

东亚地区人为硫酸盐气溶胶 柱含量变化的数值研究*

王喜红 石广玉

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 结合近年来最新评估的 $1^\circ \times 1^\circ$ 人为 SO_2 排放资料, 利用三维区域欧拉型硫化物输送模式, 研究了 90 年代中期东亚地区人为硫酸盐柱含量的时空演变规律。结果表明, 中国大陆, 尤其是中国东部经济发达地区已经成为东亚乃至全球硫污染的主要贡献源之一。东亚地区人类活动不仅使污染地区硫酸盐含量显著增加, 而且使近海无源区的海域污染加重, 人为硫酸盐柱含量分布具有明显的区域分布和季节变化特征, 夏季柱含量中心位置明显偏北, 其中污染地区柱含量逐月变化呈双峰结构, 分别出现在 9 月和 5 月, 9 月最大。该地区硫酸盐集中在 4 km 以下的大气中, 浓度随高度减少。近海海域柱含量秋冬大, 春夏小, 反映了来自大陆的输送情况。青藏高原地区柱含量变化呈单峰结构, 夏季最大, 冬季最小, 冬季浓度随高度减小, 夏季周边污染物向高原中低空输送, 300 m 左右浓度最大; 同时, 夏季高原上空维持稳定上升气流, 形成物质输送通道, 各高度层硫酸盐浓度比冬季大 1 个量级。

关键词: 东亚地区; 人为硫酸盐气溶胶; 柱含量

1 引言

硫酸盐气溶胶是影响地球大气系统能量收支的一种重要物质。它的浓度变化一方面影响着对流层化学循环和化学平衡, 另一方面影响地气系统的辐射收支, 并最终影响气候变化。研究表明, 对流层硫酸盐主要来自于自然和人类活动(包括工业活动、化石燃料的燃烧及生物质燃烧等)所排放的 SO_2 。20 世纪以来, 随着社会经济的飞速发展, 许多地区人为硫排放一直在快速地增长^[1], 而自然硫排放却相对稳定。当前, 全球平均人为硫排放是自然硫排放的 1.5~3 倍^[2,3], 而其中 90% 来自于北半球, 特别是在北半球工业区及其周围, 人为硫排放是自然硫排放的 10 倍以上^[4]。理论和数值模拟表明, 全球已形成北美、欧洲和东亚 3 个 SO_2 和硫酸盐的高值中心^[5]。因此, 人为硫酸盐对气候和环境的影响已经引起了科学界的广泛关注。

20 世纪 80 年代以来, 许多发达国家相继采取了一系列措施控制人为 SO_2 的排放, 经过多年努力, 大气中 SO_2 浓度已相对比较稳定, 而中国、印度和其他亚洲国家排放却在快速增长^[6]。根据预测, 我国未来 20 年 SO_2 排放量将继续大幅度增加^[7]。人为 SO_2 排放量的增长, 一方面使酸雨污染加重, 区域扩大, 另一方面使大气中硫酸盐气溶胶增加, 辐射强迫作用增强, 并最终影响亚洲乃至全球气候和生态环境。研究表明, 从 20

1999-09-20 收到, 1999-10-21 收到修改稿

* 本研究得到国家“九五”重中之重项目 96-908-01-06 和中国科学院大气物理研究所所长重点基金项目 98-209 的资助

世纪 60 年代以来, 中国大部分地区到达地面的直接辐射呈递减趋势, 城市和近郊水平能见度下降。在全球平均气温增高的同时, 中国南方大部分地区年平均地面气温却普遍下降, 初步估计^[8,9]造成这种变化的重要因素之一是人为硫酸盐气溶胶含量的逐年增加。因此, 科学评估中国对流层大气中人为硫酸盐气溶胶的时空分布和演变规律, 对于东亚地区气候变化的准确预测具有非常重要的意义。

早在 20 世纪 60~70 年代, 大气化学家们就已经认识到 SO_2 对硫酸盐气溶胶分布影响很大。80 年代以后, 相继设计和完善了一批区域酸沉降模式, 其中比较著名的有 ADOM^[10]、STEM^[11]和 RADM^[12]。这类复杂欧拉模式较为详细地描述污染物长距离输送过程中各种物理和化学过程。但是随着人们对环境和气候问题的日益重视, 迫切需要了解硫化物尤其是硫酸盐气溶胶的长期演变状况, 这就要求长时间运行上述复杂模式。但就目前的计算条件而言, 仍难以实现。为此, 黄美元^[13]、王自发^[14]等人发展了一类简单的区域欧拉型模式。这类模式对上述复杂模式进行简化, 抓住污染物长距离输送过程中主要的物理化学过程, 节省了大量的计算资源, 从而使硫酸盐气溶胶及其前体物长期气候演变的数值模拟成为可能。

近年来, 对东亚地区的硫污染问题已经开展了一些研究, 但是研究的焦点大多集中于硫污染物的长距离跨边界输送及沉降过程, 对不同地区硫酸盐气溶胶柱含量的季节变化研究相对较少。国际上许多研究表明, 对流层人为硫酸盐气溶胶的辐射强迫具有明显的季节变化和区域特征。而辐射强迫的这种特征又强烈地依赖于对流层人为硫酸盐柱含量的季节变化和区域分布。因此, 本文研究目的就在于利用硫输送模式来揭示东亚不同区域对流层人为硫酸盐柱含量的季节变化特征, 为研究该地区人为硫酸盐的气候效应奠定基础。本文采用的三维欧拉模式是黄美元^[13]、王自发^[13]等人发展的东亚地区硫污染物长距离输送模式, 并在模式中引入了国内最新评估的 $1^\circ \times 1^\circ$ 人为 SO_2 排放源资料^[15]。同时, 参照 RADM 模式中干沉降过程参数化的方法, 对硫酸盐气溶胶的空气动力学阻尼、表面阻尼以及地表粗糙度等的处理进行了改进, 以期能够更好地反映硫酸盐柱含量的特征。

2 模式介绍

2.1 模式概况

本文采用的三维区域欧拉模式较详细地考虑了输送、化学转化、干湿沉降和源排放等过程。模式采用的一般方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\nabla \cdot VC + \nabla \cdot (K_e \nabla C) + S + P - R_d - W_d, \quad (1)$$

其中, C 为化学物种体积混合比, V 是模式区域内每个格点上的三维风速矢量, K_e 是湍流扩散系数, P 是化学物种由于化学反应所导致的化学转化率, S 是源排放率, R_d 是干沉降, W_d 湿沉降。

模式中有关物理化学过程的处理参见文献[14], 其中干沉降过程中硫酸盐气溶胶空气动力学阻尼、表面阻尼以及地表粗糙度等参照 RADM 模式进行了改进。

2.2 初始条件和边界条件

在模式初始化初期, 边值和初值采用清洁大气中污染物的背景浓度, 水平方向各物种浓度均匀一致, 垂直方向则按指数递减: $c = c_0 e^{-z/z_0}$, c_0 为初始地面浓度, z_0 为标高。利用 NCAR/NCEP 再分析资料, 将模式模拟一段时间后生成的结果定为模式的初值。

由于模式边界对模拟结果影响较大, 因此侧边界尽可能远离我们感兴趣的区域, 同时使侧边界附近尽可能没有污染源。本文选取的区域范围如图 1 所示, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 基本满足上述条件。

2.3 源排放

污染源是造成大气污染的根本原因, 污染源的准确与否直接影响大气中硫化物的分布和含量。本文研究的重点是人为硫酸盐气溶胶, 因此主要考虑人为 SO_2 排放。其中, 中国大陆人为 SO_2 的排放资料采用白乃彬等人^[15]近年来最新估计 $1^\circ \times 1^\circ$ 结果, 中国以外其他区域的源排放采用 Akimoto 等的估算结果^[16]。图 1 给出东亚地区 ($16^\circ \sim 62^\circ \text{N}$, $75^\circ \sim 146^\circ \text{E}$) 人为 SO_2 排放 (折合为 S, 下同) 分布, 其中主要源区位于中国的

华东、西南、华北地区以及韩国。表 1 给出东亚及中国大陆、韩国、日本等地年平均排放总量及与东亚排放之比。可以看出, 东亚总人为 SO_2 排放达到 15.04 Tg/a 。根据 Muller^[17]、Spiro 等^[2]的分析和估计, 当前全球年平均人为 SO_2 排放总量约为 $70 \sim 90 \text{ Tg/a}$ 。由此可见, 东亚地区占全球排放总量的 $16.7\% \sim 21.5\%$ 。进一步分析表明, 中国大陆占东亚排放量的 78.8% , 而 100°E 以东中国东部经济发达地区占中国大陆总排放量的 97.7% 。因此, 中国大陆, 尤其是中国东部经济发达地区已经成为东亚地区乃至全球硫污染的主要来源之一。

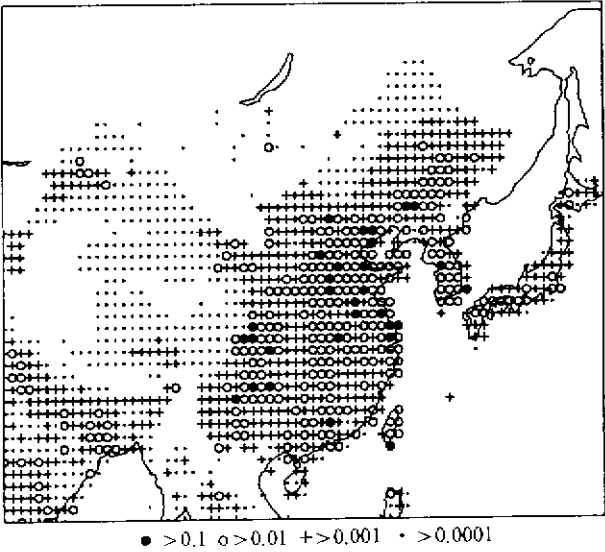


图 1 1992 年东亚地区人为 SO_2 源排放分布
单位: Tg/a

表 1 不同区域年平均人为 SO_2 排放总量及与东亚排放之比

地区	东亚地区	中国大陆	韩国	日本	台湾地区	100°E 以东 中国地区
人为 SO_2 排放 总量 / (Tg/a)	15.04	11.84	0.45	0.37	0.01	11.57
与东亚排放之比		78.8%	3.0%	2.4%	0.1%	77%

3 模拟结果

为了能够反映 20 世纪 90 年代中期硫酸盐柱含量状况, 模式气象场选用 1996 年 NCAR/NCEP 的逐日再分析资料。该年降水基本正常, 属于正常年份, 具有一定的代表性。

3.1 对流层人为硫酸盐气溶胶柱含量分布

图 2 给出了年平均对流层硫酸盐柱含量分布。高值区主要集中在长江中下游、山东半岛及韩国, 其中长江三角洲柱含量最大, 最大值达 21.58 mg/m^2 。 100°E 以东的中国广大地区柱含量超过 2 mg/m^2 , 而且波及到中国近海的广大海域, 表明人类活动不仅使污染地区硫酸盐含量显著增加, 而且使近海无源区的广大海域污染加重。上述模拟结果与近年来有关研究基本一致^[18~19]。

图 3 给出 1 月和 7 月东亚地区对流层人为硫酸盐柱含量的月平均分布。可以看出, 冬夏分布类型有较大差异。1 月份, 高值区主要位于长江中下游及山东半岛; 与 1 月相比, 7 月份高值区位置明显偏北, 主要位于山东半岛及朝鲜半岛。同时, 7 月份日本及其海域的值比 1 月份的大。造成这种差别的主要原因可能与冬夏不同时期大气环流形势的差异有关。夏季, 中国东部及中部

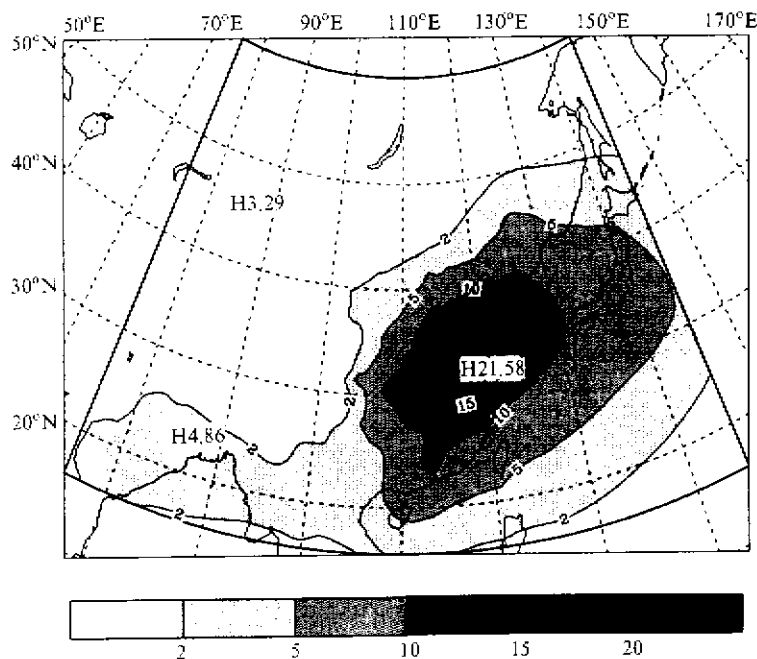


图 2 1996 年东亚地区对流层人为硫酸盐柱含量的年平均分布
单位: mg/m^2

区域受副热带高压及其西伸脊控制, 存在大型反气旋环流, 而中国南部为季风环流。它们共同作用形成一条明显的由西南向东北方向的输送通道 (图略), 使得夏季硫酸盐柱含量高值区位置明显偏北; 而冬季, 整个中国大陆中低层盛行西风气流, 北部以西北风为主, 而东南沿海以西南风为主, 二者在长江中下游一带交汇, 形成一条物质输送的辐合带, 造成该区域硫酸盐堆积 (图略)。

3.2 东亚不同区域对流层人为硫酸盐气溶胶柱含量季节变化特征

以上分析表明, 人为硫酸盐柱含量分布具有明显区域分布和季节变化特征。为此,

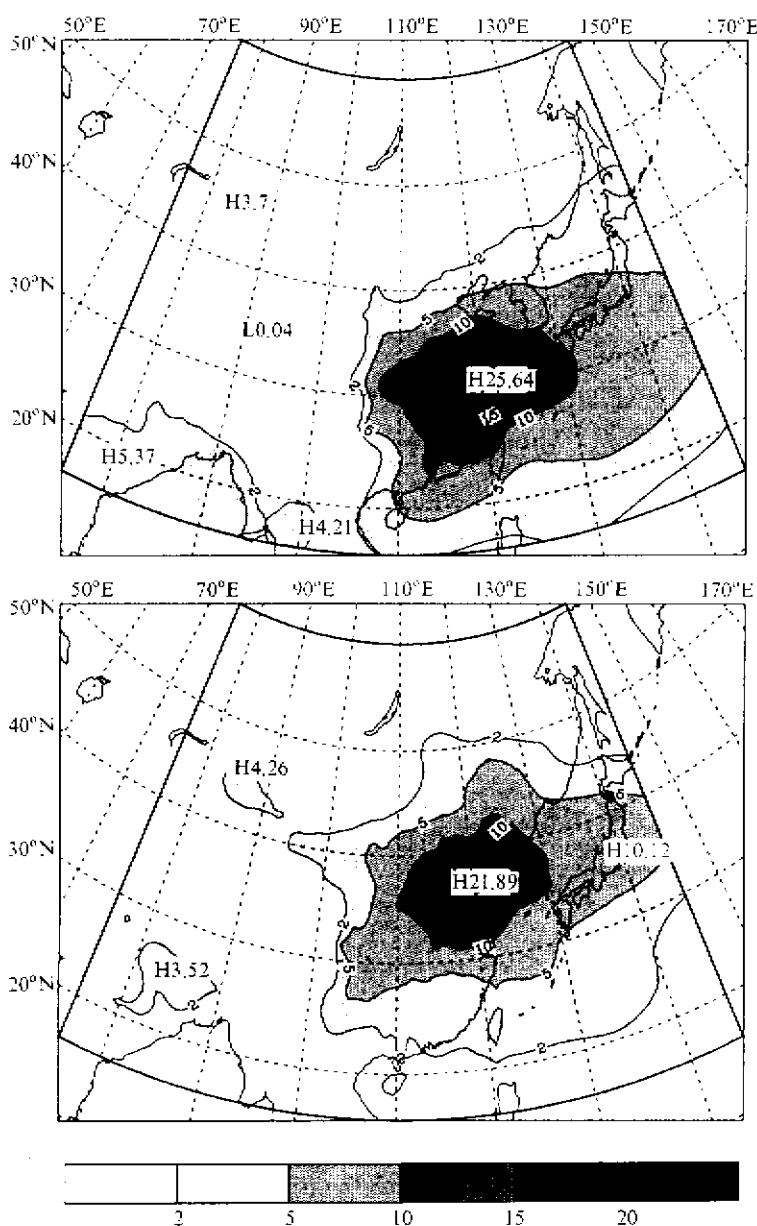


图3 1996年东亚地区对流层人为硫酸盐柱含量的月平均分布
(a) 1月; (b) 7月。单位: mg/m^2

本文分别对青藏高原(代表较清洁地区)、 100°E 以东中国大陆(代表污染较重地区)、近海海域(代表无源区)及韩国和日本等不同区域的对流层硫酸盐柱含量的季节变化进行了分析(图4)。

污染地区(100°E 以东中国大陆及韩国)柱含量逐月变化呈双峰结构,分别出现在9月和5月,其中9月最大。总体呈现出春秋大、冬夏小的特点。由于源排放保持不变,造成这种变化的主要原因为输送、沉降和化学转化过程。冬季(12~2月)对流活动较弱,大量的 SO_2 气体集中在边界层内,使干沉降量增大;同时由于温度偏低, SO_2 的化学转化效率较低;另外,该地区冬季净的硫输送量远远大于夏季^[21],这也可以从图4中近海海域柱

含量逐月变化趋势体现出来。因此,冬季该地区硫酸盐柱含量最小。随着春季的到来,对流活动开始活跃, SO_2 逐渐向自由对流层输送,近地面干沉降通量逐渐减少;同时春季温度开始升高,云量逐渐增加(图略),云内 H_2O_2 对 SO_2 氧化转化效率逐渐增强;再者,净输送通量逐渐减少^[20]。因此,虽然这一时期降水开始增多,但增加的湿沉降量并不足以抵消硫酸盐气溶胶的净生成,从而使得春季3~5月硫酸盐柱含量逐渐增加。进入夏季,尤其是6~8月,中国大陆的大部分地区进入雨季,湿沉降量很大,造

成硫酸盐柱含量出现极小。9 月以后, 雨带逐渐退至华南沿海, 而中国东部大部分地区秋高气爽, 日照充足, 对流活动频繁, 使得 9 月份柱含量达到最大。

中国近海海域由于没有人为源排放, 因此基本反映来自大陆的输送情况, 总体呈现出秋冬大, 春夏小的特征, 表明大陆输送量冬季比夏季大的特点。这与近年来其他研究基本相符^[21]。

较清洁的青藏高原地区, 人为硫酸盐柱含量很小, 其季节变化振幅不大。7~9 月最大, 12~2 月最小, 下文将给出解释。

3.3 东亚不同区域对流层人为硫酸盐气溶胶垂直分布

图 5 给出上述不同地区对流层人为硫酸盐浓度垂直分布。污染地区, 地面浓度最大, 地面以上硫酸盐浓度随高度迅速减少。大量的硫酸盐主要集中在 4 km 以下的对流层大气中。近海海域, 浓度最大值位于 400 m 左右的边界层内, 1 km 以上浓度随高度迅速下降, 比较清楚地表明了来自大陆净输送通量 1 km 以下最强。

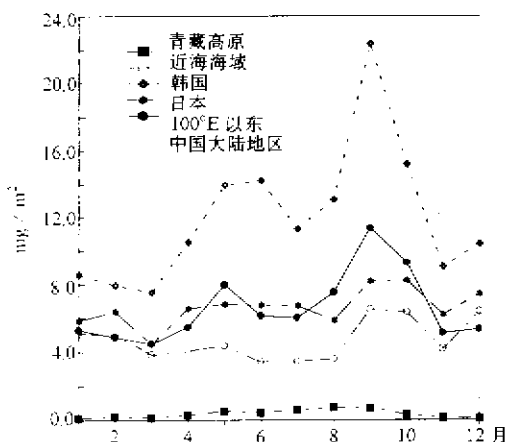


图 4 1996 年东亚不同区域人为硫酸盐柱含量的季节变化特征

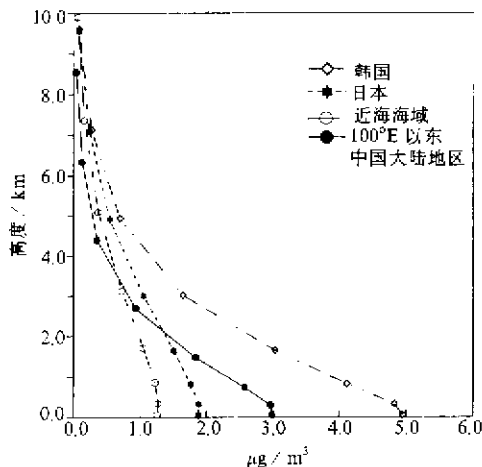


图 5 1996 年东亚各地区人为硫酸盐浓度随高度分布

青藏高原地区, 尽管人为硫酸盐柱含量很小 (图 4), 但对该地区大气成分、气候环境及生态都可能产生特殊的影响, 尤其是近年来青藏高原夏季发现臭氧总量低值中心^[22], 硫酸盐及其前体物浓度的研究就显得更为重要。国外一些研究已经注意到 SO_2 可以在一些气溶胶粒子表面发生非均相反应, 从而可消耗平流层臭氧^[23,24]。尽管尚缺乏足够的证据证明硫酸盐气溶胶非均相生成与全球臭氧减少有关, 但至少提供一种研究青藏高原夏季出现臭氧总量低值的可能性。本文对青藏高原冬夏不同时期人为硫酸盐浓度垂直分布进行了一些分析。图 6 给出 1 月和 8 月平均浓度垂直分布。8 月份各高度层人为硫酸盐浓度均比 1 月份大, 二者相差 10 倍以上。1 月, 地面浓度最大, 地面以上浓度随高度减少。人为硫酸盐主要集中在 2 km 以下的对流层大气中; 而 8 月, 300 m 左右浓度最大, 表明该层存在外来输送。1 km 以下, 浓度值十分接近, 达 $0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右, 表明污染物充分混合。1 km 以上, 浓度随高度减少。这一方面可能是由于夏季气温较高, 日照充足, SO_2 化学转化效率大, 造成硫酸盐含量较冬季高; 另一方面, 可

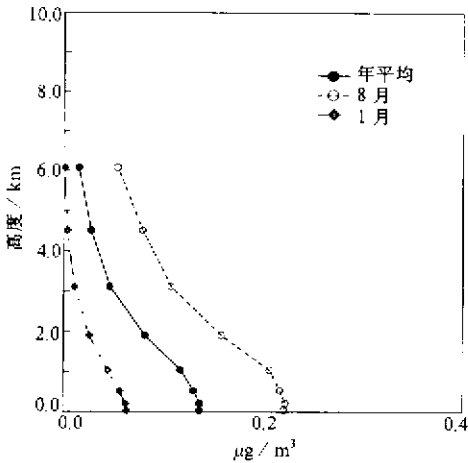


图6 1996年青藏高原地区人为硫酸盐浓度随高度的分布

青藏高原受西风带气流控制, 纬圈方向物质交换频繁, 污染物分布表征大尺度全球性特征。以上对比表明, 夏季存在着污染物向高原高空输送的现象。但目前对这种输送量的大小尚不清楚, 也不清楚这些输送的污染物在多大程度上影响高原上空的臭氧总量。这将是下一步有待研究的课题。

4 小结

本文利用近年来最新评估的 $1^\circ \times 1^\circ$ 人为 SO_2 的排放资料, 详细地分析了东亚地区人为硫排放对全球的贡献。在此基础上, 结合一个三维区域欧拉型硫化物输送模式, 研究了 20 世纪 90 年代中期 (1996 年) 东亚地区人为硫酸盐柱含量的时空演变规律。结果可归纳如下:

(1) 当前, 东亚地区总人为 SO_2 排放达到 15.04 Tg/a , 占全球人为排放总量的 $16.7\% \sim 21.5\%$ 。而 100°E 以东中国东部经济发达地区占东亚排放量的 77% 。因此, 中国大陆, 尤其是中国东部经济发达地区已经成为东亚地区乃至全球硫污染的主要贡献源之一。

(2) 东亚地区年平均对流层人为硫酸盐柱含量的高值区主要集中在长江中下游, 山东半岛及韩国。 100°E 以东的中国广大地区柱含量超过 2 mg/m^2 , 而且波及到中国近海的广大海域, 表明人类活动不仅使污染地区硫酸盐含量显著增加, 而且使近海无源区的广大海域污染加重。

(3) 由于冬夏不同时期大气环流形势不同, 使东亚地区人为硫酸盐柱含量分布类型存在较大差异。夏季污染物由西南向东北方向输送, 而冬季长江中下游形成物质辐合带。与冬季相比, 夏季柱含量中心位置明显偏北。

(4) 东亚地区人为硫酸盐柱含量具有明显的区域分布和季节变化特征。污染地区

能与高原周围冬夏不同时期大气环流差异有关。研究表明^[25], 夏季青藏高原对流层中低层在副热带高压、季风环流和西风带气流的共同作用下, 形成很强的辐合气流, 使周边污染物向高原辐合; 而对流层中高层, 受南亚高压控制存在很强的辐散气流, 使污染物由高原向周边辐散。这种环流配制使高原上空产生很强的上升气流, 上升气流将低层污染物向对流层中上部输送, 形成一个物质输送通道, 从而使高原夏季柱含量较冬季高 (图 4), 各高度浓度均比冬季大 (图 5)。同时, 夏季的这种强上升气流使高原上空对流活动旺盛, 污染物在边界层内充分混合, 从而使 1 km 以下, 浓度十分接近。而冬季, 青

(100°E 以东中国大陆及韩国) 柱含量逐月变化呈双峰结构, 分别出现在 9 月和 5 月, 其中 9 月最大。大量硫酸盐集中在 4 km 以下的对流层大气中, 其中地面浓度最大, 地面以上随高度迅速减少。近海海域柱含量的逐月变化基本反映来自大陆的输送情况。总体呈现出秋冬大、春夏小的特征。浓度最大值出现在 400 m 高度, 1 km 以上浓度随高度减少。

(5) 青藏高原地区由于冬夏大气环流形势差异, 硫酸盐分布呈现明显的季节变化特征。柱含量逐月变化呈单峰结构, 夏季最大, 冬季最小。冬季浓度随高度减小, 硫酸盐主要集中在 2 km 以下的对流层大气中; 而夏季, 由于高原中低空存在很强的辐合气流, 污染物向高原输送, 因此 300 m 左右浓度最大。夏季高原上空维持强上升气流, 对流活动旺盛, 形成物质输送通道, 使夏季各高度层硫酸盐浓度比冬季大 1 个量级, 同时, 边界层内污染物充分混合, 浓度接近。边界层以上, 浓度随高度减少。

致 谢: 感谢中国科学院大气物理研究所王自发博士提供了硫输送模式

参 考 文 献

- 1 Charlson, R. J., S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley, J. E. Hansen and D. J. Hofmann, Climate forcing by anthropogenic aerosol, *Science*, 1992, **255**, 423~430.
- 2 Spiro, P. A., D. J. Jacob and J. A. Logan, Global inventory of sulfur emission with 1 deg. times resolution, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 6023~6036.
- 3 IPCC, Climate Change 1995: The Science of Climate Change, J. T. Houghton et al., New York: Cambridge University Press, 1996, 138pp.
- 4 Galloway, J. N., G. E. Likens and M. E. Hawley, Acid deposition: natural versus anthropogenic sources, *Science*, 1984, **226**, 829~831.
- 5 Langner, J., H. Rodhe, P. J. Crutzen and P. Zimmermann, Anthropogenic influence on the distribution of tropospheric sulfate aerosol, *Nature*, 1992, **359**, 712~716.
- 6 Foell, W. K. and C. W. Green, Acid Rain In Asia: An Economic, Energy And Emission Overview, Paper presented at the Second Workshop on Acid Rain in Asia, Asian Inst. of Technology, Bangkok, 19~22 November, 1990.
- 7 韩国刚, 中国 2020 年环境保护战略目标研究, 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
- 8 Li, X. W., X. J. Zhou, W. L. Li and L. X. Chen, 1995, The cooling of Sichuan province in recent 40 years and its probable mechanisms, *Acta Meteorologica Sinica*, **9**, 57~68.
- 9 胡荣明、石广玉, 中国地区气溶胶的辐射强迫及其气候响应试验, *大气科学*, 1998, **22**(6), 919~925.
- 10 Venkatram, A., P. K. Karamchandani and P. K. Misra, Testing comprehensive acid deposition model, *Atmos. Environ.*, 1988, **22**, 737~747.
- 11 Carmichael, G. R., L. K. Peters and T. Kitada, A second-generation model for regional-scale transport / chemistry / deposition, *Atmos. Environ.*, 1986, **20**, 173~188.
- 12 Chang, J. S., R. A. Brost, I. S. Isaksen, S. Madronich, P. Middleton, W. R. Stockwell and C. J. Walcek, A three-dimension Eulerian acid deposition model: physical concepts and formulation, *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(12D), 14681~14700.
- 13 Huang, M. Y., Z. F. Wang et al., Modeling studies on sulfur deposition and transport in East Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, **85**, 1921~1926.
- 14 Wang, Z. F., M. Y. Huang, D. Y. He, H. Y. Xu and L. Zhou, Sulfur distributions and transport studies In East Asia using Eulerian model, *Adv. Atmos. Sci.*, 1996, **13**(3), 399~409.
- 15 白乃彬, 中国大陆 CO₂, SO₂ 和 NO_x 1°×1° 网格排放估计, 中国地区大气 O₃ 变化及其对气候环境的影响 (一), 周秀骥主编, 北京: 气象出版社, 1996, 145~150.
- 16 Akimoto Hajime, Distribution of SO₂⁺, NO_x and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities

- in Asian with $1^\circ \times 1^\circ$ resolution, *Atmos. Environ.*, 1994, **28**, 213~225.
- 17 Muller, J.-F., Geographical distribution and seasonal variation of surface emissions and deposition velocities of atmospheric trace gases, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 3787~3804.
 - 18 Kasibhatla, P., W. L. Chameides and J. St. John, A three-dimensional global model investigation of seasonal variation in the atmospheric burden of anthropogenic sulfate aerosols, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 3737~3759.
 - 19 Feichter, J., E. Kjellstrom, H. Rodhe, F. Dentener, J. Lelieveld, and G.-J. Roelofs, Simulation of the tropospheric sulfur cycle in a global climate model, *Atmos. Environ.*, 1996, **20**, 1693~1707.
 - 20 王自发, 我国和东亚地区硫化物与黄沙输送研究, 中国科学院大气物理研究所博士论文, 1997.
 - 21 黄美元, 我国和东亚地区硫化物跨边界输送态势研究, 气候与环境研究, 1996, **1**(1), 55~62.
 - 22 周秀骥, 罗超, 李维亮, 史久恩, 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心, 科学通报, 1995, **4**(15), 1396~1398.
 - 23 Hofmann, D. J., S. J. Oltmans, W. D. Komhyr, J. M. Harris, J. A. Lathrop, A. O. Langford, T. Deshler, B. J. Johnson, A. Torres and W. A. Matthews, Ozone loss in the lower stratosphere over the United States in 1992-1993: Evidence for heterogeneous chemistry on the Pinatubo aerosol, *Geophys. Res. Lett.*, 1994a, **21**, 65~68.
 - 24 Keys J. G., P. V. Johnston, R. D. Blatherwick and F. J. Murcray, Evidence for heterogeneous reactions in the Antarctic autumn stratosphere, *Nature*, 1993, **361**, 49~51.
 - 25 Wang, X. H., X. S., Li, A numerical study of the variations and distributions of tropospheric ozone and its precursors over China, *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, **13**(1), 86~102.

A Numerical Study on Temporal and Spatial Variations of Anthropogenic Sulfate Column Burden over Eastern Asia

Wang Xihong and Shi Guangyu

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A three-dimensional regional Eulerian model of sulfur transport is used to investigate temporal and spatial variations of anthropogenic sulfate column burden over Eastern Asia during mid-1990s on the base of recent emission data of anthropogenic sulfur dioxide (SO_2) at a horizontal resolution of $1^\circ \times 1^\circ$. The simulated results indicate anthropogenic SO_2 emission in China, especially in eastern China which is a fast economically developing region, have been one of the major contributions to Eastern Asia and global total emission. Human activities in Eastern Asia result in a rapid increase in sulfate column burden not only in pollution areas but also in offshore water. Anthropogenic column sulfate distribution has obvious seasonal and spatial pattern. The relatively large magnitude of summertime sulfate column loadings move to the north of China as compared with wintertime. In pollution area, 2 peak loadings of monthly sulfate are found to occur in September and May respectively and the maxima loadings in September. In terms of vertical distribution, the amount of sulfate is found in the bottom 4 km and the concentration decreases with height. In offshore water, the anthropogenic sulfate burden which show the magnitude of transport from eastern China is higher in autumn and winter than that in spring and summer. In Tibetan Plateau, only one peak loadings is found, maximum occurs in summer and minimum in winter. In winter, the sulfate concentration decrease with height over Tibetan Plateau; but in summer, the maxima concentration occurs in the height of 300 m due to sulfate convergence in the lower troposphere. In the meanwhile, anthropogenic sulfate concentration at each level over the Tibetan Plateau in summer are almost a factor of 10 higher than that in winter because of strong upwelling motion of sulfate to the upper troposphere.

Key words: East Asia; anthropogenic sulfate aerosol; column burden