

温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫作用^{* 1}

马晓燕 石广玉 郭裕福 王喜红

(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

对 GOALS4.0 海-陆-气耦合模式的相关部分进行了改进, 主要改进包括温室气体的扩充和硫酸盐气溶胶“显式”方案的引入, 并引入 20 世纪温室气体的实际浓度变化以及硫循环模式模拟的硫酸盐气溶胶的三维全球浓度分布, 模拟了温室气体和硫酸盐气溶胶造成的辐射强迫的空间分布和时间变化。全球平均的温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫分别为 2.17 W/m^2 和 -0.29 W/m^2 ; 温室气体造成的辐射强迫在空间上呈现明显的纬向结构, 最大值(大于 2.5 W/m^2)和最小值(小于 1 W/m^2)分别位于副热带和两极地区, 在北半球主要工业区硫酸盐气溶胶的辐射强迫绝对值接近温室气体的辐射强迫值(大于 -2.0 W/m^2)。

关键词: 海-陆-气耦合模式, 温室气体, 硫酸盐气溶胶, 辐射强迫。

1 引 言

气候系统是极其复杂的多圈层系统, 影响气候变化的因子多种多样。近几十年来, 温室效应一直被认为是最重要的气候强迫因子之一, 据估计, 自工业革命以后, 由于温室气体浓度增加所导致的辐射强迫为 2.35 W/m^2 ^[1]。另外, 人类活动向大气中排放大量的温室气体, 造成全球变暖, 同时, 也产生了大量可生成气溶胶的前体物, 这种气溶胶作为影响气候变化的重要因子之一, 其所导致的环境问题和气候效应也是不容忽视的。一般而言, 气溶胶通过两种方式影响气候, 一种是通过散射和吸收太阳辐射直接影响气候, 另一种是以云凝结核的形式改变云的光学特性和寿命从而间接影响气候。研究表明, 硫酸盐气溶胶产生的直接辐射强迫全球平均为 $-0.2 \sim -0.8 \text{ W/m}^2$, 而间接辐射强迫约为 $-0.3 \sim -1.8 \text{ W/m}^2$ ^[1]。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, 而大小相当, 因此可在一定程度上抵消了温室效应, 减缓全球增暖的趋势。

从 20 世纪 80 年代开始, 中国科学家逐步开展了人类活动对气候变化影响的数值模拟, 特别是

CO_2 的温室效应方面的研究。如石广玉等^[2]计算了大气温室气体的辐射强迫; 胡荣明和石广玉^[3]对中国地区硫酸盐气溶胶的辐射强迫进行了模拟, 但这些都是研究基本上都是基于一维或二维模式的简单估算, 因而存在一定的局限; 张立盛等^[4]和马晓燕等^[5]利用 GCM 模式模拟了硫酸盐气溶胶造成的直接辐射强迫, 由于 GCM 模式所包含的物理过程更为完善, 不仅能够得到这些因子辐射强迫的全球状况, 而且能够表现出它们的时空分布特征, 这对于空间分布很不均匀的气溶胶来说尤为重要。本文是在中国科学院大气物理研究所自行发展的全球海-陆-气耦合模式(GOALS4.0)^[6,7]的基础上进行的, 首先对模式的相关部分进行改进, 主要涉及到模式中温室气体的扩充和对硫酸盐气溶胶的处理。在本研究中, 包括了几乎所有的温室气体的作用(如 CO_2 , CH_4 , N_2O , CFC-11, CFC-12), 并以“显式”方案处理硫酸盐气溶胶的直接效应。根据 20 世纪温室气体和硫酸盐气溶胶的浓度变化, 模拟了 20 世纪气候系统外部因子的辐射强迫和气候效应, 本文只讨论有关辐射强迫部分的结果, 有关其气候效应的部分将有另文讨论^[8]。

* 初稿时间: 2003 年 12 月 28 日; 修改稿时间: 2004 年 4 月 12 日。

资助课题: 国家自然科学基金资助项目(49875012)。

作者简介: 马晓燕, 女, 博士, 现在加拿大气候模拟与分析中心(CCCma)从事博士后研究, 主要从事气溶胶-云-辐射相互作用的数值模拟研究及其气候效应, 全球变暖的模拟和诊断。

2 模式及相关部分的改进

全球海洋-大气-陆面过程耦合模式 GOALS4.0 是由中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学开放实验室发展的第 2 代全球气候模式,有关模式的详细介绍见文献[6,7]。模式中的辐射部分采用 k -分布方法来描述大气气体的吸收,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,其中短波部分 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。

为了更真实、客观地在模式中反映出自 20 世纪 60 年代以后温室气体的影响。本文对模式中的吸收气体做了一定的扩充,增加了 CFC-11 和 CFC-12 这两种完全由工业活动造成的温室气体。在补充这

些含氯氟烃类气体时,采用了与原模式中臭氧在短波部分的吸收类似的处理方法,即吸收系数是根据吸收截面值与温度的依赖关系得到的,所需的吸收截面值与温度和压力的关系采用 Hitran96 提供的数据,在输入模式时,其光学厚度累加在相应波段的光学厚度上,这与原模式中对水汽连续吸收的处理是一致的。根据 Hitran96 的吸收截面资料,CFC-11 和 CFC-12 的吸收带主要位于波数 810~880 和 810~960,对应的波段分别为 5 和 6(表 1)。

模式对硫酸盐气溶胶的处理也不再是简单的通过调整地面反照率来实现,而是在模式中“显式”考虑,也就是通过其辐射参数的变化来实现,模式所需的辐射参数如质量消光系数、单次散射反照率和不对称因子是结合文献[7,4]和 CCM3^[9]的数值而得到的。相对湿度对辐射性质的影响,依据 Kiehl 和 Briegleb^[9]所发展的多项式函数进行订正。

表 1 GOALS4.0 模式中的波段划分

Table 1 Description of wave bands in GOALS4.0

序号	对应旧波段序号	k 个数	吸收气体
1	1~9	13	H_2O
2	10	4	H_2O
3	11	5	CO_2 , H_2O , N_2O
4	12	4	O_3 , H_2O , CO_2
5	13	4	H_2O , CO_2 , CFC-11, CFC-12
6	14~15	9	O_3 , H_2O , CO_2 , N_2O , CFC-12
7	16~21	9	H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4
8	22~34	12	H_2O , CO_2
9	35	1	
10	36~40	9	O_3 , H_2O
11	41	1	
12	42~44	9	O_3
总计		80	

3 辐射强迫

IPCC 科学评估报告用辐射强迫来表示各种不同因子对地球气候系统辐射能收支所造成的辐射通量的扰动,这种扰动可以是由辐射活性物质浓度的变化引起的,如 CO_2 或气溶胶;也可以是由到达地球的太阳总辐射的变化引起的,或者是其他能够影响地面吸收辐射的因素(如地面反照率性质的改变)所造成的,辐射收支的不平衡导致气候参数的改变,从而使气候系统形成新的平衡态。辐射强迫概念的提出,给出了一个简便的方法去认识不同自然或人为的因素对地气系统的影响。辐射强迫的定义为:当地面和对流层温度保持不变时,平流层温度重新

调整到辐射平衡后对流层顶净辐射通量的变化。关于辐射强迫的概念及应用,Hansen 等^[10]、Shine 和 Forster^[11]都有较为详尽的阐述。

3.1 温室气体

与气候变化有关的温室气体辐射强迫的研究,一般集中于均匀混合的温室气体。所谓均匀混合的温室气体,是指那些具有较长的寿命从而能够在对流层相对均匀地进行混合的气体,如 CO_2 , CH_4 , N_2O 等。而 O_3 以及非甲烷烃类气体,由于寿命相对较短,因此在对流层的分布也不均匀,称为非均匀混合的温室气体。计算辐射活性气体的强迫,涉及到一系列物理参数,首先需要各种气体的光谱资料以便进行辐射传输计算,GOALS 中的谱线资料取

自 Hitran 96 数据集;其次,表征全球大气状态的参数,如温度、水汽、温室气体的浓度等,也都是必需的。在 GCMs 模式中,辐射强迫一般可定义为:当所有其他气候参数保持不变时,对流层顶净向上辐射通量的减少值^[12,13]。本文中以模式的第 3 层,即 $\sigma=0.18$ 来表示对流层顶。温室气体的浓度采用 NASA/GISS 根据实际监测或者冰芯等资料整理的数值^[14],图 1 是近百年来 CO_2 , CH_4 , N_2O , CFC-11 和 CFC-12 浓度的变化,模式计算的各温室气体的辐射强迫值列于表 2,并同时列出了最新的 IPCC 报告给出的值。对比可见,我们计算的辐射强迫均在

IPCC TAR(IPCC,2001)给定的范围之内。温室气体总的辐射强迫值是 2.17 W/m^2 ,略小于 IPCC 的“最佳”估计值,但同时应该注意到这个估计值 10% 的不确定性,另外,IPCC 估计的辐射强迫是从 1750~1990 年,本文的强迫值是从 1900~1990 年,如果加上 1750~1900 年的辐射强迫(约 0.37 W/m^2),则计算所得到的 1750~1990 年的值应为 2.54 W/m^2 ,因此我们可能对温室气体的辐射强迫高估了约 0.2 W/m^2 。新加入模式的吸收气体 CFC-11 和 CFC-12 的辐射强迫分别为 $0.10, 0.09 \text{ W/m}^2$,与 IPCC 给定的参考值 0.06 和 0.14 W/m^2 比较接近。

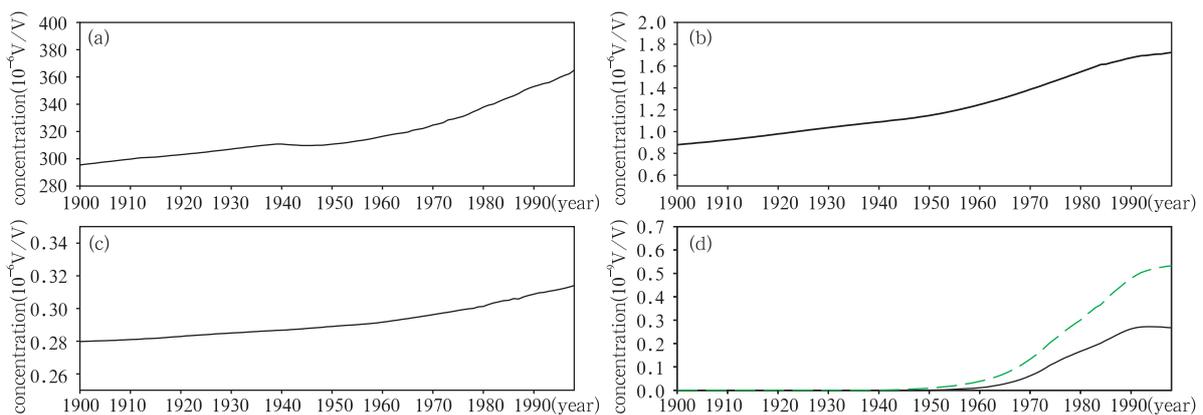


图 1 20 世纪均匀混合的温室气体浓度的时间变化
(a. CO_2 , b. CH_4 , c. N_2O , d. CFC-11 和 CFC-12(虚线))

Fig. 1 Changes in greenhouse gases concentration over the 20th century, which is CO_2 (a), CH_4 (b), N_2O (c), CFC-11 and CFC-12(dash line) respectively(d). Unit: 10^{-6} v/v (with the exception 10^{-9} v/v for CFCs)

表 2 不同因子造成的全球平均辐射强迫
(方括号内的值表示误差的估计范围;单位: W/m^2)

Table 2 Numerical values of global and annual mean radiative forcing due to greenhouse gases and sulfate aerosols. The uncertainty about the estimate is listed in square brackets. Unit: W/m^2

	文中计算的辐射强迫	IPCC 2001 给出的强迫值
	1900~1990 年	1750~1990 年
均匀混合的	+2.17	+2.35 [10%]
温室气体	1.48	CO_2 (1.40)
	0.49	CH_4 (0.50)
	0.01	N_2O (0.12)
	0.19	CFCs (0.33)
硫酸盐气溶胶	-0.29	-0.40 [50%]

温室气体的辐射强迫在全球的分布(图 2)呈明显的纬向变化特征,总体而言,它在副热带地区最大(大于 2.5 W/m^2),其次是赤道地区,而在极地最小(小于 1 W/m^2)。强迫的分布型主要受到地面温度和

水汽的控制,高层云的出现也会对它有一定的影响。

3.2 硫酸盐气溶胶

自 IPCC 第 2 次评估报告以后,由硫酸盐气溶胶引起的辐射强迫得到了更多的关注。利用化学输送模式(CTMs)获得的气溶胶浓度来计算其辐射强迫的工作,已经取代了早期箱式模式的简单估算^[15]。这些研究或者直接采用云、相对湿度和地面反射率的观测场^[9,16],或者由 GCM 产生这些数据场^[17,18],根据事先已经由 CTMs 获得的硫酸盐气溶胶的分布,利用精确的辐射传输模式计算辐射强迫。

对硫酸盐气溶胶的处理采用“显式”方案,即将其辐射特性直接引入气候模式中,硫酸盐气溶胶辐射特性的计算在第 2 节已作过详细的介绍,其浓度来自于德国马普气象研究所的模拟结果,空间分辨率为 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$,垂直高度 15 层,时间从 1900 年至 1997 年。有关资料的详细介绍见文献^[19,20]。将

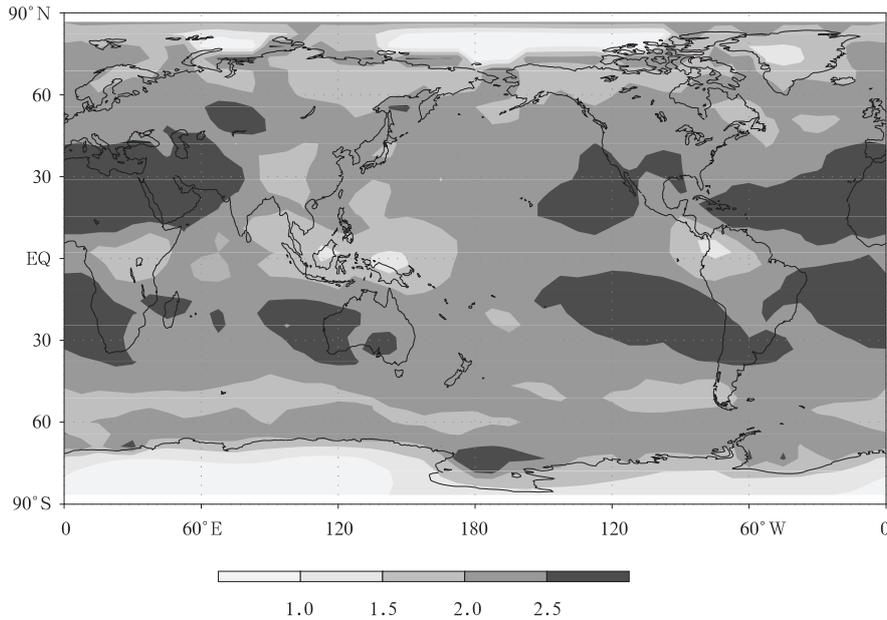


图 2 温室气体造成的对流层顶辐射强迫的空间分布(单位: W/m^2)

Fig. 2 Simulated radiative forcing at tropopause due to greenhouse gases (unit: W/m^2)

该资料插值到 GOALS 模式中去,从 20 世纪硫酸盐气溶胶柱含量的时间变化(图略)来看,在前 50 a 柱含量增加了 $0.9 \text{ mg}/\text{m}^2$,而后 50 a 增加到 $2.5 \text{ mg}/\text{m}^2$,增幅明显超过前 50 a,也可以看到大气中人为排放的硫酸盐气溶胶的增加速率正在不断加快。如果与 MPI 给出的柱含量相比^[21],本文计算的值稍稍偏小,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。

本文计算的人为硫酸盐气溶胶辐射强迫的全球平均值是 $-0.3 \text{ W}/\text{m}^2$,属于 IPCC 评估报告给出的一 $0.26 \sim -0.82 \text{ W}/\text{m}^2$ 的范围之内,也与绝大多数模式的结果($-0.26 \sim -0.4 \text{ W}/\text{m}^2$)相吻合。辐射强迫的空间分布(图 3)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,中心区辐射强迫值均超过 $-1.5 \text{ W}/\text{m}^2$,另外在南美、澳大利亚以及非洲南部地区都有 $-0.2 \sim$

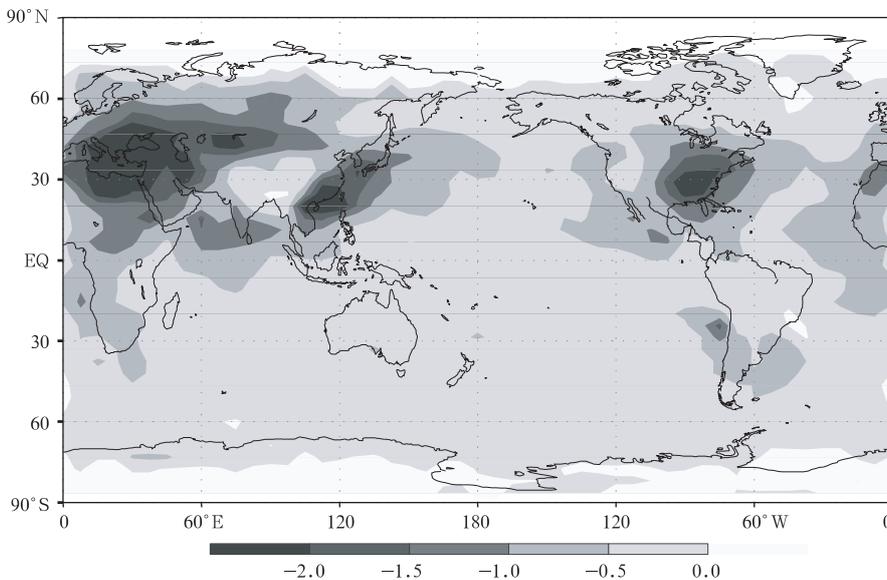


图 3 人为硫酸盐气溶胶直接辐射强迫的空间分布(单位: W/m^2)

Fig. 3 Simulated radiative forcing due to anthropogenic sulfate aerosols (unit: W/m^2)

-0.4 W/m^2 的辐射强迫,而在海洋上或者遥远的大陆地区基本不受人造硫酸盐气溶胶的影响。

由于硫酸盐气溶胶属于一种所谓的吸湿性粒子,因此随着相对湿度的变化,这种粒子的辐射特性也要随之发生相应的变化。如果忽略气溶胶散射特性对于相对湿度的依赖作用,将会导致估算的辐射强迫值系统性偏低^[20]。相对湿度对吸湿性粒子辐射特性的影响是十分复杂的,本文无意于对这一问题做详尽的探讨,因此我们参考了 NCAR CCM3 的处理方法^[11,22],对模式中相对湿度对粒子辐射特性(质量消光效率、单次散射反照率和不对称因子)的影响进行了校正,具体作法如下:

湿度影响因子 $f(H_R)$ 为

$f(H_R) =$

$$\begin{cases} 2.8 & H_R > 90\% \\ a_0 + a_1 H_R + a_2 H_R^2 + a_3 H_R^3 & 60\% \leq H_R \leq 90\% \\ 1.0 & H_R < 60\% \end{cases}$$

式中 H_R 为模式层相对湿度, $a_1 \sim a_3$ 为经验常数。

3.4 20 世纪辐射强迫的时间变化

前文计算了 1990 年温室气体和硫酸盐气溶胶辐射强迫,主要考察了它们的全球平均值、空间分布以及纬向变化的基本情况。下面将要讨论的是 20 世纪辐射强迫随时间的变化,图 4 为辐射强迫纬向平均值的时间变化。由图 4a 可见,温室气体辐射强迫的纬带分布非常明显,在 20 世纪 30 年代以前,其辐射强迫不到 0.5 W/m^2 ,直到 60 年代初,辐射强迫值为 $0.5 \sim 1.0 \text{ W/m}^2$,此后强迫增加较快,至 80 年代初,两半球中高纬度地区强迫超过 2 W/m^2 ;与温室气体不同,硫酸盐气溶胶的辐射强迫(图 4b)在 $30 \sim 60^\circ \text{N}$ 明显高于其他地区,而且,随时间增加其影响的范围逐渐扩大,因此呈现一个锥形变化的型式。从 70 年代中期开始,硫酸盐的作用开始向南半球扩展,至 90 年代中后期影响可到达南半球中高纬度地区;温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫都有随时间逐渐增加的趋势。

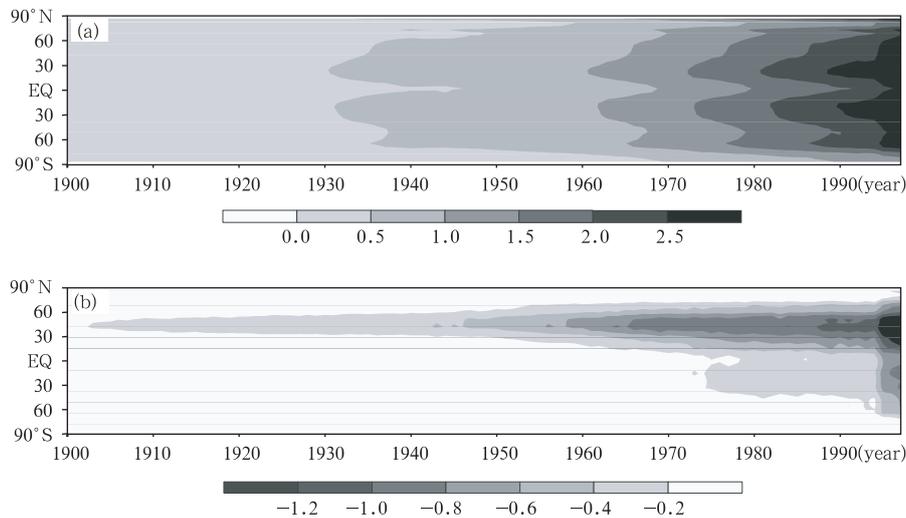


图 4 20 世纪温室气体(a)、硫酸盐气溶胶(b)辐射强迫纬向平均的时间变化(单位: W/m^2)

Fig. 4 Changes in zonal mean radiative forcing due to (a) greenhouse gases and (b) sulfate aerosols. (unit: W/m^2)

图 4 为单个因子的辐射强迫变化,图 5 则为在模式中同时考虑温室气体和硫酸盐气溶胶作用的辐射强迫。从全球平均来看,温室气体的辐射强迫在前 50 a 仅增加到 0.6 W/m^2 ,但在 20 世纪后几十年增加得更快,至 1990 年时,强迫值达到 2.17 W/

m^2 。对温室气体而言,其辐射强迫的半球平均几乎等于全球平均。如果同时考虑温室气体和硫酸盐气溶胶的共同作用,则全球平均的辐射强迫介于南、北半球平均值之间,平均而言,北半球硫酸盐气溶胶对辐射强迫的贡献约为南半球的 3 倍。

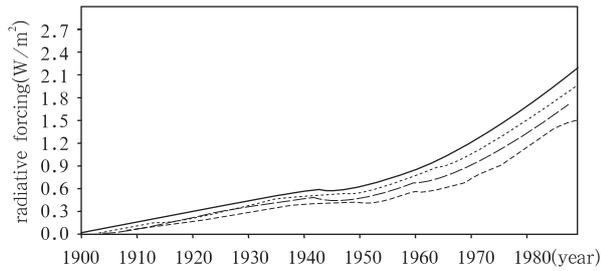


图5 温室气体和硫酸盐气溶胶辐射强迫的时间变化

(实线:温室气体的辐射强迫;虚线表示温室气体和硫酸盐气溶胶共同的辐射强迫,从上而下依次为南半球、全球平均及北半球的平均;单位: W/m^2)

Fig. 5 Changes in global and annual mean radiative forcing. The solid line is due to greenhouse gases and dash lines are total effect for both greenhouse gases and sulfate aerosols. The lines is the southern Hemisphere mean, global mean and the northern Hemisphere mean, respectively from top to bottom. (unit: W/m^2)

4 结论

根据温室气体、硫酸盐气溶胶的历史资料,输入改进后的 GOALS4.0 海-陆-气耦合模式中,计算分析了当代各强迫因子的辐射强迫作用及其近百年的时间变化特征,主要结果如下:

(1) 温室气体、硫酸盐气溶胶辐射强迫的全球平均值分别为 $+2.17$ 和 $-0.29 W/m^2$,均在 IPCC (2001) 给定的范围之内;

(2) 从辐射强迫的空间分布来看,温室气体辐射强迫的分布呈现明显的纬向结构,空间分布均匀,最大值(大于 $2.5 W/m^2$)和最小值(小于 $1 W/m^2$)分别位于副热带地区和两极地区;与之相比,硫酸盐气溶胶辐射强迫的空间分布具有很强的地域性,在北半球主要的工业地区,其辐射强迫具有更大的值;

(3) 从辐射强迫的时间变化看,温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫在近百年一直成单调增加的趋势,与各自浓度的变化趋势一致。

本文研究了温室气体和硫酸盐气溶胶的辐射强迫,其中硫酸盐气溶胶的辐射强迫只涉及到其直接效应,而并未涉及其间接效应,即气溶胶与云之间复杂的相互作用。另外,目前可以确定的对气候变化有影响的因子,除文中已讨论的温室气体和气溶胶以外,仅 IPCC 第 2 次科学评估报告可以列举出的,至少还包括太阳变化、平流层臭氧、对流层臭氧、烟尘气溶胶、生物质气溶胶、矿物尘气溶胶、地表覆被改变以及火山爆发的影响等等。只有对这些因子有

充分的认识之后,才有可能准确地重现过去的气候变化,乃至预测未来的气候变化,而目前对于其中的相当多的因子的认识还很不够,因此它们在气候变化中所起的作用,研究结果的可信度较低,对此需要做进一步的研究工作。

致谢:感谢 Max Planck Institute 的 Prof. Feichter 提供硫酸盐气溶胶的资料。

参考文献

- [1] Houghton J T, Meira L G, et al. Climate Change 2001, The IPCC scientific Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 351pp
- [2] 石广玉. 大气微量气体的辐射强迫及其温室气候效应. 中国科学(B), 1991, 35(7): 776~784
Shi Guangyu. Radiative forcing of atmospheric trace gases and their climatic effects. Chinese Science Bulletin (B) (in Chinese), 1991, 35(7): 776~784
- [3] 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
Hu Rongming, Shi Guangyu. A study of aerosol forcing and its climatic response in China. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 1998, 22(6): 919~925
- [4] Zhang L S, Shi G Y. The impact of relative humidity on radiative property and radiative forcing of sulfate aerosol. ACTA Meteor Sinica, 2001, 15(4): 465~476
- [5] 马晓燕, 石广玉, 郭裕福等. 硫酸盐气溶胶辐射强迫的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2004, 9(3): 454~464
Ma Xiaoyan, Shi Guangyu, Guo Yufu, et al. Simulation of radiative forcing by sulfate aerosols. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 2004, 9(3): 454~464
- [6] Zhang X H, Shi G Y, Liu H, et al. IAP Global Ocean Atmosphere Land System Model. Beijing: Science Press, 2000. 252pp
- [7] 吴国雄, 张学洪, 刘辉等. 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
Wu Guoxiong, Zhang Xuehong, Liu Hui, et al. Global ocean - atmosphere - land system model of LASG (GOALS/LASG) and its performance in simulation study. Quart J Appl Meteorol (in Chinese), 1997, 8 (Suppl): 15~28
- [8] Ma X Y, Guo Y F, Shi G Y, et al. Numerical Simulation of Global Temperature Change over the 20th Century with IAP/LASG GOALS Model. Adv Atmos Sci, 2004, 21(2): 234~242
- [9] Kiehl J T, Brieglab B P. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. Science, 1993, 260: 311~314
- [10] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response. J Geophys Res, 1997, 102: 6831~6864
- [11] Shine K P, Forster P M. The effect of human activity on ra-

- diative forcing of climate change: A review of recent developments. *Global and Planetary Change*, 1999, 20: 205–225
- [12] Charlson R J, Langer J, Rodhe H, et al. Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols. *Tellus*, 1991, 43AB: 152–163
- [13] Cess R D, et al. Uncertainties in carbon dioxide radiative forcing in atmospheric general circulation models. *Science*, 1993, 262: 1252–1255
- [14] Hansen J, Sato M, Lacis A, et al. Climate forcings in the Industrial era. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1998, 95: 1273–1275
- [15] Charlson R J, et al. Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 1992, 255: 423–430
- [16] Myhre G, Stordal F, Restad K, et al. Estimates of the direct radiative forcing due to sulfate and soot aerosols. *Tellus*, 1998, 50B: 463–477
- [17] Boucher O, Anderson T L. GCM assessment of the sensitivity of direct climate forcing by anthropogenic sulfate aerosols to aerosol size and chemistry. *J Geophys Res*, 1995, 100: 26117–26134
- [18] Haywood J M, Shine K P. Multi-spectral calculations of the direct radiative forcing of tropospheric sulphate and soot aerosols using a column model. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1997, 123: 1907–1930
- [19] Feichter J, Kjellstrom E, Rodhe H, et al. Simulation of the tropospheric sulfur cycle in a global model. *Atmos Environ*, 1996, 30: 1693–1707
- [20] Feichter J, Lohmann U, Schult I. The atmospheric sulfur cycle and its impact on the shortwave radiation. *Climate Dyn*, 1997, 13: 235–246
- [21] Bengtsson L, et al. Why is the global warming proceeding much slower than expected? *J Geophys Res*, 1999, 104: 3865–3876
- [22] 王喜红, 石广玉. 东亚地区云和地表反射率对硫酸盐直接辐射强迫的影响. *气象学报*, 2002, 60(6): 758–765
Wang Xihong, Shi Guangyu. Effect of cloud and surface albedo on direct radiative forcing by sulfate aerosols over Eastern Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002: 60(6): 758–765

RADIATIVE FORCING BY GREENHOUSE GASES AND SULFATE AEROSOL

Ma Xiaoyan Shi Guangyu Guo Yufu Wang Xihong

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

Abstract

GOALS4.0 ocean-atmospheric coupled model developed by IAP/LASG, was firstly improved, including adding of new greenhouse gases and introducing of the explicit representation of sulfate aerosols. It was then employed to simulate radiative forcing induced by greenhouse gases and sulfate aerosol with 20th century real concentration of greenhouse gases and sulfate aerosol from a sulfur cycle model as input. The simulated global and annual mean radiative forcing due to greenhouse gases and sulfate aerosol is 2.17 W/m^2 and -0.29 W/m^2 respectively, which are within the range of estimates in the latest IPCC report. The forcing from greenhouse gases shows homogeneous spatial distribution, with the maximum of 2.5 W/m^2 at the subtropical and the minimum of 1 W/m^2 at the polar region, while the forcing by sulfate aerosol almost compete the forcing of greenhouse gases at the major industrial regions in the Northern hemisphere.

The zonal nature of radiative forcing due to well-mixed greenhouse gases is apparent. The forcing indicates a strong symmetrical structure in the two Hemispheres. Comparing to the forcing due to greenhouse gases, the forcing by sulfate aerosols shows significant regional distribution. Maxima in sulfate are associated with high sulfur emissions in North America, Europe, and Southeast Asia. Secondary maximum in the Southern Hemisphere should be due to biomass burning.

Radiative forcing from either greenhouse gases or sulfate aerosols was very low before 1950s, while it increased very fast in the last decades. The forcing due to greenhouse gases and sulfate aerosols was less than 0.6 W/m^2 or -0.1 W/m^2 in 1950, which increase to about 2.1 W/m^2 and -0.5 W/m^2 at the end of

the 20th century. Considering only greenhouse gases the mean forcing from the two Hemispheres is almost as same as its global mean. By comparison, if the effects of greenhouse gases and sulfate aerosols are both included, the global mean forcing is between the averages of Northern and Southern Hemisphere, and the radiative forcing in the Northern Hemisphere is roughly 3 times as high as that of the Southern Hemisphere.

Key words: GOALS4.0 ocean-atmospheric coupled model; Greenhouse gases, Sulfate aerosol; Radiative forcing

LASG 第四届气候系统模式研讨会

中国科学院大气物理研究所 LASG 第四届气候系统模式研讨会于 2005 年 1 月 14 日下午在北京召开, 来自中国气象局、高校、海外研究机构和本所的专家和研究生近 100 人参加了此次研讨论。研讨会包括学术报告会和自由讨论两部分。俞永强博士和周天军博士主持学术报告会, LASG 模式组 6 位研究人员先后介绍了 LASG 第四代耦合气候系统模式及其各分量模式的进展情况。2004 年是 LASG 气候系统模式发展非常关键的一年, 多年的努力特别是模式组各成员的通力合作在这一年结出了丰硕的果实: LASG 第四代气候系统模式 FGOALS、新一代大气环流模式 GAMIL(格点模式)和 SAMIL(谱模式)成功建立, 用新模式完成了政府间气候变化委员会(IPCC)第四次评估报告(AR4)所要求的情景预测实验, 部分结果已经提交参与国际耦合模式比较计划(CMIP), 并在与 IPCC 相关的国际会议上交流。SAMIL 和 GAMIL 分别参加了国际水球试验比较计划(APE)和国际季节预报模式比较计划(SMIP), 并提交了实验结果。海洋环流模式 LICOM 得到进一步完善和推广应用。值得一提的是, 大气化学模式、海洋生态模式的耦合研究也取得可喜的进展。

自由讨论由中国气象局副局长、LASG 副主任宇如聪研究员主持。与会专家积极发言, 讨论非常热烈, 对 LASG 在气候系统模式发展方面所取得的成绩作了充分的肯定, 对存在的问题提出了中肯的意见, 对未来的发展提出了建设性的建议并寄予厚望。综合大家的发言, 可归纳如下几点意见和建议:

- (1) LASG 的数值模式在 2004 年进展很快, 2005 年应侧重对模式结果的消化, 特别是 LASG 耦合模式与 IPCC 其他耦合模式结果的对比分析, 应该对已找出的各模式中存在的重大问题, 寻求解决方案;
- (2) 通过把单柱模式、区域模式和全球模式结合起来, 增进对模式物理参数化过程的理解, 进而加以改进;
- (3) LASG 在气候系统各分量模式的发展方面均做了大量工作, 但有的分量模式在成果集成以及与气候系统模式的耦合方面仍然是一个问题;
- (4) 既有稳定的队伍, 又有流动的队伍, 是气候系统模式研发取得重大进展的宝贵经验之一, LASG 在流动方面做得很好, 但在如何稳定队伍上还需采取相应的策略;
- (5) 完善用户使用说明, 尽早释放模式, 加强模式应用, 加强与各相关单位的合作;
- (6) 尽早成立 LASG “数值模式发展科学指导委员会”(SSC)来指导和协调 LASG 模式发展工作。

中国科学院大气物理研究所 LASG