

人为气溶胶对中国东部冬季风影响的模拟研究

王东东 朱彬* 江志红 廖宏 陈海山

南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室 江苏 南京 210044

* 联系人 E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

2016-05-25 收稿 2016-12-31 接受

国家重点研发计划项目(2016YFA0602003); 国家自然科学基金资助项目(91544229; 41575148); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2010CB428505)

摘要 采用美国国家大气研究中心(NCAR)的公共大气模式CAM5.1研究了人为气溶胶排放增加对中国东部冬季风的影响,同时通过对比中国东部地区不同人为气溶胶排放源的敏感性试验结果,探讨了人为硫酸盐、黑碳及总人为气溶胶(硫酸盐+黑碳)增加对东亚冬季风的影响。结果表明:冬季硫酸盐气溶胶排放增加的直接和第一间接效应减少了到达地表的短波辐射通量,引起了陆地地表和对流层低层降温,海平面气压升高,增加了海陆间气压梯度,使得东亚冬季风增强。其第二间接效应导致中国南部大尺度降水率减少;黑碳气溶胶排放增加导致到达地表的短波辐射通量减少和大气中短波辐射通量增加,其半直接效应部分抵消了直接效应,故地表温度变化微小且不显著。加热的对流层低层导致中国南部对流活动和对流降水率增加;总人为气溶胶排放增加导致的大气温度变化表现为弱的降温作用,引起中国北部对流和大尺度降水率减少,而南部对流降水率增加。总人为气溶胶和黑碳气溶胶排放增加是导致中国北(南)部的东亚冬季风增强(减弱)的重要因素。

关键词

人为硫酸盐气溶胶;
人为黑碳气溶胶;
直接效应;
间接效应;
东亚冬季风

随着城市化进程的加快,社会工业化程度加深,人类活动对气候的影响越来越大。大量的二氧化硫(SO₂)和黑碳气溶胶排放到大气中,造成东亚地区严重的污染(Guo et al., 2013; 王东东等, 2014)。东亚地区人为气溶胶主要包括硫酸盐和黑碳气溶胶(Guo et al., 2013)¹⁵²⁴,其气候效应可分为直接、间接和半直接效应。大气中的SO₂经过一系列的氧化反应生成硫酸盐气溶胶,作为典型的人为散射性气溶胶,硫酸盐气溶胶可以直接对入射短波辐射进行散射和反射,减少到达地表的短波辐射,使大气和地表降温(Xu 2001; Gu et al., 2006; Liu et al., 2009)。硫酸盐气溶胶还可以通过作为云滴的凝结核改变云的光学特性和生命期,间接地影响地—气系统能量收支和水循环,进而影响全球或区域气候(吴润等, 2002; 王体健等, 2010; 吴蓬萍和韩志伟, 2011; Jiang

et al., 2013, 2015)。黑碳气溶胶作为典型的人为吸收性气溶胶,对入射短波辐射进行吸收,在减少到达地表的短波辐射的同时,增加了大气中的短波辐射通量,导致大气增温和地表降温(Ramanathan et al., 2001; Lau et al., 2006; 宿兴涛和王汉杰, 2009; 张华和王志立, 2009; 黄文彦等, 2015)。黑碳气溶胶对大气的增温还会造成云量蒸发,通过半直接效应影响气候(Ackerman et al., 2000)。

中国地处东亚地区,该地区是世界最大季风区,区域气候受季风影响巨大。目前越来越多的研究关注气溶胶与东亚季风之间的相互作用(Liao et al., 2015)。一方面,气溶胶的时空分布在很大程度上受到东亚季风气候的影响(Zhang et al., 2010; Zhu et al., 2012; 刘芷君等, 2015);另一方面,气溶胶对东亚季风也有较大的影响(Menon et al., 2002; Giorgi et

引用格式: 王东东 朱彬 江志红 等 2017.人为气溶胶对中国东部冬季风影响的模拟研究[J].大气科学学报 40(4): 541-552.

Wang D D, Zhu B, Jiang Z H et al. 2017. A modeling study of effects of anthropogenic aerosol on East Asian winter monsoon over eastern China[J]. Trans Atmos Sci, 40(4): 541-552. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160525001. (in Chinese).

al. 2002, 2003; Gu et al. 2006; Huang et al. 2007; Liu et al. 2009; Han et al. 2011; Zhang et al. 2012; Wu et al. 2013; Wang et al. 2015)。当前大部分研究集中于气溶胶与东亚夏季风之间的关系,而气溶胶与东亚冬季风之间的关系仍需要进一步的研究。东亚冬季风系统是北半球冬季最活跃的环境系统,对东亚地区冬季气候异常起着重要作用(贺圣平和王会军 2012)。东亚冬季风风力较夏季风强,冬季风带来的气流寒冷干燥,影响我国北方大部分地区,是我国冬季南北温差大的主要原因之一。Liu et al. (2009) 使用公共大气环流模式 CAM3.0 研究表明硫酸盐和黑碳气溶胶都导致了东亚地区地表降温,同时中上对流层增温,海平面气压下降,减弱了东亚冬季风。黄伟等(2013)利用区域气候模式 RegCM4.0 研究表明,人为气溶胶引起陆地地表降温,增加了低层海陆温差,导致低层海陆气压差加大,增强了东亚热带和副热带冬季风,并导致中国南方东部地区冬季降水减少。邓洁淳等(2014)使用 CAM5.1 发现东亚人为气溶胶(硫酸盐和黑碳)分别和共同的影响都使东亚地区冬季近地面层温度普遍降低、对流层中高层明显增温,海平面气压下降,东亚冬季风减弱。

人为气溶胶对气候的影响还存在着较大的不确定性,目前学界关于气溶胶对冬季气候的影响研究还较少,有关气溶胶间接效应的影响研究就更罕见。因此,本文利用美国国家大气研究中心(NCAR)开发的第五代公共大气环流模式(The Community Atmosphere Model Version 5.1, CAM5.1),模拟研究东亚地区局地人为气溶胶排放源改变导致的气溶胶直接、间接和半直接效应对中国东部冬季气候的影响。

1 模式简介及试验设计

公共大气模式 CAM5.1 是 NCAR 开发的公用地球系统模式(CESM1.0.3)的大气部分(Neale et al., 2010)。CAM5.1 模式中包含了气溶胶模块(MAM3, Liu et al., 2012)、对流层化学机制(MOZART)、辐射机制(RRTMG, Iacono et al., 2008)和云相关的微观和宏观机制(Morrison and Gettelman, 2008; Gettelman et al., 2010)。气溶胶机制采用的是将气溶胶划分为埃根模态(Aitken)、积聚模态(accumulation)和巨模态(coarse)的三模态模块(MAM3)。每个模态下计算不同气溶胶种类的质量和数量混合比,不同气溶胶种类在每个模态中假设

为内部混合,而在不同模态间为外部混合。每种模态的光学特性和吸湿性是该模态下所有气溶胶物种的混合计算结果(Ghan and Zaveri, 2007)。拥有这些机制的 CAM5.1 可以模拟出气溶胶的直接、半直接和间接效应(Ghan et al., 2012)。同时,模式还考虑了气溶胶与大气间的相互作用(Jiang et al., 2013, 2015; 邓洁淳等, 2014)。人为排放源(即工业、住宅和农业排放)资料来自 Lamarque et al. (2010) 的 IPCC AR5 的排放源资料。

与 Jiang et al. (2015) 相同,本文使用大气模式比较计划(Atmospheric Model Intercomparison Project, AMIP)类型的试验方案,方案使用气候态海温和海冰资料来研究大气—陆地对气溶胶强迫的“快速”响应(Ganguly et al., 2012)。在本研究中,重点讨论我国东部地区人为硫酸盐(简称硫酸盐,下同)、人为黑碳(简称黑碳,下同)和总人为气溶胶(人为硫酸盐和黑碳共同效应,简称总气溶胶,下同)对东亚冬季气候的影响。为此,本文设计了四组试验(表1),每组试验中仅改变气溶胶及其前体物的人为排放源。控制试验(EXP0)中使用所有现代(Present-Day, PD, 2000年)气溶胶及其前体物的排放源;敏感性试验中则将中国东部地区(100~125°E, 20~45°N)的气溶胶及其前体物的排放源替换为工业革命以前(Pre-Industrial, PI, 1850年)的排放源,区域外为 PD 排放源(图1)。控制试验(EXP0)与其他三组敏感性试验的差值分别代表着人为气溶胶(总气溶胶、硫酸盐和黑碳)变化对东亚季风的影响。选取了辐射、温度、风场和降水等物理量,分别表示气溶胶的辐射效应及其导致的气候效应的变化。

表1 数值试验设计和区域人为气溶胶排放源设置

Table 1 Modeling design and associated regional anthropogenic aerosol emissions in each experiment

试验/代码	中国东部地区 (100~125°E, 20~45°N)		区域外 硫酸盐和黑碳
	硫酸盐	黑碳	
	控制试验/EXP0	2000年	2000年
总气溶胶试验/EXP1	1850年	1850年	2000年
硫酸盐气溶胶试验/EXP2	1850年	2000年	2000年
黑碳气溶胶试验/EXP3	2000年	1850年	2000年

模式采用有线差分动力框架,水平分辨率为 1.9°×2.5°,垂直分层 30 层,采用 $\sigma-p$ 混合坐标,模拟过程所采用的时间步长为 30 min。模式模拟现

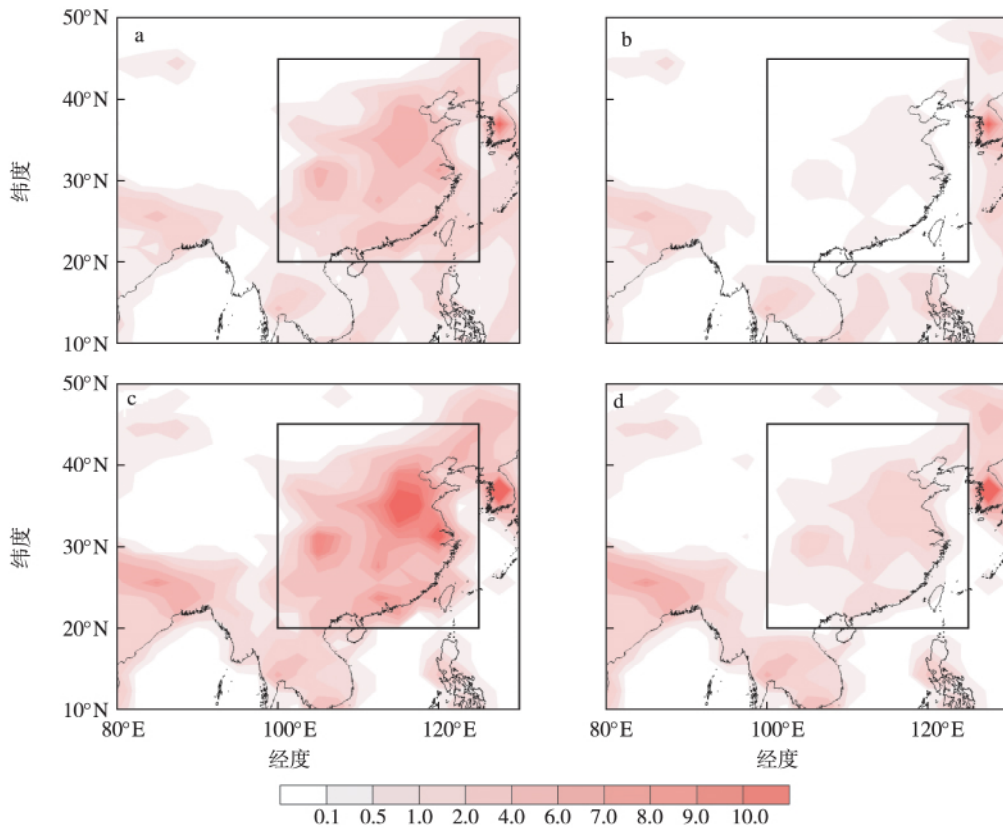


图1 东亚地区硫酸盐(a、b; 包括硫酸盐和二氧化硫, 单位: $10^{10} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$) 和黑碳(c、d; 单位: $10^{10} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$) 气溶胶排放源 a、c. 控制试验; b、d. 敏感性试验

Fig.1 Annual mean aerosol emissions of (a, b) sulfate (including sulfate and SO_2 ; units: $10^{10} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$) and (c, d) black carbon (units: $10^{10} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$) in East Asia: (a, c) control experiment; (b, d) sensitivity experiments

代气候态 31 a, 第 1 年为模式稳定时间, 取后 30 a 结果平均值进行分析。另外文中还使用 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996) 对比检验模式结果。

2 结果与分析

2.1 模式检验

为了验证 CAM5.1 模式的模拟能力, 将模式控制试验结果与 NCEP/NCAR 再分析资料 1980—2009 年冬季平均气候场进行对比。从对流层低层到高层, CAM5.1 模拟的低空东亚偏北风气流、东亚向南越赤道气流、澳大利亚低压、500 hPa 东亚大槽、北半球高空副热带高压的西部脊、200 hPa 高空东亚西风急流和向北越赤道气流等季风系统成员都与 NCEP/NCAR 再分析资料是一致的 (图略)。另外, 已有很多研究与卫星和观测数据对比验证了 CAM5.1 模式模拟的气溶胶的柱浓度和光学厚度的情况 (Liu et al., 2012; 李鑫和刘煜, 2013), 总之

CAM5.1 模式可以较好地模拟出东亚地区人为气溶胶的浓度和分布状况。

2.2 人为气溶胶对冬季气溶胶光学厚度和辐射平衡变化的影响

图 2 给出了人为气溶胶的增加对冬季 550 nm 波长气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD)、晴空条件下地表、大气中 (从地表到大气顶) 和大气顶净短波辐射通量影响的沿 $105 \sim 122.5^\circ \text{E}$ 的平均剖面。如图所示, 总气溶胶的增加导致冬季平均中国东部季风区 (定义为 $105 \sim 122.5^\circ \text{E}$, $20 \sim 45^\circ \text{N}$) 的 550 nm 波长的 AOD 增加 0.04, 最大增加 (0.06) 出现在季风区南部 (定义为 $20 \sim 32.5^\circ \text{N}$), 北部 (定义为 $32.5 \sim 45^\circ \text{N}$) 增加 0.03。总气溶胶在冬季呈现出“南高北低”的分布特征, 导致这种特征的原因是冬季盛行低层以偏北风为主的东亚冬季风具有输送作用和较弱的湿沉降作用。中国东部季风区的 AOD 增加主要是硫酸盐气溶胶增加的贡献 (图 2b), 黑碳气溶胶的贡献很小 (图 2c)。黑碳气溶胶

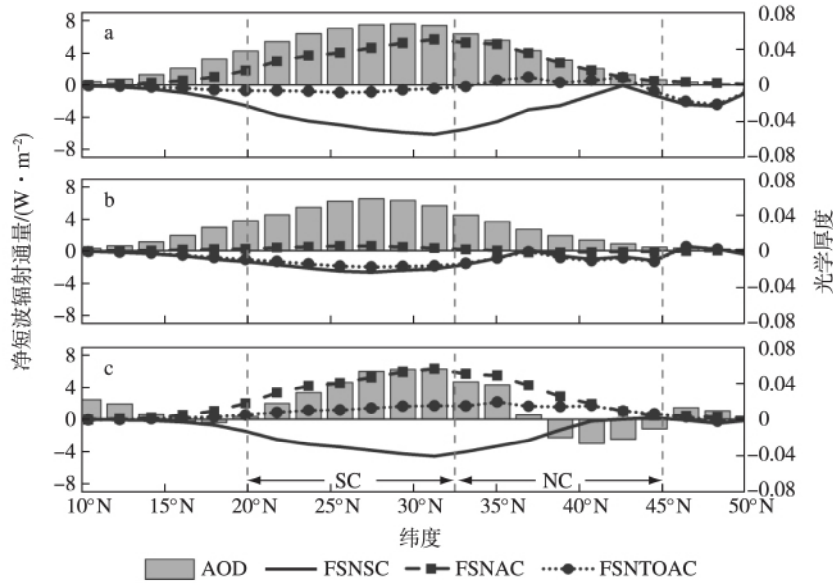


图2 人为气溶胶对冬季 550 nm 波长光学厚度 (AOD; 柱状)、晴空条件下地表 (FSNSC; 实线)、大气中 (FSNAC; 带方块虚线) 和大气顶 (FSNTOAC; 带圆点虚线) 净短波辐射通量的影响沿 105~122.5°E 的平均变化 (左纵坐标为净短波辐射通量, 单位: W/m^2 ; 右纵坐标为 AOD)
a. 总气溶胶; b. 硫酸盐气溶胶; c. 黑碳气溶胶

Fig.2 Changes of aerosol optical depth at 550 nm wavelength (AOD; bars), clear-sky net shortwave radiation flux at surface (FSNSC; solid line), net shortwave radiation flux in atmosphere (FSNAC; dashed line with squares) and net shortwave radiation flux at TOA (FSNTOAC; dotted line with circles) averaged over 105—122.5°E in winter, which are influenced by anthropogenic aerosols (The left y-axis is net shortwave radiation flux with the unit of $W \cdot m^{-2}$ and the right y-axis is AOD): (a) total anthropogenic aerosols; (b) sulfate aerosols; (c) BC aerosols

在约 37.5°N 以北地区还存在很小的负 AOD 变化 (水平分布图上不显著, 图略), 这主要是由黑碳气溶胶增加所引起的环流变化所导致, 改变的环流引起了其他气溶胶 AOD 减少, 与 Jiang et al. (2013) 的结果一致。

总气溶胶的增加导致中国东部季风区晴空条件下的向下地表净短波辐射通量减少了 $3.75 W/m^2$ (图 2a), 与增加的 AOD 的分布一致, 南部减少 $5.10 W/m^2$, 北部减少 $2.59 W/m^2$ 。虽然黑碳气溶胶的对总 AOD 的贡献很小 (图 2b、2c), 但导致的晴空地表净短波辐射通量的减少和硫酸盐气溶胶有着相同的量级。这是因为黑碳气溶胶的辐射效率要远大于硫酸盐气溶胶的辐射效率 (约高一个量级) (Schulz et al., 2006)。与地表净短波辐射通量不同, 晴空条件下人为气溶胶的增加在大气中对短波辐射通量的影响主要表现为气溶胶的吸收作用。总气溶胶的增加导致中国东部季风区大气中短波辐射通量增加 $3.60 W/m^2$ (图 2a), 主要来自黑碳气溶胶吸收作用的贡献 (图 2c)。黑碳气溶胶的吸收作用略弱于总气溶胶 (图 2a 与 2c 相比), 这是因为黑碳

气溶胶在现代 (图 2a) 比在工业革命前 (图 2c) 与更多的硫酸盐气溶胶发生内部混合, 从而吸收性增强 (Jiang et al., 2015)。总气溶胶的增加导致季风区南部晴空条件下大气顶净短波辐射通量减少 ($0.72 W/m^2$), 主要贡献来自硫酸盐气溶胶; 而北部增加 ($0.34 W/m^2$), 来自黑碳气溶胶的贡献 (与图 2c 的大气吸收相一致)。硫酸盐气溶胶的散射作用和黑碳气溶胶的吸收作用部分抵消 (图 2a)。硫酸盐和黑碳气溶胶的直接效应导致了大气顶净短波辐射通量的改变, 这意味着进入到冬季风系统的陆地短波辐射通量的变化, 这可能会导致冬季地表温度的改变并进一步影响海陆之间的热力差异, 进而影响东亚冬季风系统的强弱 (将在 2.5 节讨论)。

2.3 人为气溶胶对冬季大气温度和加热率的影响

图 3 给出了人为气溶胶对冬季地表温度和地表加热项影响的沿 105~122.5°E 的平均剖面。通常情况下, 地表加热项包括全天空条件下地表净短波辐射强迫、地表净长波辐射强迫、地表感热通量和地表潜热通量。总气溶胶的增加导致中国东部大部分地区降温 (图 3a), 区域平均降温 $0.24 K$ 。地表温度

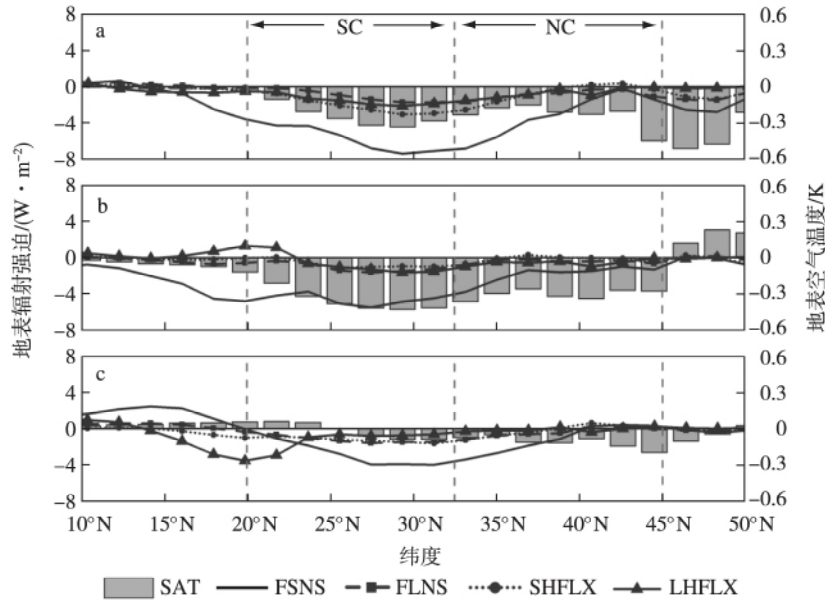


图3 人为气溶胶对冬季地表空气温度(SAT,柱状;单位:K)、全天空条件下地表净短波辐射强迫(FSNS,实线;单位: W/m^2)、地表净长波辐射强迫(FLNS,带方块虚线;单位: W/m^2)、地表感热通量(SHFLX,带圆点虚线;单位: W/m^2)和地表潜热通量(LHFLX,带三角实线;单位: W/m^2)的影响沿 $105\sim 122.5^\circ E$ 平均变化 a.总气溶胶;b.硫酸盐气溶胶;c.黑碳气溶胶

Fig.3 Changes of surface air temperature(SAT, bars; units: K), all-sky net shortwave flux at surface(FSNS, solid line; units: $W \cdot m^{-2}$), net longwave flux at surface(FLNS; dashed line with squares; units: $W \cdot m^{-2}$), surface sensible heat flux(SHFLX, dotted line with circles; units: $W \cdot m^{-2}$) and surface latent heat flux(LHFLX, solid line with triangles; units: $W \cdot m^{-2}$) averaged over $105\sim 122.5^\circ E$ in winter, which are influenced by anthropogenic aerosols; (a) total anthropogenic aerosols; (b) sulfate aerosols; (c) BC aerosols

的降低来自于人为气溶胶增加导致全天空条件下到达地表的净短波、净长波辐射强迫、地表感热与潜热通量全部减少。地表加热项的这种变化分布与气溶胶光学厚度的分布相一致(图2a)。其中,全天空条件下净短波辐射强迫的减少为最主要贡献,减少值大于其他项,主要来自硫酸盐和黑碳气溶胶的直接效应和硫酸盐气溶胶的间接效应的影响(详见2.4节)。全天空条件下地表净长波辐射强迫和潜热通量的减少相对较弱。硫酸盐气溶胶的增加导致中国东部季风区地表显著降温($0.33 K$,图3b),而黑碳气溶胶的增加引起的地表降温较小($0.07 K$)且在南部略增(图3c),但不显著(水平分布图略)。增加的人为气溶胶主要集中在东部季风区陆地上,相邻海洋上空浓度很低。并且由于海洋的热容量远远大于陆地,其对海洋表面温度的影响很小,且主要通过环流变化引起(图略)

图4 人为气溶胶对冬季中国东部大气垂直温度的影响沿 $105\sim 122.5^\circ E$ 经度平均的高度—纬度剖面。总气溶胶的增加导致中国东部季风区约300

hPa以下高度的大部分大气降温(图4a),但不显著;300 hPa以上高度增温。总气溶胶的增加导致了陆地上空近地层和对流层降温,增强了海陆热力差异。增加的硫酸盐气溶胶对约300 hPa以下对流层温度的降低贡献最大(图4b)。相比之下,黑碳气溶胶引起的低层大气温度变化较小,中上层 $30^\circ N$ 以南增温,以北降温(图4c)。综上,硫酸盐气溶胶的增加导致了东部季风区近地层和对流层大气降温,增强了海陆热力差异;黑碳气溶胶的增加导致南部地表和对流层升温和北部的降温,可能导致海陆热力差异在南部减弱而在北部增强。硫酸盐气溶胶的降温和黑碳气溶胶的增温作用部分相互抵消,导致了总气溶胶的降温作用不显著(图4a)。

冬季人为气溶胶的增加导致的东部季风区陆地上空的大气非绝热加热项变化以短波加热率和垂直扩散加热率的变化为主,湿过程的凝结加热率和长波加热率变化相对较小(图略),但是大气的非绝热加热项并不能完全解释地表和对流层温度的变化,需要从环流变化的角度作进一步的分析。

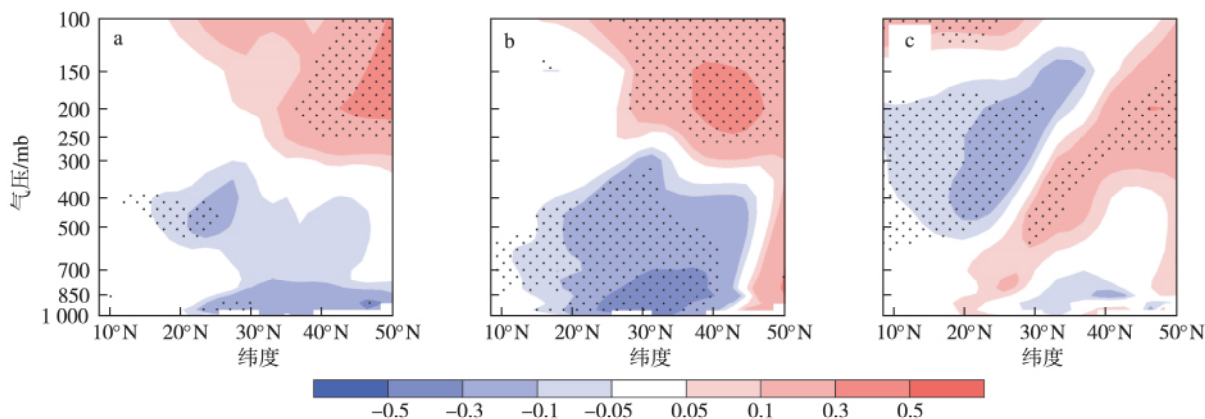


图4 人为气溶胶对冬季大气垂直温度(单位: K)的影响沿 105~122.5°E 经度平均的高度—纬度剖面(散点区表示通过 0.1 信度的显著性检验) a.总气溶胶;b.硫酸盐气溶胶;c.黑碳气溶胶

Fig.4 Latitude-altitude sections of atmospheric vertical temperature change(units: K) averaged over 105—122.5°E in winter, which are influenced by anthropogenic aerosols(The dotted signs denote where the change is statistically significant at 90% confidence level): (a) total anthropogenic aerosols; (b) sulfate aerosols; (c) BC aerosols

2.4 人为气溶胶对冬季云特性和降水的影响

图5给出了冬季人为气溶胶的增加对垂直积分云滴数和云水路径、低云量和云短波辐射通量的影响沿 105~122.5°E 的平均剖面。冬季总气溶胶的

增加导致中国东部季风区云滴数浓度增加显著,主要集中于南部($35.67 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$),北部较小($12.17 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$) (图5a)。其中,硫酸盐气溶胶为主要贡献(图5b),而黑碳气溶胶的贡献很小(图5c)。这

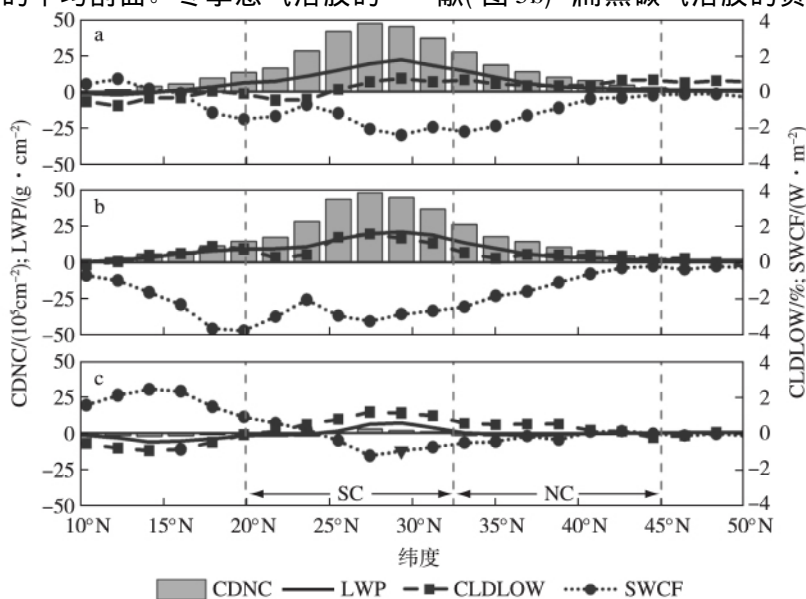


图5 人为气溶胶对冬季垂直积分云滴数(CDNC,柱状;单位: 10^5 cm^{-2})、云水路径(LWP,实线;单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)、低云量(CLDLOW,带方块虚线;单位: %)和云短波辐射通量(SWCF,带圆点虚线;单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)的影响沿 105~122.5°E 平均变化 a.总气溶胶;b.硫酸盐气溶胶;c.黑碳气溶胶

Fig.5 Changes of cloud droplet number concentration(CDNC ,bars; units: 10^5 cm^{-2}), cloud liquid water path(LWP ,solid line; units: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), low cloud amount(CLDLow , dashed line with squares; units: %) and shortwave cloud forcing(SWCF ,dotted line with circles; units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) averaged over 105—122.5°E in winter, which are influenced by anthropogenic aerosols: (a) total anthropogenic aerosols; (b) sulfate aerosols; (c) BC aerosols

是因为黑碳气溶胶相比于硫酸盐气溶胶浓度低,并且黑碳气溶胶在模式中排放的粒径很小、吸湿性很低,因此黑碳气溶胶通过影响云微物理过程的间接效应很弱(Ghan et al., 2012)。冬季总气溶胶的增加导致中国东部垂直积分云水路径增加 10.26 g/cm^2 (图 5a), 同样也主要来自硫酸盐气溶胶的贡献(图 5b)。硫酸盐气溶胶的增加导致了云滴数浓度增加, 这减慢了云水向雨水的转换过程, 进而改变云水路径(即气溶胶的第二间接效应)。黑碳气溶胶的增加导致的云水路径变化较小(图 5c), 且并不显著(水平分布图略)。硫酸盐气溶胶导致的云滴数浓度($23.16 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$)和云水路径增加(10.31 g/cm^2)都要略微高于总气溶胶的效应, 这个结果可能源自总气溶胶中黑碳的半直接效应对大气的加热结果。另外, 总气溶胶中硫酸盐和黑碳气溶胶之间更强的内部混合也会导致加热, 从而抑制成核。而硫酸盐气溶胶导致的更多的云滴数浓度更大程度地减慢了云水向雨水的转换过程(即第二间接效应), 导致了更多云水路径的增加。

总气溶胶和硫酸盐气溶胶的增加导致了更小的云滴和更多的云水路径, 增加了云的光学厚度(第一间接效应)和反照率。总气溶胶的增加导致中国东部季风区平均低云量增加(0.35%)和云短波辐射强迫的显著增加(更大负值, 1.27 W/m^2) (图 5a)。硫酸盐气溶胶导致的低云量增加和云短波辐射

强迫(图 5b)比总气溶胶更大, 且范围更广(水平分布图略)。黑碳气溶胶同样导致了低云量增加(0.52%)和云短波辐射强迫的微弱增加(0.31 W/m^2) (图 5c), 但增加的云量主要是通过环流的变化所导致的, 而不是通过气溶胶的间接效应。增加的云短波辐射强迫的变化也较小, 主要是由于黑碳气溶胶对云光学厚度的影响很小(图略)。

由图 6 可见, 总气溶胶的增加导致中国东部季风区大部分地区总降水率减少, 但在南部 110°E 以东沿海附近总降水率增加(图 6a); 硫酸盐气溶胶的增加导致总降水率显著减少(图 6b); 黑碳气溶胶导致总降水率增加, 且在南部增加显著(图 6c)。另外, 表 2 给出了人为气溶胶对冬季地表总降水率、对流降水率、大尺度降水率、海平面气压和 925 hPa 经向风的影响。结合表 2 进一步分析发现, 总气溶胶的增加导致的冬季季风区北部总降水的减少来自对流和大尺度降水率减少的共同贡献。南部总降水率的增加则主要来自对流降水率的增加; 硫酸盐气溶胶的增加导致北部对流降水率减少。南部总降水率减少主要来自大尺度降水率减少的贡献, 对流降水率则为负贡献; 黑碳气溶胶的增加对总降水的影响主要来自对流降水率的贡献。大尺度降水率变化与气溶胶对云的生命期的影响有关, 主要由硫酸盐气溶胶第二间接效应导致, 而对流降水率的变化则主要与大气的对流运动和水汽输送的变化相关。

表 2 冬季总气溶胶、硫酸盐和黑碳气溶胶对中国东部季风区域的地表总降水率、对流降水率、大尺度降水率和 925 hPa 经向风的影响

Table 2 Changes of total surface precipitation rate, convective precipitation rate, large-scale precipitation rate and 925 hPa meridional wind over monsoon region in eastern China due to total anthropogenic aerosols, sulfate aerosols and BC aerosols in winter

季风区域	总降水率/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	对流降水率/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	大尺度降水率/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	925 hPa 经向风/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
中国东部季风区($105 \sim 122.5^\circ\text{E}$, $20 \sim 45^\circ\text{N}$)	-0.03 ¹⁾	0.02 ¹⁾	-0.05 ¹⁾	-0.01 ¹⁾
	-0.05 ²⁾	-0.02 ²⁾	-0.03 ²⁾	-0.09 ²⁾
	0.04 ³⁾	0.04 ³⁾	0.01 ³⁾	0.03 ³⁾
季风区南部($105 \sim 122.5^\circ\text{E}$, $20 \sim 32.5^\circ\text{N}$)	-0.01 ¹⁾	0.08 ¹⁾	-0.09 ¹⁾	0.01 ¹⁾
	-0.05 ²⁾	0.02 ²⁾	-0.07 ²⁾	-0.09 ²⁾
	0.08 ³⁾	0.09 ³⁾	-0.01 ³⁾	0.08 ³⁾
季风区北部($105 \sim 122.5^\circ\text{E}$, $32.5 \sim 45^\circ\text{N}$)	-0.05 ¹⁾	-0.03 ¹⁾	-0.02 ¹⁾	-0.04 ¹⁾
	-0.06 ²⁾	-0.05 ²⁾	-0.01 ²⁾	-0.10 ²⁾
	0.01 ³⁾	-0.01 ³⁾	0.02 ³⁾	-0.05 ³⁾

注: 1) 为总气溶胶; 2) 为硫酸盐气溶胶; 3) 为黑碳气溶胶。

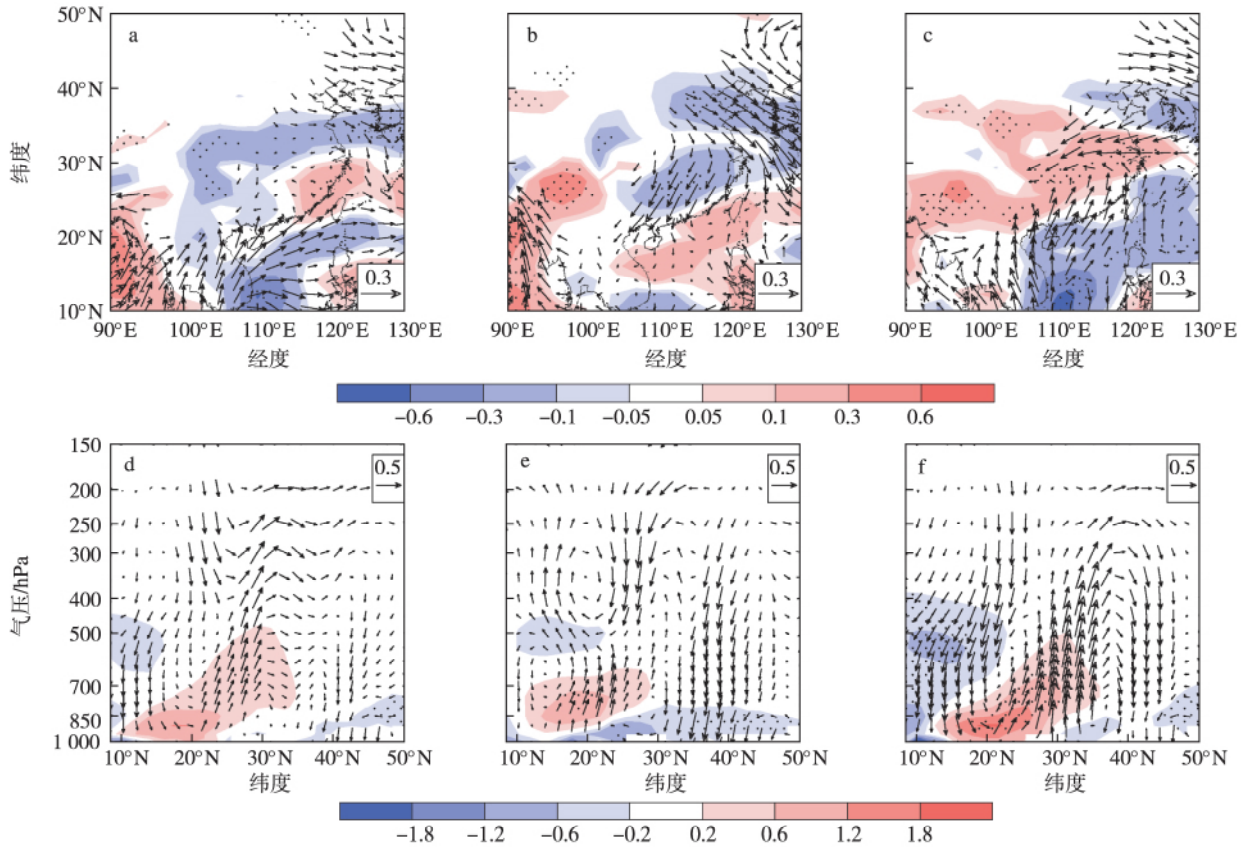


图6 人为气溶胶对冬季总降水率(彩色;单位: mm/d)和925 hPa风场(矢量;单位: m/s)影响的水平分布(a—c)以及经向水汽输送(彩色;单位: $m \cdot s^{-1} \cdot g \cdot kg^{-1}$)和经向环流(矢量;经向风速单位: m/s;垂直风速单位: Pa/s,其值乘以-200)的影响沿105~122.5°E平均的高度—纬度剖面(d—f)(散点区表示通过0.1信度的显著性检验)

a, d.总气溶胶; b, e.硫酸盐气溶胶; c, f.黑碳气溶胶

Fig.6 (a—c) Horizontal distributions of changes in total precipitation rate (shadings; units: $mm \cdot d^{-1}$) and 925 hPa wind (vectors; units: $m \cdot s^{-1}$), and (d—f) latitude—altitude sections of changes in meridional moisture flux (shadings; units: $m \cdot s^{-1} \cdot g \cdot kg^{-1}$) and meridional circulation (vectors; the unit of meridional wind is $m \cdot s^{-1}$, and the unit of vertical wind is $Pa \cdot s^{-1}$ and its value is multiplied by -200) averaged over 105—122.5°E in winter, which are influenced by anthropogenic aerosols (The dotted signs denote where the change is statistically significant at 90% confidence level): (a, d) total anthropogenic aerosols; (b, e) sulfate aerosols; (c, f) BC aerosols

2.5 人为气溶胶对冬季风的影响

在通常的气候条件下,冬季东亚地区约27°N以北的低层大气盛行西风和西北风,风从陆地吹向海洋,而在27°N以南风向转变为东风和东北风,风从西太平洋吹向陆地(Liu et al., 2009)⁶⁵⁰。东亚冬季风在低层是与西伯利亚冷高压相联系的偏北气流,在高层则对应强东亚大槽(邓洁淳等, 2014)。在垂直方向上,在约10~35°N范围内冬季气候态的经向环流特征表现为低层(约850 hPa以下高度)为偏北风,高层(约200 hPa以上高度)为偏南风,在约35°N以北高低层均为偏北风;在10~15°N为强上升气流,35°N以北为强下沉气流;此外,在30°N纬度带附近范围存在一个弱的上升气流(约400 hPa

高度)。

通常情况下,冬季东亚大陆为冷高压区,而邻近海洋为热低压区,人为气溶胶导致的温度变化将影响海陆之间的热力差异,从而影响低层的经向风。总气溶胶的增加导致925 hPa高度季风区北部的经向风为北风异常,而在南部为微弱的南风异常(图6a和表2)。在经向环流场上,总气溶胶的增加导致了在约10~20°N范围内的下沉气流异常、在约20~30°N范围内的上升气流异常。下沉和上升气流的异常变化导致了在10~30°N低层的偏南风异常,同时也增加了向北输送的水汽。在约35°N以北的下沉气流加强,同时增强了30°N以北的低层偏北风(图6d)。

黑碳气溶胶与总气溶胶影响相似,在 925 hPa 高度上,北部为北风异常,南部为南风异常,异常风速更大(图 6c 和表 2);同时,在 10~20°N 范围内的下沉气流异常、20~30°N 范围内的上升气流异常和 40°N 以北的下沉气流异常的变化也更强,其中上升气流异常扩大到了 20~35°N 范围;在 10~30°N 低层的偏南风异常、向北输送的水汽和 30°N 以北的偏北风异常也更强(图 6f)。总气溶胶和黑碳气溶胶的增加导致的这种环流变化意味着季风区北(南)部的东亚冬季风增强(减弱)。

硫酸盐气溶胶的增加则导致整个中国东部季风区 925 hPa 的经向风都表现为较强的北风异常(图 6b) 增强了低层的东亚冬季风。同时在经向环流场上(图 6e),硫酸盐气溶胶的增加导致了在约 10~20°N 范围上空大部分表现为上升气流异常、在 20~30°N 上空(约 500 hPa 以下高度)表现为上升气流异常,500 hPa 以上高度表现为下沉气流异常、在约 30°N 以北表现为下沉气流异常。这种环流变化导致了低层偏北风异常。

三组人为气溶胶试验结果都导致了在约 35°N 以北的下沉气流异常,增强了原有的下沉气流,在增强偏北风的同时也带来了更多的冷空气,这进一步解释了冬季中国北部降温的原因。硫酸盐气溶胶的增加通过直接和间接效应导致地表和低层对流层降温的同时,增强的偏北风带来更多的冷空气,引起了进一步的降温(图 3b);而黑碳气溶胶的增加通过半直接效应导致中国南部对流层温度增加,北部增强的偏北风导致了北部地表和对流层低层温度的降低(图 3c);总气溶胶的增加是两种人为气溶胶的共同结果,总效应表现为弱的降温作用(图 3a)。由于气溶胶主要分布在对流层低层和地表,因此人为气溶胶的增加对 500 hPa 和 200 hPa 高度的位势高度和风场的影响都较小(图略),且主要由环流变化引起。

3 结论和讨论

本文采用 NCAR 的 CAM5.1 模式,通过改变中国东部区域人为气溶胶排放源分别进行敏感性试

验,研究了总人为气溶胶(硫酸盐和黑碳气溶胶共同)、人为硫酸盐气溶胶和人为黑碳气溶胶的增加对东亚冬季气候的影响。对比 NCEP/NCAR 再分析资料发现,CAM5.1 可以较好地模拟出东亚地区冬季大气环流的基本特征。模拟结果给出了人为气溶胶影响机制如下:

1) 冬季硫酸盐气溶胶通过直接和第一间接效应减少了到达地表的短波辐射通量,引起了地表和对流层低层的冷却和海平面气压的增加,加强了东亚冬季风;第二间接效应导致季风区南部大尺度降水率减少及北部由环流变化引起的对流降水率减少。

2) 黑碳气溶胶的直接效应弱于硫酸盐气溶胶,并且其半直接效应会部分抵消直接效应,地表温度变化微小且不显著,但增加了对流层的温度。加热的对流层低层导致了季风区南部对流运动增强和对流降水率增加。季风区北(南)部东亚冬季风增强(减弱)。黑碳气溶胶对云的影响来自半直接效应和环流变化的反馈,与硫酸盐气溶胶不同。

3) 总气溶胶增加引起的地表“变暗”效应比单独硫酸盐或单独黑碳气溶胶的效应更强,大气温度变化表现为弱降温,是两种气溶胶的共同结果;总气溶胶增加导致季风区北部对流和大尺度降水率都减少、南部对流降水率增加;季风区北部东亚冬季风略微增强,南部减弱。

总气溶胶效应对冬季中国东部季风区的辐射平衡调整、云和降水的变化起重要作用,包含了硫酸盐和黑碳气溶胶的直接效应,黑碳气溶胶的半直接效应和硫酸盐气溶胶的间接效应,但并不是两种气溶胶效应的线性叠加,原因较为复杂,例如气溶胶之间的内部混合会导致气溶胶吸收特性的增强(直接效应),气溶胶活化过程中气溶胶之间对水汽的竞争(间接效应)和云过程之间的相互作用会导致云的非线性反馈等。此外,本文对于散射性气溶胶仅考虑了代表性硫酸盐气溶胶的效应,散射性人为气溶胶还包括有机碳和硝酸盐气溶胶等,因此在一定程度上本文对散射性气溶胶效应有所低估。

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.
- 邓洁淳, 徐海明, 马红云 等. 2014. 中国东部地区人为气溶胶对东亚冬、夏季风的影响——一个高分辨率大气环流模式的模拟研究[J]. *热带气象学报*, 30(3): 567-576.
- Deng J C, Xu H M, Ma H Y et al. 2014. The effects of anthropogenic aerosols over eastern China on East Asian monsoons: Simulation study with a high resolution CAM5.1 model[J]. *J Trop Meteor*, 30(3): 567-576. (in Chinese).

- Ganguly D ,Rasch P J ,Wang H *et al.* 2012.Fast and slow responses of the South Asian monsoon system to anthropogenic aerosols[J].*Geophys Res Lett* 39 ,L18804.doi: 10. 1029/2012GL053043.
- Gottelman A ,Liu X ,Ghan S J *et al.* 2010.Global simulations of ice nucleation and ice super saturation with an improved cloud scheme in the Community Atmosphere Model[J].*J Geophys Res* ,115(D18) : 311-319.
- Ghan S J ,Liu X ,Easter R C *et al.* 2012.Toward a minimal representation of aerosols in climate models: Comparative decomposition of aerosol direct , semidirect and indirect radiative forcing[J].*J Climate* 25(19) : 6461-6476.
- Ghan S J ,Zaveri R A 2007.Parameterization of optical properties for hydrated internally-mixed aerosol[J].*J Geophys Res* ,112(D10) : 185-194.
- 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.
- Giorgi F ,Bi X Q ,Qian Y 2003.Indirect vs.direct effects of anthropogenic sulfate on the climate of East Asia as simulated with a regional coupled climate-chemistry/aerosol model[J].*Climatic Change* 58(3) : 345-376.
- Gu Y ,Liou K N ,Xue Y *et al.* 2006.Climatic effects of different aerosol types in China simulated by the UCLA general circulation model[J].*J Geophys Res* ,111 ,D15201.doi: 10. 1029/2005JD006312.
- Guo L ,Highwood E J ,Shaffrey L C *et al.* 2013.The effect of regional changes in anthropogenic aerosols on rainfall of the East Asian summer monsoon[J].*Atmos Chem Phys* ,13(9) : 1521-1534.
- Han Z W ,Xiong Z ,Li J W 2011.Direct climatic effect of aerosols and interdecadal variations over East Asia investigated by a regional climate/chemistry model[J].*Atmos Oceanic Sci Lett* 4(6) : 299-303.
- 贺圣平 ,王会军 2012.东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征[J].*大气科学* 36(3) : 523-538. He S P ,Wang H J 2012.An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability [J].*Chin J Atmos Sci* 36(3) : 523-538.(in Chinese) .
- 黄伟 ,沈新勇 ,黄文彦 等 2013.亚洲地区人为气溶胶对东亚冬季风影响的研究[J].*气象科学* 33(5) : 500-509. Huang W ,Shen X Y ,Huang W Y *et al.* 2013.Effects of anthropogenic aerosols over Asia on East Asian winter monsoon[J].*J Meteor Sci* 33(5) : 500-509.(in Chinese) .
- 黄文彦 ,沈新勇 ,王勇 等 2015.亚洲地区碳气溶胶的时空特征及其直接气候效应[J].*大气科学学报* 38(4) : 448-457. Huang W Y ,Shen X Y , Wang Y *et al.* 2015.Spatial-temporal characteristics and direct climate effect of carbon aerosols over Asian area[J].*Trans Atmos Sci* 38(4) : 448-457.(in Chinese) .
- 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.
- Iacono M J ,Delamere J S ,Mlawer E J *et al.* 2008.Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models[J].*J Geophys Res* ,113 ,D13103.doi: 10. 1029/2008JD009944.
- Jiang Y ,Liu X ,Yang X Q *et al.* 2013.A numerical study of the effect of different aerosol types on East Asian summer clouds and precipitation[J].*Atmos Environ* 70(4) : 51-63.
- Jiang Y ,Yang X Q ,Liu X 2015.Seasonality in anthropogenic aerosol effects on East Asian climate simulated with CAM5[J].*J Geophys Res Atmos* , 120(20) : 10837-10861.
- Kalnay E ,Kanamitsu M ,Kistler R *et al.* 1996.The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J].*Bull Amer Meteor Soc* 77(3) : 437-471.
- Lamarque J F ,Bond T C ,Eyring V *et al.* 2010.Historical(1850—2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: Methodology and application[J].*Atmos Chem Phys* ,10(15) : 7017-7039.
- Lau K M ,Kim M K ,Kim K M 2006.Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: The role of the Tibetan Plateau[J].*Climate Dyn* 26(7/8) : 855-864.
- 李鑫 ,刘煜 2013.CAM5 模式中两气溶胶模块的评估[J].*应用气象学报* 24(1) : 75-86. Li X ,Liu Y 2013.Assessment of two aerosol modules of CAM5[J].*J Appl Meteor Sci* 24(1) : 75-86.(in Chinese) .
- Liao H ,Chang W Y ,Yang Y 2015.Climatic effects of air pollutants over China: A review[J].*Adv Atmos Sci* 32(1) : 115-139.
- Liu X ,Easter R C ,Ghan S J *et al.* 2012.Toward a minimal representation of aerosols in climate models: Description and evaluation in the Community Atmosphere Model CAM5[J].*Geosci Model Dev* 5(3) : 709-739.
- Liu Y ,Sun J ,Yang B 2009.The effects of black carbon and sulphate aerosols in China regions on East Asia monsoons[J].*Tellus B* 61(4) : 642-656.
- 刘芷君 ,王体健 ,谢旻 等 2015.东亚地区冬季风对气溶胶传输和分布的影响研究[J].*南京大学学报(自然科学)* 51(3) : 575-586. Liu Z J , Wang T J ,Xie M *et al.* 2015.Influence of winter monsoon on aerosol transport and distribution in East Asia[J].*J Nanjing University(Natural Sciences)* 51(3) : 575-586.(in Chinese) .
- Menon S ,Hansen J ,Nazarenko L *et al.* 2002.Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J].*Science* 297(5590) : 2250-2253.
- Morrison H ,Gottelman A 2008. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the Community Atmosphere Model ,version 3 (CAM3) .Part I: Description and numerical tests[J].*J Climate* 21(15) : 3642-3659.
- Neale R B ,Rasch P J ,Boville B A *et al.* 2010.Description of the NCAR Community Atmosphere Model(CAM5. 0) [R].NCAR/TN-486+STR , NCAR,Boulder ,Colorado.
- Ramanathan V ,Crutzen P J ,Kiehl J T *et al.* 2001.Aerosols climate and the hydrological cycle[J].*Science* 294(5549) : 2119-2124.

- Schulz M ,Textor C ,Kinne S ,et al. 2006.Radiative forcing by aerosols as derived from the AeroCom present-day and pre-industrial simulations[J].Atmos Chem Phys 6(3) : 5225-5246.
- 宿兴涛 王汉杰 2009.中国黑碳气溶胶分布特征与辐射强迫的模拟研究[J].大气科学学报 32(6) : 798-806. Su X T ,Wang H J 2009.A simulation study on distributive characteristics and radiative forcing of black carbon aerosols over China[J].Trans Atmos Sci 32(6) : 798-806.(in Chinese) .
- 王东东 朱彬 江志红 等 2014.硫酸盐气溶胶直接辐射效应对东亚副热带季风进程的影响[J].大气科学 38(5) : 897-908. Wang D D ,Zhu B , Jiang Z H ,et al. 2014.Direct effect of sulfate aerosols on the process of the East Asian subtropical monsoon[J].Chin J Atmos Sci 38(5) : 897-908.(in Chinese) .
- 王体健 李树 庄炳亮 等 2010.中国地区硫酸盐气溶胶的第一间接气候效应研究[J].气象科学 30(5) : 730-740. Wang T J ,Li S ,Zhuang B L , et al. 2010.Study on the first indirect climatic effect of sulfate aerosol in China[J].Scientia Meteorologica Sinica 30(5) : 730-740.(in Chinese) .
- Wang T J ,Zhuang B L ,Li S ,et al. 2015.The interactions between anthropogenic aerosols and the East Asian summer monsoon using RegCCMS[J].J Geophys Res Atmos 120(11) : 5602-5621.
- 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 J ,Jiang W M ,Liu H N ,et al. 2002.Simulation of the direct and indirect radiative effects of sulfate aerosol[J].Acta Sci Circum 22(2) : 129-134.(in Chinese) .
- Wu L ,Su H ,Jiang J H 2013.Regional simulation of aerosol impacts on precipitation during the East Asian summer monsoon[J].J Geophys Res 118(12) : 6454-6467.
- 吴蓬萍 韩志伟 2011.东亚地区硫酸盐气溶胶间接辐射和气候效应的数值模拟研究[J].大气科学 35(3) : 547-559. Wu P P ,Han Z W 2011.A modeling study of indirect radiative and climatic effects of sulfate over East Asia[J].Chin J Atmos Sci 35(3) : 547-559.(in Chinese) .
- Xu Q 2001.Abrupt change of the mid-summer climate in central East China by the influence of atmospheric pollution[J].Atmos Environ 35(30) : 5029-5040.
- 张华 王志立 2009.黑碳气溶胶气候效应的研究进展[J].气候变化研究进展 5(6) : 311-317. Zhang H ,Wang Z L 2009.Advances in studies of black carbon effects on climate[J].Adv Climate Change Res 5(6) : 311-317.(in Chinese) .
- Zhang H ,Wang Z ,Wang Z ,et al. 2012.Simulation of direct radiative forcing of aerosols and their effects on East Asian climate using an interactive AGCM-aerosol coupled system[J].Climate Dyn 38(7) : 1675-1693.
- Zhang L ,Liao H ,Li J P 2010.Impacts of Asian summer monsoon on seasonal and interannual variations of aerosols over eastern China[J].J Geophys Res 115 ,D00K05.doi: 10. 1029/2009JD012299.
- Zhu J L ,Liao H ,Li J P 2012.Increases in aerosol concentrations over eastern China due to the decadal-scale weakening of the East Asian summer monsoon[J].Geophys Res Lett 39 ,L09809.doi: 10. 1029/2012GL051428.

A modeling study of effects of anthropogenic aerosol on East Asian winter monsoon over eastern China

WANG Dongdong ,ZHU Bin ,JIANG Zhihong ,LIAO Hong ,CHEN Haishan

Key Laboratory of Meteorological Disaster ,Ministry of Education(KLME) /Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change(IL-CEC) /Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration ,Nanjing University of Information Science & Technology ,Nanjing 210044 ,China

East Asian region is one of the largest monsoon regions in the world ,and East Asian winter monsoon (EAWM) plays an important role in the regional climate.Anthropogenic sulfate and black carbon(BC) are most important radiation active aerosols in East Asia.The interaction between aerosols and East Asian monsoon climate has received more and more attention in recent years.In this study ,the impact of increase in anthropogenic aerosols on EAWM over eastern China are investigated using the NCAR Community Atmospheric Model version 5.1 (CAM5.1) ,a state-of-the-art climate model considering aerosol direct ,semi-direct and indirect effects.The effects of increase in anthropogenic sulfate ,BC and both of them on EAWM are decomposed from different sensitivity simulations by changing anthropogenic aerosol emission sources in eastern China ,and the experiments differed only in the aerosol and precursor gas emissions.CAM5.1 can generally capture the main features of winter atmospheric circulation in East Asia.

In winter ,the direct and 1st indirect effects of sulfate reduce the solar flux reaching the surface ,leading to a

reduction of air temperature of surface and low troposphere and an increase of sea level pressure over land. Adjustments in surface temperature and pressure fields result in a weakened wind field above 925 hPa. The gradient of pressure between land and sea is increased, which enhances EAWM. The large-scale precipitation in southern China is reduced by the 2nd indirect effects of sulfate, and the convective precipitation is reduced in northern China, which is caused by the changed circulation. In winter, the effects of BC reduce the solar flux reaching the surface and increase the solar flux in the atmosphere by absorbing. The surface air temperature has an insignificant reduction because the semi-direct effects of BC partly offset the direct. The heating of the low troposphere leads to the enhanced convection and the increased convective precipitation in southern China. The changed circulation results in temperature increase in troposphere over China. Adjustments in surface temperature and pressure fields result in an enhanced north wind in northern China and a weakened wind field in southern China above 925 hPa. The effects of BC result to an enhanced (a weakened) EAWM in northern (southern) China. The effects of BC on cloud are different from sulfate, which come from the feedback of semi-direct effect and the changed circulation. The effects of total anthropogenic aerosols (both sulfate and BC aerosols) result in a weaker reduction of air temperature in winter, which are the common result of two kinds of aerosols. The convective and large-scale precipitations are both reduced in northern China, and the convective precipitation is increased in southern China. The changes in surface temperature and pressure fields also result in an enhanced wind field in northern China and a weakened wind field in southern China above 925 hPa. The effects of total anthropogenic aerosols also result in an enhanced (a weakened) EAWM in northern (southern) China. The effects of total anthropogenic aerosols on monsoon are not simply a linear summation between the two types of aerosols.

anthropogenic sulfate aerosol; anthropogenic black carbon aerosol; direct effect; indirect effect; East Asian winter monsoon

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160525001

(责任编辑: 孙宁)