

沈新勇, 黄伟, 陈明诚, 等. 2014. 人为气溶胶的直接辐射效应及其对南亚冬季风的影响 [J]. 气候与环境研究, 19 (4): 393–406, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13058. Shen Xinyong, Huang Wei, Chen Mingcheng, et al. 2014. Direct radiative effects of anthropogenic aerosols and their effects on the South Asian winter monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (4): 393–406.

人为气溶胶的直接辐射效应及其对南亚冬季风的影响

沈新勇^{1,2} 黄伟¹ 陈明诚^{1,3} 黄文彦¹

¹ 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

³ 夏威夷大学国际太平洋研究中心, 美国夏威夷州 96822

摘要 运用区域气候模式 RegCM4.0 (Regional Climate Model Verson 4.0) 植合入一个化学过程, 对硫酸盐、黑碳、有机碳这3种人为气溶胶的时空分布特征和直接辐射效应进行了数值模拟, 进而研究了气溶胶对南亚冬季风的影响。结果表明: 光学厚度和地表短波辐射强迫的时空变化可能主要受硫酸盐气溶胶的影响。在南亚夏季风向冬季风转换时期和南亚冬季风盛行时期, 大气层顶和地表的负短波辐射强迫分布与气溶胶分布基本一致, 地表辐射强迫强度绝对值比大气层顶辐射强迫强度绝对值大得多。相关分析和合成分析表明: 在南亚夏季风向冬季风转换时期和南亚冬季风盛行时期, 南亚人为气溶胶主要分布区中的气溶胶柱浓度含量与南亚冬季风的建立和强度有反相关关系。这与气溶胶吸收太阳辐射, 从而引起气温和位势高度的变化有关。

关键词 区域气候模式 人为气溶胶 直接辐射效应 南亚冬季风 相关分析

文章编号 1006-9585 (2014) 04-0393-14

中图分类号 P461⁺.8

中图分类号 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13058

Direct Radiative Effects of Anthropogenic Aerosols and Their Effects on the South Asian Winter Monsoon

SHEN Xinyong^{1,2}, HUANG Wei¹, CHEN Mingcheng^{1,3}, and HUANG Wenyan¹

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

³ International Pacific Research Center, University of Hawaii, Hawaii, USA 96822

Abstract The spatial-temporal distribution and direct radiative effect of three anthropogenic aerosols (sulfate, black carbon, and organic carbon) were simulated by using the regional climate model RegCM4.0 (Regional Climate Model verson 4.0) coupled with a chemistry module. Results from our investigation of the effect of aerosols on the South Asian winter monsoon show that the temporal and spatial changes in optical depth and surface short wave radiative forcing may be caused primarily by the sulfate aerosol. In the transition period between the South Asian summer and winter monsoons and during the prevailing South Asian winter monsoon, the distributions of negative short wave radiative forcing at the top of the atmosphere and at the surface are nearly consistent with the distribution of the aerosols. The absolute value of the intensity of the radiative forcing at the surface is much greater than its intensity at the top of the atmosphere. Correlation and composite analyses show that the aerosols' column burdens in the main distribution area of anthropogenic

收稿日期 2013-04-05 收到, 2013-10-26 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB403405、2013CB430103, 国家自然科学基金项目 41375058、41175065, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPD, 江苏高等学校优秀科技创新团队计划项目

作者简介 沈新勇, 男, 1964年出生, 教授, 主要从事中尺度气象学、季风动力学及气溶胶的气候效应等研究。E-mail: shenxy@nuist.edu.cn

aerosols in South Asia is negatively correlated with the onset and intensity of the South Asian winter monsoon in the transition period between the South Asian summer and winter monsoons and during the prevailing South Asian winter monsoon. These effects may be attributed to the fact that aerosols absorb solar radiation, thereby inducing the changes in temperature and geopotential height.

Keywords RegCM4.0, Anthropogenic aerosol, Direct radiative effect, South Asian winter monsoon, Correlation analysis

1 引言

人为气溶胶通过很多方式影响地气系统的辐射平衡和气候，它们吸收和散射太阳短波辐射（直接气候效应）；吸收性气溶胶（如黑碳气溶胶）通过加热大气使云滴蒸发和云量减少（半直接气候效应）；人为气溶胶还可以作为云凝结核，人为气溶胶浓度增大以后，云凝结核也就增多，这就导致了更小云滴的形成，从而使云反射率增大（第一间接气候效应）；这些更小的云滴转换为雨滴的效率更小，使云的生命史更长，从而使时间平均的云反射率增大（第二间接气候效应），这些气候效应都会影响全球辐射平衡和气候(Liu et al., 2009; Rotstayn and Lohmann, 2002; 石广玉等, 2008; Dilip et al., 2012)。在最近几十年，印度作为南亚地区最大的国家，人为气溶胶的排放量比较大，这些排放的人为气溶胶不可避免地会对南亚地区的气候产生影响(Ji et al., 2011)。

许多国内外学者在气溶胶对南亚气候的影响这一方面进行了研究。Ji et al. (2011) 利用一个耦合了气溶胶化学模块的区域气候模式 RegCM3 (Regional Climate Model version 3) 研究了硫酸盐、黑碳和有机碳这 3 种人为气溶胶对南亚夏季风的影响，结果表明在夏季风前期和夏季风盛行时期，气溶胶引起的降水量的变化在±25%之间，在降水量增加的区域，南亚夏季风的建立提前，反之亦然。在印度东北部和缅甸，气溶胶导致夏季风的建立提前了 1~2 候，在印度中部和东南部，气溶胶导致夏季风的建立推迟 1~2 候。局地 Hadley 环流的异常和降水增强导致了上述变化，青藏高原对环流变化起到了关键作用。Lau et al. (2006) 利用 NASA 的 fvGCM (high-resolution Finite-volume General Circulation Model) 模式研究了气溶胶影响南亚夏季风的可能机制，发现晚春沙尘气溶胶的增加和印度北部黑碳气溶胶的排放可能导致了雨季的提前到来以及随后南亚夏季风的增强。王志立等 (2009) 利用 NCAR (National Center for Atmospheric

Research) 的全球大气模式 CAM3 (Community Atmosphere Model version 3) 研究了南亚地区黑碳气溶胶对南亚夏季风的影响，结果表明在晚春时期，南亚地区黑碳气溶胶使得印度洋和南亚大陆之间南北气压梯度增大，孟加拉湾的西南气流增强，从而造成孟加拉湾及沿岸地区雨季的提前到来，可能导致南亚夏季风提前爆发。夏季，被黑碳气溶胶加热的大气在高空形成一个稳定的加热层，形成一个由南指向北的温度梯度，有利于南亚夏季风的增强。Dilip et al. (2012) 利用了公共地球系统模式 CESM1 (Community Earth System Model version 1) 研究了人为气溶胶对南亚夏季风的影响，发现人为气溶胶和生物质燃烧气溶胶导致印度次大陆大部分地区夏季风降水减少，而次大陆西北部的降水有一定的增加。亚洲地区以外的人为气溶胶对降水的普遍减少有一定的贡献，但亚洲地区内的人为气溶胶对降水的普遍减少起着主导作用。在南亚夏季风早期，当地排放的气溶胶对降水的变化起着更加重要的作用，而在南亚夏季风晚期，当地和远方排放的气溶胶对降水变化起着相当的作用。降水变化主要受当地排放的气溶胶的影响，而地表气温的变化强烈地受远方排放的气溶胶的影响。Meehl et al. (2008) 指出黑碳气溶胶引起大气加热，从而会导致春季南亚地区降水增加，而黑碳气溶胶引起的太阳昏暗效应导致了印度洋海表温度的异常冷却，从而使夏季南亚地区降水减少。Zhang et al. (2009) 研究表明碳类气溶胶（黑碳和有机碳）使印度地区夏季地表气温增加，而使印度地区夏季总云量和降水减少。一些研究 (Zhou and Yu, 2006; Gao et al., 2008) 表明，对于亚洲季风气候的模拟，高分辨率的区域气候模式比全球模式有更好的模拟能力，与多种气溶胶综合气候效应相比，人们对于硫酸盐和黑碳等单一气溶胶的辐射强迫及其气候效应 (Kiehl et al., 1993; Qian et al., 2001; Menon et al., 2002; 吴润等, 2002; 张华等, 2008; Ramanathan and Carmichael, 2009) 的了解更为深入，因此，本文使用耦合了化学过程的新一代区域气候模式 RegCM4.0 (Regional Climate Model version 4.0) 研

究3种人为气溶胶(硫酸盐、黑碳和有机碳气溶胶)的直接辐射效应及其对南亚冬季风的影响。

Ji et al. (2011) 指出南亚气候可以清楚地分为4段时期: 冬季风向夏季风转换时期(3~5月)、夏季风盛行时期(6~9月)、夏季风向冬季风转换时期(10~12月)和冬季风盛行时期(1~2月)。为了研究气溶胶对南亚冬季风的影响, 本文只研究夏季风向冬季风转换时期和冬季风盛行时期这两段时期。本文首先检验模式的模拟能力; 然后研究气溶胶的分布特征、辐射强迫及对850 hPa风场的影响; 其次运用相关分析和合成分析这两种方法研究南亚地区气溶胶的柱浓度含量变化与南亚冬季风的关系; 最后分析气溶胶影响南亚冬季风的物理机制。

2 模式简介和试验设计

2.1 模式简介

本文使用的模式是由意大利国际理论物理中心在RegCM3的基础上发展起来的新一代区域气候模式RegCM4.0 (Giorgi et al., 2012), RegCM4.0依然沿用了RegCM3的动力学框架, 和RegCM3一样, RegCM4.0不可以进行双向嵌套, 但是它可以进行多重单向嵌套。与RegCM3相比, RegCM4.0有了如下发展: 添加了新的陆面模式CLM3.5 (Community Land Model version 3.5)、边界层参数化方案UW-PBL(University of Washington-Planetary Boundary Layer)、海气通量方案和具有日变化的海温方案; 对原有的辐射传输方案和边界层参数化方案进行了改进; 对模式进行了全面的更新以使其更具有灵活性和可操作性。RegCM4.0可以和一维湖泊模式、简化气溶胶方案(包括黑碳、有机碳、硫酸盐等气溶胶)以及气相化学模块进行双向耦合。对于气溶胶方案, 模式中硫酸盐、黑碳和有机碳气溶胶的排放通量来自于日本全球变化前沿研究中心给出的高分辨率亚洲区域排放清单(Ohara et al., 2007), 该清单给出的气溶胶排放通量具有年际变化。气溶胶方案(Solomon et al., 2006)所要预报的10种示踪物质量混合比考虑了大尺度环流的输送、水平和垂直湍流扩散、不同物质之间的物理化学转换、地表排放、深对流输送、干清除以及大尺度降水和积云降水的湿清除等物理化学过程, 气溶胶通过吸收和散射等物理过程影响辐射光谱的可见光

和红外波段, 气溶胶的辐射特性由单次散射反照率、消光系数和不对称因子等描述, 以上3个参数都是由模式给定的, 各种气溶胶的复折射指数来自于由德国慕尼黑大学和马克斯·普朗克气象学研究所开发的气溶胶与云光学特性程序包(Optical Properties of Aerosols and Clouds, OPAC)。

2.2 试验设计

本文共进行了2组试验, 分别为控制试验和敏感性试验, 其中控制试验考虑了硫酸盐、黑碳和有机碳这3种气溶胶的辐射效应, 敏感性试验去除了气溶胶的影响, 控制试验与敏感性试验模拟结果之差即作为气溶胶的直接气候效应。两组试验所选取的模拟区域的中心点位于(30°N, 90°E), 水平X方向有240个格点, 水平Y方向有144个格点, 水平分辨率为50 km, 在垂直方向有18层, 最顶层的气压为5 hPa。两组试验模拟时所用的初始场和边界场为NCAR/NCEP再分析资料, 海温场为美国海洋大气局的最优差值表层海温资料(每周更新一次)。两组试验的模拟时段为1999年11月1日到2008年10月1日, 其中前11个月作为模拟的初始化阶段, 并不作分析, 我们分析其后8年的模拟结果(下文除特别说明外, 都是分析的这8年的平均结果)。

3 模拟结果分析

3.1 模拟性能检验

首先我们用观测资料和控制试验模拟结果来检验模式的模拟能力。这里检验模式对气溶胶分布特征的模拟能力所用到的观测资料为2000年中分辨率成像光谱仪(MODIS)第三级月平均格点资料中的气溶胶光学厚度(用于检验光学厚度的气候特征, 可通过中国气象科学数据共享服务网下载)和气溶胶自动观测网(AERONET)观测得出的波长为500 nm的月平均气溶胶光学厚度(用于检验光学厚度的年际变化), 检验模式对地表气温和850 hPa风场的模拟能力所用到的观测资料为NCAR/NCEP再分析资料。

与吉振明等(2010)的处理方法类似, 图1中观测资料为2000年, 模拟资料为8年平均结果。结合图1a、1b和图1c、1d, 模式模拟出了印度东北部的气溶胶光学厚度高值区, 然而在南亚地区, 模拟的气溶胶光学厚度普遍低于实况, 这主要是因为

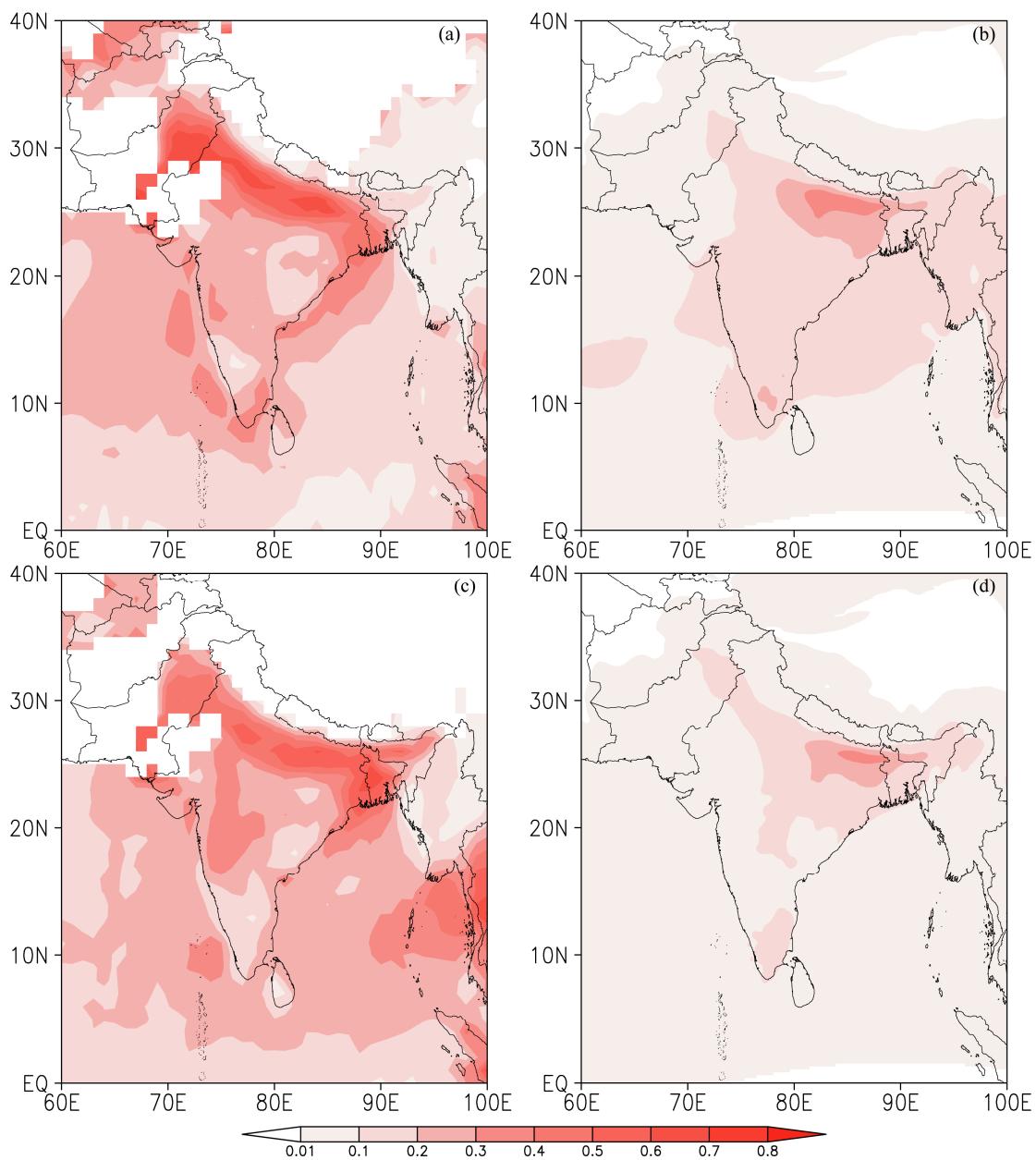


图 1 (a、b) 南亚夏季风向冬季风转换时期和 (c、d) 南亚冬季风盛行时期 (a、c) 观测与 (b、d) 模拟气溶胶光学厚度

Fig. 1 (a, c) Observed and (b, d) simulated aerosol optical depth in (a, b) the period of the transiting from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon and (c, d) the period of the prevailing of South Asian winter monsoon

实况包括了所有气溶胶，而模拟只包括了三种人为气溶胶（不包括沙尘气溶胶，因此模拟的气溶胶光学厚度普遍低于实况，模拟与实况的偏差应该很大程度上反映了沙尘气溶胶的光学厚度），这与 Ji et al. (2011) 的研究结果基本一致。

由于观测资料的限制，图 2 只给出了 2001~2007 年 Kanpur 测站 (26°N , 80°E) 年平均光学厚度的实况和模拟，由该图可以看出，由于前文分析的原因，模拟的气溶胶光学厚度普遍低于实况，但

模拟的光学厚度年际变化与实况比较一致。

结合图 3a、3b 和图 3c、3d，除了模拟在印度的南部有一个冷偏差外，模拟得到的地表气温与实况基本吻合，低纬海洋的地表气温最高，在整个南亚地区，地表气温主要随纬度的减小而增大。

对比图 4a、4b，除了实况中印度东北部的偏北风没有模拟出来，模拟与实况比较一致，阿拉伯海东部为偏东风，孟加拉湾南部为偏东风，印度南部为偏东风，上述三支偏东风在赤道到 10°N 之间的

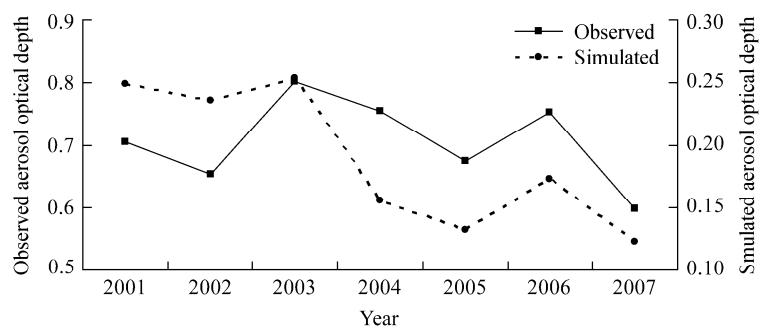
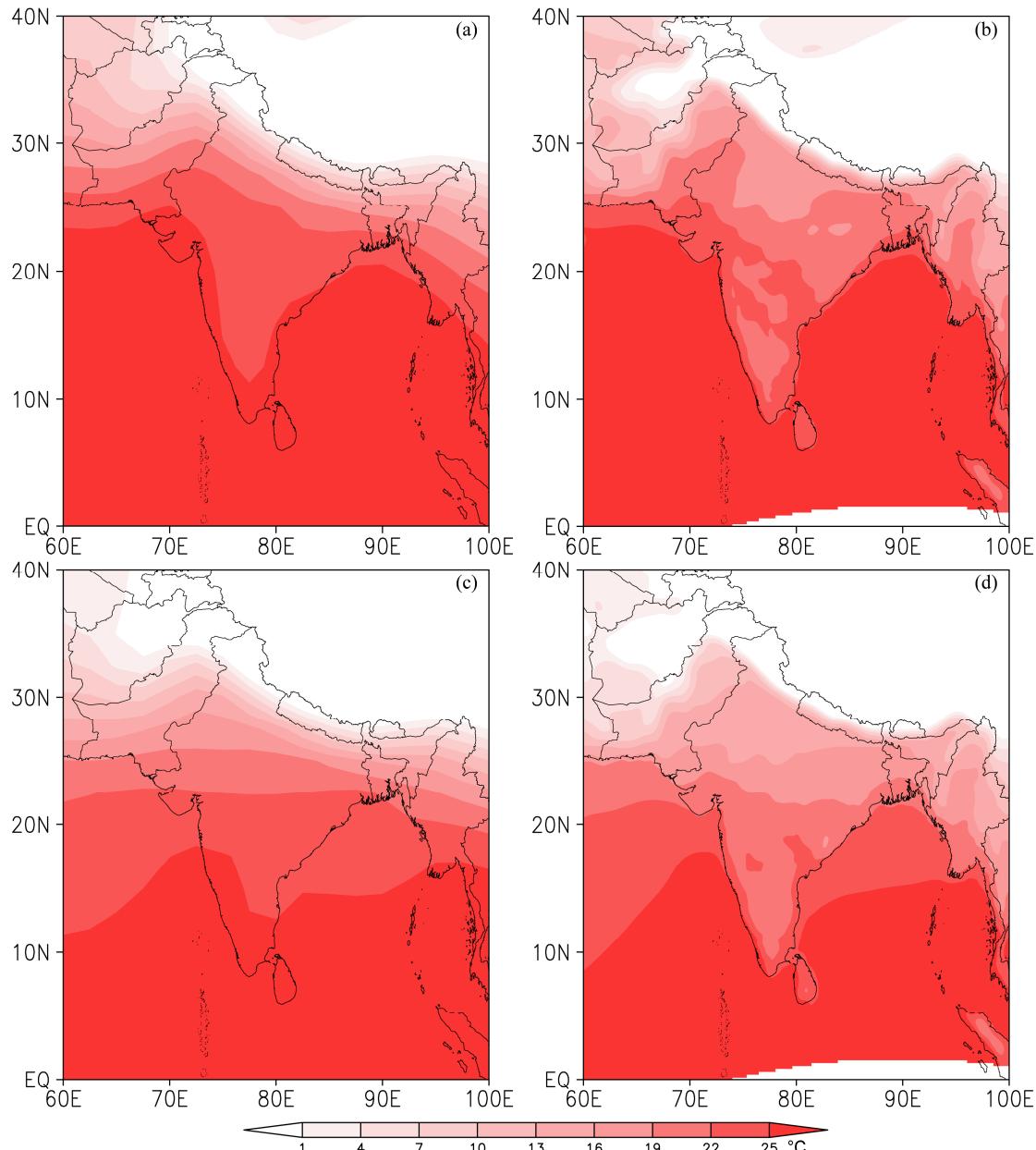
图 2 2001~2007 年 Kanpur 测站 (26°N , 80°E) 观测和模拟年平均气溶胶光学厚度Fig. 2 Observed and simulated annual mean aerosol optical depth of station Kanpur (26°N , 80°E) from 2001 to 2007

图 3 (a, b) 南亚夏季风向冬季风转换时期和 (c, d) 南亚冬季风盛行时期 (a, c) 观测与 (b, d) 模拟地表气温

Fig. 3 (a, c) Observed and (b, d) simulated surface temperature in (a, b) the period of the transitioning from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon and (c, d) the period of the prevailing of South Asian winter monsoon

区域沿逆时针方向逐渐转为偏西风, 这些特征都模拟出来了。结合图 4c、4d, 在孟加拉湾北部, 控制试验模拟为偏东风, 而实况却为偏北风, 除此之外, 模拟与实况较为一致, 阿拉伯海东北部为偏北风, 印度北部为偏西风, 阿拉伯海东南部及其以南海域、印度南部及其以南海域和孟加拉湾南部及其以南

海域为偏东风, 这些特征都模拟出来了。

由上述分析可见, RegCM4.0 对光学厚度、地表气温以及 850 hPa 风场的气候特征和光学厚度的年际变化有一定的模拟能力, 所以用该模式来研究气溶胶的直接辐射效应及其对南亚冬季风的影响具有一定的可信度。

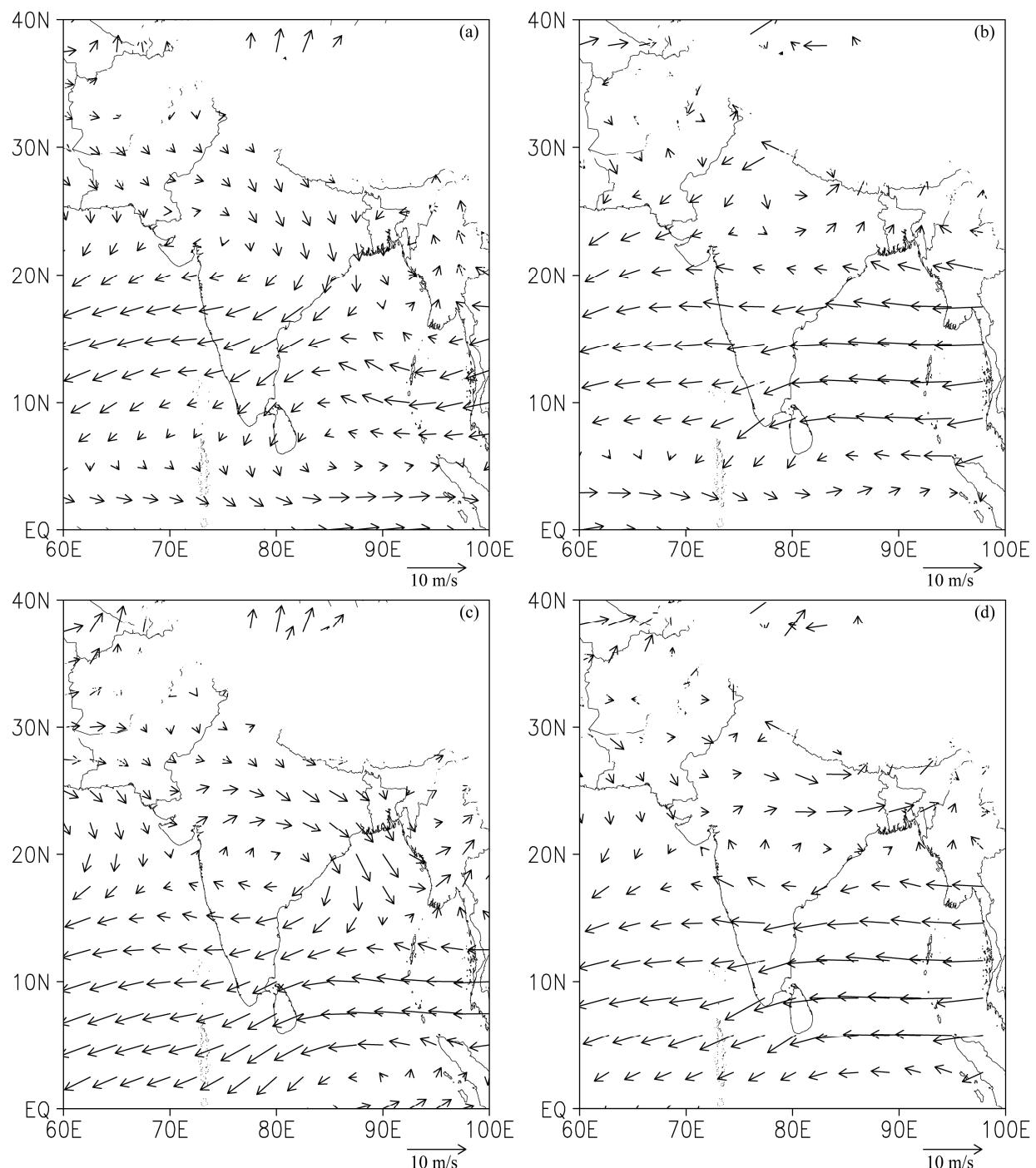


图 4 (a, b) 南亚夏季风向冬季风转换时期和 (c, d) 南亚冬季风盛行时期 (a, c) 观测与 (b, d) 模拟 850 hPa 水平风场

Fig. 4 (a, c) Observed and (b, d) simulated 850-hPa wind field in (a, b) the period of the transiting from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon and (c, d) the period of the prevailing of South Asian winter monsoon

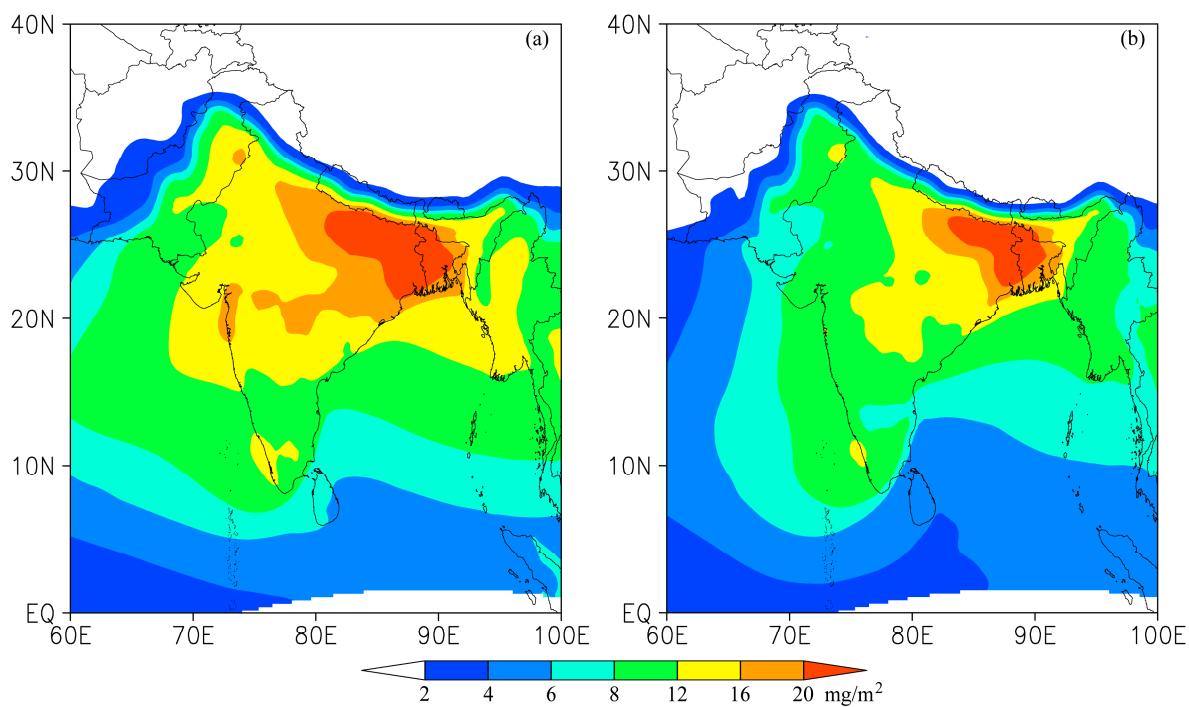


图 5 (a) 南亚夏季风向冬季风转换时期和 (b) 南亚冬季风盛行时期气溶胶柱浓度含量

Fig. 5 Column burden of aerosols in (a) the period of the transiting from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon and (b) the period of the prevailing of South Asian winter monsoon

3.2 人为气溶胶的分布特征和直接辐射效应

由图 5a、5b 可见, 在海洋上空气溶胶分布较少, 气溶胶主要分布于陆地上。由图 5b 可知, 在南亚冬季风盛行时期, 气溶胶主要分布于印度东北部地区, 由图 5a 可知, 与南亚冬季风盛行时期一样, 在南亚夏季风向冬季风转换时期, 气溶胶还是主要分布于印度东北部, 但相比于南亚冬季风盛行时期, 南亚夏季风向冬季风转换时期的气溶胶柱浓度含量大值区向西扩展。

如图 6a 所示, 碳类和硫酸盐气溶胶主要分布于 $20^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ (印度半岛北部), 由此向南北两侧逐渐递减。在印度半岛北部 ($20^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$), 碳类气溶胶在秋、冬季浓度较大, 而在春、夏季浓度相对较小; 硫酸盐气溶胶在夏、秋季浓度较大, 而在冬、春季浓度相对较小。结合图 6a、6b, 与碳类和硫酸盐气溶胶的空间分布一致, 光学厚度大值区也在 $20^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ (印度半岛北部), 且在印度半岛北部 ($20^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$) 光学厚度在夏、秋季较大, 而在冬、春季相对较小, 这与硫酸盐浓度的季节变化一致, 可见光学厚度的时空变化同时受到碳类和硫酸盐气溶胶的时空变化的影响, 但硫酸盐气溶胶的影响可能起主导作用。由图 6c 可见, 在南亚地区,

由于气溶胶对太阳短波辐射的吸收和散射作用, 地表短波辐射强迫都为负值。结合图 6b、6c, 地表短波辐射强迫时空分布特征与光学厚度时空分布特征基本一致, 不管是对于时间分布, 还是对于空间分布, 光学厚度越大, 地表负短波辐射强迫绝对值相应越大。结合图 6a、6c, 地表短波辐射强迫的时空变化可能主要受硫酸盐气溶胶的影响。

人为气溶胶通过吸收和散射太阳短波辐射, 从而影响地气系统辐射平衡, 在大气层顶和地表产生短波辐射强迫。图 7 给出了南亚夏季风向冬季风转换时期与南亚冬季风盛行时期的大气层顶、地表短波辐射强迫。由图 7b、7d 可知, 在印度、孟加拉湾和阿拉伯海, 大气层顶和地表短波辐射强迫都为负值, 在大气层顶出现了两个负辐射强迫极小值区, 一个位于印度南部, 强度达到 -4.5 W/m^2 ; 一个位于印度东北部, 强度也达到 -4.5 W/m^2 , 与前文分析的印度东北部为气溶胶柱浓度含量大值区一致。对于地表, 负辐射强迫强度绝对值的大值区位于大陆上, 而在孟加拉湾、阿拉伯海等海洋上, 负辐射强迫强度绝对值较小, 这与前文分析的气溶胶主要分布于大陆上一致, 负辐射强迫极小值区位于印度东北部, 强度达到 -19 W/m^2 , 与前文分析

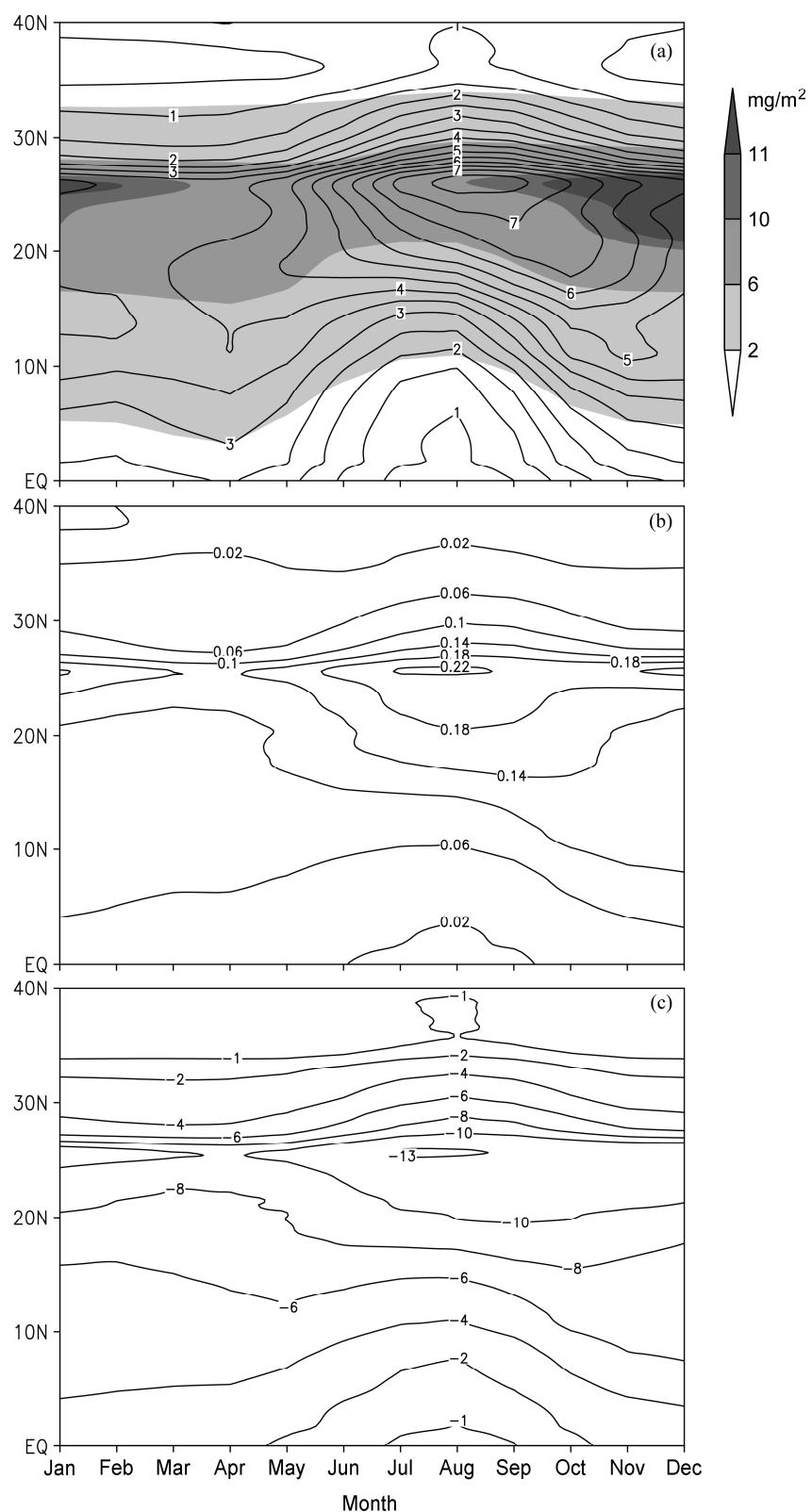


图 6 70°E~90°E 纬向平均的 (a) 碳类 (阴影) 和硫酸盐 (等值线) 气溶胶柱浓度 (单位: mg/m^2) 以及硫酸盐 (b) 气溶胶光学厚度和 (c) 地表短波辐射强迫 (单位: W/m^2) 时间一纬度剖面

Fig. 6 Time-latitude cross sections of (a) carbon (shaded) and sulfate (contour) aerosols' column burden (mg/m^2) and sulfate aerosols' (b) aerosol optical depth and (c) short wave radiative forcing at surface (W/m^2) averaged from 70°E to 90°E

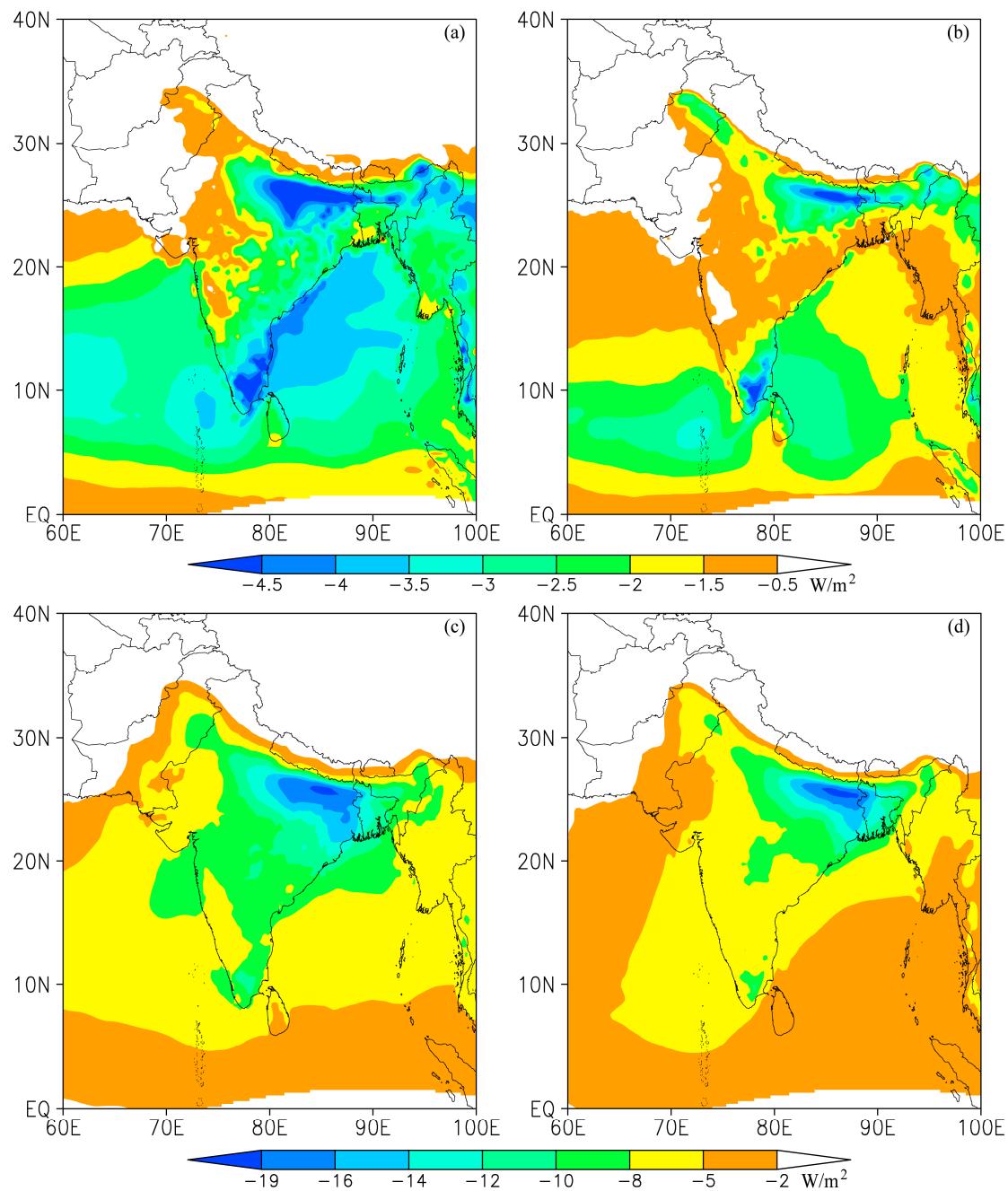


图 7 (a、c) 南亚夏季风向冬季风转换时期和 (b、d) 南亚冬季风盛行时期 (a、b) 大气层顶及 (c、d) 地表短波辐射强迫

Fig. 7 Short wave radiative forcing at (a, b) the top of atmosphere and (c, d) surface in (a, c) the period of the transiting from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon and (b, d) the period of the prevailing of South Asian winter monsoon

的印度东北部为气溶胶柱浓度含量大值区一致，地表负辐射强迫强度绝对值比大气层顶负辐射强迫强度绝对值大得多。由图 7a、7c 可知，在南亚夏季风向冬季风转换时期，对于大气层顶，与南亚冬季风盛行时期一致，负辐射强迫极小值区还是位于印度的东北部和南部，强度也都达 -4.5 W/m^2 ，只是与南亚冬季风盛行时期相比，印度东北部的负辐射强迫极小值区向西扩展，这与前面分析的相比于南

亚冬季风盛行时期，在南亚夏季风向冬季风转换时期，气溶胶柱浓度含量大值区向西扩展一致，印度南部的负辐射强迫极小值区向东北方向扩展。对于地表，与南亚冬季风盛行时期一致，负辐射强迫极小值区还是位于印度东北部，强度也达 -19 W/m^2 ，只是与南亚冬季风盛行时期相比，印度东北部的负辐射强迫极小值区向西扩展，这与前面分析的相比于南亚冬季风盛行时期，在南亚夏季风向冬季风转

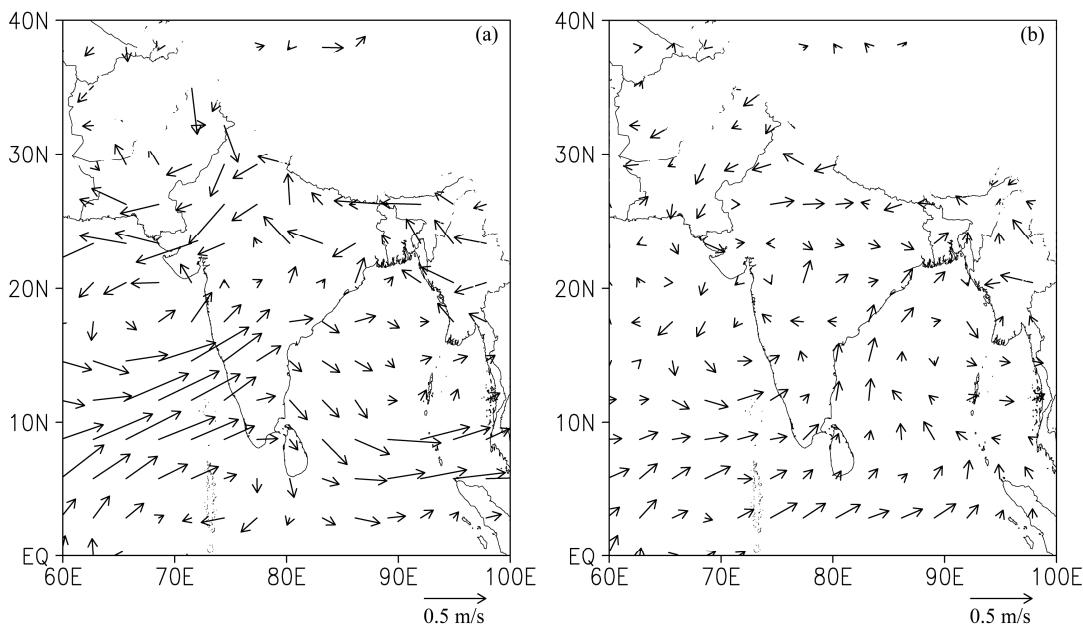


图 8 (a) 南亚夏季风向冬季风转换时期和 (b) 南亚冬季风盛行时期控制试验与敏感试验的 850 hPa 风场差值

Fig. 8 The differences of 850-hPa wind between control experiment and sensitive experiment in (a) the period of the transiting from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon and (b) the period of the prevailing of South Asian winter monsoon

换时期，气溶胶柱浓度含量大值区向西扩展一致。地表负辐射强迫强度绝对值比大气层顶负辐射强迫强度绝对值大得多。由以上分析可见，在南亚夏季风向冬季风转换时期和南亚冬季风盛行时期，大气层顶和地表的负短波辐射强迫分布与气溶胶分布基本一致，地表负辐射强迫强度绝对值比大气层顶负辐射强迫强度绝对值大得多。气溶胶在南亚地区及其附近海域的大气层顶与地表都产生短波辐射强迫，必然会通过影响温度场和位势高度场等气象要素场而对南亚冬季风的建立和强度产生影响。

3.3 人为气溶胶对南亚冬季风的影响

如图 8a 所示，阿拉伯海东部有一气旋性环流，该气旋性环流的南侧有很强的偏西风由阿拉伯海吹向印度南部。孟加拉湾也有一气旋性环流，这一气旋性环流的南侧有偏西风吹向中南半岛。而在南亚夏季风向冬季风转换时期，印度南部及其附近海域由偏西风转换为偏东风，所以上述两支偏西风使印度南部及其附近海域的偏东风建立更晚，也就是说气溶胶使南亚冬季风的建立推迟。由图 8b 可知，阿拉伯海东南部及其以南海域、印度以南海域和孟加拉湾以南海域为偏西风，而在南亚冬季风盛行时期，上述区域为偏东风，所以气溶胶使得南亚冬季风减弱。

3.4 南亚地区人为气溶胶柱浓度含量变化与南亚冬季风的关系

为了进一步研究人为气溶胶对南亚冬季风的

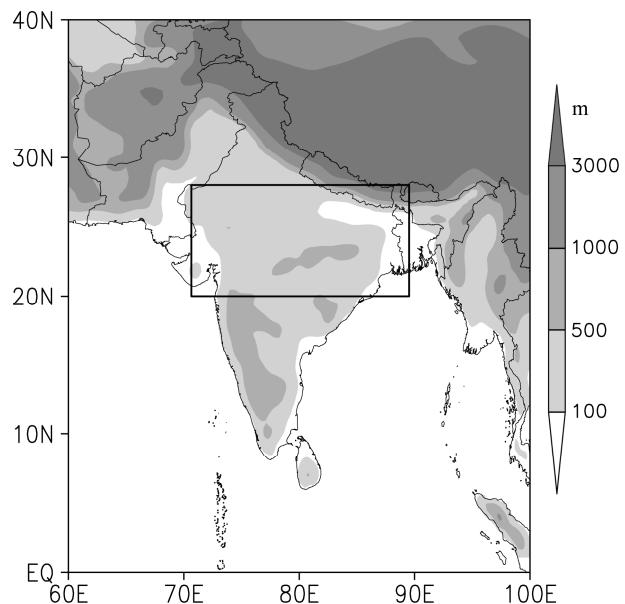


图 9 地形高度和南亚人为气溶胶主要分布区（矩形框）

Fig. 9 Terrain height and main distribution area of anthropogenic aerosols in South Asia (rectangle)

影响，下面我们运用相关分析和合成分析来研究南亚地区人为气溶胶柱浓度含量变化与南亚冬季风的关系。图 9 中的方框为我们所选取的区域 ($20^{\circ}\text{N} \sim 28^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$)，据前文分析，该区域包括印度东北部这一人为气溶胶分布大值区，南亚地区大部分人为气溶胶都分布于此区域，因此我们称该区域为南亚人为气溶胶主要分布区。首先我们计算南

亚人为气溶胶主要分布区区域平均气溶胶柱浓度含量距平，并以 0.5 倍的标准差作为划分气溶胶含量高值年与低值年的标准；然后求出南亚人为气溶胶主要分布区中的气溶胶柱浓度含量与 850 hPa 纬向风场差值（控制试验与敏感试验之差）的无偏相关系数（下文都简称为相关系数），并用查相关系数表的方法对相关系数进行显著性检验；最后我们用刚开始确定的气溶胶含量高值年与低值年做合成分析（高值年平均值减低值年平均值），并用差值 T 检验进行显著性检验。

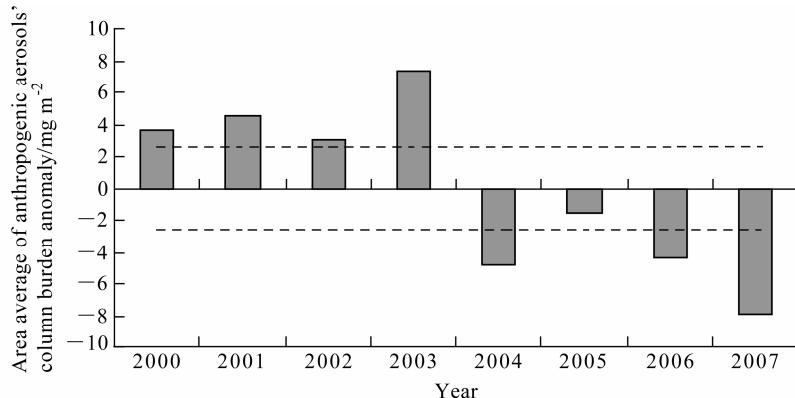


图 10 2000~2007 年南亚夏季风向冬季风转换时期南亚人为气溶胶主要分布区气溶胶柱浓度含量距平（虚线为 0.5 倍标准差）

Fig. 10 Area average of aerosols' column burden anomaly in the main distribution area of anthropogenic aerosols in South Asia in the period of the transiting from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon during 2000–2007 (dashed line: 0.5 time of standard deviation)

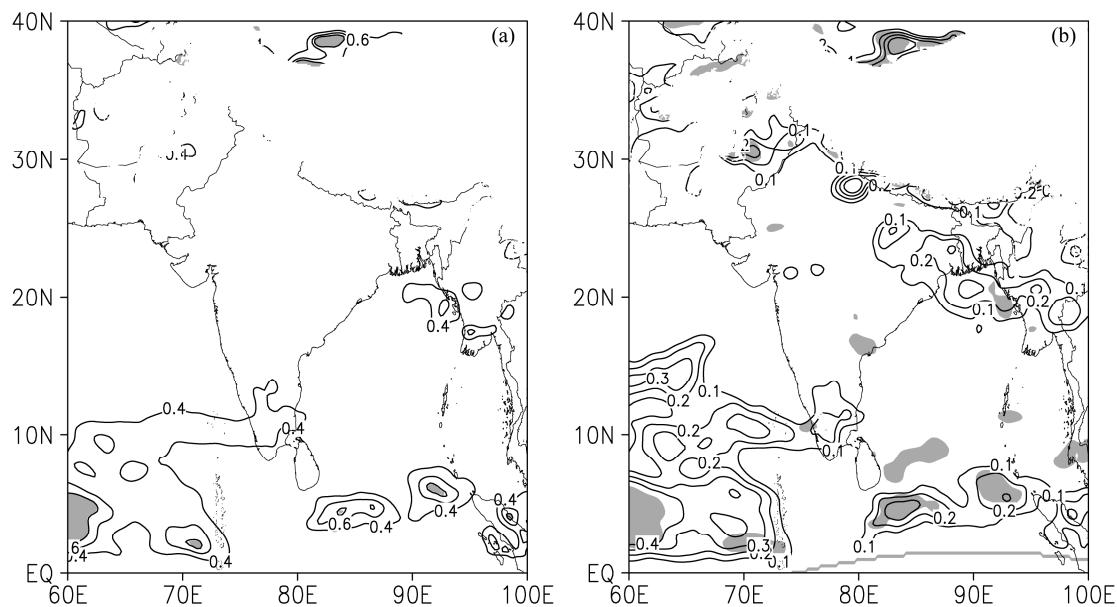


图 11 (a) 南亚夏季风向冬季风转换时期南亚人为气溶胶主要分布区气溶胶柱浓度含量与同期 850 hPa 纬向风场差值（控制试验与敏感试验之差）的相关分布；(b) 南亚夏季风向冬季风转换时期南亚人为气溶胶主要分布区气溶胶柱浓度含量高、低值年的 850 hPa 纬向风场差值（控制试验与敏感试验之差）合成分布（单位: m/s ）。阴影区通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 11 (a) The correlation coefficient between aerosols' column burden in the main distribution area of anthropogenic aerosols in South Asia and the difference of 850-hPa zonal wind between control experiment and sensitive experiment in the period of the transiting from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon; (b) the composite difference of the difference of 850-hPa zonal wind between control experiment and sensitive experiment for high and low value of area average of aerosols' column burden in the main distribution area of anthropogenic aerosols in South Asia in the period of the transiting from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon (m/s)。Shadings represent the regions passing the 0.05 significance level

图 10 给出了南亚夏季风向冬季风转换时期南亚人为气溶胶主要分布区中的气溶胶柱浓度含量距平的逐年演变情况，由该图可以看出气溶胶柱浓度含量距平有比较明显的年际变化，以 0.5 倍的标准差作为划分气溶胶柱浓度含量高值年与低值年的标准，发现在模拟的 8 年中，有 4 个气溶胶柱浓度含量高值年（2000、2001、2002 和 2003 年）和 3 个气溶胶柱浓度含量低值年（2004、2006 和 2007 年）。

由图 11a 可以看出，阿拉伯海东南部及其以南海域、印度南部和孟加拉湾以南海域的相关系数为

正值，其中部分地区通过 0.05 显著性检验。由图 11b 可知，阿拉伯海东南部及其以南海域、印度南部和孟加拉湾以南海域的纬向风为正值，其中部分地区通过 0.05 显著性检验。相关分析和合成分析表明：在南亚夏季风向冬季风转换时期，南亚人为气溶胶主要分布区中的气溶胶柱浓度含量与南亚冬季风的建立有反相关关系，当气溶胶增多（减少），南亚冬季风的建立会推迟（提前）。

图 12 给出了南亚冬季风盛行时期南亚人为气溶胶主要分布区中的气溶胶柱浓度含量距平的逐年演变情况，由该图可以看出气溶胶柱浓度含量距平有比较明显的年际变化，以 0.5 倍的标准差作为划分气溶胶柱浓度含量高值年与低值年的标准，发

现在模拟的 8 年中，有 3 个气溶胶柱浓度含量高值年（2000、2001 和 2002 年）和 4 个气溶胶柱浓度含量低值年（2003、2004、2005 和 2006 年）。

由图 13a 可以看出，阿拉伯海东部、印度和孟加拉湾西部这 3 个区域以南海域的相关系数为正值，其中部分地区通过 0.05 显著性检验。由图 13b 可知，阿拉伯海东部、印度和孟加拉湾西部这 3 个区域以南海域的纬向风为正值，其中部分地区通过 0.05 显著性检验。相关分析和合成分析表明：在南亚冬季风盛行时期，南亚人为气溶胶主要分布区中的气溶胶柱浓度含量与南亚冬季风的强度有反相关关系，当气溶胶增多（减少），南亚冬季风会减弱（增强）。

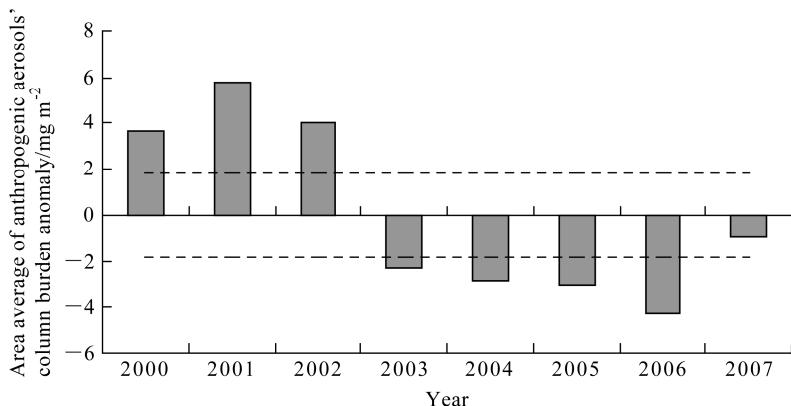


图 12 同图 10，但为南亚冬季风盛行时期

Fig. 12 Same as Fig.10, but for the period of the prevailing of South Asian winter monsoon

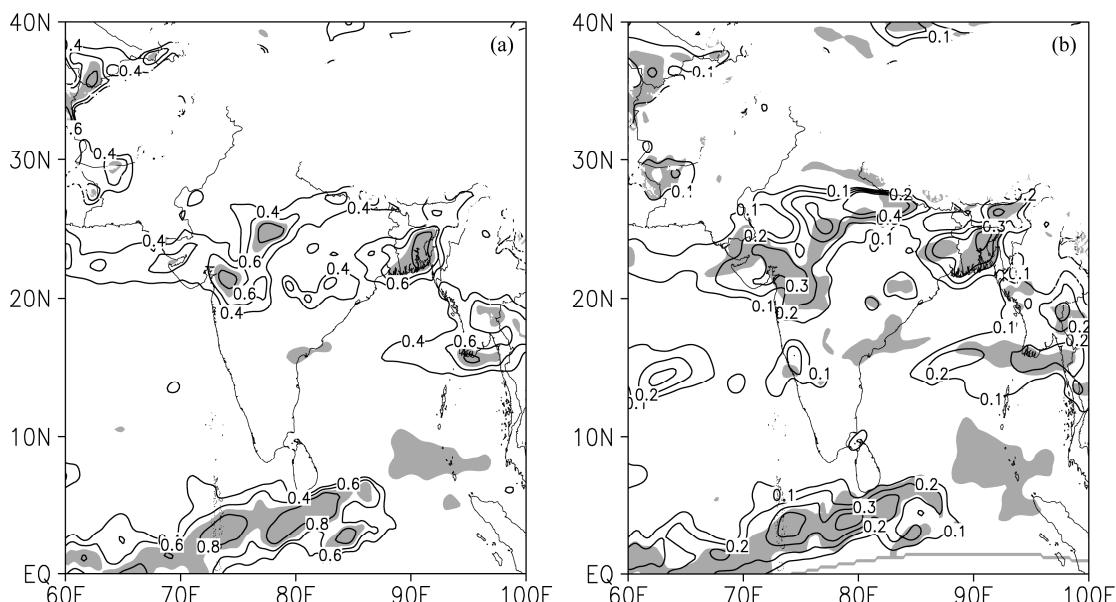


图 13 同图 11，但为南亚冬季风盛行时期

Fig. 13 Same as Fig.11, but for the period of the prevailing of South Asian winter monsoon

3.5 人为气溶胶影响南亚冬季风的物理机制分析

由3.2节可知,在南亚夏季风向冬季风转换时期和南亚冬季风盛行时期,地表负辐射强迫强度绝对值比大气层顶负辐射强迫强度绝对值大得多,这是由于有一部分太阳辐射被大气中的气溶胶所吸收。由于气溶胶吸收太阳辐射,从而加热大气,使850 hPa以上大气的温度增加(图14a、14b)。850 hPa以上大气增温膨胀,使850 hPa降压(图14c、14d),

降压区的南侧就会形成偏西风,使南亚冬季风的建立推迟并且使南亚冬季风减弱(图8a、8b)。

4 结论与讨论

本文使用耦合了化学过程的区域气候模式RegCM4.0,在模式模拟能力得到检验的基础上,对硫酸盐、黑碳和有机碳这3种气溶胶的直接辐射效

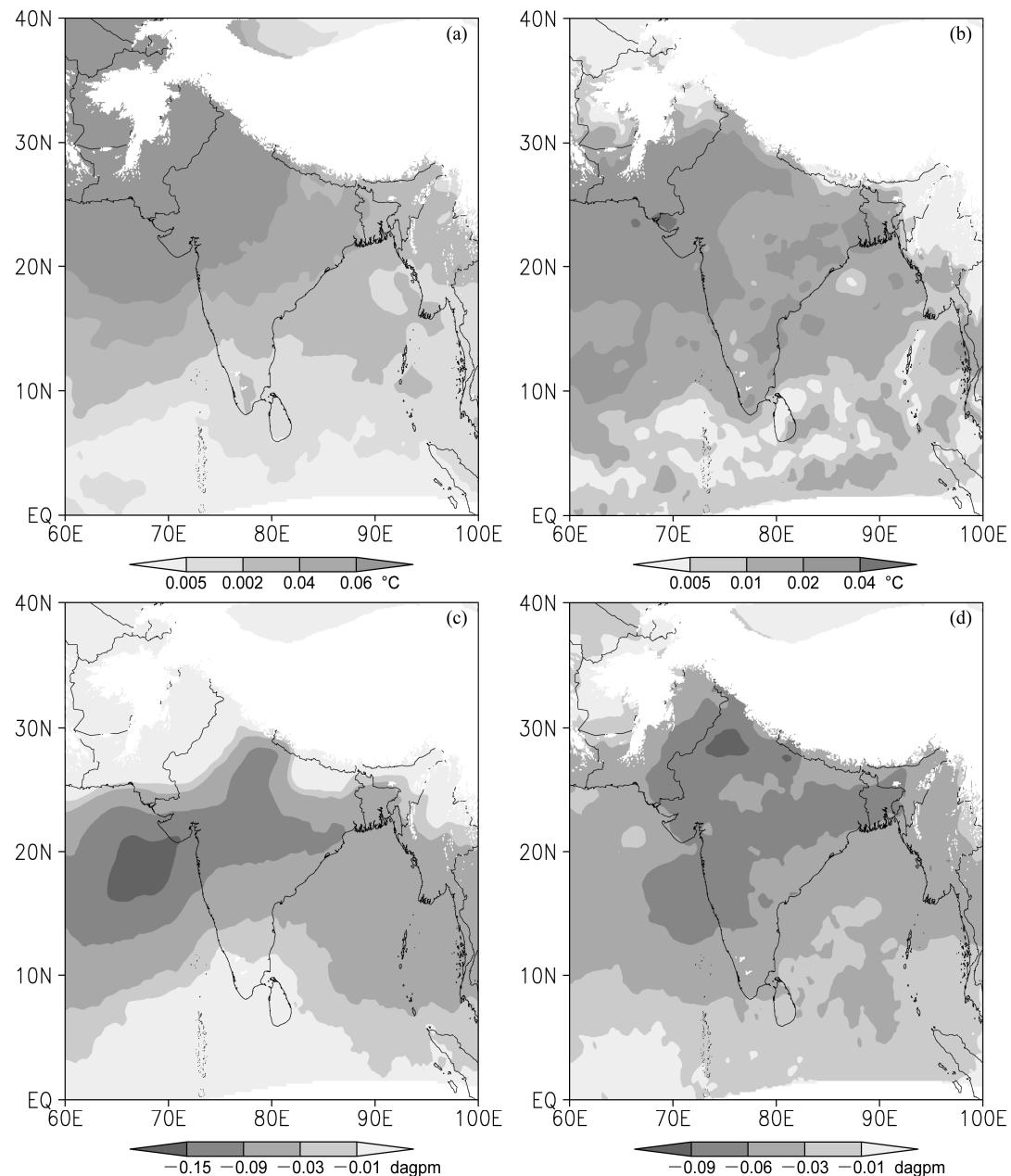


图14 (a、c) 南亚夏季风向冬季风转换时期和(b、d) 南亚冬季风盛行时期的(a、b) 850 hPa以上大气平均温度和(c、d) 850 hPa位势高度控制试验与敏感试验的差值

Fig. 14 The differences of (a, b) average temperature of atmosphere above 850 hPa and (c, d) 850-hPa potential height between control experiment and sensitive experiment in (a, c) the period of the transiting from South Asian summer monsoon to South Asian winter monsoon and (b, d) period of the prevailing of South Asian winter monsoon

应及其对南亚冬季风的影响进行了研究，主要得出以下结论：

(1) 在南亚夏季风向冬季风转换时期和南亚冬季风盛行时期，气溶胶都主要分布于印度半岛东北部地区，但相比于南亚冬季风盛行时期，在南亚夏季风向冬季风转换时期，气溶胶柱浓度含量大值区向西扩展。

(2) 气溶胶光学厚度和地表短波辐射强迫的时空变化可能主要受硫酸盐气溶胶的影响。在南亚夏季风向冬季风转换时期和南亚冬季风盛行时期，气溶胶导致了大气层顶和地表负的短波辐射强迫，大气层顶和地表负的短波辐射强迫分布与气溶胶分布基本一致，地表负辐射强迫强度绝对值比大气层顶负辐射强迫强度绝对值大得多。

(3) 相关分析和合成分析表明：在南亚夏季风向冬季风转换时期和南亚冬季风盛行时期，南亚人为气溶胶主要分布区中的气溶胶柱浓度含量与南亚冬季风的建立和强度有反相关关系，当气溶胶增多（减少），南亚冬季风的建立会推迟（提前）并且南亚冬季风会减弱（增强）。

(4) 由于气溶胶吸收太阳辐射从而加热大气，使850 hPa以上大气的温度增加。由于850 hPa以上大气增温膨胀，使850 hPa降压，降压区的南侧就会形成偏西风，使南亚冬季风的建立推迟并且使南亚冬季风减弱。

本文只研究了3种人为气溶胶的直接气候效应对南亚冬季风的影响，并没有考虑人为气溶胶的间接气候效应对南亚冬季风的影响和南亚冬季风对人为气溶胶的反馈作用，也没有考虑沙尘气溶胶的气候效应对南亚冬季风的影响，这些都有待于今后进一步研究。

参考文献 (References)

- Dilip G, Raesh P J, Wang H L, et al. 2012. Climate response of the South Asian monsoon system to anthropogenic aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 117: D13209, doi:10.1029/2012JD017508.
- Gao X J, Shi Y, Song R, 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 (1–4): 73–86.
- Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains[J]. *Climate Research*, 52: 7–29, doi:10.3354/cr01018.
- 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.
- Ji Z M, Kang S H, Zhang D F, et al. 2011. Simulation of the anthropogenic aerosols over South Asia and their effects on Indian summer monsoon [J]. *Climate Dyn.*, 36 (9–10): 1633–1647.
- Kiehl J T, Briegleb B P. 1993. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing [J]. *Science*, 260 (5106): 311–314.
- 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.
- Liu Y, Sun J R, Bai Y. 2009. The effects of black carbon and sulphate aerosols in China regions on East Asia monsoons [J]. *Tellus B*, 61 (4): 642–656.
- Meehl G A, Arblaster J M, Collins W D. 2008. Effects of black carbon aerosols on the Indian monsoon [J]. *J. Climate*, 21 (12): 2869–2882.
- 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.
- Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. 2007. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7: 4419–4444.
- 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 (2): 171–191.
- Ramanathan V, Carmichael G. 2009. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 1 (4): 221–227.
- Rotstayn L D, Lohmann U. 2002. Tropical rainfall trends and the indirect aerosol effect [J]. *J. Climate*, 15 (152): 2103–2116.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 826–840.
- Solmon F, Giorgi F, Liouesse C. 2006. Aerosol modeling for regional climate studies: Application to anthropogenic particles and evaluation over a European/African domain [J]. *Tellus B*, 58 (1): 51–72.
- 王志立, 张华, 郭品文. 2009. 南亚地区黑碳气溶胶对亚洲夏季风的影响 [J]. 高原气象, 28 (2): 419–424. Wang Zhili, Zhang Hua, Guo Pinwen. 2009. Effects of black carbon aerosol in South Asia on Asian summer monsoon [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (2): 419–424.
- 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 aerosol [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 22 (2): 129–134.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1147–1158.
- Zhang H, Wang Z L, Guo P W, et al. 2009. A modeling study of the effects of direct radiative forcing due to carbonaceous aerosol on the climate in East Asia [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (1): 57–66.
- Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. *J. Climate*, 19 (22): 5843–5858.