

大气中硫污染物的干沉降模式*

高会旺

黄美元

(青岛海洋大学物理海洋所, 青岛 266003) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

管玉平

林一骅

(青岛海洋大学物理海洋所, 青岛 266003) (中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

摘要 建立了计算 SO_2 和硫酸盐气溶胶干沉降速度的数值模式。模式中考虑了气象条件、下垫面特征等因素对不同污染物干沉降速度的影响。并利用该模式计算了典型下垫面上 SO_2 和 SO_4^{2-} 的干沉降速度, 其变化范围分别为 0.2—1.0cm/s 和 0.1—0.8cm/s, 与文献给出的结果对比表明, 该模式用于计算硫污染物的干沉降速度是可行的。最后给出了包括我国大部分地区白天和夜晚的硫污染物干沉降速度的区域分布。

关键词 硫污染物, 干沉降, 干沉降速度, 数值模式, 大气。

与降水过程无关的污染物从大气向地面做

征共同决定。

质量转移的过程称为干沉降过程。同湿沉降相比, 虽没有湿沉降那么集中, 但因其作用时间长, 作用地域广, 其总效果与湿沉降相当。70年代以后, 一些观测资料证实了这一点, 也建立了一些模式并估算出了干沉降量^[1]。干沉降速度是表述干沉降的重要参数。在早期的研究中, 一般取干沉降速度为常数, 近年来借助建立干沉降模式, 使得对干沉降过程的描述更加合理。国外已做了不少工作, 但国内的研究还不多。本研究设计一个干沉降模式, 用于计算 SO_2 和 SO_4^{2-} 的干沉降速度。

这里的干沉降模式是作为硫污染物输送转化模式的子模式设计的, 考虑到我国计算机资源的限制, 干沉降模式力求简洁而又包括主要的物理过程。

1.1 SO_2 气体在干沉降过程中受到的阻力

利用微气象关系, 空气动力学阻力的表达式为:

$$r_a = \frac{\ln(Z/Z_0) - \Psi_c}{ku^*} \quad (\text{陆地和冰冻地表}) \quad (2)$$

$$r_b = \frac{5S^{\frac{2}{3}}}{u^*} \quad (\text{非雪面、非水体}) \quad (3)$$

$$r_a + r_b = \frac{\ln(\frac{ku^*Z}{D}) - \Psi_c}{ku^*} \quad (\text{水体}) \quad (4)$$

u^* 是摩擦速度, k 为 Von Karman 常数, Ψ_c 为污染物的稳定度相关函数, Z_0 为表面粗糙度,

干沉降速度的大小随大气状态、污染物种类及下垫面类型而不同。为解释这种不同, 发展了一系列干沉降模式, 多数以阻力模型为基础^[2]。阻力模型假定污染物的干沉降速度与其受到的阻力成反比。

$$v_d = (r_a + r_b + r_s)^{-1} \quad (1)$$

其中 $r_a + r_b$ 合称为大气阻力, 表示了大气条件对沉降物的作用, r_a 为空气动力学阻力, 表示表层以上湍流混合的作用, r_b 称为附加边界层阻力(副层阻力), 表示表层内的湍流混合和分子扩散的共同作用。 r_s 为表面阻力(覆盖层阻力), 由沉降物及下垫面的化学、物理及生物特

* 国家“八五”科技攻关项目(85-912-01-03)
收稿日期: 1997-05-08

其值随下垫面而不同. Z 为高度, D 为气体的分子扩散系数. S_e 为 Schmidt 数.

对于在雪面、冰冻的水体和冬季的沼泽、草地和耕地上沉降的附加边界层阻力 r_b , Barry^[6] 试验发现 $r_b = 2.0$. 这方面的观测较少, 本文也取这个值.

稳定性相关函数 Ψ_e 表示如下:

$$\text{稳 定 } (0 < \frac{Z}{L} < 1) : \Psi_e = -5 \frac{Z}{L} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{不稳定 } (-1 < \frac{Z}{L} < 0) : \Psi_e = \exp \left[0.598 + 0.390 \ln \left(\frac{Z}{L} \right) - 0.090 \ln \left(-\frac{Z}{L} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{中 性 } (\frac{Z}{L} = 0) : \Psi_e = 0 \quad (7)$$

L 为 Monin-Obukov 长度.

$$L = \frac{\theta_{vg} u_*^3}{k g H} \quad (8)$$

θ_{vg} 为地面的虚位温, H 为大气最低层的虚位温通量.

表 1 SO_2 在各种下垫面沉降时所受到的表面阻力 r_s

下垫面类型	冬 季		春 季		夏 季		秋 季	
	夜	昼	夜	昼	夜	昼	夜	昼
针叶林	10.0	2.0	10.0	2.0	10.0	2.0	10.0	2.0
落叶林	20.0	20.0	3.0	7.0	2.0	7.0	5.0	10.0
耕 地	7.0	7.0	0.0	0.0	4.0	4.0	2.0	2.0
草 地	7.0	7.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0
城 市	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
沼 泽	7.0	7.0	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0
水 域	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
雪 / 冰	7.0	7.0						

1.2 SO_4^{2-} 气溶胶在干沉降过程中受到的阻力 SO_4^{2-} 的 r_a 同 SO_2 的 r_a .

r_b 为一常数, 其值随季节、昼夜和下垫面类型而不同^[5], 见表 2. 对于各种下垫面, 假定都

$$u^* = \frac{ku}{\ln(Z/Z_0)} \left[\frac{1}{(1 + 4.7R_b)} \right] R_b > 0 \quad (9)$$

$$u^* = \frac{ku}{\ln(Z/Z_0)} \left[1 - \frac{9.4R_b}{(1 + 7.4B)} \right]^{1/2} R_b < 0 \quad (10)$$

$$H = \frac{u \Delta \theta}{0.74} \left[\frac{k}{\ln(Z/Z_0)} \right]^2 \left[\frac{1}{(1 + 4.7R_b)^2} \right] R_b > 0 \quad (11)$$

$$H = \frac{u \Delta \theta}{0.74} \left[\frac{k}{\ln(Z/Z_0)} \right]^2 \left[1 - \frac{9.4R_b}{(1 + 5.3)B} \right] R_b < 0 \quad (12)$$

$$B = 9.4 \left[\frac{k}{\ln(Z/Z_0)} \right]^2 \left[\frac{|R_b|}{Z/Z_0} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$\Delta \theta = \theta_{va} - \theta_{vg}$, R_b 为总体理查逊数. θ_{va} 为 Z 高度处的虚位温, u 为 Z 高度处的风速.

表面阻力 r_s 为随季节、昼夜和下垫面类型变化的常数^[5], 见表 1.

有 $r_s = 0$. 即降落到地面的粒子全部被地面吸附. 这一假定与 Hicks 的实验和理论分析结果一致^[7].

表 2 SO_4^{2-} 粒子受到的副层阻力 r_b

下垫面类型	冬 季		春 季		夏 季		秋 季	
	夜	昼	夜	昼	夜	昼	夜	昼
针叶林	1.4	3.0	1.4	3.0	1.4	3.0	1.4	3.0
落叶林	10.0	20.0	3.0	6.0	1.0	2.0	2.0	4.0
耕 地	10.0	25.0	5.0	10.0	3.0	6.0	5.0	10.0
草 地	10.0	25.0	4.0	6.0	3.0	6.0	3.0	6.0
城 市	20.0	40.0	6.0	12.0	2.0	4.0	4.0	8.0
沼 泽	10.0	25.0	3.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0
水 域	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
雪 / 冰	10.0	25.0						

2 干沉降速度的计算结果

以 1992-06-13 GMT00 时的气象场为初始场, 利用一个改进的中尺度数值预报模式^{*} 计算得到了 95°E—125°E, 20°N—40°N 范围内

24h 的气象场。在模式的最低层(平坦地区约为 30m), 利用干沉降模式计算了每 h 的 SO₂ 和 SO₄²⁻ 干沉降速度。将同一下垫面类型的 SO₂ 和 SO₄²⁻ 干沉降速度对时间作平均, 得到了日平均的干沉降速度, 见表 3。

表 3 几种典型下垫面的 SO₂ 和 SO₄²⁻ 的干沉降速度/cm · s⁻¹

下垫面类型	农 田	草 地	树 林	湿 地	水 体
$v_d(SO_2)$	0.60	0.35	0.54	0.60	0.90
$v_d(SO_4^{2-})$	0.40	0.39	0.42	0.68	0.40
典型值 $v_d(SO_2)$	0.4—0.8 ^[1]	0.33 ± 0.3 ^{[1][1]}	0.426 ^[8]	0.37 ^[12]	0.5 ± 0.1 ^{[1][1]}
典型值 $v_d(SO_4^{2-})$	0.60 ^[12]	0.4 ^[13]	0.5 ^[2]	0.90 ^[12]	0.4 ± 0.2 ^[14]

Fowler 给出了农田上 SO₂ 的干沉降速度为 0.4—0.8cm/s。本文计算的农田上的平均干沉降速度为 0.6cm/s。毛节泰等^[8]分析了江西南昌市郊的观测结果, 测点的下垫面为低矮的树木, 1993-11 和 1994-06 2 次观测的 SO₂ 的平均干沉降速度分别为 0.12 和 0.426cm/s。本模式计算的树林下垫面上的平均干沉降速度为 0.54cm/s, 与 6 月的观测结果比较一致。水体上 SO₂ 的干沉降速度的测量值差别较大,

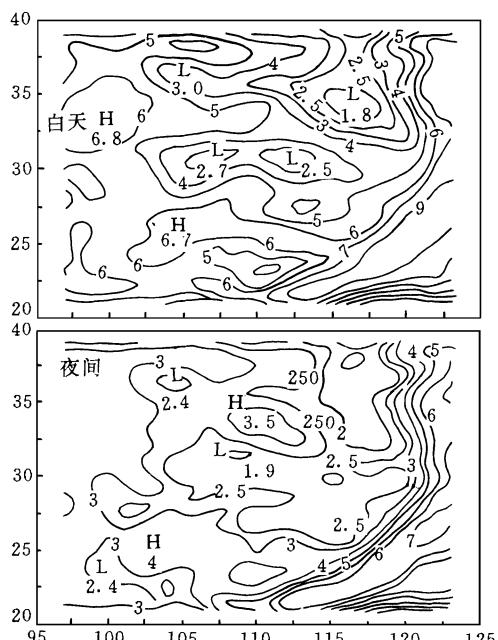


图 1 SO₂ 干沉降速度的分布 × 10⁻¹/cm · s⁻¹

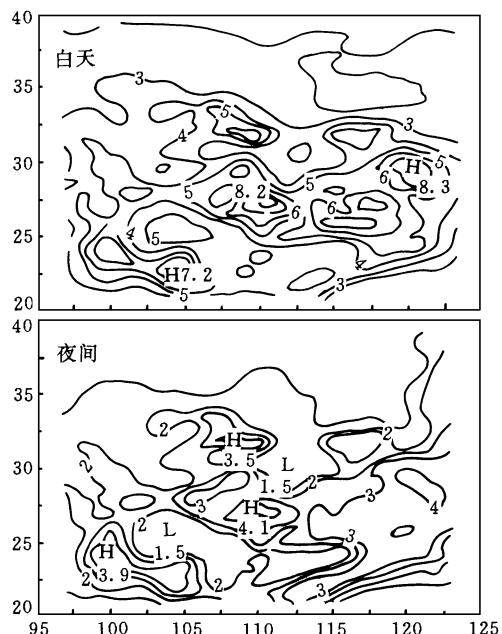


图 2 SO₄²⁻ 粒子干沉降速度的分布 × 10⁻¹/cm · s⁻¹

Owers^[9]给出 0.5 ± 0.1cm/s, 而 Whelpdale^[10]却测到了 2.2cm/s。这说明水体上的干沉降速度对气象背景、测量手段和仪器等条件比较敏感。模式计算的水体上 SO₂ 的干沉降速度为 0.9cm/s 也应是合理的, 可用于硫污染物干沉降过程的描述。图 1 给出了中午 12:00 和晚上 24:00 SO₂ 的干沉降速度分布, 可见 SO₂ 干沉

* 高会旺. 东亚地区硫沉降的数值模拟研究. 中国科学院大气物理研究所博士论文, 1995

降速度在不同地区,随不同时间而不同,一般水域大于陆地,白天大于晚上。其变化范围为0.2—1.0cm/s。图2为 SO_4^{2-} 在中午12:00和晚上24:00的干沉降速度分布。 SO_4^{2-} 的干沉降速度随时间和下垫面而不同,白天大于晚上,陆上分布的不均性由下垫面条件和气象条件不同所造成。其变范围为0.1—0.8cm/s。

3 结论

本研究建立了计算 SO_2 和硫酸盐气溶胶粒子干沉降速度的数值模式,模式中考虑了气象因子、下垫面特征对不同污染物干沉降速度的影响。然后利用该模式计算了典型下垫面上的 SO_2 和 SO_4^{2-} 的干沉降速度及其区域分布。 SO_2 的干沉降速度一般为0.2—1.0cm/s, SO_4^{2-} 粒子的干沉降速度为0.1—0.8cm/s。干沉降速度数值模式的建立将为硫污染物输送转化模式的研究提供条件。

参 考 文 献

- 1 Fower D. Dry deposition of SO_2 on agricultural crops. *Atmos. Environ.*, 1978, **12**(2): 349—373
- 2 Wesly M L and Hicks B B. Dry deposition and emission of small particles at the surface of the earth, Proc. Forth Symp. on Turbulence Diffusion and Air Quality. Am. Met. Soc., Boston: MA, 1979: 510—513
- 3 Carmichael G R and Peters L K. An Eulerian Transport/transformation/removal model for SO_2 and sulfate I. Model development. *Atmos. Environ.*, 1984, **18**(5): 937—951
- 4 Chang J S et al. A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(D12): 14681—14700
- 5 Voldner E C et al. A literature review of dry deposition of oxides of sulfur and nitrogen with emphasis on long-range transport modelling in north America. *Atmos. Environ.*, 1986, **20**(11): 2101—2123
- 6 Barry P J and Munn R E. Use of radioactive tracers in studying mass transfer in the atmosphere boundary layer, boundary layers and turbulence. *The physics of Fluids Supplement-A ECL-2577*, 1967: S263—S266
- 7 Hicks B B and Garland J A. Overview and suggestion for future research on dry deposition. *Precipitation. Scavenging. Dry Deposition and Resuspension*. New York: 1983: 1429—1432
- 8 毛节泰,胡新章.我国南昌大气若干污染物干沉降速度的测量.气象科技,1996,(2):36—42
- 9 Owers M J and Powell A W. Deposition velocity of sulfur dioxide on land and water using a ^{35}S method. *Atmos. Environ.*, 1974, **8**(1): 63—67
- 10 Whelpdale D M and Shaw R W. Sulfur dioxide removal by turbulent transfer over grass, snow and water surfaces. *Tellus*, 1974, **26**(2): 195—204
- 11 Neumann H H and Den Hartog G. Eddy correlation measurements of atmospheric fluxes of ozone, sulphur and particulates during the Champaign intercomparison study. *J. Geophys. Res.* 1985, **90**(D1): 2097—2110
- 12 桑建国等.大气扩散的数值计算.北京:气象出版社,1992: 195—197
- 13 Hicks B B et al.. An experimental study of sulfur and NO_x fluxes over grassland. *Boundary-Layer Meteorol.*, 1986, **34**(1): 103—121
- 14 Prraham L P, Torp U and R M Stern. Deposition and transformation rate of sulphur oxides during atmospheric transport over the Atlantic. *Tellus*, 1976, **28**(4): 355—372

Abstracts**Dry Deposition Model for Sulfur Pollutants.**

Gao Huiwang et al. (Institute of Physical Oceanography, Ocean Univ. of Qingdao, 266003) : *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 1—4

A dry deposition model for sulfur pollutants is developed, in which the effects of atmospheric conditions and surface types on the dry deposition velocity are considered. The dry deposition velocities of SO_2 and SO_4^{2-} are calculated over several typical land categories. The dry deposition velocities of SO_2 and SO_4^{2-} vary from 0.2—1.0 cm/s and 0.1—0.8 cm/s respectively. This dry deposition model is one of the bases of the study of Sulfur Deposition Model.

Keywords: sulfur pollutant, dry deposition velocity, numerical model, atmospheric.

Calculation of Critical Loads for Acid Deposition with the Simple Mass Balance Method.

Xie Shaodong, Hao Jiming et al. (Dept. of Environ. Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084) : *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 5—8

Based on criteria of plant response, soil stability, aluminum concentration, alkalinity and pH, critical loads of acid deposition for all kinds of red earth in Liuzhou area were calculated by using the simple mass balance method. The results indicate the following: sandy red earth, red sandy soil, fluvo-aquic sandy soil, middling-erosion red earth and fluvo-aquic sandy red earth have lower critical load values of acid deposition, cinnamon red earth and infant red earth have higher values; in order to protect 95% of the Liuzhou soil area from effects of acid deposition, critical loads of acidity, potential acidity, sulfur deposition and nitrogen deposition for red earth are $1.8 \text{ keq} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $1.9 \text{ keq} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $0.70 \text{ keq} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $1.5 \text{ keq} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively; critical load of acidity for surface water is $0.80 \text{ keq} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

Keywords: acid deposition, critical load, red earth, simple mass balance method, Liuzhou Area.

Fourier Transform Infrared Transmission Spectroscopic Analysis of Bisulfate in Ambient Aerosols.

Liang Yongmei, Wan Meirong et al. (State Key Lab of Environ. Simulation and Pollution Control, Peking University, Beijing 100871) , *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 9—12

This paper described the difference about IR absorption between sulfate and bisulfate, and chose the $750\text{--}500\text{cm}^{-1}$ as quantitative analysis range for sulfate and bisulfate. Sulfate and bisulfate in aerosol samples which collected from Zhong Guancun, Beijing in 1994—1995, prepared by pressing into KBr pellets, were analyzed using fourier transform infrared (FTIR) transmission spectroscopy. Analysis results is $2.56\text{--}60.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $ND\text{--}5.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ in terms of sulfate and bisulfate, respectively. The method presented in this paper offers a direct quantitative analysis for bisulfate.

Keywords: aerosols, bisulfate, FTIR quantitative analysis, Zhong Guancun Region, atmospheric determination.

Use of Stable Isotope for Evaluating Washout Process in Summer at Mingnan Area.

Yao Xiaohong et al. (Dept. of Environ. Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084) : *Chin. J. Environ. Sci.*, **18**(6), 1997, pp. 13—15

The stable isotope was used for evaluating washout process in summer at Mingnan Area. Abundance ratio of stable isotope of rainwater was determined in summer at Mingnan. It was found that there was a large isotope fraction in rainwater, but the value of $\delta D / \delta ^{18}\text{O}$ was stable within common cloud, and which could be used as characteristic variation to distinguish source of rainwater. According to analysis of sulfur isotope, if ratios of sulfur isotope were negative in both aerosol and SO_2 , it would be abundant ^{34}S in rainwater. A stable isotope model was used to study washout process, the result showed that ratios of rainout and washout sulfur in begining are 19.5%, 80.5% respectively, then the ratio become 32.3%, 57.7%, the ratio are 53%, 47% in the end. The ratios of two processes were almost equal in