

估算TRACE-P實驗期間亞洲生質燃燒氣膠的輻射驅動力與區域反饋作用

Estimate of radiative forcing and regional feedback of Asian biomass burning aerosols during the period of TRACE-P

王聖翔¹ 林能暉¹ 周明達²
國立中央大學大氣物理研究所¹ 國立台灣大學大氣系²

摘要

本研究主要目的為估算 2001 年 3 月 TRACE-P (TRANSPORT and Chemical Evolution over the Pacific) 實驗期間，亞洲生質燃燒氣膠的輻射衝擊。吾人結合中尺度氣象模式 MM5、大氣傳送模式 HYSPLIT 和太陽輻射傳送模式 CLIRAD-SW，模擬生質燃燒所排放的黑碳(Black Carbon, BC)和有機碳(Organic Carbon, OC)氣膠之空間分布特性，進一步模擬其所造成的直接輻射驅動力(direct radiative forcing)和測試其對氣象場的反饋作用。結果顯示，南亞地區(70°–110°E, 5°–30°N)的生質燃燒氣膠月平均濃度為 1.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ ，最大值為 14.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ ，發生在緬甸西部。生質燃燒氣膠光學厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)最大值出現在緬甸西岸達 0.14。在晴天空的情況下，生質燃燒氣膠所造成的月平均大氣層頂輻射驅動力介於-1.81(海洋上)–1.08(陸地上) W m^{-2} 之間，地表輻射驅動力介於-0.04–-9.48 W m^{-2} 之間。全天空的情況下，生質燃燒氣膠所造成的月平均的大氣層頂輻射驅動力介於-1.65(海洋上)–1.42(陸地上) W m^{-2} 之間，地表輻射驅動力介於-0.03–-9.06 W m^{-2} 之間。比較晴天空和全天空的結果顯示，雲的存在有助於增加大氣層頂和地表之輻射驅動力。經由模擬生質燃燒氣膠地表直接輻射驅動力對氣象場的反饋作用測試，顯示排放源區附近地表溫度降溫可達 2 $^{\circ}\text{C month}^{-1}$ ，然而，但目前仍然缺乏一個完整且具雙向反饋機制之模式，以探討大氣中動力與熱動力過程將如何改變，及其對區域氣象場之衝擊，此可做為未來工作重點。地表輻射量的改變將造成氣象場在空間上重新分布，海平面氣壓場有-2.5–0.5 hPa month^{-1} 的變異，月平均雲量分布有 $\pm 20\%$ 的變異，月累積雨量達 ± 500 mm的變異，凸顯生質燃燒氣膠對於區域氣候變遷有不可忽視之影響。

一、前言

大氣氣膠的來源可分為人為和自然源氣膠，人為源包括工業、交通、生質燃燒(biomass burning)、生物性燃料(biofuel burning)所排放的氣膠，而自然源主要來自於火山和沙塵的排放。大氣氣膠除了造成區域空氣品質及環境的衝擊，其所造成的直接與間接輻射效應，不但對區域輻射平衡有一定的干擾，更對區域氣候有影響。科學家經常利用全球氣候模式(Global Climate Model, GCM)研究氣膠對於全球輻射收支與長期氣候的衝擊影響，然而一般的 GCM 在處理氣膠的時候比較簡化，通常結果會趨向低估大氣對太陽能量的吸收，特別是生質燃燒活躍的地區(Wild, 1999, 2005a)。

生質燃燒氣膠對全球輻射收支相當重要(Crutzen and Andreae, 1990; Penner et al., 1992)。但是，定量生質燃燒所造成的輻射影響相當困難，由於排放源推估、化學成分、微物理特性和其光學特性的不確定性，而若與雲發生反應，期間的問題又更加複雜了。另外生質燃燒氣膠的短生命週期(大約 5 天)與具有很大的空

間和時間分布之特性，對於區域環境可能有更顯著的影響(Ramanathan et al., 2001b)。因此便有幾個大型的觀測實驗如 SAFARI (Andreae et al., 1996) 和 INDOEX (Ramanathan et al., 2001a) 針對區域生質燃燒的特性與其氣候的影響深入探討。由這些觀測實驗的觀測或模擬的結果皆顯示，生質燃燒具有區域性的特性，其所造成的區域輻射影響遠大於全球估算之平均值-0.2 W m^{-2} (IPCC, 2001)，可達 10 倍到 100 倍以上，例如 Myhre et al. (2003) 根據觀測的生質燃燒氣膠特性，估算 SAFARI-2000 期間生質燃燒氣膠造成的輻射驅動力(radiative forcing)最高可達-50 W m^{-2} ，而 2000 年 9 月平均晴天空直接輻射驅動力(clear-sky direct radiative forcing)為-4.3 W m^{-2} 。在亞洲，因為複雜的排放源(包含工業污染、沙塵、生物燃料及生質燃燒)，以至於單獨定量生質燃燒的影響相當困難。Ramanathan et al. (2001a) 估算 INDOEX 實驗期間，在北印度洋地區的自然和人為源所造成的晴天空下直接輻射趨動力為-7 \pm 1 W m^{-2} 。

本篇研究嘗試結合中尺度氣象模式、大氣傳送模式和一個高解析度的輻射傳送模式，估算 2001 年 3 月 TRACE-P 實驗期間亞洲生質燃燒氣膠之空間分布特性與輻射衝擊，進一步估算其對氣象場的反饋作用。結合一組詳細排放源和氣膠光學特性資料，模擬生質燃燒氣膠的濃度、光學特性、輻射驅動力和大氣加熱率分布，進行以下研究目的探討：

- 了解亞洲生質燃燒季節之氣膠空間分布特性及造成長程輸送之氣象條件。
- 定量估算亞洲生質燃燒氣膠對區域大氣輻射收支的影響。
- 探討生質燃燒對於氣象場的反饋作用。

二、研究方法

吾人建立一套中尺度模擬系統，結合中尺度氣象模式 MMS、區域大氣傳送模式 USA/NOAA HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Transport model, Draxler and Rolph (2003)) 和一個高解析度的輻射傳送模式 CLIRAD-SW (Chou and Suarez, 1999)，估算 2001 年 3 月 TRACE-P 實驗期間亞洲地區的生質燃燒氣膠對區域環境與輻射之衝擊，做為未來探討區域氣候與輻射收支之基礎研究，並探討如何將改變的輻射場反饋回氣象場上面。研究方法細節請參考王，2007。

三、結果與討論

本節針對模擬的亞洲生質燃燒氣膠濃度、光學厚度和輻射驅動力量場進行討論。

圖 1 為模擬在 10、1000、2000、3000、4000 和 5000 m 六層的生質燃燒氣膠月平均濃度場和風場分布情形。模擬結果顯示，近地面濃度分布或高濃度值皆發生在排放源區附近，主要為中南半島、印度和中國南方，最大值出現在緬甸西方(93E°, 23°N)達 14.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ ，在南亞地區月平均濃度值為 1.2 $\mu\text{g m}^{-3}$ 標準偏差為 5.5 $\mu\text{g m}^{-3}$ 。此季節地面生質燃燒氣膠的傳送，在東亞地區主要受到東北季風影響，中國沿岸的生質燃燒氣膠之排放有對台灣有直接的影響。而南亞地區的生質燃燒受孟加拉灣的反氣旋環流影響，造成向孟加拉灣傳送，最南可達印度洋，或向印度內陸傳送。在 1000 m 的高度，濃度分布跟地面相當接近，唯有高濃度值明顯降低。在 1000 m 以上，濃度因垂直傳送而逐漸稀釋，到 5000 m 以上幾乎都降到 1.0 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以下。2000 m 以上之高空，在北緯 20-30 度之間為明顯的轉為西風帶，此西風帶之風速較強，有利於生質燃燒的高層傳送。圖 1 顯示生質燃燒氣膠之分布高度主要在 3000 m 以下。另外吾人發現，在 1000-2000 m 這兩層的風場，臺灣上空的平均風場有明顯的改變，由東北風轉向西風，西風有利於中南半島之生質燃燒氣膠向東傳送，這也說明了台灣的地理位置特殊，低層和高層所受的生質燃燒影響來源是不相同的。

圖 2 為模擬 2001 年 3 月在 550 nm 波段的平均生質燃燒氣膠光學厚度(AOD)空間分布特性，結果顯示

其空間分布特性與氣膠濃度分布相似，高AOD皆發生在排放源附近，且可以看出煙流向下風處如孟加拉灣和中國南方傳送之特性，估算南亞地區(70° - 110°E, 5° - 30°N)平均AOD為 0.020，標準偏差為 0.052，最大值 0.14 位於緬甸西岸(95E°, 20°N)，不同於地面高濃度的位置(93E°, 23°N)，第二高值在東印度約為 0.10。

圖 3 顯示模擬 2001 年 3 月，生質燃燒氣膠所造成的晴空天下月平均之大氣層頂(TOA)、大氣(ATM)和地表(SFC)輻射驅動。其空間分布特性和月平均氣膠光學厚度場相近，最大值也是位於排放源區附近。大氣層頂的輻射驅動力(ΔF_{TOA})在大部分的南亞地區陸地和海洋分別呈現正值和負值，值介於 1.08 (95E°, 20°N)到 -1.81 W m^{-2} (93E°, 23°N)之間，平均值為 -0.13 W m^{-2} ，代表陸地上為增溫效應而海洋上為冷卻效應，此結果和地表反照率與氣膠光學特性有關，在 Collins et al. (2002)亦有提到此現象。在地表的輻射驅動分布情形(ΔF_{SFC})，整個模擬範圍呈現負值，在南亞地區數值分布從 -0.04 - -9.48 W m^{-2} ，平均值為 -1.46 (± 1.62) W m^{-2} 。一般來說，生質燃燒氣膠對於在地表的輻射驅動大於 TOA 輻射驅動。

表 1 進一步統整晴空天下和全天空下的輻射驅動力量結果。在全天空下，OC、BC 和 IOC+BC 氣膠的 ΔF_{TOA} 平均值分別為 -0.32、0.32 和 0.01 W m^{-2} ，相較於晴空天下下的 -0.41、0.27 和 -0.13 W m^{-2} ，此結果說明了在有雲存在的條件下，會減弱 OC 氣膠的降溫效應，加強 BC 氣膠的增溫效應，此現象與雲的高反射特性有關。

圖 4 為在全天空的情況下大氣加熱率改變量(ΔQ)的空間分布情形，其分布特性和大氣中的輻射驅動力(ΔF_{ATM}) 有關，Liou (2002)提到氣膠對於太陽輻射的吸收作用之所以重要，乃因為其會造成大氣的加熱。由圖 8(a)發現，大氣加熱率改變量最大值出現在緬甸西部，可以達 0.2 $^{\circ}\text{C day}^{-1}$ ，整個南亞地區皆在 0.01 $^{\circ}\text{C day}^{-1}$ 以上。圖 8(b)為沿著北緯 20 度的垂直剖面圖，由圖可知，在印度 (~80E) 和緬甸 (~95E) 的低層大氣有較強的 ΔQ (>0.1 $^{\circ}\text{C day}^{-1}$)，相反地，在孟加拉灣上空存在著比較微弱的 ΔQ ，大氣加熱率的改變量主要來自於 BC 氣膠貢獻，尤其在陸地上，這是因為 BC 氣膠具有很強的吸收能力，而陸地具有較高的地表反照率，反射太陽輻射回到大氣與太空，因此 BC 氣膠可以多次吸收太陽輻射並加熱大氣。吾人認為，生質燃燒氣膠所造成在低層大氣的海陸加熱率改變量的差異，有可能會引發或改變局部環流，需要進一步研究確定。

吾人建立一個簡化的單向反饋機制，作為生質燃燒氣膠對於氣象場反饋作用之敏感度研究(王，2007)。結果顯示，生質燃燒氣膠地表直接輻射驅動所造成的氣象場反饋作用，將造成氣象場在空間上重新分布，近地表溫度降溫可達 2 $^{\circ}\text{C month}^{-1}$ ，海平面氣壓場有 -2.5 - 0.5 hPa month^{-1} 的變異，月平均雲量分布有 $\pm 20\%$ 的變異，月累積雨量達 ± 500 mm 的變異(圖 5)，凸顯生質燃燒氣膠對於區域氣候變遷有不可忽視之影響。然而，目前仍然缺乏一個完整且具雙向反饋機制之模式，探討在完整氣象反饋作用影響下，大氣中動力與熱動力過程將如何改變，及其對區域氣象場之衝擊，此部份未來將是一個具有挑戰性的研究課題。

四、結論

吾人結合中尺度氣象模式(MM5)、大氣傳送模式(HYSPLIT)和一個高解析度的輻射傳送模式(CLRAD-SW)，進行2001年3月TRACE-P實驗期間，亞洲生質燃燒氣膠(BC和OC氣膠)對區域大氣輻射之衝擊及對氣象場的反饋作用之測試研究，定量估算其直接輻射驅動力。主要研究成果如下：

- 生質燃燒氣膠的月平均濃度分布呈現從地表到1000 m處為均勻混合，南亞地區濃度介於1.0-14.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ ，平均濃度值為1.2 g m^{-3} ，2000 m以上受西風帶影響向東傳送。
- 本研究模擬之生質燃燒氣膠光學厚度(AOD)的空間分布特性與衛星觀測有不錯的吻合，相關性達0.57。模擬結果顯示最大值出現在緬甸西岸達0.14，其中BC氣膠對於AOD的貢獻相對於OC氣膠顯著，尤其在排放源區附近。
- 本研究針對TRACE-P期間所估算的南亞地區的輻射衝擊，在晴天空的情況下，生質燃燒氣膠所造成的月平均大氣層頂輻射驅動力介於-1.81(海洋上)-1.08(陸地上) W m^{-2} 之間，地表輻射驅動力介於-0.04- -9.48 W m^{-2} 之間。全天空的情況下，生質燃燒氣膠所造成的月平均大氣層頂輻射驅動力介於-1.65(海洋上)-1.42(陸地上) W m^{-2} 之間，地表輻射驅動力介於-0.03- -9.06 W m^{-2} 之間，大氣加熱率的改變量最大可達6 $^{\circ}\text{C month}^{-1}$ 。
- 在全天空的條件下，生質燃燒氣膠所造成的大氣層頂和地表直接輻射驅動力相較於晴天空下有正的增加，顯示雲的存在有助於增溫效應，同時造成減緩地表冷卻效應。
- 模擬生質燃燒氣膠地表直接輻射驅動力對氣象場的反饋作用測試，地表輻射量的改變將造成氣象場在空間上重新分布，顯示排放源區附近地表溫度降溫可達2 $^{\circ}\text{C month}^{-1}$ ，海平面氣壓場有-2.5-0.5 hPa month^{-1} 的變異，月平均雲量分布有 $\pm 20\%$ 的變異，月累積雨量達 ± 500 mm的變異，凸顯生質燃燒氣膠對於區域氣候變遷有不可忽視之影響。

五、參考文獻

Andreae, M. O., J. Fishman, and J. Lindesay (1996), The Southern Tropical Atlantic Region Experiment (STARE): Transport and Atmospheric Chemistry near the Equator-Atlantic (TRACE A) and South African Fire-Atmosphere Research (SAFARI): An introduction, *J. Geophys. Res.*, 101, 23,519-23,520.

- Crutzen, P. J., and M. O. Andreae (1990), Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, *Science*, 250, 1,669-1,678.
- Chou, M. D., and M. J. Suarez (1999), A shortwave radiation parameterization for atmospheric studies, Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, 15, NASA/TM-1999-104606. pp40.
- Draxler, R. R., and G. Rolph (2003), HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model, Air Resour. Lab., Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Silver Spring, Md. (Available at <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001), Climate Change 2001, The Scientific Basis, Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. T. Houghton et al., Cambridge Univ. Press, New York.
- Myhre, G., T. K. Berntsen, J. M. Haywood, J. K. Sundet, B. N. Holben, M. Johnsrud, and F. Stordal (2003), Modeling the solar radiative impact of aerosols from biomass burning during the Southern African Regional Science Initiative (SAFARI-2000) experiment, *J. Geophys. Res.*, 108(D13), 8501, doi:10.1029/2002JD002313.
- Penner, J. E., R. E. Dickinson, and C. A. O'Neill (1992), Effects of aerosol from biomass burning on the global radiation budget, *Science*, 256, 1,432-1,434.
- Ramanathan, V., et al. (2001a), Indian Ocean Experiment (INDOEX): An integrated assessment of the climate forcing and effects of great Indo-Asian haze, *J. Geophys. Res.*, 106, 28,371-28,289.
- Ramanathan, V., P. J. Crutzen, J. T. Kiehl, and D. Rosefeld (2001b), Aerosol, Climate, and Hydrological Cycle. *Science*, 294, 2,119-2,124.
- Wild, M. (1999), Discrepancies between model-calculated and observed shortwave atmospheric absorption in areas with high aerosol loadings, *J. Geophys. Res.*, 104(D22), 27,361-27,372.
- Wild, M. (2005a), Solar radiation budgets in atmospheric model intercomparisons from a surface perspective, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L07704, doi:10.1029/2005GL022421.
- 王聖翔，2007：亞洲生質燃燒氣膠對區域大氣輻射之衝擊及對氣象場的反饋作用，中央大學大氣物理研究所，博士論文。

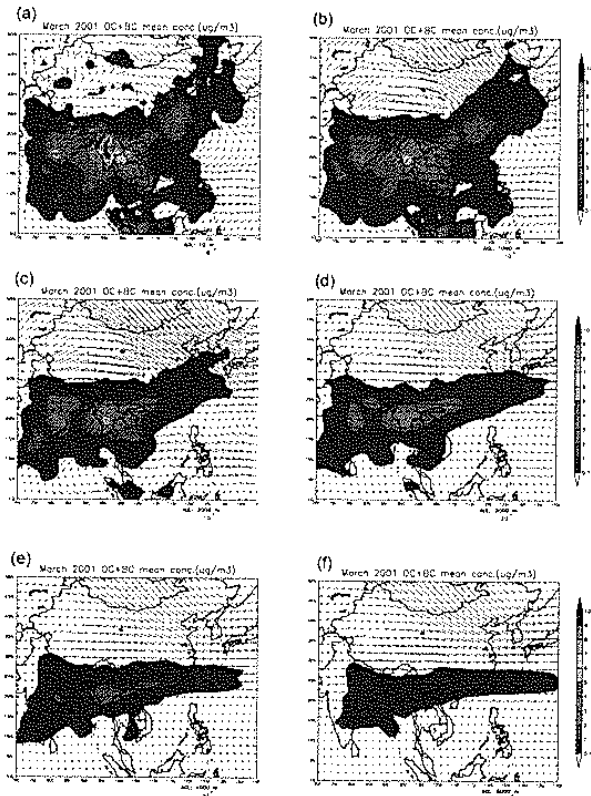


圖 1 模擬 2001 年 3 月生質燃燒氣膠(BC+OC)之月平均濃度與風場分布情形(Unit: $\mu\text{g m}^{-3}$)。

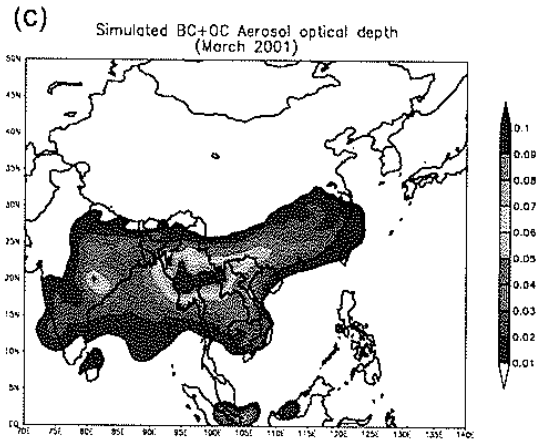


圖 2 BC+OC 氣膠所造成的 AOD。

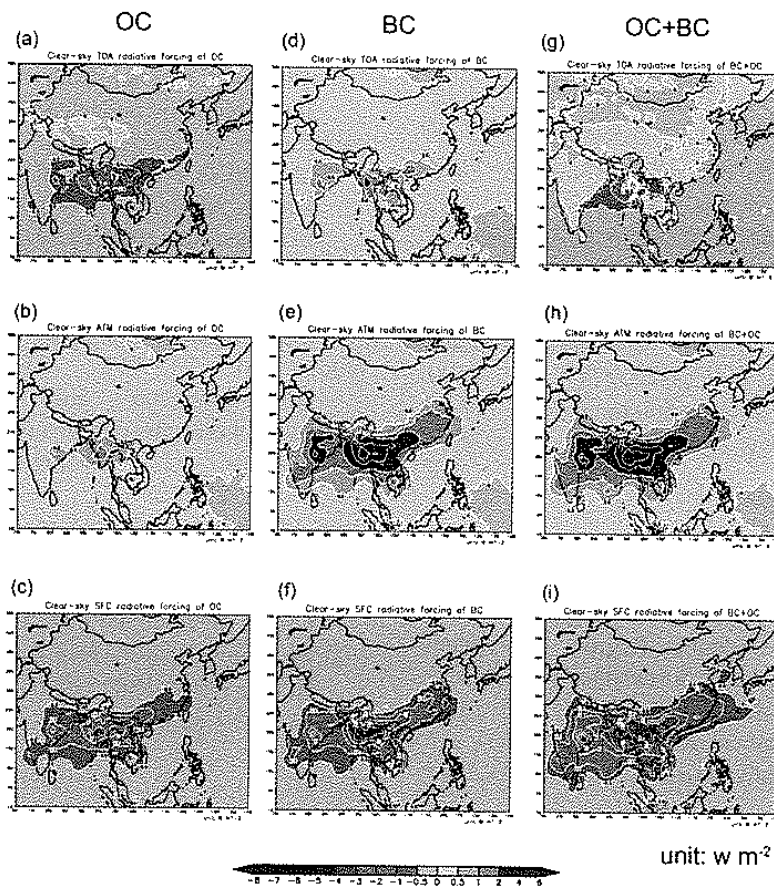
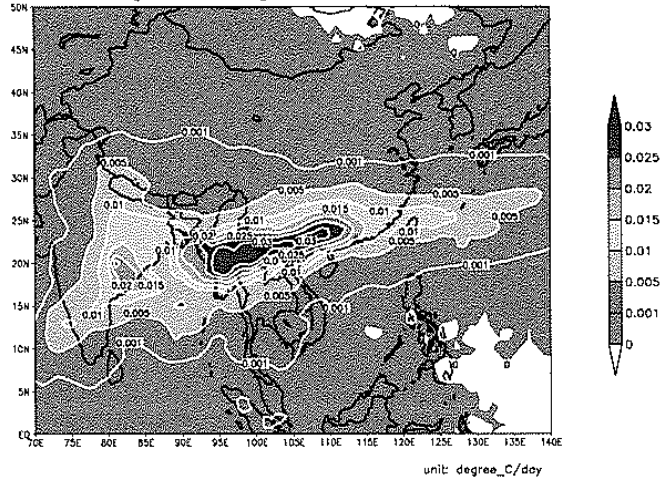


圖 3 模擬 2001 年 3 月生質燃燒氣膠所造成的晴天空下月平均輻射驅動力。分別為 OC 氣膠在(a) TOA, (b) ATM, (c) SFC; BC 氣膠在(d) TOA, (e) ATM, (f) SFC; OC+BC 氣膠在(g) TOA, (h) ATM, (i) SFC 所造成的輻射驅動力。

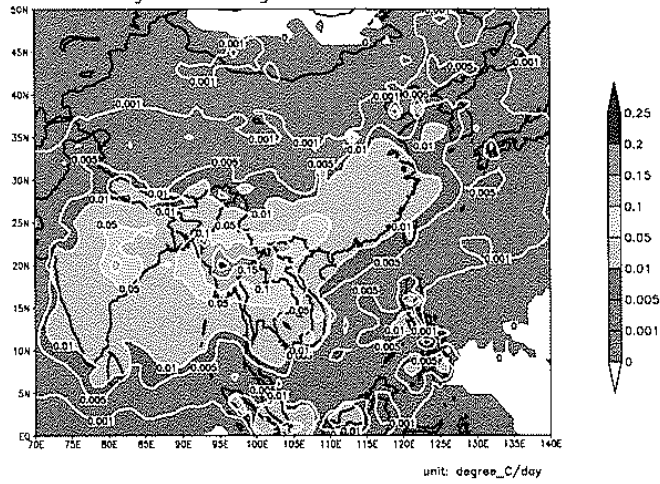
(a) 3 - 9 km

Change in heating rate from 3 to 9 km



(b) surface - 3 km

Change in heating rate from 0 to 3 km



(c) 20° N cross section

Change in heating rate, 20N

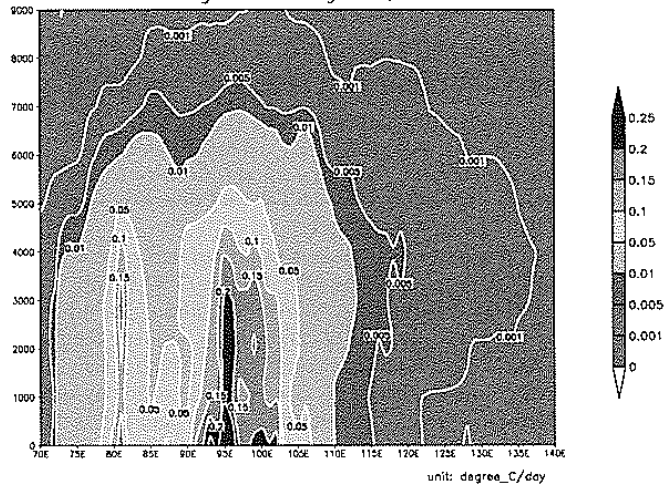


圖 4 大氣加熱率改變量分布圖(全天空下)。(a)3-9 km的平均值; (b) 0-3 km的平均值; (c) 20° N的剖面。(單位: °C day⁻¹)

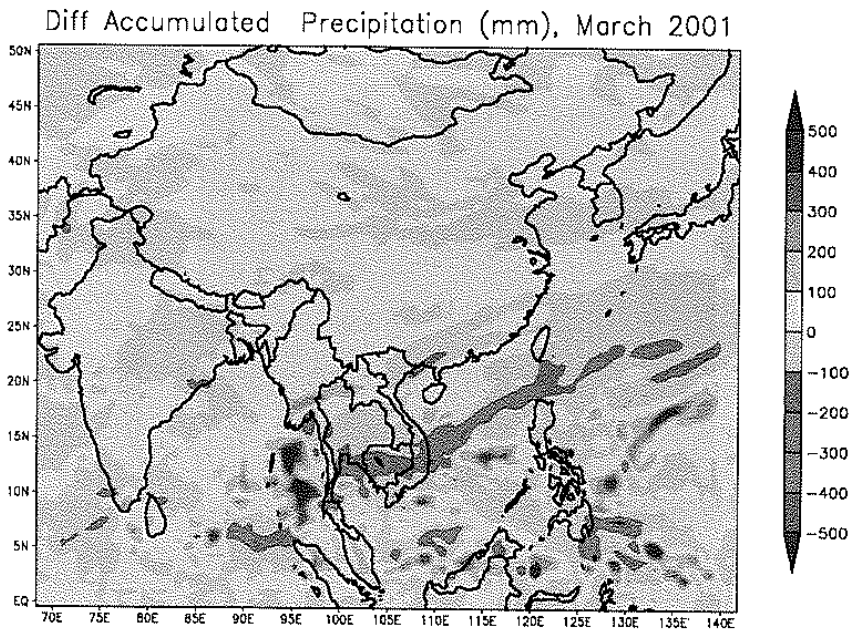


圖5 累積降水場月平均的差值。

表1 生質燃燒氣膠在晴天空和全天空下所造成的輻射驅動力。(針對南亞地區估算)

	晴天空			全天空		
	OC	BC	OC+BC	OC	BC	OC+BC
(max)	0.08	2.92	1.08	0.09	2.99	1.42
TOA (ave)	-0.41	0.27	-0.13	-0.32	0.32	0.01
(min)	-2.53	0.00	-1.81	-2.17	0.00	-1.65
(max)	-0.01	-0.02	-0.04	-0.01	-0.02	-0.03
SFC (ave)	-0.64	-0.84	-1.46	-0.54	-0.77	-1.29
(min)	-3.48	-6.33	-9.48	-3.23	-6.09	-9.06

單位: $W m^{-2}$

Estimate of radiative forcing and regional feedback of Asian biomass burning aerosols during the period of TRACE-P

Sheng-Hsiang Wang¹, Neng-Huei Lin¹, and Ming-Dah Chou²

¹. Department of Atmospheric Sciences, National Central University, Chung-Li, Taiwan

². Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

Abstract

The regional radiative impact of biomass burning aerosols in Asia is estimated using the new and detailed emission data during the experimental period of Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) in March, 2001. Integration of the Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model (MM5), USA NOAA Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Transport model (HYSPLIT) and a solar radiative transfer model (CLIRAD-SW) allow us to simulate the spatial and temporal distributions of black carbon (BC) and organic carbon (OC) aerosols from biomass burning in the South Asian region. It also allows us to estimate further their aerosol optical properties and radiative forcing. We find an anticyclone over Bay of Bengal dominates the transport of pollutants of South Asian region. The monthly mean surface concentration of OC and BC is $1.2 \mu g m^{-3}$ in this region. Western Myanmar has the maximum value, with the concentration reaching $14.1 \mu g m^{-3}$. The monthly mean all-sky direct shortwave radiative forcing ranges from -1.65 to $1.42 W m^{-2}$ at the top of the atmosphere and from -0.03 to $-9.06 W m^{-2}$ at surface, resulting in an increase of the atmospheric heating rate from 0.01 to $0.2 ^\circ C day^{-1}$. Owing to the spatial distributions of the AOD (Aerosol Optical Depth) ratio (OC/BC) and the surface albedo, there is a strong gradient of heating rate near the source regions, which may modify local circulations. Overall, biomass burning aerosols result in less solar irradiance reaching the Earth's surface, but greater heat in the lower atmosphere. We suggest such an effect will affect the dynamic and thermodynamic processes in the atmosphere and further impact the regional hydrological cycle and rainfall. In this study, the regional meteorological feedback due to biomass burning aerosol forcing also be addressed. The variation of accumulate precipitation in March 2001 shows more than ± 500 mm in the southern Asia.