

硫酸盐气溶胶辐射强迫的数值模拟研究^{*}

马晓燕 石广玉 郭裕福 张立盛

(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 利用 IAP/LASG GOALS 4.0 海气耦合模式,“显式”考虑了硫酸盐气溶胶的直接作用,并且引入德国马普气象研究所的三维浓度分布资料,模拟计算了硫酸盐气溶胶的辐射强迫。主要结果为:全球气溶胶年平均的辐射强迫为 -0.29 W m^{-2} ,在 IPCC TAR 给定的范围内,空间分布上具有明显的地域性,几个大值地区分别为东亚、西欧和北美,它们的中心值均超过 -1.5 W m^{-2} ,南美、澳大利亚以及非洲南部的辐射强迫介于 $-0.2 \sim -0.4 \text{ W m}^{-2}$ 之间,而海洋和偏远的大陆地区,则基本上不受人为硫酸盐气溶胶的影响;计算的东亚地区硫酸盐气溶胶的平均辐射强迫为 -0.75 W m^{-2} ,约为全球平均的 2.5 倍,为北半球平均的 1.6 倍。文中还讨论了全球硫酸盐气溶胶对温室气体辐射强迫的减缓作用。

关键词: 海气耦合模式;硫酸盐气溶胶;辐射强迫

文章编号 1006-9585 (2004) 03-0454-11 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

1 引言

由于人类活动的影响,大气中温室气体的浓度从工业革命后开始急剧增加,据最新的 IPCC 报告估计,其辐射强迫约为 2.35 W m^{-2} 。与此同时,气溶胶的浓度也在持续地上升。根据排放源和光学性质的不同,气溶胶又分为多种,如硫酸盐气溶胶、黑碳气溶胶、生物质气溶胶,以及近年来备受关注的沙尘气溶胶等等。其中,硫酸盐气溶胶一方面因其分布及相关信息容易定量化;另一方面因它占积聚态气溶胶 ($0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$) 质量的 25%~50%,而积聚态气溶胶对太阳辐射的影响最大;再一方面硫酸盐气溶胶易溶于水,可有效地作为云凝结核,因此目前对气溶胶的研究主要集中在硫酸盐气溶胶。国外一些研究表明^[1~8],硫酸盐气溶胶产生的直接辐射强迫全球平均为 $-0.3 \sim -0.9 \text{ W m}^{-2}$,而间接辐射强迫约为 $0 \sim -1.6 \text{ W m}^{-2}$ 。可见硫酸盐气溶胶产生的辐射强迫与温室气体产生的辐射强迫符号相反,但却大小相当,因此可在一定程度上抵消温室效应,减缓全球增暖的趋势。然而,与均匀混合的温室气体不同,硫酸盐气溶胶在对流层中寿命较短,一般仅为几天至几周;同时其源的地理分布非常不均匀,据估计目前全球 SO_2 的人为排放大约为 $70 \sim 90 \text{ Tg a}^{-1}$,其中 90% 来自于北半球工业区,只有很少一部分被输送到南半球。由于硫酸盐气溶胶较短的寿命及其源的不均匀分布,所以硫酸盐气溶胶的辐射强迫和气候效应均具有显著的区域性特征。目前由于缺乏对硫酸盐气溶胶全球排放状况的深入了解和认识,并且对其辐射性质的描述也存

在着一定的不确定性, 因而迄今为止, 对于硫酸盐气溶胶辐射强迫的研究结果之间还存在着一定的差异^[1~8], 这就需要对作进一步深入的研究。

就国内而言, 研究硫酸盐气溶胶的辐射强迫及其气候效应的工作开展得较少, 特别是利用全球气候模式所进行的这方面的研究工作。张立盛等^[9,10]曾利用 AGCM 模式估算了硫酸盐气溶胶和烟尘气溶胶造成的直接辐射强迫值。本文在此工作的基础上, 通过对硫酸盐气溶胶辐射特性的对比分析, 将硫酸盐气溶胶的影响引入到中国科学院大气物理研究所自行发展的全球海气耦合模式 GOALS 4.0 中。硫酸盐浓度来源于德国马普气象研究所 (MPI) 化学输送模式模拟的全球三维分布, 本文将其合理地引入模式中, 模拟计算了硫酸盐气溶胶造成的辐射强迫, 并讨论了结果的合理性及可能的误差来源。论文具体结构安排如下: 首先简略描述了 GOALS 4.0 模式的基本特点, 然后介绍模拟所需的硫酸盐气溶胶的辐射特性, 讨论了浓度的时间及空间变化特征, 接着对模拟的硫酸盐气溶胶的辐射强迫做了详细地讨论, 最后是总结和讨论。

2 模式简介

全球海洋—大气—陆面过程耦合模式 GOALS 4.0 是由 9 层大气、20 层海洋、3 层土壤和 1 层植被组成的^[11,12]。其中大气模式 (AGCM) 是 9 层 15 波菱形截断的谱模式 (R15L9), 水平分辨率相当于 7.5° (经度) $\times 5.5^\circ$ (纬度), 在垂直方向为不等距分层, 该模式引入标准大气扣除法以及新的改进的陆面过程。模式中的辐射方案采用石广玉^[13]和王标^[14]发展的 k 分布方法来描述大气气体的吸收, 主要吸收气体包括 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 和 N_2O 。模式共分 12 个波段, 短波部分 5 个, 长波 7 个, 并且采用二流方法计算辐射传输, 算法采用 Toon 等^[15]提出的三对角解法和二流源函数技术, 因而大气中的吸收、散射及热辐射等过程可以同时显式处理。模式的海洋部分 (OGCM) 是一个基于原始方程的 20 层全球海洋环流模式 (ML20), 其水平分辨率为 5° (经度) $\times 4^\circ$ (纬度), 垂直方向分 20 层, 模式的海陆分布及海底地形是根据 Gates 和 Nelson^[16]的 $1^\circ \times 1^\circ$ 资料产生的, 模式在垂直方向采用了 σ 坐标, 以便同时处理自由面及复杂的海底地形。陆面过程模式是一个改进的简单生物模式^[17,18]。海洋和大气的耦合使用修正的月通量距平耦合方案 (MMFA)^[19]。

3 硫酸盐气溶胶的辐射特性

硫酸盐气溶胶的直接效应是通过散射太阳辐射而影响气候的, 因此其直接效应可以通过增加地表反照率来实现。一般而言, 这种做法必须满足三个基本假定, 第一, 硫酸盐气溶胶对太阳辐射的吸收可以忽略不计; 第二, 硫酸盐气溶胶对地气长波辐射的效应可以忽略不计; 第三, 还需假定绝大部分硫酸盐气溶胶接近于地面。前两个假定对于纯粹的硫酸盐气溶胶是成立的, 而最后一个假定会造成对气溶胶的散射高估 20%^[20], 这是因为地面的相对湿度通常较高, 从而导致估算的辐射强迫偏高。本文采用对硫酸盐气溶胶的“显式”处理方案, 即将硫酸盐气溶胶的辐射特性直接引入模式中, 并输入气溶胶浓度的变化资料, 从而模拟硫酸盐气溶胶的辐射强迫及其气候效应。

在 GOALS 的辐射模式中, 统一采用光学厚度、单次散射反照率和不对称因子来描述大气中各种成分的辐射性质。气溶胶的辐射特性可以通过 Mie 散射计算^[21]得到, Mie 散射理论是在假定粒子为球形的前提下, 已知粒子的光学特性及其谱分布, 从而计算粒子的辐射特性。目前在实际应用过程中, 一般把硫酸盐气溶胶粒子当作球形来处理。而气溶胶的光学特性 (一般指复折射指数) 主要取决于其化学成分和波长。复折射指数也称复折射率, 一般表示为 $m = m_r - im_i$, 其中 m_r 和 m_i 分别是折射指数的实部和虚部。虚部表征的是粒子散射和吸收能力的相对大小, 当虚部越大时, 吸收越强, 而散射较弱。由硫酸盐气溶胶粒子的折射指数可见 (图略, 参见文献 9 图 4.2), 在波长小于 $2\ \mu\text{m}$ 时, 虚部很小; 而当波长超过 $2\ \mu\text{m}$ 时, 虚部迅速增加; 当波长大于 $3\ \mu\text{m}$ 时, 虚部的增加已超过两个数量级。这说明在短波部分, 硫酸盐气溶胶粒子的散射作用相对较强, 而吸收较弱; 在长波部分, 其吸收作用相对较强, 在处理上是不可忽略的。

在气候学研究中, 硫酸盐气溶胶粒子的谱分布一般采用对数正态分布。这样, 在已知粒子的光学性质、几何形状以及谱分布的情况下, 就可以利用 Mie 散射理论来计算气溶胶的辐射特性, 包括消光 (散射和吸收) 系数、单次散射反照率和不对称因子。

本文硫酸盐气溶胶的辐射特性, 包括质量消光特性、单次散射反照率和不对称因子, 主要依据文献 [9, 10] 的计算结果并参考 NCAR/CCM3 的值^[22]而得到^[23] (图 1)。其中, 质量消光系数主要采纳了 CCM3 的取值, 而单次散射反照率和不对称因子采用 Wiscombe^[21]的 Mie 散射计算的结果。由图 1 可见, 硫酸盐气溶胶的质量消光系数

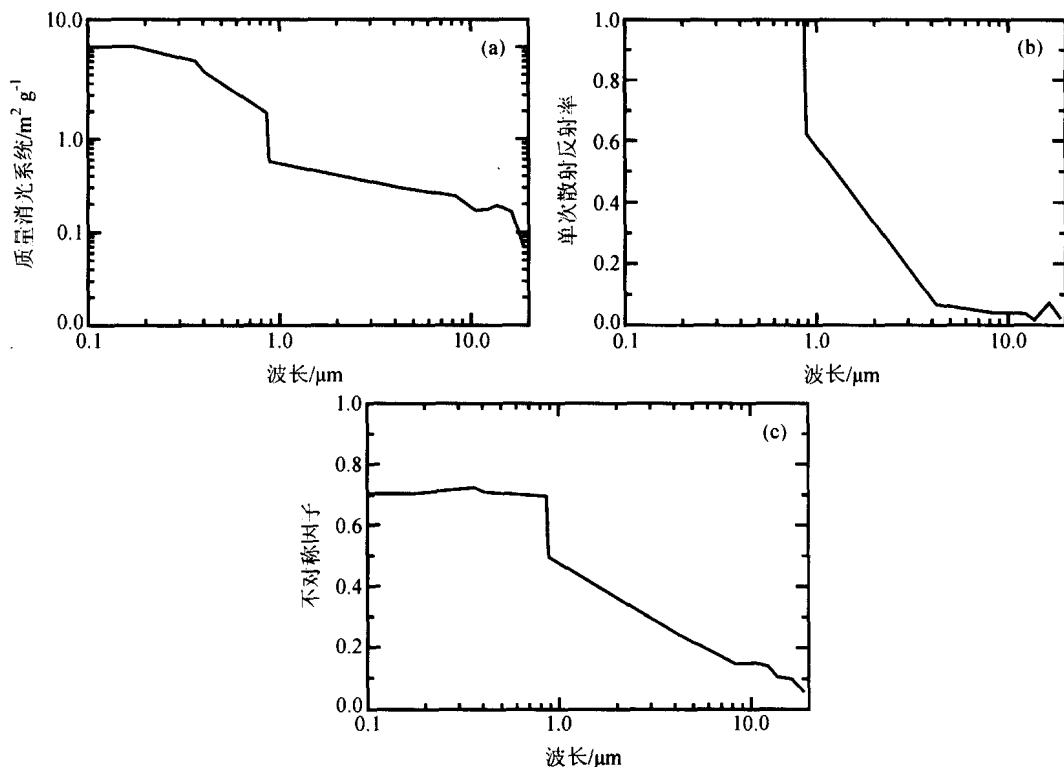


图 1 硫酸盐气溶胶的质量消光系数 (a)、单次散射反照率 (b) 及不对称因子 (c)

对波长有很强的依赖性, 在 $0.3 \mu\text{m}$ 以下, 质量消光系数近似为 10; 随波长的增加, 消光系数基本呈递减的趋势, 在 $1 \mu\text{m}$ 以上, 质量消光系数小于 1。单次散射反照率的变化显示, 在波长小于 $1 \mu\text{m}$ 时, 其值约等于 1, 也就是说, 硫酸盐气溶胶在整个可见波段是非吸收的。不对称因子的变化随波长的增加基本也是呈现下降的趋势。本文的硫酸盐气溶胶辐射参数与文献 [9] 的主要差异在于 $1 \mu\text{m}$ 以内的质量消光系数的取值, 文献 [9] 的值明显低于本文。本文的敏感性试验表明, 在某种给定的硫酸盐气溶胶浓度情况下, 例如在本文所用的 MPI 的化学输送模式模拟的 1990 年硫酸盐气溶胶的浓度下, 这两种消光系数的不同造成对流层顶的辐射强迫相差约为 0.1 W m^{-2} 。因此今后需要进行大量的地面观测和卫星反演工作, 以提高硫酸盐气溶胶辐射参数的可靠性。

4 硫酸盐气溶胶的浓度

硫酸盐气溶胶的浓度来源于德国马普气象研究所 (MPI) 化学输送模式 (CTMs) 的模拟结果^[24,25]。其具体做法是: 在一个对流层硫循环模式中, 与气候模式 ECHAM4 做交互式计算输送过程、沉降过程以及部分化学过程。模式的预报变量分别为气相的二甲基硫 (DMS) 和二氧化硫 (SO_2) 以及固相的硫酸盐 (SO_4^{2-})。来源于海洋、土壤和植被等生物质的排放以二甲基硫 (DMS) 的形式出现, 而来源于非爆发性的火山、生物质燃烧以及化石燃料燃烧的排放以 SO_2 的形式出现。平流输送、垂直扩散和对流输送的处理方法与水汽相似。到达地面的干沉降通量是最低层 (约相当于地面以上 30 m) 浓度的函数, 沉降速率依赖于硫的成分 (如 SO_2 或 SO_4^{2-}) 以及地面状况 (如水、冰、雪或土壤湿地)。而 SO_2 或 SO_4^{2-} 的降水清除根据局地的降水形成率来计算。

化石燃料和工业硫排放的时空变化来自于以下各种源: 对于 1860, 1870, ..., 1970 年使用的是 Orn 等^[26]的估算; 对于 1980 年使用 Spiro 等^[27]的结果; 而对于 1990, 2000, ..., 2050 年则使用 IS92a 的排放情景。本文以 1990 年的人为硫酸盐气溶胶来进行讨论。

图 2a 所示为地面 (以模式最低层表示) 硫酸盐气溶胶质量混合比的全球分布。可以看到, 全球存在 3 个明显的大值中心, 分别对应于北半球的主要工业区, 其中东亚地区浓度最大, 中心值达到 $8 \mu\text{g m}^{-3}$, 西欧较东亚地区略小, 其次是北美。另外在南美、非洲南部以及澳大利亚也形成一定的高值中心, 而南半球大部分地区和海洋地区硫酸盐的浓度一般小于 $0.5 \mu\text{g m}^{-3}$ 。模式最顶层 (30 hPa (图 2b)), 全球分布呈现出显著的纬向特征, 最大值位于赤道至北半球 30°N 左右区域, 两半球高纬地区浓度最小。但总体而言, 模式顶层的硫酸盐气溶胶的浓度非常小, 说明硫酸盐气溶胶主要集中在距离地面较近的区域。由年平均浓度的纬度—高度分布 (图 3) 可以更清楚的说明这一点, 即浓度的分布主要在 600 hPa 以下的对流层低层到地面之间和北半球约 $10\sim 70^\circ\text{N}$ 的范围内, 在 $28\sim 50^\circ\text{N}$, 800 hPa 以下硫酸盐浓度平均超过 $2 \mu\text{g m}^{-3}$ 。

全球平均浓度的垂直分布 (图 4) 表明, 地面至 850 hPa 之间硫酸盐气溶胶浓度较大, 平均大于 $0.6 \mu\text{g m}^{-3}$, 在 900 hPa 左右处达到最大值 $0.8 \mu\text{g m}^{-3}$, 而在 850 hPa 以上高度时, 硫酸盐气溶胶浓度迅速减小, 至 100 hPa 以上时, 浓度接近于零。

以上讨论的是硫酸盐气溶胶在不同高度的分布情况, 对整个气柱而言其浓度的状

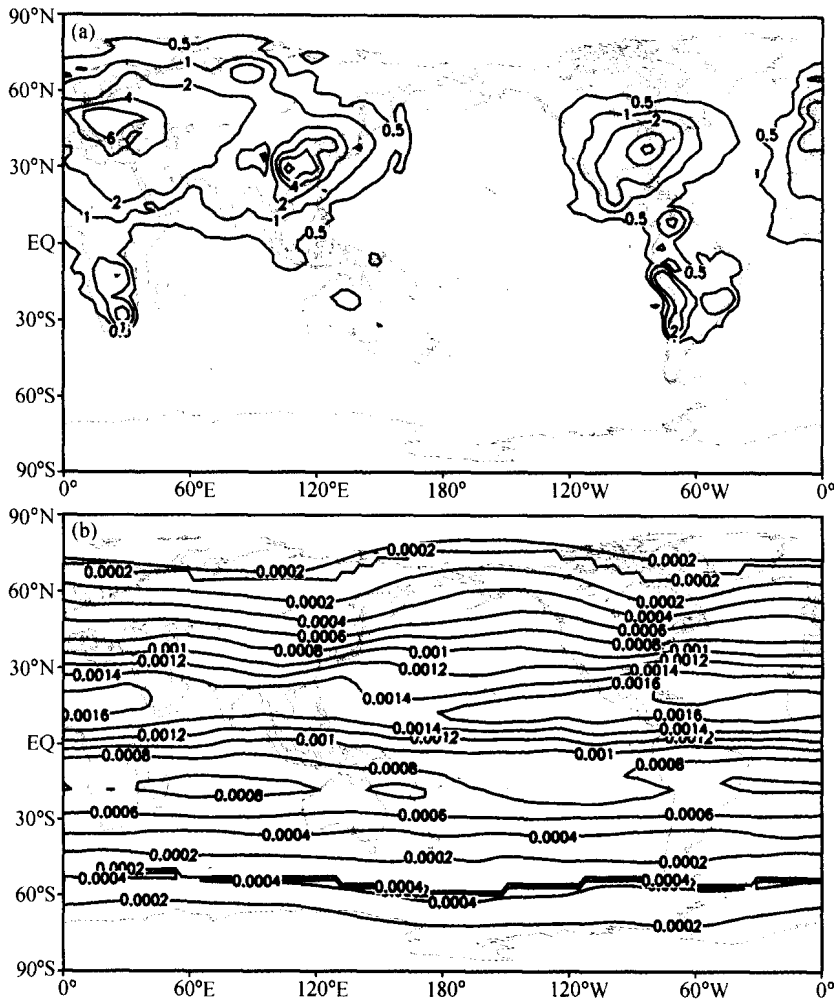


图2 模式最低层 1 000 hPa (a) 以及模式最上层 30 hPa (b) 人为硫酸盐气溶胶质量浓度的空间分布 (单位: $\mu\text{g m}^{-3}$)

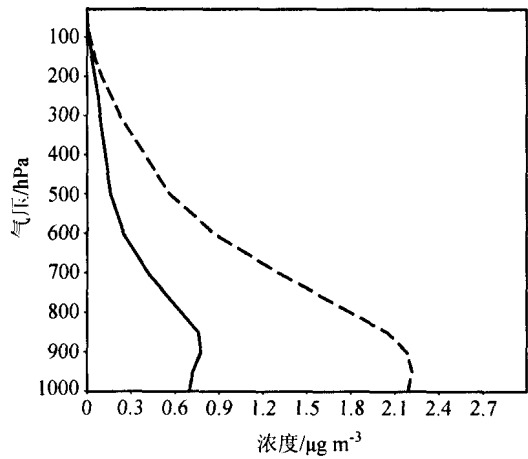


图3 人为硫酸盐气溶胶质量浓度的垂直分布
实线表示全球平均值, 虚线表示东亚地区的平均值

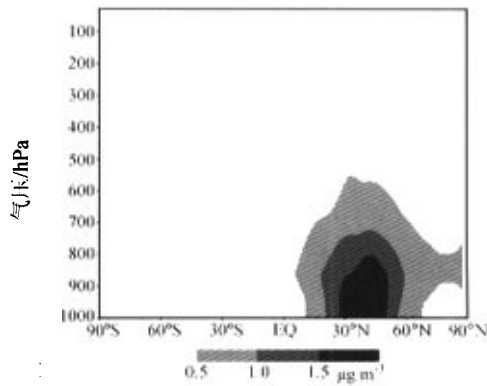


图4 人为硫酸盐气溶胶的纬度-高度分布

况用柱含量来表示。可以发现,人为硫酸盐气溶胶柱含量的全球分布(图略)与地面浓度的空间分布(图 2a)非常相似,柱含量的最大值区域依次为东亚、西欧和北美,中心区分别达 16、14 和 8 mg m^{-2} 。这也表明,整个气柱内的硫酸盐气溶胶浓度主要取决于其低层的硫酸盐气溶胶含量。仅就 1990 年而言,计算的柱含量为 2.15 mg m^{-2} ,与 MPI 给出的柱含量相比^[24],本文计算的值略微偏小,这是由于模式的空间(包括水平和垂直)分辨率不同,在对初始资料进行插值时所带来的误差。

5 硫酸盐气溶胶的辐射强迫

本文模拟了 20 世纪硫酸盐气溶胶的辐射强迫,这里只以 1990 年的结果来讨论,目的主要是为了与国外其他相关的工作进行对比,有关其辐射强迫的时间变化将有另文讨论^[28]。计算结果表明,全球年平均光学厚度为 0.01,其空间分布与地面浓度以及柱含量的分布是一致的,整体特征为北半球明显高于南半球(图略),除大洋州以外的大部分大陆地区,硫酸盐气溶胶的光学厚度都超过 0.01,而海洋上的值一般较小。人为硫酸盐气溶胶的辐射强迫全球平均是 -0.29 W m^{-2} ,在政府间气候变化专门委员会(IPCC)第三次科学评估报告^[29]给出的 $-0.26 \sim -0.82 \text{ W m}^{-2}$ 的范畴之内(表 1),更与绝大多数模式的结果($-0.26 \text{ W m}^{-2} \sim -0.4 \text{ W m}^{-2}$)相吻合。辐射强迫的空间分布(图 5)显示出在北半球工业区存在最强的辐射强迫,其中东亚地区的辐射强迫最大,西欧和北美次之,中心辐射强迫值均大于 -1.5 W m^{-2} ,在南美地区、澳大利亚以及非洲南部地区有 $-0.2 \sim -0.4 \text{ W m}^{-2}$ 的辐射强迫;而在海洋上或者遥远的大陆地区,辐射强迫值普遍小于 0.1 W m^{-2} ,受人类活动的影响较小,或基本上不受人为硫酸盐气溶胶的影响。

表 2 还给出了本文模拟的人为硫酸盐气溶胶的柱含量、光学厚度和辐射强迫在全球、北半球、南半球以及东亚地区($16 \sim 62^\circ \text{N}$, $75 \sim 146^\circ \text{E}$)的平均结果。由该表可知,北半球平均的辐射强迫(NH)是 -0.46 W m^{-2} ,南半球(SH)仅为 -0.13

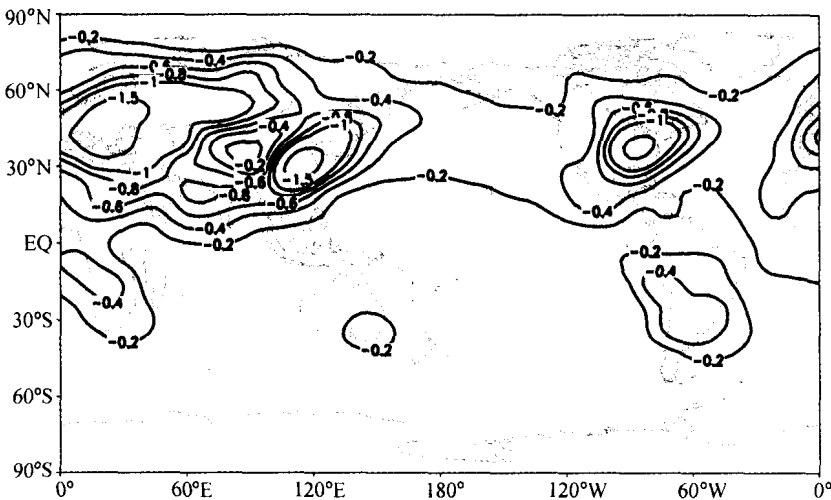


图 5 人为硫酸盐气溶胶直接辐射强迫的空间分布(单位: W m^{-2})

W m^{-2} , NH/SH 的值为 3.5, 而 IPCC 给出的范围在 2.0~6.9 之间。由于用来计算硫酸盐气溶胶辐射强迫的浓度值来源于 MPI 的硫循环模式的模拟结果, 因此这里特别将使用同一资料的 Feichter 等^[24]的研究进行对比, 该研究得到的硫酸盐气溶胶辐射强迫全球平均值为 -0.35 W m^{-2} , 略大于本文的 -0.29 W m^{-2} , 这可能与使用的对硫酸盐气溶胶散射作用估算的处理方案不同有关。Feichter 等使用的简化估算可能导致其结果偏高, 其南北半球辐射强迫之比(即 NH/SH)为 4.2, 略大于本文的结果。从全球平均的柱含量来看, 本文得到的值(2.15 mg m^{-2})与 Feichter 等的计算值(2.23 mg m^{-2})非常接近, 空间分布也相当一致。这也表明, 本文在引入 MPI 的硫酸盐气溶胶浓度资料时, 包括资料获得和插值等方面的初始工作是成功的。另外, 对于区域尺度而言, 以硫酸盐气溶胶浓度最大的东亚地区为例, 其硫酸盐气溶胶的柱含量为 8.5 mg m^{-2} , 是全球平均的 4 倍, 是整个北半球平均的 1.8 倍。计算的东亚地区硫酸盐气溶胶的辐射强迫为 -0.75 W m^{-2} , 约为全球平均的 2.5 倍, 为北半球平均的 1.6 倍。将这一结果与利用区域气候模式模拟的值相比^[30], 两者的一致性相当好。

表 1 不同研究模拟的硫酸盐气溶胶全球年平均直接辐射强迫 (DRF)

作者或数据来源	DRF/ W m^{-2}	柱含量/ mg m^{-2}	DRF NH/SH	使用的气溶胶模式来源
Ghan 等	-0.44	4.0	5.2	Ghan 等
Jacobson	-0.32	2.55	2.7	Jacobson
Boucher 和 Anderson	-0.29	2.32	4.3	Langner 和 Rodhe
Graf 等	-0.26	1.70	2.0	Graf 等
Feichter 等	-0.35	2.23	4.2	Feichter 等
Kiehl 和 Briegleb	-0.28	1.76	3.3	Langner 和 Rodhe
Iversen 等	-0.41	2.40	4.1	Iversen 等
Myhre 等	-0.32	1.90	6.9	Restad 等
Van Dorland 等	-0.36	2.11	5.0	Van Dorland 等
Koch 等	-0.68	3.3		Koch 等
Kiehl 和 Rodhe	-0.66	3.23		Pham 等
Chuang 等	-0.43	2.10	4.7	Chuang 等
Haywood 等	-0.28	1.14		Chin 和 Jacob
Kiehl 等	-0.56	2.23	2.7	Kiehl 等
Haywood 和 Ramaswamy	-0.63	1.76	2.6	Langner 和 Rohde
Penner 等和 Grant 等	-0.81	1.82	4.5	Penner 等
本研究	-0.29	2.15	3.5	Feichter 等

注: NH/SH 为北半球和南半球直接辐射强迫比率。除本研究外的其他数据取自文献 [29], 各作者及气溶胶模式的相应参考文献请查看该文献。

表 2 人为硫酸盐气溶胶的柱含量、光学厚度和辐射强迫的统计

	全球	北半球	南半球	东亚	东亚*
柱含量/ mg m^{-2} (SO_4)	2.15	4.7	1.3	8.5	
光学厚度	0.009	0.015	0.004	0.026	0.02
辐射强迫/ W m^{-2}	-0.29	-0.46	-0.13	-0.75	-0.70

* 为区域气候模式的模拟结果^[30]

前文已提到, 硫酸盐气溶胶对于温室气体导致的全球变暖有一定的减缓作用。近年来的一些研究^[25,31]也证实, 如果在模式中同时考虑温室气体和硫酸盐气溶胶的作用, 较之只考虑温室气体的影响时, 模拟的全球升温的幅度与实际情况更为接近。因此, 若要真实再现 20 世纪全球气候的变化状况, 硫酸盐气溶胶的影响是不容忽视的。由温室气体造成的辐射强迫来看, 其全球平均值为 2.17 W m^{-2} , 而硫酸盐气溶胶的作用将使这种正强迫减小 0.29 W m^{-2} ; 另外温室气体的辐射强迫在空间分布上是比较均匀的(图 6a), 并且呈现出明显的纬向特征, 在副热带地区最大(大于 2.5 W m^{-2}), 而在极地最小(小于 1 W m^{-2})。如果同时考虑了硫酸盐气溶胶的影响之后(图 6b), 可以发现对只由温室气体造成的辐射强迫有明显的减弱, 特别是在北半球主要的工业地区及其下风方向, 辐射强迫可减至 1 W m^{-2} 左右。由此可见, 硫酸盐气溶胶对温室效应的减缓作用是非常明显的, 特别是在硫酸盐气溶胶浓度较大的东亚、西欧和北美地区, 影响更为显著。近年来, 一系列观测和模拟研究均表明, 在全球变暖的背景下, 我国南

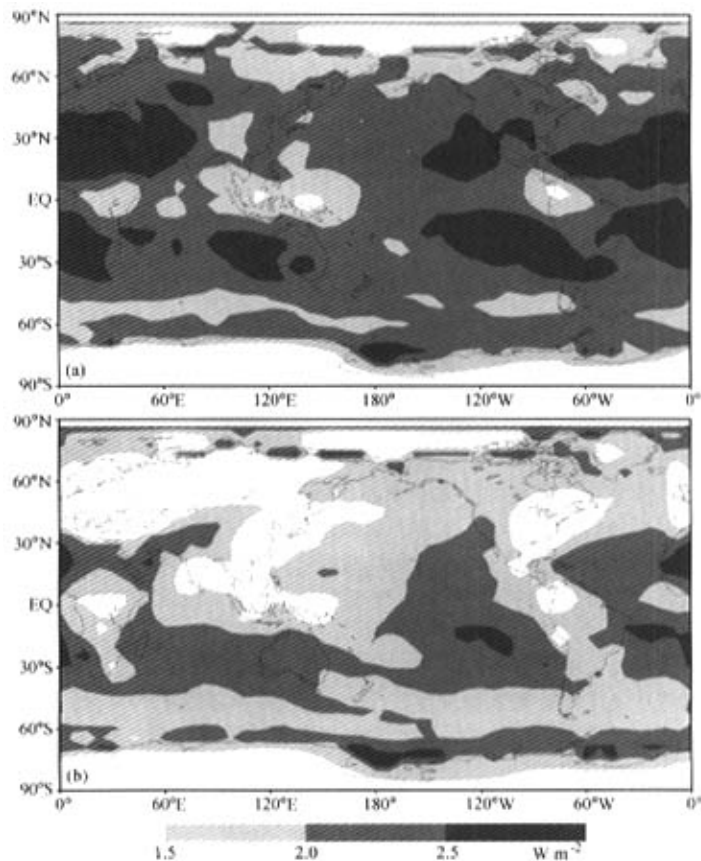


图 6 温室气体辐射强迫的空间分布 (a) 以及温室气体和硫酸盐气溶胶共同作用的辐射强迫的空间分布 (b)

方大部分地区年平均气温呈下降趋势。其中陈隆勋等^[32]利用中国 400 个台站的月平均资料,对 45 年来的气候变化特征作了全面的分析,结果发现,中国现代的气温变暖主要发生在 35°N 以北地区,变暖最大在新疆和黑龙江北部,与此同时,在 (35~23°N, 100°E) 以东地区存在一个更为广阔的变冷区;王喜红等^[30,33]利用区域气候模式的模拟结果表明,在 40°N 以北,降温幅度非常小,主要降温区位于 40°N 以南和 110°E 以东的广大地区。这些研究均表明,我国近几十年气温的变化与硫酸盐气溶胶的浓度之间可能存在着某种的联系。

6 结语和讨论

本文在 IAP/GOALS 模式中显式考虑了硫酸盐气溶胶的作用,并引入德国马普气象研究所的硫酸盐气溶胶浓度的时空分布资料,模拟分析了其辐射强迫的变化特征。结果表明,全球硫酸盐气溶胶年平均辐射强迫为 -0.29 W m^{-2} ,处于 $-0.26 \sim -0.82 \text{ W m}^{-2}$ 的范围之内,而且与绝大部分研究得到的辐射强迫在空间分布上是近似的,即在北半球工业区表现出较大的强迫值。计算的东亚地区硫酸盐气溶胶的辐射强迫为 -0.75 W m^{-2} ,约为全球平均的 2.5 倍,为北半球平均的 1.6 倍。硫酸盐气溶胶对温室气体造成的辐射强迫有明显的减弱作用,特别是在北半球主要的工业地区及其下风方向,辐射强迫可减至 1 W m^{-2} 左右。

虽然本文的结果在 IPCC 给出的合理范围内,但应该注意到目前对于硫酸盐气溶胶辐射强迫估计还存在着一定的不确定性。这在很大程度上是由估算的硫酸盐气溶胶浓度的不确定性造成的。但是硫酸盐气溶胶的观测资料还相当有限,因此为了研究硫酸盐气溶胶在气候变化中的作用,必须借助于数值模式的模拟结果。硫酸盐气溶胶是一系列复杂的化学过程和物理过程的最终产物,通过这些过程,由自然或人为排放的气相硫转化为硫酸盐。其中人为排放占全部非海盐性硫排放的 60%~80%,主要以 SO_2 的形式排出。大约 50% 的 SO_2 通过干清除或雨水带到地面,剩余的 50%,一小部分通过氧化变成硫酸盐,而大部分通过云内的均相化学反应形成液相的硫酸盐。氧化速率不仅依赖于云参数,硫酸盐的形成速率还依赖于太阳辐射、周围气体的浓度、云量、液水含量以及云滴的化学成分。由于目前的化学模式对于这些过程的描述还比较粗糙,因此不同模式估计的硫酸盐的形成速度差别较大。通过比较模式计算的硫酸盐浓度可以看到,模拟产生的硫酸盐气溶胶垂直分布差别相当大,但是地面的浓度却相当一致。遗憾的是,硫酸盐气溶胶浓度只有地面的观测,对自由大气的观测几乎没有。因此,今后加强对硫酸盐气溶胶前体物排放的监测以及硫酸盐气溶胶的空间垂直分布的观测,将会在一定程度上减小对其辐射强迫乃至气候效应误差的估计。

如果对辐射强迫进行归一化处理,即将其换算为每单位质量硫酸盐气溶胶的辐射强迫时,就可以把由模拟的硫酸盐浓度的不确定性导致的辐射强迫的不确定性分离出来。但是,辐射强迫的差异不仅仅是由硫酸盐浓度的差异造成的,各研究中采用的硫酸盐气溶胶光学参数的不同也是误差的来源之一。再者,相对湿度对辐射强迫的影响也非常重要,硫酸盐气溶胶作为所谓的吸湿性气溶胶,随着相对湿度的增加,其粒子会增大到 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 之间,这样尺度的粒子可以更有效的与短波辐射相互作用。而相

对湿度一般随高度增加而减小, 因此, 对于一定的硫酸盐浓度而言, 随着高度的上升, 造成的辐射强迫值将会变小。其他与之相关的问题, 还包括在模式中如何表示相对湿度的影响等, 由于目前的 CTMs 模式的水平分辨率一般为 250 km 左右, 而相对湿度的变化尺度远小于此, 忽略这种变化将导致强迫值系统性偏低^[34]。因而, 辐射强迫对相对湿度的大量敏感性研究以及在模式中合理体现出这种关系, 也是降低模拟不确定性的有效途径之一。

致谢 德国 Max Planck Institute 的 Feichter 教授提供了硫酸盐气溶胶的资料, 作者深表感谢。

参 考 文 献

- 1 Charlson, R. J., J. Langer, H. Rodhe, C. B. Leovy, and S. G. Warren, Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols, *Tellus*, 1991, **43AB**, 152~163.
- 2 Charson, R. J., S. E. Scharz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley, J. E. Hansen, and D. J. Hofman, Climate forcing by anthropogenic aerosol, *Science*, 1992, **255**, 423~430.
- 3 Kiehl, J. T., and B. P. Brieglab, The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing, *Science*, 1993, **260**, 311~314.
- 4 Kiehl, J. T., and H. Rodhe, Modelling geographical and seasonal forcing due to aerosols, In: *Aerosol Forcing of Climate*, R. J. Charson, and J. Heintzenberg, Eds., J. Wiley and Sons Ltd., 1995, 281~296.
- 5 Taylor, K. E., and J. E. Penner, Response of the climate system to atmospheric aerosols and greenhouse gases, *Nature*, 1994, **369**, 734~737.
- 6 Haywood, J. M., R. Stouffer, R. Wetherald, S. Manabe, and V. Ramaswamy, Transient response to a coupled model to estimated change in greenhouse gas and sulfate concentrations, *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**, 1335~1338.
- 7 Chuang, C. C., J. E. Penner, K. E. Taylor, A. S. Grossman, and J. J. Walton et al., An assessment of the radiative effects of anthropogenic sulfate, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**, 3761~3778.
- 8 IPCC, *Climate Change 1995, The IPCC Scientific Assessment*, J. T. Houghton, and L. G. Meira, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, U. K., 1996, 572pp.
- 9 张立盛, 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射强迫的数值模拟, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1999.
- 10 张立盛、石广玉, 全球人为硫酸盐和烟尘气溶胶资料及其光学厚度的分布特征, 气候与环境研究, 2000, **5** (1), 67~74.
- 11 Zhang Xuehong, Shi Guangyu, Liu Hui, and Yu Yongqiang, *IAP Global Ocean Atmosphere Land System Model*, Science Press, Beijing, 2000.
- 12 吴国雄、张学洪、刘辉、俞永强、金向泽、郭裕福、孙淑芬、李伟平, LASG 全球海洋-大气-陆面系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究, 应用气象学报, 1997, **8** (增刊), 15~28.
- 13 Shi Guangyu, An Accurate Calculation, and Representation of the Infrared Transmission Function of the Atmospheric Constituents, Ph. D. Thesis, Tohoku, 1981.
- 14 王标, 气候模拟中的辐射传输模式, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1996.
- 15 Toon, O. B., C. P. McKay, and T. P. Ackerman, Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogenous multiple scattering atmospheres, *J. Geophys. Res.*, 1989, **94** (D13), 16287~16301.
- 16 Gates, W. L., and A. B. Nelson, A new (revised) tabulation of the Sripps topography on $1^\circ \times 1^\circ$ global grid. Part II: Ocean depths. R-1227-1-APPA, The Rand Cooperation, Santa Monica, CA., 132pp
- 17 Xue, Y. K., P. J. Sellers, J. L. Klintner, and J. Shukla, A simplified biosphere model for use within general circulation models, *J. Climate*, 1991, **4**, 345~364.
- 18 Liu Hui, and Wu Guoxiong, Impacts of land surface on climate of July and summer monsoon: A study with an AGCM plus SSiB, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14** (3), 289~308.

- 19 俞永强、张学洪, 一个修正的海气耦合方案, 科学通报, 1998, **43**, 866~877.
- 20 Mitchell, J. F. B., R. A. Davis, W. J. Ingram, and C. A. Senior, On surface temperature, greenhouse gases and aerosols: models and observations, *J. Climate*, 1995, **8**, 2364~2386.
- 21 Wiscombe, W. J., Improved Mie Scattering algorithms, *Appl. Opt.*, 1980, **19**, 1505~1509.
- 22 Kiehl, J. T., and B. P. Brieglab, The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing, *Science*, 1993, **260**, 311~314.
- 23 马晓燕, 外部强迫因子对气候变化影响的数值试验研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2002.
- 24 Feichter, J., U. Lohmann, and I. Schult, The atmospheric sulfur cycle in ECHAM-4 and its impact on the shortwave radiation, *Climate Dyn.*, 1997, **13**, 235~246.
- 25 Bengtsson, L., E. Roeckner, and M. Stedel, Why is the global warming proceeding much slower than expected? *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**, 3865~3876.
- 26 Orn, G., U. Hansson, and H. Rodhe, Historical emissions of anthropogenic sulfur, 186-1985, Rep. CM-91, Dept. of Meteorology, Stockholm University, and International Meteorological Institute in Stockholm, Sweden, 1996.
- 27 Spiro, P. A., D. J. Jacob, and J. A. Logan, Global inventory of sulfur emissions with 1degx1deg resolution, *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**, 6023~6036.
- 28 马晓燕、石广玉、郭裕福、王喜红, 20 世纪气候系统外部因子的辐射强迫作用, 气象学报, 2004, **62**.
- 29 IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Jhon, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001, 881pp.
- 30 王喜红、石广玉、马晓燕, 东亚地区对流层人为硫酸盐辐射强迫及其温度响应, 大气科学, 2002, **26** (6), 761~772.
- 31 Ma Xiaoyan, Guo Yufu, Shi Guangyu, and Yu Yongqiang, Numerical Simulation of Global Temperature Change during the 20th Century with the IAP/LASG GOALS Model, *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21** (2), 227~235.
- 32 陈隆勋、朱文琴、王文、周秀骥、李维亮, 中国近 45 年来气候变化的研究, 气象学报, 1998, **56**, 257~271.
- 33 王喜红、石广玉, 东亚地区人为硫酸盐气溶胶柱含量变化的数值研究, 气候与环境研究, 2000, **5** (1), 58~66.
- 34 Haywood, J. M., and K. P. Shine, Multi-spectral calculations of the direct radiative forcing of tropospheric sulfate and soot aerosols using a column model, *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 1997, **123**, 1907~1930.

Simulation of Radiative Forcing by Sulfate Aerosols

Ma Xiaoyan, Shi Guangyu, Guo Yufu, and Zhang Lisheng

(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The direct effect of sulfate aerosol was explicitly represented in IAP/LASG GOALS 4.0 coupled model. The model simulates the radiative forcing from 1900 to 1990 by introducing into the 3-D concentration of sulfate aerosol simulated by MPI in Germany, the results show that the global mean radiative forcing due to sulfate aerosol is -0.29 W m^{-2} which belongs to the estimates of the latest IPCC scientific report. The forcing distribution is characterized with sufficiently large in a number of regions including east Asia, western Europe and northern America, which all surpass -1.5 W m^{-2} in their maximum value. The radiative forcing in South America, Australia and the south of Africa is generally between -0.2 W m^{-2} to -0.4 W m^{-2} . However, The marine or remote continents were little influenced by anthropogenic sulfate aerosols.

Key words: coupled model; sulfate aerosol; radiative forcing