

# 雲雨系統內二氧化硫的輸送 及去除之數值研究

王建國 陳景森

國立中央大學大氣物理研究所

(中華民國七十四年二月十八日收件, 三月二日修正)

## 摘要

本文企圖利用二度空間的對流性雲雨模式和一個包含平流、擴散、產生以及去除項的  $\text{SO}_2$  連續方程式, 來探討相對於雲雨區, 有不同位置及分布的  $\text{SO}_2$ , 在雲雨系統發展過程中, 其內、外環流對於  $\text{SO}_2$  的輸送和去除有何影響。關於去除項的參數化, 採用與 Fisher (1982) 類似的方法來處理。而  $\text{SO}_2$  連續方程式中的平流項之數值方法, 則選用 Shir 和 Shieh (1975) 所發展出來解正值平流項的數值方法。

在這個數值實驗中, 將以兩種在動力結構上不盡相同的對流性雲雨系統, 來討論  $\text{SO}_2$  的輸送和去除情形。其一為存在於環境垂直風切較強的雲雨系統(近地面的風速較大), 另一則存在於環境垂直風切較弱的雲雨系統。結果顯示此兩者對於  $\text{SO}_2$  的輸送和去除有很大的差異。另外, 吾人尚考慮  $\text{SO}_2$  從下邊界擴散至地面的情形, 發現它對  $\text{SO}_2$  在雲雨內的輸送和去除情形影響不大。

## 一、前言

近數十年來, 由於化石燃料的大量使用, 無形中為人類帶來了許多禍害, 空氣污染和其所伴隨著酸性雨就是其中一例。這裡所謂酸性雨是指雨水的 pH 值小於 5.6 而言。根據許多降水資料分析(如 Galloway 等, 1976; Lilojestrang 和 Morgan, 1982; Seymour 和 Stout, 1983), 得知硫酸是酸性雨的主要成分之一。因此, 空氣污染物中的  $\text{SO}_2$ , 固然可經由雲、雨滴的吸收、氧化, 而達到去除的效果, 但却因而成為酸性雨的主要來源。

過去, 有許多位學者從事於酸性雨或  $\text{SO}_2$  的濕除(wet removal)研究。在 1958 年, Junge 和 Ryan (1958) 利用含  $\text{FeCl}_2$  之溶液來作研究, 發現單純的  $\text{SO}_2$  和水之系統, 無法解釋實際大氣的情形, 於是又加入  $\text{NH}_3$ , 結果發現  $\text{NH}_3$  +

$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  之系統是形成大氣中  $\text{SO}_4^{2-}$  的重要因素, 其後 Van Den Heuvel 和 Mason (1963) 模擬大氣條件, 同樣證實有  $\text{NH}_3$  存在時, 能加速  $\text{SO}_2$  的氧化。Scott 和 Hobbs (1967) 則利用 Van Den Heuvel 和 Mason 的結果, 稍作修改並導出從  $\text{SO}_3^{2-}$  氧化成硫酸的反應率。隨後 McKay (1971) 更擴充至產生  $\text{SO}_4^{2-}$  的氧化過程, 並且加入簡單的溫度變化。Hales (1972) 則以物理過程來討論  $\text{SO}_2$  進入水滴的情形。Hill 和 Adamowicz (1977) 結合物理和化學過程, 來探討  $\text{SO}_2$  在雨滴中的氧化情形。Larson 等 (1978) 則考慮  $\text{SO}_2$  在  $\text{O}_2$  和  $\text{O}_3$  的化學氧化過程, 並得出產生硫酸的化學動力氧化式。Overton 等 (1979) 和 Reda 等 (1982) 則探討在降水時期, 雨滴穿過各種氣體時(包含  $\text{SO}_2$ ) 所發生的物理和化學變化。

然而上述之研究, 多偏重於一顆雲滴或雨滴吸

收 SO<sub>2</sub>，而未考慮整個雲動力效應，諸如雲內、外的環流結構，輻合、輻散的分佈於 SO<sub>2</sub> 去除之影響。直到最近才考慮了簡單的動力效應，如 Hane (1978) 利用二維稜線模式，來分析在風暴內的污染物之輸送情形，求出沉積至地面的量，並與實際觀測的值來做比較。Fisher (1982) 嘗試結合雲動力效應，以適當的參數方法，來討論在雲內 SO<sub>2</sub> 的吸收、輸送及硫酸的生成過程，並且使用簡單的一度空間來計算。Scott (1982) 利用一簡單化學模式結合風暴模式，來預測在雲內 SO<sub>2</sub> 轉變至 SO<sub>4</sub> 之轉換率。Hales (1982) 也利用一度空間的風暴動力系統，來探討 SO<sub>2</sub> 和硫酸浮粒的排除情形。

但是，雲、雨滴的成長，受制於雲內的動力作用，因而影響到雲、雨滴去除 SO<sub>2</sub> 的效果。另外，環境風場、SO<sub>2</sub> 相對於雲雨區的位置及分布等，都可能會影響到 SO<sub>2</sub> 的濕氣。因此，本文企圖利用一個二度空間 (X-Z) 的對流性雲雨模式，來探討在對流性的雲雨系統內，相對於雲雨區有不同位置及分布的 SO<sub>2</sub>，受到雲動力效應的作用下，其輸送和去除的情形。至於 SO<sub>2</sub> 在雲、雨滴中的化學氧化過程，由於牽涉複雜，因此擬以簡單的參數化來處理。另外，我們並假設被雲、雨滴所氧化吸收的 SO<sub>2</sub> 立即消失於模式中。

在以下第二節中，將簡單介紹所使用的數值模式架構和所採用的定差方法。爾後，將以兩種環境條件不同的對流性雲雨系統，來研究 SO<sub>2</sub> 在雲雨系統內的輸送和去除過程。其中，在第三節內將討論環境垂直風切較強之情形 (近地面的風速較大)，而在第四節內則以環境垂直風切較弱之情形來研究。最後，在第五節中將做一總結以及一些改進。

## 二、數值模式簡介

誠如上面所述，本文主要是探討 SO<sub>2</sub> 在對流性雲雨系統內的輸送與去除情形，但由於牽涉到要解一組複雜的非線性方程式，使用解析解似乎有點困難。因此，吾人利用二維的雲雨模式和 SO<sub>2</sub> 的連續方程式，以數值定差法來討論其輸送和去除效

應。在雲雨模式中，將採用可壓縮性的運動方程組與熱力方程式。因為是可壓縮的，所以聲波和重力波將會存在於模式內，故求有關壓力項時，是利用時間分割法來處理，即對有關聲波部份，選擇較小的時間間隔，而對有關對流問題部分，用較大的時間間隔來做。至於側面邊界將採用開放式方法來處理。以下將簡單介紹所使用的控制方程式和數值定差法。

### 1 SO<sub>2</sub> 的連續方程式和參數化

此二維數值模式，是利用數值方法，求出水平速度 (U)、垂直速度 (W)、位溫 (θ)、無因次壓力 (π)、動量混合係數 (momentum eddy mixing coefficient, K<sub>m</sub>)、水汽混合比 (q<sub>v</sub>)、雲滴混合比 (q<sub>c</sub>)、雨滴混合比 (q<sub>r</sub>) 以及 SO<sub>2</sub> 混合比 (C<sub>s</sub>) 的數值解。

以上前八個變數的方程式，可參考陳和林 (1983a)。至於 SO<sub>2</sub> 混合比的方程式，其處理方法與 Fisher (1982) 類似。若在雲雨系統的範圍內，則大氣中 SO<sub>2</sub> 混合比 (C<sub>s</sub>) 的連續方程式可寫成：

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial X}(UC_s) - \frac{\partial}{\partial Z}(WC_s) + \frac{\partial}{\partial X}(K_h \frac{\partial C_s}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Z}(K_h \frac{\partial C_s}{\partial Z}) - F_{q_c} - F_{q_r} + Q_s \dots\dots\dots(1)$$

式中：

K<sub>h</sub> 為混合係數。K<sub>h</sub> = C<sub>k</sub> K<sub>m</sub>；C<sub>k</sub> 是常數，在 1 至 3 之間。

F<sub>q<sub>c</sub></sub>、F<sub>q<sub>r</sub></sub> 分別為 SO<sub>2</sub> 被雲滴和雨滴吸收的吸收率。

Q<sub>s</sub> 為 SO<sub>2</sub> 的產生項。在此假設只有在最初模擬的瞬間和在一定範圍內有 SO<sub>2</sub>，其後的時間為零。

根據 Fisher (1982) 對於 F<sub>q<sub>c</sub></sub> 和 F<sub>q<sub>r</sub></sub> 的參數化，可寫成

$$F_{q_c} = C_s \cdot H' \cdot K_c \cdot q_c \cdot \bar{\rho} / \rho_w \dots\dots\dots(2)$$

$$F_{q_r} = C_s \cdot H' \cdot K_c \cdot q_r \cdot \bar{\rho} / \rho_w \dots\dots\dots(3)$$

式中：

$K_1$  是  $\text{SO}_2$  在雲、雨滴中的氧化率，隨雲、雨滴的 pH 值而變。

$\rho_w$  是水的密度。吾人取  $\rho_w = 10^{-3} \text{ kgm}^{-3}$ 。

$\bar{\rho}$  是空氣的密度，隨高度而變。

$H'$  是有效的亨利定律常數 (effective Henry's law constant)，為溫度的函數。

一般可寫成

$$H' = Hc (1 + K_1 / [H^+]) \dots\dots\dots(4)$$

在此，根據 Fisher 的建議，吾人取  $Hc = 60$ ， $K_1 = 0.02 \text{ moles } \ell^{-1}$  (在  $0 \sim 10^\circ\text{C}$  之間)。至於  $K_1$ ，根據 Penkett 等 (1979) 加入  $\text{O}_3$  所做的研究指出，在  $\text{pH} = 5$  時， $K_1 = 2 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$ ，在  $\text{pH} = 4$  時， $K_1 = 8.3 \times 10^{-4} \text{ S}^{-1}$ 。但 Fisher 分析了許多學者的研究指出，一般  $\text{pH} = 5$  時， $K_1$  約為  $3 \times 10^{-4} \text{ S}^{-1}$  (即  $100\% \text{ h}^{-1}$ )。因此，吾人將採用 Fisher 所建議的值，另也試著用 Penkett 的值來與之比較。(注意：在模擬時間內，假設 pH 值是不隨時間而變化)。

值得附帶說明的是上述對於  $F_{qr}$  的參數化，原本係針對雲區內的雨滴而言，然而在沒有其他更好的參數方法以前，在雲區以外的雨滴，也將做同樣的參數化。

## 2 數值定差法

本數值模式是用定差法而求出數值模式的解。在空間的分布上，採用交錯網格點 (stagger grid)；亦即把有關熱動力的變數、水汽的變數和  $\text{SO}_2$  的變數放在網格點上，而  $U$  及  $W$  的位置各向左、右及上、下移半個  $\Delta X$  和  $\Delta Z$ 。關於雲動力及雲微物理的數值定差法，在時間的微分上，採用二階跳蛙式 (second-order leapfrog) 並加上平滑項，平滑項的係數為 0.1，但處理聲波部分則用半隱法來計算。至於空間的微分，在水平平流項採用四階，而垂直項則為二階，且為了守恒起見，除了位溫外，將寫成通量形式 (flux form)。其他詳細的數值定差法，可參考陳和林 (1983 a, 1983 b)。關於  $\text{SO}_2$  方程式中的平流項，若使用傳統二階或高階的數值方法，常常會有負值的出現。而使用上游 (up-stream) 差分法或其他低階

的數值方法，雖不致產生頻散波紋 (dispersive "ripples")，但却會遭受極端的數值擴散。因此近幾年來，有多位學者致力於解正值平流項的數值方法，如 Shir 和 Shieh (1975)、Smolarkiewicz (1983) 等。根據王 (1984) 的研究，在此吾人採用 Shir 和 Shieh (1975) 之數值方法來處理  $\text{SO}_2$  平流項的問題。

另外，模式中的邊界條件，除了  $\text{SO}_2$  以外的其他變數，也請參考陳和林 (1983 b)。至於  $\text{SO}_2$  在側邊界的選擇上，是假設邊界外的量等於邊界上的量，但是若向模式內平流，則令通量為零。在上、下邊界上，基本上亦採用邊界外的量等於邊界上的量之假設，但是若考慮  $\text{SO}_2$  從下邊界擴散至地面的情形，則在下邊界上，將以邊界上  $\text{SO}_2$  的量線性遞減而得，亦即地面至第一層的垂直梯度與第一層至第二層的垂直梯度一樣。

## 三、 $\text{SO}_2$ 存在於環境垂直風切轉強的雲雨系統內之模擬情形

欲研究  $\text{SO}_2$  在雲雨系統內的輸送與去除過程，首先必須了解此雲雨系統的一些特性，例如：雲、雨區的分布位置、垂直運動場的狀況，輻合和輻散場的分布都會影響到  $\text{SO}_2$  的輸送及去除效應。其次， $\text{SO}_2$  在模擬開始時，相對於雲、雨區的位置和濃度的分布等，更是直接地影響到其輸送和去除的成效。因此，在本節中，將分成兩小節來討論，首先將利用發生在美國科羅拉多州 (Colorado) 的雲雨系統來做研究，探討其發展過程中的生命史和特性。其後，再利用此雲雨系統，選擇適當的時機下，釋放定量的  $\text{SO}_2$ ，以研究  $\text{SO}_2$  在此系統中，如何受到雲內、外環流和雲動力的效應，而影響  $\text{SO}_2$  輸送和去除情形。

### 1 雲雨系統的初始條件及發展

#### (1) 初始條件

在本節裡對於雲雨系統模式的初始條件，基本上是採用 1973 年 7 月 9 日在美國科羅拉多州發生雷雨胞時，位於史託林 (Sterling) 的探空資料。此測站位於風暴區的東南方約 40 公里處，故可

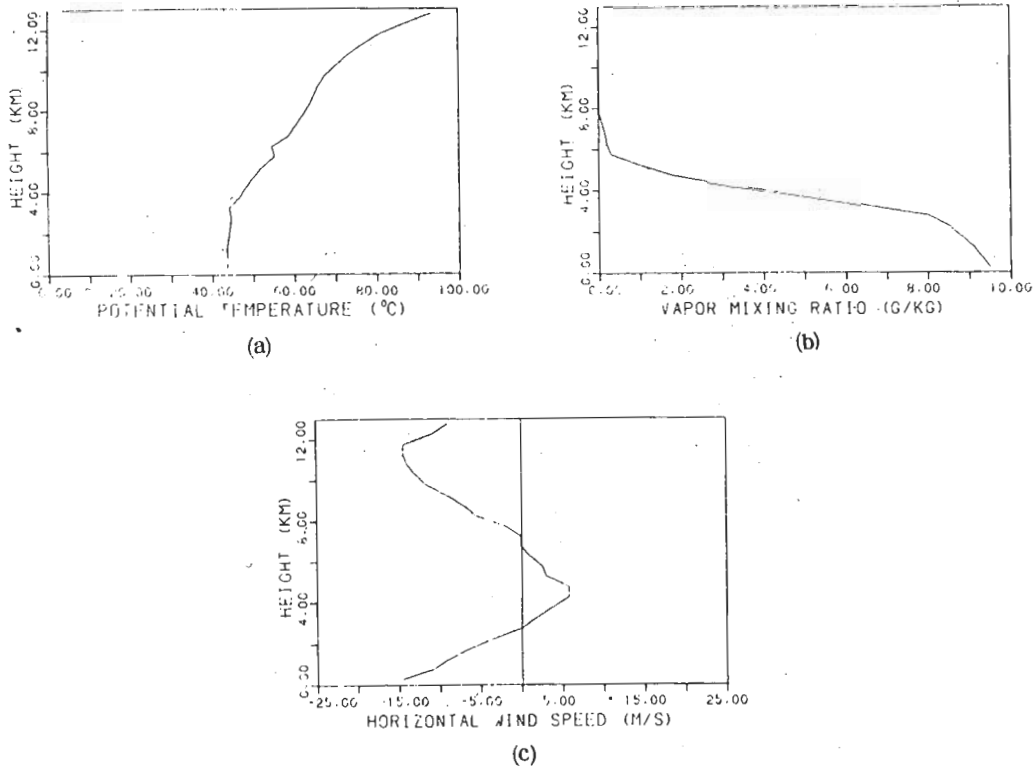


圖 1 雲雨模式內所使用的初始資料（環境垂直風切較強）。(a)位溫 (b)水汽混合比 (c)水平風速隨高度變化的情形。資料取自 1973 年 7 月 9 日，在美國科羅拉多州所發生雷雨風暴時，位於史託林的探空資料，而稍作修改。

以代表當時風暴發生時的周圍環境條件。其斜溫圖和當時的環境風場可參考陳和林（1983 a）之圖。由於企圖模擬出能夠持續發展一段時期的雲雨系統，因此將觀測資料稍作些微的修改。修改後的位溫和水汽混合比隨高度的變化情形，表示於圖 1 a、圖 1 b 中，由圖知水汽混合比在 7.75 公里以上為零。由於當日發生的雲雨系統幾乎是由北向南移，因此採取風場在南北方向上的分量，當作模式內的初始風場，同樣的也作些微的修改。修改後的初始風場如圖 1 c 所示，從圖中可知此雲雨系統的初始環境垂直風切很強，且近地面的風速極大。此外，模式內的各物理量，均假設在初始狀態的水平均勻的。

本數值模式中，所使用的範圍，水平距離取 72 公里，高度則取 13 公里，而水平網格點之間

間隔距離  $\Delta x = 1.5$  公里，垂直間隔距離  $\Delta z = 0.5$  公里，因此總計所包含的網格點數為  $49 \times 26$ 。在時間上，其間隔  $\Delta t = 6$  秒，而處理壓力所使用的小時間間隔值則為 3 秒。為了要引發此雲雨系統的發展，故在距離模式左邊界 36 公里（即左邊界算起第 25 格）及垂直高度 0.25 公里（即垂直第一層）處為中心，各向左右移 3 公里（兩個網格點）加熱，加熱時間為 9 分鐘。在第 23、24、25 的水平網格點上的加熱率，分別為 0.3、0.35、0.4°K/min，而第 26、27 格點的加熱率與 24、23 相同，其餘位置則不加熱。另外，以下之圖形的水平座標原點是放置在模式的左邊界上，而水平距離只取至 60 公里處。

## (2) 雲雨系統的發展

由於模式內的加熱效應，引發雲雨系統的發展

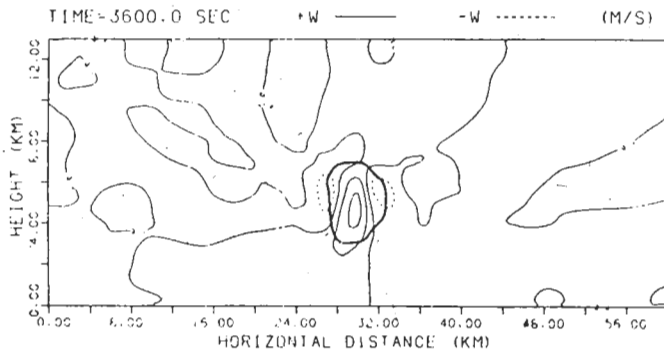
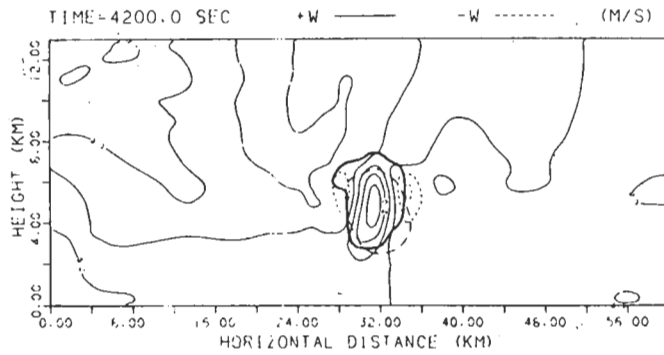
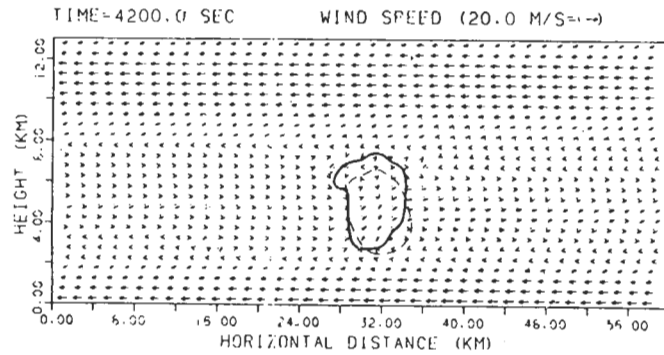


圖2 利用圖1之初始資料，模擬至3600秒時，雲雨系統附近的垂直速度場之分布情形。實線代表上升速度，虛線表下降速度，等值線的間隔均為1 m/s，滴啞線（—————）代表雲區（雲滴混合比為0.1 g/kg）。



(a)



(b)

圖3 時間為4200秒時，(a)垂直速度場，(b)風場之分布情形。較長的虛線代表雨區（雨滴混合比為0.1 g/kg），在(b)圖右上方所示為風場的比例，其圖同圖2。

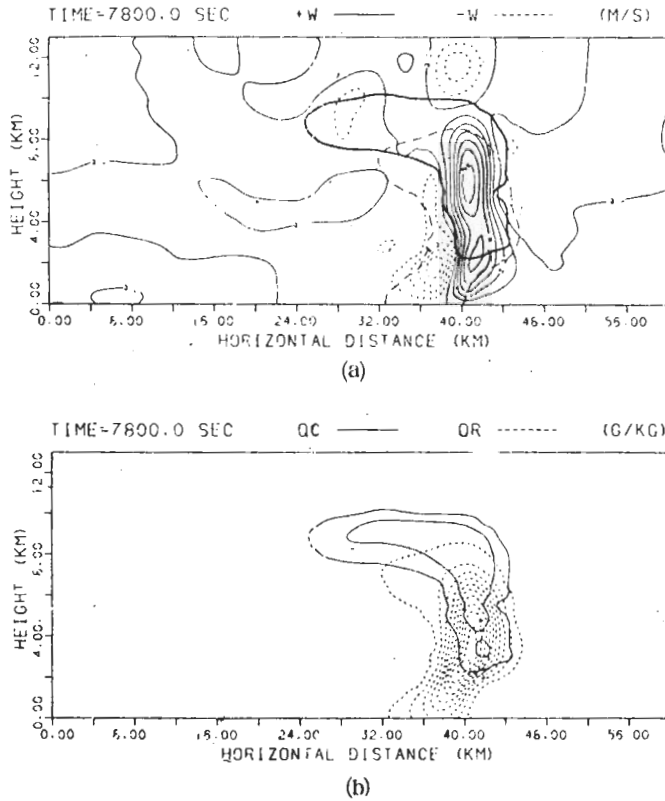


圖 4 時間為 7800 秒。(a)垂直速度之分布，其餘同圖 3 (a)。(b)雲滴混合比（實線），雨滴混合比（虛線）之分布情形，等值線間隔除了最外面的一條線為 0.1 g/kg 外，其餘自 0.5 g/kg 起，每隔 0.5 g/kg 畫一條線。

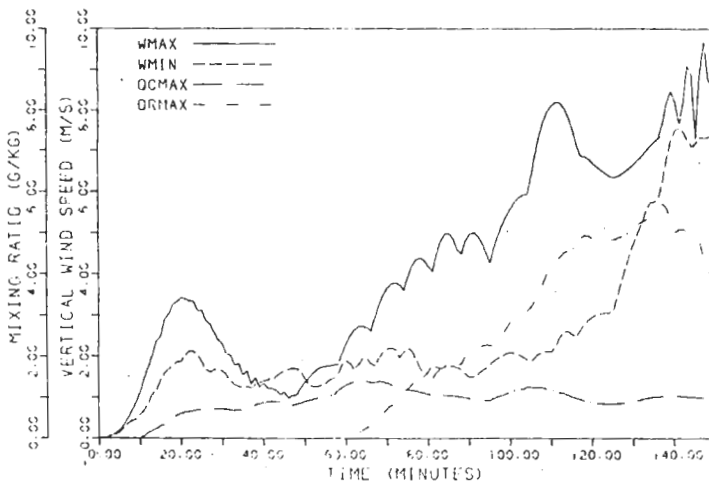


圖 5 雲雨模式內各種物理量最大值隨時間的變化情形（環境垂直風切較強）。實線、虛線、一長一短線和一長二短線，分別為模式內的最大上升速度、最大下降速度、最大雲滴混合比及最大雨滴混合比。點線為雲區內的最大上升速度。

然而至 3600 秒時，仍只有雲滴，而無雨滴存在，如圖 2 所示。圖中滴塔線 ( tick ) 表雲區範圍 ( 以  $0.1 \text{ g/kg}$  之等值線表示 )，實線代表上升速度，虛線則表示下降速度。由圖可知在雲體中央有上升速度，而兩旁的下降速度是補償作用。但至 4200 秒時 ( 圖 3a )，在雲區內已有大量的雨滴存在，此時雲底約在 2.8 公里附近。其中較長的虛線表雨區範圍 ( 亦以  $0.1 \text{ g/kg}$  之等值線做代表 )。此時，從風場圖來看 ( 圖 3b )，在雲體中的上升氣流，有偏向右方之趨勢，使得以後的雨滴偏向雲體右方發展。隨著雨滴的成長，至 6600 秒時，已降至地面了，此時雲內的上升氣流已接近極限，最大的上升速度為  $8.12 \text{ m/s}$ 。在雲底左側已有下降氣流存在，這是由於雨滴的黏滯作用與雨滴在未飽和空氣內的蒸發、冷卻作用，使得降雨區內伴隨著冷重下降氣流所致。由於大量的降雨產生，阻礙了上升氣流的發展，這可由圖 4a 知，雖然此時雲內的上升氣流仍然很旺盛，但顯然的正逐漸衰退中。相對的在雲底左側的下降氣流却逐漸加強中。值得注意的是在雲區的上升氣流有兩個極大值存在，顯示將有另一新生雲胞產生。這時從圖 4 b 中了解，降雨已達極限，最大的雨滴混合比為  $5.15 \text{ g/kg}$ 。隨著時間發展至 9000 秒時，原先的雲雨慢慢在消散中，但仍有大量雨滴存在。此時的下降氣流已增至  $7.29 \text{ m/s}$ 。另外，在雲底右側已逐漸生成新的雲胞了。

綜觀以上所述，可知在 110 分 ( 6600 秒 ) 至 150 分 ( 9000 秒 ) 之間，雲內的上升速度和雲、雨滴的分布，似乎變化較小，這也可從圖 5 中獲得證實，圖中表示在模式內最大的上升速度 ( WMAX )，最大的下降速度 ( WMIN )，最大的雲滴混合比 ( QCMAX ) 和最大的雨滴混合比 ( QRMAX )，隨時間的變化情形。從圖中可以發現最大雲滴混合比甚少變動。另外，圖中的點線表示雲區內的最大上升速度，這是因為雲區內的最大上升速度約自 135 分鐘後比雲底下方新生雲胞的最大上升速度要小所致。

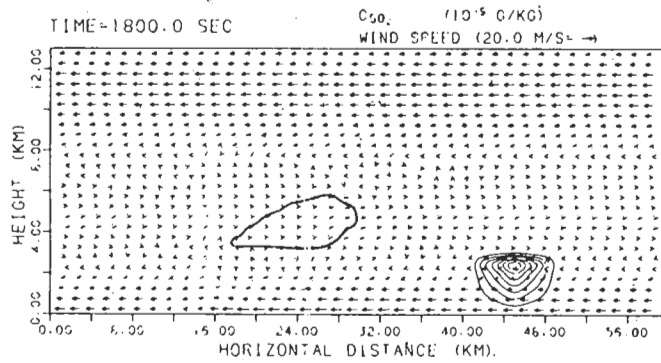
## 2 $\text{SO}_2$ 在雲雨系統內的輸送和去除情形

在上小節的敘述中，我們已對此雲雨系統的生命史和特性，有一粗略性的了解和認識。而在此小節中，將探討在此雲雨系統發展過程中，位於雲雨區附近，在開始模擬時，相對於雲雨區有不同位置及分布的  $\text{SO}_2$ ，如何受到雲內、外環流的分布，而影響  $\text{SO}_2$  的輸送及去除情形。由於此雲雨系統之下層環境，有強烈的向左風場存在，且雲雨系統的移動是往右移，因此吾人選擇在雲雨系統發展前期 ( 1800 秒 ) 和稍微遠離雲雨區的低層上風處，瞬間釋放定量的  $\text{SO}_2$ ，以期能在雲雨發展的成熟時期，隨著風場而平流至雲雨系統內。另外，此雲雨系統在 9000 秒後，已漸趨消散，且在消散的雲底下，有新生雲胞產生。因此，吾人把研究的重點放在 9000 秒內，而不去討論新生雲對  $\text{SO}_2$  的影響。

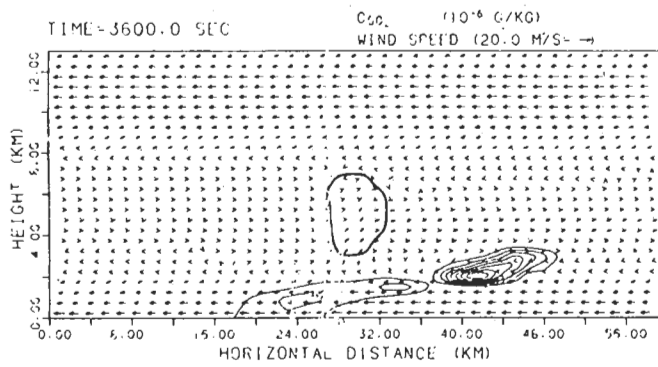
在以下的討論中，首先將以四種不同初始狀況的  $\text{SO}_2$  (  $\text{SO}_2$  的下邊界條件採用邊界外的量等於邊界上的量之假設 )，來探討其輸送和去除過程。其後，選擇其中去除量最多的個案，來討論  $\text{SO}_2$  從下邊界擴散至地面 ( 下邊界之  $\text{SO}_2$  採線性遞減 )，對於  $\text{SO}_2$  的輸送和去除有何影響。此外，由於無法確切了解  $\text{SO}_2$  在大氣中的分布情形，因此吾人假設  $\text{SO}_2$  在水平分布上為中心對稱；至於在垂直分布上，則採用  $\text{SO}_2$  隨高度的增高而增加或隨高度而遞減兩種極端的情形。至於  $\text{SO}_2$  所佔的網格點數，在水平和垂直方向上均為 5 個網格點。而模式內釋放  $\text{SO}_2$  的總量一律為  $857.60 \text{ g/m}$ ，若除上所佔的面積，則約為  $46 \mu\text{g/m}^3$ ，此值相當於在污染不嚴重的地區。

### (1) A 個案：

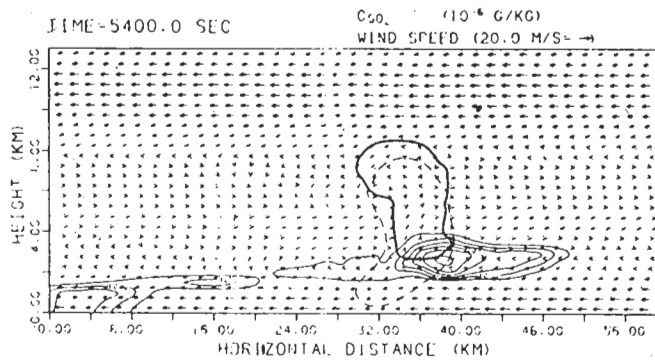
在 A 個案中，吾人假設在雲雨系統發展至 1800 秒時，其附近存在有  $\text{SO}_2$ ，而此  $\text{SO}_2$  的垂直分布是隨高度的增高而增加，直至高度在 2.75 公里，水平距離左邊界 45 公里後，抵達最大，其最大值為  $150 \mu\text{g/kg}$ ，如圖 6a 所示。圖中顯示最初模擬時， $\text{SO}_2$  的分布、相對於雲雨區的位置以及附近的風場圖。其中， $\text{SO}_2$  的混合比以實線表示，滴塔線為雲區 ( 以  $0.1 \text{ g/kg}$  之雲滴混合比表示 )，其後隨著此系統的發展， $\text{SO}_2$  的輸送情形



(a)

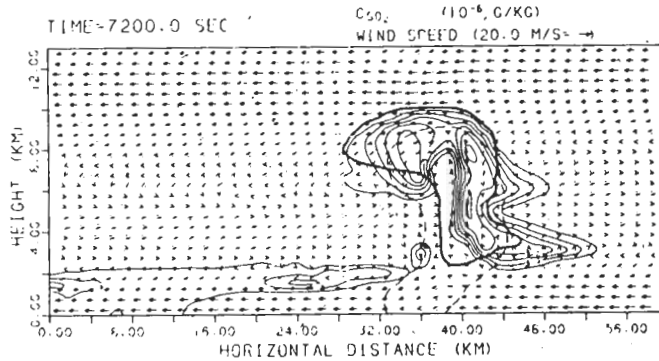


(b)

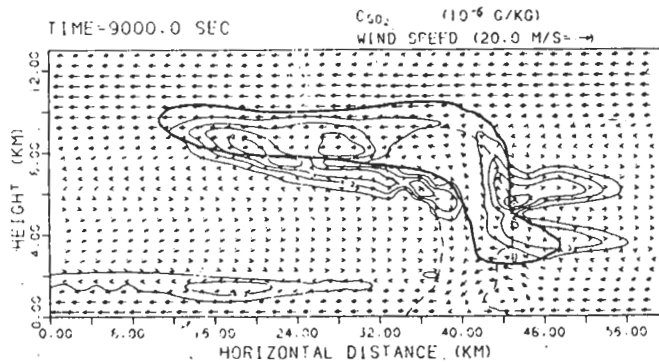


(c)





(d)



(e)

圖6 存在於垂直風切較強之雲雨系統內，SO<sub>2</sub> 在個案A的初始條件下，隨著時間之輸送情形，實線為SO<sub>2</sub> 混合比。(a)時間為1800秒，SO<sub>2</sub> 的等值線間隔為  $2 \times 10^{-6}$  g/kg。(b)時間為3600秒，等值線間隔為  $10 \times 10^{-6}$  g/kg。(c)時間為5400秒，等值線間隔為  $5 \times 10^{-6}$  g/kg。(d)時間為7200秒，等值線間隔為  $2 \times 10^{-6}$  g/kg。(e)時間為9000秒，等值線間隔為  $2 \times 10^{-6}$  g/kg。其餘同圖3。

可用圖6b至圖6e來說明，圖中之虛線表示雨區（亦以0.1 g/kg之雨滴混合比來表示）。由於擴散效應以及SO<sub>2</sub> 存在位置之近地面處有向左風速，故SO<sub>2</sub> 向左及向下擴展，但近地面的風速極大，因此至3600秒時（圖6），SO<sub>2</sub> 有分裂成兩個極大值。又因雲雨區往右移動，且SO<sub>2</sub> 受環境風場的影響，往左平流，故至5400秒時（圖6c），已有較多的SO<sub>2</sub> 流入雲雨區中。此時一部分的SO<sub>2</sub>，已平流至左邊界，而漸從左邊界流失去。但此刻的雲雨系統已漸趨成熟階段，在雲雨區內，幾乎全是上升氣流，只有在雲底左側有下降氣

。因此，在雲雨系統右方的SO<sub>2</sub>，一方面受到水平風速影響，能夠平流至雲雨區內，另一方面受到雲區內的上升氣流之影響，而能夠隨著上升氣流又往上移動。至7200秒時（圖6d），絕大部分的SO<sub>2</sub>，已漸均勻的擴展至雲區內的每一角落。而稍早平流至左邊界的SO<sub>2</sub>，大部分已流失於左邊界外。自此以後，SO<sub>2</sub> 在雲雨區內的分布甚少變動，至9000秒時，則如圖6e所示。

至於被雲、雨滴所去除之量多少呢？吾人可用一張單位長度的SO<sub>2</sub> 量，隨著時間的收支平衡圖（圖7）來說明。圖中所示，除了被雲、雨滴所去

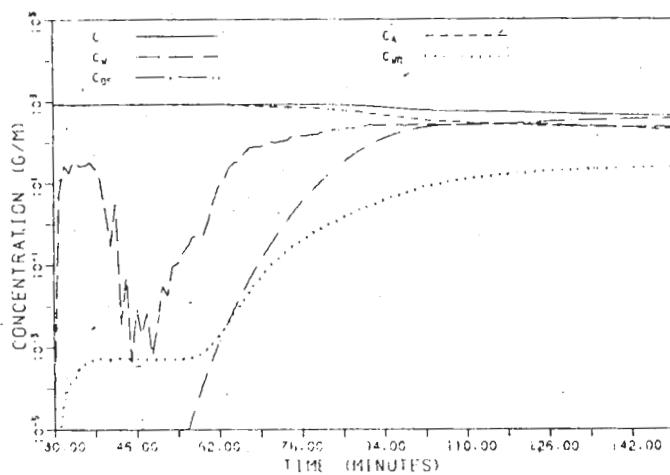


圖7 在垂直風切較強之雲雨系統內， $\text{SO}_2$  隨時間的收支平衡圖。實線、較短的虛線、較長的虛線、點線、一長一短線，分別代表某一時刻的 $\text{SO}_2$  總量、某一時刻存在於非雲雨區的 $\text{SO}_2$  總量、 $\text{SO}_2$  被雲雨滴吸收的累積量以及 $\text{SO}_2$  從側邊界流失的累積量。垂直軸採用對數座標。

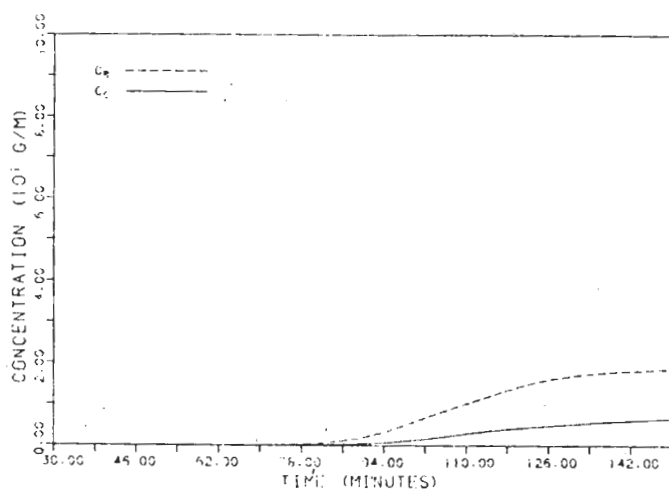


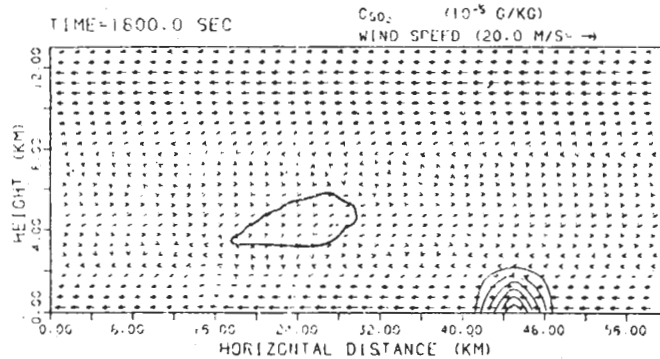
圖8 在垂直風切較強之雲雨系統內，其 $\text{SO}_2$  被雲滴（實線）和雨滴（虛線）所去除的累積量隨時間的變化情形。

除之累積量 ( $C_{wr}$ ) 以外,尚有從側邊界流失的累積量 ( $C_{br}$ )、在雲雨區內某一時刻的總量 ( $C_w$ )、在非雲雨區某一時刻的總量 ( $C_a$ ) 以及存在於模式內的某一時刻  $SO_2$  總量 ( $C$ ),隨著時間變化的情形。在此所謂雲雨區,指雲滴或雨滴的混合比達到  $10^{-5}$  g/kg 以上。由於近地面的風速極大,使得流失於側邊界的  $SO_2$  很多,至 150 分鐘 (9000 秒) 時,流失於側邊界的  $SO_2$  累積為初始的 44.81%。另外,非雲雨區中  $SO_2$  的總量在前半段比雲雨區中的總量要多,但約至 120 分鐘後,在雲雨區的量略比非雲雨區多。圖中,前半段的雲雨區之  $SO_2$  總量變動極大,這是受到雲雨系統在發展前期還不太穩定所致。至於  $SO_2$  的累積去

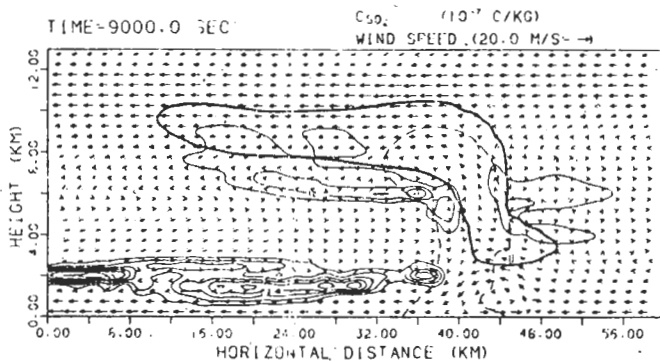
除量,在前一小段甚小,後由於雲雨系統逐漸接近  $SO_2$ ,使得去除量大增,至 150 分鐘時,累積去除量為最初總量的 2.94%。若分別探討被雲滴和雨滴的去除累積量,則如圖 8 所示。從圖中顯示,被雨滴所吸收的  $SO_2$  累積量 ( $C_R$ ) 比雲滴 ( $C_c$ ) 要多,至 150 分鐘時,兩者之比約為 3 倍。

(2) B 個案:

此個案中  $SO_2$  所佔的空間位置與 A 個案相同,但垂直分布却完全相反,它是隨高度而遞減。最大值為  $136 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,其位置距離左邊界 45 公里,高度則為 0.25 公里處,如圖 9a 所示。由於大部分的  $SO_2$  集中在近地面處,而此處的向左風速極強,因此大部分的  $SO_2$  隨著此風場漸平流至邊



(a)



(b)

圖 9 同圖 6, 但採用 B 個案。(a)時間為 1800 秒,等值線間隔為  $2 \times 10^{-5}$  g/kg。(b)時間為 9000 秒,等值線間隔為  $5 \times 10^{-7}$  g/kg。

界上，只有極少部分存在於雲雨區附近。至 9000 秒時（圖 9b），已有大部分的  $\text{SO}_2$  從左邊界流失出去，而存在模式範圍內的  $\text{SO}_2$ ，又大部分在雲雨區以外的下層處，只有少部分受到環流及擴散的影響，而流入雲雨區中，但也只局限在雲雨區的邊緣處。此時（9000 秒）， $\text{SO}_2$  從側邊界流失的累積量竟高達 84.18%，因此被雲、雨滴所去除的累積量，僅佔最初總量的 0.42%。

### (3) C 個案：

在此個案中  $\text{SO}_2$  的初始垂直分布和值與 A 個案相同，但水平分布的中心位置比 A 個案較為遠離雲雨區。亦即最大值位於左邊界 54 公里，高度

2.75 公里處，如圖 10a。由於比 A 個案較為遠離雲雨區，因此在 5400 秒時，在雲雨區中的  $\text{SO}_2$ ，顯然比 A 個案少。其後受到雲內上升氣流和擴散作用，至 9000 秒時（圖 10b），已漸均勻分布至雲雨區中，但與 A 個案比，仍多集中於雲內上升氣流之位置。而在模擬結束時（9000 秒），從側邊界所流失的累積量與被雲、雨滴所吸收的累積量，分別佔最初總量的 44.84% 及 2.22%。

### (4) D 個案：

此個案如同 A、C 個案，但水平分布的中心位置又比 A、C 個案較為遠離雲雨區，即距離左邊界達 57 公里，如圖 11a。其後  $\text{SO}_2$  隨著雲雨系統

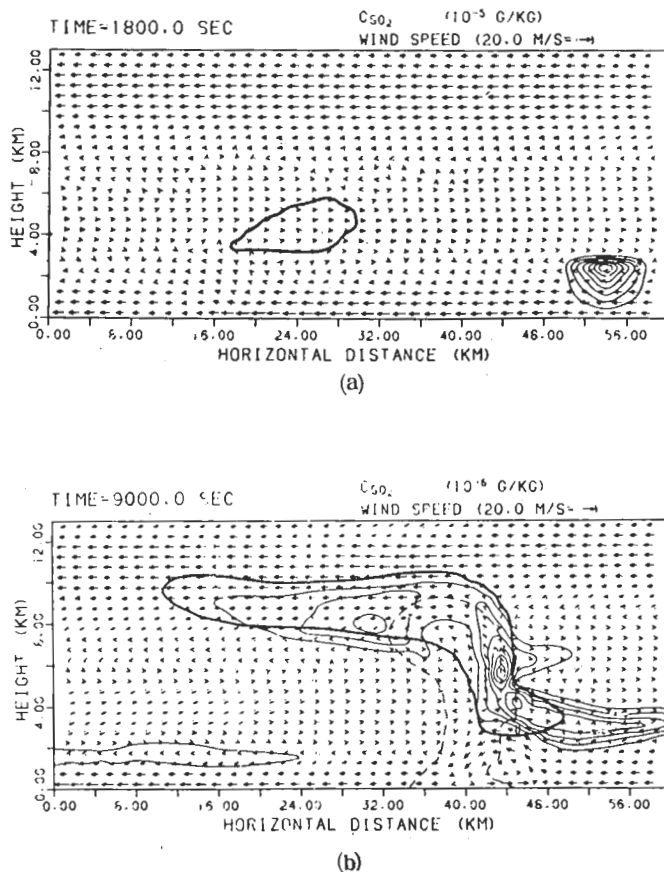
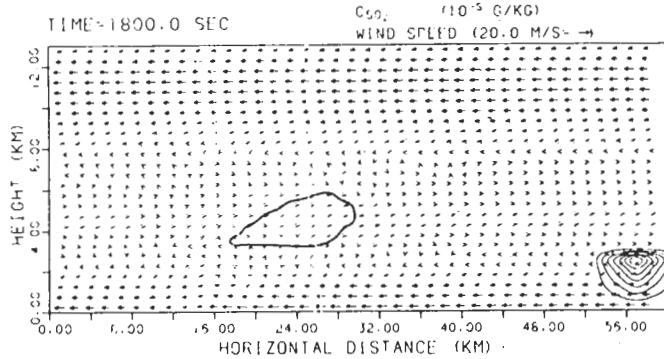
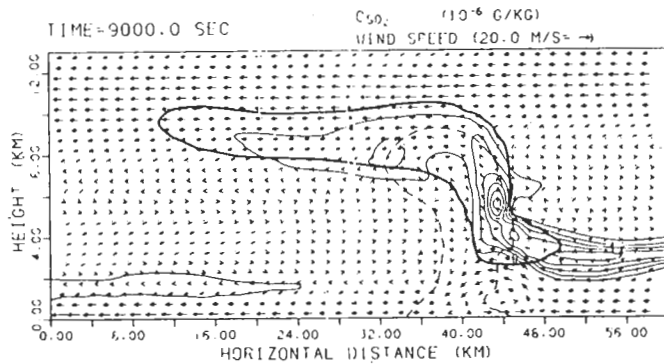


圖 10 同圖 6，但採用 C 個案。(a)時間為 1800 秒，等值線間隔為  $2 \times 10^{-5}$  g/kg。  
(b)時間為 9000 秒，等值線間隔為  $2 \times 10^{-6}$  g/kg。



(a)



(b)

圖 11 同圖 6，但採用 D 個案。(a)時間為 1800 秒，等值線間隔為  $2 \times 10^{-5}$  g/kg。(b)時間為 9000 秒，等值線間隔為  $2 \times 10^{-6}$  g/kg。

演變之輸送情形，大致與 C 個案類似。至 9000 秒時（圖 11 b），顯然 SO<sub>2</sub> 的分布趨勢與 C 個案相似。此時，流失於側邊界的累積量和去除的累積量分別為最初總量的 44.60% 及 1.82%。

(5)比較：

綜觀上述四種個案，在模擬結束時（9000 秒），SO<sub>2</sub> 從側邊界流失的累積量百分比相當高，特別是 B 個案，幾乎是其餘個案的二倍；而被雲、雨滴去除的累積量百分比，亦屬 B 個案最小，而 A 個案最多。此意味著，在環境垂直風切較強之雲雨系統內，由於近地面的風速極強，使得大部分集中在近地面的 SO<sub>2</sub>，其側邊界流失量要比集中在較上層之 SO<sub>2</sub> 來得多，即使留存在模式內的 SO<sub>2</sub>，也因為環流的影响，而遠離雲雨區。因此，能夠流入雲雨區的量，要比集中在較上層之 SO<sub>2</sub> 來得少，

間接地影響到其去除效果。另一方面，此雲雨系統對於上風處較遠離雲雨區的 SO<sub>2</sub>，其影響比稍微遠離雲雨區之 SO<sub>2</sub> 來得小，但它們之間的差距相差不多。

(6)下邊界擴散至地面之情形：

從以上的敘述，可以了解 A 個案的 SO<sub>2</sub> 分布較其他個案，有較多的機會及量流入雲雨區中，因此被雲、雨滴去除的量也最多。因此，吾人以 A 個案的 SO<sub>2</sub> 分布及位置，來了解從下邊界擴散至地面的情形。它在雲雨系統發展過程中的輸送情形與 A 個案類似。至 9000 秒時，從下邊界擴散至地面的累積量，佔最初總量的 23.8%，而此時從側邊界流失的累積量，僅為最初總量的 23.5%。由此可知，在 A 個案中，從側邊界流失的 SO<sub>2</sub>，約有一半轉移至從下邊界擴散了。若計算在 9000 秒時，被

雲、雨滴所去除的累積量，可知與A個案相似，為最初總量的2.93%。因此，對於A個案而言，是否考慮從下邊界擴散至地面的情形，影響雲、雨滴的去除不太大。

#### 四、SO<sub>2</sub>存在於環境垂直風切轉弱的雲雨系統內之模擬情形

從上節的討論中，我們了解在環境垂直風切較強（近地面的風速較大）的雲雨系統內之SO<sub>2</sub>，流失於側邊界的量極多。而在本節中，將探討存在於垂直風切較弱的雲雨系統，如何對SO<sub>2</sub>的輸送和去除造成影響。我們將以民國72年，發生在台灣的雲雨系統為代表。依照上節之做法，在本節中仍舊分成雲雨系統的發展與SO<sub>2</sub>在此系統中的情形來討論。

##### 1. 雲雨系統的初始條件及發展

在本小節中，將先敘述模式內所使用的一些初始條件，而後才討論此雲雨系統在這些初始條件下

之發展情形。

##### (1) 初始條件

資料選用民國72年（1983）8月23日，發生在本省南部的一個對流性系統，位於東港的探空資料，利用此資料線性內插至垂直網格點上，成為模式的初始條件。其中位溫和水汽混合比的垂直分布情形，如圖12a、圖12b所示。至於初始水平風場，由於此雲雨系統的走向，幾近於東西方向，因此採用風場在東西方向上的分量，當做模式內的初始水平風場，如圖12c所示。與圖1c比較，顯然此雲雨系統的初始垂直風切比美國科羅拉多州所發生的雲雨系統要小得多。此外，模式內各物理量，均假設在初始狀態下是水平均勻的。

研究此個案時，所使用的數值模式，在水平距離方向依然是72公里，但在垂直方面則取10公里。至於網格區間和時間間隔與上節同。為了要引發此雲雨系統的發展，同樣的，我們在模式範圍的中央部分加熱。以距離左邊界36公里（水平網格

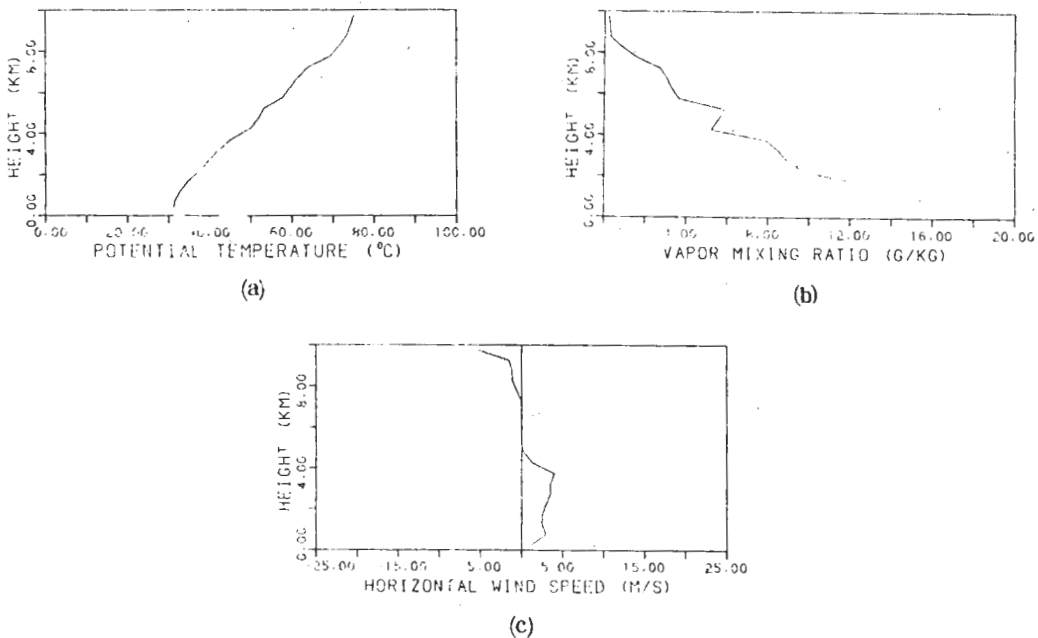


圖 12 雲雨模式內所使用的初始資料（環境垂直風切較弱）。(a)位溫 (b)水汽混合比 (c)水平風速隨高度的變化情形。資料取自民國72年8月23日於東港的探空資料。

點第 25 格) 及垂直高度 0.75 和 1.25 公里處(即垂直第二、三層)為中心, 各向左右移 6 公里(各移 4 個網格點)加熱, 加熱時間為 10 分, 加熱率在水平網格點 21、22、23、24、25 格分別為 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 $^{\circ}$ K/min, 而第 26、27、28、29 網格點的加熱率與 24、23、22、21 相同, 其餘位置不加熱。另外, 在上述加熱的時間與位置上, 同時強迫相對濕度為 95% (即水汽混合比為當時飽和水汽混合比的 0.95 倍)。為了不使此雲雨系統很快的移出模式範圍內, 故將整個模式區域以 4 m/s 的速度向右平移, 而以後所定的水平座標原點, 將放在模式左邊界上, 亦即跟隨著模式區域而移動。另外, 以下所討論的圖, 在水平方向上只取至離原點 60 公里處。

## (2) 雲雨系統的發展

由於模式內的局部加熱效應, 使得雲雨系統在加熱區開始發展, 至 1200 秒時, 雲體內已有大量的雨滴存在, 此時雲底高度約在 0.6 公里。由於雲區內都是強盛的上升氣流(最大的上升速度為 5.99 m/s), 使得雨滴不易降至地面, 而有足夠的時間在雲內成長, 兩旁的下降氣流(較短虛線所示), 是補償作用所造成的。上升氣流隨著高度並

沒有明顯的傾斜, 因此隨著時間發展, 雨滴將落在雲區的正下方。至 1800 秒時, 雨滴混合比已約達到極大。此時, 整個雲區下方幾乎被雨滴所覆蓋。向整個雲區的上升氣流仍然很旺盛, 同時我們發現在降雨區的左方, 有一很小塊的新生雲胞, 至 2400 秒時, 已有擴大之趨勢。在此時刻內, 上升氣流已開始遞減, 而在雲的下方有較明顯的下降氣流, 這中也可獲知。值得注意的是在雲體下層部分的垂直風切較小, 但在上層部分的垂直風切稍大, 因此有分裂成二個雲之趨勢。下層的雲由於上升氣流不強, 很快就消失了, 而上層的雲, 由於缺乏水汽之供應, 亦逐漸衰弱中, 直至 5400 秒時, 只剩下雲體部分, 而無雨滴存在。

整體而言, 可以用圖 13 來說明。圖 13 表示模式內最大的上升速度(WMAX)、最大的下降速度(WMIN)、最大的雲滴混合比(QCMAX)和最大的雨滴混合比(QRMAX)隨時間的變化情形。從圖中可知在 24 分鐘時, 上升速度抵達最大值, 約為 7.2 m/s, 雨滴混合比的最大值約發生在 27 分鐘後, 其值約為 4.8 g/kg。另外, 從其圖中可發現雲滴混合比的變動不太大, 最大在 20 分鐘附近, 約為 2.2 g/kg。

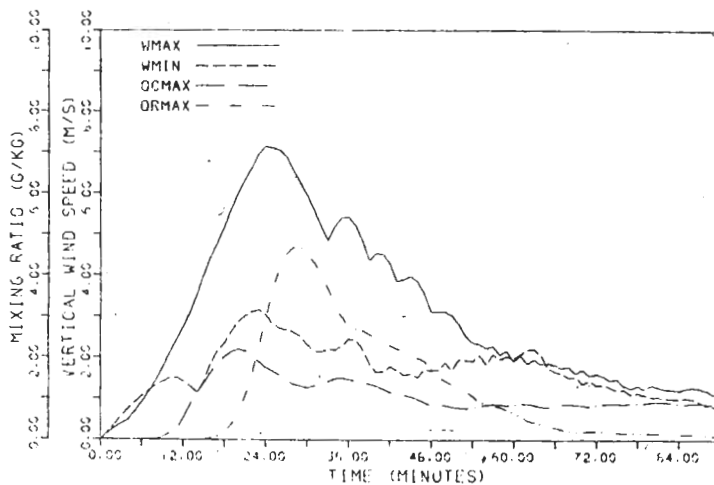
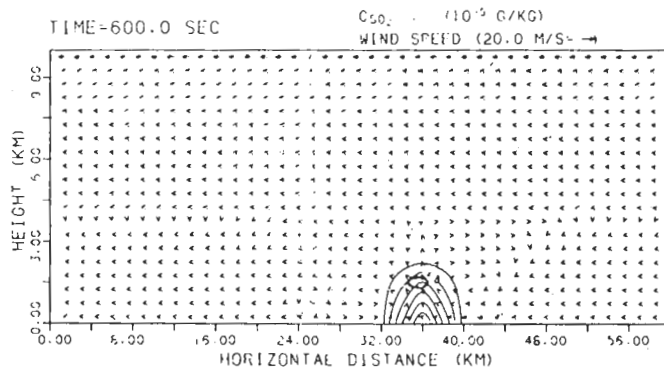
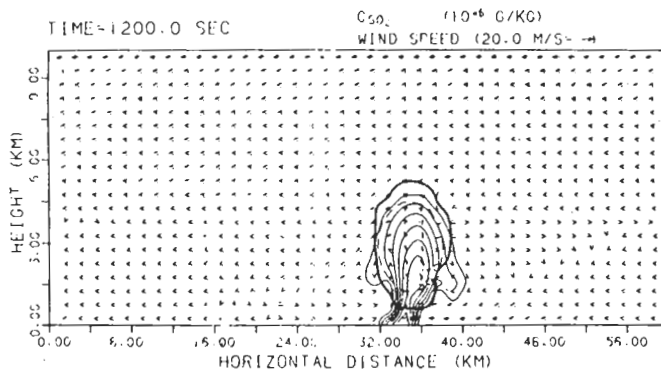


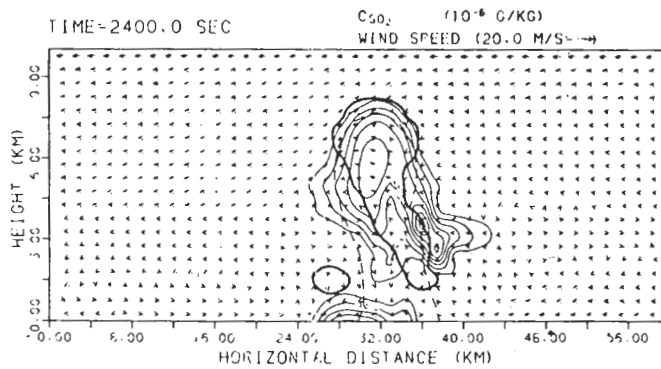
圖 13 在垂直風切較弱之雲雨系統中, 各物理量最大值隨時間的變化情形, 其餘同圖 5。



(a)



(b)



(c)



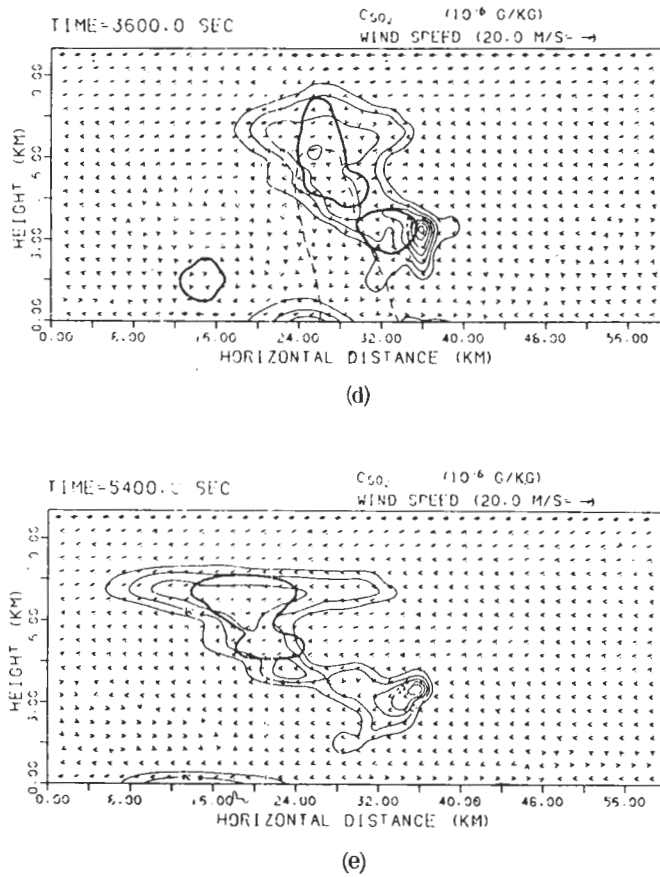


圖 14. 在垂直風切較弱之雲雨系統內，SO<sub>2</sub> 在 A 個案的初始條件下隨時間的輸送情形，其餘同圖 6。(a)時間為 600 秒時，等值線間隔為  $2 \times 10^{-6}$  g/kg。(b)時間為 1200 秒時，等值線間隔為  $10 \times 10^{-6}$  g/kg。(c)時間為 2400 秒時，等值線間隔為  $5 \times 10^{-6}$  g/kg。(d)時間為 3600 秒，等值線間隔為  $5 \times 10^{-6}$  g/kg。(e)時間為 5400 秒，等值線間隔為  $5 \times 10^{-6}$  g/kg。

2 SO<sub>2</sub> 在雲雨系統內的輸送和去除情形

在本小節中，將與 3-2 小節類似的討論方法，來研究 SO<sub>2</sub> 在環境垂直風切較弱的雲雨系統內的情形。由於此雲雨系統的生命史很短，因此吾人選擇開始有雲雨產生時（600 秒），來做為瞬間釋放 SO<sub>2</sub> 的初始時間。又由於在 5400 秒以後，已無降雨發生，且雲也在消散中，因此吾人只針對 5400 秒以前的情況做討論。

如同 3-2 小節，在下面的討論中，首先將以四種不同的 SO<sub>2</sub> 分布及位置來探討其輸送和去除情形，然後再以去除量最多的個案，來討論 SO<sub>2</sub>

從下邊界擴散至地面的影響。除此之外，尚以去除量最多的個案，來討論不同的去除參數值，對於 SO<sub>2</sub> 的去除有何影響。以上這些個案，最初瞬間所釋放的 SO<sub>2</sub> 總濃度，均為 962.63 g/m<sup>3</sup>。

(1) A 個案：

在 A 個案中，吾人假設 SO<sub>2</sub> 混合比的分布是隨高度的增高而遞減，直至高度在 2.75 公里處減至為零。其最大值距離左邊界 36 公里，高度在 0.25 公里處，其值為 134 μg/kg。在此條件下，它隨著雲雨系統的發展之輸送情形，可用圖 14 來說明。其中，圖 14 a 顯示在最初 600 秒時，

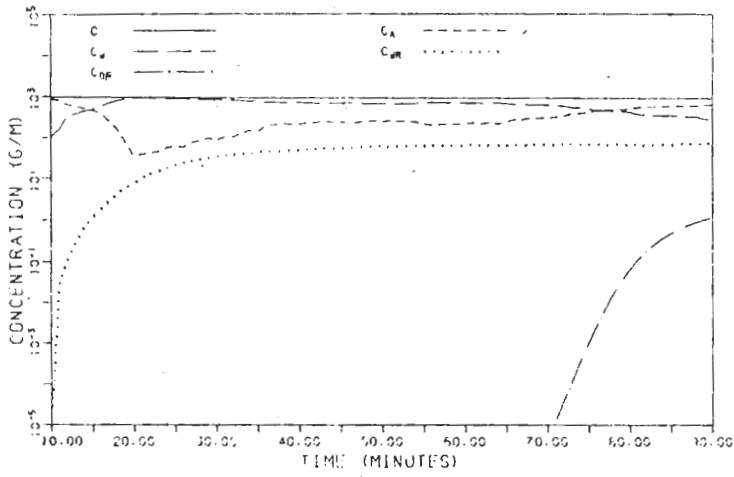


圖 15 在垂直風切較弱之雲雨系統內，SO<sub>2</sub> 隨時間的收支平衡圖，其餘同圖 7。

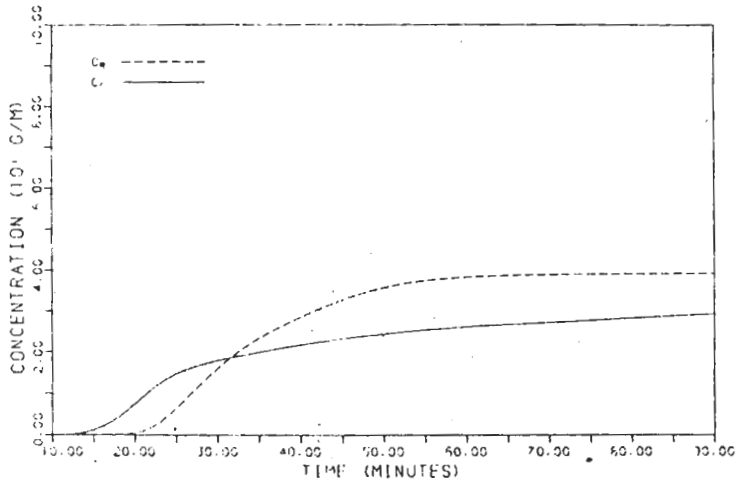


圖 16 在垂直風切較弱之雲雨系統內，其 SO<sub>2</sub> 被雲、雨滴所去除之累積量隨時間的變化情形，其餘同圖 8。

SO<sub>2</sub> 在空間的分布情形和它與雲雨區之相對位置，以及風場之分布情形。此時，最大值之位置位於雲區的正下方，又此刻的雲區剛形成，而無雨滴存在。由於雲、雨滴的迅速發展，至 1200 秒時（圖 14 b），雲區中央有旺盛的上升氣流，而在雲頂附近有向兩側輻散之趨勢，使得 SO<sub>2</sub> 隨著此環流及擴散效應，向上及兩旁擴展。至 2400 秒時（圖 14 c），由於雲、雨滴降落所帶來的下降氣流，阻斷了部分上升氣流，因此在雲區的正下方處，有分裂成兩個之趨勢；而在雲區的右側方處（中層），有輻合氣流存在，使得 SO<sub>2</sub> 在此處有集中之趨勢。隨著時間的演進，在雲區右側方的集中現象更加明顯，如圖 14 d 所示。其後，隨著雲雨系統的衰滅，在高層和近地面的 SO<sub>2</sub> 漸往左、右平流，

至 5400 秒後（圖 14 e），高層和近地面的 SO<sub>2</sub>，因受到環流的影響，而形成帶狀；至於中層 SO<sub>2</sub> 集中的現象仍舊存在，且位置甚少變動。

至於個案 A 之收支平衡圖，可以用圖 15 來說明。比較圖 15 和圖 7 可以發現，由於環境垂直風切的不同，使得 SO<sub>2</sub> 從側邊界所流失的累積量（C<sub>br</sub>），在垂直風切弱之情況比垂直風切強且近地面風速較大的情況下來得小。至 90 分鐘時（5400 秒），流失於側邊界的累積量，僅佔最初總量的 0.12%，而被雲、雨滴所吸收去除的累積量，佔最初總量的 7.15%。若分別探究被雲和雨滴所去除的累積量，隨時間的變化情形，可由圖 16 來表示。在雲雨系統發展前期，由於雨滴不多，因此被雲滴去除的累積量（C<sub>c</sub>）比被雨滴去除的累積量

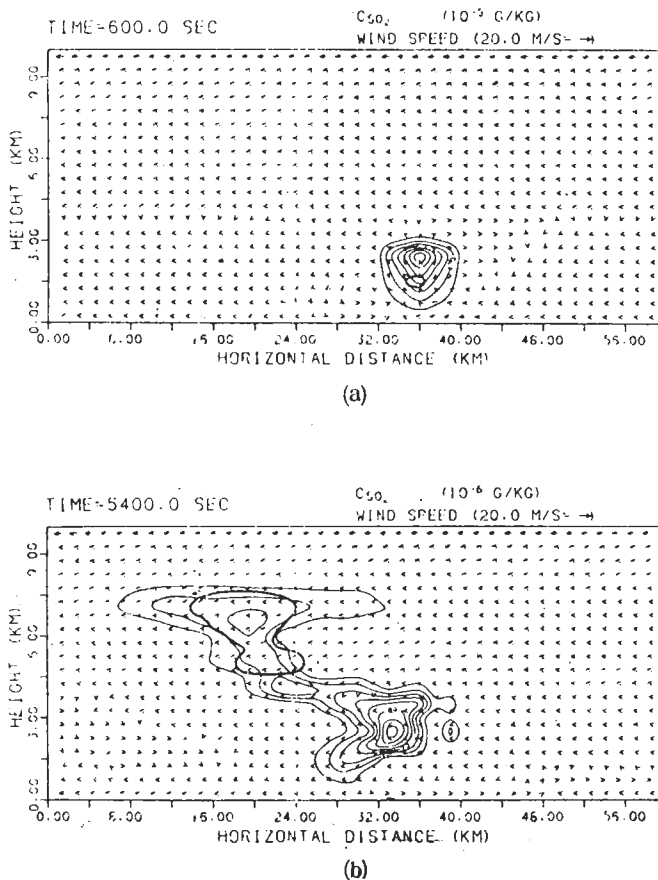


圖 17 同圖 14，但採用 B 個案。(a) 時間為 600 秒，等值線間隔為  $2 \times 10^{-5}$  g/kg。  
 (b) 時間為 5400 秒，等值線間隔為  $5 \times 10^{-6}$  g/kg。

( $C_n$ ) 要來得多。其後由於大量的雨滴產生，因此至 90 分鐘時， $C_n$  是  $C_o$  的 1.3 倍多。

(2) B 個案：

在 B 個案中， $SO_2$  所佔之網格空間位置與 A 個案同，不過其垂直分布却完全相反。最大的  $SO_2$  混合比位於左邊界 36 公里、高度 2.75 公里處，其值為  $150 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，如圖 17 a 所示。此時最大值的位置位於剛形成雲區的正上方。由於受到雲內上升氣流及擴散的影響，使得  $SO_2$  往上及兩旁擴展。至 3600 秒時，在雲區之右側，由於受到上升氣流所帶來的輻合影響，使得此處的  $SO_2$  較為集中。若對照圖 14 d，可以發現此時近地面的  $SO_2$  幾乎沒有。又由於高層有向左的風場存在，因此上層之  $SO_2$  向左平流，形成左上、右下之趨勢。其

後，隨著環流及擴散效應之影響，至 5400 秒時（圖 17 b）， $SO_2$  的分布趨勢與 A 個案類似，只不過中層之  $SO_2$  較為集中且近地面的  $SO_2$  較少罷了。至模擬結束時（5400 秒）， $SO_2$  被雲、雨滴所去除的累積量，佔最初總量的 6.22%。

(3) C 個案：

在此個案中的  $SO_2$ ，其垂直分布和值與 A 個案同，但却比 A 個案較為遠離雲雨區。其最大值位於左邊界 45 公里，高度 0.25 公里處，如圖 18 a。由於較遠離雲雨區，因此流入雲雨區的量就比 A 個案來得少。至 3600 秒時，只有少部分的  $SO_2$  流入雲雨區中，且只侷限在近地面處。其後，受到下降氣流的影響，使得  $SO_2$  無法往上擴展。因此，至 5400 秒後（圖 18 b），大部分的  $SO_2$  幾乎停

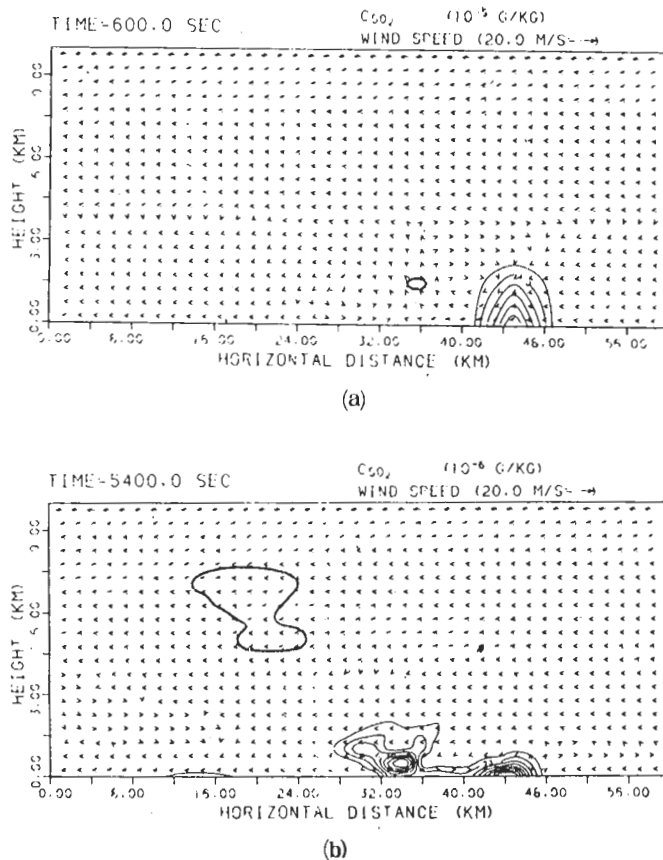


圖 18 同圖 14，但採用 C 個案。(a) 時間為 600 秒。(b) 時間為 5400 秒。等值線間隔 (a) 為  $2 \times 10^{-5} \text{ g}/\text{kg}$ ，(b) 為  $10 \times 10^{-6} \text{ g}/\text{kg}$ 。

滯在近地面處，只有極少部分因擴散的關係而存在雲雨區中。此時，SO<sub>2</sub>被雲、雨滴所去除的累積量，佔最初總量的3.52%。

(4)D個案：

SO<sub>2</sub>的垂直分布與值如同C個案，但最大值却位於左邊界48公里，高度0.25公里處，如圖19a。它隨著雲雨系統的發展之輸送情形如同C個案。由於比C個案較為遠離雲雨區，因此至5400秒時(圖19b)，絕大部分的SO<sub>2</sub>，仍在遠離雲雨區之近地面處。而此時被雲、雨滴所去除的累積量，僅佔最初總量的0.95%。

(5)比較：

綜觀上述四種個案，可以明顯看出流失於側邊界的SO<sub>2</sub>量，在環境垂直風切較弱之情形比較強

之環境風切要來得小。在模擬結束時(5400秒)，被雲、雨滴所去除的百分比，以A個案最高，D個案最低。由此可知，此雲雨系統(環境垂直風切較弱)，對於雲雨區附近的SO<sub>2</sub>比遠離雲雨區的SO<sub>2</sub>，有更大的影響。在雲雨區附近的SO<sub>2</sub>，易被雲內上升氣流而擴展至雲內各角落；但在遠離雲雨區的SO<sub>2</sub>，流入雲雨區的量很少。而此雲雨系統對於SO<sub>2</sub>的垂直分布，似乎沒有多大的影響，因此去除量的百分比(在5400秒後)相差不大。

(6)下邊界擴散至地面的情形

由上述的比較知，A個案的SO<sub>2</sub>被雲、雨滴所去除的量最多，因此吾人以A個案的SO<sub>2</sub>分布及位置，來了解SO<sub>2</sub>從下邊界擴散至地面，對於雲、雨滴去除SO<sub>2</sub>的影響。至5400秒時，SO<sub>2</sub>從

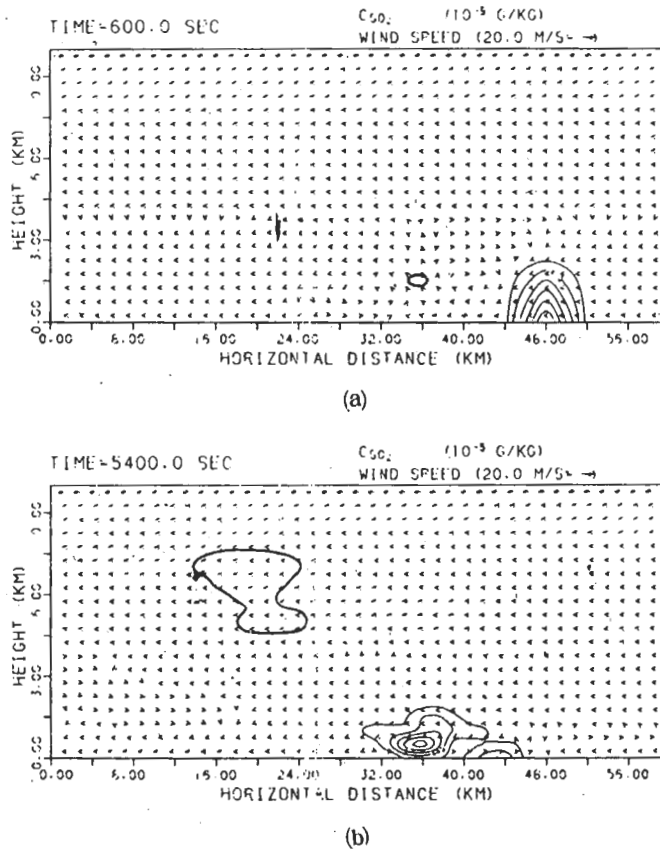


圖 19 同圖 14，但採用 D 個案。(a)時間為 600 秒。(b) 5400 秒。等值線間隔均為  $2 \times 10^{-5}$  g/kg。

下邊界擴散至地面的累積量百分比為 9.44%，而從側邊界流失的累積量百分比為 0.02%，至於被雲、雨滴所去除的累積量百分比為 6.88%，若與 A 個案來比較，可以發現雲、雨滴所去除的百分比相差不多。顯然地，考慮從下邊界擴散至地面的情形，對於  $\text{SO}_2$  的去除影響不大。

#### (7) 不同去除參數值的考慮

Penkett (1979) 有加入  $\text{O}_3$  而求得  $\text{SO}_2$  在水滴中的氧化率，因此我們嘗試利用 A 個案的  $\text{SO}_2$  分布和位置，以 Penkett 之參數值（當  $\text{pH} = 5$  時，氧化率  $K_1 = 2 \times 10^{-3} \text{ S}^{-1}$ ，以 F 個案表示： $\text{pH} = 4$ ， $K_1 = 8.3 \times 10^{-4} \text{ S}^{-1}$ ，以 G 個案表示）來計算  $\text{SO}_2$  的濕除量，並與 A 個案（利用 Fisher 之參數假設， $\text{pH} = 5$ ， $K_1 = 3 \times 10^{-4} \text{ S}^{-1}$ ）來比較。在模擬結束（90 分鐘）後，F 個案中  $\text{SO}_2$  被雲、雨滴所去除的百分比為 36.73%，比 A 個案還高（A 個案之去除百分比為 7.15%），而 G 個案在 90 分鐘後僅為 2.10%，較 A 個案為低。結果顯示不同的參數值，其被雲、雨滴所去除的百分比亦不相同。

## 五、結論與改進

本文以兩種在動力結構上，不盡相同的對流性雲雨系統，來討論  $\text{SO}_2$  的輸送和去除過程。其一為存在於環境垂直風切較強的雲雨系統，另一則為存在於環境垂直風切較弱的雲雨系統。前者所發展出來的雲雨系統，其上升氣流隨高度有明顯的傾斜，因此會使雲雨系統的演變，較為緩慢，從而造成生命期較長，也較為穩定的雲雨系統。反觀後者，所發展出來的雲雨系統，其上升氣流隨著高度沒有明顯的傾斜，以致於雲雨系統內的雲、雨滴，阻礙了上升氣流的發展，造成生命期較短之雲雨系統。

從三、四節的討論中，吾人可以得到以下幾個結論：

①  $\text{SO}_2$  易受到環境垂直風切較強（近地面的風速較大）的影響，使得流出模式側邊界的量極多，相對地流入雲雨區的量較少。反之，在垂直風切較弱的環境內，流失於側邊界的  $\text{SO}_2$  量較少，相

對地流入雲雨區的量較多。因此，間接地造成在模擬結束時，後者比前者要有較高的  $\text{SO}_2$  去除百分比。

② 存在於垂直風切較強的雲雨系統，由於近地面的風速極強，使得集中在近地面的  $\text{SO}_2$  比集中在較上層的  $\text{SO}_2$ ，不但有較多的量在非雲雨區中，而且流失側邊界的量也較多；反倒是模擬開始時相對於雲雨區的遠近，由於處在流入雲雨區的流場中，因此流入雲雨區的  $\text{SO}_2$  量相差不多。相反地，存在於環境垂直風切較弱的雲雨系統，易使近雲雨區的  $\text{SO}_2$  比遠離雲雨區的  $\text{SO}_2$ ，有較大的機會流入雲雨區中，從而間接地影響到  $\text{SO}_2$  的去除效應；反倒是垂直分布對於  $\text{SO}_2$  的輸送和去除相差不多。

③ 考慮  $\text{SO}_2$  從下邊界擴散至地面的情形來看，對於  $\text{SO}_2$  在雲雨系統內的輸送和去除影響不大。主要是由於擴散至地面的  $\text{SO}_2$ ，大部分是由非雲雨區的近地面處而來。

④  $\text{SO}_2$  被雲、雨滴所去除的量與使用的參數值有關。例如：雲、雨滴的  $\text{pH}$  值、氧化率等，都會影響雲、雨滴的吸收率。

⑤ 雨滴去除  $\text{SO}_2$  的量要比雲滴多。這也許是由於吾人假設在雲區外的雨滴和雲內之雨滴，具有同等的吸收率所致。

⑥ Fisher (1982) 利用一度空間的雲雨模式，來計算雲內之雲、雨滴吸收  $\text{SO}_2$  的值，發現雲、雨滴的氧化率為  $2.8 \times 10^{-4} \text{ S}^{-1}$ ，且  $\text{pH} = 4.5$  時，其吸收  $\text{SO}_2$  的量佔最初量的 40%，而  $\text{pH} = 4.5$  時，則為 99%。顯然，吾人所模擬出來的結果比 Fisher 計算的值要低。這是由於在 Fisher 的模式中，全部的  $\text{SO}_2$  都流入雲雨區內，不似本模式有相當多的量在雲雨區外，以致於被雲、雨滴所去除的比例在 Fisher 模式中比吾人所模擬出來的高。

另外，對於酸性雨和  $\text{SO}_2$  的輸送及去除研究，本文只是一個起步工作，有待改進的地方尚多。諸如：

① 去除參數化的問題：由於實際大氣中，包含

各種不同性質的化合物與元素，它們與  $\text{SO}_2$  的化學反應，以及和雲、雨滴的化學氧化過程是很複雜的。例如：在雲、雨滴中， $\text{SO}_2$  可被  $\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$  或  $\text{H}_2\text{O}_2$  等所氧化，而金屬離子的存在，可加速  $\text{SO}_2$  的氧化。除了水相的反應外， $\text{SO}_2$  尚可經由光化學反應，自由基 (free radicals) 及分子氧化等，而轉變至另一型態的硫化物。雖然 Moler (1980) 指出， $\text{SO}_2$  在水相的氧化反應是大氣中  $\text{SO}_2$  轉變至硫酸的主要原因。但是，不可否認的，其他反應 (光化學反應等) 也扮演了重要角色。另外，在模擬時間內，雲、雨滴的 pH 值不是一個常數；以及雲外雨滴的吸收率，不同於雲內的雨滴等。種種有賴進一步的研究。

②雲雨系統的問題：本文只討論對流性的雲雨系統，但非對流性的雲雨系統，對於  $\text{SO}_2$  的輸送及去除具有重要的角色，不能忽視。

③乾除問題：從過去許多的研究 (如 Garland, 1978) 指出，乾除對於  $\text{SO}_2$  的去除，扮演了一個極重要的角色。Scott (1982)、Kimura (1983) 就曾在模式中加入了乾除效應。根據 Garland (1978) 認為  $\text{SO}_2$  的沉積速率，平均約為  $0.8 \text{ m/s}$ ，雖然此值在短時間內，對於  $\text{SO}_2$  的去除影響不大，但是若模擬時間較久，則必須考慮此去除過程。

④  $\text{SO}_2$  的觀測值問題，由於觀測網的限制，無法確切了解  $\text{SO}_2$  在實際大氣中的分布情形和濃度的多寡，故無法和實際比較。

⑤二維模式的限制： $\text{SO}_2$  的輸送和去除情形，在二維模式中，只能做粗略的估計，而不能做精確的評估。因此，有賴於發展三維的模式來研究。

⑥未考慮  $\text{NO}_x$ ： $\text{NO}_x$  也是造成酸性雨的主要來源之一，因此，對於  $\text{NO}_x$  在雲雨系統中的輸送和去除過程，以及  $\text{SO}_2$  加入  $\text{NO}_x$  之後的輸送和去除情形，有賴進一步研究。

## 致 謝

本研究在國家科學委員會 NSC—72—0202—M008R—08 專題研究的資助，及國立中央大

學電子計算機中心和遙感探測中心多方面的協助下，使本文得以順利完成，謹表謝忱。

## 參考文獻

- 陳景森、林煥閔，1983a：風暴的二維數值模式之研究。大氣科學，10，55—66。
- 陳景森、林煥閔，1983b：風暴數值模式的側邊界條件之研究。國立中央大學地球物理學刊，24，57—76。
- 王建國，1984：雲雨系統內二氧化硫的輸送及去除之數值研究。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文。
- Fisher, B. E. A., 1982: The transport and removal of sulphur dioxide in a rain system. Atmospheric Environment, 16, 775-783.
- Galloway, J. N., G. E. Likens and E. S. Edgerton, 1976: Acid precipitation in the northeastern United States: pH and acidity. Science, 194, 722-724.
- Garland, J. A., 1978: Dry and wet removal of sulphur from the atmosphere. Atmospheric Environment, 12, 349-362.
- Hales, J., 1982: Mechanistic analysis of precipitation scavenging using a one-dimensional, time-variant model. Atmospheric Environment, 16, 1775-1783.
- Hales, J. M., 1972: Fundamentals of the theory of gas scavenging by rain. Atmospheric Environment, 6, 635-659.
- Hane, C. E., 1978: Scavenging of urban pollutants by thunderstorm rainfall: numerical experimentation. J. Appl. Meteor., 17, 699-710.
- Hill, F. B. and R. F. Adamowicz, 1977: A model for rain composition and the washout of sulfur dioxide. Atmospheric Environment, 11, 917-927.
- Junge, C. E. and T. G. Ryan, 1958: Study of the  $\text{SO}_2$  oxidation in solution and its role in atmospheric chemistry. Quart. J. R. Meteor. Soc., 84, 46-55.
- Kimura, F., 1983: A numerical simulation of local winds and photochemical air pollution (I): two-dimensional land and sea breeze. J. Meteor. Soc. Japan, 61, 862-878.
- Larsow, T. V., N. R. Horike and Harrison, 1978: Oxidation of sulfur dioxide by oxygen and ozone in aqueous solution: a kinetic study with significance to atmospheric rate processes. Atmospheric Environment, 12, 1597-1611.

- Liljestrand, H. M. and J. J. Morgan, 1982: Chemical source, equilibrium and kinetic models of acid precipitation in southern California. Energy and Environmental Chemistry, Vol. 2, "Acid rain", L. H. Keith, ed., Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan, 103-123.
- Mckay, H. A. C., 1971: The atmospheric oxidation of sulphur dioxide in water droplets in presence of ammonia. Atmospheric Environment, 5, 7-14.
- Müller, D., 1980: Kinetic model of atmospheric  $\text{SO}_2$  oxidation based on published data. Atmospheric Environment, 14, 1067-1076.
- Overton, J. H., Jr. and V. P. Aneja, 1979: Production of sulfate in rain and raindrops in polluted atmospheres. Atmospheric Environment, 13, 355-367.
- Penkett, S. A., B. M. R. Jones, K. A. Brice and A. E. J. Eggleton, 1979: Importance of atmospheric ozone and hydrogen peroxide in oxidizing sulphur dioxide. Atmospheric Environment, 13, 123-138.
- Reda, M., Y. Adewuyi and G. R. Carmichael, 1982: The influence of gas scavenging of trace gases on precipitation acidity. Energy and Environmental Chemistry, Vol. 2, "Acid rain", L. H. Keith, ed., Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Michigan, 263-285.
- Scott, B. C., 1982: Predictions of in-cloud conversion rates of  $\text{SO}_2$  to  $\text{SO}_4$  based upon a simple chemical and kinematic storm model. Atmospheric Environment, 16, 1735-1752.
- Scott, W. D. and P. V. Hobbs, 1967: The formation of sulfate in water droplets. J. Atmos. Sci., 24, 54-57.
- Seymour, M. D. and T. Stout, 1983: Observations on the chemical composition of rain using short sampling times during a single event. Atmospheric Environment, 17, 1483-1487.
- Shir, C. C. and L. J. Shieh, 1975: Development of urban air quality simulation model with compatible raps data. EPA-600/4-75-005-a, Meteorology Laboratory U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park, N.C..
- Smolarkiewicz, P. K., 1983: A simple positive definite advection scheme with small implicit diffusion. Mon. Wea. Rev., 111, 479-486.
- Van Den Heuval, A. P. and B. J. Mason, 1963: The formation of ammonium sulfate in water droplets exposed to gaseous sulphur dioxide and ammonia. Quart. J. R. Meteor. Soc., 89, 271-275.

## A Numerical Study of Transport and Removal of Sulfur Dioxide in Cloud System

Chien-Kuo Wang

Ching-Sen Chen

Institute of Atmospheric Physics, National Central University

### ABSTRACT

An attempt to study the effect of cloud dynamic on the transport and removal of  $\text{SO}_2$  by cloud-water and rain-water is made by coupling a two-dimensional cloud model with a continuity equation of  $\text{SO}_2$ . We employ a positive definite finite difference method developed by Shir and Shieh (1975) to solve the advection term of  $\text{SO}_2$ . The parameterization of the removal of  $\text{SO}_2$  by cloud and rain is similar to that of Fisher (1982).

Two different types of cloud system were examined in this simulation study. One had large vertical shear of horizontal wind in the low layer and the other had small one. Large difference about the depletion of  $\text{SO}_2$  from cloud and rain system was attributed to the internal dynamic structure of cloud system, the relative position of the initial distribution of  $\text{SO}_2$  with respect to cloud system, and the transport of  $\text{SO}_2$  due to ambient wind.