

王东东, 朱彬, 万绪江. 硫酸盐气溶胶间接效应对中国东部冬季气候的影响[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(5): 52-61.

WANG Dong-dong, ZHU Bin, WAN Xu-jiang. Impact of indirect effects of sulfate aerosol on winter climate in East China[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2020, 36(5): 52-61.

硫酸盐气溶胶间接效应对中国东部冬季气候的影响

王东东¹ 朱彬^{2,3,4,5} 万绪江⁶

(1. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044; 3. 南京信息工程大学气候与环境变化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210044; 4. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 5. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 6. 辽宁省人工影响天气办公室, 辽宁 沈阳 110166)

摘要: 气溶胶间接效应通过对云的作用来影响气候, 其过程复杂且不确定性较大。本研究利用美国国家大气研究中心 (NCAR) 的公共大气模式 CAM5.1 通过改变模式中硫酸盐气溶胶转化为云凝结核数浓度的数量, 设计了硫酸盐气溶胶间接效应的敏感性试验, 通过与控制试验对比来研究其间接效应对中国东部地区冬季云、降水和季风强度的影响。结果表明: 在东亚地区云凝结核形成过程中, 硫酸盐气溶胶占绝对的主导地位。硫酸盐气溶胶间接效应导致中国东部地区冬季云凝结核和云滴数浓度显著增加, 海洋和陆地低层的云滴有效半径减小和总云液水路径的增加, 导致了云反照率的增加。引起的负辐射强迫使地表和大气降温, 海平面气压升高, 增加的海陆气压梯度导致中国南方地区东亚冬季风增强, 总降水率减少。硫酸盐气溶胶间接效应可能不是东亚冬季风在 20 世纪 80 年代中期年际变率减弱的原因。

关键词: 硫酸盐气溶胶; CAM5.1 模式; 敏感性试验; 东亚冬季风

中图分类号: P461+.8 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1673-503X.2020.05.007

引言

现代经济发展迅速, 伴随着人类活动排放至大气的温室气体和气溶胶的增加, 对区域气候和空气质量产生了重大影响^[1-3]。中国地区冬季由于煤炭和石油产品燃烧集中排放, 导致大气中较高浓度的二氧化硫 (SO₂) 等污染物^[4]。SO₂ 转化生成的硫酸盐气溶胶是大气气溶胶最主要的成分之一^[5], 不仅可以通过直接散射入射的太阳辐射来改变地—气辐射平衡, 还可以作为云凝结核参与云微物理过程, 间接地对中国区域及全球气候系统产生重大影响^[6-7]。气溶胶气候效应与东亚季风的相互作用是当前大气环境和气候变化领域的研究重点^[8]。

近几十年, 国内外开展了较多关于气溶胶—云之间相互作用的观测, 证明了气溶胶间接效应的存在^[9-11], 但通过观测来评估其气候影响非常困难。随着气候模式的发展, 针对硫酸盐气溶胶间接效应的研究也逐渐展开。吴润等^[12]、徐萌柳和银燕^[13] 在区域气候模式 RegCM 中引入大气化学过程, 模拟发现硫酸盐气溶胶间接效应加剧了地面负的辐射强迫和地表降温。王体健等^[14] 建立区域气候化学模拟系

统 RegCCMS 发现中国地区硫酸盐气溶胶第一间接效应引起气温降低和降水减少, 并且在不同季节和地区存在明显差异。吴蓬萍和韩志伟^[15] 利用区域模式 RIEMS 发现东亚地区硫酸盐气溶胶的第一间接辐射强迫为负, 总体上使地表温度降低, 降水减少。此外, 人为气溶胶会导致东亚夏季风减弱^[16-17], 改变降水格局^[18-20]。导致的季风强度和降水的变化来自人为气溶胶直接和间接效应共同的作用^[21]。

东亚冬季风在 20 世纪 80 年代中期经历了年际变率的减弱, 气溶胶可能是影响因子之一^[22-23]。在目前的研究中, 气溶胶对东亚冬季气候影响的研究大多集中于气溶胶总体气候效应的影响^[24-26], 单独区分间接效应影响的研究较少, 而区分研究有利于确定各种效应的贡献, 以及了解不同效应的影响机制。本研究使用 CAM5.1 模式, 通过改变转化为云凝结核的硫酸盐气溶胶数浓度, 研究硫酸盐气溶胶间接效应对中国东部地区冬季云、降水和季风强度的影响, 探讨其是否为东亚冬季风年际变率减弱的原因之一, 以期为定量研究间接效应的影响机制及可能贡献提供参考。

收稿日期: 2020-05-15; 修订日期: 2020-06-28。

资助项目: 国家重点研发计划 (2016YFA0602003) 和辽宁省自然科学基金 (20180540093) 共同资助。

作者简介: 王东东, 男, 1986 年生, 助理研究员, 主要从事大气成分与气候变化方面研究, E-mail: wangdd-iaesy@qq.com。

通信作者: 朱彬, 男, 教授, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn。

1 资料与方法

1.1 资料来源

为检验模式模拟效果,本文使用了美国环境预报中心(NCEP)和美国大气研究中心(NCAR)水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的 NCEP/NCAR 再分析资料^[27]。时间上选取了代表了 2000 年气候态的 1981—2010 年的逐月平均资料。资料包括了不同高度层的风场资料(资料可在 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> 下载)。

1.2 模式简介

本文使用的模式为公共大气模式 CAM5.1 (Community Atmosphere Model, V5.1), 是由 NCAR 开发的公用地球系统模式(CESM1.0.3)的大气部分^[28]。模式选用 MOZART 气溶胶机制^[29]和 Morrison & Gettelman 的云微观物理机制^[30-31], 可模拟出气溶胶的直接、半直接和间接效应^[32], 以及气溶胶—大气之间的相互作用^[33]。模式详细介绍可参考 Jiang 等^[21]和 Wang 等^[33]。CAM5.1 模式的气体

气溶胶排放源来自 Emmons 等^[29]排放清单, 温室气体等保持在 2000 年气候态状态。

CAM5.1 模式中云微观物理机制采用了一个双参数方案来描述云滴数浓度, 通过公式(1)^[34]计算出活化凝结核数浓度(N):

$$N = \sum_{i=1}^l N_i \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(u_i)] \quad (1)$$

式(1)中 μ 为与过饱和度相关的参数, 符合寇拉曲线的描述; N_i 为每种吸湿性气溶胶的数浓度。

云滴有效半径公式为:

$$r_c = \frac{\Gamma(\mu + 4)}{2\lambda\Gamma(\mu + 1)} \quad (2)$$

式(2)中 Γ 为伽马函数; λ 为倾斜参数; $\mu = 1/\eta^2 - 1$ 是谱形参数; η 为云滴谱的相对谱宽, 根据经验公式^[35]给出。

1.3 试验设计

为了区分气溶胶的间接效应对中国东部冬季气候的影响, 本文设计了 4 组试验, 详见表 1。敏感性试验设计的具体做法为通过改变转化为凝结核的硫

表 1 硫酸盐气溶胶间接效应数值试验设计

Table 1 Numerical experimental design of indirect effect of sulfate

试验名称	试验设计描述
控制试验: CTRL	包含所有气溶胶的直接和间接效应, 其他气候辐射强迫因子如温室气体等保持在 2000 年气候态状态
减半试验: HALFIE	转化为凝结核计算的硫酸盐气溶胶数浓度减半 ($\times 0.5$), 其他条件与控制试验相同
加倍试验: DOUBLEIE	转化为凝结核计算的硫酸盐气溶胶数浓度加倍 ($\times 2.0$), 其他条件与控制试验相同
关闭试验: NONEIE	转化为凝结核计算的硫酸盐气溶胶数浓度关闭 ($\times 0$), 其他条件与控制试验相同

酸盐气溶胶数浓度来处理间接辐射过程; 在这个过程中其他种类气溶胶和排放源保持不变, 理论上不影响气溶胶的直接辐射计算。分别用控制试验与敏感性试验结果差值(控制试验减去减半试验或关闭试验、加倍试验减去控制试验)来表示硫酸盐气溶胶间接效应可能对中国东部地区冬季云、降水和气候产生的影响。与其他研究^[21, 26, 33]一样, 本文使用固定海温来研究气溶胶强迫对大气—陆地之间的(快)响应^[36]。模式水平分辨率为 $1.9^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直分层 30 层, 采用 σ -p 混合坐标。模式积分代表 2000 年气候态的 31 a, 第一年时间为模式稳定时间, 取后 30 a 月平均结果进行分析。这里值得注意的是, 本研究中敏感性试验是为了突出气溶胶的间接效应, 但这并不能完全代表实际情况。另外, 使用 *t*-test 检验方法来评估差异的显著性。

2 结果分析

2.1 模式验证

图 1 是控制试验模拟和 NCEP/NCAR 再分析资

料的 2000 年气候态冬季平均 925 hPa、500 hPa 和 200 hPa 风场和环流场的水平分布。从对流层低层到高层, CAM5.1 对北半球冬季大气环流的模拟显示出较好的模拟效果。从 925 hPa 环流场中可以看到(图 1a 和图 1b) 热带地区基本上受东风控制, 东亚地区受西北风或东北风控制, 模式对东亚向南越赤道气流、阿留申低压和澳大利亚低压等系统有较好的模拟; 对于对流层中层(500 hPa, 图 1c 和图 1d) 模式对盛行西风和东亚大槽的位置和强度有较好的模拟; 在 200 hPa 高度环流场上(图 1e 和图 1f) 模式对南半球高空副热带高压脊、向北越赤道气流和北半球高空副热带高压的西部脊等特征也都模拟较好。但由于模拟使用的固定海温, 因此与实际情况存在着一些偏差。整体来看, CAM5.1 对冬季环流系统的位置与强度也都有很强的模拟能力。

另外, 将模拟的硫酸盐气溶胶地面浓度与其他研究者的结果进行了对比, 发现 CAM5.1 模式模拟的硫酸盐气溶胶浓度相对较高, 但模拟结果位于其他模拟结果中值范围^[37]。有研究^[38-40]曾详细地

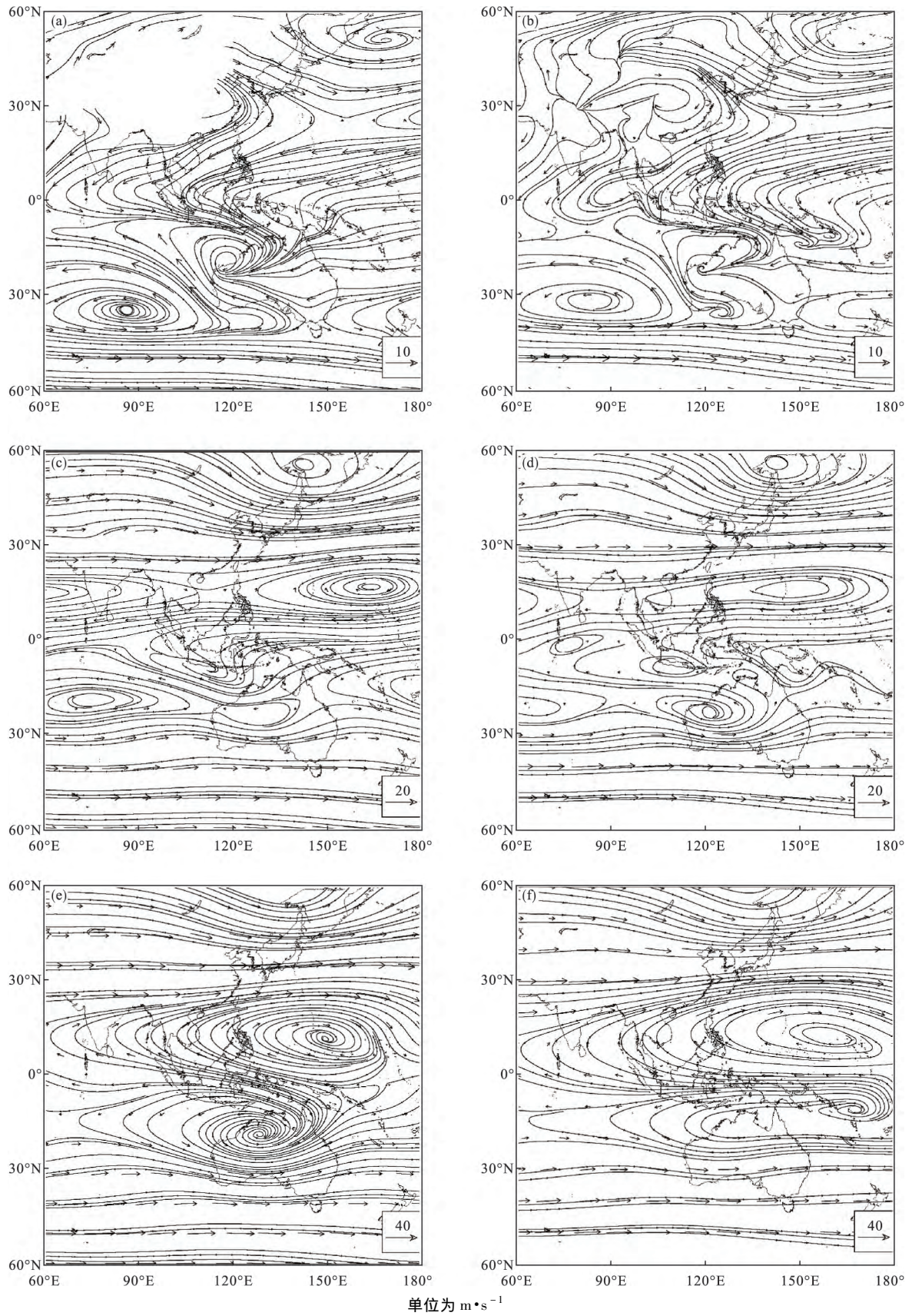


图 1 冬季控制试验模拟的 925 hPa (a)、500 hPa (c)、200 hPa (e) 和 NCEP/NCAR 再分析资料的 925 hPa (b)、500 hPa (d)、200 hPa (f) 高度风场和环流场水平分布

Fig. 1 Horizontal distribution of wind and flow fields at 925 hPa (a) 500 hPa (c) and 200 hPa (e) from the CTRL and at 925 hPa (b) 500 hPa (d) and 200 hPa (f) from the NCEP/NCAR in winter

将CAM5模拟的硫酸盐气溶胶浓度与观测资料进行了对比,发现模式对硫酸盐气溶胶有较好的模拟能力,气溶胶的全球收支和分布均有较好的一致性。

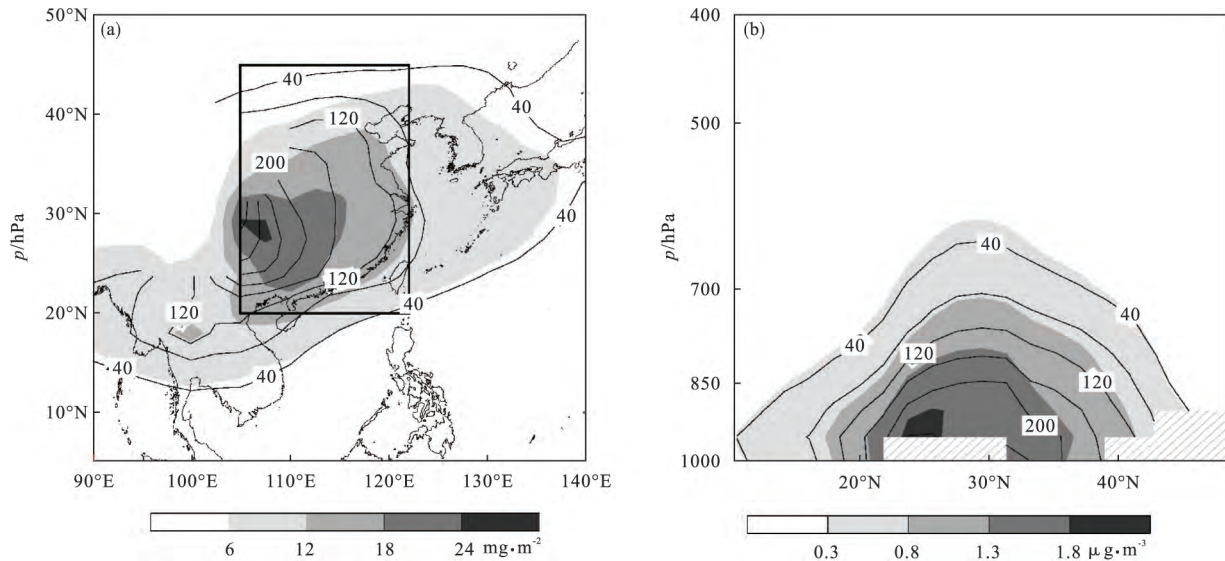


图 a 填色为硫酸盐气溶胶柱浓度;图 b 填色为硫酸盐气溶胶浓度;图 a 和图 b 等值线为过饱和度为 0.1% 的云凝结核数浓度 ($CCN_{0.1\%}$),单位为个· cm^{-3} ;黑框范围为中国东部地区 20° — 45° N, 105° — 122° E

图 2 控制试验 (CTRL) 模拟的冬季硫酸盐气溶胶柱浓度和 850 hPa 高度 $CCN_{0.1\%}$ (a) 的水平分布、硫酸盐气溶胶浓度和 $CCN_{0.1\%}$ (b) 沿 105° — 122° E 经度平均的高度—纬度剖面图

Fig. 2 Horizontal distribution of sulfate aerosol column loading and $CCN_{0.1\%}$ at 850 hPa (a) latitude-altitude sections of sulfate aerosol concentration and $CCN_{0.1\%}$ (b) along 105° — 122° E in winter from CTRL

硫酸盐气溶胶柱浓度和 850 hPa 高度上过饱和度为 0.1% 的云凝结核数浓度 ($CCN_{0.1\%}$) 的水平分布 (图中不闭合等值线是由于高度缺省所导致)。从图中可以看出,较高的硫酸盐气溶胶集中在中国东部地区,最高值出现在四川盆地地区 (约 $24 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)。这种分布特征主要与该区域的高 SO_2 排放、独特的地形特征和东亚地区季风环流有关。模式模拟的 850 hPa 高度 $CCN_{0.1\%}$ 的分布与硫酸盐气溶胶的分布相一致,中国东部地区冬季平均值为 $137.69 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,高值中心同样位于四川盆地地区 (可达 $320 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$),浓度自西北向东南方向递减 (图 2a)。硫酸盐气溶胶浓度在约 800 hPa 高度以下较高 (图 2b) 最高浓度区域对应柱浓度超过 $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的南方地区。垂直方向上 $CCN_{0.1\%}$ 与硫酸盐气溶胶浓度的分布非常一致,主要分布在约 700 hPa 高度以下,高值区分布在近地面到约 900 hPa 高度。

冬季中国东部地区垂直积分云滴数浓度 (CDNC) 和总云液水路径的分布与硫酸盐气溶胶的分布特征一致 (图略),区域平均值分别为 $0.93 \times 10^5 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $94.33 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。云滴有效半径 (CER) 高值区位于 20° N 以南的海洋上空约 850 hPa 高度以下 (图略),最大 CER 超过 $4.8 \text{ } \mu\text{m}$,中国南方

2.2 硫酸盐气溶胶对中国东部冬季气候的影响

2.2.1 冬季硫酸盐气溶胶与云特性

本文重点分析中国东部地区,定义为 (20° — 45° N, 105° — 122° E 图 2a)。图 2a 为控制试验模拟的冬季

地区上空约 700 hPa 高度以下 CER 范围为 1.6 — $3.2 \text{ } \mu\text{m}$ 。模拟结果中这种陆地上空 CER 相对较小,海洋上空相对较大的分布特征与其他研究者得到的结果相似^[15]。

2.2.2 硫酸盐气溶胶与辐射强迫

气溶胶作为云凝结核参与云的形成过程,影响 CDNC,在假定不变的水汽条件下会改变 CER,从而引起云反照率的变化,影响辐射平衡^[41]。表 2 给出了硫酸盐气溶胶间接效应导致冬季中国东部地区平均云特征的变化结果。硫酸盐气溶胶间接效应导致的 $CCN_{0.1\%}$ 和 CDNC 变化的水平分布与控制试验相似 (图略),减半和加倍试验导致 850 hPa 高度 $CCN_{0.1\%}$ 分别增加约 29% 和 33%。关闭试验导致的 $CCN_{0.1\%}$ 变化大小和分布与控制试验几乎相同, $CCN_{0.1\%}$ 增加约 92% (表 2),说明硫酸盐气溶胶在形成云凝结核过程中占明显的主导地位^[41]。减半、加倍和关闭试验导致垂直积分 CDNC 分别增加了 33%、32% 和 80% (表 2)。

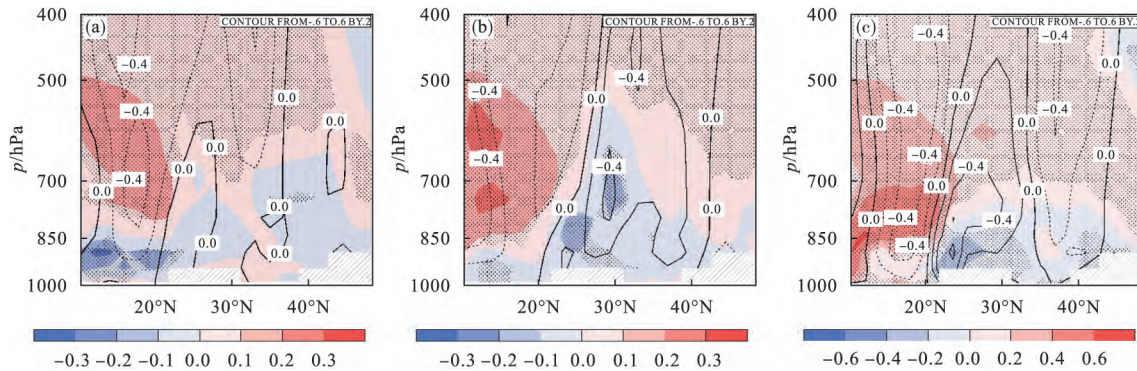
图 3 为硫酸盐气溶胶间接效应导致的冬季 CER 和垂直速度变化的高度—纬度剖面图。从图 3 可以看出,三组试验结果整体上的分布都是 CER 在热带地区上空 (20° N 以南) 因上升运动异常而增加 (负为

向上) ,而在陆地上空(20°—30°N) 由于 CDNC 的增加而减少。陆地高层的增加与环流反馈导致的垂直

表 2 硫酸盐气溶胶间接效应导致冬季中国东部地区平均的云特征变化

Table 2 Changes in cloud characteristics caused by the indirect effect of sulfate in winter over East China

云特征	850 hPa 高度 CCN _{0.1%} / cm ⁻³	垂直积分 CDNC/ 1 × 10 ⁵ 个·cm ⁻²	CLWP/ g·cm ⁻²	CER/ μm	总云量/ (%)	低云量/ (%)	中云量/ (%)	高云量/ (%)
减半试验	40.23	0.31	12.63	-0.04	0.15	0.69	0.33	-0.72
加倍试验	45.01	0.30	7.91	-0.05	-0.48	-0.26	0.24	-0.71
关闭试验	127.36	0.74	41.29	-0.15	1.75	2.43	1.04	0.42



填色为云滴有效半径,单位 μm;等值线为垂直速度,单位 10⁻² Pa·s⁻¹;点区域为云滴有效半径变化显著性超过 90% 区域

图 3 减半试验 (a)、加倍试验 (b) 和关闭试验 (c) 硫酸盐间接效应导致的冬季云滴有效半径和垂直速度的变化沿 105°—122°E 经度平均的高度—纬度剖面图

Fig. 3 Latitude-altitude sections of the changes in cloud droplet effective radius and vertical velocities caused by the IE of sulfate averaged over 105°—122°E in winter in CTRL minus HALFIE (a), DOUBLEIE minus CTRL (b) and CTRL minus NONEIE (c)

运动异常有关。减半、加倍试验导致 CER 均减小了约 3%, 关闭试验减小了约 9% (表 2)。总体来说,硫酸盐气溶胶间接效应导致了陆地低层的 CER 减小,这与增加的 CDNC 和陆地上空环流反馈导致的下沉运动异常有关,海洋上空的 CER 则显著增加,主要受上升运动异常的影响。导致的 CER 的变化主要发生在冬季水汽含量较为丰富的中国南方地区和邻近海洋上空^[21]。

云液水路径 (CLWP) 是一个重要的云属性参数,其增加的原因可能是更多但更小的云滴导致了降水效率的减少,也就是与气溶胶云生命周期效应相关^[42]。硫酸盐气溶胶间接效应总体上导致了冬季 CLWP 的增加 (图 4),减半和关闭试验导致 CLWP 的变化与冬季气候态的硫酸盐气溶胶分布相似,而加倍试验导致 CLWP 在陆地上硫酸盐气溶胶浓度最高的地方 (图 2a) 出现了一个没有变化的区域。

改变的 CER、CLWP 等云特征会导致云反照率的变化,从而造成辐射强迫的变化^[21]。云短波辐射强迫 (SWCF) 是由全天空和晴空条件下大气顶向外的短波通量差异计算得到的,是一个与气候系统辐射平衡过程相关的云属性参数。从图 4 中可以看出,3 组试验均导致了负的 SWCF。减半和关闭试验

导致的 SWCF 变化最大区域出现在中国南方地区邻近海洋上 (图 4a 和图 4c),这与减小的 CER 和增加的云量 (表 2) 一致;加倍试验导致的负 SWCF 主要出现在赤道附近的海洋和中南半岛地区,而在中国东部地区的变化则很小且不显著 (图 4b),与 CLWP 的变化一致。

表 3 是硫酸盐气溶胶间接效应对冬季中国东部地区平均辐射强迫和地表加热项的影响结果,引起的地表、大气顶短波辐射强迫的变化与 SWCF 的变化大小和分布十分一致 (图略)。王体健等^[14]模拟的 1 月中国地区硫酸盐气溶胶的第一间接辐射强迫为 $-1.80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。吴蓬萍和韩志伟^[15]模拟得到的冬季东亚地区硫酸盐气溶胶的第一间接辐射强迫为 $-0.88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。本研究中加倍试验得到的冬季平均硫酸盐气溶胶间接辐射强迫为 $-1.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,与其他人的研究结果相近,而减半和关闭试验导致的间接辐射强迫值则高于其他研究结果。此外,云量的变化还导致了云长波辐射强迫的增加 (表 3),但相比 SWCF 数值变化较小。

2.2.3 硫酸盐气溶胶与东亚冬季风和降水

图 5 是硫酸盐气溶胶间接效应导致的冬季地表温度和海平面气压的变化。减半试验导致的主要降

温位于北方地区,中国东部地区降温为 $-0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$; 关闭试验导致了中国东部地区整体的降温($-0.80\text{ }^{\circ}\text{C}$),

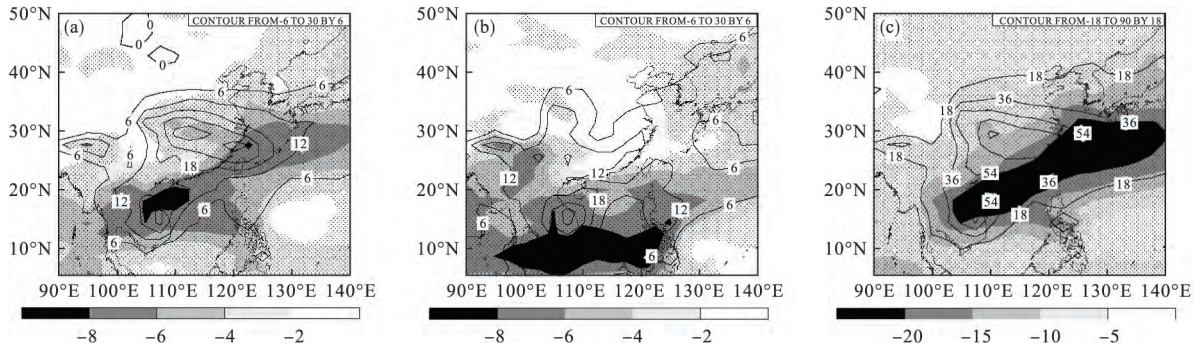


图 4 减半试验 (a)、加倍试验 (b) 和关闭试验 (c) 硫酸盐间接效应导致的冬季云短波辐射强迫和云液水路径变化的水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of the changes in cloud shortwave radiative forcing and total cloud liquid water path caused by the IE of sulfate in winter in CTRL minus HALFIE (a), DOUBLEIE minus CTRL (b) and CTRL minus NONEIE (c)

表 3 硫酸盐气溶胶间接效应导致冬季中国东部地区平均的云辐射强迫、大气顶净短波辐射强迫和地表加热项的变化

Table 3 Changes in cloud radiative forcings net shortwave radiative forcings at the top of atmosphere and heating terms at surface by the indirect effect of sulfate in winter over East China

辐射强迫	云短波辐射强迫	云长波辐射强迫	大气顶净短波辐射强迫	地表净短波辐射强迫	地表净长波辐射强迫	地表感热通量	地表潜热通量
减半试验	-2.43	0.32	-3.68	-3.77	-1.24	-0.92	-1.25
加倍试验	-1.54	0.49	-1.04	-0.79	0.25	-0.02	-0.32
关闭试验	-9.13	1.11	-11.97	-12.52	-3.53	-2.93	-3.82

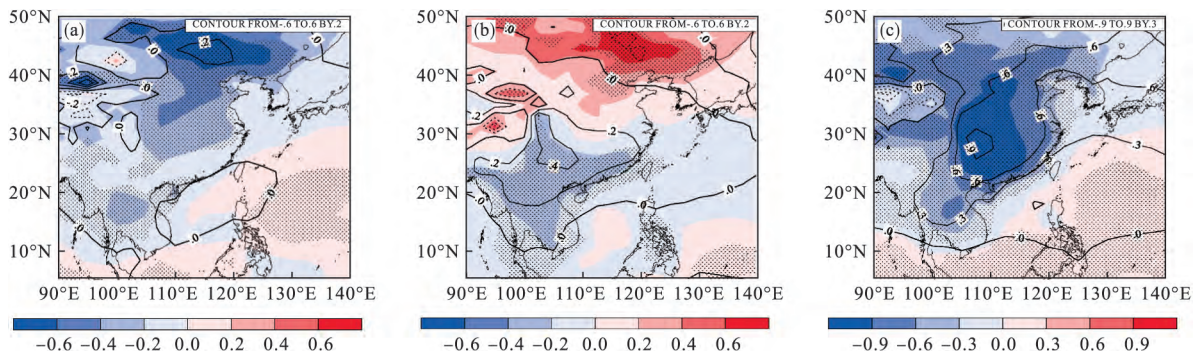


图 5 减半试验 (a)、加倍试验 (b) 和关闭试验 (c) 硫酸盐间接效应导致的冬季地表温度和海平面气压变化的水平分布

Fig. 5 Horizontal distribution of the changes in surface temperature and sea level pressure caused by the IE of sulfate in winter in CTRL minus HALFIE (a), DOUBLEIE minus CTRL (b) and CTRL minus NONEIE (c)

最大降温出现在西南部地区。加倍试验则导致了一个相对复杂的地表温度变化,表现为南方地区降温和北方地区的显著升温,中国东部地区平均地表温度变化很小($0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$)。在北半球冬季,通常情况下,东亚地区陆地为高压区,而东部相邻近海洋为低气压区。结合之前的温度变化发现,减半试验和关闭试验引起的降温使中国东部地区海平面气压分别升高 0.09 hPa 和 0.60 hPa ,加倍试验导致海平面

气压升高 0.14 hPa , 主要与南方地区的降温相对应。

通常情况下,影响地表温度的加热项包括全天空条件下的地表净短波辐射强迫,净长波辐射强迫,感热通量和潜热通量^[33]。结合表 3 可以看出,减半和关闭试验导致的地表加热项均为负值,共同导致了地表的降温,地表净短波辐射强迫占主要贡献,主要来自气溶胶间接效应引起的负 SWCF。加倍试验导致的地表加热项的变化中净长波辐射强迫为正,

感热通量变化很小,净短波辐射强迫和潜热通量为较小的负值。虽然净短波辐射变化的贡献最大,但却并不是增温的主要原因。冬季硫酸盐气溶胶间接效应引起的温度变化可能主要受到云的重新分布和环流变化导致的温度平流的影响^[15 21]。

东亚冬季风以干冷气流特征为主,低层盛行偏北风,高层为盛行西风(图 1),通常使用 925 hPa 高度风场来表示冬季风^[43]。硫酸盐气溶胶间接效应引起的温度变化导致了海平面气压的改变,改变了中国东部地区与相邻海洋之间的海陆气压梯度,进

一步影响东亚冬季风。图 6 为硫酸盐气溶胶间接效应导致的冬季 925 hPa 高度风场和总降水率变化。减半试验导致的中国东部地区冬季整体偏北风气流几乎不变(图 6a),仅在南部沿海地区略微增强,而其他大部分地区为不显著的减弱,与不显著的海平面气压变化一致(图 5a)。而与在南方地区显著的降温和增加的海平面气压(图 5b 和图 5c)相对应,加倍试验和关闭试验导致中国东部地区偏北风增大,南方地区的偏北风增大更多,也更显著(图 6b 和图 6c)。

结合图 3a 给出的垂直速度的变化结果,减半试

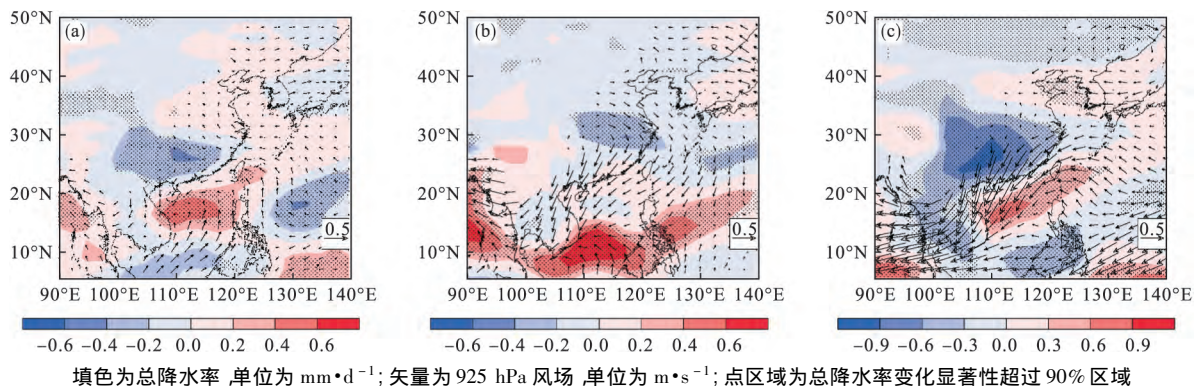


图 6 减半试验 (a)、加倍试验 (b) 和关闭试验 (c) 硫酸盐间接效应导致的冬季 925 hPa 风场和总降水率变化的水平分布

Fig. 6 Horizontal distribution of the changes in wind field at 925 hPa and total precipitation rate caused by the IE of sulfate in winter in CTRL minus HALFIE (a), DOUBLEIE minus CTRL (b) and CTRL minus NONEIE (c)

验导致热带海洋和陆地中部地区中高层上升运动增强,南方和约 35°N 以北陆地地区上空为较弱的、不显著下沉运动差异;并且上层为偏南气流差异,200 hPa 高空急流中心北移(图略),整体上导致了东亚冬季风的减弱。加倍试验导致热带海洋地区上升气流的增强和中纬度地区下沉运动的异常(图 3b),而 40°N 以北的上升运动异常引起了北方地区低层偏南气流异常,这导致南方地区冬季风的增强和北方地区冬季风的略微减弱。关闭试验同样导致了邻近海洋地区上升运动异常和中纬度陆地上空的下沉运动异常(图 3c),导致南方地区冬季风的显著增强,而 35°N 以北的上升运动异常则导致了北方地区冬季风的略微减弱。

结合前面分析的云特征和云量的变化(表 2),减半和关闭试验导致了南方地区总降水率(对流降水率和大尺度降水率)减少,而南部邻近海洋地区的降水增加(图 6a 和图 6c)。陆地上减少的降水既有对流降水的贡献(约 70%),又有云生命周期效应导致的降水减少(大尺度降水率,约 30%),而海洋上增加的降水主要是对流降水率的贡献。加倍试验导致中国东部地区普遍降水减少(图 6b),最显著的减少同样出现在南方地区,其中对流降水率和大尺度降水率的贡献各占一半。硫酸盐气溶胶间接效应

整体上导致冬季中国东部地区总降水率的减少,其中南方地区为显著的减少,而北方地区为不显著的增加。

3 结论与讨论

(1) 本文利用 CAM5.1 模式,通过减半、加倍和关闭参与核化过程的硫酸盐气溶胶浓度的试验设计,模拟研究硫酸盐气溶胶间接效应对中国东部地区冬季云、降水和季风的影响。冬季云凝结核、云滴数浓度和总云液水路径的分布与硫酸盐气溶胶浓度分布一致,主要分布在中国东部地区。硫酸盐气溶胶间接效应对冬季云凝结核和云滴数浓度产生极大的影响,主要发生在中国南方地区。关闭试验中,间接效应导致的云凝结核和云滴数浓度的变化几乎与中国东部地区气候态的数值相等,在形成云凝结核和云滴数浓度过程中分别占了约 92% 和 80% 的贡献,这说明东亚地区硫酸盐气溶胶粒子在形成云凝结核过程中占绝对的主导地位^[41]。

(2) 硫酸盐气溶胶间接效应导致冬季海洋和陆地低层的云滴有效半径减小和总云液水路径的增加。这除了与增加的云滴数浓度有关,还与环流反馈导致的陆地/海洋上空下沉/上升运动异常有关。陆地上减小的云滴有效半径和增加的云液水路径引

起了云和大气顶短波辐射强迫的减少。加倍试验得到的冬季平均硫酸盐气溶胶间接辐射强迫为 $-1.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 与其他人的研究结果相近, 而减半和关闭试验导致的间接辐射强迫值则高于其他研究结果。

(3) 负的间接辐射强迫导致了地表温度和中上层大气的降温, 引起海平面气压的增加。温度的变化以短波辐射为主要贡献, 但温度的变化并不能完全由加热项解释, 可能还受到环流反馈导致的温度平流的影响^[15-21]。关闭试验导致中国东部地区整体的降温约 $-0.80 \text{ }^\circ\text{C}$, 海平面气压升高了 0.60 hPa , 最大变化均出现在中国南方地区。改变的海陆气压梯度导致中国南方地区东亚冬季风的显著增强和总降水率的减少, 以对流降水率的减少为主要贡献(约70%), 气溶胶云生命期效应导致的大尺度降水减少约占30%。减半和加倍试验同样导致了降温和海平面气压的增加, 但相对数值较小且显著性较低, 引起的变化更多的是由环流反馈所引起的。

综上所述, 硫酸盐气溶胶间接效应会引起冬季中国东部地区负的云短波辐射强迫, 导致近地层和中上层大气的降温, 增加陆地海平面气压, 导致中国南方地区东亚冬季风增强和降水减少。硫酸盐气溶胶间接效应可能不是20世纪80年代中期东亚冬季风年际变率减弱的原因。本研究使用的敏感性试验设计, 在保留了直接效应的情况下, 区分研究了硫酸盐气溶胶间接效应对东亚冬季风的影响机制, 但试验设计并不能完全代表实际情况, 未来在试验设计上需要进一步完善。

参考文献

- [1] Liao H, Chang W Y, Yang Y. Climatic effects of air pollutants over China: A review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences* 2015, 32(1): 115–139.
- [2] 王欢, 李栋梁. 人类活动排放的 CO_2 及气溶胶对20世纪70年代末中国东部夏季降水年代际转折的影响[J]. *气象学报* 2019, 77(2): 327–345.
- [3] 杨元琴, 王继志, 张小曳, 等. 2017年1月沈阳和松辽平原地区重污染过程气象条件影响机理分析[J]. *气象与环境学报* 2018, 34(6): 116–124.
- [4] Li C, McLinden C, Fioletov V, et al. India is overtaking China as the world's largest emitter of anthropogenic sulfur dioxide [J]. *Scientific Reports* 2017, 7: 14304.
- [5] Zhang H J, Chen S L, Zhong J, et al. Formation of aqueous-phase sulfate during the haze period in China: Kinetics and atmospheric implications [J]. *Atmospheric Environment* 2018, 177: 93–99.
- [6] Boucher O, Randall D, Artaxo P, et al. Clouds and Aerosols [M] // Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. 2013: 578–613.
- [7] 王东东, 朱彬, 江志红, 等. 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* 2017, 40(4): 541–552.
- [8] 吴国雄, 李占清, 符淙斌, 等. 气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展[J]. *中国科学: 地球科学* 2015, 45(11): 1609–1627.
- [9] Coakley J A JR, Bernstein R L, Durkee P A. Effect of shipstack effluents on cloud reflectivity [J]. *Science*, 1987, 237(4818): 1020–1022.
- [10] Liao H, Seinfeld J H. Effect of clouds on direct aerosol radiative forcing of climate [J]. *Journal of Geophysical Research* 1998, 103(D4): 3781–3788.
- [11] 赵春生, 彭大勇, 段英. 海盐气溶胶和硫酸盐气溶胶在云微物理过程中的作用[J]. *应用气象学报* 2005, 16(4): 417–425.
- [12] 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 等. 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* 2002, 22(2): 129–134.
- [13] 徐萌柳, 银燕. RegCM3引入气溶胶间接气候效应模拟效果对比[J]. *气象与环境学报* 2012, 28(1): 1–10.
- [14] 王体健, 李树, 庄炳亮, 等. 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* 2010, 30(5): 730–740.
- [15] 吴蓬萍, 韩志伟. 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* 2011, 35(3): 547–559.
- [16] Guo L, Highwood E J, Shaffrey L C, et al. The effect of regional changes in anthropogenic aerosols on rainfall of the East Asian Summer Monsoon [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2013, 13(3): 1521–1534.
- [17] Song F F, Zhou T T, Qian Y. Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models [J]. *Geophysical Research Letters* 2014, 41(2): 596–603.
- [18] Liu Y, Sun J R, Yang B. The effects of black carbon and sulphate aerosols in China regions on East Asia monsoons [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 2009, 61(4): 642–656.
- [19] Jiang Y Q, Yang X Q, Liu X H. Seasonality in anthropogenic aerosol effects on East Asian climate simulated

- with CAM5 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(20): 10837–10861.
- [20] 高星星, 桂海林, 陈艳, 等. 中国典型地区夏季气溶胶时空分布及其对云和降水的影响 [J]. *气象与环境学报* 2020, 36(1): 11–20.
- [21] Jiang Y Q, Liu X H, Yang X Q, et al. A numerical study of the effect of different aerosol types on East Asian summer clouds and precipitation [J]. *Atmospheric Environment* 2013, 70: 51–63.
- [22] Miao J P, Wang T. Decadal variations of the East Asian winter monsoon in recent decades [J]. *Atmospheric Science Letters* 2020, 21(4): e960.
- [23] 马肖琳, 高西宁, 刘煜, 等. 气溶胶对东亚冬季风影响的数值模拟 [J]. *应用气象学报* 2018, 29(3): 333–343.
- [24] 黄伟, 沈新勇, 黄文彦, 等. 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* 2013, 33(5): 500–509.
- [25] 邓洁淳, 徐海明, 马红云, 等. 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* 2014, 30(3): 567–576.
- [26] Jiang Y Q, Yang X Q, Liu X H, et al. Anthropogenic aerosol effects on East Asian winter monsoon: The role of black carbon-induced Tibetan Plateau warming [J]. *Journal of Geophysical Research*: 2017, 122(11): 5883–5902.
- [27] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(33): 437–472.
- [28] Neale R B, Chen C C, Gettelman A, et al. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 5.0) [R/OL]. NCAR/TN–486+STR, Boulder, Colo: NCAR. http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/cam/docs/description/cam5_desc.pdf. [2020–5–5].
- [29] Emmons L K, Walters S, Hess P G, et al. Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4) [J]. *Geoscientific Model Development* 2010, 3(1): 43–67.
- [30] Morrison H, Gettelman A. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the Community Atmosphere Model, Version (CAM3). Part I: Description and numerical tests [J]. *Journal of Climate* 2008, 21(15): 3642–3659.
- [31] Gettelman A, Morrison H, Ghan S J. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the Community Atmosphere Model, Version (CAM3). Part II: Single-column and global results [J]. *Journal of Climate* 2008, 21(15): 3660–3679.
- [32] Ghan S J, Liu X, Easter R C, et al. Toward a minimal representation of aerosols in climate models: Comparative decomposition of aerosol direct, semidirect, and indirect radiative forcing [J]. *Journal of Climate* 2012, 25(9): 6461–6476.
- [33] Wang D D, Zhu B, Jiang Z H, et al. The impact of the direct effects of sulfate and black carbon aerosols on the subseasonal march of the East Asian subtropical summer monsoon [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121(6): 2610–2625.
- [34] Abdul-Razzak H, Ghan S J. A parameterization of aerosol activation: 2. multiple aerosol types [J]. *Journal of Geophysical Research* 2000, 105(D5): 6837–6844.
- [35] Martin G M, Johnson D W, Spice A. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1994, 51(13): 1823–1842.
- [36] Ganguly D, Rasch P J, Wang H, et al. Fast and slow responses of the South Asian monsoon system to anthropogenic aerosols [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(18): L18804.
- [37] 王东东, 朱彬, 江志红, 等. 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*, 2014, 38(5): 897–908.
- [38] 李鑫. CAM5 模式的评估与一次有机碳气溶胶的气候效应 [D]. 北京: 中国气象科学研究院 2012: 19–22.
- [39] 李鑫, 刘煜. CAM5 模式中两气溶胶模块的评估 [J]. *应用气象学报* 2013, 24(1): 75–86.
- [40] Yang Y, Wang H L, Smith S J, et al. Global source attribution of sulfate concentration and direct and indirect radiative forcing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* 2017, 17(14): 8903–8922.
- [41] Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1977, 34(7): 1149–1152.
- [42] Albrecht B. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 1989, 245(4923): 1227–1230.
- [43] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风 [M]. 北京: 气象出版社, 1991: 200–210.

Impact of indirect effects of sulfate aerosol on winter climate in East China

WANG Dong-dong¹ ZHU Bin^{2,3,4,5} WAN Xu-jiang⁶

(1. Institute of Atmospheric Environment ,China Meteorological Administration ,Shenyang 110166 ,China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster ,Ministry of Education ,Nanjing University of Information Science & Technology ,Nanjing 210044 ,China; 3. International Cooperative Joint Laboratory on Climate and Environmental Change ,Nanjing University of Information Science & Technology ,Nanjing 210044 ,China; 4. Collaborative Innovation Center For Meteorological Disaster Prediction ,Warning and Assessment ,Nanjing University of Information Science & Technology ,Nanjing 210044 ,China; 5. Key Open Laboratory of Aerosol and Cloud Precipitation ,China Meteorological Administration ,Nanjing University of Information Science & Technology , Nanjing 210044 ,China; 6. Liaoning Weather Modification Office ,Shenyang 110166 ,China)

Abstract: The indirect effects (IE) of aerosols affect the climate through clouds ,which is complex and uncertain. Based on the CAM5. 1 (Community Atmosphere Model ,V5. 1) model developed by the NCAR (National Center for Atmospheric Research) ,sensitivity experiments of the IE of sulfate aerosols were designed to investigate the influence of the IE on a cloud ,precipitation and the intensity of monsoon in winter in East China in this paper by changing the number concentrations of the sulfate aerosols that can serve as the cloud condensation nuclei number concentration. The results show that sulfate aerosols play a dominant role in the formation of cloud condensation nuclei (CCN) in East Asia. The indirect effects of sulfate aerosols result in a significant increasing concentration of CCN and cloud droplet number in winter in East China ,decrease the effective radius of cloud droplet in the low layer of ocean and land and increase the total cloud liquid water path ,resulting in an increasing albedo of a cloud. The negative radiation effect forces to cool the surface and lower atmosphere ,increases the sea level press. The increasing sea-land pressure gradient leads to the intensification of the East Asian winter monsoon and the reduction of the total precipitation rate in southern China. The indirect effects of sulfate aerosols may not be responsible for the decadal weakening of East Asian winter monsoon in the mid-1980s.

Keywords: Sulfate aerosol; CAM5. 1 model; Sensitivity experiments; East Asian winter monsoon