

关于我国和东亚酸性物质的输送研究*

II. 硫化物浓度空间分布特征及季节变化

王自发 黄美元 高会旺 安俊岭

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 应用硫化物输送三维欧拉实用模式, 计算和分析了我国和东亚地区二氧化硫和硫酸盐粒子的空间分布特点及季节变化, 给出了年平均硫化物大气含量分布, 还讨论了四种典型下垫面硫化物浓度的垂直分布廓线。结果表明, 近地层硫化物浓度分布与排放源的分布类似, 高值区主要在山东半岛及相邻的华北部分地区和四川盆地, 在上海, 台南, 汉城和东京等地是小范围的高值区。地面浓度冬季大, 夏季浓度小。高空分布形势与低层不同, 由西南-东北走向变为东西走向。硫酸盐粒子分布高值中心少且平滑。夏季分布更加均匀化。年平均硫酸盐大气含量高值区主要集中在江淮流域, 向海上延伸距离较远。四类地区硫化物垂直廓线反映了不同季节外来输送贡献。

关键词 硫化物 空间分布 大气含量 垂直廓线

1 引言

空气中硫污染物的多少直接影响人类的健康, 空气中硫化物浓度是环保中反映各地污染状况一个重要因子。模式计算是研究区域酸性污染物浓度、沉降和输送的有效工具。它不仅有助于了解硫污染物的空间分布和跨边界输送态势, 可为研究人为气溶胶(如硫酸盐粒子)的气候效应提供初始浓度场或硫化物大气含量分布场, 而且可以预测未来的变化趋势并为经济可持续发展战略中控制污染源的排放提供科学依据。在西欧和北美开展了许多模式计算^[1~4], 讨论了硫化物浓度分布及地区之间的输送。近年来对我国和东亚地区的硫污染物浓度分布也有一些研究^[5~11], 但主要计算了一些典型天气条件下和特定地域或特定区域的浓度分布。因此有必要较详细地研究和计算我国和东亚地区硫污染物浓度的时空分布。

本文使用的三维欧拉型污染物长距离输送实用模式^[12~15]介于同类简单模式和复杂模式之间, 比较详细地考虑了源、输送、干、湿沉降、气、液相化学过程。用分裂解法对气相化学过程进行查表式处理。通过模式的灵敏度试验, 模式具有较高的分辨率和灵敏度。根据与实测资料对比, 模式有较好的可信度。模式的详细构造参见文献^[15]。排放源中国大陆部分使用国家环保局公布的数据, 其他部分取自 Akimoto^[16]的资料。使用欧洲中期数值预报中心的气象资料(ECMWF)作为模式的输入场, 应用该模式研

1996-05-22 收到, 1997-06-13 收到修改稿

* 本研究部分为国家“八五”科技攻关项目, 得到中国科学院“九五”重大项目 KZ951-A1-403-03-03 及大气边界层物理和大气化学国家重点实验室“百人计划”的资助

究了长时间我国和东亚地区硫化物浓度空间分布特征。

2 硫化物浓度的空间分布及季节变化

2.1 年平均浓度分布

图 1 分别是近地面层 (70 m) 和高空 (4 km) 年平均 SO_2 浓度水平分布图。近地面层 SO_2 与排放源的分布类似, 高值区主要有: 山东半岛及华北地区, 该地区范围最大, 强度最强; 以重庆、成都为中心的四川盆地地区; 上海、台南、汉城、东京等地的小范围高值区。随高度的增大分布越平滑。1 km 上空两个强度较大的区域 (山东半岛、四川盆地) 已连为一个狭长的从西南到东北的高值区, 并且在西安附近上空形成一个较强的高值中心。高空的分布形势已发生改变, 有西南-东北走向变为从西向东走向。高值区也向南推移, 呈现在西南地区、长江以北、黄河以南的广阔地区, 向东抵达朝鲜半岛及日本九州。四川盆地的浓度普遍高于山东半岛。

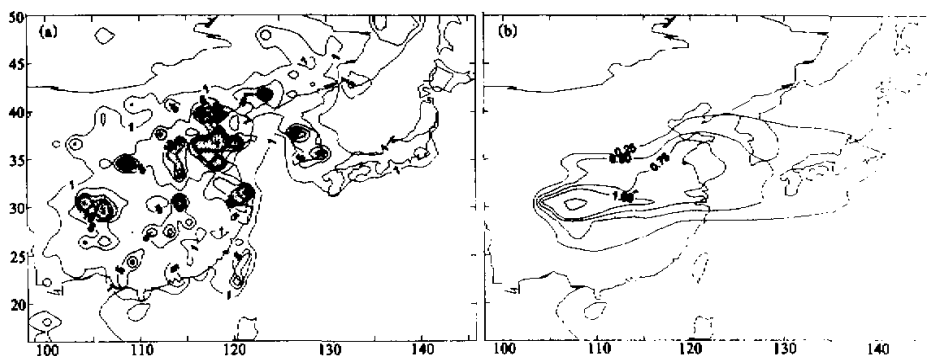


图 1 年平均 SO_2 浓度水平分布 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
(a) 近地面层 (70 m), (b) 高空 (4 km)

近地面层 (70 m) 和高空 (4 km) 年平均 SO_4^{2-} 浓度水平分布见图 2。地面层 SO_4^{2-} 高值区分布主要有两个, 一个是从河北经山东、江苏到浙江的东部沿海地区; 另一个是以四川盆地为中心向东向南扩展到湖北、湖南和贵州, 另外在汉城、东京、台湾有一些小中心。福建、江西、浙江的浓度较小。1 km 上空西南-东北走向的格局更加明显, SO_4^{2-} 的浓度值的大小和低层差不多, 以山东半岛为中心的纺锤形高值区范围更大, 并且与四川盆地的高值区连为一体。高空浓度分布形势更加趋于均一化, 并向南有所推移。2 mg/m^3 的等值线已向东远远延伸到了日本。在这块地区高空 SO_4^{2-} 的浓度大于低层。高浓度分布从四川盆地向东到长江中下游地区。

2.2 硫化物浓度分布的季节变化

低层 SO_2 浓度分布与源强的关系密切, 浓度值随季节变化 (图 3a, b), 冬季地面浓度高于夏季, 高值中心分布成片。夏季浓度高值中心小且孤立, 高空 SO_2 主要分布在四川盆地、江淮流域上空。夏季分布明显不同, 从四川盆地经山西、山东、渤海到朝

鲜半岛和日本中部。

图 3c、d 分别给出了冬季和夏季 SO_4^{2-} 低层浓度分布。冬季硫酸盐浓度高值区呈片状分布, 其分布型反映了西北风的输送作用, 有两个大的中心: 四川盆地及华东地区。夏季高值区呈点状分布, 孤立的中心很多。春秋的情况介于冬夏之间。4 km 高度

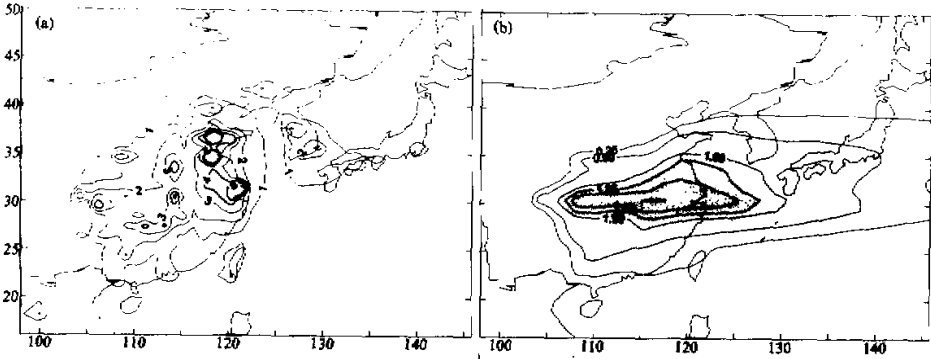


图 2 年平均 SO_4^{2-} 浓度水平分布 (mg/m^3)
(a) 近地面层 (70 m), (b) 高空 (4 km)

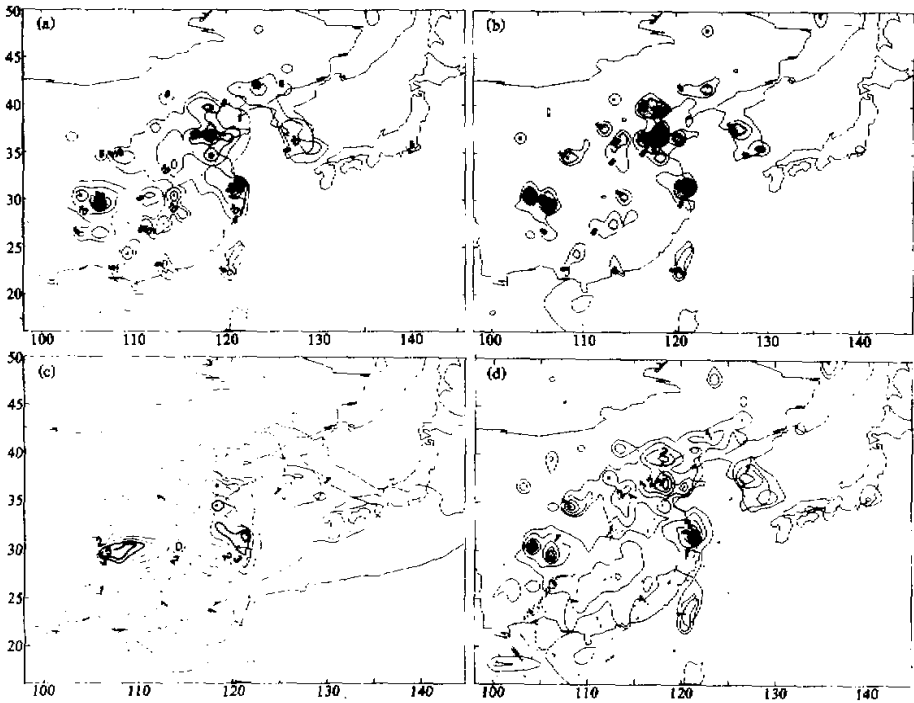


图 3 近地面层 (70 m) 年平均 SO_2 、 SO_4^{2-} 浓度分布季节变化 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
(a) 冬季 SO_2 , (b) 夏季 SO_2 , (c) 冬季 SO_4^{2-} , (d) 夏季 SO_4^{2-}

SO_4^{2-} 浓度季节变化很明显。冬季高值区呈带状, 主要分布在长江流域。夏季 SO_4^{2-} 浓度分布为西南—东北走向, 有四川盆地、陕西、山东半岛至朝鲜中部等三个中心。

3 硫化物大气含量分布

单位面积空气柱中所含硫化物的质量定义为大气硫化物含量 (M), 单位为 mg/m^2 。数学表达式可写为

$$M = \int_0^{\infty} C(z) dz,$$

其中 $C(z)$ 为硫化物浓度分布, z 为高度。该物理量反映了大气中硫化物的整体含量, 其水平分布为研究人为硫化物 (如硫酸盐粒子) 的辐射、气候效应提供输入场, 因而有着重要的作用。

图 4 分别为东亚地区年平均硫化物、 SO_2 和 SO_4^{2-} 大气含量分布。硫化物大气含量高值区主要分布在长江流域、淮河流域、华北、朝鲜半岛及日本西北地区, 高值中心在四川盆地及武汉、上海及江苏、山东半岛及朝鲜半岛, 以山东半岛及四川盆地强度最大。 SO_2 的大气含量分布与排放源的分布基本一致, 说明 SO_2 输送不远, 基本上以本

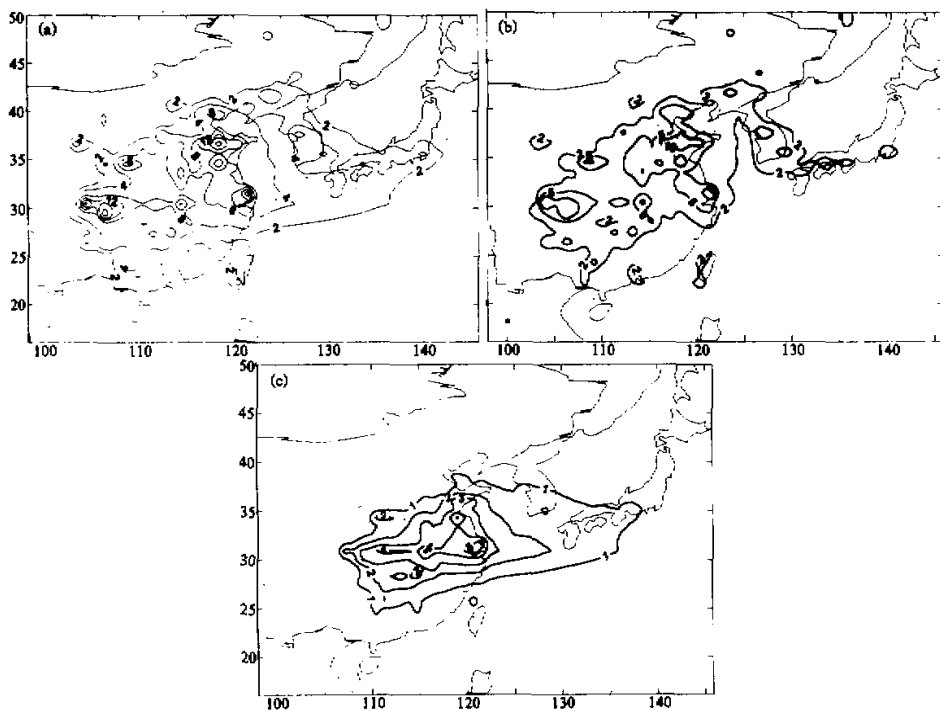


图 4 东亚地区年平均硫化物、 SO_2 、 SO_4^{2-} 大气含量分布 (mg/m^2)
(a) 硫化物总量, (b) SO_2 , (c) SO_4^{2-}

地源为主, 目前仅影响到渤海、黄海。硫酸盐的大气含量高值主要分布在长江中下游地区、山东半岛、韩国及日本南部。高值区比较集中在沿长江地带。等值线向海洋伸展距离较长, 说明了硫酸盐的输送作用较强。

4 典型地区硫化物浓度垂直分布廓线

在分析了 SO_2 和 SO_4^{2-} 浓度的水平分布特点的基础上, 根据下垫面和排放源的状况分为四类: 城市地区、山区和林区、平原和沙漠地区、海洋地区, 分别得出了这四类地区的 SO_2 和 SO_4^{2-} 浓度的不同季节的垂直廓线 (图 5), 它们清楚地表明了不同类型地区的硫污染物的空间分布的平均状况和季节变化特点。

由于模式的网格点为 $1^\circ \times 1^\circ$, 远大于城市的面积, 一般来说, 城市的污染物的浓度比郊区要高得多, 因而模式模拟出的包含城市的网格点上的硫化物的浓度值必然小于城市的常规监测值。从北京、东京各季节 SO_2 和 SO_4^{2-} 高度廓线可以看出, SO_2 浓度高度廓线四季变化不大, 浓度随高度迅速减少, 北京到 2~3 km 高度浓度降为很小, 东京

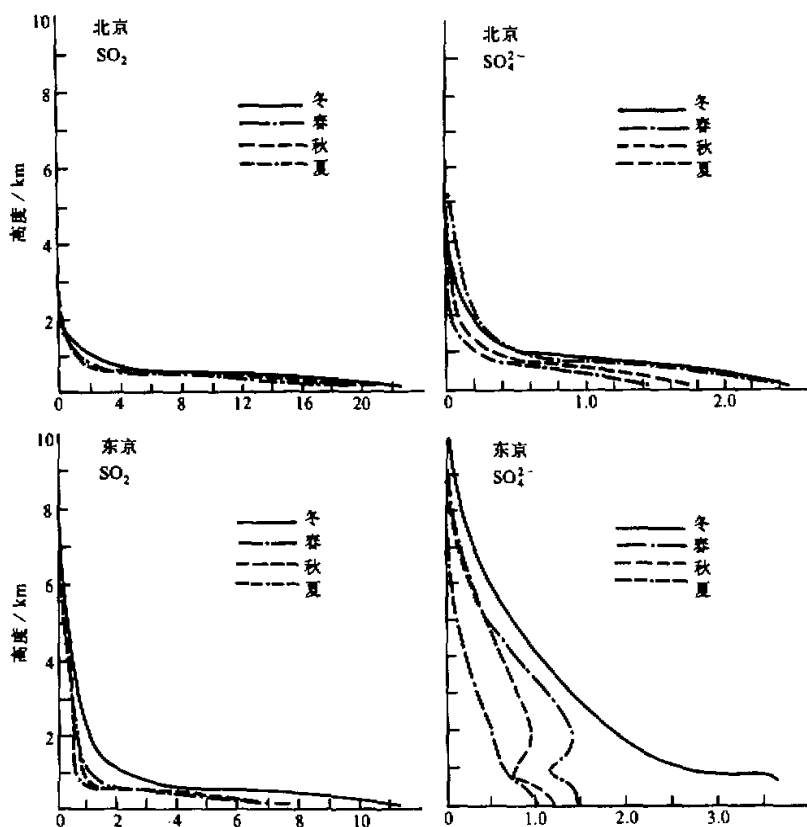
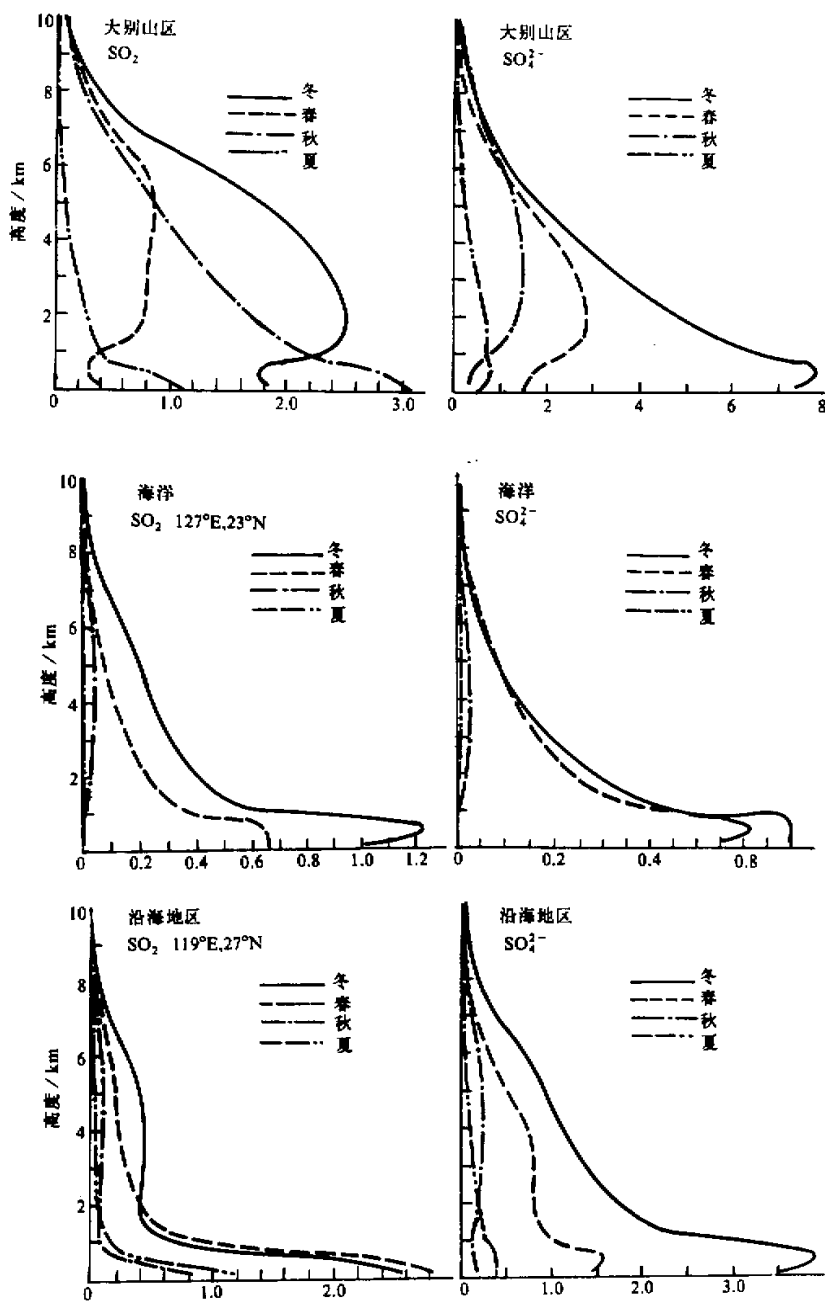


图 5 四类地区的 SO_2 和 SO_4^{2-} 浓度的不同季节的垂直廓线

图5 四类地区的 SO_2 和 SO_4^{2-} 浓度的不同季节的垂直廓线 (续)

可达较高的位置 (6~8 km), 低层 SO_2 浓度值季节变化较大, 东京、北京的冬季地面浓度为最大, SO_4^{2-} 浓度低层随高度衰减很大, 但高层衰减减慢, 浓度高值可以达到比 SO_2 更高的高度。 SO_4^{2-} 浓度高度廓线的季节变化比较大, 不同季节情况差异较大, 北京随高度指数衰减, 变化趋势较平稳, 以冬季为大。东京秋冬季在 0~1 km 处也有一个随高度衰减很小的高值区, 夏季一直随高度衰减。东京在夏季和秋季在 2 km 左右又出现一个极大值区, 呈现双峰结构。地面层 SO_4^{2-} 浓度季节变化很大。

由于山区人为 SO_2 排放量很小, 各地区污染物浓度的大小主要取决于周围地区的输送。大别山区地处长江中游地区, 华中和华东的交界处, SO_2 人为排放源很小。 SO_2 浓度的四季变化很明显, 地面浓度秋季最大, 其次为冬季。冬、春季的变化很有特色, 在 500 m 左右有一极小值, 在 2~4 km 左右又一极大值, 并且污染物浓度的最大值在中层而不在地面, 表明了春、冬季外来源的作用。 SO_4^{2-} 地面上浓度冬季最大, 在 800 m 附近有一个极大值, 然后随高度线性减少, 夏季地面浓度最低, 随高度廓线衰减最慢, 春秋高值区在 2~3 km 附近, 地面和高层浓度都较低。 SO_4^{2-} 浓度值高于 SO_2 浓度值, 说明了外来输送中 SO_4^{2-} 的重要作用。沿海地区冬季和春季浓度值明显高于夏、秋季, SO_2 浓度在 1.5 km 下随高度迅速衰减, 秋冬季在 2~3 km 左右维持一个较大值, SO_4^{2-} 的浓度从地面往上增加, 最大值在 800 m 左右, 然后往上随高度减少, 冬季减少最快, 其他季节变化缓慢。冬、春季 SO_4^{2-} 浓度明显偏大, 并且高于 SO_2 浓度值。

海洋上 SO_2 和 SO_4^{2-} 浓度廓线可以反映出不同高度上大陆源的输送作用。季节变化相当明显, 冬季的浓度最大值在 1.5~2 km 左右, 由地面往上浓度逐渐增加, 2 km 以上线性减少。

5 结论

(1) 近地层硫化物浓度分布与排放源的分布类似, 高值区主要在山东半岛及相邻的华北部分地区和四川盆地, 在上海、台南、汉城和东京等地是小范围的高值区。冬季地面浓度大, 夏季浓度小。高空分布形势与低层不同, 由西南-东北走向变为东西走向。硫酸盐粒子分布高值中心少且平滑, 高空分为两支。夏季硫酸盐粒子分布更加均匀化, 呈西南-东北走向, 高值区从四川盆地经陕西、山西、山东、渤海到朝鲜半岛。

(2) 年平均 SO_2 大气含量与排放源的分布比较一致, 说明 SO_2 输送距离较近, 主要受局地影响。硫酸盐大气含量高值区主要集中在江淮流域, 向海上延伸距离较远, 说明了硫酸盐长距离输送比较明显。

(3) 城市地区 SO_2 浓度随高度迅速衰减, 硫酸盐粒子随高度衰减小于 SO_2 , 浓度高值可以达到比 SO_2 更高的高度, 地面浓度季节变化明显。其他地区如山区、海洋地区廓线反映了不同季节外来输送作用, 浓度的极大值在较高的高度。

参 考 文 献

- 1 Zlatev, Z., Christensen, J. and Hov O., 1992, An Eulerian air pollution model for Europe with nonlinear chemistry, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 15, 1~37.

- 2 Langner, J. and Rodhe, H., 1991, A Global Three-Dimensional Model Of the Tropospheric Sulfur Cycle, *Journal of Atmospheric Chemistry*, **13**, 225~263.
- 3 Chang, J. S., Brost, R. A., Isaksen, I. S., Madronich, S., Middleton, P., Stockwell, W. R. and Walcek, C. J., 1987, A three dimensional Eulerian acid deposition model: physical concepts and formulation, *J. Geophys. Res.*, **92**(D12), 14681~14700.
- 4 Eliassen, A. and Saltbones, J., 1983, Modeling of long-range transport of sulfur over Europe: a two-year model run and model experiment, *Atmos. Environ.*, **17**, 1457~1473.
- 5 Muraio, N., KaTni, N., Sasaki, Y., Okamoto, S., Koobayashhi, K., 1993, A modeling study on acid rain in East Asia, International Conference on Regional Environment and Climate Changes in East Asia, 305~309.
- 6 Kotamarthi, V. R. and Carmichael G. R., 1990, The long rang transport of pollutants in the Pacific Rim Region., *Atmos. Environ.*, **24A**, 1521~1524.
- 7 Carmichael, G. R., L. K. Peters and T. Kitada, 1986, A second-generation model for regional-scale transport / chemistry / deposition, *Atmos. Environ.*, **20**, 173~188.
- 8 毛节黎, 1992, 广东、广西地区酸沉降统计模式的研究, *环境科学学报*, **12**(1), 28~36.
- 9 雷孝恩等, 1993, 一个高分辨对流层物质交换模式, *气象学报*, **51**, 75~86.
- 10 贾新媛, 1993, 区域酸沉降模式, *大气科学*, **17**(b), 732~740.
- 11 Huang Meiyuan, Wang Zifa, He Dongyang, Xu Huaying and Zhou Ling, 1996, Modeling studies on sulfur deposition and transport in East Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, **85**(1), 1921~1927.
- 12 Wang Zifa, Huang Meiyuan, He Dongyang, Xu Huaying and Zhou Ling, 1996, Sulfur distribution and transport studies in east asia using eulerian model, *Advances in Atmospheric Sciences*, **13**(3), 399~409.
- 13 王自发、黄美元, 1997, 关于我国和东亚酸性物质的输送研究 I. 三维欧拉污染物输送实用模式, *大气科学*, **21**(3), 366~378.
- 14 何东阳、黄美元, 1992, 一个适用于区域性大气环境模拟的大气光化学模式, *环境科学学报*, **12**(2), 182~192.
- 15 黄美元、王自发、何东阳、徐华英、周玲, 1996, 我国冬夏硫化物沉降与输送研究, *科学通报*, **41**(11), 1013~1016.
- 16 Akimoto Hajime, 1994, Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with SO₂ resolution, *Atmos. Environ.*, **28**, 213~225.

Studies on Transport of Acid Substance in China and East Asia Part II: Spatial Distribution of Sulfur and its Seasonal Variation

Wang Zifa, Huang Meiyuan, Gao Huiwang and An Junling

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The spatial distribution and seasonal variation are analyzed for sulfur oxidate and sulfate in East Asia and China with the 3-D Euler Model for sulfur transport. The content of sulfur in air and seasonal vertical profile of sulfur for four land types are also discussed in the paper. It shows that SO₂ concentration is very sensible to the distribution of emissions' intensity on lower layers. Its high value areas locate in Shandong Peninsula, parts of the eastern China and Sichuan basin. Some small high-value-areas live scattered around large cities such as Shanghai, Taian, Seoul and Tokyo. The concentration of SO₂ on surface is higher in winter more than in summer. The pattern of distributions are different between higher and lower layer, changing from southwest-northeast pattern to west-east. But sulfate distributes smoother and smaller with a few high-value centers, especially for summer. The content of sulfur in air is crammed into the middle and lower reaches of the Changjiang River with a long nose to the East China Sea. The vertical profile of sulfur among four land types shows the different contribution of transport for various seasons.

Key words sulfur spatial distribution content in air vertical profile