸地影響較小。背景氣流場分析顯示，上述軌跡傳輸差異主要受到大範圍氣流所影響，也會隨氣候條件變化而改變。

當我們進一步檢視各群集比例年際變化時發現，北越和泰國源區之軌跡傳輸路徑有顯著南北震盪現象，在強聖嬰年春季（如：1983, 1987, 1992, 1998），軌跡傳輸路徑有明顯偏北趨勢；但在反聖嬰年春季（如：1985, 1989, 1996, 1999, 2000），軌跡傳輸路徑雖有部分偏南趨勢，但改變似乎不如聖嬰年顯著。透過分析聖嬰／反聖嬰年大氣距平環流發現，聖嬰年在菲律賓東方海面出現反氣旋式距平環流，為中南半島和東亞地區帶來顯著之西南風距平，使得軌跡傳輸路徑產生偏北之趨勢。反聖嬰年雖在菲律賓產生氣旋式距平環流，但在中南半島和東亞地區所引發之東北風距平並不顯著，因此對軌跡傳輸路徑影響不如聖嬰年明顯。

雖然在聖嬰年春季，透過菲律賓東方海面所產生之反氣旋式距平環流，對東南亞污染物軌跡傳送可產生偏北之影響，但仍有不完全一致之處（參見圖9）。例如：1990年並非聖嬰年，但泰國源區北支群集比例最高；1995年為弱聖嬰年，但此時泰國源區南支群集比例最高。上述差異顯示，除了聖嬰年春季所產生距平環流外，仍存在其他影響軌跡傳送方向之因素，這些因素可能包含：局部環流（造成北越和泰國源區差異）、熱帶季內震盪、季風環流等，需要未來近一步的分析。

本文之軌跡分析雖然在定性上可推估春季起源自中南半島地區污染物可能傳輸路徑，但在定量上並不能代表實際污染物輸送量分佈，因為氣膠在輸送過程中常因重力（乾沉降）或降水（濕沉降）而被清除，其中又濕沉降過程對氣膠清除效率最高。東亞地區於春季期間常有鋒面系統通過，傳輸至該區之氣膠可能有部分會被清除，因此雖然軌跡分析顯示，春季起源自中南半島的污染物有相當大機率會傳輸至東亞地區，但若考慮降水影響（濕沉降），對東亞地區影響程度可能仍遠不如對源區附近的影響。

本研究也發現，台灣位於春季中南半島污染物主要傳輸路徑上，從源區傳輸至台灣上空僅需2~3天左右，平均傳輸高度在2000~3000公尺間。雖然對台灣地區地面空氣品質影響不大，但仍可能透過吸收短波輻射（直接效應）或增加凝結核數量（間接效應），改變區域氣候型態（如：雲量、溫度、降水等），其影響仍不容忽視。此外，中央大學鹿林山測站所處位置和高度正好位於中南半島污染物主要傳輸範圍裡，是研究氣膠-雲-氣候交互作用最佳的實驗基地，其學術價值應受到更多的重視。

致 謝

本研究由國科會計畫 NSC96-2111-M-034-001、NSC96-2745-M-008-005 和 環 保 署 計 劃 EPA-96-FA11-03-A166 共同支助所完成。作者非常感謝二位審查委員所提供寶貴意見，使本文內容得以更為完善；作者也感謝美國 NOAA Air Resources Laboratory 提供 HYSPLIT 軌跡模式之線上計算功能，使得本研究得以順利進行。

參考文獻

- 余嘉裕、卓盈旻、涂建翊，2002：東亞沙塵暴的時空特徵分析，中華民國環境保護學會學刊，25-2, 178-198。
- 黃希爾，2004：東亞生質燃燒對台灣高山氣膠特性的影響。國立中央大學環境工程所碩士論文。
- 林宗嵩、余嘉裕，2005：1995年3月12日台灣北部黃雨個案分析。大氣科學，33, 143-160。
- Akimoto, H., 2003: Global air quality and pollution, *Science*, 302, 1716-1719.
- Anderberg M. R., 1973: *Cluster Analysis for Applications*. Academic Press, 359 pp.
- Bey, I., D. J. Jacob, J. A. Logan, and R. M. Yantosca, 2001b: Asian chemical outflow to the Pacific in spring: Origins pathways, and budgets. *Journal of geophysical research*, 106, 97-114.
- Chan, C.Y., and coauthors, 2003: Characteristics of biomass burning emission sources, transport, and chemical speciation in enhanced springtime tropospheric ozone profile over Hong Kong, *J. Geophys. Res.*, 108, doi:10.1029/2001JD001555.
- Chang, S. C., and C. T. Lee, 2007: Secondary aerosol formation through photochemical reactions estimated by using air quality monitoring data in Taipei City from 1994 to 2003. *Atmospheric Environment*, 41, 4002-4017.
- Chung, Y. S., 1992: On the observations of yellow sand (dust storms) in Korea. *Atmos. Env.*, 26, 2743-2749.
- Dickerson, R. R., and coauthors, 1997: The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog. *Science*, 278, 827-830.
- Dorling, S. R., T. D. Davies, and C. E. Pierce, 1992: Cluster Analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry-Method and applications. *Atmos. Environ.* 26, 2575-2581.
- Draxler, R. R., 1992: Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectories (HYSPLIT): Version 3.0 User's guide and model description. *NOAA Tech. Memo. ERL ARL-195*, 26pp.
- , 1996: Trajectory optimization for balloon flight planning. *Weather and Forecasting*, 11, 111-114.
- , and G. D. Hess, 1998: An overview of the HYSPLIT4 modeling system for trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, 47, 295-308.
- Everitt B., 1980: *Cluster Analysis*. Halstead, 136 pp.
- Fan, X.B., and coauthors, 1996: Mineral particles collected in China and Japan during the same Asian dust-storm event. *Atmos. Env.*, 30, 347-351.
- Jorba Q., and coauthors. 2004: Cluster Analysis of 4-Day Back Trajectories Arriving in the

- Barcelona Area, Spain, from 1997 to 2002. *J. of Applied Meteor.*, 43, 887-901.
- Kalnay, E., and coauthors, 1996: The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 77, 437-471.
- Kotamarthi, V.R. and G. R. Carmichael, 1993: A modeling study of the long range transport of Kosa using particle trajectory analysis. *Tellus*, 45, 426-441.
- Liao, H. and J. H. Seinfeld, 1997: Effect of clouds on direct aerosol radiative forcing of climate. *J. Aerosol Sci.*, 28, 425-426.
- Liu, H., and coauthors, 2003: Transport pathways for Asian pollution outflow over the Pacific: Interannual and seasonal variations. *J. Geophys. Res.*, 108, 8786, doi:10.1029/2002JD003102.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, A. P. Mitra, and D. Sikka, 2002: The Indian Ocean Experiment and the Asian Brown Cloud. *Science*, 83, 947-955.
- Seinfeld, J. H. and Coauthors, 2004: ACE-ASIA: Regional Climatic and Atmospheric Chemical Effects of Asian Dust and Pollution. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85, 367-380.
- Stohl, A., 2001: A 1-year Lagrangian "climatology" of airstreams in the Northern Hemisphere troposphere and lowermost stratosphere, *J. Geophys. Res.*, 106, 7263-7279
- Streets, D. G., K. F. Yarber, J. H. Woo, and G. R. Carmichael, 2003: Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions, *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 1099, doi:10.1029/2003GB002040.
- Trenberth, K. E., 1997: The definition of El Nino. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2771-2777.
- Xie, P. and P. A. Arkin, 1996: Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *J. Climate*, 9, 840-858.
- , and -----, 1997: Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observation , satellite estimates and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2539-2558
- Yu, J. Y., Y. W. Wang, and C. W. Chang, 2009: Asian dust activity during 1995~2006: A climatological analysis. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* (revised)

A Cluster Analysis of the Springtime Forward Trajectories Arising from Southeast Asia and the Climate Influence

Jia-Yuh Yu¹ Neng-Huei Lin² Ho-Hsiu Hsieh¹ Tsung-Sung Lin³

¹**Department of Atmospheric Sciences, Chinese Culture University**

²**Department of Atmospheric Sciences, National Central University**

³**Department of Environment and Property Management, Jin Wen University of Technology**

(Manuscript received 30 March 2008; in final form 3 December 2008)

ABSTRACT

Southeast Asia has long been recognized as the most important source area of biomass burning aerosols. Each spring, a large amount of soot aerosols are released to the atmosphere that might impact the regional air quality and is capable of altering the climate pattern through changing the atmospheric radiation balance. In this study, the forward trajectories derived from the NOAA HYSPLIT model are used to analyze the probable transport paths of biomass aerosols arising from the Indo-China Peninsula. The NCEP/NCAR atmospheric data is also employed to examine the possible climate influence on the transport paths.

Our results show that trajectories released from the northern part of Indo-China Peninsula are capable of affecting almost the entire East Asia. On the other hand, trajectories released from the southern part of Indo-China Peninsula are likely to impose influence at a regional scale. We also found that paths of trajectories which are released from the northern Indo-China Peninsula tend to shift northward during strong El Nino years. The existence of an anomalous anti-cyclonic circulation to the east of Philippine is shown to be responsible for such change.

Key words: Biomass aerosol, Cluster analysis, Forward trajectory

