

吉振明, 高学杰, 张冬峰, 等. 2010. 亚洲地区气溶胶及其对中国区域气候影响的数值模拟 [J]. 大气科学, 34 (2): 262–274. Ji Zhenming, Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, et al. 2010. Simulation of the aerosols over Asia and its climate effect on China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 262–274.

亚洲地区气溶胶及其对中国区域气候影响的数值模拟

吉振明^{1, 2, 3} 高学杰² 张冬峰² 吴佳² 徐影²

¹ 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085

² 国家气候中心, 北京 100081

³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 使用一个耦合入化学过程的区域气候模式 (RegCM3), 在 NCAR/NCEP 再分析资料驱动下, 通过多年时间尺度的连续积分, 进行了亚洲区域气溶胶硫酸盐、黑碳和有机碳的时空分布及其直接气候效应的数值模拟。首先对模式的模拟能力进行了检验, 结果表明, 模式能够较好地模拟中国地区气温和降水的分布, 对该区域气溶胶的时空分布有一定的模拟能力。模式模拟得到的气溶胶浓度分布在冬季南北差异较大而夏季较小。气溶胶浓度与其形成的大气层顶和地面负短波辐射强迫有较好的对应关系。四川盆地是气溶胶浓度及其产生的辐射强迫的高值区。气溶胶对地面气温和降水都产生影响。其中所引起的冬季气温降低, 与气溶胶的分布和浓度有一定的对应关系, 但夏季引起的降温中心位于河套及黄河下游地区。气溶胶使得冬季和夏季中国东部大部分地区的降水减少。同时, 对气温和降水上述变化的原因进行了讨论。

关键词 区域气候模式 气溶胶 气候效应

文章编号 1006-9895 (2010) 02-0262-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

Simulation of the Aerosols over Asia and Its Climate Effect on China

Ji Zhenming^{1, 2, 3}, GAO Xuejie², ZHANG Dongfeng², WU Jia², and XU Ying²

¹ Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

² National Climate Center, Beijing 100081

³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract A regional climate model coupled with a chemistry-aerosol model (the ICTP RegCM3) is employed to simulate the anthropogenic aerosols including sulfate, black carbon and organic carbon and their direct effect on climate over Asia and China. The model is driven by the NCAR/NCEP re-analysis data. Multi-year simulations are conducted. Results show that the model performs well in reproducing present climate over the region. Simulation of the spatial and temporal patterns of aerosols is also reasonable although to a less extent. A greater latitudinal distribution of the aerosol concentration is simulated in winter compared to that in summer. Negative short wave radiative forcing is found at both the top of the atmosphere and the surface. The magnitude of the forcing is in good corre-

收稿日期 2008-11-09, 2009-10-28 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2006CB403707、2007BAC03A01、2009CB421407, 公益性行业 (气象) 科研专项 GY-HY200806010

作者简介 吉振明, 男, 1983 年出生, 博士研究生, 从事区域气候模拟及气候变化研究工作。E-mail: jzm@itpcas.ac.cn

通讯作者 高学杰, E-mail: gaioxj@cma.gov.cn

spondence to the concentration of aerosols. The greatest concentration and largest radiative forcing are both found in the Sichuan Basin in Southwest China. Evident effects of the aerosols on both surface air temperature and precipitation are simulated over China. In winter, a drop in temperature impacted by aerosols is generally consistent with the aerosol concentration and distribution, whereas the largest decrease in temperature in summer is found in Hetao and the lower reaches of the Yellow River. The aerosol leads to a reduction of precipitation in eastern China both in winter and summer. The reasons for the temperature and precipitation changes are also presented in the paper.

Key words regional climate model, aerosol, climate effect

1 引言

硫酸盐、黑碳(BC)、有机碳(OC)、硝酸盐和工业矿物颗粒物等人为排放大气气溶胶,主要来源于化石燃料的燃烧、交通运输和工农业生产过程等。由于气溶胶生命周期短,一般为几天到几周,区域性尺度强,其辐射强迫作用一般位于排放源附近。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 政府间气候变化专门委员会)第四次评估报告(Forster et al., 2007; IPCC, 2007)指出,气溶胶对气候的影响不可忽视,全球平均人为硫酸盐气溶胶的直接辐射强迫作用约为 -0.4 W/m^2 (范围为 $-0.2 \sim -0.6 \text{ W/m}^2$),来自化石燃料的黑碳气溶胶全球平均辐射强迫约为 0.2 W/m^2 (范围为 $-0.05 \sim 0.35 \text{ W/m}^2$),同样来自化石燃料的有机碳气溶胶直接辐射强迫效应约为 -0.05 W/m^2 。

近20~30年来,随着经济的快速发展,中国和亚洲地区气溶胶排放大量增加,这将不可避免地对这里的气候产生很大影响。现在已有许多工作通过使用不同类型的数值模式(如辐射传输模式、全球和区域气候模式等)进行这方面的研究,包括气溶胶引起的辐射强迫、对气温和降水的影响等,取得了很多成果(王喜红等, 2002; Giorgi et al., 2002; 吴润等, 2002; 高学杰等, 2003; Qian et al., 2003; 吴润和符淙斌, 2005; Huang et al., 2007; 孙家仁和刘煜, 2008a, 2008b; 张华等, 2008)。如IPCC第四次评估报告(IPCC, 2007)所指出的,气溶胶的气候效应具有非常大的不确定性,上述研究所得到的结果,在定性方面比较一致,如对地面产生负辐射强迫引起降温,对降水也有一定影响等,但具体在气温和降水的变化幅度和空间分布等方面,结果互相之间存在较大差异,此外,上述研究还较少考虑多种气溶胶的共同作用。

研究表明,具有较高分辨率的区域气候模式,

对于东亚地区季风气候较全球模式有更好的模拟能力(高学杰等, 2006; Zhou and Yu, 2006; Gao et al., 2008)。我们使用一个耦合了化学过程的区域气候模式,通过长时间积分,模拟了亚洲地区主要气溶胶(硫酸盐、黑碳、有机碳)的时空分布,分析了3种气溶胶综合辐射强迫的季节变化和地理分布特征,并给出了它们对中国地区地面气温和降水的影响。

2 模式简介和试验设计

本文所用模式为意大利国际理论物理中心(The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics)在区域气候模式RegCM2基础上发展出的改进版RegCM3(Pal et al., 2007),其所耦合的气溶胶模式,是Solmon et al. (2006)在Qian et al. (2001)方案基础上发展起来的,其中气溶胶的传输包括水平和垂直平流输送、水平和垂直湍流扩散,积云对流输送,地面排放,大尺度和对流降水清除(湿沉降),干沉降以及物理化学过程中的生成和耗损等。

在考虑各种类型气溶胶的辐射特性时,模式给定了单位质量各种类型气溶胶(硫酸盐、亲水黑碳和有机碳、厌水黑碳和有机碳)不同波长(19个)的质量削光效率因子、单次散射反照率和非对称因子参数。其中在计算硫酸盐、亲水黑碳和有机碳气溶胶的光学特性时,考虑了湿度的影响,并且对于不同类型气溶胶采用不同的拟合公式计算其亲水增长(Solmon et al., 2006)。

气溶胶的气候效应包括直接和间接两种,前者通过散射和吸收太阳短波辐射直接影响气候,后者通过改变云的光学特性和寿命等间接影响气候。本试验中只考虑气溶胶的直接效应。

试验中模式水平分辨率取为50 km,中心点在(32.0°N, 99.0°E),格点数目为192×160(东西—南北)。为考虑整个亚洲地区气溶胶对中国气候的影

响,模式所取范围相对较大,覆盖中国、印度及周边(图1),垂直方向分为18层,顶层高度为10 hPa。辐射采用NCAR CCM3方案(Kiehl et al., 1996),陆面过程使用BATS1e(Dickinson et al., 1993),行星边界层方案为Holtslag方案(Holtslag et al., 1990),积云对流参数化方案选择为Grell方案(Grell, 1993)。

模式初始场和每6小时输入一次的侧边界场由NCAR/NECP再分析数据得到,海温使用美国海洋大气局(NOAA)的OISST资料(Reynolds et al., 2002)。

共进行2个试验,积分时间均为1987年1月1日到2002年12月31日,其中前12个月作为模式的初始化(spin-up)时段,不做分析,分析时段为1988年1月至2002年12月,共计15年的时间。

试验1(EXP1)为控制试验,其中不包括气溶胶;试验2(EXP2)为敏感性试验,引入了3种主要人为排放气溶胶(硫酸盐、黑碳、有机碳)的作用。试验2与试验1两者结果之差被视为气溶胶的气候效应。

硫酸盐气溶胶是由煤和石油燃烧产生的 SO_2 排放,在大气中经化学反应形成的。黑碳由化石燃料或木材等生物质的不完全燃烧产生。有机碳同样来源于化石燃料和生物质燃烧,主要由直接排放的一次有机气溶胶和经过大气化学反应生成的二次有机气溶胶组成。

为了便于分析,将中国境内排放源较集中的地区划分为3个子区域[图1(见文后彩图)]:北方($33.4^\circ\text{N}\sim 42.4^\circ\text{N}$, $109.3^\circ\text{E}\sim 124.3^\circ\text{E}$)(简称NC)、南方($21.5^\circ\text{N}\sim 33.4^\circ\text{N}$, $109.3^\circ\text{E}\sim 124.3^\circ\text{E}$)(简称SC)、四川盆地($27.7^\circ\text{N}\sim 32.6^\circ\text{N}$, $105.5^\circ\text{E}\sim 109.3^\circ\text{E}$)(简称SCB)。

模式计算采用的排放清单,为日本全球变化前沿研究中心(Frontier Research Center for Global Change)制作的REAS(Regional Emission inventory in Asia)(Ohara et al., 2007),此排放清单曾被应用于中国地区 NO_2 和臭氧等研究(Li et al., 2008; Shi et al., 2008)。注意到这个资料仅有年际间变化,没有年内(季节)变化,分辨率为 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ (经纬度),在使用中,我们首先用双线性方法将其插值到了区域模式的计算格点上。

图2给出REAS中硫酸盐气溶胶的前体物 SO_2 、黑碳和有机碳1988~2002年的平均排放通

量。由图2中可以看到,它们的空间分布呈现类似的特征,以中国东部和印度地区数值较大,其中中国北方和四川盆地是中国的两个排放中心,但 SO_2 的数值较黑碳和有机碳一般大一个数量级。

用于检验模式气候场(地面气温和降水)的观测资料,为国家气候中心基于751个观测台站制作的CN05气温(Xu et al., 2009)和降水的格点数据(Xie et al., 2007),其分辨率均为 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 经纬度。

中国地区自1980年代以来开始开展气溶胶方面的观测,取得了很多数据和分析结果。但总体来说气溶胶的观测还存在站点较少、空间分布不够均匀和资料比较分散等问题,在时间方面的连续性也不够,大多针对于个别过程或较短时间尺度(石广玉等, 2008),从而较难将这些资料使用于气候学意义上多年模式结果检验。

相对而言,卫星遥感资料在空间和时间的连续性上具有一定优点。本研究采用2000~2002年MODIS第三级月平均格点资料(MOD08)中 $\lambda=0.55\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶光学厚度(AOD),检验模式对气溶胶分布的模拟。MODIS资料在国内气溶胶分析中有很多应用,这里不再一一指出,可参阅石广玉等(2008)的回顾。

3 结果分析

3.1 模式模拟能力的检验

对区域基本气候场的模拟能力,是进行气溶胶及其气候效应模拟的基础。以往研究表明,RegCM3对东亚平均环流的特征和中国地区地面气温、降水的年、季地理分布和变化等具有较好的模拟能力,特别是在汛期降水方面(Gao et al., 2008; Zhang et al., 2008)。本节简要给出模式对中国地区年平均气温和降水的模拟和检验(图3)。

由图3a、b的对比可以看到,模式对中国地区年平均地面气温的模拟效果较好。在东部地势平坦地区,气温受纬度变化影响明显,南方高,北方低;在西部气温受地形影响显著,如西北的祁连山、天山等地,为气温低值区,而与其相邻的柴达木和准噶尔、塔里木盆地,则为高温中心。与观测相比,模拟的误差主要为西部地区存在 $1\sim 2^\circ\text{C}$ 的冷偏差,更进一步的分析表明这种冷偏差主要出现于冬季(图略)。

图3c、d分别给出中国年平均降水的观测和模拟,从图中可以看到,观测中区域降水自东南向西

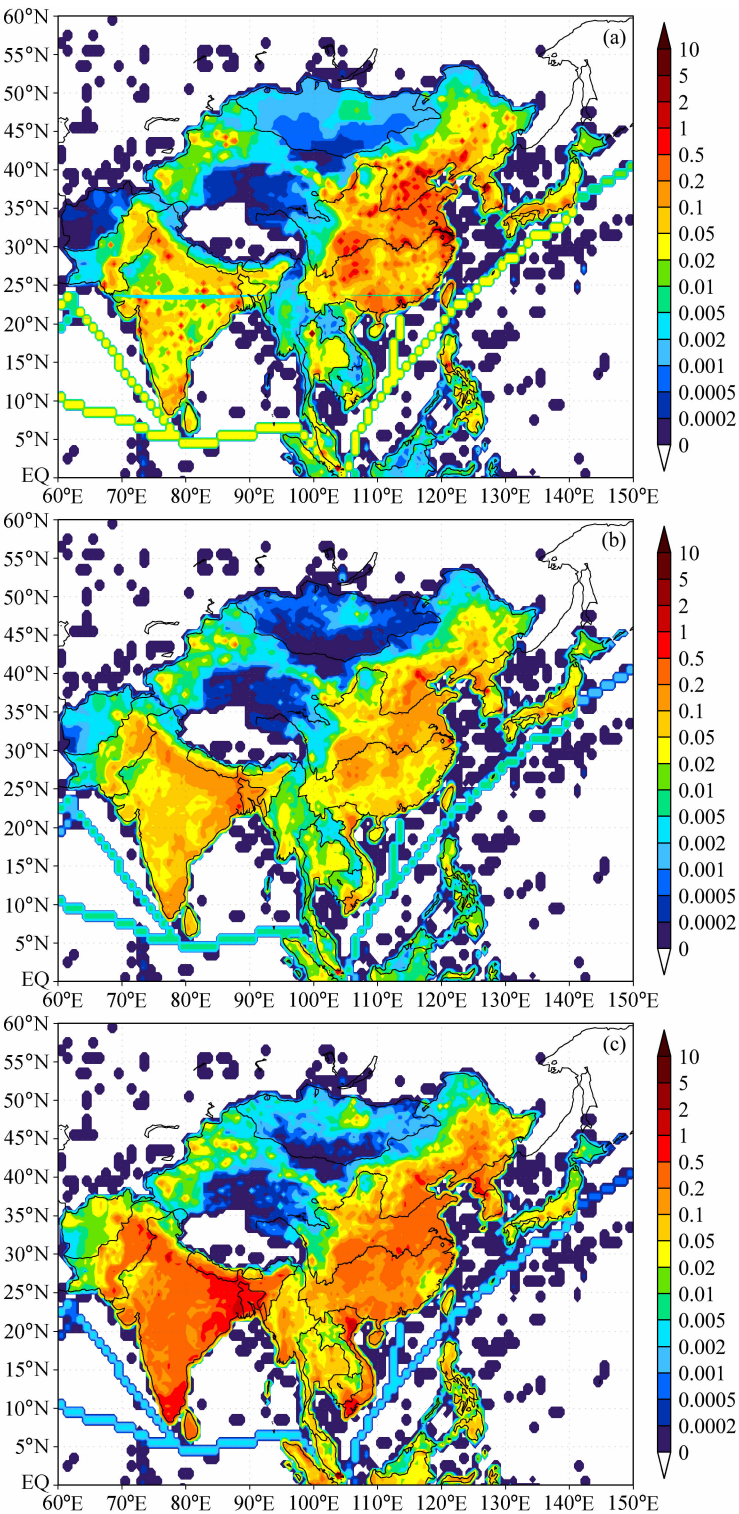


图 2 亚洲区域排放清单：(a) SO₂(单位：10⁻⁹kg·m⁻²·s⁻¹)；(b) 黑碳 (单位：10⁻¹⁰kg·m⁻²·s⁻¹)；(c) 有机碳 (单位：10⁻¹⁰kg·m⁻²·s⁻¹)
Fig. 2 Emission inventory in Asia: (a) SO₂(units: 10⁻⁹kg·m⁻²·s⁻¹)；(b) BC (units: 10⁻¹⁰kg·m⁻²·s⁻¹)；(c) OC (units: 10⁻¹⁰kg·m⁻²·s⁻¹)

北递减的层次得到较好的模拟，一些地形性降水也有较好的体现，如祁连山、天山等地的降水中心。与观测差别较大的，主要有在东北和华北北部地区

降水模拟过多，而在东南地区则偏少等，其中以冬季模拟偏差的百分率较大（图略）。

图 4a、b 分别给出冬季气溶胶 AOD 的观测

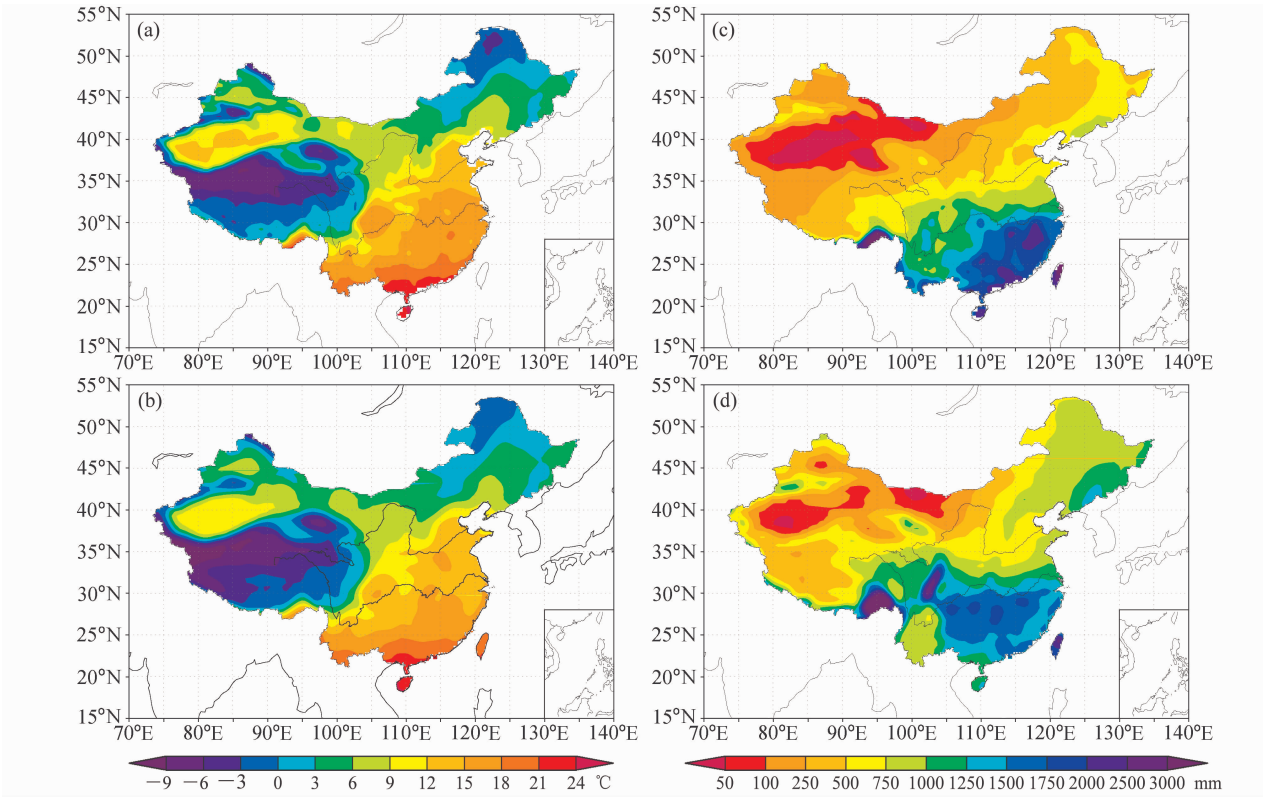


图3 中国年平均地面 (a、b) 气温和 (c、d) 降水的 (a、c) 观测与 (b、d) 模拟
Fig. 3 (a, c) Observed and (b, d) simulated annual mean (a, b) temperature and (c, d) precipitation over China

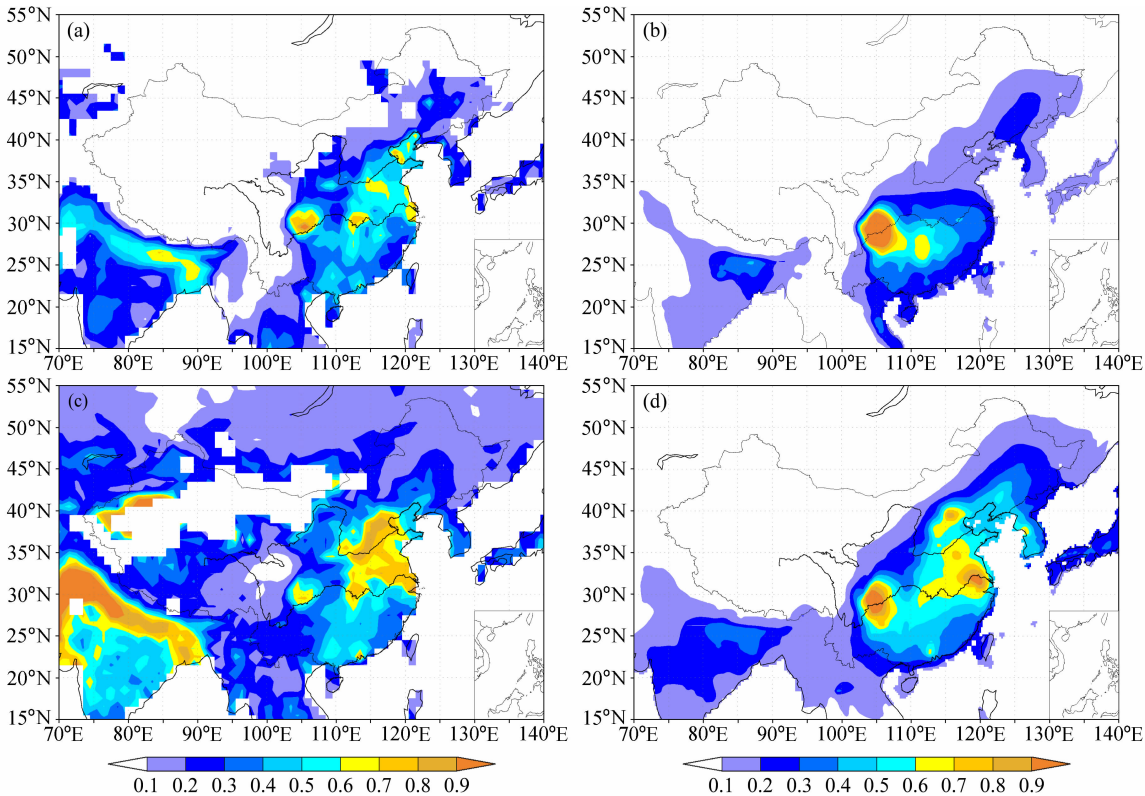


图4 (a、b) 冬季、(c、d) 夏季平均气溶胶光学厚度的 (a、c) 观测和 (b、d) 模拟
Fig. 4 (a, c) Observed and (b, d) simulated aerosol optical depth averaged for (a, b) winter and (c, d) summer

(MODIS 资料) 和模式的模拟。由两者的对比可以看到, 模拟的 AOD 与观测在空间分布上表现出一定的一致性, 观测中四川盆地和长江中游等高值中心, 以及在西部、东南沿海的低值区等在模拟中都有较好体现。但所模拟的自四川盆地的大值区, 与观测相比数值偏大。华北地区存在的模拟低于观测值的现象, 可能是由于冬季该地区生物质燃烧排放较大, 但所使用的排放清单中不包括季节变化。此外, 模式模拟的冬季风过强 (Zhang et al., 2008), 可能也是北方地区 AOD 模拟偏小的原因。

夏季卫星观测资料中的 AOD 高值中心, 在中国范围内包括四川盆地、长江中下游部分地区、华北等 (图 4c)。相对于观测, 模式模拟的四川盆地和长江下游的 AOD 数值偏大, 华北偏小 (图 4d)。华北地区 AOD 偏小, 可能有以下几个方面的原因: 模式本身的误差 (环流和降水等) (Zhang et al., 2008), 排放清单的误差, 气溶胶的种类考虑得较少 (如模拟不考虑该地区麦收后秸秆燃烧产生的生物质、硝酸盐气溶胶 NO_x 、夏季更活跃的有机挥发物 VOC 排放等), 此外, 反演的 MODIS 气溶胶 AOD 可能也存在不够准确的问题 (王莉莉等, 2007)。具体原因需要更深入的分析 and 数值试验说明。观测中位于印度半岛西北部的高值中心, 在模拟中也不存在, 这可能是由沙尘气溶胶形成的 (模拟也没有考虑)。

RegCM3 模式和其中的化学过程总体上是基于欧洲地区气候特点发展而来的 (Solmon et al., 2006), 经过在东亚地区多年的发展和应用, RegCM 系列模式现在对这一地区气候的模拟能力相对较好 (Gao et al., 2001, 2008), 但在气溶胶方面还显不足, 是未来需要改进的地方。

3.2 气溶胶分布的模拟

图 5 给出模式模拟的硫酸盐、黑碳和有机碳气

溶胶冬、夏季平均柱含量分布。冬季硫酸盐气溶胶 (图 5a) 主要分布在印度半岛东北部、中南半岛以及我国东部的黄河以南地区, 最大值出现在四川盆地, 中心含量在 25 mg/m^2 以上, 可能受较强冬季风影响, 硫酸盐的柱含量在排放同样较多的我国东北 (图 2a) 并不是很大。三个子区域平均的柱含量 (见表 1), 以 SCB 最大 (18.3 mg/m^2), 其次为 SC (8.5 mg/m^2), NC 浓度最小, 平均柱含量为 3.4 mg/m^2 。

夏季硫酸盐气溶胶 (图 5b) 的主要分布特征和冬季类似, 但范围和数值更大, 其中大于 25 mg/m^2 的高值区主要位于我国四川盆地, 长江以北至华北平原大部分地区的柱含量在 20 mg/m^2 以上。相对于冬季, 三个子区域平均中, SCB 变化不大但仍然是最高, NC 和 SC 区域均有较大增加, 含量分别为 14.9 mg/m^2 和 15.4 mg/m^2 (表 1)。

吴润等 (2002) 使用耦合了化学过程的 RegCM2 模式, 对 1994 年 1、4、7、10 月中国地区硫酸盐气溶胶分布进行了模拟, 得到的 1、7 月硫酸盐气溶胶的分布与本文结果较一致, 但位于四川盆地的最高值略微高于本文结果, 此外, 冬季位于长江三角洲的次大值区域, 本试验也未模拟出来。

冬季黑碳气溶胶 (图 5c) 主要分布在印度半岛和我国东部, 2 个大于 1.25 mg/m^2 的高值中心分别位于印度半岛东北部和四川盆地。夏季分布 (图 5d) 与冬季类似, 但夏季的 2 个高值中心的强度减弱, 这可能与夏季季风降水引起的湿沉降有关, 此外, 夏季在华北地区北部出现了一个新的大值区。由表 1 可以看到, 相对于硫酸盐气溶胶, 3 个子区域平均的黑碳冬夏季变化不是很大, 此外硫酸盐气溶胶的柱含量一般较黑碳大 20 多倍。

有机碳在中国东部的分布在冬夏季差别不是很大 (图 5e、f), 印度半岛东北部的柱含量在两个季

表 1 三个子区域各物理量的变化
Table 1 The changes of physical quantities in the three sub-regions

	冬季			夏季		
	NC	SC	SCB	NC	SC	SCB
硫酸盐平均柱含量/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$	3.4	8.5	18.3	14.9	15.4	21.3
黑碳平均柱含量/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$	0.4	0.5	1.0	0.6	0.5	0.9
有机碳平均柱含量/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$	0.9	2.0	2.6	1.8	1.9	2.9
大气层顶平均短波辐射强迫/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	-3.1	-7.2	-19.2	-11.4	-13.5	-19.0
地面平均短波辐射强迫/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	-6.0	-13.2	-25.0	-17.5	-19.3	-25.9
地面气温/ $^{\circ}\text{C}$	-0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1
降水	-0.9%	-3.9%	-3.4%	-9.1%	1.7%	-10.8%

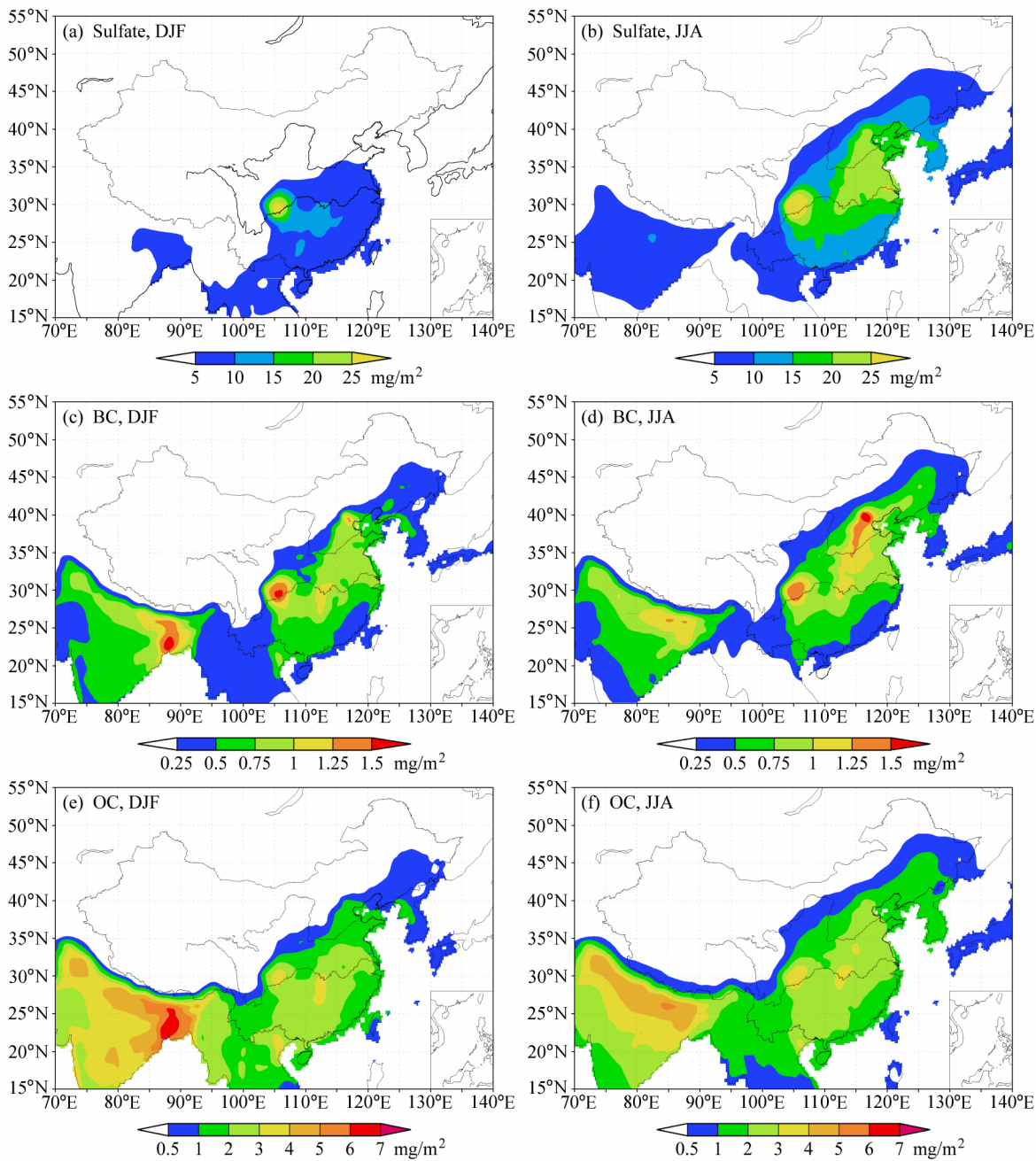


图5 (a、c、e) 冬季、(b、d、f) 夏季 (a、b) 硫酸盐、(c、d) 黑碳、(e、f) 有机碳气溶胶平均柱浓度含量

Fig. 5 The (a, c, e) winter and (b, d, f) summer mean column burden of (a, b) sulfate, (c, d) BC, and (e, f) OC

节都是区域最高的，并以冬季更大。中国境内有机碳在各子区域的平均柱浓度，除 NC 的夏季高于冬季外，其他两个子区域的季节差别不大，数值以冬季 SCB 最大，有机碳的数值一般较硫酸盐小 10 倍左右（表 1）。

模拟给出的气溶胶分布具有夏季高于冬季的特点，与实际观测和其他模拟中的冬季高于夏季不同（Cao et al., 2007; Kim et al., 2007）。其原因一方面在于模式对气候态和气溶胶传输等模拟中产生的

误差，另一方面可能是由于气溶胶本身具有明显季节循环，中国地区气溶胶分布在冬季高夏季低，而我们使用的排放清单不包括季节循环造成的。模式对气溶胶分布模拟所产生的误差，增加了结果中的不确定性。

3.3 气溶胶短波辐射强迫

硫酸盐气溶胶和有机碳都属于散射性气溶胶，黑碳属于吸收性气溶胶，它们的综合作用不是简单的线性叠加，而是取决于 3 种气溶胶混合后的总体

辐射性质。图 6 (见文后彩图) 给出模式模拟的气溶胶在大气层顶及地面的短波辐射强迫分布, 由图中可以看到, 3 种气溶胶综合的辐射效应均为负值。

大气层顶的辐射强迫, 冬季的主要负强迫区位于我国南方, 其中以四川盆地最大, 中心值在 -20 W/m^2 以上, 北方的负强迫值相对较小 (图 6a 和表 1)。夏季 (图 6b) 负强迫区的分布范围较广, 包括印度半岛、中南半岛至我国中、东部, 数值一般也较冬季大, 最大值同样出现在四川盆地。与冬季相比, 各子区域大气层顶辐射强迫平均值差异相对较小 (见表 1), 仍然以 SCB 最大, 为 -19.0 W/m^2 。

由图 6c、d 可以看到, 冬、夏季气溶胶的地面短波辐射强迫分布与大气层顶辐射强迫分布较一致, 但数值更大一些, 同样, 以 SCB 子区域的平均负强迫极值最大, 冬、夏季平均分别为 -25.0 W/m^2 和 -25.9 W/m^2 。

注意到 Giorgi et al. (2002) 使用较早版本的 RegCM 模式进行的 5 年时间长度中国东部硫酸盐和黑碳气溶胶及其气候效应的模拟结果中, 所给出的硫酸盐气溶胶的大气层顶辐射强迫与本研究得到综合强迫相比, 在分布型上比较相似, 但前者的数值平均小一倍左右。

Qian et al. (2003) 使用气候版本的 MM5 模式进行了中国地区气溶胶气候效应 5 年时间长度的模拟, 其中给出的地面辐射强迫, 其使用的气溶胶分布为事先给定 (prescribed), 种类较多 (6 种)。所得到的地面强迫辐射的数值, 同样在冬、夏季都和本研究得到的结果具有类似的分布型, 但数值同样要小, 特别是在夏季。

3.4 气溶胶对地面气温和降水的影响

图 7 给出气溶胶引起的中国境内 (大陆) 地面气温、降水及夏季 850 hPa 风场变化的分布。

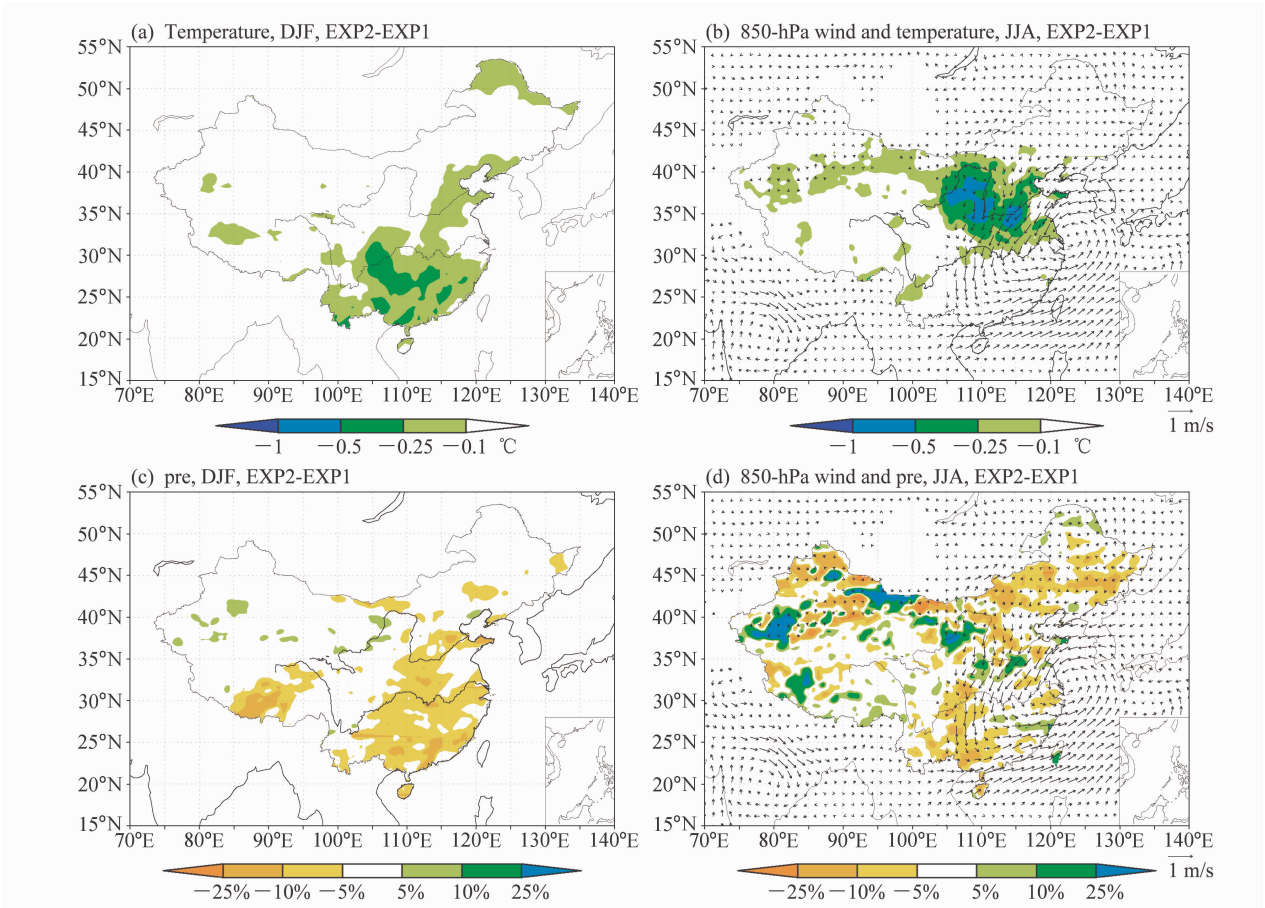


图 7 气溶胶对中国地区地面气温、降水及夏季 850 hPa 风场的影响: (a) 冬季气温; (b) 夏季气温和 850 hPa 风场; (c) 冬季降水; (d) 夏季降水和 850 hPa 风场

Fig. 7 Simulated aerosol effects on surface temperature, precipitation, and 850-hPa wind field: (a) Temperature in DJF; (b) temperature and 850-hPa wind in JJA; (c) precipitation in DJF; (d) precipitation and 850-hPa wind in JJA

引入气溶胶后,冬季地面气温降低(图 7a),主要降温区位于华北平原、山东半岛和长江以南大部分地区,降温幅度一般超过 0.1°C ,西南地区个别地方会达到 0.25°C 以上。SCB 和 SC 的平均降温分别为 -0.3°C 和 -0.1°C (见表 1)。气溶胶对我国其他地区地面气温影响较小。气溶胶引起的西南四川盆地地区降温,和观测给出的结果表现出一致性(Qian and Giorgi, 2000)。冬季降温的分布与各种气溶胶的平均柱浓度(图 4a、c、e)和引起的辐射强迫负值区分布(图 6a)较为一致,这主要是由于冬季我国降水和云量相对较少,气溶胶对太阳短波辐射的散射和反射作用更为直接引起的。

相对于冬季,夏季地面气温的变化与气溶胶浓度及其辐射强迫的分布表现出较大的不一致。如图 7b 所示,夏季大的降温出现在黄河中游的河套至其东部的华北及长江以北地区,其中位于河套及黄河下游的降温中心数值达到 $-0.5\sim-1.0^{\circ}\text{C}$ 间。三个子区域中,以 NC 降温幅度最大 (0.3°C),而 SCB 和 SC 均小于 0.1°C 。夏季,中国地区的气流以西南和东南季风为主,注意到夏季气溶胶引起的最大降温与气溶胶分布及辐射强迫的最大值并不重合。由图 7b 中 850 hPa 风场变化可以看到,模式中在引入气溶胶作用后,在中国东部产生了一个气旋式环流,环流中心位于长江出海口外,北方大部分地区均处于气旋左上部偏北气流控制之下,形成冷平流,并在一定程度上阻止了南方暖空气的向北输送,这是该地区降温的可能原因之一。

与 Giorgi et al. (2002) 给出的硫酸盐气溶胶对气温的影响相比,冬季两者分布型较为相似,但我们模拟的数值基本偏小一倍左右。夏季,两个模拟得到的气温变化分布型也有类似之处,如两者降温均在河套一带最大等,但本模拟得到的四川盆地和长江以南的降温偏小,而北方的降温中心则偏大一倍左右。

Qian et al. (2003) 模拟得到气溶胶在冬季引起的降温,在中国南方大部分地区达到近 -1°C 。在夏季有两个较大的降温区,其中一个位于四川盆地,中心数值超过 -1°C ,另一个位于北方自华北至河套以南地区,但数值偏小,在 $-0.3\sim-0.6^{\circ}\text{C}$ 间。

图 7c、d 分别给出气溶胶引起的中国冬、夏季平均降水变化,由图中可以看到,与 Giorgi et al. (2002) 和 Qian et al. (2003) 的模拟结果类似,气

溶胶会引起中国降水普遍减少。

具体在本模拟中冬季降水变化(图 9c)的主要特点,为中国东部降水的普遍减少,减少值一般在 $5\%\sim 10\%$ 之间,个别地区达到 $10\%\sim 25\%$ 。各子区域中,NC 降水减少最少,为 -0.9% (见表 1),SCB 为 -3.4% ,SC 最大,为 -3.9% 。冬季降水的变化可能是因为气溶胶引起低层气温降低,直接增加大气稳定度,减弱垂直运动,从而导致降水减少。

夏季降水变化(图 7d)在中国西部正负相间。东部降水以减少为主,减少较明显的地区包括内蒙古中西部至东北中部,以及位于西南的四川、重庆、贵州、广西及云南西部,减少的幅度在个别地方可以达到 10% 。以长江出海口外为中心的气旋式环流,在其北部的黄海和渤海造成降水大范围增加(图中未给出),此外在其外围的西北和南部个别地方,也引起了降水增加。各子区域平均的变化,在 NC 和 SCB 为减少 10% 左右,SC 则为一个微弱的增加 (1.7%)。

从夏季 850 hPa 环流场可以看到,中国南方在 $107^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 间有较强的北风距平,这对西南暖湿气流的向北输送产生一定的阻碍作用,引起这一地区降水的减少,但总体来看模拟得到的中国降水变化,与周天军等(2008)对其他研究的综述类似,并没有出现观测中的“南涝北旱”现象。

气溶胶排放引起的辐射强迫,和自然的沙尘气溶胶辐射强迫量级相似,但对气温和降水的影响相对大很多(Zhang et al., 2009)。

4 小结和讨论

使用 RegCM3 区域气候模式,对东亚地区人为排放气溶胶(硫酸盐、黑碳、有机碳)及其直接气候效应进行了数值模拟和初步分析。首先在对模式所模拟的气候场和气溶胶分布进行检验的基础上,分析了气溶胶对中国气候可能产生的影响。结果表明:

(1) 模式能够较好地模拟中国地区气候,对气溶胶的分布具有一定模拟能力,但也存在许多需要改进的地方。3 种气溶胶柱含量的分布随季节不同有所变化,一般来说都是夏季浓度高于冬季,冬季北方浓度小于南方,其中以硫酸盐气溶胶分布的季节变化最大。四川盆地全年都为气溶胶柱含量的高值区。3 种气溶胶综合引起了大气层顶和地面短波的负辐射强迫,辐射强迫的分布和季节变化与气溶

胶的柱含量表现出一定的对应关系,地面的辐射强迫数值大于大气层顶。

(2) 气溶胶引起地面气温下降。其中,冬季气温的下降与气溶胶浓度分布有密切关系,降温主要出现在南方,但夏季气温的变化则与气溶胶浓度分布的关系不大,降温中心位于河套地区,数值可以达到 0.5°C 以上。气溶胶对冬、夏季中国东部降水,总体来说均产生一定的减少作用,减少的幅度一般在 $5\%\sim 10\%$ 之间。

需要指出的是,到目前为止,对气溶胶及其气候效应的模拟仍是十分复杂的问题,存在许多不确定性,特别是在对气温和降水影响的模拟上。本文模拟得到的气溶胶分布与观测结果(AOD)相差较大,尤其是华北地区气溶胶模拟结果明显偏低,从而在较大程度上影响了模拟结果的可信性程度。上述偏差产生的原因,主要包括模式对气候场本身和对气溶胶分布模拟的误差两个方面,此外排放源可能也是误差来源之一。

未来还需要通过模式及气溶胶过程的改进以及包括气溶胶间接气候效应的引入,中国地区排放清单的更合理应用^①,系统性观测资料的搜集及在模式检验中的应用,更长时间的积分和统计显著性分析等多方面的工作,得到气溶胶对中国气候影响的更可靠结果。

目前,不同气候模式及模式的不同版本所给出的气候效应差异较大,反映了气溶胶模拟中的不确定性,特别是在气温和降水方面。未来需要开展如大气和耦合模式所进行的 AMIP、CMIP 类比较试验(王会军,1997;Meehl et al.,2000),如进行多个区域气候模式在相同的区域、时段、侧边界场、排放源等条件下运行,并对结果进行比较,以更深入地了解气溶胶效应及其不确定性。

气候变化的成因,有自然变率和人类活动两个方面,其中人类活动影响气候的因素,包括温室气体(Gao et al.,2001)、土地利用(高学杰等,2007)、本文所述的气溶胶强迫等,未来需要更多的数值试验和模拟,以考察它们各自和综合的作用,从而更好地理解中国地区当代气候及其变化的成因。

参考文献 (References)

Cao J J, Lee S C, Chow J C, et al. 2007. Spatial and seasonal distri-

butions of carbonaceous aerosols over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D22S11, doi: 10.1029/2006JD008205.

Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-387+STR, National Center for Atmospheric Research.

Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [M] // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the IPCC AR4*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the IPCC AR4* [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Kim M-K, Lau W K M, Kim K-M, et al. 2007. A GCM study of effects of radiative forcing of sulfate aerosol on large scale circulation and rainfall in East Asia during boreal spring [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L24701, doi: 10.1029/2007GL031683.

Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. 2001. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (6): 1224-1230.

高学杰,林一骅,赵宗慈. 2003. 用区域气候模式模拟人为硫酸盐气溶胶在气候变化中的作用 [J]. *热带气象学报*, 19 (2): 169-176. Gao Xuejie, Lin Yihua, Zhao Zongci. 2003. Modelling the effects of anthropogenic sulfate in climate change by using a regional climate model [J]. *Journal Tropical Meteorology (in Chinese)*, 9 (2): 173-180.

高学杰,徐影,赵宗慈,等. 2006. 数值模式不同分辨和地形对东亚降水模拟影响的试验 [J]. *大气科学*, 30 (2): 185-192. Gao Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 30 (2): 185-192.

高学杰,张冬峰,陈仲新,等. 2007. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟 [J]. *中国科学 (D辑)*, 37 (3): 397-404. Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin, et al. 2007. Land use effects on climate in China as simulated by a regional climate model [J]. *Sci. China (Ser. D)*, 50 (4): 620-628.

Gao X J, Shi Y, Song R Y, et al. 2008. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 100: 73-86.

Giorgi F, Bi X, Qian Y. 2002. Direct radiative forcing and regional climatic effects of anthropogenic aerosols over East Asia: A re-

① 曹国良. 2008. 中国关键大气成分排放清单 [R]. 中国气象科学研究院博士后出站报告.

- gional coupled climate-chemistry/aerosol model study [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D20): 4439–4456.
- Grell G A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 764–787.
- Holtslag A A M, De Bruijn E I F, Pan H L. 1990. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 118: 1561–1575.
- Huang Y, Chameides W L, Dickinson R E. 2007. Direct and indirect effects of anthropogenic aerosols on regional precipitation over East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D03212, doi: 10.1029/2006JD007114.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1996. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3) [R]. Tech. Rep. NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research.
- Li J, Wang Z, Akimoto H, et al. 2008. Regional-scale modeling of near-ground ozone in the Central East China, source attributions and an assessment of outflow to East Asia—The role of regional-scale transport during MTX2006 [J]. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 8: 13159–13195.
- Meehl G A, Boer G J, Covey C, et al. 2000. The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81: 313–318.
- Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. 2007. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7: 4419–4444.
- Pal J S, Giorgi F, Bi X Q, et al. 2007. Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88 (9): 1395–1409.
- Qian Y, Giorgi F. 2000. Regional climatic effects of anthropogenic aerosols? The case of southwestern China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 3521–3524.
- Qian Y, Giorgi F, Huang Y, et al. 2001. Regional simulation of anthropogenic sulfur over East Asia and its sensitivity to model parameters [J]. *Tellus B*, 53: 171–191.
- Qian Y, Leung L R, Ghan S J, et al. 2003. Regional climate effects of aerosols over China: Modeling and observation [J]. *Tellus B*, 55: 914–934.
- Reynolds R W, Rayner N A, Smith T M, et al. 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate [J]. *J. Climate*, 15: 1609–1625.
- 石广玉, 王标, 张华, 等. 2008. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 32 (4): 826–840. Shi Guangyu, Wang Biao, Zhang Hua, et al. 2008. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 32 (4): 826–840.
- Shi C, Fernando H, Wang Z F, et al. 2008. Tropospheric NO₂ columns over east central China: Comparisons between SCIAMACHY measurements and nested CMAQ simulations [J]. *Atmos. Environ*, 42: 7165–7173.
- Solmon F, Giorgi F, Lioussé C. 2006. Aerosol modeling for regional climate studies: Application to anthropogenic particles and evaluation over a European/African domain [J]. *Tellus B*, 58: 51–72.
- 孙家仁, 刘煜. 2008a. 中国区域气溶胶对东亚夏季风的可能影响 (I): 硫酸盐气溶胶的影响 [J]. *气候变化研究进展*, 4 (2): 111–116. Sun Jiaren, Liu Yu. 2008a. Possible effect of aerosol over China on East Asia summer monsoon (I): Sulfate aerosols [J]. *Adv. Clim. Change Res. (in Chinese)*, 4 (2): 111–116.
- 孙家仁, 刘煜. 2008b. 中国区域气溶胶对东亚夏季风的可能影响 (II): 黑碳气溶胶及其与硫酸盐气溶胶的综合影响 [J]. *气候变化研究进展*, 4 (3): 161–166. Sun Jiaren, Liu Yu. 2008b. Possible effect of aerosol over China on East Asia summer monsoon (II): Black carbon and its joint effect with sulfate aerosols [J]. *Adv. Clim. Change Res. (in Chinese)*, 4 (3): 161–166.
- 王会军. 1997. 国际大气环流模式比较计划 (AMIP) 进展 [J]. *大气科学*, 21 (5): 633–637. Wang Huijun. 1997. The advance of the atmospheric model intercomparison project (AMIP) [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 21 (5): 633–637.
- 王莉莉, 辛金元, 王跃思, 等. 2007. CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性 [J]. *科学通报*, 52 (4): 477–486. Wang Lili, Xin Jinyuan, Wang Yuesi, et al. 2007. Validation of MODIS aerosol products by CSHNET over China [J]. *Chinese Sci. Bul.*, 52 (12): 1708–1718.
- 王喜红, 石广玉, 马晓燕. 2002. 东亚地区对流层人为硫酸盐辐射强迫及其温度响应 [J]. *大气科学*, 26 (6): 751–760. Wang Xihong, Shi Guangyu, Ma Xiaoyan. 2002. The direct radiative forcing of anthropogenic sulfate and its temperature response over the East Asia [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 26 (6): 751–760.
- 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 等. 2002. 硫酸盐气溶胶直接和间接辐射气候效应的模拟研究 [J]. *环境科学学报*, 22 (2): 129–134. Wu Jian, Jiang Weimei, Liu Hongnian, et al. 2002. Simulation of the direct and indirect radiative effects of sulfate aerosols [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 22 (2): 129–134.
- 吴润, 符淙斌. 2005. 近五年来东亚春季黑炭气溶胶分布输送和辐射效应的模拟研究 [J]. *大气科学*, 29 (1): 111–119. Wu Jian, Fu Congbin. 2005. Simulation research of distribution transportation and radiative effects of black carbon aerosol in recent five spring seasons over East Asia region [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 29 (1): 111–119.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (4): 763–772.
- Xie P P, Yatagai A, Chen M Y, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. *J. Hydrometeorol.*, 8: 607–625.
- Zhang D F, Gao X J, Ouyang L C, et al. 2008. Simulation of present climate over East Asia by a regional climate model [J]. *J. Trop. Meteorol.*, 14 (1): 19–23.

Zhang D F, Zakey A S, Gao X J, et al. 2009. Simulation of dust aerosol and its regional feedbacks over East Asia using a regional climate model [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 1095–1110.

张华, 马井会, 郑有飞. 2008. 黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1147–1158. Zhang Hua, Ma Jinghui, Zheng Youfei. 2008. The study of global radiative forcing due to black carbon aerosol [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 32 (5): 1147–1158.

Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulation by coupled climate models [J]. *J. Climate*, 19 (22): 5843–5858.

周天军, 李立娟, 李红梅, 等. 2008. 气候变化的归因与预估模拟研究 [J]. *大气科学*, 32 (4): 906–922. Zhou Tianjun, Li Lijuan, Li Hongmei, et al. 2008. Progress in climate change attribution and projection studies [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 32 (4): 906–922.

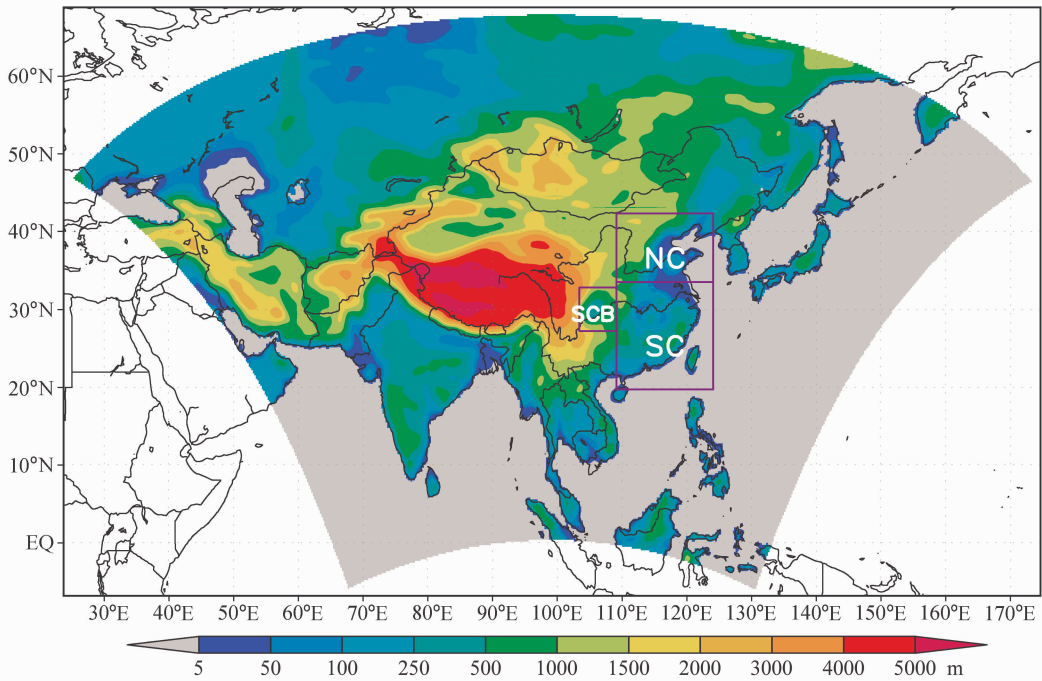


图 1 模式范围、地形高度及子区域示意图
Fig. 1 Model domain, topography, and three sub-regions

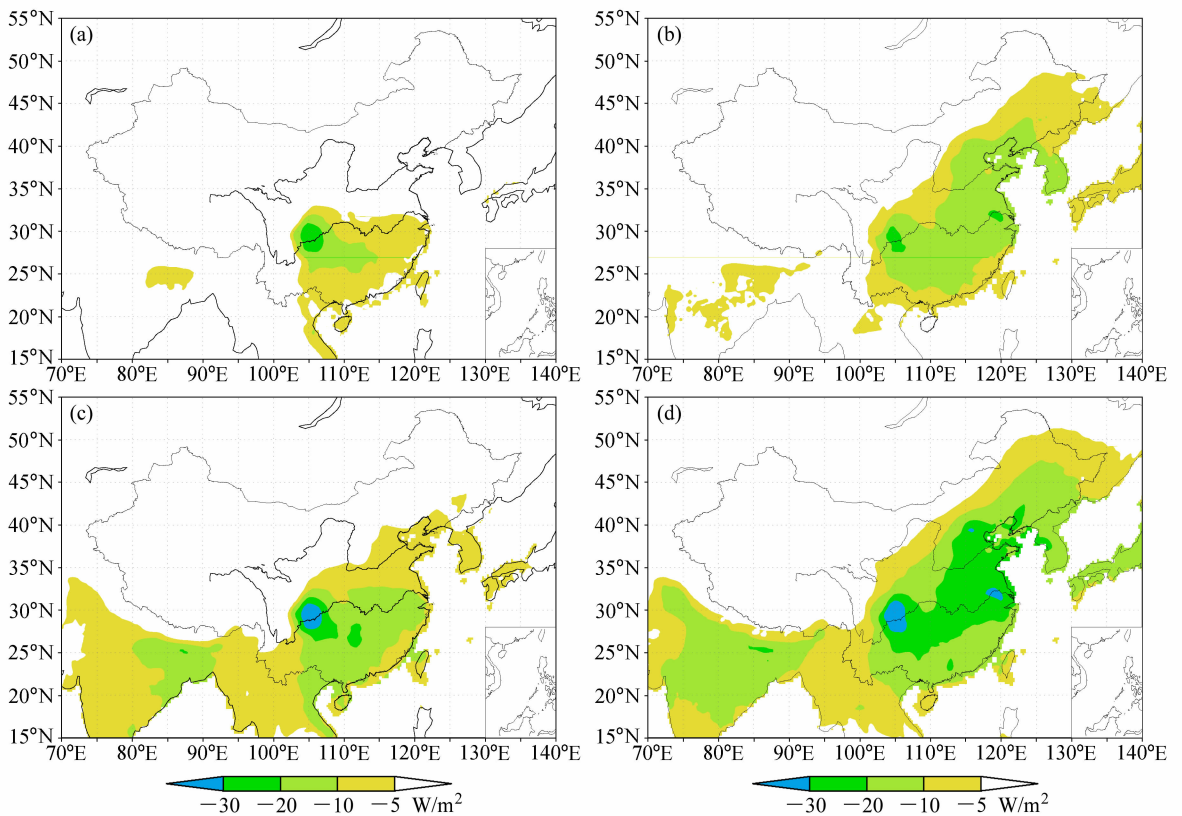


图 6 (a, c) 冬季、(b, d) 夏季模拟 (a, b) 大气层顶及 (c, d) 地面平均短波辐射强迫 (单位: W/m^2)
Fig. 6 Simulated (a, c) winter and (b, d) summer mean short wave radiative forcing at (a, b) the top of atmosphere and (c, d) the surface