

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13193. Wang Dongdong, Zhu Bin, Jiang Zhihong, et al. 2014. Direct effect of sulfate aerosols on the process of the East Asian subtropical monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 897–908.

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

王东东¹ 朱彬¹ 江志红² 杨修群³

¹ 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, 南京 210044

² 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

³ 南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘 要 本文利用全球气候—大气化学模式 CAM5 并结合 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 1950~2009 年再分析资料, 讨论硫酸盐气溶胶直接辐射效应对东亚副热带季风爆发、发展和结束进程的影响。模拟结果表明: 硫酸盐气溶胶通过直接辐射效应引起东亚大陆大部分地区近地面降温, 进而降低了中纬度东亚大陆与西太平洋之间的纬向热力对比, 延迟春初、提早夏末海陆纬向热力差异逆转时间, 由此引发东亚副热带季风爆发时间延后了 4 候左右, 结束时间提前了 3 候左右; 减小的海陆热力差异导致东亚大陆偏南风减弱、东亚季风减弱以及季风降水的区域调整。我们通过 NCEP/NCAR 再分析资料分析亦发现, 1980 年以后中纬度东亚大陆与西太平洋之间的纬向热力差异逆转时间比 1980 年以前在春初延迟、夏末提前, 导致了副热带季风爆发时间比 1980 年之前延后, 结束时间提前, 东亚大陆偏南风减弱, 副热带夏季风系统性减弱, 硫酸盐直接辐射效应可能是造成这一结果的原因之一。以往的观测和模拟都表明, 由于人为活动的增加, 导致 1980 年后东亚大陆硫酸盐气溶胶负荷较之前大幅增加, 而东亚夏季风减弱, 本文的研究进一步确认了两者的关系。

关键词 东亚副热带季风 硫酸盐气溶胶 直接效应

文章编号 1006-9895(2014)05-0897-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13193

Direct Effect of Sulfate Aerosols on the Process of the East Asian Subtropical Monsoon

WANG Dongdong¹, ZHU Bin¹, JIANG Zhihong², and YANG Xiuqun³

¹ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

³ School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract The direct effect of sulfate aerosols on the process of the East Asian subtropical monsoon was investigated using the interactive global climate-chemistry model version 5 of the Community Atmosphere Model combined with the

收稿日期 2013-06-11, 2014-02-11 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB428505, 江苏省高校自然科学研究重大基础研究项目 12KJA170003, 江苏省“333”高层次人才培养工程, 江苏省“六大人才高峰”计划, 江苏省 2011 年度普通高校研究生科研创新计划项目 CXLX11_0620

作者简介 王东东, 男, 1986 年出生, 博士研究生, 研究方向: 大气化学与气候变化。E-mail: donny_dongwang@foxmail.com

通讯作者 朱彬, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

NCEP/NCAR reanalysis dataset. The simulation results suggest that the surface temperature in most parts of the East Asian land has decreased, and the zonal thermal difference between the East Asian mid-latitude land and the western Pacific has weakened. The reversal time of the land-sea zonal thermal difference is later/earlier in early spring/late summer, and the onset/retreat times of the subtropical monsoon have been shifted to later/earlier by approximately 3 pentads because of the direct radiation effect of sulfate aerosols. The decreasing land-sea zonal thermal difference has led to the weakening of the south wind over the East Asian land and the East Asian monsoon, and a regional adjustment in monsoon rainfall. The results also imply that the reversal time of the land-sea zonal thermal difference between the East Asian mid-latitude land and the western Pacific after 1980 is later/earlier in early spring/late summer than before 1980 from the analysis of the NCEP/NCAR reanalysis data, leading to a/an later/earlier onset/retreat of the subtropical monsoon, weakening of the south wind over the East Asian land, and weakening of the subtropical monsoon after 1980. The sulfate aerosol direct radiation effect is likely to be one of the causes of this result. Both previous observational and model studies have shown that the sulfate aerosol loading increased markedly in the East Asian land after 1980 as a result of human activity, and the East Asian monsoon weakened. This study further confirms the relationship between them.

Keywords East Asian subtropical monsoon, Sulfate aerosol, Direct effect

1 引言

IPCC (政府间气候变化专门委员会) 第四次评估报告 (Forster et al., 2007) 给季风下的定义是: 季风是热带和副热带地区地面风 and 对应降水的季节反转, 是大陆尺度的陆地与邻近海洋之间加热差异引起的。亚洲是世界上最大的季风区之一, Zhu et al. (1986) 明确提出了东亚季风系统分为南海热带季风与副热带季风。何金海等 (2008) 指出东亚地区特殊的海陆分布不仅形成了这一地区巨大的经向海陆热力差异, 同时也形成了东亚大陆与西太平洋之间的纬向海陆热力差异, 从而造成了东亚季风系统的复杂性和特殊性, 其突出表现之一就是既有热带季风系统又有副热带季风系统。何金海等 (2007)、祁莉等 (2007) 和赵平等 (2008) 进一步区分了东亚副热带季风与热带季风的本质和机制, 提出了热带季风的建立时间取决于经向海陆热力差异的逆转, 而东亚副热带季风则更依赖于纬向海陆热力差异的逆转。东亚热带季风与副热带季风之间存在相互作用, 并直接影响我国大范围的旱涝。自 20 世纪 70 年代末, 东亚热带夏季风和副热带季风开始呈现减弱趋势, 并观测到降水带的南移 (Xu, 2001; Yu et al., 2004; 杨修群等, 2005; 赵平和周秀骥, 2006; Ding et al., 2008, 2009)。

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也越来越大。随着工业化的发展, 大量的 SO_2 排放到大气中造成严重污染。中国总 SO_2 排放从 20 世纪 50 年代到 21 世纪初增加了 5 倍多, 大部分增加发生在 20 世纪 70 年代之

后 (Lefohn et al., 1999; Streets et al., 2008)。大气中的 SO_2 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, 硫酸盐气溶胶直接辐射效应可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。许多研究者就硫酸盐气溶胶对东亚季风的影响进行了研究, Xu (2001) 基于统计分析认为从上世纪 90 年代末中国夏季的气候异常现象是由于工业化排放的硫酸盐气溶胶显著减少了太阳辐射, 陆地气温的降低使海陆温差减小, 导致夏季风偏弱所造成的。Ramanathan et al. (2001, 2005) 指出由于气溶胶造成到达地面的太阳辐射减少, 使热带水循环减弱, 导致亚洲季风减弱。Menon et al. (2002) 发现黑碳气溶胶吸收太阳辐射加热大气, 并增强中国南部对流, 使中国南部季风降水增加, 北部减少。Gu et al. (2006) 发现因为硫酸盐气溶胶辐射效应, 7 月长江流域降水减少而在中国南部沿海降水增加, Menon et al. (2002) 所假设的单次散射反照率 0.85 与中国观测的 0.90 不一致, 说明中国区域气溶胶以散射特性为主的, 因此他认为这种降水型分布可能是中国区域各种气溶胶综合作用的结果。Liu et al. (2009)、孙家仁和刘煜 (2008a, 2008b) 对综合气溶胶直接效应的模拟发现, 中国区域的硫酸盐和黑碳的综合效应使得中国内陆普遍降温, 中国地区季风减弱, 降水减少, 并发现综合气溶胶作用以散射特性为主。Guo et al. (2013) 研究表明, 硫酸盐气溶胶可以导致海陆热力差异减弱从而减弱环流, 从太平洋和印度洋输送来的水汽都减少。Jiang et al. (2013) 发现硫酸盐和有机碳气溶胶导致的地

表降温增加了大气稳定度,抑制了对流降水,减少的海陆热力差异减弱了东亚夏季风。

目前气溶胶辐射效应对季风影响的研究主要还是针对东亚热带季风,并且通常是讨论整体季风变化,或是对夏季风降水变化的研究,而对于东亚季风的爆发,发展和结束进程有哪些作用还不是很清楚,特别是对副热带季风的影响研究较少。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(CAM5)结合美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)1950~2009年再分析资料研究硫酸盐气溶胶直接辐射效应对东亚副热带季风的爆发、发展和结束进程的影响。

2 模式介绍和试验设计

本研究中使用 NCAR 最新发布的 CAM5 模式(Neale et al., 2010)。化学和气溶胶机制选用 MOZART 机制(Emmons et al., 2010),该机制详细描述了对流层大气化学过程和气溶胶过程,包含了主要的气溶胶物种:硫酸盐、黑碳、有机碳、硝酸盐、沙尘和海盐。辐射机制为基于大气环流模式的快速辐射传输机制(RRTMG)(Iacono et al., 2008),机制将气溶胶分为 14 类进行辐射计算,包含每类气溶胶的吸湿特性以及在不同长短波波段和不同相对湿度下的吸收、散射、消光、单次散射反照率和不对称因子等辐射特性,可以很好地模拟各种气溶胶的直接辐射效应;并且,机制还包含气体、水汽和云的辐射计算。化学和气溶胶排放源来自于 Lamarque et al.(2010)的 IPCC AR5 排放清单。层状云微物理机制是一个双参数化方案,可预报水云和冰云的质量和数量混合比(Morrison and Gettelman, 2008; Gettelman et al., 2010)。气溶胶通过云滴活化过程影响层云微物理,在云滴活化的参数化公式中,云滴活化通过次网格垂直速度、气溶胶的粒径分布和垂直平均吸湿性的函数来实现(Abdul-Razzak and Ghan, 2000)。湿边界层湍流机制是基于 Bretherton and Park (2009)的机制。液态云宏观物理过程由 Park 等给出。这些机制使得模式可以很好的模拟气溶胶的直接、半直接和间接效应。

为研究硫酸盐气溶胶的直接辐射效应对东亚季风气候的影响,本文设计的试验是在不影响气溶胶间接效应的基础上,通过关闭模式中气溶胶直接

辐射过程来体现直接辐射效应的作用。我们设计了一组对比试验,其中控制试验为包含全部气溶胶的直、间接辐射过程的控制试验,记作有硫酸盐直接辐射效应试验(With),另外一个试验是关闭硫酸盐气溶胶直接辐射过程,保留硫酸盐气溶胶的间接辐射过程,其他条件与控制试验相同,记作无硫酸盐直接辐射效应试验(Without)。使用 With 与 Without 试验差值结果来表示硫酸盐气溶胶的直接辐射效应,模式积分 11 年,第一年为模式稳定时间,取后十年结果平均值进行分析。

根据上述提到的 20 世纪 70 年代末开始的东亚夏季风减弱,雨带南移的情况,本文还使用 NCEP/NCAR 的再分析资料来重现过去几十年里东亚气候,特别是东亚季风的变化,以及研究其与硫酸盐气溶胶负荷之间的关系。

NCEP/NCAR 再分析数据集采用了当今最先进的全球资料同化系统和完善的数据库,对各种来源(地面、船舶、无线电探空、测风气球、飞机、卫星等)的观测资料进行质量控制和同化处理,获得了一套完整的再分析资料集,广泛用于气候诊断分析、东亚季风、水分循环等各个方面的研究(Kalnay et al., 1996)。本研究使用 1950~2009 年的温度、纬向风和经向风再分析资料设计了一组对比,取 1950~1979 年 30 年每 5 天的候平均结果,代表 1980 年以前硫酸盐气溶胶浓度较低情况下的气候态,记为 BF1980;取 1980~2009 年 30 年每 5 天的候平均结果,代表 1980 年以后硫酸盐气溶胶负荷较高情况下的气候态,记为 AF1980,用这组对比结果来研究东亚季风的变化情况。

模式采用有线差分动力框架,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,模拟过程所采用的时间步长为 30 min。为了在研究气溶胶直接辐射效应中避免海洋表面温度变化对结果的影响,模式使用指定月平均气候态海表温度和海冰来进行模拟。

3 结果分析

已有很多研究者使用了不同的观测数据对 CAM5 模式模拟结果进行评估,包括气溶胶和云(Gettelman et al., 2010; Liu et al., 2012; 李鑫和刘煜, 2013)。本文首先检验模式对东亚季风的模拟能力,结果表明 CAM5 模式可以获取亚洲夏季风环流及其相关雨带的主要特征:南亚和东南亚低层

盛行西风,东亚低层盛行西南风,并且从海洋向东北亚存在一个向北的水汽输送,与邹松佐等(2012), Jiang et al. (2013) 等人验证结果一致, CAM5 模式在模拟东亚季风降水上与其他大气环流模式结果相似,区域分布比较一致,但还存在一定的偏差(图略)(Kang et al., 2002; Adler et al., 2003; Li et al., 2010)。

3.1 硫酸盐气溶胶直接辐射效应

图 1 为模拟的硫酸盐气溶胶在可见光波段的光学厚度年平均值及其沿 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 时间—纬度剖面图。模拟结果发现硫酸盐气溶胶光学厚度主要分布在东亚地区的陆地及邻近海洋上,以及印度半岛和中南半岛上,最大值出现在中国中部 30°N 附近的四川盆地地区,东亚大陆有着较高的硫酸盐气溶胶负荷。在时间序列图(图 1b)上可以看出,冬春季硫酸盐气溶胶主要分布在 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 范围内,在 30°N 附近的中国南方和四川盆地地区持续较高,春季达到最大,光学厚度达到 0.9 左右,从 18 候左右主要受华南前汛期的降水影响,光学厚度降低维持在 0.6 左右;进入夏季之后,由于东亚夏季风的作用,低层以西南气流为主,把气溶胶向北输送,光学厚度高值区北移至 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间,在华北地区出现高值中心。在初夏第 30 候左右开始,东亚热带夏季风开始爆发, 30°N 附近的中国大陆地区雨季爆发,降水对气溶胶有明显的清除作用。在仲夏时(7~8 月)降水减少,湿清除作用减弱,在充足水汽的情况下硫酸盐气溶胶吸湿增长,气溶胶持续积累,光学厚度增加。CAM5 模式模拟的硫酸盐气溶胶柱浓度、光学厚度的分布和季节变化特征与其他模式结果基本一致,模拟值处于各模式结果(柱浓度: $20\sim 60\text{ mg m}^{-2}$, 光学厚度: $0.5\sim 1.2$) 中间值(吴润等, 2005; Verma et al., 2006; 王体健等, 2010;

Wang et al., 2010; 吉振明等, 2010; 吴蓬萍和韩志伟, 2011; Pozzoli et al., 2011; Déandreis et al., 2012)。需要指出,模拟值与模式的分辨率相关,一般高分辨率模式模拟结果偏高,反之偏低。本文应用的 CAM5 模式的化学机制选用 MOZART 模块,有评估认为其中硫的液相氧化较快,导致夏季硫酸盐气溶胶模拟结果偏高(李鑫和刘煜, 2013)。

硫酸盐气溶胶为典型的散射性气溶胶,减少了到达地表的太阳辐射。中国大陆地区夏季高浓度的硫酸盐气溶胶直接辐射效应对太阳辐射有着很大程度的减少。图 2 为硫酸盐气溶胶直接辐射效应引起的地表净短波辐射通量、总云量、地表加热项和地表温度沿 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 时间—纬度剖面图。从图 2a 中可以看到,由于光学厚度和总云量随时间的变化,地表净短波辐射通量的差值也有相应的变化,这个变化是硫酸盐气溶胶散射太阳辐射以及其直接辐射效应引起的云量变化反馈所导致的结果。冬春季主要表现为 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 范围内的负辐射通量,夏季负辐射通量随气溶胶的北移而北移,在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 范围内产生了负辐射通量。在冬、春季还存在正的地表净短波辐射通量,这主要是受云量减少的影响,特别是在 18 候开始,在整个中国中东部有着正的辐射通量变化。图 2b 中等值线图为地表加热项随时间的变化,地表加热项由地表净辐射通量、潜热通量和感热通量组成。受硫酸盐气溶胶直接辐射效应的影响,在 20°N 以北的陆地上普遍为负通量,因此导致 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 平均地表温度在 20°N 以北陆地上普遍存在降温。

3.2 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

目前已有研究指出了东亚热带季风与副热带季风的区别与联系,何金海等(2007)和祁莉

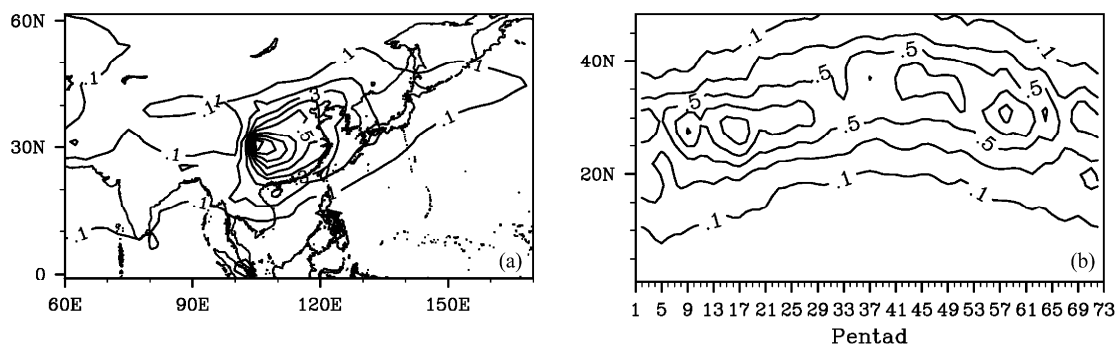


图 1 硫酸盐气溶胶在可见光波段的光学厚度的 (a) 年平均值和 (b) 沿 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 时间—纬度剖面

Fig. 1 (a) Annual average and (b) time-latitude cross section along the longitudes $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ for sulfate aerosol optical depth in visible band

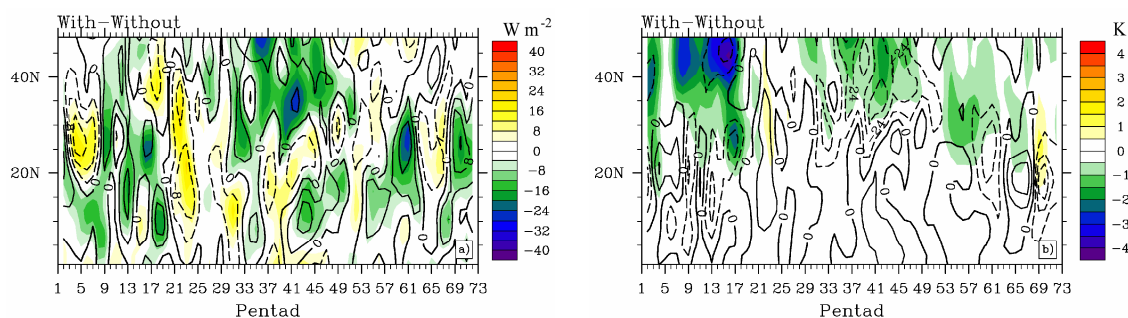


图2 硫酸盐气溶胶直接辐射效应引起的 (a) 地表净短波辐射通量 (填色, 单位: W m^{-2}) 和总云量百分比 (等值线, 单位: %), (b) 地表温度 (填色, 单位: K) 和地表加热项 (等值线, 单位: W m^{-2}) 沿 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 的时间—纬度剖面

Fig. 2 Time-latitude cross sections of (a) net solar radiation flux at surface (color, W m^{-2}) and total cloud cover (contour, units: %), (b) surface temperature (color, K) and ground heat fluxes (contour, W m^{-2}) change by the direct effect of sulfate aerosol along the longitudes $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ (dashed contours represent negative values)

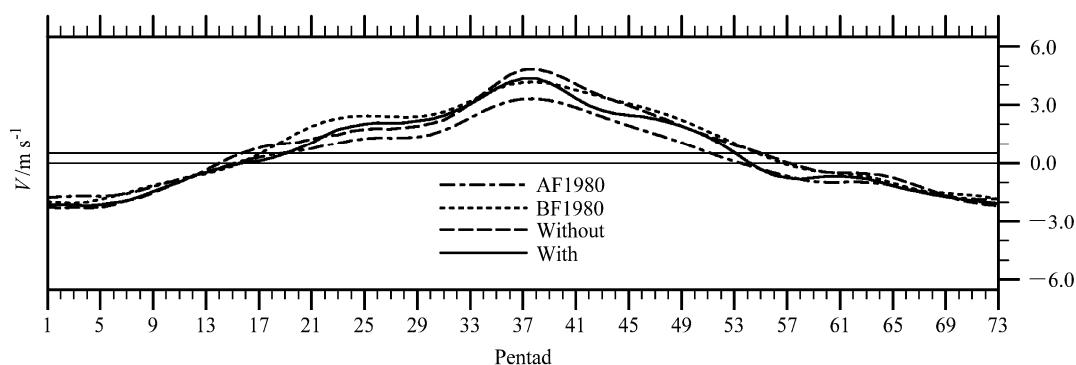


图3 副热带地区 ($27.5^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 平均经向风随时间变化 (单位: m s^{-1})

Fig. 3 Temporal evolution of the meridional wind (m s^{-1}) averaged over the subtropics ($27.5^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)

等 (2007) 分析发现东亚副热带夏季风建立早于热带夏季风, 于 3 月中旬开始建立。热带夏季风的建立时间取决于经向海陆热力差异转向, 而东亚副热带夏季风则依赖于纬向海陆热力差异的逆转。副热带夏季风的建立以偏南风的建立为特征, 而热带夏季风的建立以偏东风向偏西风的转变为特征。赵平等 (2007, 2008) 指出经向风的高、低层垂直切变以及相对应的低层南风加强在很大程度上是由东亚—西太平洋副热带的纬向热力差异变化引起的。

根据上述提出的基于纬向海陆热力差异是形成东亚副热带季风的基本推动力的观点, 副热带地区 ($27.5^{\circ}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$) 从偏北风转为偏南风的过程表明了东亚副热带夏季风的建立, 也就是经向风 V 由负转正的候数 ($V \geq 0 \text{ m s}^{-1}$), 并结合 Wang et al. (2004) 中关于热带季风爆发的判断, 经向风 V 转正后的未来 4 候平均风速大于 0.5 m s^{-1} 的候数作为副热带季风爆发的时刻, 而在偏南风转回偏北风时 ($V < 0 \text{ m s}^{-1}$), 定义为副热带季风结束。

根据上述东亚副热带季风爆发的判断标准, 首先对 NCEP/NCAR 的经向风再分析资料进行分析。从图 3 中可得到, 1980 年以前 (BF1980) 经向风在 17 候左右由偏北风转为偏南风, 此时副热带季风爆发, 在 57 候左右风向逆转, 由偏南风转换为偏北风, 副热带季风结束。1980 年以后 (AF1980) 的经向风在 20 候左右就开始转为偏南风, 副热带季风爆发; 54 候左右偏南风风向出现逆转, 副热带季风结束。因此, 1980 年后的副热带季风爆发延后 3 候左右, 而结束提前了 3 候左右。

在模拟的有硫酸盐气溶胶直接辐射效应 (With) 试验结果中, 副热带地区经向风在 20 候左右从偏北风完全转换为偏南风, 副热带季风爆发; 在 54 候左右偏南风转换为偏北风, 副热带季风结束。在无硫酸盐气溶胶直接辐射效应 (Without) 试验结果中, 在 16 候左右副热带季风爆发, 并在 57 候左右结束。因此, 硫酸盐气溶胶的直接辐射效应也导致东亚副热带季风爆发延后了 4 候左右, 并且提前结

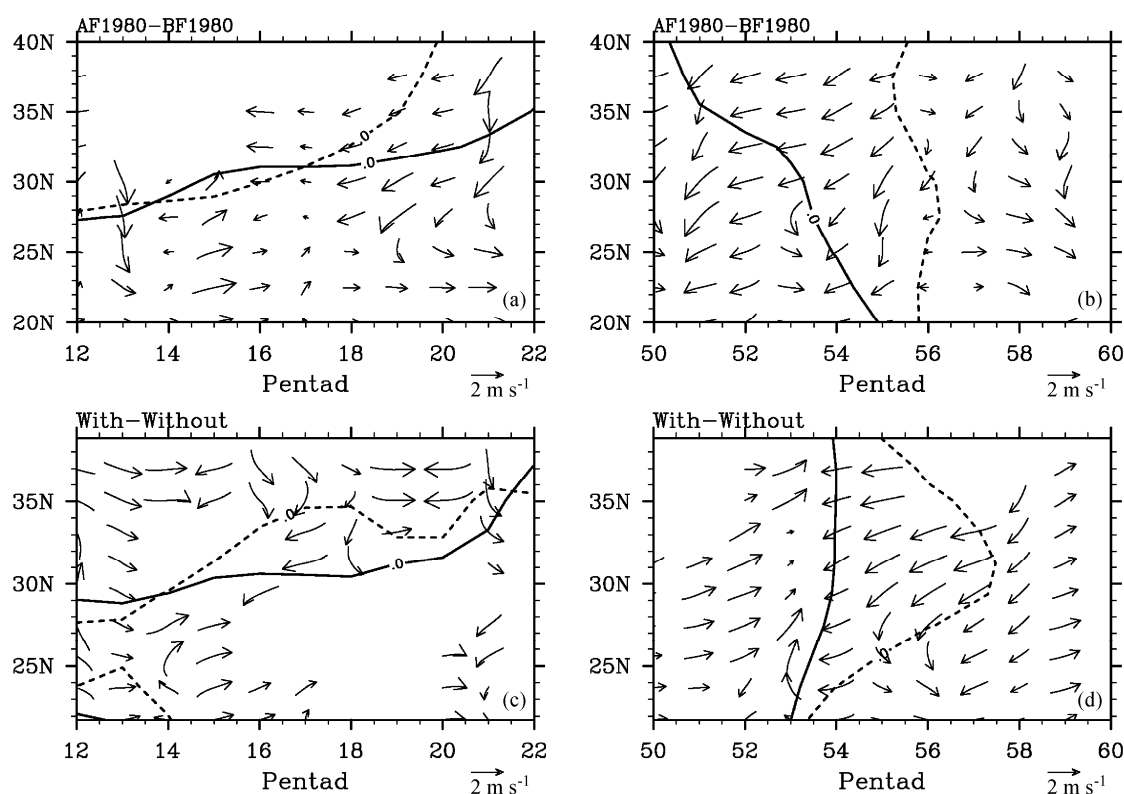


图4 东亚副热带季风爆发(左列)和结束(右列)(候)时期(a、b) AF1980与BF1980和(c、d) With与Without试验的850 hPa风场差值(单位: m s^{-1})和经向风 $V=0$ 线沿 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 时间-纬度剖面。图中实线分别表示 AF1980 与 With 试验, 虚线分别表示 BF1980 与 Without 试验(图中只显示置信度大于 90% 的部分)

Fig. 4 Time-latitude cross sections of the difference of 850 hPa wind fields (vector; m s^{-1}) between (a, b) AF1980 and BF1980, (c, d) experiments With and Without and the zero meridional wind (line) in the onset (left) and retreat (right) periods of the East Asian subtropical monsoon along the longitudes $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$. The solid/dashed line is AF1980/BF1980 in (a, b) and experiments With/Without in (c, d) (Only wind fields exceeding 90% confidence level of are shown)

束了 3 候左右。这个结果与 NCEP/NCAR 再分析资料中 BF1980 和 AF1980 的变化相一致, 并且模拟的副热带季风在爆发和结束的时间上, BF1980 与 Without 试验比较一致, 而 AF1980 与 With 试验结果比较一致。

在全年中, AF1980 的经向风在偏北风时期与 BF1980 相差不大, 但在转换为偏南风后, AF1980 的偏南风要比 BF1980 小了 0.74 m s^{-1} 左右。也就是说在过去的几十年里, 副热带地区偏南风减弱了。而在 With 与 Without 试验中也同样存在这样的现象, 但减少的量级没有那么大, 为 0.14 m s^{-1} 。

从爆发与结束时期的 850 hPa 风场差值和经向风 $V=0$ 线沿 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 时间-纬度剖面图中可以看出, 在副热带季风爆发阶段, 经向风 $V=0$ 线变化缓慢, 逐渐向北推进; 而在结束时迅速南撤。图 4a 中 AF1980 的经向风 $V=0$ 线向北推进比 BF1980 慢, 在图中的差值风场主要以偏北风差异为主, 说明

AF1980 的经向风从偏北风向偏南风的转换和北进比 BF1980 要慢。而在副热带季风结束阶段(图 4b), AF1980 的偏南风较早南撤, 图中差值风场还是以偏北风为主, 是由于 AF1980 偏南风提前减弱, 并且提前转为偏北风导致的。图 4c 的 With 与 Without 试验中经向风的变化与图 4a 比较接近, With 试验的经向风的转向和北进更慢; 在副热带季风结束时(图 4d), With 试验经向风提前反转南撤, 但是在经向风转换之前风场差值为偏南风, 经向风转换之后风场差值才转为偏北风, 这一现象可能与降水和云量的变化引起的华南地表增温有关。经向风的转换($V=0$ 线)在爆发时的缓慢北进和结束时的迅速南撤, 正符合了副热带季风渐进式建立, 撤退迅速的特点(何金海等, 2007)。

综上所述, 东亚副热带季风在 1980 年以后要比 1980 年之前爆发延后 3 候, 结束时提前 3 候。并且在副热带季风爆发后, 副热带地区的偏南风减

弱, 副热带季风系统性减弱。模拟的 With/Without 对照试验中, 东亚副热带季风也受硫酸盐气溶胶直接辐射效应所致而延后爆发, 偏南风减弱, 提前结束。因此, 硫酸盐气溶胶的直接辐射效应可能是导致东亚副热带季风延后爆发, 季风减弱和提前结束的原因之一。

3.3 硫酸盐气溶胶直接辐射效应对纬向海陆热力差异的影响

接下来我们讨论硫酸盐气溶胶直接辐射效应对副热带季风影响的可能机制。何金海等(2007, 2008)研究指出了东亚副热带季风的建立时间取决于纬向海陆热力差异的逆转。东亚地区各纬度基本

以 120°E 附近为纬向的冷暖区分界线, 并且 30°N 纬度带为增温和降压最快的地区。本文中选取东西两侧温度纬向偏差的高值区为关键区, $130^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 代表西太平洋海洋地区, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 代表东亚大陆地区, 得到了 30°N 纬度带上 850 hPa 的纬向海陆热力差异随时间变化图(图 5)和 30°N 西太平洋—东亚大陆 850 hPa 的温度纬向偏差的逐候变化图(图 6)。温度的纬向偏差定义为各经度上的温度与 $105^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 平均温度之差, 来反映海陆冷暖状况。

从图 5 中可以看出整个 850 hPa 30°N 纬带上的西太平洋与中国大陆地区的纬向海陆热力差异的季节逆转过程与东亚副热带夏季风的建立与发展

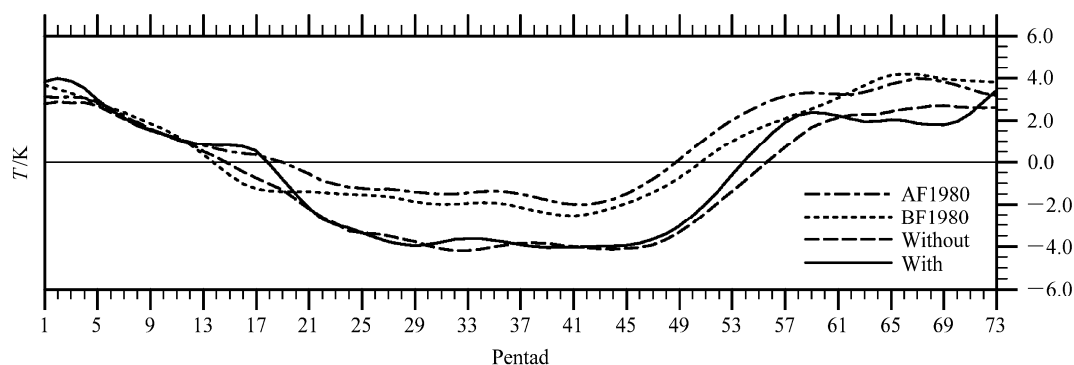


图 5 30°N 纬度带上 850 hPa 的纬向海陆热力差异的随时间变化 (单位: K)。海陆热力差异定义为西太平洋海洋地区 ($130^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 平均温度与东亚大陆地区 ($105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 平均温度之差

Fig. 5 Temporal evolution of the zonal land-sea thermal contrast (K) at 850 hPa at 30°N . Zonal land-sea thermal contrast is defined as the average temperature difference between the western Pacific Ocean ($130^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$) and the East Asian continent ($105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)

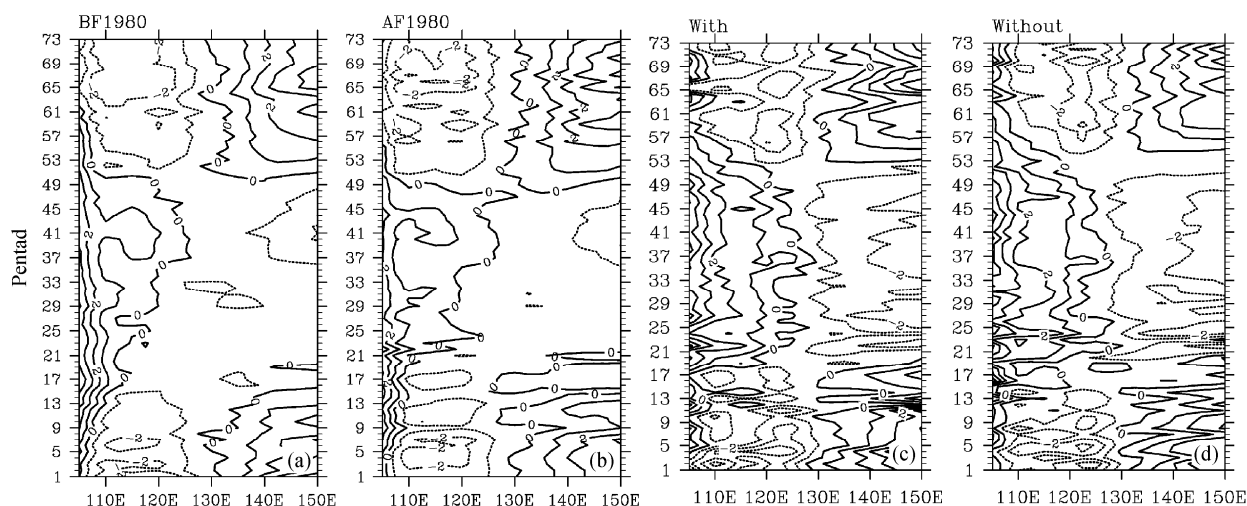


图 6 30°N 纬度带上 850 hPa 的温度纬向偏差的逐候变化 (单位: K): (a) BF1980; (b) AF1980; (c) With; (d) Without。温度的纬向偏差定义为各经度上的温度与 $105^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 平均温度之差 (虚线表示负值)

Fig. 6 Evolutions of air temperature zonal deviation (K) at 850 hPa at 30°N : (a) BF1980; (b) AF1980; (c) With; (d) Without. Zonal temperature deviation is defined as the temperature difference between the value at each longitude and the average for longitudes $105^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ (dashed contours represent negative values)

的进程基本一致: BF1980 在 30°N 纬带上的纬向热力差异在 14 候前后由正转负, 并在 51 候前后热力差异由负转正。AF1980 则在 19 候前后由正转负, 49 候前后再次逆转。相应的温度纬向偏差图可以看到, BF1980 (图 6a) 的海洋在 16 候以前为暖区, 16 候以后转为冷区, 51 候时再次转为暖区, 相对的陆地地区 16 候之前为冷区, 16 候以后转暖, 51 候后转冷。AF1980 (图 6b) 的海洋则在 19 候由暖转冷, 50 候逆转, 陆地则相反。海陆温差逆转时间与副热带季风的爆发和结束时间比较一致。在海陆热力差异由正转负后, AF1980 的热力差异要明显小于 BF1980, 这与图 3 中得到的偏南风减弱的结果相一致。

在 With 试验中 30°N 纬带上的纬向热力差异在 18 候左右由正转负, 在 54 候左右再次逆转; Without 试验中在 15 候左右开始逆转, 56 候左右由负转正。海洋与陆地的冷暖区转换也相应比较一致 (图 6c、d)。With 与 Without 试验结果对比发现, 硫酸盐气溶胶直接辐射效应造成的中国大陆地区普遍温度降低, 而海洋上温度变化不大, 导致春季时陆地增温变慢, 从冷区向暖区的转换过程延后, 导致了海陆热力差异逆转延后, 副热带季风爆发延后; 而在副热带季风结束时, 由于陆地的降温导致陆地提前由暖区转为冷区, 使海陆热力差异提前转换, 副热带季风提前结束。在海陆热力差异由正转负后, With 试验结果的热力差异整体上要比 Without 试验小, 与之前偏南风减弱的结果一致。相应的 30°N 纬带上的 500 hPa 纬向温度差也有相似的变化, 但在时间上更早 (图略)。

综上所述, 通过对 1950~2009 年 NCEP/NCAR 再分析资料分析海陆热力差异的年变化发现, 1980 年以后纬向海陆热力差异由正转负的时间延后, 由负转正的时间提前, 从而导致了副热带季风爆发延后, 结束提前, 并且热力差异在由正转负后减小, 导致经向偏南风的减弱。模拟结果中, 硫酸盐直接辐射效应通过降低陆地温度从而延后了由正转负的纬向热力差异逆转的时间, 并提前了由负转正的时间, 从而导致了副热带季风爆发延后, 结束提前, 并由于陆地的降温使海陆热力差异由正转负后减小, 经向偏南风减弱。陈隆勋等 (2004) 也指出在过去几十年里全球变暖情景下, 气溶胶辐射作用可以大部分解释四川及长江中游气温变冷带的存在。NCEP/NCAR 再分析资料中海陆热力差异由

负转正的时间整体比模拟结果提前, 这可能是由于实际海洋温度是变化的, 而模拟结果中使用的为气候态海温。

3.4 硫酸盐气溶胶直接辐射效应对副热带季风降水的影响

已有研究表明, 我国华南地区降水分为两个阶段, 一个以锋面降水为主, 另一个以对流降水为主, 副热带季风的爆发对应着华南前汛期降水的开始。陈隆勋等 (2000) 给出华南前汛期雨季开始期的雨带主要是冷空气和副热带高压西侧转向的西南风以及南亚地区冬春副热带南支西风槽中西风汇合而形成的, 是副热带季风雨季开始。何金海等 (2008) 指出, 16 候起显著的来自西太平洋向中国华南地区水汽输送带已经形成, 正是这一强水汽输送带前沿的辐合导致了 3 月下旬中国华南—江南地区降水量的显著增加。赵平等 (2007, 2008) 指出东亚—西太平洋副热带雨带明显早于热带, 副热带主要雨带不是由热带直接向北移来的, 更大程度上是在副热带季风发展过程中局地形成的。随着经向风转换为偏南风之后加强和向北移动, 偏南风前方的辐合和上升运动也加强并向北移动, 副热带降水也明显加强并向北移动。

上述提到, 受硫酸盐气溶胶直接辐射效应的影响, 东亚副热带季风爆发时间延后, 结束时间提前。那么, 副热带季风雨带也因此随着发生变化。图 7 给出了 With 试验的总降水率和 850 hPa 风场合成图及 With 与 Without 试验差值沿 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 时间—纬度剖面图。我们对比 With 和 Without 试验结果发现, 春初 (9 候开始) 降水均出现较早, 而由于 With 试验的偏南风转换和向北推进较慢, 因此在春初 (13~21 候), With 试验南风分量偏弱, 降水位置偏南, 降水差值显示硫酸盐气溶胶直接辐射效应导致春初 30°N 以南降水增加, 而 30°N 以北降水减少。

在南海季风爆发前 (30 候左右), Without 试验在 21 候 30°N 以南的华南地区开始产生超过 6 mm d^{-1} 的降水, 而有硫酸盐气溶胶试验中超过 6 mm d^{-1} 降水出现很晚 (26 候左右开始)。副热带季风发展时间的变化改变了水汽输送的发展, 并且由于偏南风的减弱, 在 850 hPa 水汽通量图中 (图 8), 存在着副热带季风爆发的延后, 水汽通量减弱的情况, 可以说明副热带季风发展时间的变化改变了水汽输送的发展。同时在季风爆发初期 (16~21 候) 也存

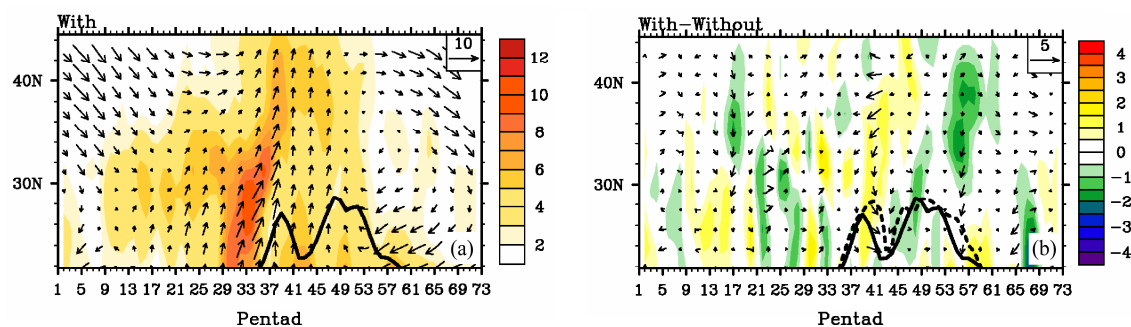


图7 (a) With 试验总降水率 (单位: mm d^{-1}) 和 850 hPa 风场 (单位: m s^{-1}) 及 (b) With 与 Without 试验总降水率 (单位: mm d^{-1}) 和 850 hPa 风场 (单位: m s^{-1}) 差值沿 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 时间—纬度剖面。其中, (a) 中实线和 (b) 中灰色实线 (With 试验)、灰色虚线 (Without 试验) 为 $125^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ 500 hPa $U=0$ 线

Fig. 7 Time-latitude cross sections of (a) precipitation rate (mm d^{-1}) and wind at 850 hPa (m s^{-1}) in experiment With and (b) the differences of precipitation rate (mm d^{-1}) and wind at 850 hPa (m s^{-1}) between experiments With and Without along the longitudes $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$. Solid line in (a) and grey solid (experiment With) and dashed (experiment Without) lines in (b) are the zero zonal wind at 500 hPa averaged over $125^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$

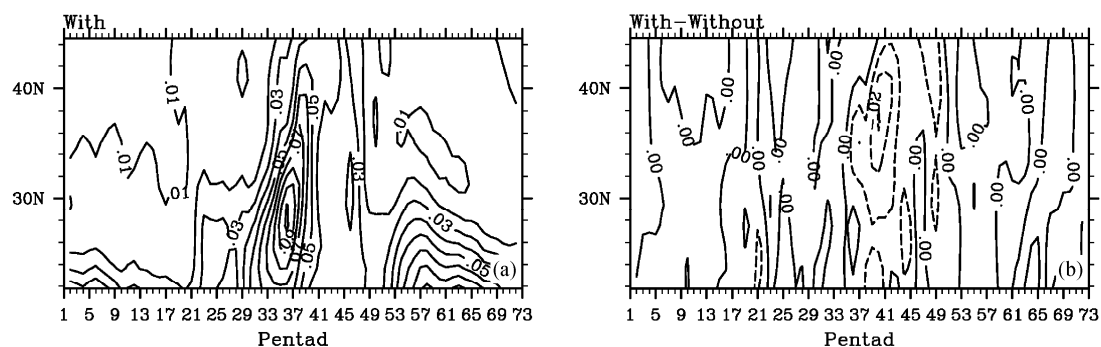


图8 (a) With 试验 850 hPa 水汽通量和 (b) With 与 Without 试验差值沿 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 时间—纬度剖面 (单位: $\text{g hPa}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。虚线表示负值

Fig. 8 Time-latitude cross sections of (a) water vapor flux at 850 hPa in experiment With and (b) the difference between experiments With and Without along the longitudes $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ (units: $\text{g hPa}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Dashed contours represent negative values

在季风减弱导致的水汽输送减少。这个结果与之前得到的副热带季风爆发延后相关, 雨季的延后爆发导致了 With 试验在春季的降水减少, 相应的云量减少, 到达地表的辐射增加, 这也解释了图 2 中提到的地表正辐射通量和增温的结果。

张庆云和陶诗言 (1999) 与吴国雄等 (2002) 研究指出, 使用 $125^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ 500 hPa 上副高系统中纬向风 $U=0$ 的东、西风分界线可以较好反映副高脊线位置的连续变化。南海季风爆发后, 副热带雨带向北移动, 在 With 试验中, 由于海陆温差的减少而导致偏南风减弱, 雨带向北移动比 Without 试验偏南, 图 7c 中副高脊线的第一次北跳提前, 并提前结束, 位置偏南, 第二次北跳时间延后, 使得雨带在华北地区停留时间较长, 导致仲夏 (7~8 月) 华北地区降水增加。

到了 53 候左右, With 试验中副高脊线提前南撤, 副热带季风也提前消退, 此时 Without 试验中

副热带季风以及降水还在维持, 因此副热带季风的提前消退导致了华北地区降水减少。

4 结论

本研究应用全球气候—大气化学模式 CAM5 模拟并结合 NCEP/NCAR 1950~2009 年再分析资料, 讨论硫酸盐气溶胶直接辐射效应对东亚副热带季风爆发、发展和结束进程的影响。主要结果如下:

(1) 硫酸盐气溶胶光学厚度主要分布在东亚地区的陆地及邻近海洋上, 最大值出现在中国中部 30°N 附近的四川盆地地区。夏季受东亚夏季风低层西南气流输送作用的影响, 光学厚度在华北地区出现高值中心。硫酸盐气溶胶为典型的散射性气溶胶, 与其引起的云量变化反馈共同导致东亚陆地上负的地表加热项, 其直接辐射效应引起东亚大部地表降温。

(2) 副热带季风爆发时间取决于纬向热力差异

的逆转。通过对 1950~2009 年 NCEP/NCAR 再分析资料分析西太平洋与东亚大陆的海陆热力差异的年变化发现, 1980 年后比 1980 年前纬向海陆热力差异由正转负的时间延后, 由负转正的时间提前, 导致了副热带季风爆发延后, 结束提前, 并且海陆热力差异减小, 引起东亚大陆偏南风减弱, 副热带夏季风系统性减弱。

(3) 硫酸盐直接辐射效应通过降低陆地温度从而延后了由正转负的纬向热力差异逆转的时间, 并提前了由负转正的时间, 从而导致了副热带季风爆发延后, 结束提前和偏南风的减弱。硫酸盐气溶胶直接辐射效应可能是导致 1980 年后副热带季风爆发延后, 结束提前和偏南风减弱的原因之一。

(4) 硫酸盐气溶胶直接辐射效应引起的副热带季风发展时间的变化导致了降水的变化。副热带季风爆发延后, 结束提前导致了东亚地区春初和秋季降水的减少。而夏季的降水变化与副热带高压的北跳有关。

研究中仅讨论了硫酸盐气溶胶直接辐射效应的作用, 而没有加入其它重要人为气溶胶如黑碳和有机碳气溶胶的作用, 并且没有深入讨论气溶胶的间接效应所引起的作用。对于偏南风减弱的机制讨论的还不是很详细, 关于热带季风和夏季风降水的变化分析较少, 没有分析气溶胶效应与西太平洋副热带高压“北跳”变化之间的机制, 在今后的工作中, 对上述工作进一步展开。

参考文献 (References)

- Abdul-Razzak H, Ghan S J. 2000. A parameterization of aerosol activation: 2. Multiple aerosol types [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D5): 6837–6844.
- Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present) [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 4 (6): 1147–1167.
- Bretherton C S, Park S. 2009. A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model [J]. *J. Climate*, 22 (12): 3422–3448.
- 陈隆勋, 李薇, 赵平, 等. 2000. 东亚地区夏季风爆发过程 [J]. *气候与环境研究*, 5 (4): 345–355. Chen Longxun, Li Wei, Zhao Ping, et al. 2000. On the process of summer monsoon onset over East Asia [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (4): 345–355.
- 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. *气象学报*, 62 (5): 634–646. Chen Longxun, Zhou Xiujie, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 634–646.
- Déandres C, Balkanski Y, Dufresne J L, et al. 2012. Radiative forcing estimates of sulfate aerosol in coupled climate–chemistry models with emphasis on the role of the temporal variability [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12 (12): 5583–5602.
- Ding Y, Wang Z, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, 28 (9): 1139–1161.
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: Possible causes [J]. *International Journal of Climatology*, 29 (13): 1926–1944.
- Emmons L K, Walters S, Hess P G, et al. 2010. Description and evaluation of the Model for Ozone and Related chemical Tracers, version 4 (MOZART-4) [J]. *Geosci. Model Dev.*, 3 (1): 43–67.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [M]// *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Gettelman A, Liu X, Ghan S J, et al. 2010. Global simulations of ice nucleation and ice supersaturation with an improved cloud scheme in the Community Atmosphere Model [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D18): D18216, doi:10.1029/2009JD013797.
- 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.: Atmos.* (1984–2012), 111 (D15), 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]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13 (3): 1521–1534.
- 何金海, 祁莉, 韦晋, 等. 2007. 关于东亚副热带季风和热带季风的再认识 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1257–1265. He Jinhai, Qi Li, Wei Jin, et al. 2007. Reinvestigations on the East Asian subtropical monsoon and tropical monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1257–1265.
- 何金海, 赵平, 祝从文, 等. 2008. 关于东亚副热带季风若干问题的讨论 [J]. *气象学报*, 66 (5): 683–696. He Jinhai, Zhao Ping, Zhu Congwen, et al. 2008. Discussions on the East Asian subtropical monsoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 683–696.
- 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.: Atmos.* (1984–2012), 113 (D13), doi:10.1029/2008JD009944.
- Jiang Y Q, Liu X H, 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: 51–63.
- 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.

- 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.
- Kang I S, Jin K, Wang B, et al. 2002. Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs [J]. *Climate Dyn.*, 19 (5–6): 383–395.
- 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]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10 (15): 7017–7039.
- Lefohn A S, Husar J D, Husar R B. 1999. Estimating historical anthropogenic global sulfur emission patterns for the period 1850–1990 [J]. *Atmos. Environ.*, 33 (21): 3435–3444.
- Li H M, Dai A G, Zhou T J, et al. 2010. Responses of East Asian summer monsoon to historical SST and atmospheric forcing during 1950–2000 [J]. *Climate Dyn.*, 34 (4): 501–514.
- 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]. *Geoscientific Model Development*, 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.
- 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 Xin, Liu Yu. 2013. Assessment of two aerosol modules of CAM5 [J]. *Journal of Applied Meteorology Science (in Chinese)*, 24 (1): 75–86.
- 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, Gettelman 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, Chen C C, Gettelman A, et al. 2010. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 5.0) [R]. Technical Note. NCAR/TN-486+STR. NCAR, Boulder, CO, USA.
- Pozzoli L, Janssens-Maenhout G, Diehl T, et al. 2011. Re-analysis of tropospheric sulfate aerosol and ozone for the period 1980–2005 using the aerosol–chemistry–climate model ECHAM5-HAMMOZ [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (18): 9563–9594.
- 祁莉, 何金海, 张祖强, 等. 2007. 纬向海陆热力差异的季节转换与东亚副热带季风环流 [J]. *科学通报*, 52 (24): 2895–2899. Qi Li, He Jinhai, Zhang Zuqiang, et al. 2007. Seasonal cycle of the zonal land–sea thermal contrast and East Asian subtropical monsoon circulation [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 52 (24): 2895–2899.
- Ramanathan V, Chung C, Kim D, et al. 2005. Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102 (15): 5326–5333.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 294 (5549): 2119–2124.
- Streets D G, Yu C, Wu Y, et al. 2008. Aerosol trends over China, 1980–2000 [J]. *Atmospheric Research*, 88 (2): 174–182.
- 孙家仁, 刘煜. 2008a. 中国区域气溶胶对东亚夏季风的可能影响 (I): 硫酸盐气溶胶的影响 [J]. *气候变化研究进展*, 4 (2): 111–116. Sun Jiaren, Liu Yu. 2008a. Possible effect of aerosols over China on East Asian summer monsoon (I): Sulfate aerosols [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 4 (2): 111–116.
- 孙家仁, 刘煜. 2008b. 中国区域气溶胶对东亚夏季风的可能影响 (II): 黑碳气溶胶及其与硫酸盐气溶胶的综合影响 [J]. *气候变化研究进展*, 4 (3): 161–166. Sun Jiaren, Liu Yu. 2008b. Possible effects of aerosols over China on East Asian summer monsoon (II): Black carbon and its joint effects with sulfate aerosols [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 4 (3): 161–166.
- Verma S, Boucher O, Upadhyaya H C, et al. 2006. Sulfate aerosols forcing: An estimate using a three-dimensional interactive chemistry scheme [J]. *Atmos. Environ.*, 40 (40): 7953–7962.
- Wang B, Zhang Y, Lu M M. 2004. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (4): 699–710.
- Wang Z L, Zhang H, Shen X S, et al. 2010. Modeling study of aerosol indirect effects on global climate with an AGCM [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (5): 1064–1077, doi:10.1007/s00376-010-9120-5.
- 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 Tijian, Li Shu, Zhuang Bingliang, et al. 2010. Study on the first indirect climatic effect of sulfate aerosol in China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 30 (5): 730–740.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京: 科学出版社, 314. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclone (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 314.
- 吴润, 罗燕, 王卫国. 2005. 东亚地区人为硫酸盐气溶胶辐射气候效应不同模拟方法的对比 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 27 (4): 323–331. Wu Jian, Luo Yan, Wang Weiguo. 2005. The comparison of different simulation methods for the climate responses of the radiative forcing of anthropogenic sulfate aerosol over East Asia [J]. *Journal of Yunnan University (in Chinese)*, 27 (4): 323–331.
- 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 Pengping, Han Zhiwei. 2011. A modeling study of indirect radiative and climatic effects of sulfate over East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (3): 547–559.
- 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.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 31 (22), doi:10.1029/2004GL02127.
- 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型 [J]. *地球物理学报*, 48 (4): 789–797. Yang Xiuqun, Xie Qian, Zhu Yimin, et al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 48 (4): 789–797.

- Zhao P, Zhang R H, Liu J P, et al. 2007. Onset of southwesterly wind over eastern China and associated atmospheric circulation and rainfall [J]. *Climate Dyn.*, 28 (7–8): 797–811.
- Zhu Q G, He J H, Wang P X. 1986. A study of circulation differences between East-Asian and Indian summer monsoons with their interaction [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 3 (4): 466–477.
- 张庆云, 陶诗言. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究 [J]. *气象学报*, 57 (5): 539–548. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57 (5): 539–548.
- 赵平, 周秀骥. 2006. 近 40 年我国东部降水持续时间和雨带移动的年代际变化 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 548–556. Zhao Ping, Zhou Xiujie. 2006. Decadal variability of rainfall persistence time and rain belt shift over eastern China in recent 40 years [J]. *Journal of Applied Meteorology Science (in Chinese)*, 17 (5): 548–556.
- 赵平, 周秀骥, 陈隆勋, 等. 2008. 中国东部—西太平洋副热带季风和降水的气候特征及成因分析 [J]. *气象学报*, 66 (6): 940–954. Zhao Ping, Zhou Xiujie, Chen Longxun, et al. 2008. Characteristics of subtropical monsoon and rainfall over eastern China and western North Pacific and associated reasons [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (6): 940–954.
- 邹松佐, 郭品文, 沙天阳, 等. 2012. 利用 CAM5.1 模拟中国东部大规模城市化对东亚地区夏季大气环流及降水分布的影响 [J]. *气象科学*, 32 (5): 473–481. Zou Songzuo, Guo Pinwen, Sha Tianyang, et al. 2012. Simulations of the impact of the large-scale urbanization in eastern China on the atmospheric circulation and rainfall distribution around eastern Asia using CAM5.1 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 473–481.