

# 颱風天氣狀況東亞硫沉降及輸送研究

王自發<sup>1</sup>

中國科學院大氣物理研究所

劉廣英 蕭玲鳳

中國文化大學 理學院地學研究所

## 摘要

利用三維歐拉型污染物長距離輸送實用模式，著重研究了颱風天氣過程中我國大陸及東亞地區硫化物濃度及沉降的時空分布特點以及硫化物的輸送態勢。結果表明：颱風天氣狀況下硫化物的分佈與月平均的情況有顯著差異， $\text{SO}_4^{2-}$ 的濃度與 $\text{SO}_2$ 基本是一個量級；在颱風中心， $\text{SO}_4^{2-}$ 的沉降量大於 $\text{SO}_2$ 的沉降量，並且高值中心分離很顯著，濕沉降佔總沉降的比例很大；颱風中心積聚大量的硫化物，並對於週邊地區硫化物的輸送產生很大的影響。

## 一、引言

對年及月平均狀況下東亞地區硫化物的沉降與輸送規律已有一些研究<sup>[1-4]</sup>。由於污染物的輸送與天氣形勢（如風場、降雨、雲量等）、化學轉化、排放源等因素密切相關，在一些特定的天氣條件下會形成區域範圍的嚴重大氣污染事件。研究一些典型天氣條件下東亞地區硫沉降的沉降與輸送特點對於加深對我國各地區之間和東亞各國（地區）之間硫化物的輸送規律及污染物的分佈特徵的認識有著重要的作用和意義。這也是對今後開展東亞污染物分佈的預報試驗作一點嘗試。颱風是影響東亞的重要天氣系統之一，在我國各地登陸的颱風，平均每年有 6-7 個。颱風作為一個深厚的低氣壓，流場特徵獨特，降水也很大，一次颱風過程常能造成 300-400mm 的特大降水。一次颱風登陸過程必然對東亞污染物的分佈與沉降造成很大的影響，且很可能造成污染物的範圍堆積與沉降。

本文主要著眼於 1994 年 7 月份 Tim（六號）颱風登陸北上的天氣過程研究了我國及東亞地區硫化物濃度及沉降的時空分布特點以及硫化物的輸送態勢。

## 二、東亞硫化物輸送歐拉模式

輸送模式是研究東亞地區硫化物的跨國輸送問題的有效工具。東亞地區覆蓋範圍很廣，涉及的地區多，要得出不同天氣狀況下東亞硫化物的沉降與輸送特徵，模式既要科學地考慮影響沉降及輸送的物理和化學因子，又可以方便計算長時間多地區之間的相互輸送量。

採用地形追隨的球坐標系，三維歐拉型污染物輸送方程為

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\Delta H \cdot C_i) + \frac{\partial}{R \partial \varphi}(u \cdot \Delta H \cdot C_i) + \frac{\partial}{R \cos \theta \partial \theta}(v \cos \theta \cdot \Delta H \cdot C_i) \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma}(W \cdot C_i) = \frac{K_\varphi \partial}{R^2 \cos^2 \theta \partial \varphi} \left( \Delta H \cdot \frac{\partial C_i}{\partial \varphi} \right) + \frac{K_\theta \partial}{R^2 \cos \theta \partial \theta} \\ & \left( \Delta H \cdot \cos \theta \frac{\partial C_i}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_\sigma \partial C_i}{\Delta H \partial \sigma} \right) + S \cdot \Delta H + P \cdot \Delta H \\ & - R_d \cdot \Delta H - W_{ash} \cdot \Delta H \end{aligned} \quad (1)$$

其中為  $C_i$  第  $i$  種污染物濃度， $t$  為時間， $\theta$ 、 $\varphi$  為緯度、經度， $R$  為地球半徑， $K_\varphi$ 、 $K_\theta$ 、 $K_\sigma$  為經向、緯向、垂直湍流擴散係數， $u$ 、 $v$  為水平風速， $P$  為化學轉化項， $S$  為源排放速率， $P$ 、 $R_d$ 、 $W_{ash}$  分別為化學轉化、乾沉降和濕清除項，地形追隨坐標  $\sigma$  為

$$\sigma(\theta, \varphi) = \frac{z - h(\theta, \varphi)}{H(\theta, \varphi) - h(\theta, \varphi)} = \frac{z - h}{\Delta H} \quad (2)$$

<sup>1</sup> 現在京都大學防災研究所 E-mail: wang@bouh.u.dpri.kyoto-u.ac.jp

其中  $H$  為對流層高度， $h$  為地形高度。

根據不同條件下的測量結果採用經驗參數化的方法模擬乾沉降速度，沉降速度與三個滯留因子的和成反比<sup>[9]</sup>。濕清除主要是處理雲下洗脫過程。沖刷係數與雨強、雨滴譜分佈及各種污染物的濃度有關<sup>[6]</sup>，對硫酸鹽的沖刷還與氣溶膠的粒子譜及化學成份有關<sup>[7]</sup>。擴散係數取為常數。相關參數見文獻<sup>[8]</sup>。

氣相化學子模式<sup>[8]</sup>包括了 31 種物質，52 個化學反應，考慮了溫度、水汽、光強、雲霧及各種物質濃度對氣相轉化率的影響。液相化學反應模型考慮了氣體  $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NH}_3$  和  $\text{CO}_2$  被雲雨吸收、溶解、電離、液相反應。通過數值試驗，找出影響  $\text{SO}_2$  氣相氧化率的主要因子（如光強、溫度、濕度、 $\text{SO}_2$  濃度等），分為不同的檔，然後應用化學模式計算各種分檔不同組合情況  $\text{SO}_2$  轉化率的查算表。在輸送模式中不用解化學方程，直接根據不同的條件用查表法從該表中得出  $\text{SO}_2$  轉化率。

模式選取的水平範圍為東經  $98^\circ\text{E}$  至  $146^\circ\text{E}$ ，北緯  $16^\circ\text{N}$  至  $50^\circ\text{N}$ ，水平網格為  $1^\circ \times 1^\circ$ ，可見在邊界所通過的地區基本上是邊遠地區或海洋。側邊界為單向面，允許物質流出但不許流入，邊界條件取為硫化物的背景濃度。上邊界為封閉面，下邊界為吸收邊界。採用交錯網格，網格垂直方向隨地形變化按分為 8 層。模式使用的差分格式滿足質量守恆關係以及計算穩定性條件<sup>[8]</sup>。和實測資料對比表明，模式具有模擬東亞硫沉降及輸送的可靠能力<sup>[4,5,8]</sup>。

採用中國環科院的排放源資料(圖 1)，其它地區採用 Akimoto(1994)資料<sup>[5]</sup>。

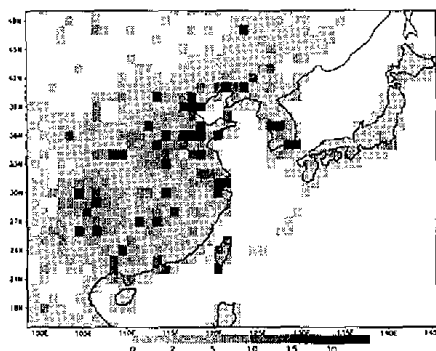


圖 1 輸送模式使用的  $\text{SO}_2$  排放源( $\text{g}/\text{m}^2/\text{y}$ )

### 三、天氣過程及資料

選取 1994 年七月一次颱風(六號)天氣過程

進行模擬，利用國家氣象局氣象中心 T42 譜模式輸出資料作為模式的輸入場，網格化的降水資料為全國氣象臺站實測資料經內插得到。圖 2 給出了颱風路徑。該颱風于 7 月 8 日出現在菲律賓以東洋面，中心位於  $(129.7^\circ\text{E}, 15.8^\circ\text{N})$ ，向西北移動，7 月 10 日橫過台灣南部，並於 11 日 0 時在福建省晉江到泉州之間登陸。12 日達到武漢，13 日低壓北上與北方的氣旋合併為一鋒面氣旋。颱風登陸北上，其倒槽與東移西風槽相互作用，從南到北大片地區出現了豪大雨。颱風登陸前後一直維持暖心結構，具有熱帶系統的特徵，變性較緩慢，河套地區為不強的冷平流區。這次過程存在一系列的強降水中心，11 日福建、江西的雨量較大，在福建沿海、九江降水量在 100mm 以上，黃河流域和華北的降水較少，12 日雨帶從華南一直延伸到東北，降水量也較 11 日大。

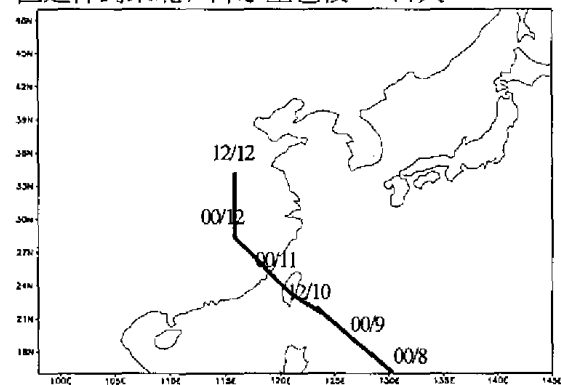


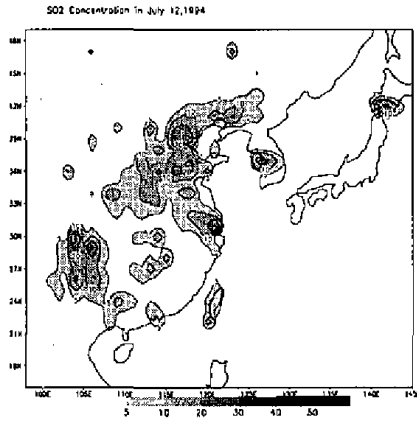
圖 2 Tim(9406 號)颱風中心移動路徑

## 四、模擬結果

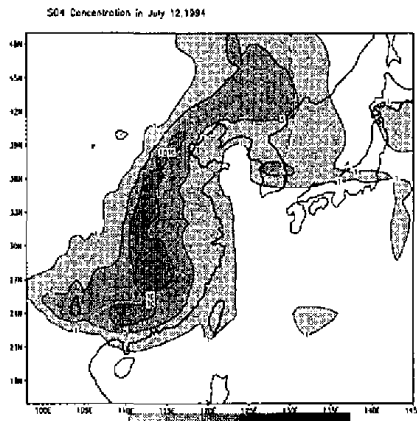
### 1. 颱風天氣硫化物的濃度分佈

先分析近地層硫化物濃度分佈。7 月 11 日  $\text{SO}_2$  濃度高值主要分佈在西南、江蘇、山東、遼寧、韓國等地，硫酸鹽主要分佈在西南、華南和東南沿海、華東、遼寧和朝鮮半島，以及台灣地區。7 月 12 日(圖 3a)近地層  $\text{SO}_2$  濃度高值主要分佈在西南、江蘇、華北、山東、遼寧、韓國等地，硫酸鹽(圖 3b)顯示出颱風輸送的特徵，高值中心與  $\text{SO}_2$  分佈中心分離，高值中心從華南、華中、華北延伸到東北，呈帶狀分佈。以颱風中心濃度值最大，表明颱風中心積聚了大量的污染物。7 月 13 日  $\text{SO}_2$  濃度分佈形勢與 7 月 12 日基本相同，只是南部如西南地區濃度增大，北部地區如華北和東北濃

西南地區濃度增大，北部地區如華北和東北濃度減少，這主要是由於雨區北移造成的。硫酸鹽仍舊呈西南至東北走向，華中的高值中心消失，分離為西南和華北兩個中心，並且向東北擴展很遠。



a

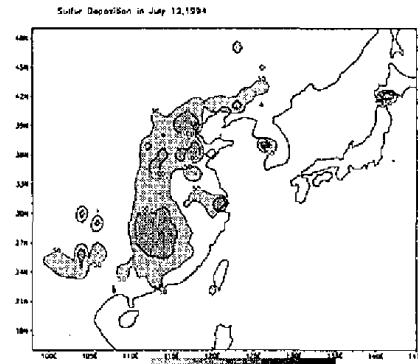


b

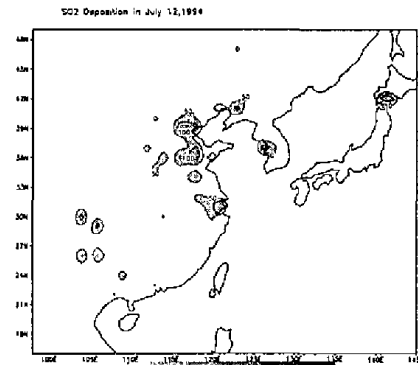
圖3 12日近地層硫化物濃度分布(µg/m<sup>3</sup>)  
a. SO<sub>2</sub> b. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

總之，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的濃度與SO<sub>2</sub>基本是一個量級。在降水區，尤其在在颱風低壓週圍，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的濃度遠大於SO<sub>2</sub>，這是由於在低壓中心週圍一直維持較高的濕度，SO<sub>2</sub>向SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的液相轉化作用顯著。在非降水區SO<sub>2</sub>的濃度大。與月平均情況不同的是，SO<sub>2</sub>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的高值中心分離很顯著。颱風中心所經過地區的硫化物濃度隨時間變化表明週邊的污染物會向中心輸送。

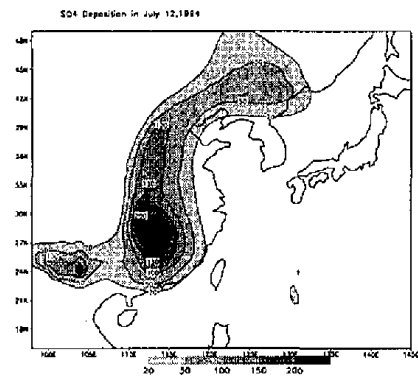
## 2. 颱風天氣硫化物的沉降分佈



a



b



c

圖4 12日硫化物沉降量分布(mgS/m<sup>2</sup>)  
a. 總硫沉降 b. SO<sub>2</sub> c. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

7月12日硫沉降分佈見圖4。總沉降高值中心主要位於華南、華中、華北，呈南北走向，與平均狀況的沉降分佈差異較大(圖4a)。與平均狀況<sup>[4]</sup>相比，四川盆地的硫沉降的高值區消失，山東半島至上海的高值中心也大大減弱。在大範圍降水區，尤其在颱風中心附近，沉降量很大，並且SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的沉降量大於SO<sub>2</sub>的沉降量。濕沉降佔總沉降的比例很大。干、濕沉降及SO<sub>2</sub>及SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>沉降的高值中心均有分離現象。

圖5a為7月12日硫化物濕沉降量分佈。濕沉降在雲南還存在一個小中心，從廣東、經湖南、湖北、河南、山西，到遼寧有一條狹長

的濕沉降區。在湖南和湖北存在一個圓形的高值中心，與颱風的位置類似，13日（圖5b）濕沉降分為南北兩塊，北方高值區在京津唐地區，向東北延伸很遠。南方濕沉降區在貴州和湖北。

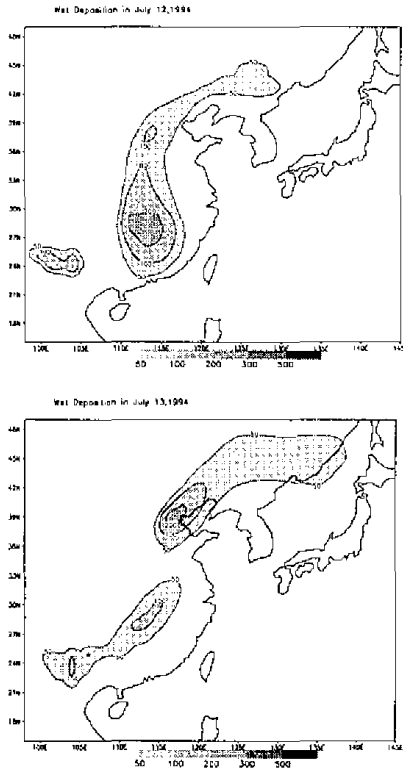


圖5 硫化物濕沉降量分布( $\text{mgS}/\text{m}^2$ )  
a. 12日 b. 13日

### 3. 颱風天氣硫化物的輸送通量分佈

定義輸送通量為風矢量與濃度的乘積。7月11日颱風中心位於台灣海峽，從 $\text{SO}_2$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 低層輸送通量分佈(圖略)看，颱風中心週圍有硫化物的輻合，硫酸根的輸送作用較強。從上海方向自東向西輸送，以 $\text{SO}_2$ 為主。湖北、四川、湖南及廣東硫化物自北向南輸送。黃河以北地區自西南向東北輸送，硫酸根向北輸送很遠。

7月12日颱風中心已移至武漢地區。從邊界層的輸送通量看(圖6)，沿海地區均由南向北輸送，在颱風中心有很強的污染物輻合， $\text{SO}_2$ 的輻合較弱， $\text{SO}_4^{2-}$ 的輻合相當明顯。無降水地區的 $\text{SO}_2$ 大量向降水區輸送，並以 $\text{SO}_4^{2-}$ 的形式沉降到地面。西南地區硫化物從北向南

輸送，使得該地沉降高值區比月平均狀況偏南。高層的輸送通量也不小，北邊受西風帶影響自西向東輸送，南邊由於颱風低壓比較深厚，還有少量影響。

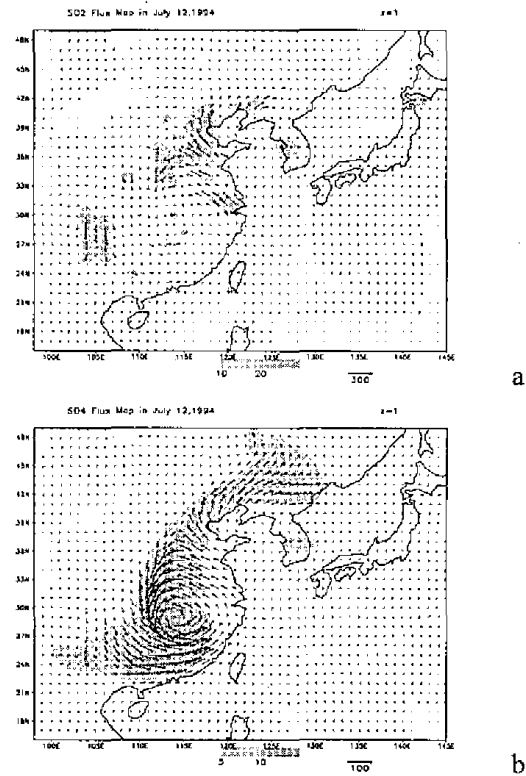


圖6 12日低層硫化物濃度以及輸送通量分布  
a.  $\text{SO}_2$  b.  $\text{SO}_4^{2-}$

7月13日颱風已消失，從低層 $\text{SO}_2$ 的輸送通量看，四川盆地的 $\text{SO}_2$ 由北向南輸送，在華北有一低壓中心，積聚了大量的污染物。硫酸鹽的輸送特別明顯，從西南、華中到華北、東北有一條很強的輸送通量帶，在華北地區形成一個硫酸鹽的高值中心。

### 4. 颱風天氣硫化物的相互輸送量與月平均情況的差異

這次颱風天氣過程對東亞各國及我國各地區之間的相互輸送量有很大影響。表1給出了幾個地區的三天沉降量佔月平均總沉降量的比例。如果比例大於10%，則表明沉降量大於平均狀況，即颱風引起的輸送或沉降顯著。 $\text{SO}_2$ 的沉降量均低於10%， $\text{SO}_4^{2-}$ 的沉降量許多地區遠大於10%，一些地區卻偏小。總沉降的趨勢也如此。說明颱風對於東亞硫化物

沉降量及相互輸送的影響還是很大的。

地區	SO <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	干沉降	濕沉降	總沉降
吉林	7.09	72.65	24.02	15.61	17.86
河南	6.07	32.59	14.86	7.74	9.22
安徽	8.80	26.27	16.43	11.23	12.41
湖北	5.13	28.37	13.77	9.60	10.38
江西	6.45	48.82	15.48	15.50	15.50
福建	6.80	41.39	18.31	7.77	11.67
四川	3.24	2.47	11.58	0.33	3.13
台灣	4.93	1.81	12.41	0.09	4.59
朝鮮	4.46	15.20	17.90	2.75	6.34
日本	3.75	1.54	12.27	0.08	3.27

表 1 三天沉降量占月平均總沉降的百分比

## 五、結論

一些典型天氣條件下東亞地區硫化物的沉降與輸送特點與月平均的狀況有顯著差異，值得進一步研究。颱風天氣硫化物的沉降與輸送特點主要有以下幾點。

1. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的濃度與 SO<sub>2</sub> 基本是一個量級。在降水區，尤其在在颱風低壓週圍，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的濃度遠大於 SO<sub>2</sub>。不同于月平均情況的是，SO<sub>2</sub> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的高值中心分離很顯著。

2. 總沉降高值中心與月平均狀況的沉降分佈差異較大，主要位於華南、華中、華北，呈南北走向。在颱風中心，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的沉降量大於 SO<sub>2</sub> 的沉降量，濕沉降佔總沉降的比例很大。干、濕沉降及 SO<sub>2</sub> 及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降的高值中心均有分離現象。

3. 對於這次過程，邊界層內，沿海地區均由南向北輸送，在颱風中心有很強的污染物輻合，SO<sub>2</sub> 的輻合較弱，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的輻合相當明顯。無降水地區的 SO<sub>2</sub> 大量向降水區輸送，並以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的形式沉降到地面。西南地區硫化物從北向南輸送，使得該地沉降高值區比月平均狀況偏南。高層的輸送通量也不小，北邊受西風帶影響自西向東輸送，南邊由于颱風低壓比較深厚，還有少量影響。

4. 東亞各國及我國各地區之間的相互輸送量與月平均狀況有一些差別，大陸與港臺之間的輸送顯著增大。

## 致謝

本文為大陸中國科學院大氣物理所與私立中國文化大學大氣科學系研究人員共同進行工作的一部份，我們感謝提供方便的所有人士與單位。第一作者更對日本京都大學防災研究所提供的研究環境與協助致上無限敬意。除此之外，研討會使我能有機會將成果呈現在大家面前，謝謝大家。

## 參考文獻

- [1] Carmichael G.R., 1993, Modeling of acid deposition in Asia, In *Proc. 3rd Workshop on Acid Rain in Asia*, pp21-43, AIS Press, Bangkok.
- [2] Ichikawa, Y. and S. Fujita. 1995, An analysis of wet deposition of sulfur using a trajectory model for East Asia. *Water Air and Soil pollution* 85, 1927-1932
- [3] Huang Meiyuan, Wang Zifa, Modeling studies on sulfur deposition and transport in East Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 85,4,1921-1926
- [4] Wang Zifa, Huang Meiyuan, *et al*, 1996, Sulfur distribution and transport studies in east asia using eulerian model, *Advances in Atmospheric Sciences*, 13,3,399-409
- [5] Akimoto Hajime, 1994, Distribution of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1° resolution, *Atmos. Environ.*, 28, 213-225
- [6] 徐玲, 秦渝, 1992, 雲下氣體清除過程參數化, *環境化學*, 11, 1, 1-10
- [7] 彭紅, 秦渝, 1992, 氣溶膠濕清除過程參數化, *大氣科學*, 16, 5, 622-631
- [8] 王自發, 黃美元, 1997, 東亞硫化物沉降與輸送研究(I)-硫化物輸送歐拉實用模式, *大氣科學*, 21, 3, 366-378

## Sulfur deposition and transport in East Asia under typhoon weather condition

K.Y Liu L.F Hsiao

Institute of Geography, Science College, Chinese Culture University, Taipei

Z.F Wang

National Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry,  
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

There are many studies about the annual and monthly averaged deposition and transport for sulfur in East Asia. The transport of pollutants has rich relationship with chemical reaction, emissions and weather conditions such as wind fields, precipitation, cloud cover, etc. The serious regional pollution will happen under special weather conditions. It is very important to study the spatial distribution of sulfur concentration and deposition and its transport under the special weather conditions such as typhoon weather process. As one of the important weather system of East Asia, typhoon landed on China has six or seven every year. It has special flow fields and causes server precipitation and may cause large scale deposition of pollutants.

A typhoon process in July, 1994 is selected for modeling. Its center locates at 129.7 East longitude and 15.8 North latitude and moves northwest. It runs across Taiwan island, lands in Qianzhou of Fujian province in July 11 and reaches Wuhan city in July 12. Server precipitation appears from south to north during the typhoon process.

The 3-D Eulerian practical long range transport model for sulfur used in the paper is between the related simple models and complex models. It considers in details many physical and chemical processes such as the emission, transport, gas-phase and aqueous chemical process, dry deposition and washout process. It is reliable through the comparison with observation. Model output of T42 spectrum model of the National Meteorological Center of the Chinese Meteorological Bureau is selected as the input data for the transport model from July 11 to 13, 1994. Precipitation data is interpolated with the observation data of weather stations in China. Emission data of mainland is afforded by the National Environmental Bureau, while others by Akimoto.

The spatial distribution of sulfur concentration and deposition and its transport are studied with the transport model focusing on the landing weather process of the typhoon. The results show that there are much difference of spatial distribution of sulfur concentration with monthly averaged and the concentration of sulfate has reached the same level of sulfur oxidate under typhoon weather condition. The concentration of sulfate are higher then that of sulfur oxidate in rainfall area especially in the surrounding of low-pressure areas of typhoon while less then in no-precipitation area. The high-value center of sulfate serperated with that of sulfur oxidate comparing with monthly averaged. The deposition of sulfate are much more then that of sulfur oxidate in the center of typhoon and wet deposition reached at prime percentage of total deposition. Lots of sulfur are convected into the center of typhoon and typhoon has noticeable influence on the transport of sulfur in surroudings.

發表方式：口頭

需要設備：投影機

論文發表者：王自發

聯絡電話：2861-1801分機383 傳真：(O)2861-5274

聯絡地址：臺北市士林區陽明山華岡路55號中國文化大學大氣科學系 蕭玲鳳

E-mail: wzf@lasgsi4.iap.ac.cn