

文章编号: 1673-1719 (2008) 03-0161-06

# 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

孙家仁<sup>1,2</sup>, 刘煜<sup>1</sup>

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

**摘要:** 利用NCAR的新一代GCM CAM3.0模式耦合一个气溶胶同化系统, 研究了中国区域黑碳气溶胶的直接气候效应。结果显示, 中国区域黑碳气溶胶引起全球平均辐射强迫为 $0.13 \text{ W/m}^2$ , 导致除了青藏高原和广西以外的中国大部分地区降温, 其中东北、四川和内蒙古中北部降温最显著。由此造成海陆温差缩小, 气压差降低, 从而总体上使东亚夏季风减弱。但与硫酸盐气溶胶的影响相比, 黑碳气溶胶使季风减弱的程度较小, 长江中下游地区的降水有所增加。黑碳气溶胶加强了中国东南部地区的对流活动, 这与硫酸盐气溶胶的作用相反。同时, 探讨了中国区域硫酸盐和黑碳气溶胶的综合直接气候效应。结果表明, 硫酸盐和黑碳气溶胶的综合作用与仅有硫酸盐气溶胶的情形十分相似, 降水变化的区域也和硫酸盐的保持一致。

**关键词:** 黑碳气溶胶; 硫酸盐气溶胶; 东亚夏季风; 对流活动

**中图分类号:** X6/P402/P467 **文献标识码:** A

## 引言

黑碳(BC)气溶胶的光学性质与其他气溶胶不同, 它具有独特的吸光特性, 通过对太阳辐射的强吸收而起到加热大气的作用。IPCC第四次评估报告(AR4)<sup>[1]</sup>给出了化石燃料燃烧产生的BC的直接辐射强迫范围是 $(0.20 \pm 0.15) \text{ W/m}^2$ 。

本文与硫酸盐气溶胶的影响研究<sup>[2]</sup>出于同样目的, 想了解中国地区黑碳气溶胶对东亚夏季风的影响, 着重讨论与硫酸盐的不同之处。同时, 也研究了相同情况下中国地区“综合气溶胶”(即中国地区黑碳和硫酸盐气溶胶)对东亚夏季风的影响, 进一

步了解多种气溶胶的综合作用。

本文使用的资料、模式及模式检验方法与文献[2]相同, 此处从略。

## 1 试验方案

为了研究中国地区人为BC气溶胶对气候的影响, 设计了1个对照试验和1个敏感试验。在对照试验中, 模式包括了全球5种类型的气溶胶, 即硫酸盐、沙尘、海盐、有机碳和黑碳气溶胶。在敏感试验中, 中国地区没有BC气溶胶, 其他条件与对照试验相同。为了研究中国地区黑碳和硫酸盐气溶胶(称

收稿日期: 2007-04-09; 修订日期: 2007-12-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB403707)资助

作者简介: 孙家仁(1978-), 男, 硕士, 主要从事大气化学数值模拟研究。E-mail: sjrwt@163.com

之为综合气溶胶)对气候的综合影响,设计了另一个敏感试验。在此敏感试验中,中国地区没有BC和硫酸盐气溶胶,其他条件与对照试验相同。模式模拟55 a,舍弃前15 a,取后40 a模拟结果进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 黑碳气溶胶的气候效应

由模式最低层中国地区黑碳气溶胶的柱浓度分布(图略)可知,黑碳气溶胶浓度分布与硫酸盐气溶胶十分类似,只是浓度值约低一个量级。在四川盆地存在一个BC高值中心,冬季浓度可达 $2.5 \text{ mg/m}^2$ ;由华南,经华中和华北直到东北地区存在一个西南-东北走向的BC气溶胶高值带,其高值中心位于山东和河南地区,冬季中心值约为 $1.4 \text{ mg/m}^2$ ;在新疆的喀什、叶城和阿克苏一带存在一个高值中心,冬、夏中心浓度皆可达 $0.2 \text{ mg/m}^2$ 左右。显然,该浓度分布在中东部地区与田华等<sup>[3]</sup>给出的光学厚度分布比较一致。

模拟的中国地区黑碳气溶胶40 a全球平均总辐射强迫为 $0.13 \text{ W/m}^2$ ;地表平均降温约 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$ ;全球平均表面气压升高约 $0.03 \text{ Pa}$ ;40 a平均年降水量降低 $1.75 \text{ mm}$ ,变化很小,可忽略不计。与硫酸盐气溶胶不同,BC没有形成硫酸盐那样强的北半球带状地表降温区,但是在中国中东部地区四季都有降温。从降温强度的季节变化来看,夏、秋季降温较小,降温大值区偏北;而冬、春季降温较显著,降温极值区偏南,主要集中在四川、贵州、云南一带,可达 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (图略)。

图1(a, b)是中国地区BC引起的夏季地表温度和气压变化。从图1(a)中可以看到,BC的总辐射强迫引起了除青藏高原、新疆中部、云南、广西等地区升温以外,中国其他地区普遍降温。其中,东北地区南部到内蒙古东部一带降温最显著,可达 $0.4 \sim 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;内蒙古中部与蒙古国交界处亦出现小范围强降温,达 $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ;四川盆地的降温值在 $0.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。整体来看,BC引起的大陆降温范围不如硫酸盐的影响那么广阔,其中,四川盆地和北方地区降温显著,东部沿海地区降温不大。同时,海洋上温度基本保持不

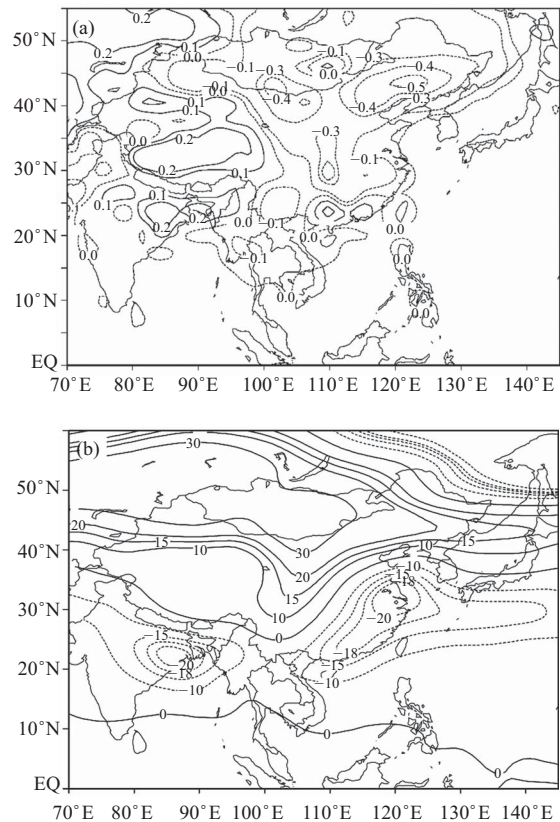


图1 中国区域BC引起的夏季地表温度(a;  $^\circ\text{C}$ )和地表气压(b; Pa)变化

Fig. 1 Changes in summer surface temperature (a;  $^\circ\text{C}$ ) and pressure (b; Pa) induced by black carbon (BC) aerosols in China

变,由此使得海陆热力差异减小。从图1(b)地表气压场变化可见,中国西部和北部地区气压升高 $10 \sim 30 \text{ Pa}$ ,东南部及其沿海气压降低,长江入海口处降压最显著,可达 $20 \text{ Pa}$ 。

图2是中国地区BC引起的夏季850 hPa风场的变化。由图可见,中国地区BC使得经南海转向的西南季风增强,由印度北部过高原南侧吹向中国内陆的偏南和偏西南气流减弱,经副热带高压南侧转向的东南季风也减弱。这几个地区的气流变化在中国的长江流域及江南地区产生一个气旋性的流场,使得中国地区长江中下游的日降水量约增加 $0.2 \text{ mm}$ (如图3)。另外,在高纬地区,从副热带高压北侧流出中国大陆的副热带西南季风气流也明显减弱;中国东部偏南气流减弱显著,内陆风速减小。由以上气流变化可知,副热带高压减弱,南退东缩。图4(a, b)是BC气溶胶引起的夏季积云降水和大尺度降水



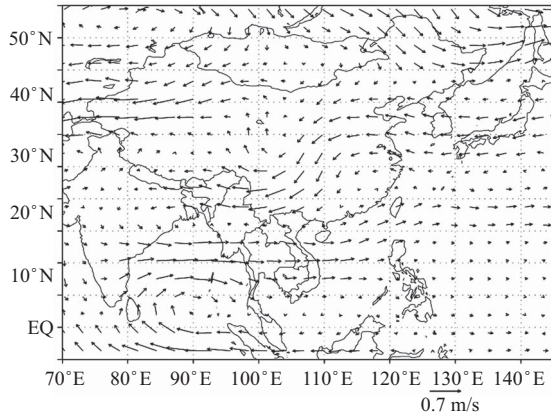


图2 中国区域BC引起的夏季850 hPa风场(m/s)变化  
Fig. 2 Changes in summer horizontal wind (m/s) at 850 hPa induced by BC aerosols in China

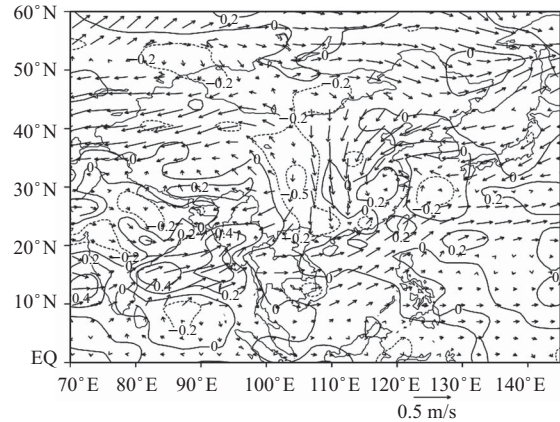


图3 BC引起的地面日总降水量(mm)和风场(m/s)变化  
Fig. 3 Changes in daily precipitation (mm) and surface horizontal wind (m/s) induced by BC in China

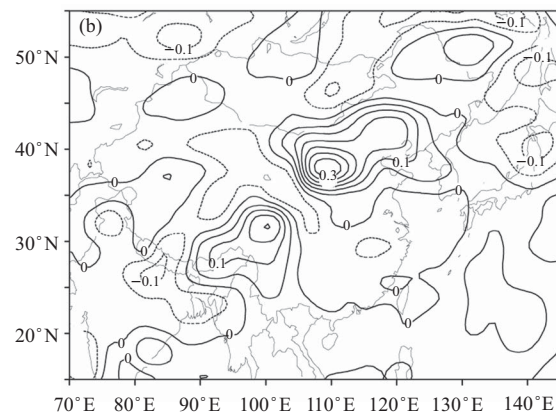
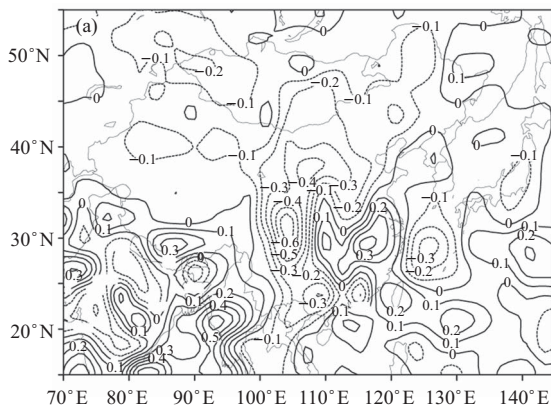


图4 BC引起的夏季(6—8月)日降水量(mm)变化  
(a) 积云降水, (b) 大尺度层云降水

Fig. 4 Changes in daily precipitation (mm) in summer induced by BC aerosols  
(a) convective precipitation, (b) large scale precipitation

的变化。由图3和图4的降水场对比可见,总降水变化和积云降水变化水平分布(图4a)基本一致,而与层云降水分布(图4b)不同。由此表明,BC气溶胶主要对积云降水起作用,而对层云降水影响较小,这一特征与硫酸盐气溶胶类似。另外可见,虽然长江中下游地区降水增加,但是中国西南地区 and 北方地区降水减少,其中四川盆地减少最显著,日降水量减少0.5 mm左右。与硫酸盐气溶胶类似,总降水变化和积云降水变化的水平分布基本一致,BC气溶胶主要对积云降水起作用,而对层状云降水影响较小。

利用与文献[2]类似的方法,从垂直环流的角度分析。图5是 $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 纬向平均的垂直环流和温度的变化,可以看到,由于BC正辐射强迫对大气的加热作用, $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 上空出现较深厚的升温区, $40^{\circ}\text{N}$ 以北有深厚降温区。但降温区不如硫酸盐气溶胶造成的降温区那么深厚和宽阔,最高不超过250 hPa,且对流层中上层降温较显著。由于升温区域的不稳定加热作用,使得南方流入的气流上升运动加强,有利于对流活动的发展。气流在低层辐合,使中国东南地区地表气压降低(图1b),流场呈现气旋性变化趋势(图2)。相反,其北部变冷空气下沉运

动加强并向南补充,使原来北进的气流受阻减弱。从强度上来看,BC对北方地区上空的降温作用比硫酸盐的弱。此外,计算得出BC使得西南季风强度指数<sup>[4]</sup>减小了2.85%,东南季风强度指数减小了6.18%,两个指数减小率都小于由硫酸盐气溶胶引起的相应变化。

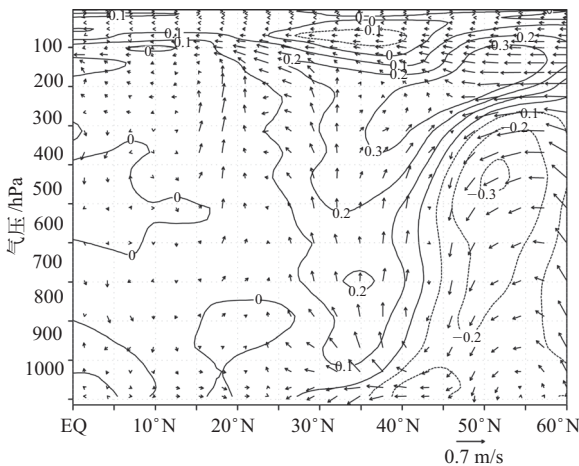


图5 中国区域BC气溶胶引起的夏季105°~120°E纬向平均的垂直经圈环流和温度廓线(°C)变化

Fig. 5 Height-latitude cross section of changes in the summer meridional circulation (m/s) and temperature (°C) averaged over 105°~120°E induced by BC in China

图6(a, b)给出500 hPa和850 hPa高度上的温度变化,由图可见,在500 hPa上,BC引起中国45°N以北温度降低,主要在东北地区降温显著;45°N以

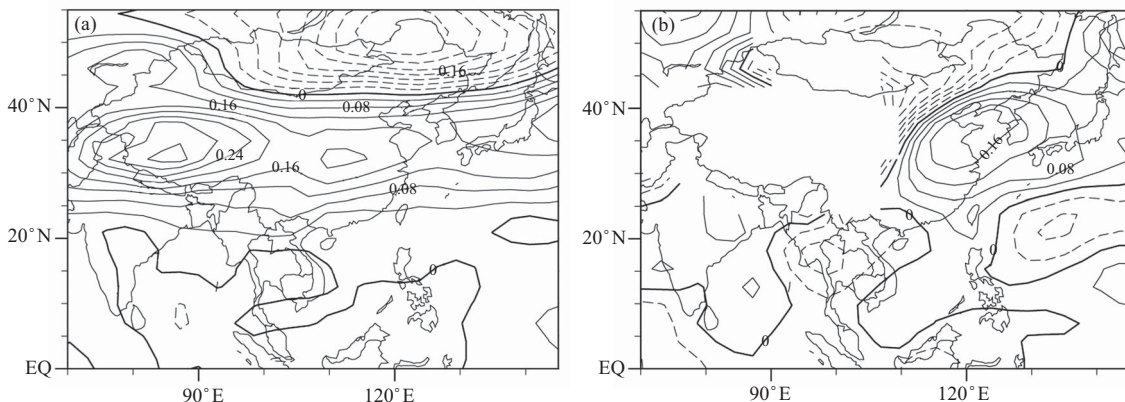


图6 BC引起的夏季500 hPa (a)和850 hPa (b)温度变化

Fig. 6 Summer 500 hPa (a) and 850 hPa (b) temperature changes induced by BC aerosols in China

南温度升高,其中在25°~40°N存在一条升温高值带,青藏高原加热作用引起的温度升高在这条带状区中较为显著。850 hPa上模拟显示,BC引起中国东部及其沿海地区温度显著升高,而西部、北部地区温度降低。对比BC引起的这两层的温度变化可知,与对流层中高层(500 hPa)相比,中国东部(主要是胶州半岛一带)低层(850 hPa)升温较显著,所以这一带大气的不稳定度有增强趋势。由夏季的地面降水变化(图4a)亦可见,由于对流不稳定性的增强,中国东部地区对流性降水增加。中国其他地区,与对流层中高层相比,低层降温或升温不显著,对流不稳定性减弱,对流性降水亦相应减少(如图4a)。结合图1(a)可知,BC引起中国地表气温普遍下降,可以引起对流层底层大气层结稳定性增强,但是该稳定层比较浅薄,因此它可能不是影响大气层结稳定性的主要因素。中国东部仍以对流活动增强为主,BC的温度模拟与硫酸盐的差异是由它们对光的不同吸收特性造成的。

### 2.2 综合气溶胶的气候效应

40 a平均的综合气溶胶对全球温度的影响与仅有硫酸盐的情况十分相似,即对北半球降温贡献比较大,存在北半球强降温带,最强降温区在西北太平洋(30°~50°N, 180°~230°E)海域,降温可达2~4°C。全球地表平均降温约0.03°C,气压升高约0.3 Pa,全球平均日降水量降低约0.17 mm。

从模拟的水平和垂直环流形势变化上可以看到,综合气溶胶对东亚夏季风有减弱作用,这与硫酸盐气溶胶的作用十分相似。对季风的减弱程度可以从季风强度指数的定量计算上反映出来,计算得到的西南风强度指数减小了5.15%,东南季风强度指数减小了10.04%。另外,温度及降水变化的区域也和硫酸盐的效应十分吻合。综合气溶胶对季风产生削弱作用的主要原因,同样是由于辐射强迫对陆地表面的降温作用引起了海陆温差和气压差的减小,从而使大气环流发生变化,导致季风强度的减弱。

### 3 结论与讨论

中国区域黑碳气溶胶对东亚夏季风的影响比硫酸盐气溶胶复杂。热带西南季风的增强带来了长江中下游积云降水的增加;西太平洋上东南季风和副热带西南季风的减弱,使得副高减弱南退,中国大陆中高纬地区降水减少。利用与文献[2]相同的季风指数进行定量衡量,计算得出BC使西南季风强度指数减小了2.85%,东南季风强度指数减小了6.18%,两个指数减小率都小于由硫酸盐气溶胶引起的指数减小率。与硫酸盐的影响不同,BC使中国东南部地区对流活动加强,对流性降水增加,这是中国地区出现“南涝”现象的重要机制之一。同时,黑碳和硫酸盐气溶胶都使得中国地区出现“北旱”现象。

由中国区域硫酸盐和黑碳气溶胶的模拟试验结果可以看到,硫酸盐气溶胶造成中国区域大部分地区降温,降水减少,夏季风减弱,对流活动受到抑制。硫酸盐气溶胶代表了散射性气溶胶的作用。而黑碳气溶胶的影响代表了吸收性气溶胶的影响。中国区域硫酸盐和黑碳气溶胶的综合作用表明,综合气溶胶对东亚夏季风同样有减弱的作用,这种作用与仅有硫酸盐的情形十分相似,降水变化的区域也和硫酸盐的情况比较一致。对季风产生削弱作用的原因,也主要是由于辐射强迫对陆地表面的降温作用引起的海陆温差和气压差减小,从而使大气环流发生变化,减弱了季风强度,即多种气溶胶的综合作用并不是它们作用的线性叠加,而是取决于多种气溶胶的总体性质是属于散射性质的(如硫酸盐气

溶胶)还是吸收性质的(如黑碳气溶胶)。这表明,多种气溶胶的总体性质是决定气溶胶综合作用的关键。在中国区域硫酸盐和黑碳气溶胶的综合作用基础上,如果再将具有散射性质的有机碳气溶胶考虑进去,中国区域气溶胶的总体性质可能具备散射性特征,这可能与Menon等<sup>[5]</sup>的假设“中国地区气溶胶是吸收性的”所得到的气候效应的认识完全不同。

本文所得结论和Lau等<sup>[6-7]</sup>的印度次大陆气溶胶对东亚夏季风的加强机制作用不同。由此表明,只考虑通过印度次大陆及其周边地区吸收性气溶胶的排放来推断东亚夏季风增强可能有一定的局限性,若与中国区域硫酸盐和黑碳气溶胶结合起来考虑可能更加合理。

本研究只讨论了黑碳气溶胶的直接气候效应,而没有考虑气溶胶的间接作用和气候场对气溶胶的反馈作用,这些将在今后的工作中得以改进。■

### 参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007
- [2] 孙家仁,刘煜. 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, 2008, 4(2): 111-116
- [3] 田华,马建中,李维亮,等. 中国中东部地区硫酸盐气溶胶直接辐射强迫及气候效应的数值模拟[J]. 应用气象学报, 2005, 16(3): 322-333
- [4] 乔云亭,陈烈庭,张庆云. 东亚季风指数的定义及其与中国气候的关系[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 69-82
- [5] Menon S, Hanson J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 2002, 297: 2250-2253
- [6] Lau K M, Kim M K, Kim K M. Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: the role of the Tibetan Plateau [J]. Climate Dyn., 2006, 26: 855-864, doi:10.1007/s00382-006-0114-z
- [7] Lau K M, Kim K M. Observational relationships between aerosol and Asian monsoon rainfall, and circulation [J]. Geophys. Res. Lett., 2006, 33, L21810, doi:10.1029/2006GL027546



## Possible Effects of Aerosols over China on East Asian Summer Monsoon (II): Black Carbon and Its Joint Effects with Sulfate Aerosols

Sun Jiaren<sup>1,2</sup>, Liu Yu<sup>1</sup>

(1 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;*

2 *South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China*)

**Abstract:** The direct effects of black carbon (BC) aerosols over China on East Asian summer monsoon have been investigated using the latest version of general circulation model (GCM) CAM3.0 developed by NCAR/UCAR, which is coupled with an off-line aerosol assimilation system. The model results show that BC aerosols over China can bring about a global average radiative forcing of  $0.13 \text{ W/m}^2$ , resulting in the decrease of land surface temperature in most of China except for Qinghai, Tibet and Guangxi provinces where the surface temperature increased. Therefore, the differences in surface temperature and pressure between land and sea reduce, which finally weakens East Asian summer monsoon. BC aerosols have less effect on weakening monsoon intensity compared with sulfate aerosols. However, it increases precipitation, especially convective precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River. On the contrary to sulfate aerosols, BC aerosols enhance the convective activities in the southeast of China. Besides, the joint effect of BC and sulfate aerosols over China has also been studied. The model results indicate that the synthetic effect of sulfate and BC aerosols is similar to that of sulfate aerosols only, and precipitation changes induced by the joint effect are also consistent with those by the sulfate aerosols effect.

**Key words:** black carbon aerosols; sulfate aerosols; East Asian summer monsoon; convective activity