

廖礼, 漏嗣佳, 符瑜, 等. 2015. 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响 [J]. 大气科学, 39 (1): 68–82, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13302. Liao Li, Lou Sijia, Fu Yu, et al. 2015. Radiative forcing of aerosols and its impact on surface air temperature on the synoptic scale in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 68–82.

# 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响

廖礼<sup>1,2</sup> 漏嗣佳<sup>1,2</sup> 符瑜<sup>3</sup> 常文渊<sup>1</sup> 廖宏<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室 (LAPC), 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院大气物理研究所气候变化研究中心 (CCRC), 北京 100029

**摘 要** 本文应用 WRF-Chem (Weather Research and Forecasting—Chemistry) 模式研究中国东部地区气溶胶及其部分组分 (硫酸盐、硝酸盐和黑碳气溶胶) 在天气尺度下的辐射强迫和对地面气温的影响。5 个无明显降水时间段 (2006 年 8 月 23~25 日、2008 年 11 月 10~12 日、2008 年 12 月 16~18 日、2009 年 1 月 15~17 日和 2009 年 4 月 27~29 日) 的模拟显示, 气溶胶浓度呈现显著的白天低, 夜间高的日变化特征, 且北方区域 (29.8°~42.6°N, 110.2°~120.3°E) 平均 PM<sub>2.5</sub> 近地面浓度 (40~80 μg m<sup>-3</sup>) 高于南方区域 (22.3°~29.9°N, 109.7°~120.2°E, 30~47 μg m<sup>-3</sup>)。气溶胶对地面 2 m 温度 (地面气温) 有明显的降温效果, 在早上 08:00 (北京时, 下同) 和下午 17:00 左右最为显著, 最高可降低约 0.2~1 K, 同时气溶胶的参与改善了模式对地面气温的模拟。本文还通过对 2006 年 8 月 23~25 日一次个例的模拟, 定量分析了气溶胶及其部分组分 (硫酸盐、硝酸盐和黑碳气溶胶) 的总天气效应 (直接效应+间接效应)、直接效应和间接效应分别对到达地面的短波辐射和地面气温的影响。北方区域平均气溶胶直接效应所造成的短波辐射强迫要高于南方区域, 分别为 -11.3 W m<sup>-2</sup> 和 -5.8 W m<sup>-2</sup>, 导致地面气温分别降低了 0.074 K 和 0.039 K。南方区域平均气溶胶间接效应所产的短波辐射强迫高于北方区域, 分别为 -14.4 W m<sup>-2</sup> 和 -12.4 W m<sup>-2</sup>, 引起的地面气温的改变分别为 -0.094 K 和 -0.035 K。对于气溶胶组分, 硫酸盐气溶胶的直接效应和间接效应的作用相当, 其总效应在北方和南方区域平均短波辐射强迫分别为 -7.0 W m<sup>-2</sup> 和 -10.5 W m<sup>-2</sup>, 对地面气温的影响为 -0.062 K 和 -0.074 K, 而硝酸盐气溶胶的作用略小。黑碳气溶胶使得北方和南方区域平均到达地表的太阳短波辐射分别减少了 6.5 W m<sup>-2</sup> 和 5.8 W m<sup>-2</sup>, 而地表气温则分别增加了 0.053 K 和 0.017 K, 相比于间接效应, 黑碳气溶胶的直接效应的影响更加显著。

**关键词** 中国东部 气溶胶 辐射强迫 地面气温

文章编号 1006-9895(2015)01-0068-15

中图分类号 P422

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13302

## Radiative Forcing of Aerosols and Its Impact on Surface Air Temperature on Synoptic Scale in Eastern China

LIAO Li<sup>1,2</sup>, LOU Sijia<sup>1,2</sup>, FU Yu<sup>3</sup>, CHANG Wenyan<sup>1</sup>, and LIAO Hong<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer and Atmospheric Chemistry (LAPC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

收稿日期 2013-11-06; 网络预出版日期 2014-02-17

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441200

作者简介 廖礼, 男, 1984 年出生, 博士研究生, 从事气溶胶数值模拟研究。E-mail: liaoli@mail.iap.ac.cn

通讯作者 廖宏, E-mail: hongliao@mail.iap.ac.cn

3 Climate Change Research Center (CCRC), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** Using the WRF-Chem (Weather Research and Forecasting-Chemistry) model, we investigate aerosol radiative forcing and its impacts on surface air temperature in Eastern China on the synoptic scale. Simulations of five selected periods without precipitation (August 23–25, 2006; November 10–12, 2008; December 16–18, 2008; January 15–17, 2009; and April 27–29, 2009) indicate that aerosol concentrations are generally lower in the daytime and higher at night. Simulated surface-layer concentrations of  $PM_{2.5}$  averaged over Northern China ( $29.8^{\circ}$ – $42.6^{\circ}$ N,  $110.2^{\circ}$ – $120.3^{\circ}$ E,) are  $40$ – $80 \mu\text{g m}^{-3}$ , higher than the simulated values of  $30$ – $47 \mu\text{g m}^{-3}$  in Southern China ( $22.3^{\circ}$ – $29.9^{\circ}$ N,  $109.7^{\circ}$ – $120.2^{\circ}$ E). Aerosols exerted a large cooling effect on surface air temperature (SAT, 2 m above ground level), and the effect is the strongest at 08:00 and 17:00 with decreases in temperature by  $0.2$ – $1$  K. We also find that including aerosols in simulations improves the simulation of SAT. Based on the simulation of a weather event during August 23 to 25 in 2006, we quantitatively analyze the total (direct + indirect), direct, and indirect radiative effects of aerosols on SAT. Shortwave radiative forcing at the surface induced by direct effects of aerosols is stronger in Northern China than that in Southern China, with average forcings of  $-11.3 \text{ W m}^{-2}$  and  $-5.8 \text{ W m}^{-2}$ , respectively, and corresponding coolings of SAT by  $0.074$  K and  $0.039$  K. However, shortwave radiative forcing induced by indirect effects of aerosols is weaker in Northern China than that in Southern China, with average forcings of  $-12.4 \text{ W m}^{-2}$  and  $-14.4 \text{ W m}^{-2}$ , respectively, and corresponding coolings of SAT by  $0.035$  K and  $0.094$  K. The direct and indirect effects of sulfate are of similar magnitude. The total effect of sulfate on shortwave radiative forcing in Northern and Southern China is  $-7.0 \text{ W m}^{-2}$  and  $-10.5 \text{ W m}^{-2}$ , respectively, causing a cooling of SAT by  $0.062$  K and  $0.074$  K, while the effect of nitrate is relative weak. Due to black carbon aerosols, the solar shortwave radiation reaching the surface is decreased by  $6.5 \text{ W m}^{-2}$  and  $5.8 \text{ W m}^{-2}$  and the SAT increases by  $0.053$  K and  $0.017$  K averaged over Northern and Southern China, respectively. The direct effect of black carbon on shortwave radiation is much larger than the indirect effect.

**Keywords** Eastern China, Aerosols, Radiative forcing, Surface air temperature

## 1 引言

气溶胶通过其直接和间接效应影响地气系统的能量平衡: 气溶胶吸收和散射太阳辐射, 从而减少到达地面的太阳辐射, 引起地面气温的降低, 称为气溶胶的直接效应; 气溶胶还可以形成云凝结核, 从而改变云的辐射特性和生命周期, 称为气溶胶的间接效应。IPCC (2007) 指出, 气溶胶直接和间接辐射强迫总作用是减少到达近地面的太阳辐射, 形成冷却效应。

目前已有许多应用数值模拟研究气溶胶通过辐射强迫对气候的影响。Takemura et al. (2005) 应用全球三维气溶胶传输辐射模式 SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) 模拟了 1850 和 2000 年气溶胶辐射强迫, 指出在对流层顶人为气溶胶全球平均直接和间接辐射强迫分别为  $-0.1 \text{ W m}^{-2}$  和  $-0.9 \text{ W m}^{-2}$ , 气溶胶缓解了约 40% 由于人为活动产生的温室气体所引起的地面空气温度的升高。Zhang et al. (2010a) 应用 WRF-Chem (Weather Research and Forecasting—Chemistry) 模式模拟 2001 年美国大陆地区气溶胶的气候效应, 并定量分析了气溶胶分别能够减少 1

月和 7 月的太阳辐射多达 9% 和 16%, 进而使得 1 月和 7 月地面 2 m 温度降低了多达 0.16 K 和 0.37 K。不同种类的气溶胶由于其散射和吸收特性的不同而引起不同的辐射效应, 对太阳辐射和地面气温的影响也存在差异。硫酸盐和硝酸盐气溶胶属于散射型气溶胶, 能够吸收和散射太阳辐射, 从而产生降温效应。Giorgi et al. (2002) 应用 RegCM (Regional Climate Model) 模式模拟中国四川盆地硫酸盐气溶胶表明, 1993~1997 年间人为硫酸盐气溶胶的辐射强迫作用可使地面空气温度降低  $0.1$ ~ $0.7$  K。Li et al. (2009) 利用 RegCM 和 TACM (Tropospheric Atmosphere Chemistry Model) 相耦合的模式模拟发现, 2003 年 1 月和 7 月中国地区人为硝酸盐气溶胶在对流层顶的平均间接辐射强迫分别为  $-1.63 \text{ W m}^{-2}$  和  $-2.65 \text{ W m}^{-2}$ , 尤其在一些区域甚至达到  $-10 \text{ W m}^{-2}$ , 对 1 月和 7 月地面空气温度分别降低了 0.13 K 和 0.09 K。与硫酸盐和硝酸盐气溶胶 (散射性气溶胶) 不同, 悬浮于大气中的黑碳气溶胶 (吸收性气溶胶) 能够吸收太阳辐射从而有很强的辐射加热效应 (Jacobson, 2001)。Wang (2004) 应用 CCM3 (Community Climate Model version 3) 模式研究发现黑碳气溶胶对太阳辐射的强烈吸收作用,

导致黑碳气溶胶在大气顶的 20 年全球平均直接辐射强迫为  $0.16\sim 0.80\text{ W m}^{-2}$ , 改变地面空气温度  $0.09\pm 0.07\text{ K}$ 。由以上这些研究可以看出, 目前的大多数相关研究主要集中在气候研究方面, 进行定量分析研究气溶胶的辐射效应及其对温度的影响。然而在天气尺度上, 气溶胶的影响和反馈作用也是十分重要的。

目前气溶胶对太阳辐射和地面气温在天气尺度上影响的研究相对较少。一些研究中将气溶胶考虑到天气预报模式中评估气溶胶对天气预报的影响。Pérez et al. (2006) 在 DREAM (Dust Regional Atmospheric Modeling System) 模式中加入沙尘的影响, 使模式对大气温度和平均海表气压的预测有很大的提高。Rodwell and Jung (2008) 在欧洲中心中尺度天气预报模式 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) 中加入气溶胶的模拟, 结果显示加入气溶胶的模拟能够改善模式对气温等气象参数的预报。此外, Zhang (2008) 应用 WRF-Chem 模式研究 2000 年 8 月德克萨斯州地区气溶胶反馈作用, 5 天模拟结果显示, 气溶胶的存在导致近地面气温降低最高达  $0.18\text{ K}$ 。其后续的研究进一步表明大气中的  $\text{PM}_{2.5}$  (大气中直径小于或等于  $2.5\text{ }\mu\text{m}$  的颗粒物) 的存在, 可减少到达地面的太阳辐射  $11.2\sim 14.4\text{ W m}^{-2}$  ( $4.1\%\sim 5.6\%$ ), 从而使近地面气温降低  $0.06\sim 0.14\text{ K}$  ( $0.2\%\sim 0.4\%$ ) (Zhang et al., 2010b)。Wang et al. (2009) 应用 SBDART (Santa Barbara Discrete Ordinate Radiative Transfere) 模式研究北京地区在不同天气状况下的气溶胶辐射强迫, 即干净天 (2004 年 10 月 26 日)、灰霾天 (2004 年 10 月 29 日)、雾天 (2004 年 11 月 30 日) 和沙尘天 (2006 年 04 月 17 日), 近地面  $\text{PM}_{10}$  浓度分别为:  $38.1\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ 、 $320.8\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ 、 $229.2\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$  和  $197.7\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ , 对应产生的气溶胶辐射强迫分别为:  $-30\text{ W m}^{-2}$ 、 $-76\text{ W m}^{-2}$ 、 $-72\text{ W m}^{-2}$  和  $-136\text{ W m}^{-2}$ , 这也表明了气溶胶浓度越高, 产生的辐射强迫作用更大。从全球来看, 中国地区是气溶胶浓度高值区, 因此所产生的辐射强迫以及对地面气温的影响要高于美国地区。Zhang et al. (2009) 利用 WRF-Chem 模式模拟 2008 年 1 月 26~30 日的中国南方暴雪过程中黑碳气溶胶的影响, 结果表明黑碳气溶胶的沉降降低雪表面反照率, 使研究区域平均地面气温最高增加  $0.033\text{ K}$ 。然而以往的气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响

的研究多集中在对单个时间段个例的研究, 对中国东部地区气溶胶及其组分的总效应、直接效应和间接效应所产生的辐射强迫及其对温度的影响缺少全面系统的定量分析。

本文应用 WRF-Chem 模式研究中国东部地区气溶胶及其部分组分 (硫酸盐、硝酸盐和黑碳气溶胶) 在天气尺度下的辐射强迫和对地面气温的影响。通过选取了多个时间段的个例 (2006 年 08 月 23~25 日、2008 年 11 月 10~12 日、2008 年 12 月 16~18 日、2009 年 01 月 15~17 日和 2009 年 04 月 27~29 日) 进行研究, 从统计的角度进行定量分析, 并具体分析其中的一个时间段的个例 (2006 年 8 月 23~25 日) 中气溶胶及其部分组分 (硫酸盐、硝酸盐和黑碳气溶胶) 的总效应、直接效应和间接效应的辐射强迫和对地面气温的影响。本文第二部分介绍模式的设置及使用数据的来源; 第三部分简要介绍了模式试验的设计; 模式验证及模拟结果分析分别在本文的第四和第五部分给出; 第六部分为结论。

## 2 模式设置和数据

WRF (Weather Research and Forecasting model) 模式是 NCAR (National Center for Atmospheric Research) 及 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 等研究开发的中尺度数值天气预报模式及同化系统, 加入化学模块后, 对于大气化学方面的研究该模式又有了很大的发展, 并使其能够更好对于气象—大气气溶胶—辐射传输—云之间的反馈作用进行模拟 (Grell et al., 2005; Fast et al., 2006; Gustafson et al., 2007; Chapman et al., 2009)。

本文采用 WRF-Chem 3.3 版本, 该版本发布于 2011 年 4 月。模式所选的主要的物理参数化方案包括以下: 改进的 Lin et al. (1983) 微物理方案, RRTM (The Rapid Radiative Transfer Model) 长波辐射方案和 Goddard 短波辐射方案 (Mlawer et al., 1997), YSU (Yonsei University) 边界层方案 (Hong et al., 2006), NOAH (National Center for Environmental Prediction, Oregon State University, Air Force, and Hydrologic Research Lab's) 陆面模块 (Chen and Dudhia, 2001; Ek et al., 2003), Grell-Devenyi 积云参数化方案 (Grell and Dévényi, 2002)。所选的主要的化学参数化方案包括以下: 光解率采用 Fast-J 方案 (Wild et al., 2000),

气相化学反应机制采用 CBM-Z (Carbon-Bond Mechanism version Z) 方案 (Zaveri and Peters, 1999), 气溶胶模块采用 MOSIC (Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry) 方案 (Zaveri et al., 2008), MOSIC 粒径分为 8 个档 (0.039~0.078、0.078~0.156、0.156~0.3125、0.3125~0.625、0.625~1.25、1.25~2.5、2.5~5.0、5.0~10  $\mu\text{m}$ ), 液相化学反应方案采用 Fahey and Pandis (2001)。

本文中 WRF-Chem 模式模拟区域覆盖中国大部分区域, 蒙古、日本、朝鲜半岛以及亚洲中部和俄罗斯的部分地区, 中心位于北京附近, 采用 Lambert 投影, 模式水平分辨率为 60 km $\times$ 60 km。从 10 hPa 高度开始模式垂直方向分为 30 层。初始气象场和边界条件都取自于 NCEP-FNL (National Centers for Environmental Prediction-Final Analysis) 全球分析资料 (http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION\_DATA\_new/index\_16.html [2013-10-05]), 此资料时段间隔为 6 小时, 水平分辨率为 1 $^\circ\times$ 1 $^\circ$ , 使用这些资料可以使得 WRF-Chem 模式模拟出更加合理和准确的气象条件。化学模块中没有自带的排放源, 只有一些背景值, 因此在使用模式时要添加模拟需要的排放清单。本文使用 David Streets 2006 年的亚洲排放源清单 INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment-Phase B, http://mic.greenresource.cn/intex-b2006 [2013-10-08])。该源的分辨率为 0.5 $^\circ\times$ 0.5 $^\circ$ , 包含的物种有黑碳 (BC)、一氧化碳 (CO)、氮氧化物 (NO<sub>x</sub>)、有机碳 (OC)、二氧化硫 (SO<sub>2</sub>)、挥发性有机物 (VOC)。其中, VOC 包括烷烃, 烯烃, 芳香烃等 30 个物种。氨气 (NH<sub>3</sub>) 排放选用 David Streets 2000 年亚洲排放清单, 分辨率为 0.5 $^\circ\times$ 0.5 $^\circ$ 。VOC 的地表植被排放根据模拟的气象条件, 使用 Gunther 方案在线计算获得 (Guenther et al., 1993; Guenther et al., 1994), 没有加入海盐和沙尘排放。表 1 给出了中国东部和中国区域排放总量, 由表 1 可见 50% 以上排放集中在了中国东部地区。气溶胶和气体边界条件来自于 MOZART-4/GEOS-5 (Model for Ozone and Related chemical Tracers-4/Goddard Earth Observing

System-5)。

地面气温观测数据来自于中国气象局 (http://www.cma.gov.cn/ [2013-10-10]), 该数据基于中国的 751 个观测站点, 为了方便与模拟值对比分析, 将观测数据插值成与模式相同的网格, Xu et al. (2009) 对插值方法进行了说明和验证。气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 和单次散射反照率 (Single Scattering Albedo, SSA) 观测数据都来自于 AERONET (Aerosol Robotic Network, http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\_web/index.html [2013-10-12])。为了更好的定量描述气溶胶对天气影响在不同区域的特征, 本文划分两个重点区域: 中国北方区域 (29.8 $^\circ\sim$ 42.6 $^\circ\text{N}$ , 110.2 $^\circ\sim$ 120.3 $^\circ\text{E}$ ) 和中国南方区域 (22.3 $^\circ\sim$ 29.9 $^\circ\text{N}$ , 109.7 $^\circ\sim$ 120.2 $^\circ\text{E}$ ) 进行分析研究。本文中日期和时间均为北京时。

### 3 试验设计

表 2 给出了两个试验的试验设计。我们选用模式平衡一天之后的结果来进行分析。试验 1 中, 选取不同季节且无明显降水的 5 个时段进行模拟分析。每个时间段模拟均包括一个控制实验 (CTRL) 和一个无气溶胶敏感性试验 (NOAER), CTRL 减 NOAER 即可得到气溶胶对辐射和地面气温的影响。通过 CTRL 和 NOAER 试验模拟的地面气温分别与观测值对比, 分析气溶胶对模式模拟地面气温的作用。WRF-Chem 模式中气溶胶通过直接和间接效应影响天气。直接效应是将气溶胶光学厚度计入大气辐射传输模块, 影响对太阳辐射的收支计算 (Fast et al., 2006); 间接效应是气溶胶通过激活 (活化) 过程, 形成云凝结核 (Chapman et al., 2009)。因此, 设所研究气溶胶 AOD 为 0, 即关闭了其直接效应, 关闭所研究气溶胶的激活 (活化) 过程, 即关闭了其间接效应。试验 2 中, 分别模拟分析 2006 年 8 月 23~25 日期间气溶胶及其部分组分 (硫酸盐、硝酸盐和黑碳气溶胶) 的直接效应, 间接效应和总效应对辐射和地面气温的影响, 其中均分别包括一个控制试验 (CTRL) 和两个敏感性试验 (NODIR 和 NODIRIND)。CTRL 减 NODIRIND 即

表 1 中国东部和中国区域排放源年排放总量

Table 1 Annual total emissions in Eastern China and China

	BC/Tg (C) a <sup>-1</sup>	SO <sub>2</sub> /Tg (S) a <sup>-1</sup>	OC/Tg (C) a <sup>-1</sup>	NH <sub>3</sub> /Tg (N) a <sup>-1</sup>	NO <sub>x</sub> /Tg (N) a <sup>-1</sup>	CO/Tg (CO) a <sup>-1</sup>	VOC/Tg (C) a <sup>-1</sup>
中国东部 (20 $^\circ\sim$ 45 $^\circ\text{N}$ , 110 $^\circ\sim$ 120 $^\circ\text{E}$ )	1.0	8.9	1.7	6.1	3.6	99.8	14.7
中国 (20 $^\circ\sim$ 54 $^\circ\text{N}$ , 90 $^\circ\sim$ 135 $^\circ\text{E}$ )	1.9	16.4	3.6	11.7	7.0	180.8	26.6

为所研究气溶胶的总效应, CTRL 减 NODIR 即为直接效应, NODIR 减 NODIRIND 即为间接效应。

表 2 试验设计

Table 2 Experimental setup

日期	试验设计
试验 1 2006 年 08 月 23~25 日	CTRL: 包含所有气象和化学过程以及气溶胶辐射和反馈作用
2008 年 11 月 10~12 日	溶胶辐射和反馈作用
2008 年 12 月 16~18 日	NOAER: 关闭排放源进行模拟
2009 年 01 月 15~17 日	
2009 年 04 月 27~29 日	
试验 2 2006 年 08 月 23~25 日	CTRL: 包含所有气象和化学过程以及气溶胶辐射和反馈作用
	NODIR: 关闭所研究气溶胶的直接效应
	NODIRIND: 关闭所研究气溶胶的直接和间接效应

## 4 模拟性能分析

此部分选区多个时段中 2006 年 8 月 23~25 日时段, 将模式 CTRL 模拟试验的气象参数(地面 2 m 温度)、气溶胶浓度和气溶胶光学特性与观测值进行了对比分析, 从而对模式模拟性能进行了初步验证。由于本文中观测和模拟均采用的是地面 2 m 温度, 因此一致简称为地面气温。

### 4.1 地面气温验证

图 1 显示了模拟和观测的平均地面气温, 模式能较好的再现地面气温分布。气温高值区主要分布

表 3 2006 年 8 月 23~25 日模拟和观测近地面 PM<sub>2.5</sub> 及其组分浓度 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, BC, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 OC, 单位: μg m<sup>-3</sup>) 和气体浓度 (O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub>, 单位: 10<sup>-9</sup>)

Table 3 Simulated and observed concentrations of PM<sub>2.5</sub> and its components (μg m<sup>-3</sup>) and phase species gas (10<sup>-9</sup>) in the surface layer during August 23–25, 2006

	日期	榆垓		兴隆		西安		上海	
		模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测
PM <sub>2.5</sub> 质量浓度/μg m <sup>-3</sup>	23 日	55	50						
	24 日	53	50			80	120	22	9~22
	25 日	88	120						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 质量浓度/μg m <sup>-3</sup>	23 日	12	10						
	24 日	16	20			14	32		
	25 日	26	30						
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 质量浓度/μg m <sup>-3</sup>	23 日	6	5						
	24 日	20	15			26	30		
	25 日	16	13~17						
BC 质量浓度/μg m <sup>-3</sup>	23 日	7	5~8						
	24 日	7	5~8					4	3
	25 日	9	12						
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 质量浓度/μg m <sup>-3</sup>	23~25 日					14	15		
OC 质量浓度/μg m <sup>-3</sup>	23~25 日							7	3~6
O <sub>3</sub> 气体浓度/10 <sup>-9</sup>	23~25 日	70	40~80	83	60~100				
SO <sub>2</sub> 气体浓度/10 <sup>-9</sup>	23~25 日	32	15~20	15	3~5				
NO <sub>2</sub> 气体浓度/10 <sup>-9</sup>	23~25 日	28	7~40	18	5~15				

注: 榆垓、兴隆、西安和上海的观测数据分别来自于文献: Matsui et al. (2009), Wu et al. (2011), Zhang et al. (2011) 和 Hou et al. (2011)。

在中国中东部, 南方和四川盆地地区, 这些区域气温均达 25°C 以上。低值区主要分布在中国东北 (10~20°C) 以及高原地区 (0~15°C)。模式在黑龙江和华南地区模拟气温偏低 (最大差 5°C)。分析模拟驱动气象场 NCEP 数据显示, 这种模拟气温差异与驱动场误差有关。

### 4.2 气溶胶浓度验证

图 2 显示了模拟的细粒子气溶胶 PM<sub>2.5</sub>、硫酸盐 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 硝酸盐 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 和黑碳气溶胶的地表浓度分布 (北方和南方区域见图 2a 红框)。总体上, 气溶胶浓度高值位于中国东部, 显示出华北平原, 长江三角洲和四川盆地几个高值中心。这与当地经济发展快所导致的人为气溶胶及其前体物的排放总量高有关。华北地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度最高值达 70 μg m<sup>-3</sup>, 在川渝、湖南及长江中下游及地区次之, 浓度约为 30~50 μg m<sup>-3</sup>。硫酸盐气溶胶的浓度高值区位于华北和四川东部地区, 约 10~14 μg m<sup>-3</sup>, 中国中东部其余地区约为 4~10 μg m<sup>-3</sup>。硝酸盐气溶胶浓度高值位于河北南部、河南和湖北北部, 达 20~28 μg m<sup>-3</sup>, 在湖南、山东和长江下游次之约 8~20 μg m<sup>-3</sup>。黑碳气溶胶浓度最低, 主要位于河北南部和河南, 约 8~14 μg m<sup>-3</sup>, 四川地区次之, 约 4~6 μg m<sup>-3</sup>。

表 3 为模式模拟的 PM<sub>2.5</sub> 及其组分: 硫酸盐、硝酸盐、黑碳、铵盐 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 和有机碳气溶胶和臭氧

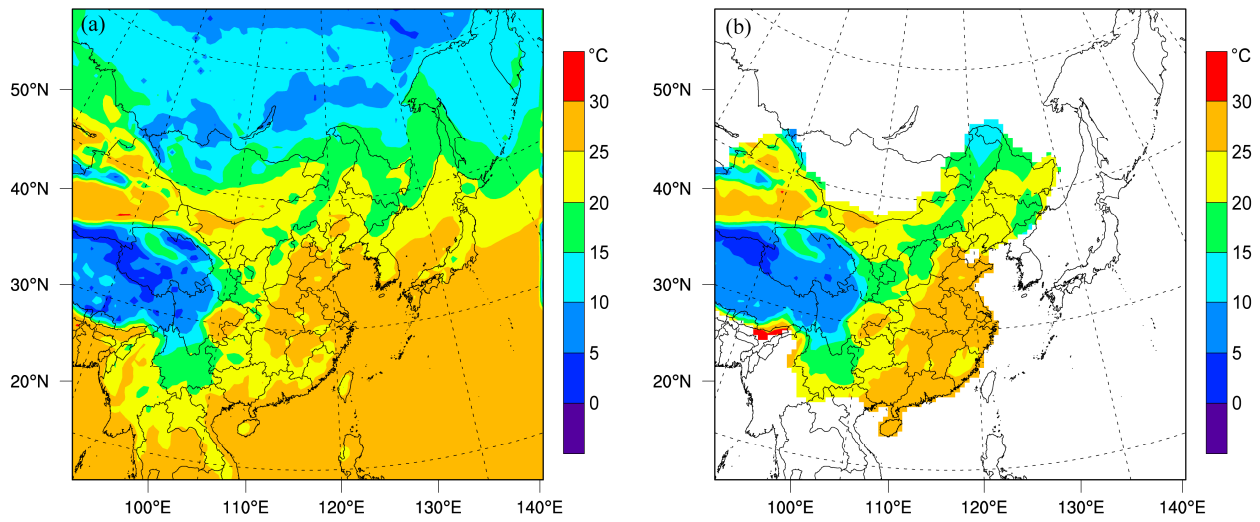


图 1 2006 年 8 月 23~25 日 (a) 模拟和 (b) 观测的平均地面气温 (单位: °C)  
Fig. 1 (a) Simulated and (b) observed surface air temperature (°C) averaged over August 23–25, 2006

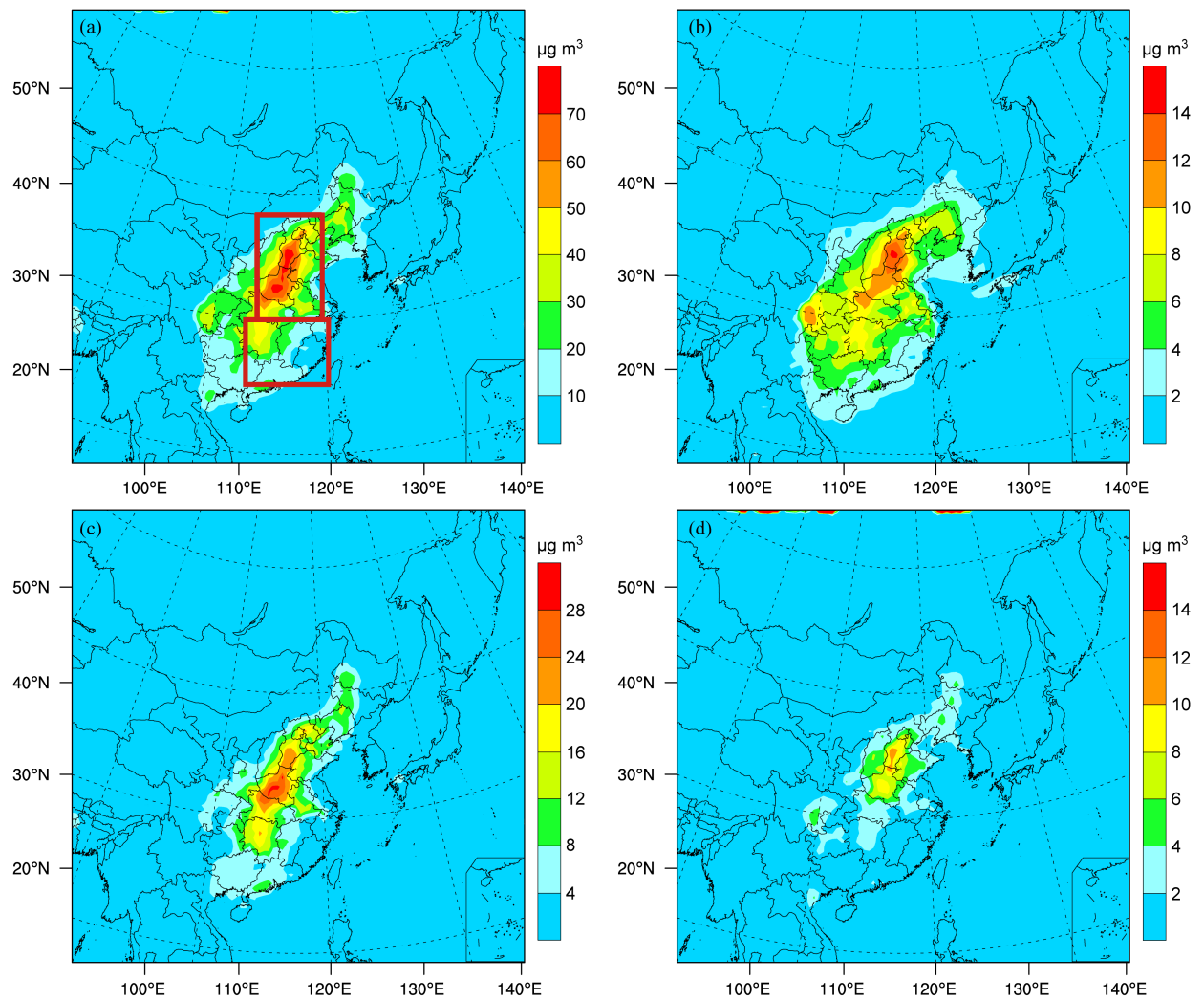


图 2 2006 年 8 月 23~25 日模式模拟的 (a)  $PM_{2.5}$ 、(b)  $SO_4^{2-}$  (硫酸盐)、(c)  $NO_3^-$  (硝酸盐) 和 (d) BC (黑碳) 平均近地面质量浓度 (单位:  $\mu g m^{-3}$ )  
Fig. 2 Simulated mass concentrations ( $\mu g m^{-3}$ ) of (a)  $PM_{2.5}$ , (b)  $SO_4^{2-}$  (sulfate aerosol), (c)  $NO_3^-$  (nitrate aerosol) and (d) BC (black carbon aerosol) in the surface layer averaged over August 23–25, 2006

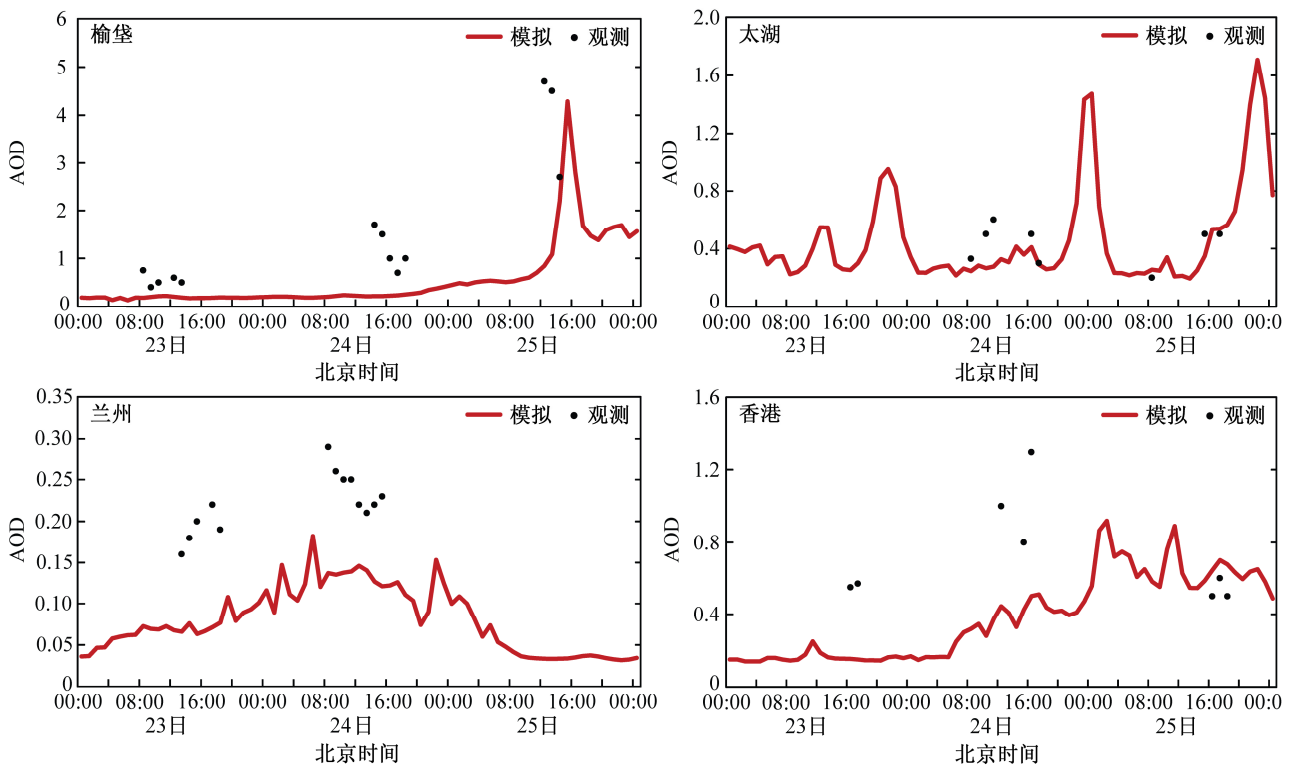


图3 2006年8月23~25日模拟(红线)和观测(黑点)的气溶胶光学厚度(AOD, 波长: 500 nm)

Fig. 3 Simulated (red lines) and observed (black dots) AOD (Aerosol Optical Depth) at wavelength of 500 nm during August 23–25, 2006

( $O_3$ ), 二氧化硫和二氧化氮( $NO_2$ )气体近地面浓度与文献搜集所获得的四个站点的观测值进行对比。四个站点分别为: 榆堡( $39^{\circ}51'N$ ,  $116^{\circ}30'E$ )、兴隆( $40^{\circ}24'N$ ,  $117^{\circ}30'E$ )、西安( $34^{\circ}15'N$ ,  $108^{\circ}56'E$ )、上海( $31^{\circ}13'N$ ,  $121^{\circ}28'E$ )。由表3可以看出, 模式模拟的 $PM_{2.5}$ 及其组分和气体浓度与观测值较为吻合, 但在西安站点模式模拟的 $PM_{2.5}$ 和硫酸盐气溶胶浓度略低于观测值, 分别低估了 $40 \mu g m^{-3}$  (33%)和 $18 \mu g m^{-3}$  (56%), 这是由于模式模拟中对西安城市地区排放量的低估所致。

#### 4.3 光学特性验证

气溶胶光学特性的验证中, 模式模拟的AOD和SSA与四个站点的观测值进行对比, 四个站点分别为: 榆堡( $39^{\circ}18'N$ ,  $116^{\circ}11'E$ )、太湖( $31^{\circ}25'N$ ,  $120^{\circ}12'E$ )、兰州( $35^{\circ}56'N$ ,  $104^{\circ}08'E$ )和香港( $22^{\circ}18'N$ ,  $114^{\circ}10'E$ )。模式模拟的AOD与观测值的对比如图3所示, 从总体上, 模式模拟的AOD在趋势和量级上与观测值有较好的吻合, 但模拟值均存在不同程度的低估, 尤其在兰州和香港这两个城市站点, 分别低估了0.15和0.4左右, 这可能由于模式模拟的分辨率较高, 模式

低估了这两个城市站点的气溶胶浓度所造成的。表4给出了模式模拟的SSA与观测值的对比, 由表4可以看出, 模式模拟的SSA略低于观测值(最大在榆堡站低估了0.21), 但总体上吻合较好。

表4 2006年8月23~25日模拟和观测的单次散射反照率(SSA, 波长: 500 nm)

Table 4 Simulated and observed SSA (Single Scattering Albedo) at wavelength of 500 nm during August 23–25, 2006

站点	时间	模拟	观测
榆堡	2006年8月24日07:00	0.74	0.95
	2006年8月24日16:00	0.75	0.93
太湖	2006年8月24日10:00	0.92	0.99
	2006年8月24日17:00	0.90	0.93
兰州	2006年8月24日08:00	0.94	0.92
	2006年8月24日09:00	0.94	0.90
	2006年8月25日08:00	0.77	0.87
	2006年8月25日09:00	0.74	0.83
	2006年8月25日11:00	0.73	0.80
	2006年8月25日16:00	0.75	0.87
香港	2006年8月25日17:00	0.76	0.77
	2006年8月25日18:00	0.76	0.80
	2006年8月23日16:00	0.89	0.91
	2006年8月23日17:00	0.89	0.93

## 5 模拟结果

### 5.1 气溶胶对模式模拟地面气温的影响

试验 1 中五个不同时间段模式模拟的区域平均  $PM_{2.5}$  近地面质量浓度和对地面气温的影响如图 4 所示, 在此我们选用北方区域和南方区域进行对照分析。由图 4 中可见,  $PM_{2.5}$  近地面浓度在南北区域均有明显的日变化特征。气溶胶浓度在夜间由于大气对流运动减弱逐渐累积, 早上 06:00~08:00 达到最高, 随着日出后太阳辐射逐渐增强, 空气对流活动加强, 有利于气溶胶扩散, 气溶胶浓度逐渐降低, 下午 17:00 左右达到最低。五个时段中, 北方区域的气溶胶浓度明显高于南方区域,  $PM_{2.5}$  近地

面浓度的高值在北方区域约为  $40\sim 80\ \mu\text{g m}^{-3}$ , 在南方区域约为  $30\sim 47\ \mu\text{g m}^{-3}$ , 最高值 ( $80\ \mu\text{g m}^{-3}$ ) 出现在 2009 年冬季的模拟中 (图 4d), 这是由于冬季大气对流运动较弱造成的。

在五个时段的模拟中, 气溶胶均对地面气温有明显的降温效果 (个别时间的轻微增温是由黑碳气溶胶的加热作用所致), 并且存在明显的日变化。由于夜间没有太阳辐射, 气溶胶对夜间气温影响较小, 其影响主要集中在白天。气溶胶对地面气温影响的第一个高值出现在早上 08:00 左右, 虽然此时太阳辐射并未达到最高, 但由于对应气溶胶浓度日变化最高值, 因此降温较为明显。此后, 随着气溶胶浓度的降低, 对地面气温的影响逐渐减小, 直至

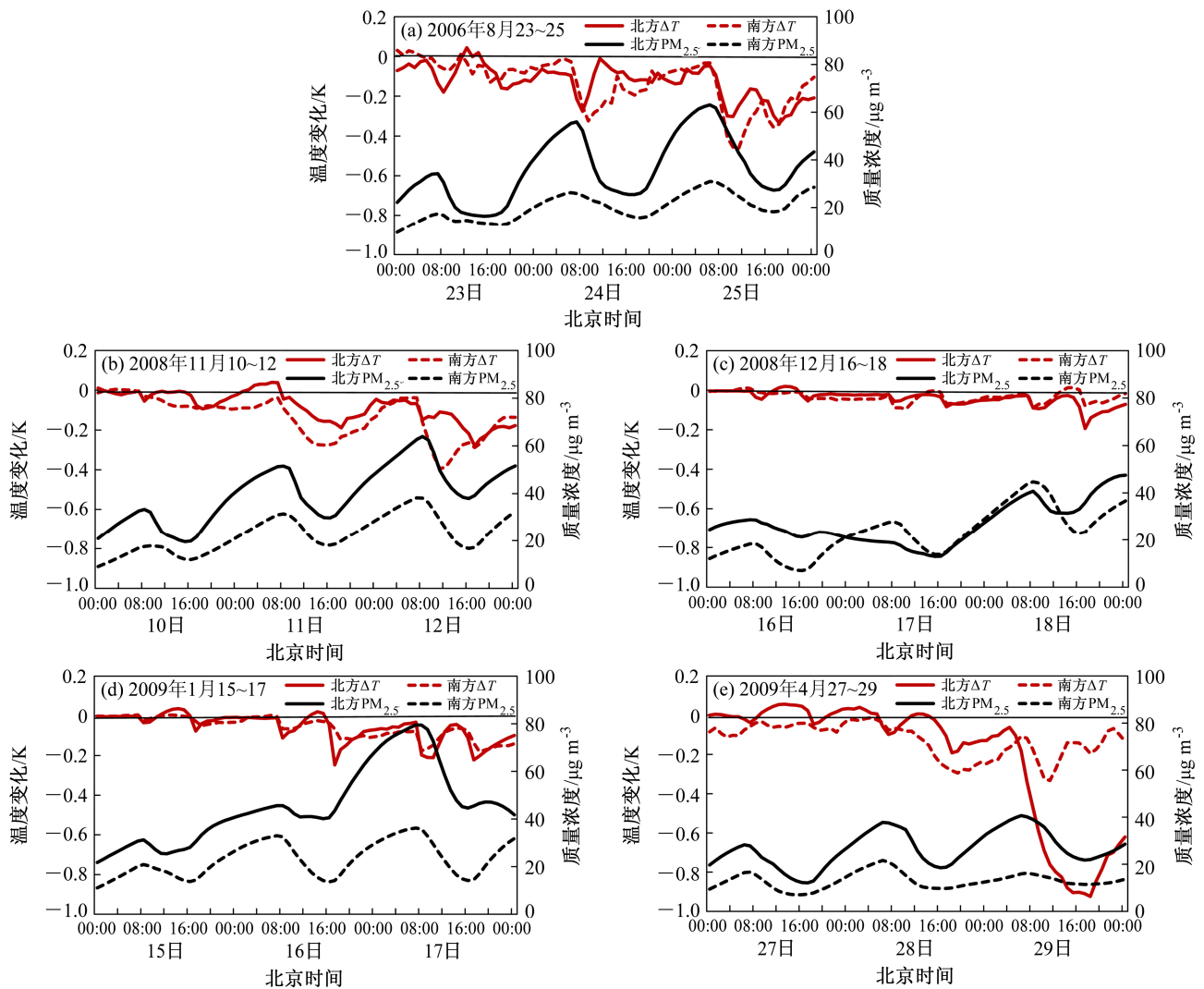


图 4 模式模拟的北方 (实线) 和南方 (虚线) 区域平均  $PM_{2.5}$  近地面质量浓度 (右坐标轴, 黑线, 单位:  $\mu\text{g m}^{-3}$ ) 和对地面气温的影响 (左坐标轴, 红线, 单位: K)

Fig. 4 Simulated surface layer mass concentrations of  $PM_{2.5}$  (right axis, black lines,  $\mu\text{g m}^{-3}$ ) in the surface layer averaged over North China (solid lines) and South China (dashed lines) and the aerosol impacts on surface air temperature (left axis, red lines, K)



正午 12:00 左右,随着太阳辐射达到最高,气溶胶降温作用再次增强,并在 16:00~18:00 左右达到另一个峰值。五个时段的模拟结果中,气溶胶最高可使地面气温降低约 0.2~1 K,降温效果最强为 2009 年春季的模拟,气溶胶使北方区域平均降温最高将近 1 K (图 4e),虽然此时段的气溶胶近地面浓度不是最高,但是可能由于此时段中间接效应起到了很强烈的作用,导致降温剧烈。本文模拟得到的气溶胶的冷却作用比 Zhang (2008) 应用 WRF-Chem 模式了德克萨斯州地区 2000 年 8 月的 5 天中,气溶胶使近地面气温降低作用(最高 0.18 K)更大,这可能的原因在于中国地区气溶胶浓度远高于美国地区( $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度仅为  $20 \mu\text{g m}^{-3}$ ),因此其冷却效果更加显著。

表 5 统计了北方和南方区域模式模拟的有气溶胶 (CTRL) 和无气溶胶 (NOAER) 的地面气温与观测值的平均绝对误差和均方根误差(标准误差)。由表 5 可见,在有气溶胶的地面气温的平均绝对误差和均方根误差均小于无气溶胶,因此在有气溶胶的情况下模拟的地面气温更接近于实际观测,气溶胶的参与改善了模式对地面气温的模拟。

表 5 北方(南方)区域模式模拟的有气溶胶 (CTRL) 和无气溶胶 (NOAER) 的地面气温与观测值的平均绝对误差(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和均方根误差(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Table 5 Mean absolute error and root mean square error between simulated (with aerosols and without aerosols) and observed surface air temperature in North China and South China

	平均绝对误差/ $^{\circ}\text{C}$		均方根误差/ $^{\circ}\text{C}$	
	CTRL	NOAER	CTRL	NOAER
2006 年 08 月 23~25 日	1.52 (0.94)	1.63 (0.95)	1.80 (1.23)	1.82 (1.35)
2008 年 11 月 10~12 日	2.19 (1.27)	2.24 (1.29)	2.65 (1.56)	2.69 (1.58)
2008 年 12 月 16~18 日	1.28 (1.33)	1.31 (1.35)	1.64 (1.78)	1.67 (1.80)
2009 年 01 月 15~17 日	2.11 (1.67)	2.17 (1.73)	2.56 (2.06)	2.61 (2.11)
2009 年 04 月 27~29 日	1.51 (1.63)	1.68 (1.72)	1.85 (2.02)	2.03 (2.14)

注: 括号为南方区域。平均绝对误差:  $E = 1/N \sum_{n=1}^N |f_n - r_n|$ , 均方根误差:  $E' = [1/N \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2]^{1/2}$ ,  $N$  为网格数量,  $n$  为网格,  $f_n$  为  $n$  网格的模拟值,  $r_n$  为  $n$  网格的观测值 (Talor, 2001)。

## 5.2 气溶胶及其部分组分的辐射强迫和对地面气温的影响

依据试验 2 的模拟结果,此部分定量分析 2006

年 8 月 23~25 日期间气溶胶及其部分组分( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和 BC) 的总效应、直接效应和间接效应分别对到达地面短波辐射和地面气温的影响。

图 5 给出了北方和南方区域平均  $\text{PM}_{2.5}$  及其部分组分( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和 BC) 近地面质量浓度日变化特征。整体上看,北方区域  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  和 BC 的近地面质量浓度均大于南方区域。但北方区域和南方区域  $\text{PM}_{2.5}$  浓度均呈现出明显的日变化特征,在早上 07 时左右达到最高值,北方区域和南方区域  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分别约为  $51 \mu\text{g m}^{-3}$  和  $25 \mu\text{g m}^{-3}$ ; 在傍晚 17 时左右浓度达到最低,分别约为  $23 \mu\text{g m}^{-3}$  和  $16 \mu\text{g m}^{-3}$ 。硫酸盐气溶胶主要通过  $\text{SO}_2$  氧化生成,但其浓度没有明显的日变化特征,北方区域和南方区域浓度最高值均分别约为  $8 \mu\text{g m}^{-3}$  和  $5 \mu\text{g m}^{-3}$ 。而硝酸盐气溶胶浓度具有明显的夜间高,白天低的趋势,北方区域和南方区域硝酸盐气溶胶浓度均在早上 07 时左右达到最高值,分别约为  $16 \mu\text{g m}^{-3}$  和  $8 \mu\text{g m}^{-3}$ , 此后呈不断下降趋势,在傍晚 18 时左右达到最低值,分别约为  $5 \mu\text{g m}^{-3}$  和  $4 \mu\text{g m}^{-3}$ 。本文中模拟得到的硝酸盐气溶胶浓度日变化特征与 Morin et al. (2011) 的研究结果相一致,  $\text{HNO}_3$  气体与硝酸盐气溶胶间的气粒转化对温度及其敏感,当温度较低时主要以硝酸盐存在,而温度较高时主要以气态  $\text{HNO}_3$  形式存在,因此硝酸盐气溶胶浓度呈现出白天低夜晚高的日变化特征。黑碳气溶胶的浓度亦呈现出在早上 7 时出现峰值随后逐渐减小至下午 16~18 时达到低值的日变化特征,这一日变化特征在北方地区尤为显著。这是由于夜间对流活动较弱,气溶胶易于累积,在早间 07 时左右黑碳气溶胶浓度达到最高值,北方和南方区域黑碳气溶胶浓度分别约为:  $6 \mu\text{g m}^{-3}$  和  $2 \mu\text{g m}^{-3}$ , 之后随着太阳辐射的增加,对流运动的加强,浓度逐渐减小,在下午达到最低值,北方和南方区域黑碳气溶胶浓度分别约为:  $2 \mu\text{g m}^{-3}$  和  $1 \mu\text{g m}^{-3}$ 。本文模拟黑碳气溶胶浓度的日变化特点与李杨等 (2005) 和蔡子颖等 (2011) 结果较为一致。

图 6 给出了气溶胶及其部分组分( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和 BC) 的地面短波辐射强迫以及对地面气温的影响的区域平均值。总体上,气溶胶及硫酸盐和硝酸盐气溶胶能够吸收和散射太阳辐射,并能够形成云凝结核,增加云的光学厚度和云层反射率,因此气溶胶的直接与间接效应均降低了到达地面的短波辐射,导致地面气温降低。从区域上看,北方区域

平均气溶胶直接效应所造成的负的短波辐射强迫作用 ( $-11.3 \text{ W m}^{-2}$ ) 要高于南方区域 ( $-5.8 \text{ W m}^{-2}$ ) (图 6a、b), 引起北方和南方地区地面气温分别降低了  $0.074 \text{ K}$  和  $0.039 \text{ K}$  (图 6c、d), 这主要是由于北方区域气溶胶浓度高于南方区域所致 (图 5)。但是由于南方区域相对湿度高 ( $80\% \sim 90\%$ , 图略), 能够促进气溶胶的激活, 从而有利于云凝结核的形成和增长 (Jia and Guo, 2012)。南方区域气溶胶间接效应所产的的短波辐射强迫高于北方区域, 分别

为  $-14.4 \text{ W m}^{-2}$  和  $-12.4 \text{ W m}^{-2}$ , 引起的地面气温的改变分别为  $-0.094 \text{ K}$  和  $-0.035 \text{ K}$ 。

对于硫酸盐气溶胶而言, 其在南方区域的直接效应和间接效应的辐射强迫和对地面气温的影响略高于北方区域。这主要的原因在于南方区域的具有更强的太阳辐射和湿度。硫酸盐气溶胶在北方和南方区域的短波辐射强迫分别为  $-7.0 \text{ W m}^{-2}$  和  $-10.5 \text{ W m}^{-2}$  (直接和间接效应之和), 对地面气温的影响分别为  $-0.062 \text{ K}$  和  $-0.074 \text{ K}$ 。其中硫酸盐

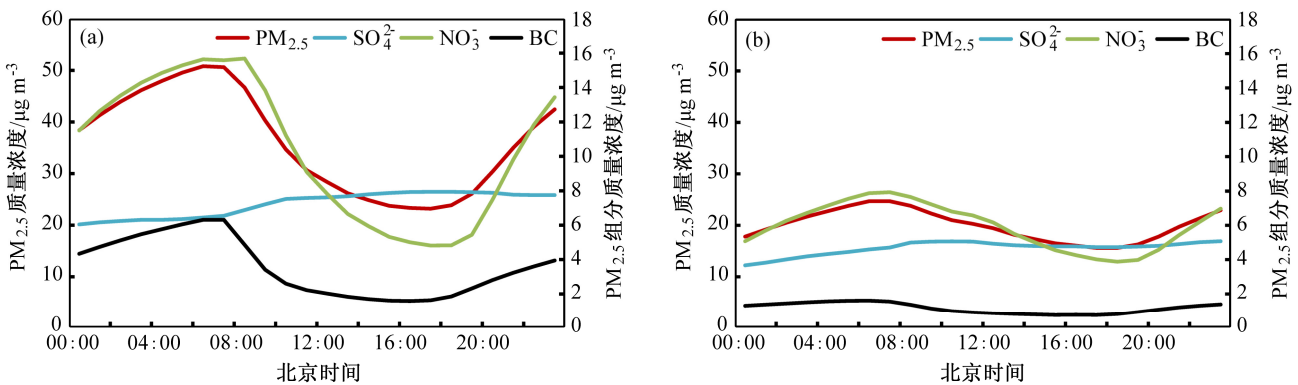


图 5 2006 年 8 月 23~25 日模式模拟的 (a) 北方和 (b) 南方区域平均 PM<sub>2.5</sub> (左坐标轴) 及其部分组分 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 BC, 右坐标轴) 近地面质量浓度 (单位: μg m<sup>-3</sup>) 的日变化

Fig. 5 Simulated diurnal variation of surface layer mass concentrations (μg m<sup>-3</sup>) of PM<sub>2.5</sub> (left axis) and some components (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and BC, right axis) averaged over (a) North China and (b) South China during August 23–25, 2006

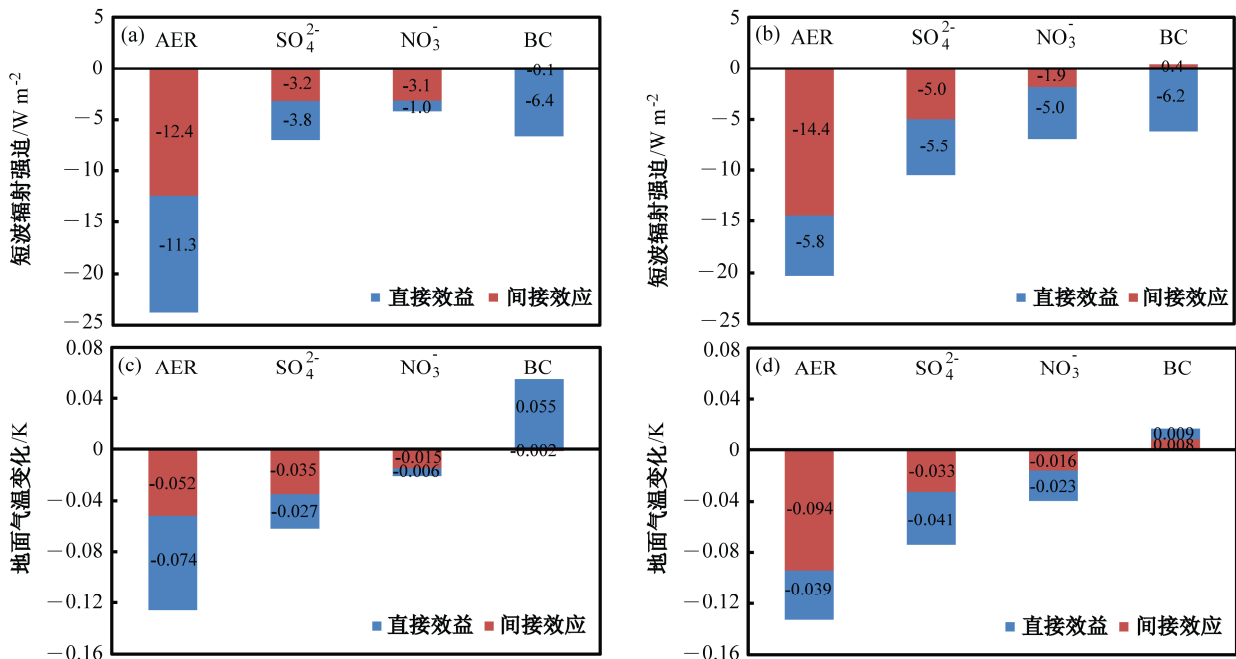


图 6 2006 年 8 月 23~25 日北方 (左列) 和南方 (右列) 区域平均气溶胶 (AER) 及其部分组分 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 BC) (a、b) 地面短波辐射强迫以及对 (c、d) 地面气温的影响

Fig. 6 (a, b) Average shortwave radiative forcing of aerosols (AER) and some components (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and BC) in the surface layer and their impacts on (c, d) surface air temperature in (a, c) North China and (b, d) South China during August 23–25, 2006

气溶胶的直接效应和间接效应的作用相当。相比于 Giorgi et al. (2002) 应用 RegCM 模式模拟 1993~1997 年间中国四川盆地人为硫酸盐气溶胶使地面气温降低 0.1~0.7 K, 本文模拟数值略小, 可能是由于本文计算的辐射强迫和地面气温变化为区域平均值, 包括了部分气溶胶低值区域, 而四川盆地是硫酸盐气溶胶高值区 (图 2b), 因而其对地表气温的影响更强。

硝酸盐气溶胶的短波辐射强迫以及对地面气温的影响略小于硫酸盐气溶胶, 北方和南方区域平均地面短波辐射分别减少  $4.1 \text{ W m}^{-2}$  和  $6.9 \text{ W m}^{-2}$ , 因而使得地面气温亦分别减少 0.021 K 和 0.039 K, 略低于 Li et al. (2009) 利用模式研究得到的 2003 年 7 月中国地区人为硝酸盐气溶胶对地面气温的影响 ( $-0.09 \text{ K}$ )。从区域来看, 北方区域的硝酸盐气溶胶的直接效应的作用小于间接效应, 换言之, 即硝酸盐气溶胶引起的北方区域地面气温的降低主要是由硝酸盐气溶胶的间接效应所致。而南方区域则是相反, 即由硝酸盐的直接效应起主要作用。这可能是由于虽然南方区域硝酸盐气溶胶浓度小于北方区域, 但是南方区域相对湿度大 (AOD 高), 且有更强的太阳辐射, 因此其直接效应更加显著。北方和南方区域均有一定的云量 (图略), 虽然南方区域相对湿度很高, 有利于硝酸盐气溶胶的激活形成云凝结核, 但是其云量的增加 (0.004) 没有北方区域 (0.03) 多, 其间接效应相对较弱。

与硫酸盐和硝酸盐气溶胶 (散射型气溶胶) 不同, 黑碳气溶胶作为重要的吸收性气溶胶, 能够强烈地吸收太阳辐射, 从而加热大气, 因此其直接效应虽然同样减少了到达地表的短波辐射, 但是地面气温却增加了; 黑碳气溶胶间接辐射强迫很小并且有正有负, 具有很强的不确定性, 这主要是由于云的反馈过程比较复杂造成的 (Ackerman et al., 2000; Kristjánsson, 2002; Highwood and Kinnersley, 2006; Bond et al., 2013)。由图 6 可见, 黑碳气溶胶使得北方和南方区域平均到达地表的太阳短波辐射分别减少了  $6.5 \text{ W m}^{-2}$  和  $5.8 \text{ W m}^{-2}$ , 而地表气温则分别增加了 0.053 K 和 0.017 K。虽然在南方区域黑碳气溶胶浓度低, 但黑碳气溶胶的消光系数 ( $12.5 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ , 波长: 550 nm) 要强于硫酸盐气溶胶 ( $4.18 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ , 波长: 550 nm), 并且其吸收性很强 (Liao et al., 2004), 所以黑碳气溶胶在南方的辐射强迫的要高于硫酸盐气溶胶。

此模拟的地面气温变化与 Wang (2004) 应用 CCM3 模式研究发现黑碳气溶胶 20 年全球平均直接效应增加地面气温  $0.09 \pm 0.07 \text{ K}$  较为相近。

图 7 进一步展示了两个研究区域平均气溶胶及其部分组分 ( $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和 BC) 总效应、直接效应和间接效应的地面短波辐射强迫及其对地面气温的影响的日变化结果。整体上看, 气溶胶对到达地面短波辐射的影响与对地面气温的影响有很好的对应关系。

由图 7a、d、g、j 可见, 气溶胶总效应导致的地面短波辐射强迫分别在上午 08~10 时左右和下午 16~18 时左右呈现出最大值, 约为  $-43 \sim -39 \text{ W m}^{-2}$ 。气溶胶的直接和间接效应均对上午 08~10 时左右辐射强迫峰值有贡献。上午 08~10 时左右气溶胶浓度高 (图 5), 并且此时太阳天顶角大, 因此造成了很强的直接辐射强迫。如 Liao and Seinfeld (1998) 指出, 散射性气溶胶 (硫酸盐) 辐射强迫随太阳天顶角增加而增加。由于此时南方区域的云量的增加达到了峰值 (图未给), 所以此时的间接辐射强迫也非常显著。下午 16~18 时左右虽然太阳天顶角大, 但是气溶胶浓度低, 因此直接效应较弱, 此时辐射强迫峰值主要受间接效应影响, 在下午 16~18 时左右北方区域云量的增加达到峰值, 南方区域 (峰值相对较小) 云量在此阶段也在不断上升。

受到辐射强迫高值影响, 地面气温在这 2 个时刻下降幅度最大, 约为  $-0.27 \sim -0.21 \text{ K}$ 。其中, 硫酸盐气溶胶总效应对短波辐射的影响在中午 12 时和下午 16 时左右分别达到最高约为  $-28$  (南方区域)  $\sim -25 \text{ W m}^{-2}$  (北方区域), 对地面气温的影响最大为在  $-0.13 \text{ K}$  (南方区域)。总体而言, 硝酸盐气溶胶对短波辐射和气温的影响比硫酸盐气溶胶小, 这是由硝酸盐气溶胶浓度白天低夜间高的日变化特征所决定的。硝酸盐气溶胶对短波辐射和地面气温的影响在南方区域更加显著, 最大分别为  $-33 \text{ W m}^{-2}$  和  $-0.09 \text{ K}$  (14:00 左右)。受太阳辐射强度的影响, 黑碳气溶胶对短波辐射的影响最大值出现在南方区域, 约为  $-38 \text{ W m}^{-2}$ , 高于北方区域的  $-17 \text{ W m}^{-2}$ , 其升温作用明显, 北方和南方区域均在中午 14 时左右达到最高, 分别为 0.21 K 和 0.13 K。

北方区域气溶胶直接效应导致的地面短波辐射强迫在上午 09 时左右达到最高值:  $-32 \text{ W m}^{-2}$ , 从而使地面气温降低 0.2 K, 而随着黑碳气溶胶强

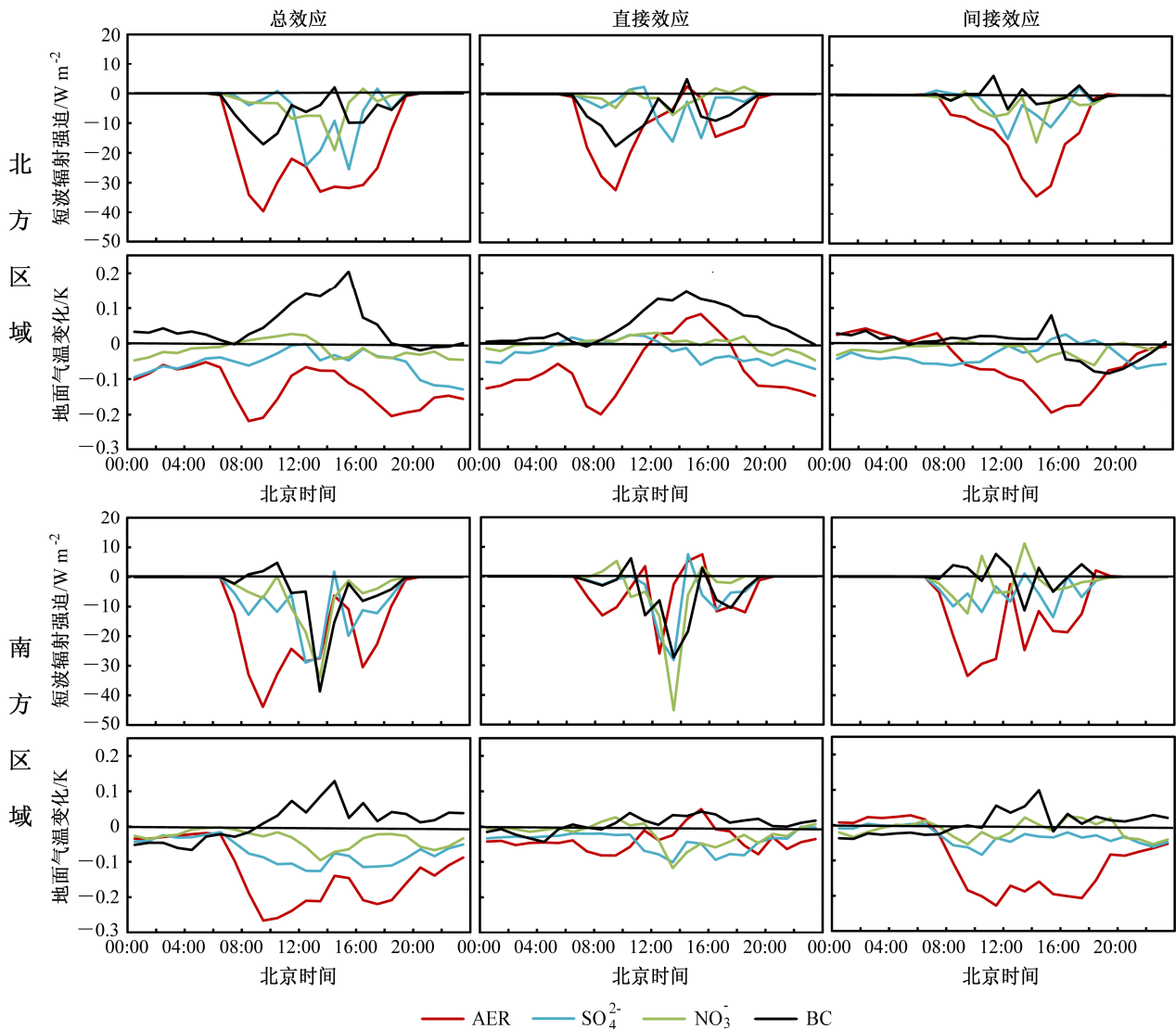


图7 2006年8月23~25日模式模拟的北方和南方区域平均气溶胶(AER)及其部分组分(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和BC)总效应、直接效应和间接效应的地面短波辐射强迫(单位: W m<sup>-2</sup>)及其对地面气温的影响的日变化(单位: K)

Fig. 7 Simulated diurnal variations of shortwave radiative ( $W m^{-2}$ ) forcing by the total, direct, and indirect effect of the aerosols (AER) and some components (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and BC) in the surface layer and their impacts on surface air temperature (K) averaged over North China and South China during August 23–25, 2006

烈的加热作用, 15 时前后气温上升, 最高升温 0.08 K。南方区域气溶胶直接效应导致的辐射强迫和降温最大为  $-26 W m^{-2}$  和  $-0.08 K$ , 同样受黑碳气溶胶增温的影响, 午后出现增温 (最高 0.05 K)。硫酸盐和硝酸盐气溶胶的直接效应对辐射和气温影响的日变化比较类似, 均在中午时段显现高值。其中, 南方区域硝酸盐的直接效应的辐射强迫最为明显, 在 14 时达到最高值  $-45 W m^{-2}$ , 相对应的使气温降低 0.12 K。黑碳气溶胶的直接效应对短波辐射的影响十分显著, 在北方和南方区域短波辐射强迫最高分别约为  $-18 W m^{-2}$  和  $-27 W m^{-2}$ , 地面气温

在 14 时左右升高最为明显, 分别为 0.15 K 和 0.04 K (图 7b、e、h、k)。

北方区域气溶胶间接效应导致的地面短波辐射强迫在午后达到最高值  $-33 W m^{-2}$ , 其贡献主要来自于硫酸盐和硝酸盐气溶胶, 与之相对应, 使地面气温降低 0.19 K。而在南方区域, 气溶胶间接效应对短波辐射和地面气温的影响均表现为双峰型, 高值分别在上午 10~11 时左右和下午 16~17 时左右, 约为:  $-33 W m^{-2}$  和  $-0.23 K$ 。硫酸盐和硝酸盐气溶胶的间接效应对辐射和地表气温的影响并没有很明显的日变化特征, 但总体上是负强迫和降

温的效果。硫酸盐气溶胶间接效应在北方区域的短波辐射强迫约 $-15\sim 3\text{ W m}^{-2}$ ，对地面气温的影响为 $-0.07\sim 0.02\text{ K}$ ；在南方区域的短波辐射强迫约 $-13\sim 1\text{ W m}^{-2}$ ，对地面气温的影响为 $-0.08\sim 0\text{ K}$ 。硝酸盐气溶胶间接效应的短波辐射强迫和对地表气温的影响在北方区域更加显著，最高分别为 $-16\text{ W m}^{-2}$ 和 $-0.06\text{ K}$ 。相比于直接效应的影响，黑碳气溶胶间接效应对地面短波辐射和气温的影响要小很多，并且其间接效应具有很强的不确定性，有待进一步研究（图 7c、f、i、l）。

## 5 结论

本文应用 WRF-Chem 模式研究中国东部地区气溶胶及其部分组分（ $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 BC）在天气尺度下的辐射强迫和对地面气温的影响，主要结论如下：

模式能够较好地模拟中国东部地区的地面气温，气溶胶及其部分组分（ $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 BC）的分布。通过不同季节且无明显降水的 5 个时间段的模拟研究气溶胶对地面气温的影响，结果显示，北方区域平均  $\text{PM}_{2.5}$  近地面浓度（ $40\sim 80\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ ）高于南方（ $30\sim 47\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ ），并且均体现出白天低夜间高的日变化特征。气溶胶对地面气温有明显的降温效果，在早上 08 时和下午 17 时左右最为显著，最高可降低约  $0.2\sim 1\text{ K}$ 。模拟的地表气温与观测数据的对比显示，有气溶胶的情况下模拟的地面气温更接近于实际观测。

本文定量分析了 2006 年 8 月 23~25 日期间气溶胶及其部分组分（ $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 BC）的总效应，直接效应和间接效应分别对到达地面短波辐射和地面气温的影响。北方区域平均气溶胶直接效应所造成的负的短波辐射强迫作用（ $-11.3\text{ W m}^{-2}$ ）要高于南方区域（ $-5.8\text{ W m}^{-2}$ ），引起北方和南方地区地面气温分别降低了  $0.074\text{ K}$  和  $0.039\text{ K}$ ，其中最高值分别约  $-32\text{ W m}^{-2}$  和  $0.2\text{ K}$ （上午 09 时）。南方区域平均气溶胶间接效应所产的的短波辐射强迫高于北方区域，分别为  $-14.4\text{ W m}^{-2}$  和  $-12.4\text{ W m}^{-2}$ ，引起的地面气温的改变分别为  $-0.094\text{ K}$  和  $-0.035\text{ K}$ ，其中最高值分别约  $-33\text{ W m}^{-2}$  和  $-0.23\text{ K}$ 。

对气溶胶组分（ $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 BC）的研究中显示，硫酸盐和硝酸盐气溶胶做为散射型气溶胶能够散射和反射太阳辐射，并且形成云凝结核，增加云量，减少到达地面的太阳辐射，使地面气温降低。

硫酸盐气溶胶的直接效应和间接效应的作用相当，其总效应在北方和南方区域平均的短波辐射强迫分别为  $-7.0\text{ W m}^{-2}$  和  $-10.5\text{ W m}^{-2}$ ，对地面气温的影响分别为  $-0.062\text{ K}$  和  $-0.074\text{ K}$ 。硝酸盐气溶胶的短波辐射强迫以及对地面气温的影响略小于硫酸盐气溶胶，北方和南方区域平均的地面短波辐射分别减少  $4.1\text{ W m}^{-2}$  和  $6.9\text{ W m}^{-2}$ ，因而使得地面气温亦分别减少  $0.021\text{ K}$  和  $0.039\text{ K}$ 。硫酸盐和硝酸盐气溶胶的直接效应对辐射和气温影响的日变化比较类似，均在中午时段显现高值，但它们的间接效应并没有很明显的日变化特征，但总体上也是负强迫和降温的效果。其中，南方区域硝酸盐的直接效应的辐射强迫最为明显，在 14 时达到最高值  $-45\text{ W m}^{-2}$ ，相对应的使气温降低  $0.12\text{ K}$ 。黑碳气溶胶使得北方和南方区域平均到达地表的太阳短波辐射分别减少了  $6.5\text{ W m}^{-2}$  和  $5.8\text{ W m}^{-2}$ ，而地表气温则分别增加了  $0.053\text{ K}$  和  $0.017\text{ K}$ 。黑碳气溶胶能够吸收太阳辐射，并放出红外辐射，从而加热大气，相比于间接效应，黑碳气溶胶的直接效应对短波辐射和气温的影响更加显著，在北方和南方区域短波辐射强迫最高分别约为  $-18\text{ W m}^{-2}$  和  $-27\text{ W m}^{-2}$ ，增温作用在 14 时左右最为明显，分别为  $0.15\text{ K}$  和  $0.04\text{ K}$ 。

## 参考文献 (References)

- Ackerman A S, Toon O B, Stevens D E, et al. 2000. Reduction of tropical cloudiness by soot [J]. *Science*, 288 (5468): 1042-1047.
- Bond T, Doherty S, Fahey D, et al. 2013. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (11): 5380-5552.
- 蔡子颖, 韩素芹, 黄鹤, 等. 2011. 天津夏季黑碳气溶胶及其吸收特性的观测研究 [J]. *中国环境科学*, 31 (5): 719-723. Cai Ziyang, Han Suqin, Huang He, et al. 2011. Observational study on black carbon aerosols and their absorption properties in summer in Tianjin [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 31 (5): 719-723.
- Chapman E G, Gustafson W I, Easter R C, et al. 2009. Coupling aerosol-cloud-radiative processes in the WRF-Chem model: Investigating the radiative impact of elevated point sources [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9 (3): 945-964.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (4): 569-585.
- Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D22), doi:10.1029/2002JD003296.

- Fahey K M, Pandis S N. 2001. Optimizing model performance: Variable size resolution in cloud chemistry modeling [J]. *Atmos. Environ.*, 35 (26): 4471–4478.
- Fast J D, Gustafson W I Jr, Easter R C, et al. 2006. Evolution of ozone, particulates, and aerosol direct radiative forcing in the vicinity of Houston using a fully coupled meteorology-chemistry-aerosol model [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D21), doi:10.1029/2005JD006721.
- Giorgi F, Bi X Q, Qian Y. 2002. Direct radiative forcing and regional climatic effects of anthropogenic aerosols over East Asia: A regional coupled climate-chemistry/aerosol model study [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D20), doi:10.1029/2001JD001066.
- Grell G A, Dévényi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (14): 38-1–38-4.
- Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al. 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model [J]. *Atmos. Environ.*, 39 (37): 6957–6975.
- Guenther A, Zimmerman P, Wildermuth M. 1994. Natural volatile organic compound emission rate estimates for US woodland landscapes [J]. *Atmos. Environ.*, 28 (6): 1197–1210.
- Guenther A B, Zimmerman P R, Harley P C, et al. 1993. Isoprene and monoterpene emission rate variability-model evaluations and sensitivity analyses [J]. *J. Geophys. Res.-Atmospheres*, 98 (D7): 12609–12617.
- Gustafson W I, Chapman E G, Ghan S J, et al. 2007. Impact on modeled cloud characteristics due to simplified treatment of uniform cloud condensation nuclei during NEAQS 2004 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (19), doi:10.1029/2007GL030021.
- Highwood E J, Kinnersley R P. 2006. When smoke gets in our eyes: The multiple impacts of atmospheric black carbon on climate, air quality and health [J]. *Environ. Inter.*, 32 (4): 560–566.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (9): 2318–2341.
- Hou B, Zhuang G S, Zhang R, et al. 2011. The implication of carbonaceous aerosol to the formation of haze: Revealed from the characteristics and sources of OC/EC over a mega-city in China [J]. *J. Hazard. Mater.*, 190 (1–3): 529–536.
- IPCC. 2007. *The Physical Science Basis of Climate Change: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing* [M]. New York: Cambridge University Press.
- Jacobson M Z. 2001. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 409 (6821): 695–697.
- Jia X C, Guo X L. 2012. Impacts of secondary aerosols on a persistent fog event in northern China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5 (5): 401–407.
- Kristjánsson J E. 2002. Studies of the aerosol indirect effect from sulfate and black carbon aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D15), doi:10.1029/2001JD000887.
- Li S, Wang T J, Zhuang B L, et al. 2009. Indirect radiative forcing and climatic effect of the anthropogenic nitrate aerosol on regional climate of China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (3): 543–552.
- 李杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 2005. 2003 年秋季西安大气中黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析 [J]. *气候与环境研究*, 10 (2): 229–237. Li Yang, Cao Junji, Zhang Xiaoye, et al. 2005. The variability and source apportionment of black carbon aerosol in Xi'an atmosphere during the autumn of 2003 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10(2): 229–237.
- Liao H, Seinfeld J H. 1998. Effect of clouds on direct aerosol radiative forcing of climate [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D4): 3781–3788.
- Liao H, Seinfeld J H, Adams P J, et al. 2004. Global radiative forcing of coupled tropospheric ozone and aerosols in a unified general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D24), doi:10.1029/2003JD004456.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22 (6): 1065–1092.
- Matsui H, Koike M, Kondo Y, et al. 2009. Spatial and temporal variations of aerosols around Beijing in summer 2006: Model evaluation and source apportionment [J]. *J. Geophys. Res.*, 114, doi:10.1029/2008JD010906.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-*k* model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res.*, 102 (D14): 16663–16682.
- Morin S, Sander R, Savarino J. 2011. Simulation of the diurnal variations of the oxygen isotope anomaly ( $\Delta^{17}\text{O}$ ) of reactive atmospheric species [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (8): 3653–3671.
- Pérez C, Nickovic S, Pejanovic G, et al. 2006. Interactive dust-radiation modeling: A step to improve weather forecasts [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D16), doi:10.1029/2005JD006717.
- Rodwell M J, Jung T. 2008. Understanding the local and global impacts of model physics changes: An aerosol example [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134 (635): 1479–1497.
- Takemura T, Nozawa T, Emori S, et al. 2005. Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 110 (D2), doi:10.1029/2004JD005029.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D7): 7183–7192.
- Wang C E. 2004. A modeling study on the climate impacts of black carbon aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D3), doi:10.1029/2003JD004084.
- Wang Y, Che H Z, Ma J Z, et al. 2009. Aerosol radiative forcing under clear, hazy, foggy, and dusty weather conditions over Beijing, China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36, doi:10.1029/2009GL037181.
- Wild O, Zhu X, Prather M J. 2000. Fast-j: Accurate simulation of in- and below-cloud photolysis in tropospheric chemical models [J]. *J. Atmos. Chem.*, 37 (3): 245–282.
- Wu Q Z, Wang Z F, Gbaguidi A, et al. 2011. A numerical study of contributions to air pollution in Beijing during CAREBeijing-2006 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (12): 5997–6011.
- 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.
- Zaveri R A, Peters L K. 1999. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D23): 30387–30415.
- Zaveri R A, Easter R C, Fast J D, et al. 2008. Model for simulating aerosol interactions and chemistry (MOSAIC) [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D13), doi:10.1029/2007JD008782.
- Zhang T, Cao J J, Tie X X, et al. 2011. Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in Xi'an, China: Seasonal variations and sources [J].

- Atmos. Res., 102 (1-2): 110-119.
- Zhang Y. 2008. Online-coupled meteorology and chemistry models: History, current status, and outlook [J]. Atmos. Chem. Phys., 8 (11): 2895-2932.
- Zhang Y, Liao H, Zhu K F, et al. 2009. Role of black carbon-induced changes in snow albedo in predictions of temperature and precipitation during a snowstorm [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 2 (4): 230-236.
- Zhang Y, Wen X Y, Jang C J. 2010a. Simulating chemistry-aerosol-cloud-radiation-climate feedbacks over the continental U. S. using the online-coupled Weather Research Forecasting Model with chemistry (WRF/Chem) [J]. Atmos. Environ., 44 (29): 3568-3582.
- Zhang Y, Pan Y, Wang K, et al. 2010b. WRF/Chem-MADRID: Incorporation of an aerosol module into WRF/Chem and its initial application to the TexAQS2000 episode [J]. J. Geophys. Res., 115 (D18), doi:10.1029/2009JD013443.