大气科学学报　2021 年　第 44 卷　第 4 期:507-517

论 著

http://dqkxxb.cnjournals.org

华南黑碳气溶胶浓度与南海夏季风关系的年代际突变

郑彬[①②*],黄燕燕[①②],谷德军[①②],林爱兰[①②],李春晖[①②]

① 中国气象局 广州热带海洋气象研究所,广东 广州 510641;

② 广东省区域数值天气预报重点实验室,广东 广州 510641

*联系人,E-mail:zbin@gd121.cn

2019-11-08 收稿,2020-03-15 接受

国家重点研发计划项目(2018YFC1505801);广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515011399;2019A1515011808)

摘要　利用重建的华南区域黑碳气溶胶(Black Carbon,BC)浓度资料,分析其与南海夏季风在年际尺度上的关系。结果表明,华南区域 BC 浓度与南海夏季风的关系在 2000 年前后有明显的突变,由显著负相关变为显著正相关,即由高 BC 浓度弱季风变为高 BC 浓度强季风。通过合成对比分析,发现 1988—1999 年(第一时间段)的华南 BC 主要气候效应是间接辐射强迫作用:华南 BC 使云粒子半径减小,抑制华南区域春季降水,增加了云的生命期,从而使到达地面的短波辐射减少,表面和低层大气降温。负温度异常激发了异常反气旋,在南海区域即有东风异常。到夏季,东风异常减弱了季风强度,同时抑制了南海地区的降水。2000—2010 年(第二时间段)的华南 BC 主要气候效应是直接辐射强迫作用:春季高 BC 浓度通过直接气候效应,增暖大气,加强降水,但是雨日减少,从而使到达地面的短波辐射增多,表面和低层大气增温。正温度异常激发了异常气旋,在南海区域即有西风异常一直维持到夏季,增大了季风强度,同时增强了南海地区的降水。

关键词

黑碳气溶胶;

南海夏季风;

直接效应;

间接效应;

华南

大气气溶胶作为全球变化的重要强迫因子,因其全球气候效应而成为科学家们广泛关注的一个重要研究领域,并且已经成为当前国际全球变化研究的热点问题之一。气溶胶粒子影响地球大气辐射平衡和云雨过程,这两种过程都会引起气候变化。一方面,气溶胶粒子直接通过吸收和散射太阳辐射,改变地-气系统的能量收支;另一方面,气溶胶粒子还作为云的凝结核(CCN)改变云的光学和微物理特性,甚至云结构、生命期和降水,改变地球水循环(李占清,2020)。

季风活动引起的洪涝干旱等自然灾害威胁着全球超过 60%的人口,因此气溶胶辐射强迫对大尺度季风系统的影响也越来越受到关注(陈明诚等,2014;王东东等,2017;史湘军等,2020a;2020b)。季风作为气候系统中最主要也最活跃的组成部分,其形成与演变取决于系统外部强迫和系统内部反馈。季风的基本推动力包括太阳辐射季节变化、海陆热力差异和大气中湿过程等,而气溶胶可以改变几乎所有这些驱动季风的基本推动力。已有研究表明,气溶胶辐射强迫可以影响全球所有季风区的降水量或雨带分布,例如:南亚季风区(Devara et al.,2003;Chen et al.,2007;Wang et al.,2009)、东亚季风区(Gu et al.,2006;Huang et al.,2007)、澳大利亚季风区(Rotstayn et al.,2007)、非洲季风区(Solmon et al.,2008;Huang et al.,2009)和南美季风区(Lin et al.,2006)。黑碳气溶胶(Black Carbon,BC)是吸收性气溶胶,作为气候变暖的重要角色(Ramanathan et al.,2002),其直接辐射强迫仅次于二氧化碳(Ramanathan and Carmichael,2008),它对季风的影响与其他散射性气溶胶有很大区别。

引用格式:郑彬,黄燕燕,谷德军,等,2021.华南黑碳气溶胶浓度与南海夏季风关系的年代际突变[J].大气科学学报,44(4):507-517.

Zheng B,Huang Y Y,Gu D J,et al.,2021.Interdecadal change in the relationship between black carbon aerosol over southern China and South China Sea summer monsoon[J].Trans Atmos Sci,44(4):507-517.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191108012.(in Chinese).

对于南亚季风，Lau et al.（2006）提出了吸收性气溶胶的高层加热泵（Elevated Heat Pump，EHP）效应。首先，吸收性气溶胶使青藏高原南坡上的空气加热，吸引了更多的印度洋暖湿水汽的从低层补充；同时，由于地面的冷却抑制了对流，从而更可以使暖湿空气向喜马拉雅山脚深入，并引起该处的更多降水；由于更多的降水引起该处更多的加热，从而又吸引更多的暖湿空气汇入，形成一个正反馈，导致南亚季风提早爆发。一些观测资料分析（Satheesh et al.，2008）和模式研究（Collier and Zhang，2009）也证实了南亚季风区的 EHP 效应。而夏季，与黑碳气溶胶相关的高空稳定的加热层，形成一个由北指向南的温度梯度，有利于南亚夏季风的增强（王志立等，2009）。但是 Collier and Zhang（2009）的研究也指出，气溶胶辐射强迫将导致季风爆发前南亚地区表面短波辐射减小而降水增多，从而导致低层大气的冷却，并形成异常反气旋，最终对 6—7 月活跃期的南亚夏季风是一种负反馈效应。甚至在 5 月，Nigam and Bollasina（2010）也认为 EHP 理论并不符合观测事实。例如，5 月气溶胶标准差中心并不在喜马拉雅南坡，而是在北印度-刚果平原以南。此外，更重要的是气溶胶与表面温度以及降水的关系也与 EHP 理论相反。

BC 对东亚季风的影响也没有定论。有研究认为 BC 的直接效应加热大气，使大气变得不稳定，对流加强，从而降水增多。例如，Menon et al.（2002）就将 20 世纪后半叶的中国南涝北旱归因于 BC 的直接辐射强迫。Liu et al.（2010）的模式模拟研究结果也指出 BC 使华南降水增加，华北降水减少。但是，也有不少研究认为 BC 的直接辐射强迫使陆地表面变冷，海陆热力对比减小，从而使亚洲季风减弱（孙家仁和刘煜，2008，Liu et al.，2009）。此外，Wang（2004）的研究表明 BC 对降水的影响具有很大的不确定性，但总体是使云量增多。这与 Ackerman et al.（2000）的结论正好相反，他们认为 BC 是使热带云减少的。这个矛盾可能与 BC 的半直接效应有关。Zhang et al.（2009）在考虑碳类气溶胶的直接和半直接效应后，认为在中国南方大气变暖，云量和降水减少，在北方正好相反。这与 Menon et al.（2002）仅考虑 BC 的直接辐射强迫的结果正好相反。而 Wonsick et al.（2014）也认为半直接效应可能是导致 EHP 理论与观测差异的原因。

综上所述，虽然有许多关于气溶胶辐射强迫与季风关系的研究，但是总体来说，不确定性还是非常高。而华南地区不仅仅气溶胶的区域特征明显，其气候特征也很显著，是南海夏季风影响中国大陆的最前沿。目前对 BC 在年际尺度上如何影响南海夏季风研究得较少，还没有清晰的图像。本文利用重建的华南区域 BC 浓度资料，分析其与南海夏季风在年际尺度上的关系，并理解其相关的机制。

1　资料与方法

使用的资料包括重建的逐年华南大陆 BC 浓度序列（廖碧婷，2012）、逐月 NCEP-NCAR 再分析风场、温度场和云强迫的短波辐射资料（水平分辨率 2.5°×2.5°，Kalnay et al.，1996）、逐月的 CMAP 降水资料（水平分辨率 2.5°×2.5°，Xie and Arkin，1997）、扩展重建的海表温度资料 ERSST.V4（水平分辨率 2.0°×2.0°，Smith and Reynolds，2004；Smith et al.，2008）和 CPC 基于观测分析的全球逐日降水资料（水平分辨率 0.5°×0.5°，Xie et al.，2007；Chen et al.，2008）。此外，日本再分析 JRA-25 的风场资料（水平分辨率 1.25°×1.25°，Onogi et al.，2007）用于对比验证。资料时间长度都是 1988—2010 年。其中重建的逐年华南大陆 BC 浓度序列使用的样本有 125 组，采样点分布在华南大陆及南海北部，最南端在永兴岛，最北端在番禺；对比分析显示出重建的逐年华南大陆 BC 浓度序列与珠三角一些城市（广州、深圳、香港、珠海等）的观测结果相近（廖碧婷，2012）。由于采样的时间段大多在南海夏季风爆发前（超过 80%），因此，本文利用重建的逐年华南大陆 BC 浓度序列分析季风爆发前 BC 对大气环流的调制作用，进而影响南海夏季风强度的思路是可行的。

本文中的春季是指北半球春季 3—5 月（MAM），夏季指北半球夏季 6—8 月（JJA）。南海夏季风指数定义为南海区域（105°～120°E，5°～20°N）夏季平均 850 hPa 风场在西南方向的投影（Zheng et al.，2009）。主要研究方法为滑动相关和合成分析。由于计算相关的变量都包含有明显的趋势变化时，相关特征可能被夸大或者缩小（施能等，2007），因此本研究中各变量分别进行去线性趋势处理。11 a 滑动相关计算如下：

$$C_t=\mathrm{Cor}[(A_{t-5},A_{t-4},\cdots,A_{t+4},A_{t+5}),$$
$$(B_{t-5},B_{t-4},\cdots,B_{t+4},B_{t+5})],t=6,7,\cdots,(n-5)。$$

其中：C 为相关系数；$\mathrm{Cor}[A,B]$ 是两个变量的相关计算；A 和 B 代表变量；t 为时间；n 为变量时间长度。

本文还使用了 NCAR 的 CAM5 模式对相关过程进行了 2 组模拟试验,第 1 组参考试验(CTL):考虑全球各种气溶胶排放(IPCC AR5 排放源)的直接与间接气候效应的试验;第 2 组敏感性试验(CTL-noBC):中国区域无 BC 排放,其他与参考试验一致。模式积分了 13 a,输出都是月平均值,已删去了第一年的积分结果。

2　华南 BC 浓度与南海夏季风的关系

图 1 显示的是华南 BC 浓度与南海夏季风指数时间序列。由图 1a 可见,在 2000 年之前,华南 BC 浓度年际变率的周期约为 8 a,而 2000 年之后的年际变率周期明显变短,仅为 4 a 左右。相比较而言,南海夏季风主要以年代变率(10 a 左右周期)为主,但是依然存在年际变率。从小波分析(图 2a)可以看到,华南 BC 浓度在 2000 年之前确实存在 6~8 a 的显著年际变率,而之后的周期虽然没有通过置信度为 95%的显著性检验,但是也显示出向短周期的扩展。而南海夏季风变率确实也是以 10~12 a 的年代周期为主(图 2b),年际周期并没有通过置信度为 95%的显著性检验。

华南 BC 浓度与南海夏季风 11 a 滑动相关(图 3)显示,两套再分析资料的南海夏季风指数与华南 BC 浓度的关系都经历了一个突变的过程,从显著负相关变为正相关,即从高气溶胶浓度弱季风转变为高气溶胶浓度强季风。但是因为是滑动相关,并不能确定具体的突变年份,但有一个时间范围,即 1997—2007 年。结合图 1 可以看到,在 2000 年之前二者的变化趋势基本是相反的,而之后则基本相同。由此,分时间两段进行分析,即 1988—1999 年为第一时间段,2000—2010 年为第二时间段。

南海夏季风指数是纬向风和经向风的组合,分别将华南 BC 浓度与它们进行滑动相关分析,得到图 4。从图 4a、c 可以看到,不论是 NCEP/NCAR 还是 JRA-25 再分析的纬向风与 BC 的关系同样都经历了与季风指数相同的突变。经向风与 BC 的关系虽然也有变化,但是两套资料正好相反。NCEP/NCAR 再分析资料的经向风与 BC 的关系是不显著变的显著正相关,而 JRA-25 资料则是从显著正相关变为没有显著相关。综合来看,BC 与南海夏季风关系的变化可能主要来自于纬向风与 BC 关系的变化。因此,以下重点分析 BC 对纬向风的影响,主要使用 NCEP-NCAR 再分析资料。

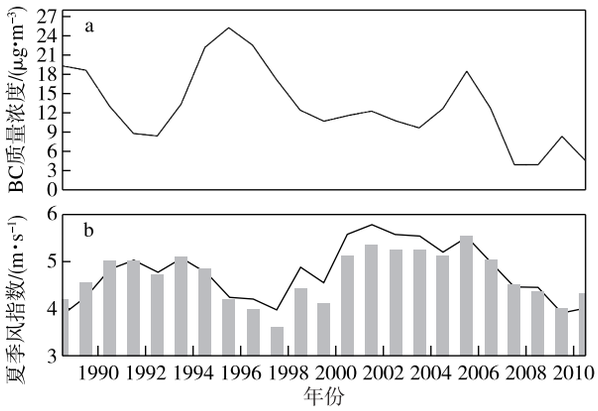

图 1　华南黑碳气溶胶浓度重建序列(a;单位:μg·m^{-3})和南海夏季风指数(b,单位:m/s;曲线为 NCEP-NCAR 再分析资料,柱状图为日本再分析资料)

Fig.1　Time series of (a) reconstructed concentrations of black carbon over southern China, and (b) the South China Sea summer monsoon index (the solid line in (b) is from the NCEP-NCAR reanalysis, and the bars from the JRA-25 reanalysis)

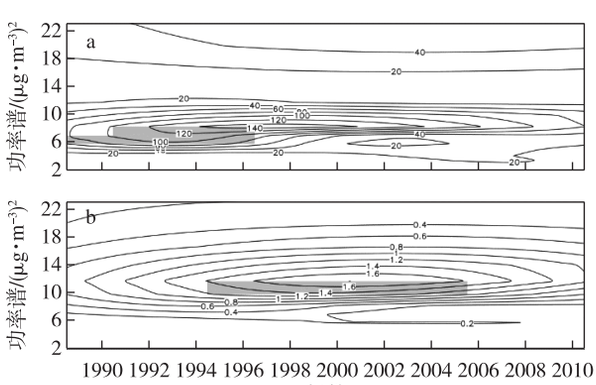

图 2　华南 BC 浓度(a)与南海夏季风指数(b)的小波功率谱(阴影区为超过 95%的置信水平检验)

Fig.2　Wavelet power spectra of the (a) BC concentration and (b) SCSSM index (the shaded areas denote the periods exceeding the 95% significance level)

3　可能机制分析

通过合成方法分析 BC 和南海夏季风的关系发生突变的原因。与 BC 相关的 850 hPa 水平二维风场和气温异常分布如图 5 所示。从图 5a 第一时间段春季合成可以看到,华南地区高 BC 浓度对应 850 hPa 温度负异常,温度负异常激发了异常反气旋,而异常反气旋在南海区域即有东风异常。而春季南海/西北太平洋盛行东北风,因此 BC 引起的异常东风增大了全风速,从而使南海/西北太平洋的海温降

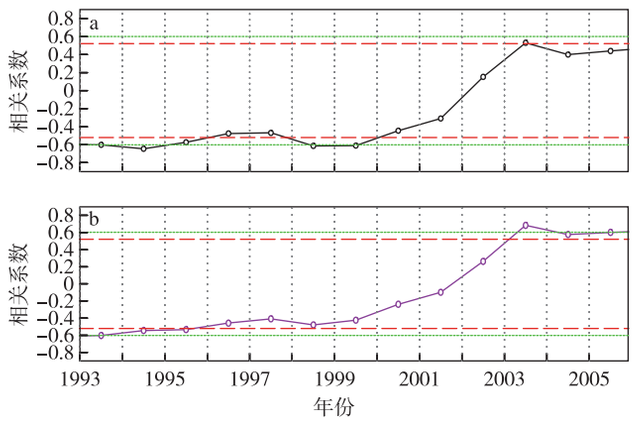

图 3　华南 BC 浓度分别与 NCEP/NCAR（a）和 JRA25（b）再分析资料的南海夏季风指数的 11 a 滑动相关（长虚线和短虚线分别为 0.1 和 0.05 信度显著性水平检验）

Fig.3　Eleven-year running correlation coefficients between the BC concentration and SCSSM index from (a) the NCEP/NCAR and (b) JRA25 reanalyses (the long and short dashed lines respectively represent the 90% and 95% significance levels)

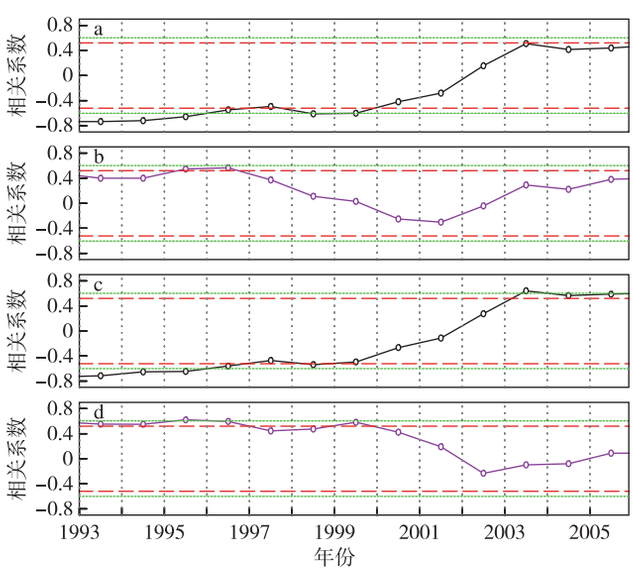

图 4　华南 BC 浓度分别与 NCEP/NCAR（a、b）和 JRA25（c、d）再分析资料南海区域 850 hPa 纬向风（a、c）和经向风（b、d）11 a 滑动相关（长虚线和短虚线分别为 0.1 和 0.05 信度的显著性水平检验）

Fig.4　11-year running correlation coefficients between the BC concentration and 850 hPa (a) zonal and (b) meridional winds from the NCEP/NCAR reanalysis, and 850 hPa (c) zonal and (d) meridional winds from the JRA25 reanalysis (the long dash lines and short ones represent 90% and 95% significance level, respectively)

低（图 6a）。通过温度平流和海温的感热通量作用，南海/西北太平洋的气温也是降低的（图 5a）。到夏季，南海地区盛行西南风，BC 引起的异常东风减小了全风速，海温开始增暖，从而在异常东风区域出现了异常暖海温（图 7a），同样，通过温度平流和海温的感热通量作用，南海/西北太平洋也有气温变暖的区域（如图 5b）。此外，春季增大的全风速使海洋向上的潜热通量增大，水汽增多，降水增大（图 6b）；夏季则正好相反（图 7b）。第二时间段 BC 相关的华南区域温度为正异常，所以相关的过程与第一时间段正好相反。

为什么高 BC 浓度在第一时间段和第二时间段有不同的温度异常响应？从图 6b、d 看到，在第一时间段和第二时间段高 BC 浓度对应的华南地区降水异常也是不同的，第一时间段降水偏少，而第二时间段偏多。有研究认为黑碳气溶胶的直接辐射效应是减少降水的（Ramanathan et al., 2005; Gu et al., 2006; 张华等，2008），这是因为其吸收太阳辐射加热了大气，同时使地面冷却，从而增强了大气稳定度。也有研究认为 BC 的直接效应加热大气，使大气变得不稳定，对流加强，从而降水增多（Menon et al., 2002; Liu et al., 2010）。李建云等（2009）的数值模拟研究指出虽然中国大部分地区由于黑碳气溶胶的直接辐射效应而降水减少，但是华南是增多的。这个矛盾可能源于 BC 的分布差异。

结合图 5b 和图 6d 可以看到，第二时间段春季的高 BC 浓度对应气温正异常，降水偏多。这可能是 BC 的直接辐射强迫的作用。而第一时间段春季高 BC 浓度对应气温负异常并不能用直接效应来解释。为此，比较两个阶段的云强迫的向下短波辐射通量，如图 8。从图 8a 可以看到，第一时间段华南地区云强迫的表面向下短波辐射通量是减小的，而第二时间段相反，是增加的。这里的辐射强迫与温度异常有很好的对应关系。但是云辐射强迫与华南降水异常似乎有矛盾。即第一时间段华南降水偏少，但是云量却是增多，有负的辐射强迫；而第二时间段华南降水偏多，云量减少，有正的辐射强迫。进一步统计两个阶段华南春季降水日，如图 9 所示。第一时间段虽然华南春季降水是减少的，但是雨日却是增多了，因此云量增多，表面向下的太阳辐射是减少的。相反地，第二时间段的华南春季降水是增多，但是雨日减少，对应的云量减少，向下的太阳辐射增大。从图 9 还可以看到，第一时间段降水量的减少是由于大雨以上的降水减少，而小雨日增多；而

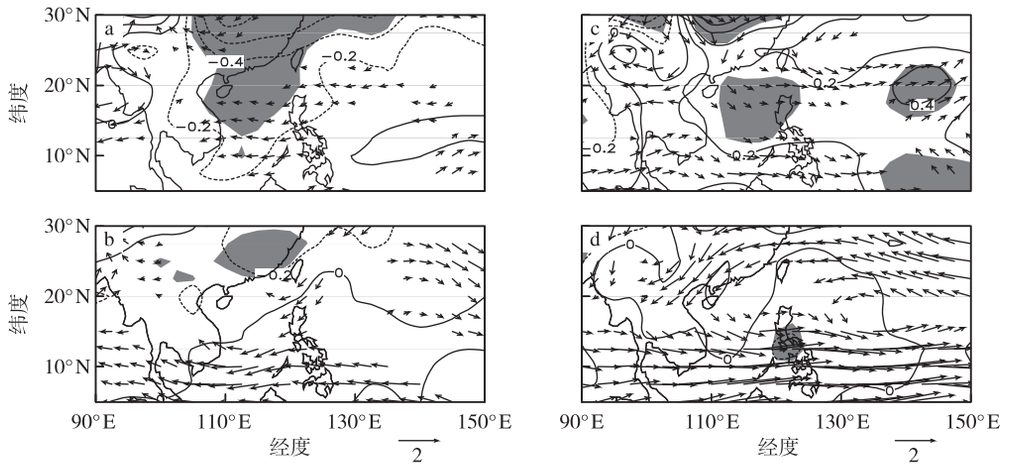

图 5　第一时间段春季(a)、第一时间段夏季(b)、第二时间段春季(c)和第二时间段夏季(d)华南气溶胶浓度正异常合成的 850 hPa 风场(单位:m/s)和温度场(单位:K)(阴影和矢量分别代表温度和纬向风超过 95%置信水平检验的区域)

Fig.5　Composite 850 hPa winds (m/s) and air temperature (K) associated with the positive BC anomalies in (a) spring of the first period, (b) summer of the first period, (c) spring of the second period and (d) summer of the second period (the shaded areas and vectors respectively denote the air temperature and zonal wind exceeding the 95% significance level)

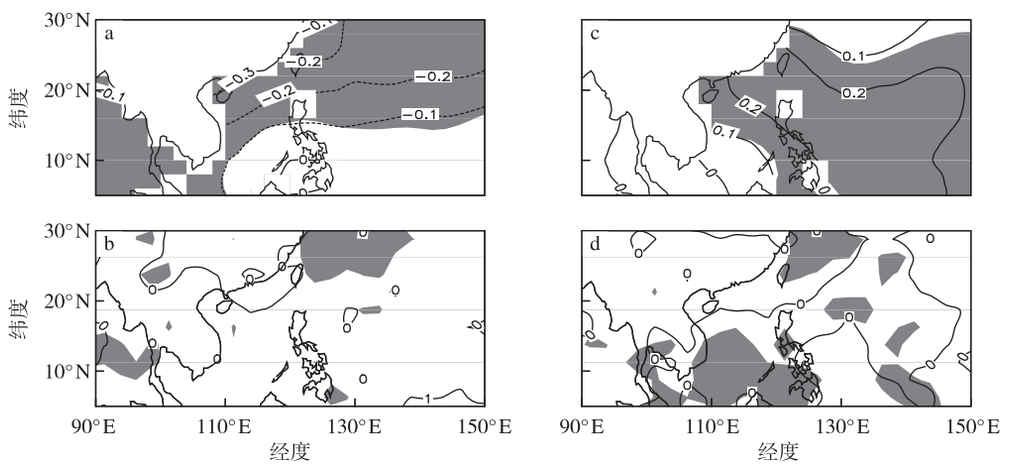

图 6　第一时间段春季华南气溶胶浓度正异常合成的海表温度异常(a;单位:K)和降水异常(b;单位:mm),第二时间段春季华南气溶胶浓度正异常合成的海表温度异常(c;单位:K)和降水异常(d;单位:mm)(阴影代表超过 95%置信水平检验的区域)

Fig.6　(a) Composite sea surface temperature anomalies (unit: K) and (b) precipitation anomalies (unit: mm) associated with the positive BC anomalies in spring of the first period, (c) composite sea surface temperature anomalies (unit: K) and (d) precipitation anomalies (unit: mm) associated with the positive BC anomalies in spring of the second period (the shaded areas denote the anomalies exceeding the 95% significance level)

第二时间段大雨以上降水明显增多,虽然雨日偏少,但平均降水量依然偏多。综上可知,第一时间段 BC 的气候效应可能以间接效应为主,而第二时间段则是以直接效应为主。

利用数值模式来进行机理验证。模式虽然不能模拟出华南 BC 浓度与南海夏季风相关的年代际变化,但是对于 BC 增大的背景下(CTL 试验相对于 CTL-noBC),南海夏季风强度也有差异。分别将 BC 增大背景下,南海夏季风减弱和增强的年份进行合成分析,分别代表第一时间段和第二时间段。从图 10 可以看到,当华南 BC 浓度增大南海夏季风强度变小时,华南及南海北部(105°~120°E,15°~25°N)低层气温是降低的,对应的是纬向东风异常;而华南 BC 浓度增大南海夏季风强度变大时,相关

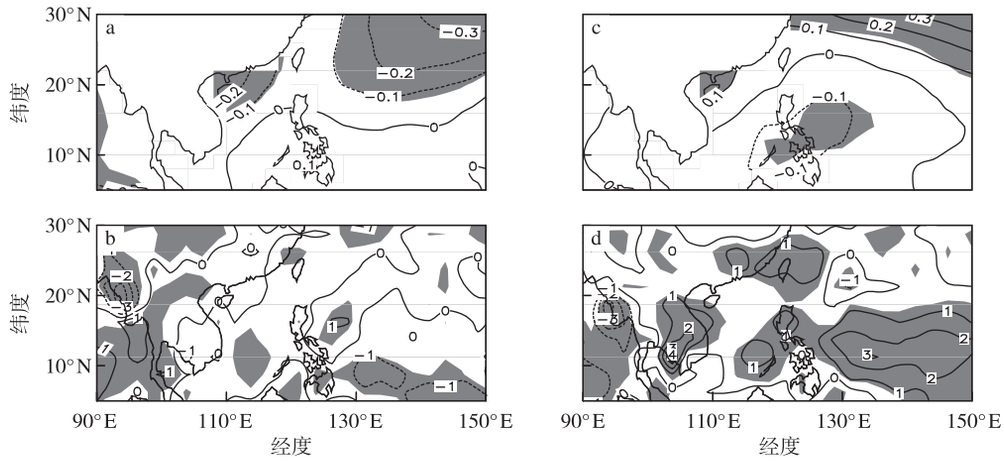

图 7　第一时间段夏季华南气溶胶浓度正异常合成的海表温度异常（a；单位：K）和降水异常（b；单位：mm），第二时间段夏季华南气溶胶浓度正异常合成的海表温度异常（c；单位：K）和降水异常（d；单位：mm）（阴影代表超过 95%置信水平检验的区域）

Fig.7　（a）Composite sea surface temperature anomalies（unit：K）and（b）precipitation anomalies（unit：mm）associated with the positive BC anomalies in summer of the first period，（c）composite sea surface temperature anomalies（unit：K）and（d）precipitation anomalies（unit：mm）associated with the positive BC anomalies in summer of the second period（the shaded areas denote the anomalies exceeding the 95% significance level）

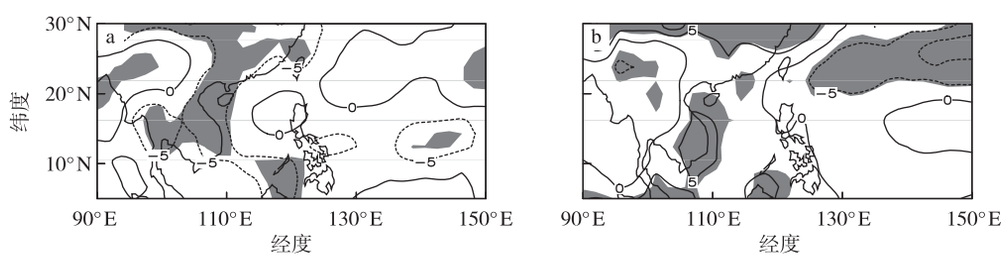

图 8　第一时间段（a）和第二时间段（b）春季华南气溶胶浓度正异常合成的云强迫的表面净短波辐射（单位：W/m^2）（阴影代表超过 95%置信水平检验的区域）

Fig.8　Composite cloud forcing net solar radiation at surface（W/m^2）associated with the positive BC anomalies in spring of（a）the first period and（b）the second period（the shaded areas denote the anomalies exceeding the 95% significance level）

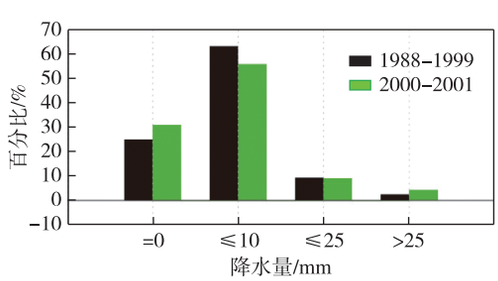

图 9　春季华南降水日的统计（单位：%）

Fig.9　Statistics of the spring rain day over SC（unit：%）

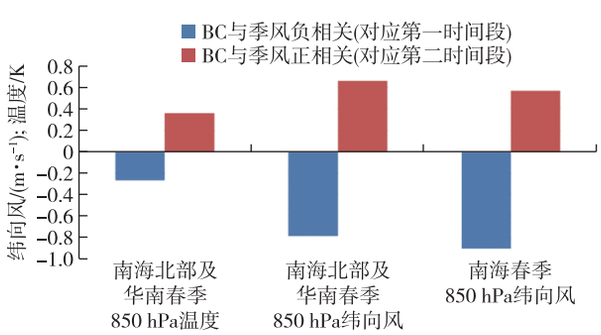

图 10　模式模拟输出合成的南海及华南 850 hPa 纬向风场（单位：m/s）和温度场（单位：K）

Fig.10　Composite 850 hPa zonal winds（unit：m/s）and air temperature（unit：K）over the South China Sea and southern China from the CAM5 model

的异常正好反号。这与前面的分析相同。

图 11 显示了华南春季云的垂直结构和云中 BC 含量比例的垂直分布，可以看到，当华南 BC 浓度增大南海夏季风强度变小时，低云的云量增大而高云的云量减小（图 11a）。这表明小雨增多而大雨减

少,而低云也有更长的生命期。这与前面分析的第一时间段雨量减小但是雨日增多是一致的。图 11b 显示华南 BC 浓度增大南海夏季风强度变小时,低云中 BC 含量的比例增大。此外,相应的云水数密度也是增大的(图略)。由此可见,当华南 BC 浓度增大而南海夏季风强度变小时,BC 的间接效应起了重要作用,更多的 BC 进入到云中,延长了云的生命期,从而减少了到达地面的辐射。相反,当华南 BC 浓度增大而南海夏季风强度变小时,大气中 BC 比例更大,而云的生命期相对变短,因此 BC 的直接效应起了更重要的作用。

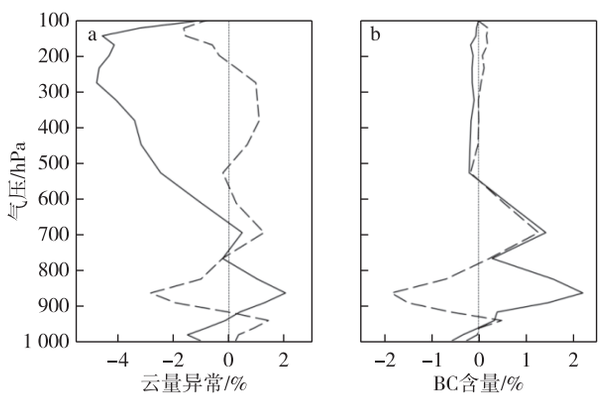

图 11　模式模拟输出合成的华南春季云量异常(a;单位:%)和云中 BC 含量比例(b;单位:%)(实线对应华南 BC 浓度与南海夏季风负相关,虚线对应正相关)

Fig.11　(a) Composite cloud (%) and (b) ratio of BC in cloud to BC (%) over southern China in spring from the CAM5 model (the solid lines represent the fact that SCSSM is weaker when BC over southern China is larger, and dashed lines indicate that SCSSM is stronger when BC over southern China is larger)

4　结论与讨论

BC 对季风降水和环流的影响虽然已有很多研究,但是多是关注南亚季风和东亚副热带季风,而且得到的结论并不一致,有的甚至相反,这充分表明了 BC 对季风影响的复杂性。南海夏季风是影响中国大陆最重要的热带季风系统,本文利用重建的华南 BC 浓度资料,分析年际尺度上 BC 对南海夏季风的影响。综合前面的分析结果,主要得到以下几点结论:

1)华南 BC 浓度与南海夏季风的关系在 2000 年前后出现突变,从显著负相关变为显著正相关。相关的降水日数也发生了变化:降水日和小雨日在 2000 年之后减少,但是大雨以上降水日明显增多。

2)第一时间段高 BC 浓度弱南海夏季风的影响机制:春季高 BC 浓度通过间接气候效应,使云粒子半径减小,抑制降水,增加了云的生命期,从而使到达地面的短波辐射减少,表面和低层大气降温。负温度异常激发了异常反气旋,在南海区域即有东风异常。由于风-蒸发作用,春季南海/西北太平洋海温降低,但是降水增多。到夏季,东风异常减弱了季风强度,风-蒸发作用使南海/西北太平洋的东风异常区海温升高,同时抑制了南海地区的降水,如图 12 所示。

3)第二时间段高 BC 浓度强南海夏季风的影响机制:春季高 BC 浓度通过直接气候效应,增暖大气,加强降水,但是雨日减少,从而使到达地面的短波辐射增多,表面和低层大气增温。正温度异常激发了异常气旋,在南海区域即有西风异常。由于风-蒸发作用,春季南海/西北太平洋海温升高,但是降水减少。到夏季,西风异常增大了季风强度,风-蒸发作用使南海/西北太平洋的东风异常区海温降低,同时增强了南海地区的降水,如图 13 所示。

在 2000 前后,华南 BC 的主要气候效应发生变化,从间接效应为主转变为直接效应为主,导致了它们与南海夏季风的关系也发生了变化,从显著负相关变为显著正相关。BC 主要气候效应的变化可能与云的特征属性发生变化有关。有研究表明,虽然地面气溶胶浓度增加可改变云的垂直结构和降水发生的概率,但是它依赖于云水的含量和相态(Li et al.,2011;陆春松等,2021)。这说明如果云中水含量或相态发生气候突变,那么 BC 对云的影响也会发生变化,从而导致 BC 主要气候效应的改变。

从模式模拟来看,目前很难模拟到这种突变现象,但是对于某一阶段的模拟还是有效的。例如,李建云等(2009)使用区域气候模式 RegCM3 模拟的 BC 直接效应确实使华南大雨以上降水日增多,小雨日减少,总体降水偏多。而同样利用 RegCM3 模拟的 BC 间接效应则有地面降温和降水减小的结果(庄炳亮等,2009)。这些与本文不同阶段的结果相同。如果不区分直接效应和间接效应,模式中黑碳气溶胶的增加将使春季南海地区出现东风异常,华南降水增加,但是华南地区表面气温上升,反气旋异常主要在南海区域,华南为气旋性环流异常(胡海波等,2011)。可见,模拟的结果与观测的两个阶段都不完全相同,似乎是两个阶段的混合。如果不找到控制 BC 主要气候效应的因子,很难在模式中模拟到 BC 与南海夏季风关系的这种变化。

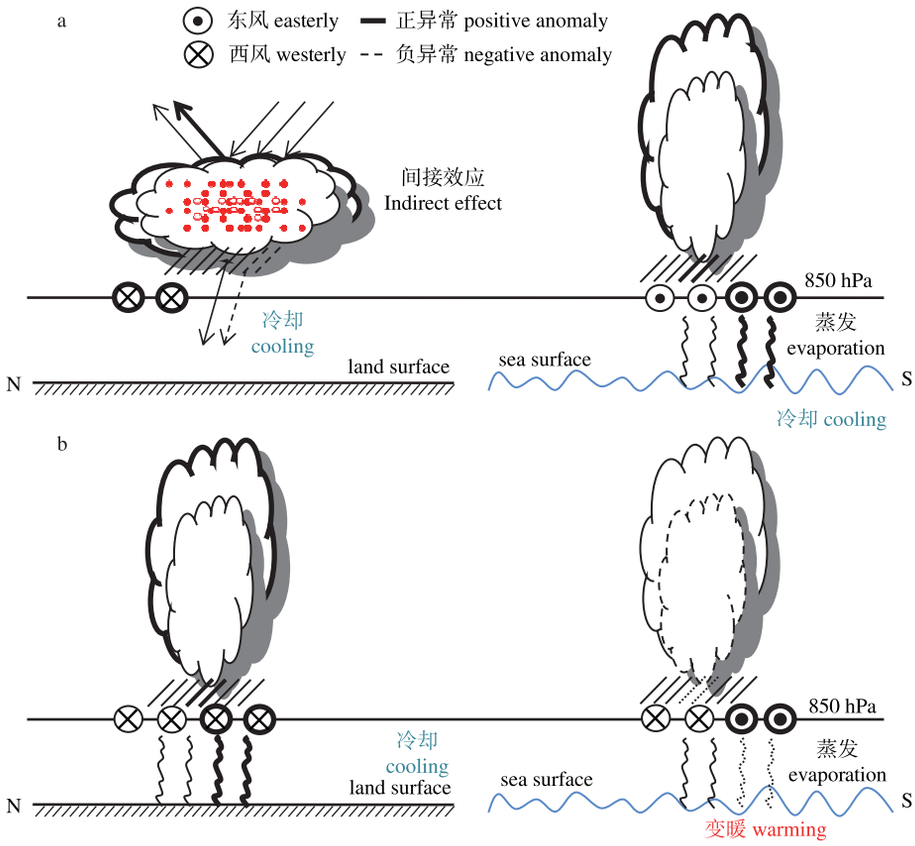

图 12　第一时间段 BC 影响南海夏季风的示意：(a)春季；(b)夏季

Fig.12　Schematic diagram of the influence of BC on the South China Sea summer monsoon in the first period: (a) spring; (b) summer

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. doi: 10.1126/science.288.5468.1042.

陈明诚，孙照渤，沈新勇，等，2014. 近 22 a 人为气溶胶对东亚地区夏季风环流影响的数值模拟研究[J]. 大气科学学报，37(4)：395-404. Chen M C, Sun Z B, Shen X Y, et al., 2014. Simulation of anthropogenic aerosols' effect on East Asian summer monsoon in recent 22 years[J]. Trans Atmos Sci, 37(4): 395-404. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20120105005. (in Chinese).

Chen M Y, Shi W, Xie P P, et al., 2008. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation[J]. J Geophys Res: Atmos, 113(D4): D04110. doi: 10.1029/2007JD009132.

Chen W T, Liao H, Seinfeld J H, 2007. Future climate impacts of direct radiative forcing of anthropogenic aerosols, tropospheric ozone, and long-lived greenhouse gases[J]. J Geophys Res: Atmos, 112(D14): D14209. doi: 10.1029/2006JD008051.

Collier J C, Zhang G J, 2009. Aerosol direct forcing of the summer Indian monsoon as simulated by the NCAR CAM3[J]. Clim Dyn, 32(2/3): 313-332. doi: 10.1007/s00382-008-0464-9.

Devara P C S, Raj P E, Pandithurai G, et al., 2003. Relationship between lidar-based observations of aerosol content and monsoon precipitation over a tropical station, Pune, India[J]. Meteorol Appl, 10(3): 253-262. doi: 10.1017/S1350482703003050.

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, 111(D15): D15201. doi: 10.1029/2005JD006312.

胡海波，刘超，张媛，等，2011. CAM3.0 模式中黑碳及硫酸盐气溶胶浓度变化对东亚春季气候的影响研究[J]. 气象科学，31(4)：466-474. Hu H B, Liu C, Zhang Y, et al., 2011. The effects of aerosols in CAM3.0 on climate in East Asia during boreal spring[J]. J Meteor Sci, 31(4): 466-474. (in Chinese).

Huang J, Zhang C, Prospero J M, 2009. Large-scale effect of aerosols on precipitation in the West African Monsoon region[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 135(640): 581-594. doi: 10.1002/qj.391.

Huang Y, Chameides W L, Dickinson R E, 2007. Direct and indirect effects of anthropogenic aerosols on regional precipitation over East Asia[J]. J

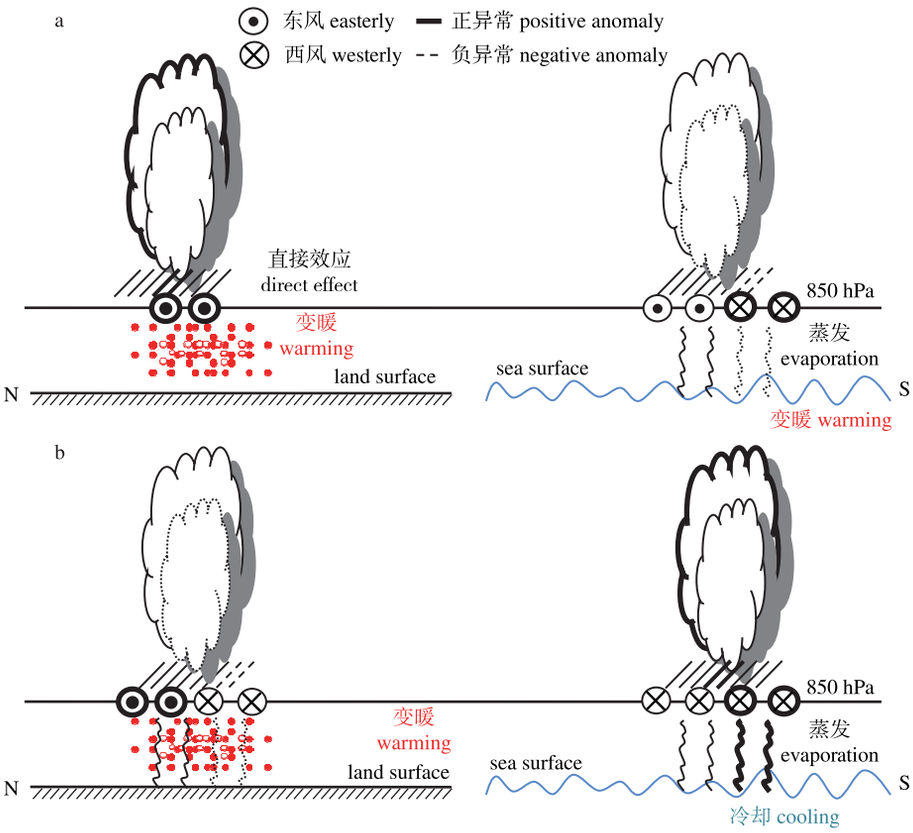

图 13 第二时间段 BC 影响南海夏季风的示意:(a)春季;(b)夏季

Fig.13 Schematic diagram of the influence of BC on the South China Sea summer monsoon in the second period:(a) spring;(b) summer

Geophys Res:Atmos,112(D3):D03212.doi:10.1029/2006JD007114.

Kalnay E,Kanamitsu M,Kistler R,et al.,1996.The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J].Bull Amer Meteor Soc,77(3):437-472.

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.

李建云,张杰,田密,2009.中国地区黑碳气溶胶直接辐射效应的数值模拟研究[J].气象与减灾研究,32(1):17-24. Li J Y,Zhang J,Tian M,2009.Simulation of the direct radioactive effects of black carbon aerosol in China[J].Meteorol Disaster Reduct Res,32(1):17-24.doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2009.01.003.(in Chinese).

李占清,2020.气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述[J].大气科学学报,43(1):76-92. Li Z Q,2020.Impact of aerosols on the weather,climate and environment of China:an overview[J].Trans Atmos Sci,43(1):76-92.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200115005.(in Chinese).

Li Z Q,Niu F,Fan J W,et al.,2011.Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation[J].Nat Geosci,4(12):888-894.doi:10.1038/ngeo1313.

廖碧婷,2012.重建华南大陆黑碳等气溶胶谱的长期时间序列[D].北京:中国气象科学研究院. Liao B T,2012.Rebuild the long-term time series of black carbon and inorganic water-soluble ions aerosol spectrum over South China[D].Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences.(in Chinese).

Lin J C,Matsui T,Pielke R A Sr,et al.,2006.Effects of biomass-burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin:a satellite-based empirical study[J].J Geophys Res:Atmos,111(D19):D19204.doi:10.1029/2005JD006884.

Liu H N,Zhang L,Wu J,2010.A modeling study of the climate effects of sulfate and carbonaceous aerosols over China[J].Adv Atmos Sci,27(6):1276-1288.doi:10.1007/s00376-010-9188-y.

Liu Y,Sun J R,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.doi:10.1111/j.1600-0889.2009.00427.x.

陆春松,薛宇琦,朱磊,等,2021.基于层积云飞机观测资料评估气溶胶间接效应[J].大气科学学报,44(2):279-289. Lu C S,Xue Y Q,Zhu L,et al.,2021.Evaluation of aerosol indirect effect based on aircraft observations of stratocumulus[J].Trans Atmos Sci,44(2):279-289.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200613001.(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.doi:

10. 1126/science.1075159.

Nigam S, Bollasina M, 2010. "Elevated heat pump" hypothesis for the aerosol-monsoon hydroclimate link: "Grounded" in observations? [J]. J Geophys Res: Atmos, 115(D16): D16201. doi: 10. 1029/2009JD013800.

Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al., 2007. The JRA-25 reanalysis[J]. J Meteor Soc Japan, 85(3): 369-432. doi: 10. 2151/jmsj. 85. 369.

Ramanathan V, Carmichael G, 2008. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. Nat Geosci, 1(4): 221-227. doi: 10. 1038/ngeo156.

Ramanathan V, Crutzen P J, Mitra A P, et al., 2002. The Indian ocean experiment and the Asian brown cloud[J]. Curr Sci, 83(8): 947-955.

Ramanathan V, Chung C, Kim D, et al., 2005. Atmospheric brown clouds: impacts on South Asian climate and hydrological cycle[J]. PNAS, 102(15): 5326-5333. doi: 10. 1073/pnas. 0500656102.

Rotstayn L D, Cai W J, Dix M R, et al., 2007. Have Australian rainfall and cloudiness increased due to the remote effects of Asian anthropogenic aerosols? [J]. J Geophys Res: Atmos, 112(D9): D09202. doi: 10. 1029/2006JD007712.

Satheesh S K, Moorthy K K, Babu S S, et al., 2008. Climate implications of large warming by elevated aerosol over India[J]. Geophys Res Lett, 35(19): L19809. doi: 10. 1029/2008GL034944.

施能, 顾骏强, 封国林, 2007. 论带有趋势变化的变量的相关: 数值试验[J]. 数学的实践与认识, 37(8): 98-103. Shi N, Gu J Q, Feng G L, 2007. On the correlation of variables containing secular trend variation: numerical experiment[J]. Mathematics in Practice and Theory, 37(8): 98-103. doi: 10. 3969/j. issn. 1000-0984. 2007. 08. 018. (in Chinese).

史湘军, 刘娇娇, 朱寿鹏, 等, 2020a. 基于 CMIP6 强迫模拟分析人为气溶胶的气候效应(二): 诊断方法在分类评估中的重要性[J]. 大气科学学报, 43(4): 630-639. Shi X J, Liu J J, Zhu S P, et al., 2020a. A modeling study on anthropogenic aerosol effects based on CMIP6 forcing, part Ⅱ: the importance of calculation methods in classification analysis[J]. Trans Atmos Sci, 43(4): 630-639. doi: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20180919002. (in Chinese).

史湘军, 沈沛洁, 朱寿鹏, 等, 2020b. 基于 CMIP6 强迫模拟分析人为气溶胶的气候效应(一): 介绍 NUIST 模式评估结果[J]. 大气科学学报, 43(3): 506-515. Shi X J, Shen P J, Zhu S P, et al., 2020b. A modeling study on anthropogenic aerosol effects based on CMIP6 forcing. part Ⅰ: NUIST model results and corresponding estimation[J]. Trans Atmos Sci, 43(3): 506-515. doi: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20180919001. (in Chinese).

Smith T M, Reynolds R W, 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854—1997)[J]. J Climate, 17(12): 2466-2477. doi: 10. 1175/1520-0442(2004)017<2466: ieros>2. 0. co; 2.

Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al., 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880—2006)[J]. J Climate, 21(10): 2283-2296. doi: 10. 1175/2007jcli2100. 1.

Solmon F, Mallet M, Elguindi N, et al., 2008. Dust aerosol impact on regional precipitation over western Africa, mechanisms and sensitivity to absorption properties[J]. Geophys Res Lett, 35(24): L24705. doi: 10. 1029/2008GL035900.

孙家仁, 刘煜, 2008. 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 J R, Liu Y, 2008. Possible effects of aerosols over China on east Asian summer monsoon(Ⅱ): black carbon and its joint effects with sulfate aerosols[J]. Adv Clim Change Res, 4(3): 161-166. doi: 10. 3969/j. issn. 1673-1719. 2008. 03. 006. (in Chinese).

Wang C E, 2004. A modeling study on the climate impacts of black carbon aerosols[J]. J Geophys Res: Atmos, 109(D3): D03106. doi: 10. 1029/2003JD004084.

Wang C E, Kim D, Ekman A M L, et al., 2009. Impact of anthropogenic aerosols on Indian summer monsoon[J]. Geophys Res Lett, 36(21): L21704. doi: 10. 1029/2009GL040114.

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).

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 Z L, Zhang H, Guo P W, 2009. Effects of black carbon aerosol in South Asia on Asian summer monsoon[J]. Plateau Meteor, 28(2): 419-424. (in Chinese).

Wonsick M M, Pinker R T, Ma Y, 2014. Investigation of the "elevated heat pump" hypothesis of the Asian monsoon using satellite observations[J]. Atmos Chem Phys, 14(16): 8749-8761. doi: 10. 5194/acp-14-8749-2014.

Xie P, Arkin P A, 1997. Global precipitation: a 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs[J]. Bull Amer Meteor Soc, 78(11): 2539-2558.

Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al., 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia[J]. J Hydrometeorol, 8(3): 607-626. doi: 10. 1175/jhm583. 1.

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 H, Ma J H, Zheng Y F, 2008. The study of global radiative forcing due to black carbon aerosol[J]. Chin J Atmos Sci, 32(5): 1147-1158. (in Chinese).

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]. Adv Atmos Sci, 26(1): 57-66. doi: 10. 1007/s00376-009-0057-5.

Zheng B, Li C H, Lin A L, et al., 2009. Features and comparisons of the quasi-biennial variations in the Asia-Pacific monsoon subsystems[J]. J Trop

Meteor,15(1):116-120.doi:10.3969/j.issn.1006-8775.2009.01.021.
庄炳亮,王体健,李树,2009.中国地区黑碳气溶胶的第一间接辐射强迫与气候效应[J].高原气象,28(5):1095-1104. Zhuang B L,Wang T J,Li S,2009.The first indirect radiative forcing of black carbon aerosol and its effect on regional climate of China[J].Plateau Meteorol,28(5):1095-1104.(in Chinese).

Interdecadal change in the relationship between black carbon aerosol over southern China and South China Sea summer monsoon

ZHENG Bin[1,2],HUANG Yanyan[1,2],GU Dejun[1,2],LIN Ailan[1,2],LI Chunhui[1,2]

[1]*Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology,China Meteorological Administration,Guangzhou* 510641,*China*;
[2]*Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction,Guangzhou* 510641,*China*

In this study,a set of reconstructed black carbon (BC) data is used to analyze the relationship between BC over southern China (SC) and the South China Sea (SCS) summer monsoon (SCSSM) on the interannual time scale.An abrupt change of the relationship appears at around 2000.Before 2000,there is a negative correlation between them,namely larger BC concentration corresponding to weaker SCSSM,while positive correlation begins in 2000.By means of composite and contrast analyses,it is found that a major climate effect of BC over SC is attributed to the indirect radiative forcing during the first period (1988—1999):Namely,the reduced cloud particle radiuses related to BC over SC suppress the spring precipitation,yet increase the cloud lifetime,which decreases the amount of solar radiation,thus leading to a cooling at the surface and in the lower atmosphere.The negative air temperature anomalies excite an anomalous anticyclone with easterly anomalies over the SCS.In summer,the anomalous easterlies weaken the SCSSM and decrease the precipitation over the SCS.During the second period (2000—2010),the main BC climate effect is direct radiative forcing:The warmer atmosphere associated with the larger BC concentration enhances the spring precipitation,while decreasing the number of rain days,which in turn increases the amount of solar radiation,thus leading to a greater warming at the surface and in the lower atmosphere.The positive air temperature anomalies excite an anomalous cyclone with westerly anomalies over the SCS.In summer,the anomalous westerlies enhance the SCSSM and the precipitation over the SCS.

black carbon aerosol;South China Sea summer monsoon;direct effect;indirect effect;South China

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191108012

(责任编辑:刘菲)