

用 STEM-II 模式研究东亚地区春季沙尘 气溶胶对硫化物输送和沉降的影响

肖 辉

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

Gregory R. Carmichael, Yang Zhang

(CGRER, University of Iowa, Iowa City, IA 52240, USA)

摘 要 利用 STEM-II 三维区域尺度大气化学模式, 研究了 1994 年 3 月 1 日至 14 日东亚地区春季沙尘气溶胶对硫化物输送和沉降的影响。结果表明, SO_2 和 SO_4^{2-} 的大值区主要出现在我国东部地区。在模拟时段, 日本地区火山源的排放对该地区大气中 S 分布的贡献达 10%~30%, 并与当时飞机的观测结果相吻合。模拟区域内 SO_2 和 SO_4^{2-} 的收支的分析研究表明, 在硫的总排放量中, 从东边界面流出去的输送通量最大, 并出现在 30~40°N 带的 2~6 km 高度上, 这是与该地区最大的人为排放源所在地相一致的。最后, 给出了模拟时段整个对流层大气 SO_4^{2-} 气溶胶含量的分布, 还估算了 SO_4^{2-} 气溶胶对地气系统的直接辐射强迫和温度变化的影响。

关键词 沙尘气溶胶 硫化物 火山源 辐射强迫 东亚地区

1 引言

近 20 多年来, 东亚地区由于人口众多和能源消耗大等因素, 已成为世界上大气污染物 (如 SO_2 、 NO_x 等) 排放量增长最快的地区之一。如, SO_2 和 NO_x 的排放量分别从 1975 年的 9.1 Tg (S, 下同) 和 2.9 Tg (N, 下同) 增长到 1987 年的 14.5 Tg 和 4.7 Tg, 年增长率均为 5%^[1]。在未来几十年里, 由于燃料用煤的继续增加, 预计 SO_2 和 NO_x 的排放量还将上升。据预测, 到 2020 年, 它们的排放量将增长 2~3 倍^[2]。 SO_2 和 NO_x 排放的大量增加, 使得该地区大气污染、酸雨等一系列环境问题已极为突出。东亚地区还是世界上沙尘暴天气的多发地之一, 并且沙尘暴的源地主要位于我国的西北地区。沙尘暴天气经常发生在春季, 每年从我国西北地区向大气输送的沙尘估计有 800 Tg^[3], 占全球沙尘年排放总量的 1/3 以上^[4]。30% 的沙尘在沙漠源地经沉降返回地面, 其余的 70% 沙尘气溶胶则随高空西风向东输送并沉降在源地下游的我国东部和北太平洋地区^[3]。沙尘气溶胶是大气中气溶胶的一个重要来源, 它对源地及其下游广大地区的气候、辐射、云和降水分布、大气化学、大气环境及生态环境等方面均可产生影响。沙尘暴期间能见度显著下降, 矿物质大量沉降, 并可改变降水的物理化学特性^[5]。在春季东亚地区沙尘暴期间, 与沙尘长距离相联系的大气污染物常常可以到达韩国和

日本,甚至可到达位于太平洋中部的夏威夷群岛^[6]。在风系作用下,陆上物质的长距离输送对远离陆地的西太平洋热带海域上雨水的酸度和化学组成结构有很大影响^[7]。

沙尘气溶胶和大气污染物在输送过程中可相互影响。Zhang 等^[8]研究了沙尘在硝酸盐粒子和臭氧形成中的作用,并发现沙尘对硝酸盐颗粒物和光化学氧化剂的形成有重要的影响。Dentener 等^[9]的模式研究也得到类似的结果,他们认为,在沙尘源地的下风方,SO₂在沙尘气溶胶表面上的非均相化学反应对硫酸盐的大量形成起重要的作用。最近,由 NASA 主持在西太平洋沿海地区进行了两次科学实验 (PEM-West A 和 B)^[10,11],主要研究不同季节东亚地区大气化学组分及其向太平洋中部的长距离输送过程。1994 年 2~3 月进行的 PEM-West B 飞机观测实验测量的项目有对流层 SO₂、硫酸盐等多种大气组分和相关的气象参数,并在东亚地区一些站点作相应的地面观测。观测结果显示,太平洋的西部和中部地区已经在一定程度上受到来自东亚大陆地区的污染物和沙尘气溶胶的影响。在北太平洋上空,从东亚大陆来的大气气溶胶中硫酸根和硝酸根的浓度显著增多^[11]。肖辉等^[12]曾利用 STEM-II 三维区域大气化学模式,研究了东亚地区沙尘气溶胶对硫酸盐形成的影响,结果表明,SO₂ 气体在沙尘气溶胶表面上进行的非均相氧化过程是硫酸盐形成的一条重要途径,由这条途径提供的硫酸盐占其总浓度的 20%~50%,而且沙尘暴过程主要影响沙尘源地下游的中国东部地区硫酸盐的分布,使得那里的硫酸盐浓度有较大的增加。这说明,沙尘气溶胶的存在可能对大气污染物的输送产生某些重要的物理化学上的影响。

本文利用美国依阿华大学 Carmichael 教授研究小组发展起来的三维区域尺度对流层大气化学模式 (STEM-II)^[13],结合最近在西太平洋地区进行的 PEM-West B 科学实验观测,进一步研究 1994 年春季东亚地区沙尘气溶胶对硫化物输送和沉降的影响,并探讨硫酸盐气溶胶对该地区气候环境的直接强迫作用。

2 模式概述

STEM-II 是一个区域尺度对流层大气化学模式,它考虑大气污染物的输送、化学转换、沉降等过程^[13]。大气边界层采用参数化方法处理^[14]。本研究使用该模式的参数化版本,对 SO₂ 向硫酸盐的化学转换进行参数化处理,耦合 SO₂ 在沙尘气溶胶表面上进行的非均相化学转换过程^[8,12]。模式的控制方程有沙尘、SO₂ 和 SO₄²⁻ 的输送方程,考虑了干湿沉降过程、污染物的气液相转化过程以及 SO₂ 气体在沙尘气溶胶表面上进行的非均相化学转化过程,还考虑 SO₂ 与 OH 基之间的气相化学反应过程,同时假定,由 SO₂ 气相反应形成的 H₂SO₄,要么成为新的粒子,碰并到沙尘表面,要么直接凝聚到沙尘表面。关于该模式较为详细的介绍可参考文献^[12]。

研究的区域为 (100~160°E, 20~55°N), 包括中国大部、日本、朝鲜、韩国和俄罗斯及蒙古一部分。模式使用地形追踪坐标系。水平网格分辨率为 1°×1°,垂直区域为地面至 10 km 高空,垂直网格分辨率为 500 m。模式中所用的气象场 (气压、温度、湿度、风向、风速等) 数据是根据 ECMWF 客观分析场插值得到,并根据质量守恒原理计算出格点上的垂直风速。模式所用的气象资料的时间间隔为 12 h。

本文考虑的化学组分主要是 SO₂ 和硫酸盐。所用的 SO_x 排放源是由 RAINS-ASIA

模式预测得到的 1994 年数据^[2,15]。排放源包括自然源和人为源。自然源主要由模式区域内活动的火山源组成,暂时不考虑海洋源二甲基硫(DMS)的影响;人为源包括陆上面源和高架源以及航船活动源。从沙尘源地进入大气的沙尘排放率是根据实际风场,使用 Gillette-Passi 公式^[12,16]计算得到。

3 结果与讨论

3.1 硫分布的模拟

许多观测事实说明,在沙尘气溶胶的表面覆盖着一层硫酸盐和硝酸盐。例如,在东地中海的测量表明,沙尘气溶胶表面上包有一层硫酸盐,这一表层使得这些气溶胶成为有效的云凝结核(CCN)^[17]。Parungo 等^[5]最近对东亚沙尘气溶胶作斑痕测试和 TEM 检测的结果也清楚地说明了这一点。在北太平洋地区进行的飞机采样观测发现,即使在相对湿度小于 40% 的情况下也有一部分沙尘气溶胶粒子的表面是湿的,并且表面包含一层硫酸盐和硝酸盐的可溶性溶液^[18]。本文模拟了这一过程。

首先,利用实测风场模拟了 1994 年 3 月 1 日至 14 日东亚地区沙尘浓度的变化^[12]。在这期间,第一次起沙过程发生在 3 月 3 日。这些沙尘气溶胶在以后的几天内随着高空风场向东南方向输送。较强的沙尘暴发生在 3 月 6 日。在源区附近地面层,模拟的沙尘质量浓度超过 $700 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这一过程释放的沙尘,随着低压系统的移动,首先向东输送,然后转向东北,强烈地影响沙尘所经地区(如中国北部、朝鲜半岛和日本)的大气环境质量。3 月 8 日输送到西太平洋上空的沙尘质量浓度超过 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。3 月 10 日,有沙尘从黄土高原源区释放,并向东移动,进入西太平洋。模拟结果说明,沙尘暴的发生、发展和输送特征与天气形势有密切的关系。

然后,根据 SO_x 的输送、化学转换和沉降模式,模拟了考虑沙尘气溶胶表面的非均相化学反应作用的 SO_2 和 SO_4^{2-} 分布。图 1、2 分别给出了 1994 年 3 月 2~5 日 1 km 高度上 SO_2 和 SO_4^{2-} 的分布。可以看出,模拟区域 SO_2 和 SO_4^{2-} 的分布与天气系统的移动情况有很大关系。3 月 2~5 日,一个冷锋过程经过日本上空,带来了东亚大陆上空高浓度的 SO_2 污染物。在 3 月 4、5 日模拟区域的大部分地区 SO_2 的体积分数超过 1×10^{-9} 。体积分数在 10×10^{-9} 以上的 SO_2 大值区主要出现在我国西南的四川、重庆一带和华北、华中地区的北京、河北、山东、上海一带。在韩国和日本的南部, SO_2 的体积分数也达到 5×10^{-9} 。在 SO_4^{2-} 分布中,体积分数为 2×10^{-9} 大值区主要有两个,一是位于我国的四川、重庆一带,另一个在我国的北京、河北、山东至韩国南部一带,大体上与 SO_2 的大值区相对应。在个别地区, SO_4^{2-} 体积分数达到 5×10^{-9} 。从图 2 还可以看到, SO_4^{2-} 体积分数为 1×10^{-9} 的等值线从我国东部向东一直伸展到韩国和日本南部,说明了 SO_4^{2-} 的输送作用较强。这些模拟结果与 Huang 等^[19]的结果基本是一致的。

3.2 模式硫分布与实验观测的比较

在 PEM-West B 实验观测期间,美国的 NASA 利用装备有大量科学仪器的 DC-8 型飞机,同时测量大气中几十种大气化学成分和相关的气象要素。 SO_2 和 SO_4^{2-} 浓度的测量是这次实验的一项重要内容。Thorton 等^[20,21]对这次观测的 S 分布特征作了详细的分析研究。他们认为,从东亚大陆输送来的硫化物已经对西太平洋地区有很大影响,

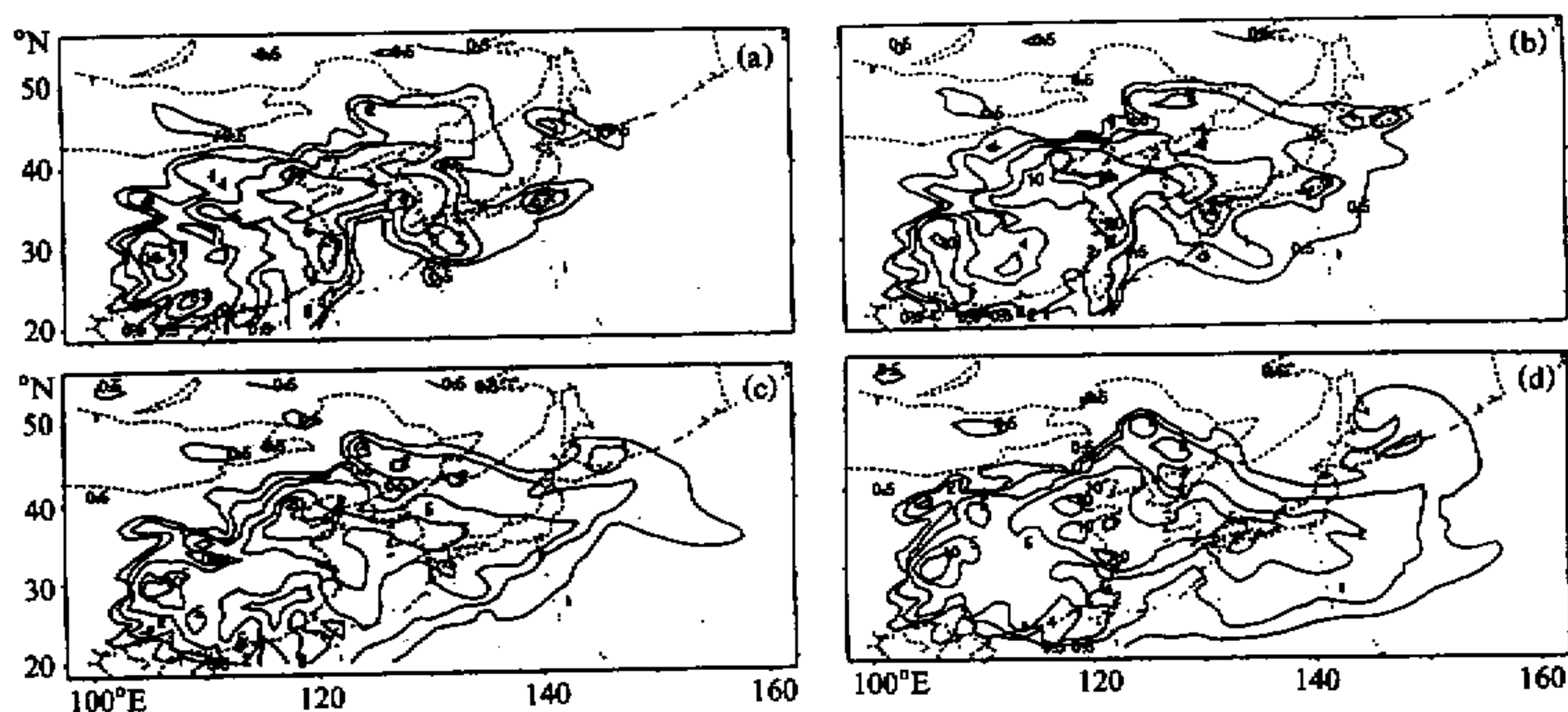


图1 1994年3月2日(a)、3日(b)、4日(c)、5日(d)在1 km高度上计算的 SO_2 体积分数 ($\times 10^{-9}$) 的分布

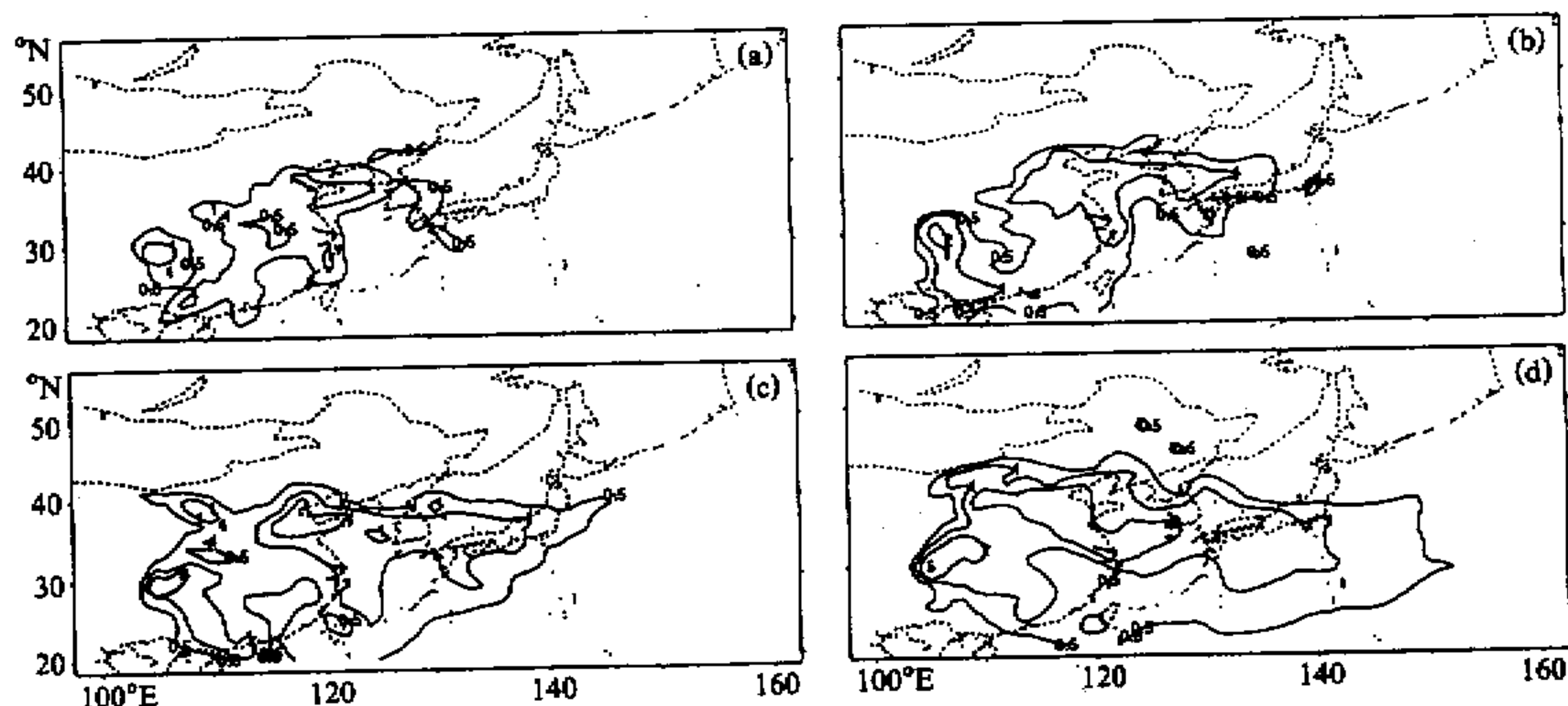


图2 1994年3月2日(a)、3日(b)、4日(c)、5日(d)在1 km高度上计算的 SO_4^{2-} 体积分数 ($\times 10^{-9}$) 的分布

SO_2 的来源主要是人为源和火山源的排放。下面, 仅对这次实验观测的一个个例的结果进行讨论, 以便与本模式模拟的结果相比较。

1994年3月4日DC-8型测量飞机进行了PEM-West B实验的第14次观测飞行。飞机从日本横田(Yokota, $139^\circ 23' \text{E}$, $35^\circ 45' \text{N}$)空军基地起飞后沿着 139°E 向南飞行。3月4日一条冷锋经过日本上空, 带来了源于亚洲大陆的富含 SO_2 的空气(见图1、2), 它经过我国华北、韩国到达日本南部。图3给出了模式模拟的 SO_2 和 SO_4^{2-} 沿 139°E 垂直剖面 and 沿航线的观测值。模式结果表明, 富含 SO_2 的空气主要集中在3 km以下的对流层下层, 并且其体积分数的最高值出现在 $30 \sim 40^\circ \text{N}$ 间。这与东亚地区主要

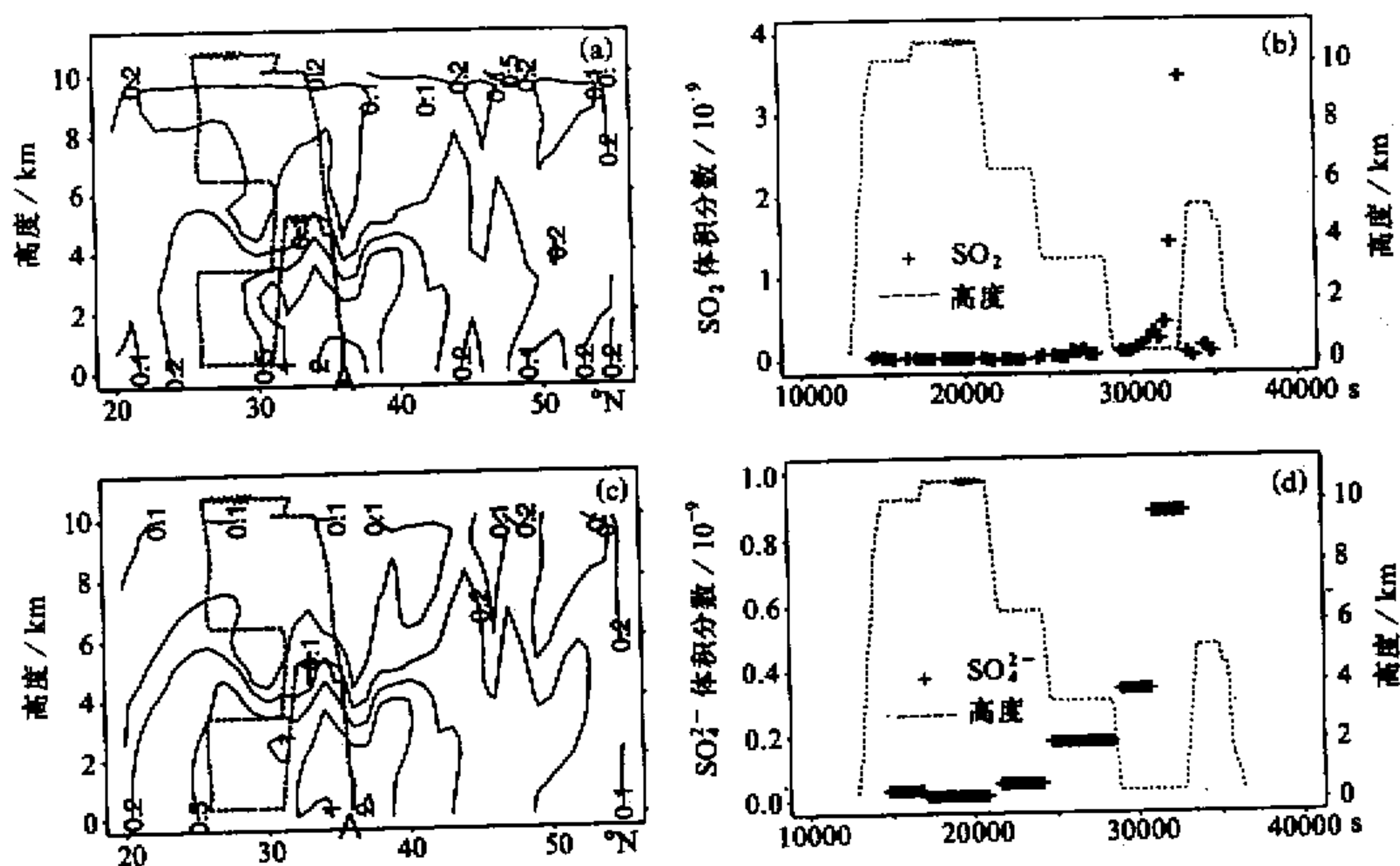


图3 1994年3月4日15:00(对应于第14次航测的时间),沿139°E线计算的 SO_2 和 SO_4^{2-} 垂直剖面图
(a)、(c)分别为模拟的 SO_2 和 SO_4^{2-} 体积分数($\times 10^{-9}$)的垂直分布及飞机航线(虚线);
(b)、(d)分别为飞机测量的 SO_2 和 SO_4^{2-} 体积分数沿航线(虚线)的分布

的工业和经济发展密集区的位置相一致的。另外,图3的观测结果和模拟结果都表明,在30°N处2 km高度上存在一个明显的峰值区。这个大值区看来受日本南部樱岛(Sakurashima)火山排放出的含硫气体的影响很大。Fujita等^[22]估计,这个位于日本九州(Kyushu)南部的火山,每年约有0.4 Tg的 SO_2 气体排放进入大气。

为了估计火山源的排放对大气中S分布的贡献,图4给出了仅有火山源贡献的 SO_2 和 SO_4^{2-} 绝对体积分数及其分别与考虑了所有排放源贡献的总 SO_2 和总 SO_4^{2-} 体积分数之比。在模拟期间,主要的火山源位于日本南部的九州岛、中部东京附近和北部北海道附近。从图4a、b上可以看出,在源区附近的一定区域内,由火山源贡献的 SO_2 约占总根据所有排放源模拟的总 SO_2 体积分数的10%~30%。对于 SO_4^{2-} ,也有相似的比值(图4c、d)。

1994年3月4日的流场使九州樱岛火山烟羽正好处在飞机航线附近(如图4所示)。飞机航线上1~3 km高度间,樱岛火山烟羽显示有一条很细长的体积分数为 0.5×10^{-9} 的 SO_2 高值区。在这个位置上扣除其它 SO_2 源影响的模式 SO_2 体积分数峰值为 1.5×10^{-9} ,在相应位置飞机也观测到一个大值区,峰值为 3×10^{-9} (在33000 s附近)。模式 SO_2 峰值比观测值小,可能主要是由于模式较低的水平分辨率产生的平滑作用所致。当然,在模拟中未考虑海洋源DMS对大气硫含量的贡献也可能是模式值比实测值小的一个原因,但Thornton等^[21]的研究表明,PEM-West B实验期间在西太平洋上空由DMS产生的 SO_2 占大气 SO_2 总量的10%以下。

3.3 区域硫化物的收支

把模拟时段(1994年3月1日~14日)内模式 SO_2 和 SO_4^{2-} 的浓度进行积分就可

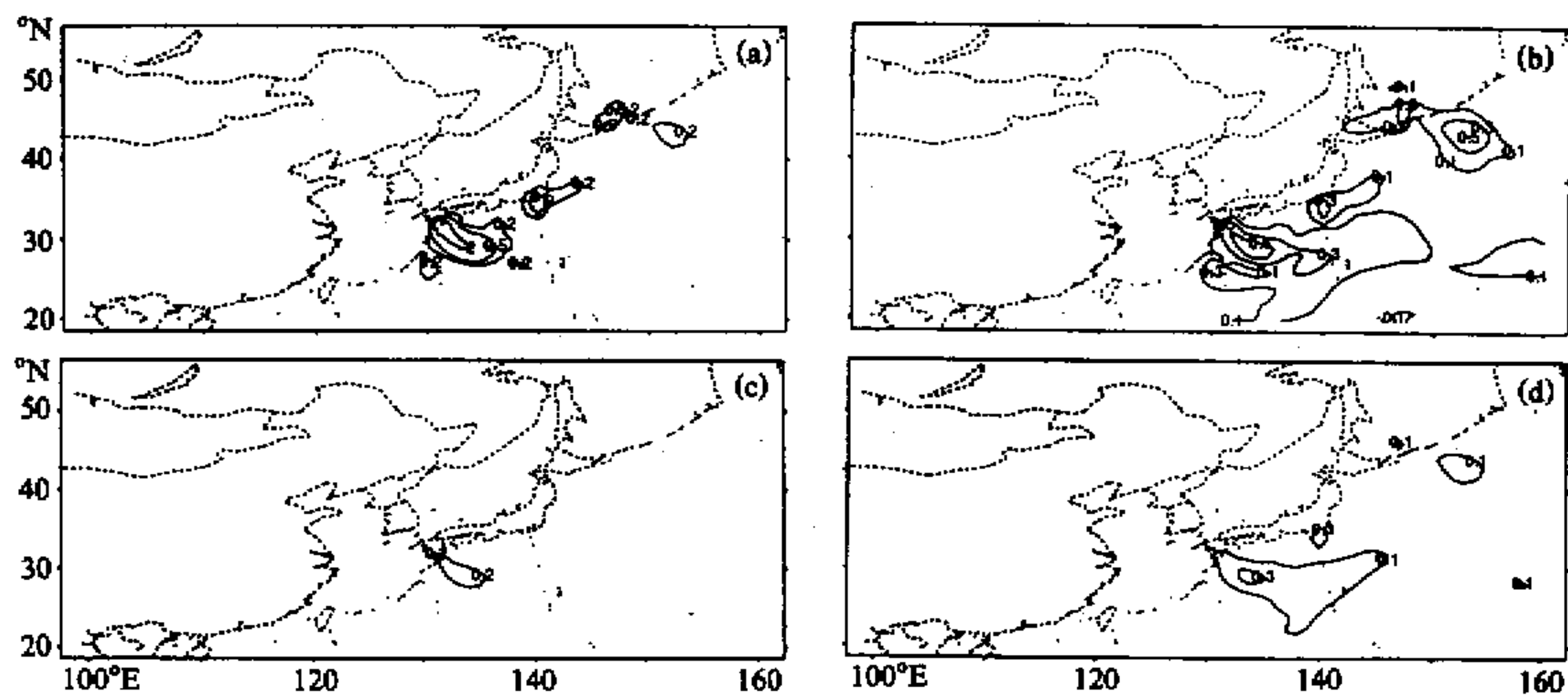


图4 1994年3月4日1 km高度上,计算的仅有火山源贡献的 SO_2 和 SO_4^{2-} 体积分数($\times 10^{-9}$)及其分别与考虑了所有排放源贡献的总 SO_2 和总 SO_4^{2-} 体积分数之比值
(a)、(b)分别为 SO_2 体积分数及相应的比值;(c)、(d)分别为 SO_4^{2-} 体积分数及相应的比值

以了解模拟区域内 SO_x 的收支。表1给出了模拟区域 SO_x 的总排放量、干沉降量和净通量(正值表示进入模拟区域的净通量)。在硫的总排放量中,有28%是通过干沉降清除的,并且在干沉降量中有85%是以 SO_2 的形式清除的;其余的72%硫排放总量输送到模式域外。表2给出了通过模式各个界面输送的总通量,其中,正值表示物质流入模式域,而负值表示物质流出模式域。可见,从东边界面流出去的S输送通量最大,为顶部界面流出量的7倍和南边界面流出量的3.7倍。进出模式各个界面的输送通量也是随时间变化的(见图5)。

表1 1994年3月1日~14日模式区域内 SO_2 和 SO_4^{2-} 的质量平衡 Gg

	初始 质量	地面源 排放量	高架源 排放量	火山源 排放量	模式域 流出量	干沉 降量	终了 质量
SO_2	709.26	186.38	82.46	8.61	-58.50	-68.47	743.58
SO_4^{2-}	356.07	6.54	2.90	0.30	-74.22	-12.60	378.62
总S	1065.33	192.92	85.36	8.91	-132.72	-81.07	1122.20

表2 1994年3月1日~14日流出模式域各边界的 SO_2 和 SO_4^{2-} 总量 Gg

	西边界	东边界	南边界	北边界	上边界	总输送量
SO_2	41.84	-73.29	-20.23	6.05	-11.94	-58.50
SO_4^{2-}	15.16	-63.29	-16.01	-2.61	-7.47	-74.22
总S	57.00	-136.58	-36.24	3.44	-19.41	-132.72

流出模拟区域的S输送量与沙尘气溶胶表面上的非均相反应有较大关系。对无沙尘气溶胶反应情况, SO_2 的S输送量占总硫输送量的64%, SO_4^{2-} 的S输送量占总硫输送量的36%;而对有沙尘气溶胶反应情况,这两个比例相应变为44%和56%。在模拟

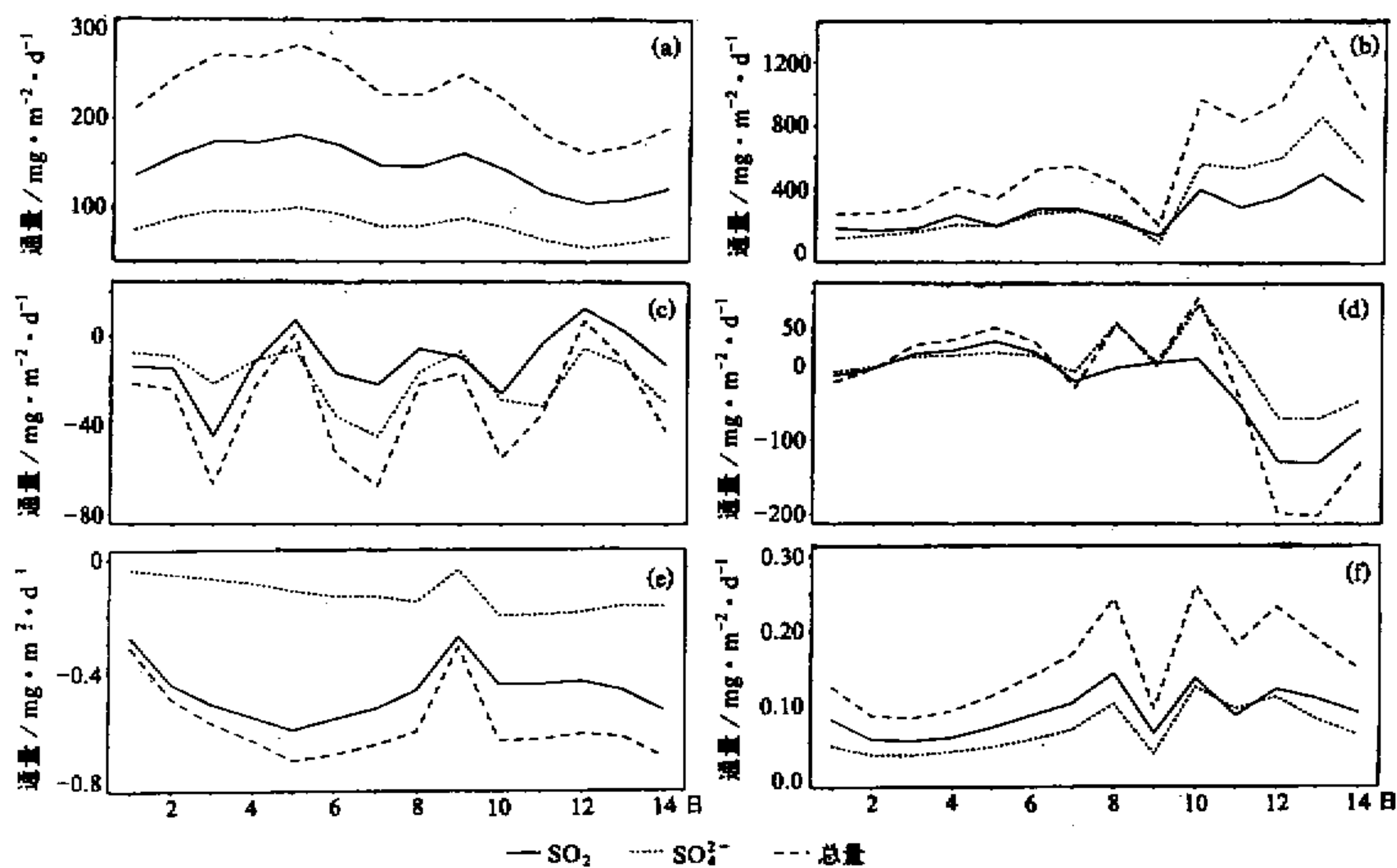


图5 1994年3月1日~14日模式各个界面上硫化物日平均输送通量
(a) 西边界; (b) 东边界; (c) 南边界; (d) 北边界; (e) 下边界; (f) 上边界

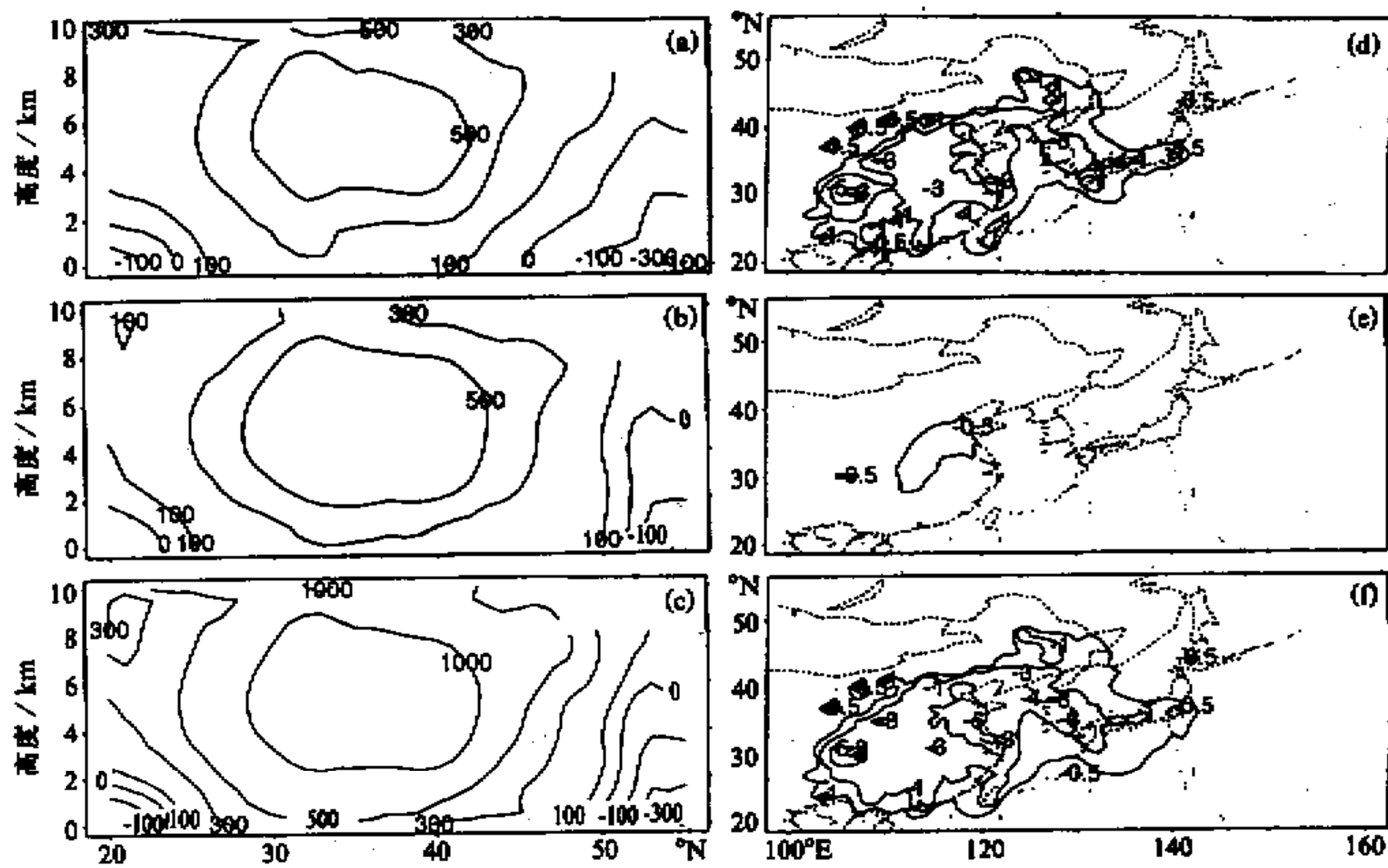


图6 东边界和下边界上硫化物14天平均通量的分布
单位: $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。(a)、(b)、(c) 分别为东边界面上 SO_2 、 SO_4^{2-} 和总 S 通量;
(d)、(e)、(f) 分别为下边界面上 SO_2 、 SO_4^{2-} 和总 S 通量

结束时, 无沙尘气溶胶反应情况下 SO_4^{2-} 的 S 净输送量为 51.4 Gg, 而有沙尘气溶胶反应情况下 SO_4^{2-} 的 S 净输送量为 74.2 Gg, 比无沙尘的情况增加了 44%。

图 6 给出了沿着模式的东边界面 (160°N) 和下边界的 14 天平均通量的分布。由图可见, 平均来说, 沿着模式的东边界面最大的流出通量出现在 $30\sim 40^\circ\text{N}$ 带的 2~6 km 高度上, 这是与该地区最大的人为排放源所在地相一致的。 SO_2 与 SO_4^{2-} 的通量分布形式非常相似。在模拟时段, 从模式的下边界沉降清除的最大通量主要出现我国东部广大地区, 并以 SO_2 的清除为主。

3.4 对流层 SO_4^{2-} 含量的区域分布特征及其对区域气候环境可能的影响

大气气溶胶对气候环境的作用可分为直接辐射强迫、间接辐射强迫和对云生命史的影响^[23]。这里主要讨论模拟时段大气 SO_4^{2-} 气溶胶的直接强迫作用。

图 7 给出了考虑和不考虑 SO_2 在沙尘气溶胶表面上的非均相反应作用产生的 SO_4^{2-} 含量分布。由图 7a 可见, 不考虑沙尘气溶胶表面反应作用的情况下, SO_4^{2-} 含量大于 $20\text{ mg}/\text{m}^2$ 的高值区主要集中在我国的西南、黄河和长江中下游地区, 并且整个模式区域的极大值区位于重庆附近, 这与那里较为严重的大气污染状况^[24~29]有关。

根据钱云等^[30]提供的方法, 可以估算出 SO_4^{2-} 气溶胶对地气系统的直接辐射强迫和温度变化的强度。图 7 中 SO_4^{2-} 含量为 $20\text{ mg}/\text{m}^2$ 等值线所围区域大体上造成辐射强迫的损失量为 $-6\text{ W}/\text{m}^2$, 引起的温度变化为 -0.2°C , 而 SO_4^{2-} 含量为 $35\text{ mg}/\text{m}^2$ 等值线所围区域可造成辐射强迫的损失量为 $-10\text{ W}/\text{m}^2$, 温度减少量为 -0.4°C 。

考虑气溶胶表面的非均相反应作用后 (图 7b), 整个对流层的 SO_4^{2-} 含量比不考虑气溶胶表面的非均相反应作用时增大 $40\%\sim 50\%$, 并且也比钱云等^[30]的结果大一些。 SO_4^{2-} 含量为 $50\text{ mg}/\text{m}^2$ 大值区主要出现在重庆、黄河与长江中下游地区, 极大值为 $75\text{ mg}/\text{m}^2$ 的区域位于湖北的宜昌、沙市至武汉一带。相应地, 含量为 $35\text{ mg}/\text{m}^2$ 的地区的 SO_4^{2-} 气溶胶产生的辐射强迫损失量达 $-10\text{ W}/\text{m}^2$, 引起的温度减少量为 -0.4°C 。

需要指出的是, 以上给出的 SO_4^{2-} 气溶胶对地气系统温度变化的结果是初步的, 而且影响东亚地区气候环境变化的原因很多, 需要用相关的动力学模式进一步加以研究。

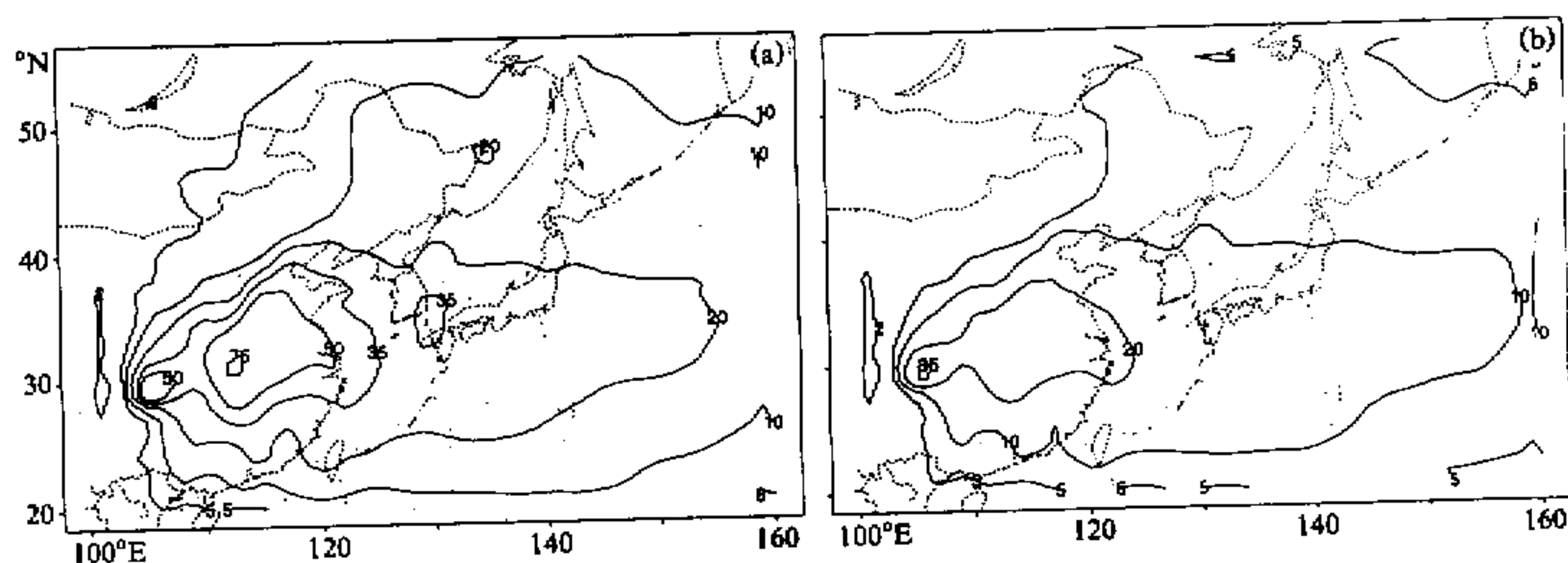


图 7 1994 年 3 月 1 日~14 日对流层 SO_4^{2-} 平均含量的区域分布
单位: mg/m^3 , (a) 考虑 SO_2 在沙尘气溶胶表面上的非均相反应作用的情况;
(b) 不考虑 SO_2 在沙尘气溶胶表面上的非均相反应作用的情况

4 小结

本文利用 STEM-II 区域尺度大气化学模式, 研究了 1994 年 3 月 1 日~14 日东亚地区春季沙尘气溶胶对硫化物输送和沉降的影响。结果表明, SO_2 和 SO_4^{2-} 的大值区主要出现在我国西南的四川、重庆一带, 华北和华中地区的北京、河北、山东、上海一带, SO_2 和 SO_4^{2-} 还有较强的向下游输送作用。在模拟时段, 日本地区火山源的排放对该地区大气中 S 分布的贡献达 10%~30%, 并与当时飞机的观测结果相吻合。文中分析研究了模拟区域内 SO_2 和 SO_4^{2-} 的收支。在硫的总排放量中, 有 28% 是通过干沉降清除的, 其余的 72% 硫排放总量输送到模式域外, 而且从东边界面流出去的输送通量最大, 为顶部界面流出量的 7 倍和南边界面流出量的 3.7 倍。平均来说, 通过模式的东边界面最大的流出通量出现在 30~40°N 带的 2~6 km 高度上, 这是与该地区最大的人为排放源所在地相一致的。整个对流层 SO_4^{2-} 含量的大值区主要出现在重庆、黄河与长江中下游地区, 而且极大值 75 mg/m² 的位置位于湖北的宜昌、沙市至武汉一带。文章最后还估算了模拟时段 SO_4^{2-} 气溶胶对地气系统的直接辐射强迫和温度变化的强度。

参 考 文 献

- 1 符淙斌、黄燕, 1996, 亚洲的全球变化问题, 气候与环境研究, 1(2), 97~112.
- 2 Foell, W., C. Green, M. Amann, G.R. Carmichael, et al., 1995, Energy use, emissions, and air pollution reduction strategies in Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, **85**, 2277~2282.
- 3 Zhang, X.Y., R. Arimoto and Z.S. An, 1997, Dust emission from Chinese desert sources linked to variation in atmospheric circulation, *J. Geophys. Res.*, **102**(D23), 28041~28047.
- 4 Andreae, M.O., 1995, Climatet effects of changing atmospheric aerosol levels, in: *World Survey of Climatology, Future Climates of the World*, Vol.16, edited by A. Henderson-Sellers, Elsevier, New York, 341~392.
- 5 Parungo, F., Y. Kim, C-J Zhu, et al., 1995, *Asian dust storms and their effects on radiation and climate*, Science and Technology Corporation, Hampton, Virginia, USA, STC Report 2906, 11~16.
- 6 Gao, Y., et al., 1992, Relationships between the dust concentrations over eastern Asia and the remote North Pacific, *J. Geophys. Res.*, **97**(9), 9867~9872.
- 7 肖辉、沈志来、黄美元, 1995, 陆上物质的远距离输送对西太平洋热带海域降水化学组成的影响, 环境科学学报, **15**(1), 16~22.
- 8 Zhang, Y., Y. Sunwoo, V. Kotamarthi and G.R. Carmichael, 1994, Photochemical oxidant processes in the presence of dust: An evaluation of the impact of dust on particulate nitrate and ozone formation, *J. Appl. Meteor.*, **33**, 813~824.
- 9 Dentener, F.J., G.R. Carmichael, Y. Zhang, J. Lelieveld and P.J. Crutzen, 1996, The role of mineral aerosol as a reactive surface in the global troposphere, *J. Geophys. Res.*, **101**, 22869~22889.
- 10 Hoell, J., D. Davis, S. Liu, R. Newell, M. Shipham, H. Akimoto, R. McNeal, R. Bendura and W. Drewry, 1996, Pacific Exploratory Mission A: September-October 1991, *J. Geophys. Res.*, **101**, 1641~1654.
- 11 Hoell, J.M., D.D. Davis, S.C. Liu, R.E. Newell, H. Akimoto, R.J. McNeal and R.J. Bendura, 1997, The Pacific Exploratory Mission-West Phase B: February-March, 1994, *J. Geophys. Res.*, **102**(D23), 28223~28239.
- 12 肖辉、G.R. Carmichael, Y. Zhang, 1998, 东亚地区沙尘气溶胶影响硫酸盐形成的模式评估, 大气科学, **22**(3), 343~353.
- 13 Carmichael, G.R., L.K. Peters and R.D. Saylor, 1991, The STEM-II regional scale acid deposition and photochemical oxidant model: I. An overview of model development and applications, *Atmos. Environ.*, **25A**, 2077~2090.

- 14 Carmichael, G.R. and L.K. Peters, 1984, An Eulerian transport / transformation / removal model for SO_2 and sulfate, I: Model development, *Atmos. Environ.*, **18**, 937~951.
- 15 Arndt, R. and G.R. Carmichael, 1995, Long range transport and deposition of sulfur in Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, **85**, 2283~2288.
- 16 Gillette, D.A. and R. Passi, 1988, Modeling dust emission caused by wind erosion, *J. Geophys. Res.*, **93**, 14233~14242.
- 17 Levin, Z., E. Ganor and V. Gladstein, 1996, The effects of desert particles coated with sulfur on rain formation in the eastern Mediterranean, *J. Appl. Meteor.*, **35**(9), 1511~1523.
- 18 (日本)名古屋大学水圏科学研究所编, 1991, 黄沙, Kokon 出版, 120~131.
- 19 Huang Meiyuan, Wang Zifa et al., 1995, Modeling studies on sulfur deposition and transport in East Asia, *Water, Air and Soil Pollution*, **85**(4), 1921~1926.
- 20 Thornton, D.C., A.R. Bandy, B.W. Blomquist, R.W. Talbot and J.E. Dibb, 1997, Transport of sulfur dioxide from the Asia Pacific Rim to the North Pacific troposphere, *J. Geophys. Res.*, **102**(D23), 28489~28499.
- 21 Thornton, D.C., A.R. Bandy, B.W. Blomquist, J.D. Bradshaw and D.R. Blake, 1997, Vertical transport of sulfur dioxide and dimethyl sulfide in deep convection and its role in new particle formation, *J. Geophys. Res.*, **102**(D23), 28501~28509.
- 22 Fujita, S. and A. Takahashi, 1994, Acidic deposition in East Asia, Cent. Inst. of Elec. Power Ind., Rep.T93091, 35p.
- 23 Charlson, R.J., J. Langner, et al., 1992, Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, **255**, 423~430.
- 24 沈志来、吴玉霞、肖辉、黄美元, 1992, 重庆地区云水化学特性年际变化, *环境科学学报*, **12**(2), 193~199.
- 25 沈志来、吴玉霞、肖辉等, 1993, 我国西南地区云水化学的某些基本特征, *大气科学*, **17**(1), 87~96.
- 26 Shen Zhilai, Wu Yuxia, Xiao Hui et al., 1993, Some basic features of cloudwater chemistry in Southwest China, *Chinese J. of Atmos. Sci.*, **17**(2), 195~205.
- 27 肖辉、沈志来、黄美元、吴玉霞, 1993, 我国西南地区地面和低层大气臭氧的观测分析, *大气科学*, **17**(5), 621~628.
- 28 黄美元、沈志来、刘帅仁、吴玉霞、肖辉等, 1995, 中国西南典型地区酸雨形成过程研究, *大气科学*, **19**(3), 359~366.
- 29 沈志来、吴玉霞、黄美元、肖辉等, 1996, 我国重酸雨地区云水化学观测研究, *科学通报*, **41**(4), 338~340.
- 30 钱云、符淙斌、胡荣明、王自发, 1996, 工业 SO_2 排放对东亚和我国温度变化的影响, *气候与环境研究*, **1**(2), 143~149.

Modeling Studies for the Effects of Spring-Time Mineral Aerosols on the Transport and Deposition of Sulfur in East Asia Using the STEM-II Model

Xiao Hui

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

Gregory R. Carmichael and Yang Zhang

(CGRER, University of Iowa, Iowa City, IA 52240, USA)

Abstract The impact of spring-time mineral aerosols on the transport and deposition of sulfur in East Asia during the period of March 1 through March 14, 1994 is studied using a three-dimensional regional-scale atmospheric chemistry model (STEM-II model) coupled with the mineral dust processes. The results indicate that the areas of the maximum amounts of sulfur dioxide and particulate sulfate are

located in the eastern China. The sulfur emitted from the volcanos in Japan is responsible for 10% to 30% of the atmospheric sulfur in the local region during this time period, which is comparable with the aircraft-based measurements. The sulfur transport is largely limited to the 2~6 km level of the atmosphere, with the maximum flux occurring in the 30°N to 40°N band which is consistent with the region of maximum anthropogenic emissions. The distributions of the average column amounts of the particulate sulfate in this region are shown, and the directive radiative forcing of the particulate sulfate on the temperature variation of the earth-atmosphere system is also discussed.

Key words mineral aerosol sulfur volcanic emission radiative forcing East Asia