

文章编号:1673-8411 (2015) 03-0013-09

我国硫酸盐气溶胶气候效应的数值模拟

李阳, 宋娟, 孙磊

(江苏省气象科学研究所, 江苏 南京 210009)

摘要:气溶胶的气候效应近年来备受关注。区域气候模式能够在有限的计算资源下取得更高的分辨率,成为一种研究区域气候的有力工具。本文使用意大利国际理论物理中心(ICTP)开发的区域气候模式(RegCM3),对 2008 年 12 月~2009 年 11 月我国硫酸盐气溶胶的时空分布及其直接气候效应进行了模拟。研究表明受大气环流影响,硫酸盐气溶胶空间分布在夏季分布最广,而其最大平均季度柱浓度出现在四川盆地,达到了 $27\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。受特殊地形的影响,四川盆地上空在全年一直维持着高浓度的硫酸盐。硫酸盐气溶胶对直接辐射强迫与其柱浓度的分布有很好的相关性。直接辐射强迫在夏季分布最广,其数值达到了 $-2.99\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,全年平均为 $-2.4\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。硫酸盐的直接气候效应造成了地面气温下降,在夏季达到了 -0.26°C ,全年平均为 -0.09°C 。直接气候效应对降水总体表现为微弱的抑制作用,但不同区域,不同季节差异较大。

关键词:RegCM3;硫酸盐;直接辐射强迫;气候效应

中图分类号:P461.8

文献标识码:A

A numerical study of sulfate aerosol direct effect and its impact on the East Asia climate

LI YANG, SONG JUAN, SUN LEI

(Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009, China)

Abstract: The climate effects of aerosol have dragged more and more attention in recently years. For achieving higher resolution under the limited calculated resource, the regional climate models become a robust tool of studying the issue. The RegCM3, which is developed by the ICTP, is used in this study. With the model, we focused on the sulfate aerosol spatial distribution and its direct radiative effect and the effects on East Asia with the domain of Chinese mainland from December 2008 to November 2009. The simulated results show that there are the high concentration of sulfate aerosol in Sichuan basin, middle and east China. Affecting by the terrain, Sichuan basin always has a high sulfate concentration, which can be as high as 27mg m^{-2} in the autumn. The direct radiative forcing presents a well relativity with the sulfate loading. The radiative forcing has a maximum value of $-2.99\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ in summer and the yearly average direct radiative forcing at the tropopause due to sulfate aerosol is $-2.40\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, which lead to a cooling effect on the surface and slightly restraining the precipitation. Although the tendency of the temperature and precipitation was the same on the whole region of China, it has significant diversity in difference areas and seasons.

Key words: RegCM3, Sulfate Aerosol, Direct Radiative Forcing, Climate Effects

引言

从上世纪 70 年代起,气溶胶的气候效应就受到

了学者的重视,但随着全球变暖的证实,温室气体效应得到了更多的关注。直到 1991 年菲律宾皮那图博(Pinatubo)火山喷发,把大量的尘埃和硫酸盐气溶胶

收稿日期:2015-05-18

基金项目:国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306043)。

作者简介:李阳(1987-),男,本科,助理工程师,主要从事气候变化和气象防灾减灾研究。

带入大气,全球平均气温下降了 0.5°C ,气溶胶对气候的影响才又得到越来越多的关注^[1]。然而,由于气溶胶时空分布的多变性、化学组成的复杂性、对气溶胶—云—辐射之间复杂的非线性关系,以及受到气溶胶观测资料的局限性,造成了气溶胶的气候效应到目前为止仍然是一个很不确定的量^[2,3]。

大气气溶胶根据化学成分可以分为硫酸盐气溶胶、硝酸盐气溶胶、沙尘气溶胶、黑碳气溶胶和有机碳气溶胶等。不同种类的气溶胶在大气停留的时间,光学性质以及与云的相互作用都不一样。气溶胶粒子对入射辐射的吸收和散射造成了到达地气系统短波辐射通量的减少,称之为气溶胶的直接效应。直接效应减少了到达地面表面的太阳辐射,对地面具有冷却作用,这与温室气体的直接效应相反。但气溶胶粒子的气候强迫却不如温室气体那样直接,甚至辐射强迫的符号都与气溶胶的性质有关。如硫酸盐气溶胶散射入射的太阳辐射从而导

大气变冷^[4,5],而黑碳气溶胶吸收太阳辐射和红外辐射导致其所在的气层变暖^[6],可以部分抵消硫酸盐的冷却作用。在区域尺度上,气溶胶的直接辐射强迫可以非常显著。这也是其与温室气体不同的地方。温室气体因为在大气中停留时间较长,其浓度空间分布均匀,而气溶胶粒子在大气中的停留时间较短,且具有明显的区域特征。印度洋试验(INDOEX, Indian Ocean Experiment)的观测表明,在南亚旱季(1~4月),主要由人类活动产生的气溶胶粒子形成的霾层可能会掩盖温室气体的效应^[7,8]。在这期间,霾层可以对地表产生约 $14\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的净冷却效应,而温室气体对地表的辐射强迫估计约为 $2\sim 3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

本文主要关注的是硫酸盐气溶胶及其直接辐射效应。硫酸盐气溶胶是一种亲水性气溶胶,对短波辐射具有强烈的反射和散射作用,根据 Charlson^[9]在1994年的估计,全球每年向大气排放约9000万吨 SO_2 ,其中90%来自于北半球。我国能源结构以煤碳燃烧为主, SO_2 的排放浓度在大多数城市处于较高水平,特别是在北方冬季的采暖期。目前,我国 SO_2 排放呈现出逐年增加趋势^[10]。在工业较发达的城市,如重庆,气溶胶的“阳伞效应”甚至超过了“温室效应”而使这些地区的气温呈现变冷趋势^[11]。根据IPCC研究报告^[2],全球平均人为硫酸盐气溶胶总的直接辐射强迫作用约 $-0.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,北半球平均值约 $-1.0\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。观测和数值模拟都表明,全球已形成北

美、欧洲和东亚三个 SO_2 和硫酸盐的高值中心^[12]。人类活动产生的 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体的增加引起的总辐射强迫作用大约为 $2\sim 2.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[13],而硫酸盐气溶胶的直接效应可以部分抵消了温室效应。胡荣明^[14]统计发现: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。而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,这可能与人为硫酸盐气溶胶含量的逐年增加有关。因此,科学认识硫酸盐气溶胶的时空分布,定量分析其直接辐射强迫及气候效应有重要意义。

1 模式介绍及模拟方案设计

1.1 RegCM 简介

有限区域模型(LAMs)用于区域气候研究的思想最初由 Dickinson^[15]和 Giorgi^[16]提出。这个思想基于单步嵌套,即来自大气环流模式(GCM)的大尺度天气场或天气再分析资料可以为高分辨率区域气候模型(RCM)提供初始条件和依赖时间的天气侧边界条件(LBCs),而RCM却不向驱动的GCM提供反馈,这就促使RegCM。Giorgi等^[17,18]对模式的物理过程和数值方案进行了升级,发展成了RegCM2。RegCM2的动力框架基于中尺度模型MM5,辐射过程采用的是NCAR CCM2。特别地,CCM2的辐射传输包^[19]被用作计算辐射量,非局部边界层方案^[20]取代了旧的局部边界层方案,质量通量积云方案^[21]也作为可选方案加了进去,BATS^[22]的最新版本也包括在模式当中。

随着模式的广泛使用,以及RegNet^[23]平台的推出,模式的开发者与使用者有了更多、更深入的交流。在2003~2004年间,意大利国际理论物理中心(ICTP)在NCAR/RegCM2基础上发布了新版(RegCM3)。目前,RegCM3已经被广泛用于区域气候研究及全球季节预测研究。本研究使用的就是此版本的区域气候模式。相对于RegCM2,RegCM3采用了CCM3^[24]辐射传输方案,以及更详细的地形和植被数据。CCM3的引入使得模式在许多的物理过程上有了很大改进。

1.2 模拟方案设置

气溶胶粒子散射和反射太阳辐射,使到达地表的太阳辐射减少,从而产生直接辐射强迫。在模式中包含气溶胶模块,模块中计算了气溶胶的光学参数,因此模式可以直接计算气溶胶直接辐射强迫。在

气溶胶模块中不但计算了每个格点上气溶胶的光学参数,还计算了整个垂直方向上大气柱的光学性质。在计算气溶胶直接辐射强迫时,把大气层顶、地面两层之间的大气光学性质由气溶胶模块计算得出。因此模式中提供了另一个辐射计算的子程序用于诊断气溶胶的直接效应。在一次模拟中两次调用该子程序;第一次调用中使用的是晴空无气溶胶的大气柱的光学参数;第二次调用时使用的是有气溶胶的光学参数。两次运算辐射通量之差即为气溶胶的直接辐射强迫。因此本文的辐射强迫是设定为晴空(clear sky)条件下的。

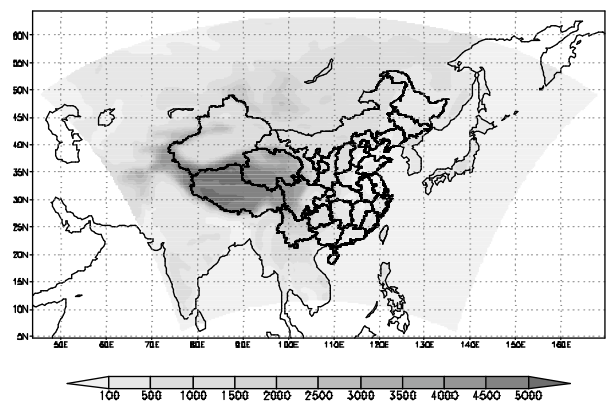


图1 模拟区域及区域内的地形高度(m)。

物理过程和参数化方案:选取侧边界选择5层过渡指数松弛方案;Holtstag行星边界层方案;SUBEX大尺度降水方案;海洋表面通量采用Zeng海洋参数化方案。区域中心点在(36.5°N,106.5°E),格点数为120×160,水平格距50km,见图1。模式的垂直分层为18层,模式顶气压为50hPa。模式的积分时间步长150s。积分时间从2008年11月到2009年11月,其中2008年11月为Spin-up时间。设计了两种模拟试验,分别为标准模式无人为气溶胶,标准模式考虑硫酸盐直接效应,如表1。

表1 试验方案

试验	描述
CONT	标准模式无气溶胶气候效应
DIR	标准模式仅考虑硫酸盐直接效应

模式采用NNRP2再分析数据(水平分辨率为2.5°×2.5°)为RegCM3提供初始边界场,每6h一次。地表数据使用的是全球陆地覆盖特征(GLCC)资料,

包括地形和植被覆盖类型数据,分辨率分别为10'和30';海平面温度采用NCEP/NCAR的GISST月平均海温资料。模式中硫酸盐气溶胶的产生需要有其前体物SO₂排放清单的引入。RegCM3提供了在EDGAR(Emission Database for Global Atmospheric Research)基础上建立的排放源清单,包含了SO₂、BC和OC的人为源和生物质源,分辨率为1°×1°。本文使用了CGRER(The Center for Global and Regional Environmental Research)提供了东亚地区分辨率为0.5°×0.5°的人为气溶胶排放源清单,包含了工业、电力、交通运输和人为生活排放。该排放源是在2006年INTEX-B(Intercontinental Chemical Transport Experiment-Phase B)观测试验的基础得到的^[25]。此排放源的分辨率与区域/中尺度模式有较好匹配性。从图2可以看出,SO₂的排放主要集中在华北,华中和华东地区,另外四川盆地地区排放源也较大。这些排放源的分布与工业发展程度和经济发展水平是一致的。在我国的西北地区和青藏高原地区排放源较少。在洋面上基本没有人为SO₂的排放,线状的排放源是航线上的轮船等交通工具的排放。

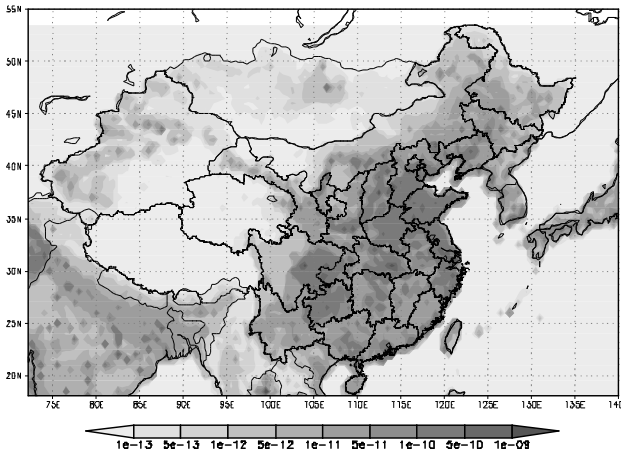


图2 由东亚排放源清单插值得到的2006年东亚SO₂排放源(kg·m⁻²·s⁻¹)。

2 结果分析

2.1 模式结果的基本检验

图3给出了2008年12月~2009年11月冬季(12月,1月,2月)和夏季(6月,7月,8月)模式输出的地表气压场和风场与NCEP再分析资料的比较,其中NCEP资料为插值结果。从图3中可以看出模拟的地面气压与观测值非常接近,这反映了模式对

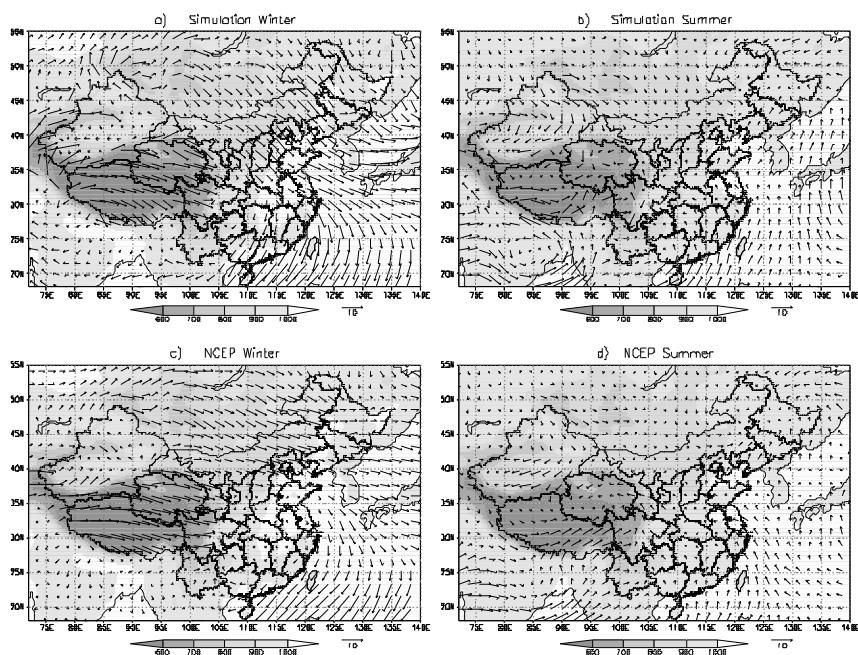


图3 模式输出地面气压场(hPa)和风场($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)与NCEP资料的对比,其中(a)(b)分别为冬季,夏季的模拟;(c)(d)分别为冬季,夏季的观测。

气压场模拟的精准性。模式输出风场基本与NCEP资料也基本一致,如在青藏高原与四川盆地交界处的风场变化,以及在东南方向环流的季节转变。模式能够反映副热带高压的移动对我国中东部风场的影响,成功揭示了西太平洋副高的位置及强弱的时间演变,对副高几次北跳、南撤时间的模拟接近实况,说明模式对东亚季风的环流特征具有很好的模拟能力,这与李树^[26]的检验结果基本一致。为了更加客观地检验模式,对温度和降水的检验,使用了CRU (Climatic Research Unit)^[27]资料对模式的结果进行检验。CRU数据集是为了更好研究古气候,气候变化以及气候预报而建立的,包含全球陆地的气温,降水,云量等。本文使用的是CRU TS 3.1,包含1901~2009的逐月平均气候数据,分辨率为 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$,数据可在网站(<http://badc.nerc.ac.uk>)上申请获得。

图4显示了2008年12月~2009年11月冬季和夏季模拟的地表气温与观测的CRU资料的对比。从图4中可以看出,模拟的温度与观测值总体上较为接

近,各低温中心和高温中心都较好的表现了出来。在四季中温度的零度分界线模拟效果较好,但在温度数值上整体表现偏低,特别是在冬季的长江中下游地区模拟值与实际观测有较大出入。模式对整个区域内四季温度的过度变化的模拟是较为准确的,这与高学杰^[28]对RegCM3模式的检验是一致的。总体上,模式对中国区域内各典型地区(如青藏高原,新疆地区,东北等)的温度的模拟能力是可以的,夏季的模拟效应优于冬季。

在各种气候模式,对降水的模拟一直是一个难点,这与产生降水的物理过程多而复杂以及现阶段气候模式的水平有关^[29]。

图5给出了模拟的年均降水量与CRU年均降水量。年降水的空间分布与观测比较接近,但模式模拟的降水中心和降水量呈现偏大现象,这与其他学者的模拟结果是一致的^[30, 31]。造成偏大的原因可能与模式使用的大尺度降水参数化方案有关。因为降水过程牵涉到诸多的物理过程(如云的宏微观过程,水循环等),目前模式中对降水过程的描述的物理模型与

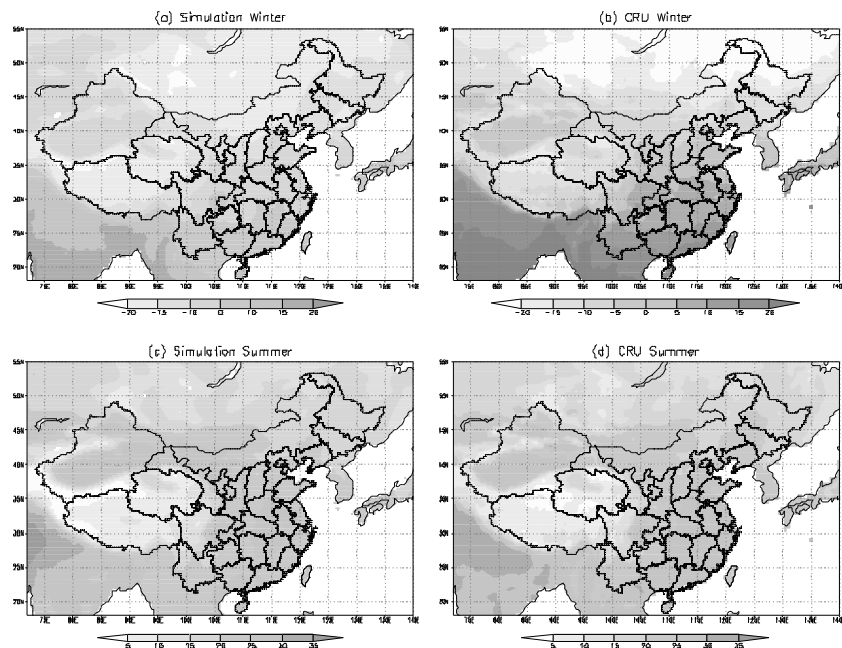


图4 模式输出地面气温($^\circ\text{C}$)与CRU资料的对比,其中(a)、(c)分别为冬季和夏季的模拟;(b)、(d)分别为冬季和夏季的观测。

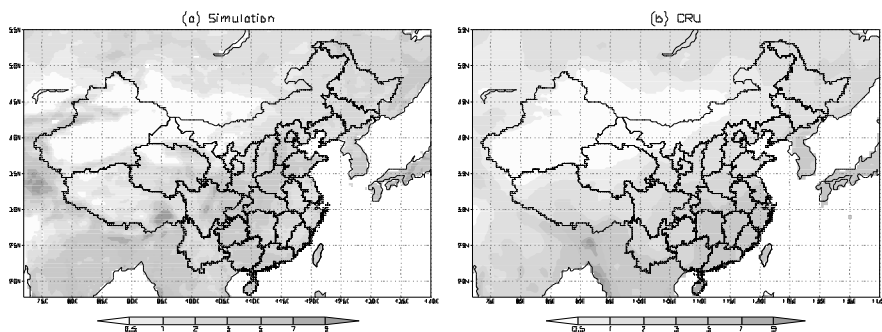


图5 (a)为模拟的年均降水量(b)为 CRU 年均降水量

实际还有一定的偏差,而夏季的对流降水牵涉到非线性过程更为复杂^[32],气候模式中为了节约计算成本,常常使用简化的参数化方案,但这些以特定公式给出的降水量计算并不能精确的反映实际情况,造成了降水模拟误差偏大,这一问题也是目前许多区域气候模式面临的难题^[33]。

2.2 硫酸盐的直接辐射强迫

从图6可以看出硫酸盐气溶胶柱浓度有明显的季节变化,冬季浓度最低,范围最小,夏季浓度高范围大,这是因为在模式中硫酸盐主要是由 SO_2 通过液相化学反应生成,夏季云量和水汽的增加无疑促进了这一过程。在一年四季中四川盆地一直是硫酸盐的一个峰值中心,最大可超过 $27\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$,这是由于四川盆地地面有较强的排放源,又受到周围地形阻隔,在低层难以向周围扩散,形成聚集造成高浓

(冬季)。

图7给出了2008年12月~2009年11月冬季,春季,夏季和秋季的硫酸气溶胶在对流层顶和地表的直接辐射强迫分布。从图中可以看出,硫酸盐在大气层顶和地面均为负的辐射强迫。大气层顶的直接辐射强迫与硫酸盐气溶胶的柱浓度分布有很好的对应关系。硫酸盐柱浓度高的地区,其直接辐射强迫的也较强。冬季辐射强迫主要分布在四川盆地以及广西一带,除冬季以外,在华北,华东等都有较强的辐射强迫分布。在一年中,四川盆地的辐射强迫一直较大,这与硫酸盐柱浓度分布是一致的。辐射强迫在全年的峰值出现在秋季的四川盆地,最大超过了 $-27\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,而在夏季的分布范围最广。夏季盛行的西南气流使得硫酸盐气溶胶向东北方向扩散,影响更大的范围。辐射强迫的分布区域呈东北—西南走向,与硫酸盐柱浓度的夏季分布是对应的。除四川盆地外,我国中东部和东北地区的直接辐射强迫集中在 $-1\sim-12\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。而在西北,青藏高原等地,因为几乎没有 SO_2 的排放,因此硫酸盐的辐射强迫也很小,基本都在 $-1\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下。

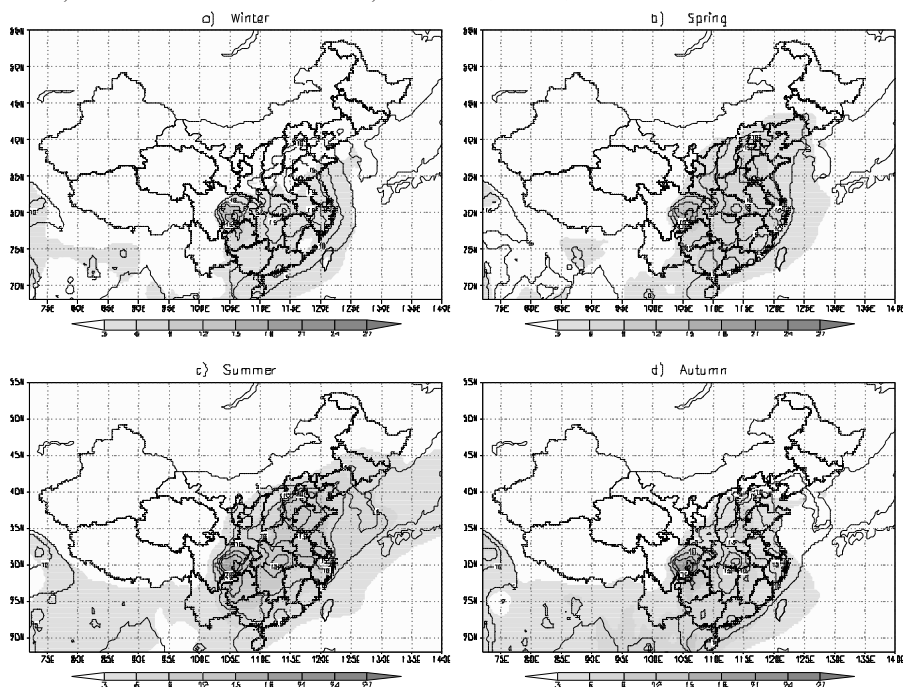


图6 2008年12月~2009年11月冬季,春季,夏季和秋季模式模拟的硫酸气溶胶柱浓度(填色)和 SO_2 柱浓度(等值线)分布,(a)(b)(c)(d)分别对应冬季,春季,夏季和秋季

度。在夏季明显可以看到除四川盆地外,中国中东部地区硫酸盐浓度也在较高的水平,这与夏季的环流形势有关。在夏季,硫酸盐气溶胶被从印度洋吹来的气流向东北方向输送,在与副高相互作用下,造成硫酸盐气溶胶在夏季向东北方向扩展。当副高南移时,北方高压随之南下,使得硫酸盐的分布区域偏向我国的中南部

表2给出了我国不同地区的辐射强迫的统计情况。因为青藏高原海拔高而且几乎没有硫酸盐的分布,因此没有对青藏高原地区进行统计。从表中可以看出,硫酸盐在西南(主要包含四川盆地),华北,华中,华东,华南等都有较强的直接辐射强迫。辐射强迫的数字与硫

酸盐柱浓度有较好的相关性。从季节上来说,全国平均的最大值出现在夏季,达到了 $-2.99\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,季节最大值出现在春季的华中地区,达到了 $-10.55\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。华北,东北等地直接辐射强迫有较明显的季节变化。从区域分布来看,华中(主要是湖北一带)和西南地区一直是受硫酸盐直接辐射强迫影响强的区域。对全年平均发现,全国在对流层顶的平均辐射强迫达到了 $-2.40\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。对硫酸盐直接辐射强迫的研究很多,但由于使用的排放源或计算方法的不同,得到结果相差还是很大的。吴润等^[34]对东亚人为硫酸盐的模拟结果为 $-0.39\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,周秀骥^[35]对气溶胶的模拟结果得到中国全年平均直接辐射强迫为 $-8\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。其他模拟大都在这一区间^[36,37]。

图 8 给出了 2008 年 12 月~2009 年 11 月期间硫酸盐气溶胶的柱浓度及其直接辐射强迫 ($90^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 平均)随纬度的变化。从图中可以看出,辐射强迫与硫酸盐柱浓度有很好的负相关关系。而辐射强迫最大地方在 $20^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 之间,在冬季两个峰值

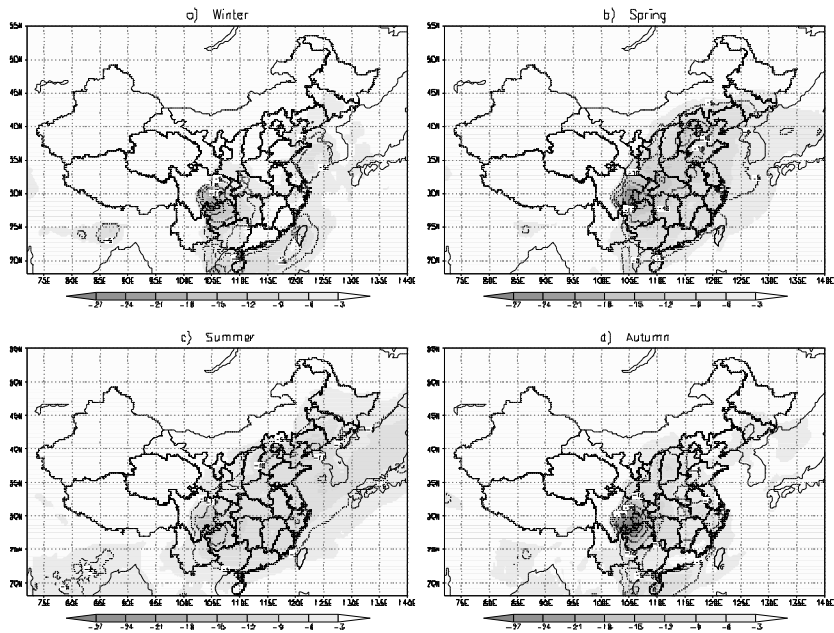


图 7 2008 年 12 月~2009 年 11 月硫酸盐气溶胶在大气层顶(填色)和地面(等值线)造成的直接辐射强迫($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), (a) (b) (c) (d) 分别对应冬季,春季,夏季和秋季

出现在 17°N 和 26°N 附近,在春季峰值向北移到了 30°N 附近;到了夏季强辐射强迫的分布扩展到北纬 40°N 左右;在秋季峰值呈现向南移动趋势。硫酸盐柱浓度也有同样的趋势,这与 SO_2 的排放源分布是对应的,说明直接辐射强迫受气溶胶浓度的影响最

表 2 中国不同地区硫酸盐气溶胶浓度及其直接辐射强迫统计

		华北	华中	华南	华东	西北	西南	东北	全国
冬季	TOA 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-1.38	-4.47	-4.55	-2.97	-0.28	-5.6	-1.78	-1.78
	SRF 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-1.34	-4.35	-4.49	-2.92	-0.27	-5.48	-1.69	-1.74
	硫酸盐浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	1.47	4.46	3.8	3.91	0.22	3.99	0.94	1.57
春季	TOA 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-7.68	-10.55	-5.06	-7.36	-0.65	-7.31	-2.69	-2.56
	SRF 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-7.69	-10.64	-5.12	-7.42	-0.66	-7.38	-2.68	-2.57
	硫酸盐浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	-5.19	8.3	4.77	7.09	0.68	4.94	1.64	2.19
夏季	TOA 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-6.01	-8.11	-2.97	-7.94	-0.89	-6.46	-4.59	-2.99
	SRF 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-6.04	-8.2	-3.00	-8.02	-0.91	-6.53	-4.60	-3.02
	硫酸盐浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	6.84	9.74	2.67	8.03	1.21	7.06	3.45	2.88
秋季	TOA 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-4.09	-7.27	-4.73	-5.44	-0.71	-8.29	-2.06	-2.3
	SRF 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-4.01	-7.18	-4.73	-5.37	-0.7	-8.2	-1.99	-2.27
	硫酸盐浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	3.53	7.37	6.12	5.43	0.54	6.74	1.08	2.56
全年平均	TOA 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-4.79	-7.6	-4.33	-5.93	-0.63	-6.92	-2.78	-2.41
	SRF 辐射强迫/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	-4.77	-7.59	-4.33	-5.93	-0.63	-6.9	-2.74	-2.40
	硫酸盐浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	4.26	7.46	4.34	6.11	0.64	5.68	1.78	2.30

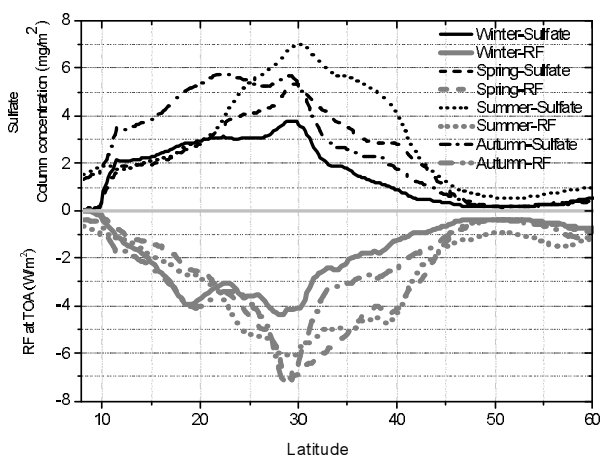


图8 硫酸盐直接辐射强迫(灰色)和硫酸盐柱浓度(黑色)(90°E~130°E)的随纬度的变化。

大也最直接。

2.3 硫酸盐气溶胶直接气候效应

图10给出了2008年12月~2009年11月一年四季硫酸盐气溶胶直接气候效应对地面造成的影响(DIR-CONT)。冬季,地面气温基本没有明显的变化,特别是在我国的中东部基本没有变化。春季,在我国的中南部出现了一个降温中心,这个降温与该区域较强的直接辐射强迫有关。夏季出现了大面积的降温区域,在西南以及长江中下游地区因硫酸盐在地面负的直接辐射强迫造成了降温,但同时在西北等地辐射强迫并不强的地区出现了较为明显的降温。造成这样的原因可能是:本文计算的硫酸盐直接辐射强迫是一个瞬时辐射强迫,在瞬时辐射强迫产生以后,局地的温度,水汽,云等会做出相应的反应,这些反应通过平流过程,辐散过程,水文循环等对周边地区产生会产生不确定的反馈,造成周围环境大气状态发生变化。而牵涉到水汽和云对气候反馈时,根据目前的研究还存在较大的不确定性^[38]。秋季区域的降温中心移到了京津唐地区,对应着该区域较强的辐射强迫。从全国范围来看,硫酸盐的直接气候效应造成了地面气温的下降,降温中心能达到了1℃,在夏季甚至超过了2℃,但降温区域的分布与辐射强迫的分布并不完全不一致。辐射强迫在产生以后,会对相关的物理过程产生一系列直接或间接的影

响,因此温度对辐射强迫的反应并不是一个简单的线性关系。

硫酸盐气溶胶的直接辐射强迫在引起温度的变化后必然会对水循环产生影响,如蒸发量,相对湿度等的改变,上述变化将会对降水产生影响。显然,直接效应的这种反馈作用是间接的,也更为复杂,非线性更强。表3给出了2008年12月~2009年11月硫酸盐气溶胶直接气候效应的统计。从表3中可以看出,在辐射强迫较大的地区,其造成的降温效果也越明显,最大降温出现在夏季的华东地区达到了0.72℃。从全年来看,硫酸盐气溶胶在夏季造成的降温最明显,达到了0.256℃,从区域来讲,硫酸盐直接气候效应对华中地区地表温度造成的降温最强,达到了0.216℃。硫酸盐对全国造成的年均降温约为0.09℃。但硫酸盐气溶胶的降温作用,在区域尺度和季节上差异很大。而降水的变化分布要更复杂。在进行统计后,如表3,发现降水的变化非常的不确定,不同区域,不同时间都不一样,甚至出现相反的情况出现。降水在夏季变化最大,减少了0.157mm·d⁻¹;对华东地区降水的抑制达到了0.283mm·d⁻¹。硫酸盐直接辐射气候效应对全国降水表现为抑制,为0.048mm·d⁻¹。综合来讲,从区域统计上可以看出降温的强弱与辐射强迫有一定的一致性,直接效应对降水表现为抑制作用,但不同区域、不同季节分布差异很大。

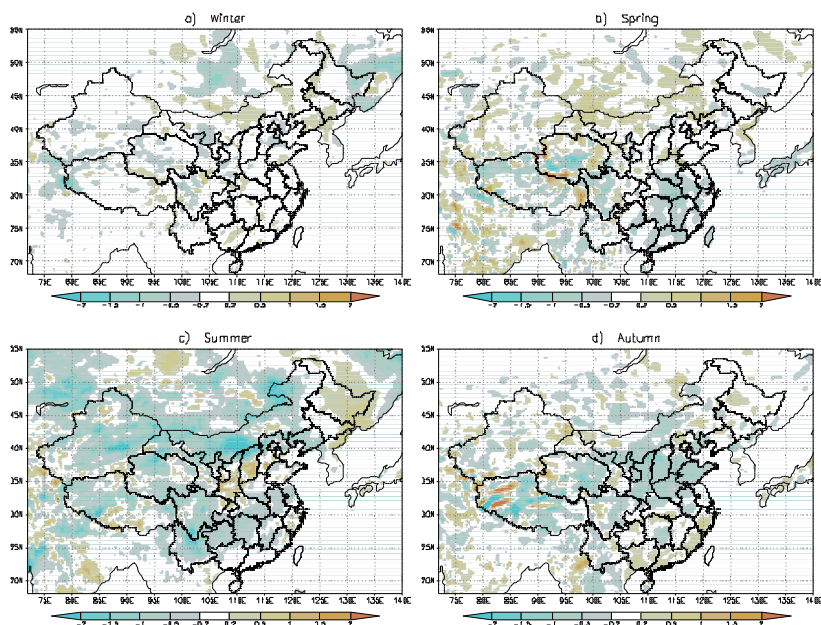


图10 硫酸盐气溶胶的直接气候效应造成的地面气温的变化 (DIR-CONT, °C), (a) (b) (c) (d) 分别对应冬季, 春季, 夏季和秋季

表 3 中国不同地区硫酸盐气溶胶浓度及其直接辐射强迫统计

		华北	华中	华南	华东	西北	西南	东北	全国
冬季	TOA 辐射强迫/ $W \cdot m^{-2}$	-1.38	-4.47	-4.55	-2.97	-0.28	-5.6	-1.78	-1.78
	地面气温变化/ $^{\circ}C$	0.044	0.1	0.052	0.01	-0.052	-0.02	0.101	-0.025
	降水量变化/ $mm \cdot d^{-1}$	-0.005	0.017	0.073	0.007	0.004	0.021	0.016	0.005
春季	TOA 辐射强迫/ $W \cdot m^{-2}$	-7.68	-10.55	-5.06	-7.36	-0.65	-7.31	-2.69	-2.56
	地面气温变化/ $^{\circ}C$	0.04	-0.434	-0.127	-0.321	0.083	-0.091	0.016	-0.003
	降水量变化/ $mm \cdot d^{-1}$	-0.22	-0.554	-0.04	-0.467	-0.007	0.22	0.144	0.004
夏季	TOA 辐射强迫/ $W \cdot m^{-2}$	-6.01	-8.11	-2.97	-7.94	-0.89	-6.46	-4.59	-2.99
	地面气温变化/ $^{\circ}C$	-0.31	-0.34	-0.065	-0.72	-0.52	-0.46	-0.005	-0.256
	降水量变化/ $mm \cdot d^{-1}$	-0.86	0.056	-0.187	-0.307	0.037	0.102	0.491	-0.157
秋季	TOA 辐射强迫/ $W \cdot m^{-2}$	-4.09	-7.27	-4.73	-5.44	-0.71	-8.29	-2.06	-2.3
	地面气温变化/ $^{\circ}C$	-0.47	-0.16	0.04	-0.13	-0.16	-0.03	-0.42	-0.105
	降水量变化/ $mm \cdot d^{-1}$	0.13	0.50	0.22	-0.36	-0.006	0.16	-0.19	-0.046
全年平均	TOA 辐射强迫/ $W \cdot m^{-2}$	-4.79	-7.6	-4.33	-5.93	-0.632	-6.92	-2.78	-2.41
	地面气温变化/ $^{\circ}C$	-0.173	-0.216	-0.024	-0.129	-0.163	-0.15	0.007	-0.09
	降水量变化/ $mm \cdot d^{-1}$	-0.173	0.006	0.015	-0.283	0.007	0.126	0.212	-0.048

3 结论

(1)减少 SO₂ 的排放,尤其在四川、重庆、贵州等地是非常有必要的。

(2)夏季水稻田实行浅层灌水,以提高田间温度节约用水,减少气溶胶产生的气候效应对农业生产的负面效应。

(3)气溶胶削弱了太阳直接辐射,降低了大气底层温度,促使对流减弱。不仅使降水减少,也使雾霾增多。需要指出的是对于气候反馈的量化还存在很大的不确定性,因此本研究能够定性定量的给出硫酸盐直接气候效应的符号;但对气候作用的量化精度还有很大提升空间,以后将会在这方面做进一步的努力。

参考文献:

[1] 吴兑. 华南气溶胶研究的回顾与展望 [J]. 热带气象学报, 2003, 19 (B09): 145-151.

[2] IPCC.Climate change 2007: the physical science basis [J]. Agenda, 2007, 6: 07.

[3] 徐萌柳, 银燕. RegCM3 引入气溶胶间接气候效应模拟效果对比 [J]. 气象与环境学报, 2012, 28 (1): 1-10.

[4] Giorgi F, Bi X, Qian Y. Direct radiative forcing and regional climatic effects of anthropogenic aerosols over East Asia: A regional coupled climate-chemistry/

aerosol model study [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107 (D20): 4439.

[5] 张立盛, 石广玉. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算 [J]. 大气科学, 2001, 25 (002): 231-242.

[6] Zhuang B, Jiang F, Wang Tlynnnetwwdagriorglynnnet. Investigation on the direct radiative effect of fossil fuel black-carbon aerosol over China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010: 1-12.

[7] LelieveldJ, CrutzenP, RamanathanVlynnnetwwdagriorglynnnet The Indian Ocean experiment: widespread air pollution from SouthandSoutheastAsia [J] Science, 2001, 291 (5506): 1031

[8] RamaswamyV, BoucherO, HaighJlynnnetwwdagriorglynnnet, Radiative forcing of climate change: Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (US), 2001.

[9] Charlson RJ, Wigley TML. Sulfate aerosol and climatic change [J]. Scientific American; (United States), 1994, 270 (2).

[10] 钱云, 符淙斌. SO₂ 排放, 硫酸盐气溶胶和气候变化 [J]. 地球科学进展, 1997, 12 (5): 440-446.

[11] 罗云峰, 周秀骥. 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状 [J]. 地球科学进展, 1998, 13 (006): 572-581.

[12] Langner J, Rodhe H, Crutzen Plynnetwwdagriorglynnnet. Anthropogenic influence on the distribution of tropospheric sulphate aerosol [J]. Nature, 1992, 359 (6397): 712-716.

[13] 王体健, 闵锦忠, 孙照渤 lynnetwwdagriorglynnnet. 中

- 国地区硫酸盐气溶胶的分布特征 [J]. 气候与环境研究, 2000, 5 (002): 165-174.
- [14] 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 [J]. 大气科学, 1998, 22 (6): 919-925.
- [15] Dickinson R, Errico R, Giorgi F. *lynnetwwdagriorglynnet A regional climate model for the western United States* [J]. *Climatic Change*, 1989, 15 (3): 383-422.
- [16] Giorgi F. Simulation of Regional Climate Using a Limited Area Model Nested in a General Circulation Model [J]. *Journal of Climate*, 1990, 3: 941-964.
- [17] Giorgi F, Marinucci MR, Bates GT. Development of a second-generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes [J]. *Monthly Weather Review*; (United States), 1993, 121 (10).
- [18] Giorgi F, Marinucci MR, Bates GT. *lynnetwwdagriorglynnet Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part II: Convective Processes and Assimilation of Lateral Boundary Conditions* [J]. *Monthly Weather Review*, 1993, 121: 2814.
- [19] Briegleb BP. Delta-Eddington Approximation for Solar Radiation in the NCAR Community Climate Model [J]. *J Geophys Res*, 1992, 97 (D7): 7603-7612.
- [20] Holtlag A, de Bruijn E, Pan HL. A High Resolution Air Mass Transformation Model for Short-Range Weather Forecasting [J]. *Monthly Weather Review*, 1990, 118: 1561.
- [21] Grell GA, Dudhia J, Stauffer DR. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) [J]. 1994.
- [22] Dickinson R, Errico R, Giorgi F. *lynnetwwdagriorglynnet, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model NCAR Tech. Note NCARTN-387STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 1993*
- [23] Giorgi F, Pal JS, Bi X. *lynnetwwdagriorglynnet Introduction to the TAC special issue: The RegCM2 network* [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 86 (1): 1-4.
- [24] Kiehl JT, Hack JJ, Bonan GB. *lynnetwwdagriorglynnet. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM 3)* [J]. NASA, 1996, (19980147981).
- [25] Zhang Q, Streets DG, Carmichael GR. *lynnetwwdagriorglynnet Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission* [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9 (14): 5131-5153.
- [26] 李树. 中国地区硝酸盐气溶胶及其气候效应研究 [D]: 南京大学, 2009.
- [27] Mitchell TD, Jones PD. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25 (6): 693-712.
- [28] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇. *lynnetwwdagriorglynnet. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 I: 模式对中国气候模拟能力的检验* [J]. *气象学报*, 2003, 61 (1): 20-28.
- [29] Li J, Liu Y, Wu G. Cloud radiative forcing in Asian monsoon region simulated by IPCC AR4 AMIP models [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26 (5): 923-939.
- [30] 李巧萍, 丁一汇. 区域气候模式对东亚季风和中国降水的多年模拟与性能检验 [J]. *气象学报*, 2004, 62 (2): 140-153.
- [31] 张冬峰, 高学杰, 白虎志. *lynnetwwdagriorglynnet. RegCM3 模式对青藏高原地区气候的模拟* [J]. *高原气象*, 2005, 24 (005): 714-720.
- [32] Giorgi F, Bi X. A study of internal variability of a regional climate model [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105 (D24): 29503-29521.
- [33] Lopez P. Cloud and precipitation parameterizations in modeling and variational data assimilation: A review [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64 (11): 3766-3784.
- [34] 吴润, 罗燕, 王卫国. 东亚地区人为硫酸盐气溶胶辐射气候效应不同模拟方法的对比 [J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2005, 27 (4): 323-331.
- [35] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟 [J]. *大气科学*, 1998, 22 (4): 418-427.
- [36] 罗燕, 吴润, 王卫国. 利用 MODIS-GOCART 气溶胶资料研究中国东部地区气溶胶直接辐射强迫 [J]. *热带气象学报*, 2007, 22 (6): 638-647.
- [37] 吴润, 王卫国. 中国地区工业硫酸盐气溶胶对辐射和温度的影响 [J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2003, 25 (001): 41-47.
- [38] Stephens GL. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review [J]. *Journal of Climate*, 2005, 18 (2): 237-273.