

赵树云, 智协飞, 张华, 等. 2014. 气溶胶—气候耦合模式系统 BCC_AGCM2.0.1_CAM 气候态模拟的初步评估 [J]. 气候与环境研究, 19 (3): 265–277, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12015. Zhao Shuyun, Zhi Xiefei, Zhang Hua, et al. 2014. Primary assessment of the simulated climatic state using a coupled aerosol-climate model BCC_AGCM2.0.1_CAM [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (3): 265–277.

气溶胶—气候耦合模式系统 BCC_AGCM2.0.1_CAM 气候态模拟的初步评估

赵树云^{1,2} 智协飞¹ 张华² 王志立³ 王在志²

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 本文讨论了国家气候中心第二代大气环流模式 BCC_AGCM2.0.1 和加拿大气溶胶理化模式 CAM 所组成的耦合模式系统对 5 种典型气溶胶 (硫酸盐、黑碳、有机碳、沙尘和海盐) 和气候要素的模拟效果。结果表明, 耦合系统对 5 种典型气溶胶的模拟总体上比较合理, 尤其是对硫酸盐、沙尘和海盐的模拟比 BCC_AGCM2.0.1 原有的月平均气溶胶资料有很大的改进。耦合系统模拟的全球平均气候态参量与观测/再分析资料比较一致, 在总云量、陆地表面温度和降水等方面要略优于原月平均气溶胶资料的模拟结果。耦合系统对沙尘和海盐气溶胶模拟的改进使得撒哈拉沙漠和南半球中纬度海洋大气顶净太阳辐射的模拟也有所改进, 而这将直接影响地表温度尤其是陆地表面温度。而不同气溶胶方案在赤道海洋上引起的云反馈不仅引起辐射的改变, 还将对降水产生明显影响。

关键词 气溶胶 BCC_AGCM2.0.1_CAM 耦合模式系统 模式评估

文章编号 1006-9585 (2014) 03-0265-13

中图分类号 P461.8

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12015

Primary Assessment of the Simulated Climatic State Using a Coupled Aerosol-Climate Model BCC_AGCM2.0.1_CAM

ZHAO Shuyun^{1,2}, ZHI Xiefei¹, ZHANG Hua², WANG Zhili³, and WANG Zaizhi²

1 Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Laboratories for Climate Studies, Chinese Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Using the coupled model system of the second generation Global Circulation Model of the National Climate Center (BCC_AGCM2.0.1) and Canadian Aerosol Model (CAM), the simulation of five typical aerosols (sulfate, black carbon, organic carbon, soil dust, and sea salt) and possible effects on the modeled climate are discussed in this paper. The results show that in general, the coupled system simulates the five aerosols reasonably well, and there are obvious improvements in sulfate, dust, and sea salt aerosols compared to the original monthly mean aerosol data used in BCC_AGCM2.0.1. The climatic statistics simulated by the coupled system mainly agree well with observational/reanalyzed data, and are a little better than the monthly mean aerosol data in terms of the total cloud amount, land surface temperature, and precipitation rate. The enhanced representation of dust and sea salt improves the

收稿日期 2012-02-01 收到, 2013-06-19 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB403405、2012CB955303, 科技部公益性行业(气象)科研专项课题 GYHY201406023, 国家自然科学基金 41205116

作者简介 赵树云, 女, 1985 年出生, 硕士研究生, 主要从事气溶胶辐射强迫与气候效应研究。E-mail: shuyun_z@aliyun.com

通讯作者 张华, E-mail: huazhang@cma.gov.cn

simulation of net solar radiation at the top of the atmosphere in the Sahara Desert and mid-latitude ocean in the Southern Hemisphere and also affects the land surface temperature. The cloud feedback above the tropical ocean caused by the change in aerosol scheme not only alters radiation but also markedly influences precipitation.

Keywords Aerosol, BCC_AGCM2.0.1_CAM coupled model system, Assessment of model

1 引言

气溶胶是大气中的重要成分之一，能够吸收或散射长、短波辐射，从而影响大气的辐射平衡，对当前的气候状态以及未来的气候变化有着比较显著的作用。但是目前对气溶胶的研究还不够深入，有很多待解决的问题（如气溶胶光学性质的精确观测、混合问题、气溶胶在气候模式中的模拟等），因此成为气候研究领域的一个热点。

气溶胶的成分、分布和含量不是一成不变的，其受下垫面特征、人类活动、气象条件等诸多因素的影响，和这些因素存在着广泛的相互作用。而气候模式一般使用月平均或者季节平均的固定气溶胶数据作为模式的气溶胶输入场（Miller and Tegen, 1998; 王志立等, 2009a, 2009b; Zhang et al., 2009）。固定的气溶胶资料虽然能够体现过去某个时间段气溶胶的分布特征，但是却丢失了气溶胶和模式其他过程相互作用的环节，对于研究气溶胶对气候的影响和随气候的演变等问题，这种做法显然不够合理。出于这种考虑，越来越多的研究开始寻求大气环流模式和能描述气溶胶产生、扩散和演变的气溶胶理化模式的耦合，目前国际上成功耦合气溶胶模式的大气环流模式主要有 ARQM (Zhang and McFarlane, 1995)、DLR (Roeckner et al., 1996)、GISS (Schmidt et al., 2006)、KYU (Numaguti et al., 1995; Hasumi and Emori, 2004)、LSCE (Sadourny and Laval, 1984; Hourdin and Armengaud, 1999)、LOA (Sadourny and Laval, 1984; Hourdin and Armengaud, 1999)、MPI_HAM (Roeckner et al., 2003, 2004; Stier et al., 2005)、PNNL (Kiehl and Gent, 2004)、UIO_GCM (Hack, 1994; Kiehl et al., 1998)、BCC_AGCM2.0.1 (Zhang et al., 2012) 等。

在大气环流模式中耦合气溶胶模式是研究气溶胶气候影响最理想的方式 (Gong et al., 2003)。Zhang et al. (2012) 在国家气候中心第二代大气环流模式 BCC_AGCM2.0.1 中耦合了加拿大气溶胶理化模式 CAM，并做了初步分析，但是还没有对新耦合系统的整体模拟情况进行研究。因此本文将对

新耦合系统从气溶胶本身到常规气候态变量的模拟情况进行初步的探讨，一方面深化对耦合系统气溶胶模拟性能的了解，另一方面揭示新气溶胶模式 CAM 的引入对气候态模拟的影响。这将为未来利用该耦合系统进行气溶胶气候效应的研究及其他相关研究提供重要的参考依据。

2 模式和方法简介

2.1 大气环流模式

国家气候中心第二代大气环流模式 BCC_AGCM2.0.1 由 CAM3.0/NCAR 发展而来，改进后的模式整体模拟能力比原来 CAM3.0 有所提高，特别是对热带和副热带降水、风场、海洋上感热和潜热通量的模拟 (Wu et al., 2010)。该模式在水平方向采用 42 波三角截断方案 [T42, 约 2.8° (纬度) \times 2.8° (经度)]，垂直方向为混合 σ -压力坐标系，共 26 层，模式顶气压约为 2.9 hPa，刚性边界。相对于 CAM3.0, BCC_AGCM2.0.1 在动力和物理过程中进行了许多调整。在动力方面，主要的调整体现在参考大气温度和参考地面气压的应用上，这种变化导致了相关的诊断方程和求解方法发生了根本改变 (Wu et al., 2008)。物理过程调整主要包含以下几个方面：1) 将原来的 Zhang and Mcfarlane (1995) 对流方案调整为 Zhang and Mu (2005) 方案，并且在对流触发条件中加入相对湿度 $> 75\%$ 和垂直速度 $v < 0$ 的限制，将云水向雨水的转化系数调低；2) 干绝热调整方案采用颜宏 (1987) 的方案；3) 海洋表面 (动量、潜热、感热) 端流通量计算过程中所用粗糙度采用 Smith (1988) 的计算方法，并且将海面波动和海浪飞沫的影响进行了参数化；4) 陆地模式中冰覆盖量的计算公式采用 Wu and Wu (2004) 的经验公式。该模式用由 1971~2000 年 NCEP 再分析资料得到的多年平均大气状态作为初始场，海温和海冰密度是由 1981~2001 年实测数据得到的逐月平均海温和海冰资料 (Hurrell et al., 2008)。

2.2 气溶胶模式

Zhang et al. (2012) 在 BCC_AGCM2.0.1 的基

础上耦合了一个气溶胶理化数值模式 CAM (Gong et al., 2003)。CAM 包含 5 种典型气溶胶 (硫酸盐、海盐、黑碳、有机碳、沙尘) 的排放、传输、化学转化、与云的相互作用、干沉降和湿沉降等过程, 气溶胶按粒径大小分为 12 档, 最小粒径为 0.005 μm , 最大粒径为 20.48 μm 。气溶胶的排放 (包括自然排放和人为排放) 来自气溶胶观测和模式比较项目 AeroCom (<http://aerocom.met.no/aerocomhome.html> [2012-04-23]), 包括黑碳和有机碳 (Van der Werf et al., 2004; Bond et al., 2004)、 SO_2 和硫酸盐 (Van der Werf et al., 2004; Cofala et al., 2005)、二甲基硫 (Dimethyl Sulfide, DMS) (其中海洋资料: Kettle and Andreae, 2000; 大气—海洋转换资料: Nightingale et al., 2000)。其它排放数据来自 EDGAR3.2 (the Database for Global Atmospheric Research) 1995 年资料 (Olivier et al., 2002)。海盐排放方案来自 Gong et al. (2002), 沙尘排放方案来自 Marticorena and Bergametti (1995)。该模式包含一个在线的硫化学模块, 其中 DMS、 SO_2 、 H_2S 、 H_2SO_4 气体浓度为预报量, 而 OH 、 O_3 、 H_2O_2 和 NO_3 的浓度为给定的离线值, 来自 MOZART/NCAR (Brasseur et al., 1998; Hauglustaine et al., 1998)。该模式在 Zhang et al. (2012) 中有详细说明。

2.3 方法及试验设计

本文利用上述国家气候中心第二代大气环流模式 BCC_AGCM2.0.1 和加拿大气溶胶理化模式 CAM 的耦合系统运行 22 年, 取后 18 年结果平均得到典型种类气溶胶柱含量和光学厚度等变量以及典型气候态变量的分布, 并与观测/再分析资料进行对比。BCC_AGCM2.0.1 模式原来采用的气溶胶资料是由大气化学传输模式 (MATCH) 和一个卫星反演气溶胶光学厚度的同化系统生成的一组月平均气溶胶浓度值 (Collins et al., 2001, 2002)。作为对比试验, 利用原有的月平均气溶胶资料作为 BCC_AGCM2.0.1 的气溶胶输入量同样运行 22 年, 取其后 18 年的结果分析。两组试验分别记为 “BCC_int” (取 interactive aerosols 之意) 和 “BCC_pre” (取 prescribed aerosols 之意)。两次模式运行均只考虑气溶胶的直接辐射效应。

3 气溶胶柱含量和光学厚度的模拟

由于耦合系统对气溶胶方案进行了替换, 大气

环流模式中的气溶胶输入发生了很大的变化, 这里首先对耦合系统模拟的气溶胶柱含量和光学厚度进行分析, 将本文的模拟结果和参与 “AeroCom” 的多模式中值 AEROCHOM_MEDIAN 相比较, 以了解 BCC_int 模拟的气溶胶水平在国际同类研究中所处的位置。

3.1 气溶胶柱含量

硫酸盐气溶胶来源于化石燃料燃烧排放的 SO_2 (72%), 海洋生物排放的 DMS (19%), 火山喷发的 SO_2 (7%) 等的氧化以及生物质燃烧排放的 SO_4 (2%) (Forster et al., 2007)。从各种源所占比例可见, 硫酸盐气溶胶的排放和不同国家和地区的工业化程度密切相关。由图 1a1 可以发现, BCC_int 模拟的硫酸盐大值区分别出现在美国东南部、欧洲东部、印度和中国东部, 其分布形势基本与 AEROCHOM_MEDIAN (图 1b1) 相同, 但数值上普遍较 AEROCHOM_MEDIAN 有所偏大。BCC_pre 给出的硫酸盐柱含量比前两者均大一倍以上。全球平均硫酸盐柱含量 BCC_int 为 1.770 mg m^{-2} , AEROCHOM_MEDIAN 为 1.248 mg m^{-2} , 而 BCC_pre 为 3.397 mg m^{-2} 。可见, 不同模式和方法得到的硫酸盐气溶胶柱含量还有很大的不确定性, BCC_int 模拟的硫酸盐柱含量更接近 AEROCHOM_MEDIAN 的中值水平。

黑碳气溶胶主要由含碳物质不完全燃烧产生, 因其对可见光到近红外波段的太阳辐射均有很强的吸收性而引起人们的广泛关注 (张华等, 2008; Zhang et al., 2009; 王志立等, 2009b; 杨溯等, 2010)。黑碳气溶胶在全球有 4 个主要的排放源区, 分别在中国东部、西欧、非洲中部和南美 (Bond et al., 2007)。由图 1a2 可见, 耦合系统基本模拟出了黑碳的几个大值区, 但是和 AEROCHOM_MEDIAN 的分布 (图 1b2) 相比, 黑碳柱含量大值区的分布范围明显偏小。从全球平均来看, BCC_int 模拟的黑碳柱含量为 0.138 mg m^{-2} , 比 AEROCHOM_MEDIAN 结果 (0.345 mg m^{-2}) 小将近 2/3。BCC_int 模拟的黑碳气溶胶柱含量偏小原因可能有两方面: 首先耦合系统的黑碳气溶胶排放强度在参与 AeroCom 的模式中处于较低的水平 (Zhang et al., 2012); 另一个原因可能和 BCC_int 中黑碳的老化时间有关, CAM 中不可溶性碳类气溶胶的存在时间只有一个积分步长 (Gong et al., 2003), 这使得黑碳很快地老化为吸湿性气溶胶而参与湿沉降。

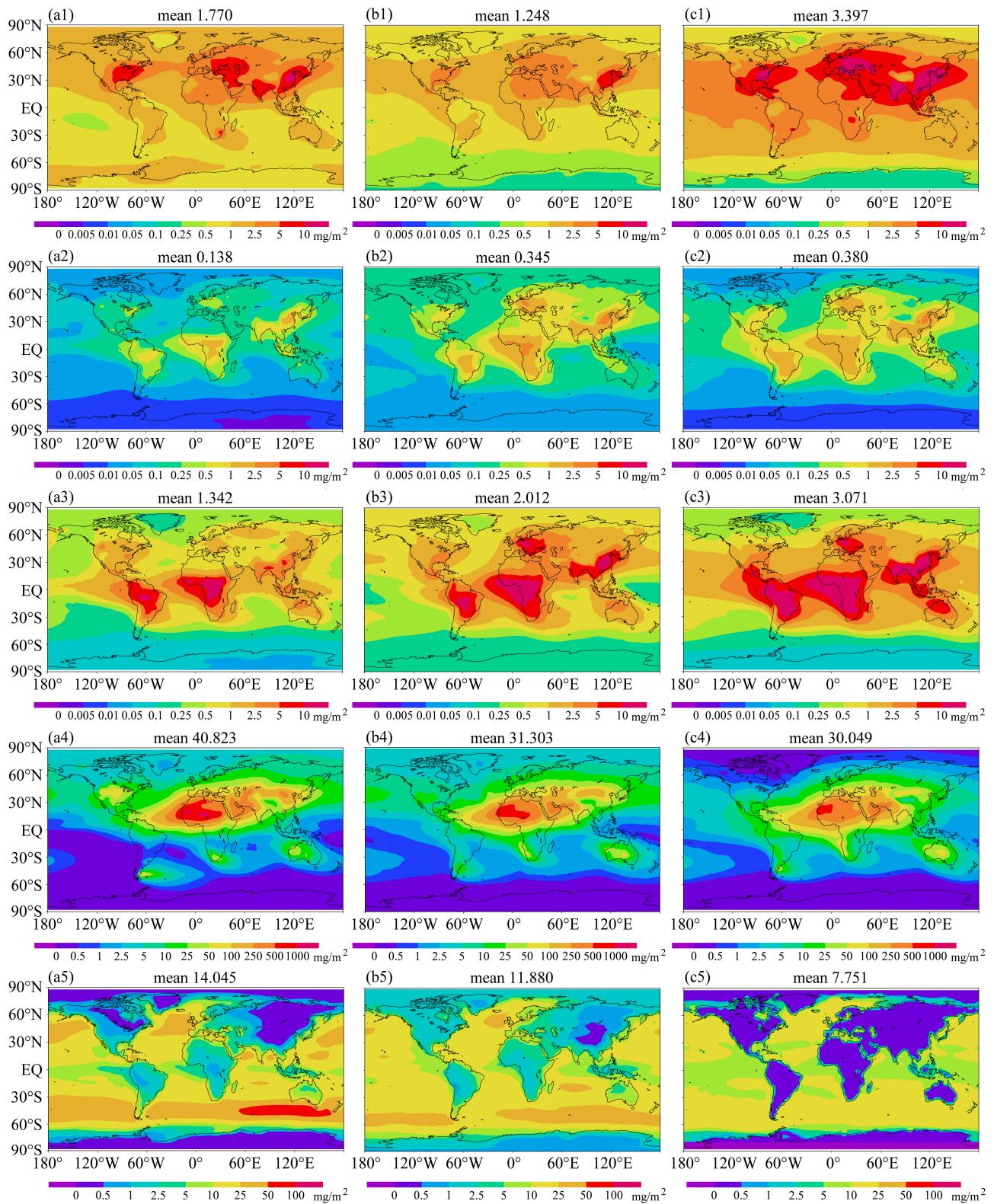


图 1 BCC_int (左列)、AEROCOM_MEDIAN (中列)、BCC_pre (右列) 得到的 (a1–c1) 硫酸盐、(a2–c2) 黑碳、(a3–c3) 有机碳、(a4–c4) 沙尘和 (a5–c5) 海盐 5 种典型种类气溶胶年平均柱含量的全球分布

Fig. 1 Global distributions of column burden of typical aerosols (a1–c1) sulfate, (a2–c2) black carbon, (a3–c3) organic carbon, (a4–c4) soil dust, and (a5–c5) sea salt from BCC_int (left panel), AEROCOM_MEDIAN (middle panel), and BCC_pre (right panel)

有机碳气溶胶和黑碳气溶胶是同源的, 所以许多方案把一定种类化石燃料或植物的有机碳和黑碳排放率设定为一个固定比值 (Lioussse et al., 1996; Cooke et al., 1999)。图 1a3、1b3、1c3 所示的有机碳模拟情形与黑碳基本相似, 耦合系统模拟值仍然偏低, 其原因也与黑碳气溶胶偏低相同。

沙尘气溶胶也称矿物沙尘, 主要源于干旱、半干旱地区的风蚀过程 (钱云等, 1999)。全球 4 个沙尘暴多发区 (中亚、北美、中非和澳大利亚) 主要分布在赤道两侧 ($25^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{N}$) 的副热带地区 (马井会等, 2007)。从图 1a4 和 1b4 可以看出, BCC_int 模拟的沙尘气溶胶柱含量的分布形势基本与 AEROCOM_MEDIAN 相似, 且与 BCC_pre 相比, 耦合系统更好地模拟了沙尘气溶胶的南北传输, 这在沙尘气溶胶在北半球高纬度地区的分布上表现得最为明显。但是, BCC_int 模拟的全球平均值 (40.823 mg m^{-2}) 比 AEROCOM_MEDIAN (31.303 mg m^{-2}) 偏大。耦合系统的沙尘排放率 ($10.641 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 远远大于 AEROCOM_MEDIAN ($2.208 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 这可能是 BCC_int 沙尘柱含量比较大的主要原因。

海盐气溶胶主要由海浪飞沫破裂生成, 主要排放源在海洋。从图 1a5、1b5 可以看出, BCC_int 模拟的海盐气溶胶柱含量分布与 AEROCOM_MEDIAN 比较相似, 尤其是在中低纬度地区; 在高纬度地区, 耦合系统的海盐柱含量较 AEROCOM_MEDIAN 偏低可能是由于其南北方向传输较弱。BCC_int 在南北纬 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 之间的海洋上有两个非常明显的柱含量大值带, 这可能是造成耦合系统全球平均海盐柱含量 (14.045 mg m^{-2}) 稍大于 AEROCOM_MEDIAN 全球平均 (11.88 mg m^{-2}) 的

主要原因。值得注意的是, 图 1c5 中显示的月平均气溶胶资料的海盐柱含量分布, 陆地上几乎没有海盐气溶胶, 这表明原有的月平均气溶胶资料在计算大气中海盐含量的时候没有通过动力过程处理海洋向陆地的输送。从这点来说, 耦合系统的海盐方案较月平均气溶胶资料有明显的改进。

综上所述, BCC_AGCM2.0.1 与 CAM 耦合系统对 5 种典型种类气溶胶柱含量的模拟总体上比较合理, 尤其是对硫酸盐、沙尘和海盐的模拟都较月平均气溶胶资料有所改进。但是, 耦合系统对碳类气溶胶的模拟相对 AEROCOM_MEDIAN 总体偏低, 这需要从黑碳的排放方案、物理参数化和大气环流过程多方面进行更深入的探讨, 同时应该注意 AEROCOM_MEDIAN 仅仅代表了多模式的中值水平, 各模式之间也存在很大的差异。要对耦合系统碳类气溶胶的模拟进行改进, 需要在观测方面有可靠的数据支持。

3.2 气溶胶光学厚度

气溶胶光学厚度是影响气溶胶辐射效应最重要的物理量。图 2 给出了耦合系统和月平均气溶胶资料模拟的气溶胶光学厚度 (550 nm, 下同) 的全球分布。从全球平均来看, BCC_int 模拟值 (0.070) 和 BCC_pre (0.064) 相差不大。但是从空间分布来看, 两者差别是比较明显的。首先, 在撒哈拉沙漠、 $30^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{S}$ 海洋上和北极附近, BCC_int 的气溶胶光学厚度相对 BCC_pre 偏大; 而在美国东部、南美、西欧、非洲南部, 情况正好相反。对比图 1 气溶胶柱含量的分布, 两者在非洲撒哈拉地区的气溶胶光学厚度差别主要是沙尘造成的; 而海洋上空, 远离大陆地区 (比如 $30^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{S}$) 的气溶胶光学厚度差异主要归因于海盐; 西欧、北美等工业程度较高的

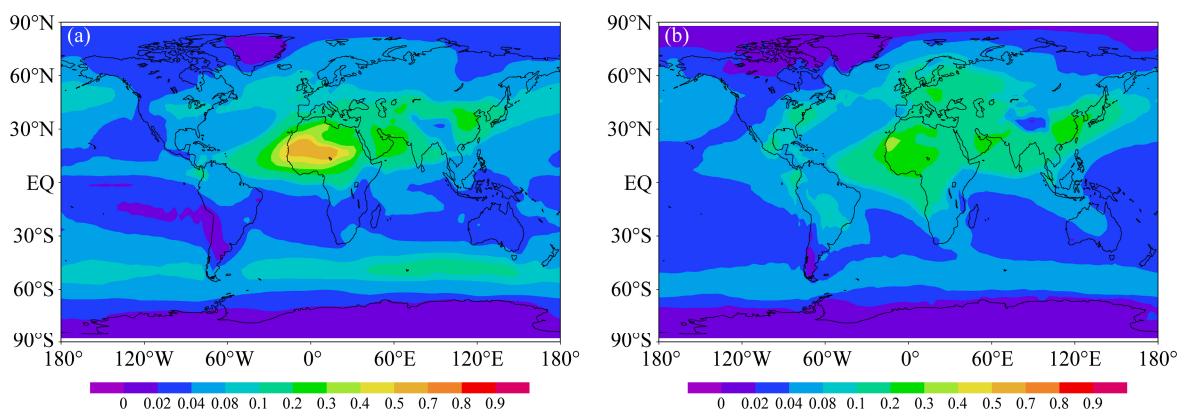


图 2 (a) BCC_int 和 (b) BCC_pre 得到的总光学厚度的全球分布对比

Fig. 2 Comparisons of the global distribution of total aerosol optical depth from (a) BCC_int and (b) BCC_pre

地区，气溶胶光学厚度差别的主要贡献者为硫酸盐；非洲南部和南美的差异主要由碳类气溶胶产生。对比 AEROCOM_MEDIAN (http://aerocom.met.no/cgi-bin/aerocom/surfobs_annualrs.pl [2012-04-23]), BCC_int 对于撒哈拉地区和中纬度海洋上空的气溶胶光学厚度的模拟都有较大的改进。

Zhang et al. (2012) 利用 CARSNET 和 AERONET 站点资料对比了耦合系统模拟的气溶胶光学厚度，发现除了在某些受硝酸盐和铵盐影响较大的站点 (CAM 里没有考虑硝酸盐和铵盐) 外，耦合系统对气溶胶光学厚度的量级和季节变化模拟是比较好的。本文为了说明 BCC_int 气溶胶光学厚度相对于 BCC_pre 的变化，选取了以下 8 个站点与 AERONET 比较：中国两个[北京 (40.0°N, 116.4°E)，敦煌 (40.0°N, 94.8°E)]，北非两个[Tamanrasset (22.8°N, 5.5°E)，Dahkla (23.7°N, 15.9°W)]，欧洲 1 个[Hamburg (53.6°N, 10.0°E)]、北美洲 1 个[Bondville (40.0°N, 88.4°W)]、南美洲 1 个[Brasilia (15.9°S, 47.9°W)]、南印度洋 1 个[Amsterdam_Island (37.8°S, 77.6°E)]，主要考虑了各个站点所处区域的主导性气溶胶不同。

如图 3 所示，除了北非两个站点春季气溶胶光学厚度过大外，BCC_int 模拟的气溶胶光学厚度均在 AERONET 资料的变化范围内。在中国的两个站点，BCC_pre 模拟的春季气溶胶光学厚度普遍偏小，而 BCC_int 对这种情况有所改善；而在 Hamburg 站 (受硫酸盐气溶胶影响较大)，BCC_int 对其季节变化趋势模拟得很好；另外，在 Amsterdam 岛 (位于海盐气溶胶的大值区)，BCC_int 模拟的气溶胶光学厚度与 AERONET 非常吻合，较月平均气溶胶资料有很大的改进。在 Tamanrasset (位于撒哈拉沙漠腹地) 和 Dahkla 站 (位于撒哈拉大西洋沿岸)，BCC_int 对其春季气溶胶光学厚度模拟偏大，其原因可能与春季该地区地表风速模拟偏大有关；在 Bondville 站 (位于美国中东部) 对光学厚度季节变化趋势模拟稍差；在 Brasilia 站 (位于巴西内陆地区)，BCC_int 模拟结果接近观测的最小值，这主要

是 BCC_int 对碳类气溶胶模拟偏小造成的。

表 1 给出了 BCC_int 和 BCC_pre 模拟的总气溶胶光学厚度、各类气溶胶光学厚度和对总气溶胶光学厚度的贡献。从中可以看出，耦合系统和月平均气溶胶资料模拟的总气溶胶光学厚度分别为 0.070 和 0.064，两者均比 AEROCOM_MEDIAN 结果 (约 0.11) 小，与 GEOSCHEM (Yu and Luo, 2009) 结果 (0.069) 接近。其中，耦合系统总气溶胶光学厚度的最大贡献来源于沙尘，其次来源于海盐，两者贡献了气溶胶光学厚度的约 77%；而月平均气溶胶资料中，光学厚度最大的是硫酸盐，贡献了总光学厚度的 43.8%，沙尘和海盐的贡献分别只有 22.2% 和 13.4%。由于各类气溶胶吸收和散射性存在差异，另外，各类气溶胶的主要分布区域不同，因此各类气溶胶在总光学厚度中比例配置的不同将导致各地区大气和地表辐射收支发生变化，进而影响到各地区的气候。

4 常规气候场的模拟

4.1 全球平均量

表 2 列出了 BCC_int 和 BCC_pre 模拟的全球年平均气候态参量以及相应的观测或再分析资料。从表 2 中可以看出，BCC_int 较好地模拟了大气顶净太阳辐射通量和向上长波辐射通量，净辐射通量比 BCC_pre 减小了约 0.4 W m⁻²，使其更接近 ERBE 观测结果。在地面，BCC_int 模拟的净太阳辐射较 ISCCP 资料偏小、净长波辐射较 ISCCP 资料偏大，使模拟的地表总辐射 (约 99 W m⁻²) 比观测值 (约 116 W m⁻²) 偏小约 17 W m⁻²，这可能与模拟的赤道和两极地区到达地表的短波辐射偏低有关 (Wu et al., 2010)；与 BCC_pre 相比，BCC_int 的地表净短波辐射和净长波辐射都有一定的增加，但两者地表总辐射收支差别很小，仅有约 0.1 W m⁻²。

对于地表潜热和感热通量，BCC_int 模拟的两者之和与 NCEP 资料结果比较接近，但是潜热和感热通量分别比 NCEP 资料偏小和偏大，说明

表 1 气溶胶总光学厚度、各种气溶胶光学厚度及其对总光学厚度的贡献

Table 1 Total aerosol optical depth (AOD), each AOD and their contributions to total AOD

	总光学厚度	硫酸盐		黑碳		有机碳		沙尘		海盐	
		光学厚度	贡献	光学厚度	贡献	光学厚度	贡献	光学厚度	贡献	光学厚度	贡献
BCC_int	0.070	0.010	14.30%	0.000604	0.86%	0.0055	7.90%	0.0280	-40.00%	0.0260	37.10%
BCC_pre	0.064	0.028	43.80%	0.00208	3.30%	0.0104	16.30%	0.0142	22.20%	0.0087	13.40%

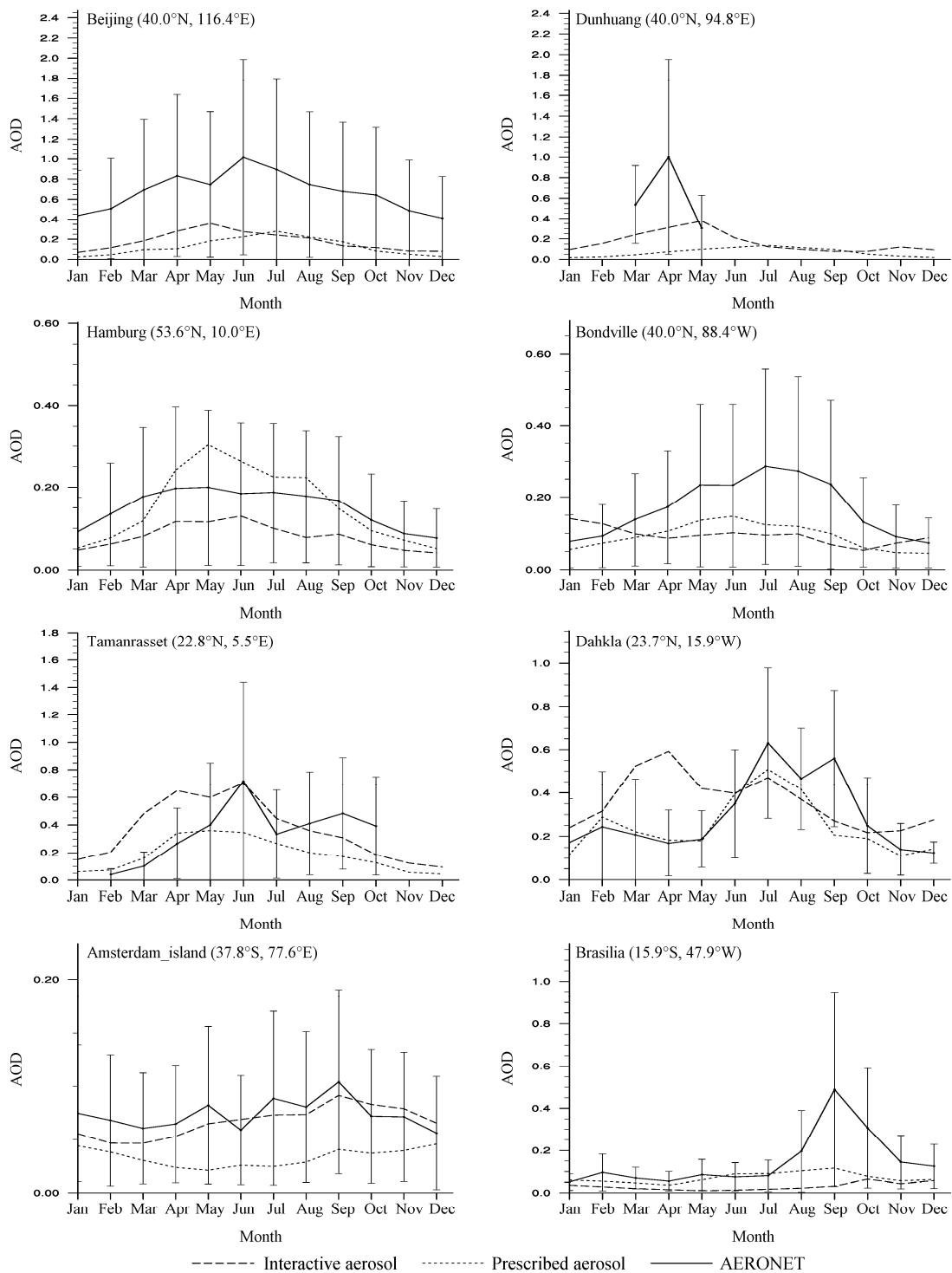


图 3 BCC_int 和 BCC_pre 模拟的 550 nm 气溶胶光学厚度和 AERONET 平均结果的对比 (误差棒代表观测光学厚度的标准差)

Fig. 3 Comparisons of BCC_int and BCC_pre simulated AOD at 550 nm and AERONET mean level (the error bar indicates the standard deviation of observed optical depth)

BCC_int 模拟的地表蒸发偏弱、地表温度偏高, BCC_pre 与 BCC_int 情形相似。但气溶胶方案的改变对潜热和感热通量的改变比较明显, BCC_int 相比 BCC_pre 减少了 0.6 W m^{-2} 潜热通量、而增加了

约 0.9 W m^{-2} 感热通量, 超过了两者辐射通量的差异。潜热和感热与大气温度、水汽输送和降水有着密切联系, 因此气溶胶的变化引起这二者的明显改变是值得关注的。

表 2 BCC_int 和 BCC_pre 的全球年平均气候态变量和相应的观测/再分析资料值比较**Table 2 Comparisons of globally and annually mean climate variables among BCC_int, BCC_pre, and observational/reanalyzed data**

物理量	观测	BCC_int	BCC_pre
大气顶			
辐射能量收支/W m ⁻² (向下为正)	0.059 ^a	2.006	2.421
净太阳辐射通量/W m ⁻²	234.004 ^a	235.324	235.956
向上长波辐射通量/W m ⁻²	233.946 ^a	233.317	233.534
地面			
辐射能量收支/W m ⁻²	116.458 ^b	98.924	99.038
净太阳辐射通量/W m ⁻²	165.893 ^b	158.838	158.407
净长波辐射通量/W m ⁻²	49.425 ^c	59.914	59.369
潜热通量/W m ⁻²	80.922 ^c	76.911	77.523
感热通量/W m ⁻²	15.795 ^c	21.971	21.051
其它量			
总云量	66.715% ^b	59.185%	58.879%
可降水量/mm	24.575 ^d	23.686	23.657
降水率/mm d ⁻¹	2.607 ^e	2.635	2.657
陆地表面温度/K	281.31 ^c	282.23	282.24
云短波辐射强迫/W m ⁻²	-54.163 ^a	-54.655	-54.312
云长波辐射强迫/W m ⁻²	30.355 ^a	29.088	28.966

注: ^a—ERBE: 地球辐射收支试验; ^b—ISCCP: 国际人造卫星云气候学项目; ^c—NCEP: 美国国家环境预报中心; ^d—NVAP: 美国国家航空航天局水蒸气项目; ^e—GPCP: 全球降水气候学计划

BCC_int 模拟的总云量较 ISCCP 总云量偏小, 但相对于 BCC_pre 的模拟值略有提高, 这里仅仅考虑了气溶胶的直接辐射效应。模式对云的模拟是一个公认的难题, 其水平的提高需要发展更为精细的云处理方案, 另外, 气溶胶和云的相互作用也值得进一步研究。BCC_int 模拟的云短波和长波辐射强迫和 ERBE 资料比较一致。BCC_int 的可降水量较 NVAP 偏小, 但是相对于 BCC_pre 略有增加, 这意味着相对于 BCC_pre, BCC_int 模拟的大气总的水汽含量有所增加。BCC_int 模拟的降水率和陆地表面温度均较 BCC_pre 更接近观测/再分析结果。

从以上模式结果与观测/再分析资料的对比分析可以发现, 新气溶胶方案的加入虽然没有从根本上消除模式存在的偏差, 但是使得模拟结果相比较月平均气溶胶资料向观测/再分析资料靠近。

4.2 辐射通量

气溶胶主要通过影响辐射影响气候, 气溶胶的辐射效应是研究其气候影响的基础, 因此, 应该对新的气溶胶—气候耦合系统模拟的辐射场有所了解。从表 2 可以看出, BCC_int 和 BCC_pre 模拟的

大气顶净太阳辐射通量相差 0.6 W m⁻², 地面净太阳辐射通量相差 0.4 W m⁻²。图 4 对比了模式模拟与 ERBE 观测资料的大气顶净太阳辐射通量的全球分布。从图 4a 和 4b 可以看出, 除了青藏高原、撒哈拉沙漠和阿拉伯地区存在明显的差异外, BCC_int 模拟的大气顶净太阳辐射通量的分布与观测资料基本一致。图 4d 给出了两者差异的全球分布, 可以看出, BCC_int 模拟的赤道附近、青藏高原和北半球高纬度大陆上的大气顶净太阳辐射通量相对 ERBE 偏小, 在撒哈拉和中纬度大洋上则相对 ERBE 偏大, 这主要是大气环流模式本身的误差(Wu et al., 2010) 造成的, 需要模式的进一步完善。BCC_pre 模拟结果也存在同样的特点(见图 4e)。但是从 BCC_int 和 BCC_pre 模拟结果的对比(图 4f)可以看出, 在撒哈拉沙漠、阿拉伯半岛和 30°S~60°S 洋面上, BCC_int 对模拟结果存在的正偏差有明显的纠正效果, 这表明耦合系统的海盐方案在南半球洋面上, 以及沙尘方案在撒哈拉和阿拉伯半岛较月平均气溶胶资料有一定的优越性。从中亚经中国西北到中国东部地区, BCC_int 模拟的大气顶净太阳辐射较 BCC_pre 偏低, 比较图 1a4 和图 1c4, 这主要是耦合系统模拟的沙尘气溶胶相对于月平均气溶胶资料偏多造成的。但在有些地区, 如南中国海和赤道太平洋地区, 两种气溶胶方案的气溶胶光学厚度差异不明显(图 2), 而且在晴空条件下, 以上地区大气顶净太阳辐射通量的差异也不明显(图略)。对比云水含量差异的分布, 这些地区大气顶净太阳辐射通量的差异主要与云对气溶胶直接辐射效应的反馈有关。

4.3 地表温度与降水

地表温度和降水是最典型的两个气候态变量, 也是讨论气溶胶气候效应最重要的两个变量。图 5 对比了模式模拟和 NCEP 再分析资料地表温度的全球分布。从图 5a 和图 5b 可以看出, BCC_int 模拟的地表温度全球分布形势和 NCEP 再分析资料基本相同。图 5d 显示了二者差异的分布, 由于模式在运行时用的是固定的 NCEP 再分析海温资料(2.1 节), 因此在海洋上的差异很小; 在非洲和南美洲大陆, 耦合系统普遍存在温度正偏差, 而在亚欧大陆大部分地区和北美大陆高纬度地区, 耦合系统存在着负偏差。这种偏差的分布形式在 BCC_pre 结果中有同样的体现(图 5e)。图 5f 显示了 BCC_int 与 BCC_pre 地表温度差异的分布形势, 从中可以看出,

在撒哈拉沙漠地区, 耦合系统对模式模拟的正温度偏差有明显的改进作用, 这主要是沙尘气溶胶的贡献; 在西欧和美国东部, BCC_int 温度负偏差相对

BCC_pre 较小, 这主要是耦合系统在这些地区的硫酸盐气溶胶相对月平均气溶胶资料较少造成的; 从中亚到我国西北和华北地区, 耦合系统的地表温度

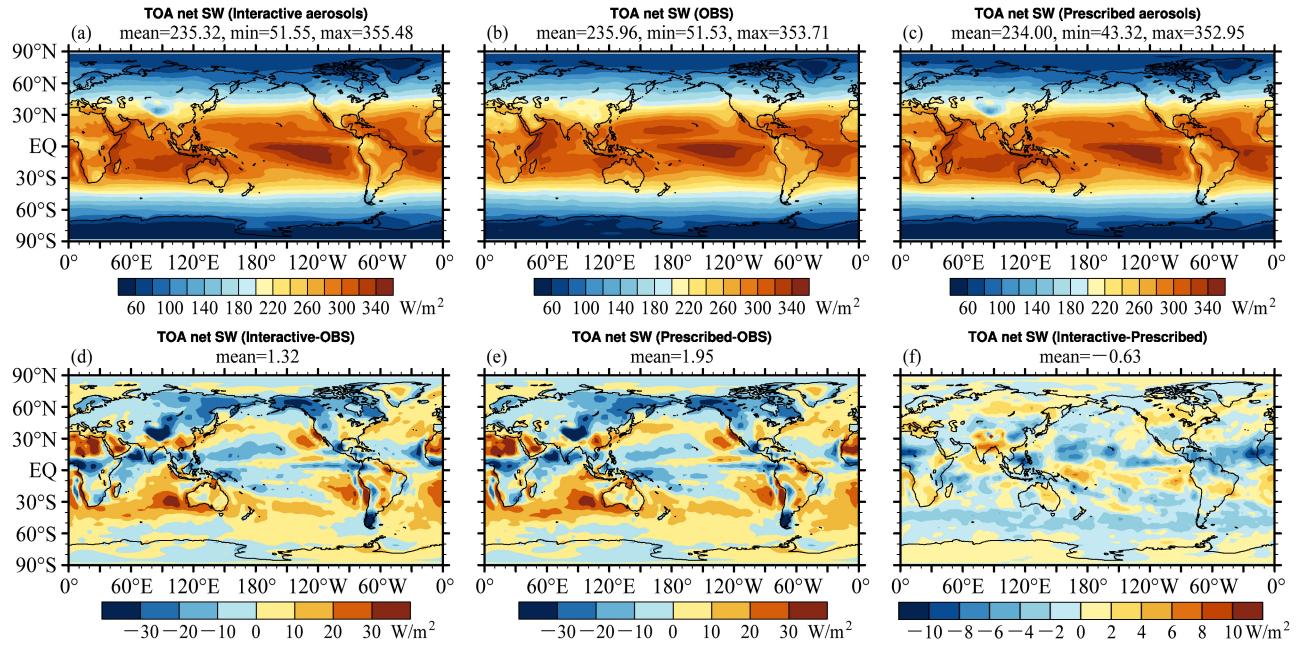


图 4 (a) BCC_int、(b) ERBE、(c) BCC_pre 大气顶净太阳辐射通量及差异 (d) BCC_int-ERBE、(e) BCC_pre-ERBE、(f) BCC_int-BCC_pre 的分布
Fig. 4 The distributions of net solar radiation at the top of atmosphere from (a) BCC_int, (b) ERBE, (c) BCC_pre, and their differences (d) BCC_int minus ERBE, (e) BCC_pre minus ERBE, and (f) BCC_int minus BCC_pre

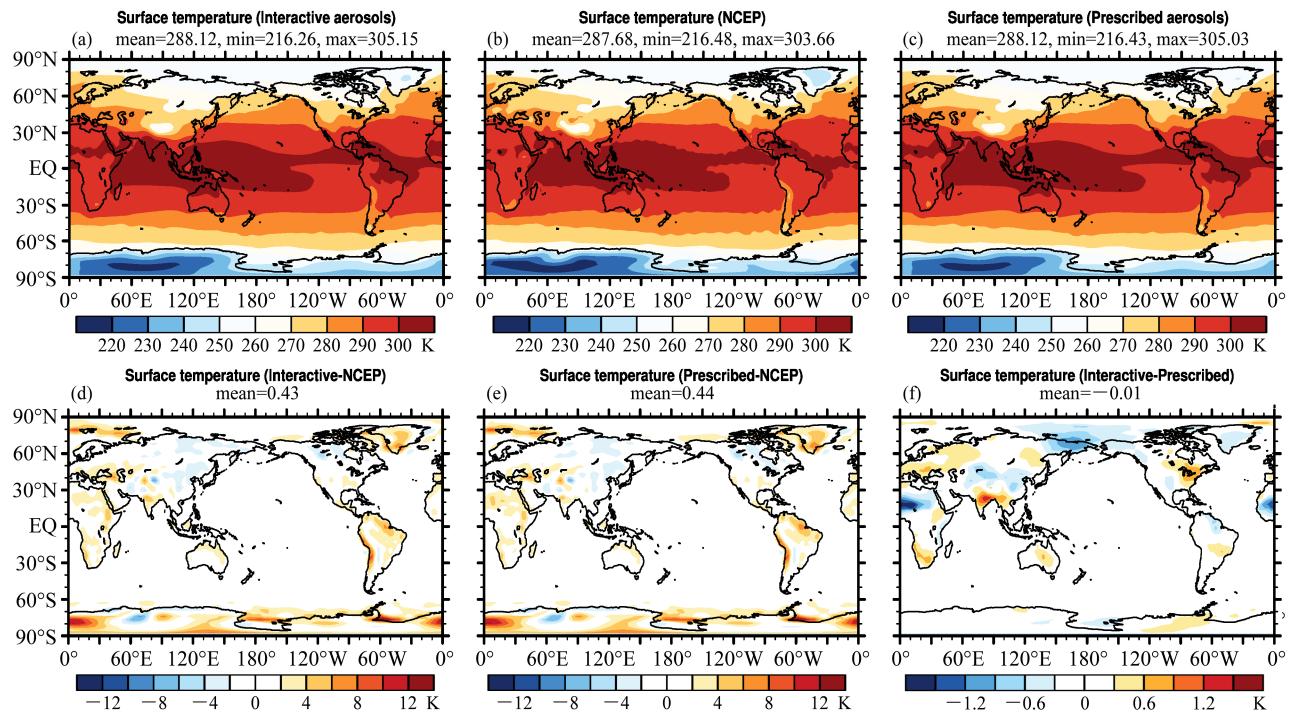


图 5 (a) BCC_int、(b) NCEP、(c) BCC_pre 得到的地表温度及差异 (d) BCC_int-NCEP、(e) BCC_pre-NCEP、(f) BCC_int-BCC_pre 的全球分布
Fig. 5 The distributions of temperature at the surface from (a) BCC_int, (b) NCEP, (c) BCC_pre, and their differences (d) BCC_int minus NCEP, (e) BCC_pre minus NCEP, and (f) BCC_int minus BCC_pre

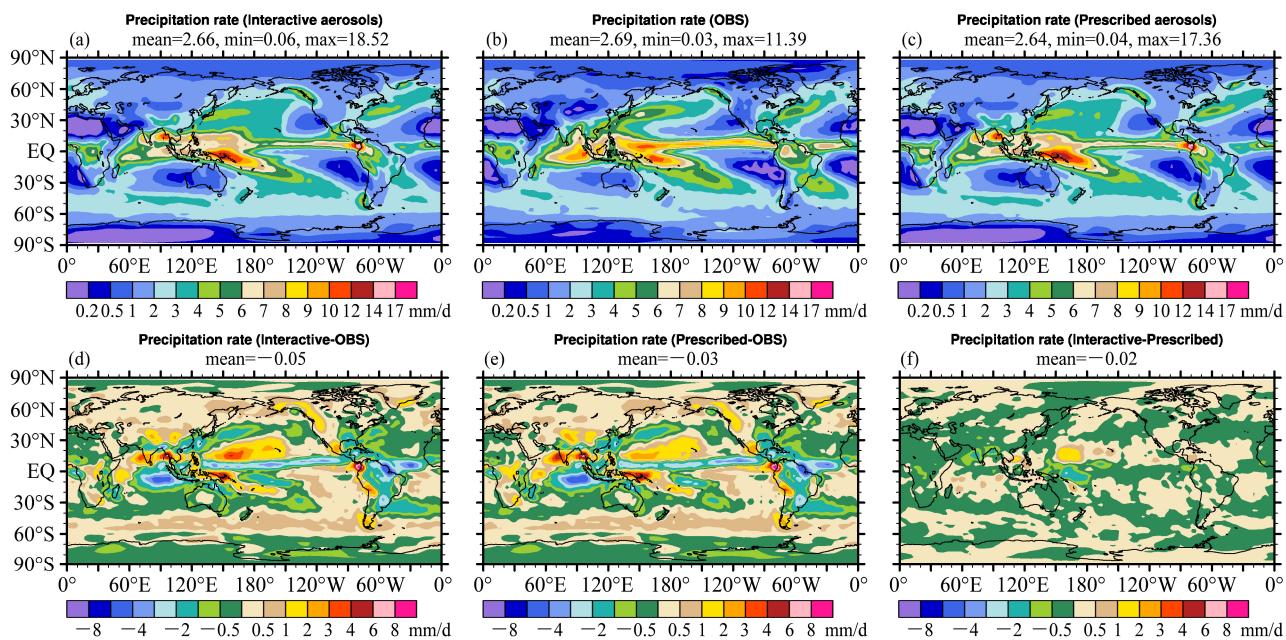


图6 (a) BCC_int、(b) GPCP、(c) BCC_pre、(d) BCC_int-GPCP、(e) BCC_pre-GPCP、(f) BCC_int-BCC_pre 得到的降水率及其差异的全球分布
Fig. 6 The distributions of precipitation rate at the surface from (a) BCC_int, (b) GPCP, (c) BCC_pre, and their differences (d) BCC_int minus GPCP, (e) BCC_pre minus GPCP, and (f) BCC_int minus BCC_pre

负偏差相对月平均气溶胶资料增大基本是沙尘气溶胶相对后者偏多造成的。

图6给出了模式模拟的降水率全球分布形势以及和GPCP资料的对比。从图6a和图6b中可见，BCC_int模拟出了降水率空间分布的基本形势，但在热带地区，其降水率明显偏大。图6d给出了BCC_int和观测结果差异的分布，从中可以看出在印度和孟加拉湾季风降水区和西太平洋的赤道两侧BCC_int的降水率偏差较大，BCC_pre模拟的降水率偏差分布与此类似（图6e）。图6f显示了气溶胶方案的不同造成的降水率差异的分布，从中可以看出比较明显的特征：首先，在印度和孟加拉湾地区BCC_int的降水率相对BCC_pre有所减小，在一定程度上减小了模拟结果与观测的偏差；其次，在西太平洋赤道南北两侧BCC_int的降水率相对于BCC_pre分别有明显的减少和增加，这种变化使南侧降水率的模拟偏差有所减小，而使北侧降水率的模拟偏差有所增大。气溶胶对降水的影响比对地表温度的影响更复杂，要通过一系列反馈过程来实现，其中最重要的是云反馈。气溶胶影响云，进而影响降水的途径主要有两个，即影响地气辐射平衡和作为云凝结核或者冰核影响云微物理性质进而影响云和降水。但目前还无法准确获得气溶胶与云及降水的确切关系（杨慧玲等，2011）。本文仅考

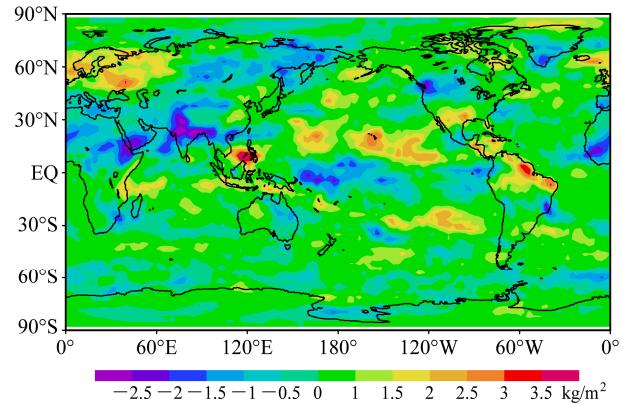


图7 BCC_int-BCC_pre 得到的云水（包括液水和冰水）路径差异
Fig. 7 The difference of in-cloud water (liquid and ice) from BCC_int minus BCC_pre

虑气溶胶的直接辐射作用，而没有考虑气溶胶与云的微物理过程，因此这里的云反馈主要是指云对气溶胶辐射作用的反馈，即气溶胶作用于大气辐射过程，而影响温度、环流等气候特征，云的形成和分布随着这些特征的改变而变化，云的变化进而对辐射场、降水等产生影响，构成气溶胶—辐射—云—气候的复杂反馈过程。从图7可以看出，在印度地区，BCC_int使得该地区云水路径相比BCC_pre有所减小，与降水率的变化有很好的对应；而在西太平洋赤道两侧，气溶胶的改变造成的降水率变化与云水路径的变化同样有着很好的对应关系。如果对

整层大气进行水汽通量的积分(图略), 在印度地区, BCC_int 使得由陆地向海洋的水汽通量明显增加, 这不利于云和降水的形成; 而在西太平洋赤道南、北两侧, BCC_int 分别减弱和增加了水汽的辐合, 从而减弱和增加了降水。同时我们发现, 印度和西太平洋赤道附近既不是气溶胶光学厚度最大的地区, 也不是气溶胶改变最明显的地区(图 2), 但是气溶胶方案的改变对这些地区降水率的影响最大。这一方面是因为这些地区的降水率本身比较大, 另一方面也可能与这些地区降水对气溶胶比较敏感有关。由此可见, 准确模拟气溶胶和其辐射效应, 对于提高降水, 尤其是印度和西太平洋赤道附近地区的降水模拟非常重要。

5 结论

通过对气溶胶—气候耦合模式系统 BCC_AGCM2.0.1_CAM 的气溶胶和气候态模拟情况的初步评估, 得到以下结论:

耦合系统对 5 种典型种类气溶胶的柱含量和光学厚度的模拟总体上是合理的, 尤其是对硫酸盐、沙尘和海盐的模拟相比 BCC_AGCM2.0.1 原有的月平均气溶胶资料有很大改进, 但是碳类气溶胶处于 AeroCom 的较低水平。

耦合系统对全球平均气候态变量的模拟和观测/再分析资料比较一致, 且对总云量、陆地表面温度和降水等的模拟比月平均气溶胶资料模拟结果略有改进, 虽然并没有从根本上降低误差。从大气顶净太阳辐射通量、地表温度和降水率的全球分布来看, 耦合系统模拟的分布形势和观测/再分析资料比较相似, 其误差主要是 BCC_AGCM2.0.1 本身误差造成的。耦合系统在撒哈拉、阿拉伯和南半球海洋上模拟的大气顶净短波辐射比原有月平均气溶胶资料有所改进, 而在赤道太平洋上, 气溶胶的改变引起了云和其它反馈, 不仅影响了辐射场, 而且对降水产生了重要的影响。

参考文献 (References)

- Bond T C, Streets D G, Yarber K F, et al. 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D14203, doi: 10.1029/2003JD003697.
 Bond T C, Bhardwaj E, Dong R, et al. 2007. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850–2000

- [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, doi: 10.1029/2006GB002840.
 Brasseur G P, Hauglustaine D A, Walters S, et al. 1998. MOZART: A global chemical transport model for ozone and related chemical tracers, 1, Model description [J]. *J. Geophys. Res.*, 103: 28265–28289.
 Cofala J, Amann M, Klimont Z, et al. 2005. Scenarios of world anthropogenic emissions of SO₂, NO_x, and CO up to 2030, internal report of the Tran Boundary Air Pollution Programme [R]. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg, Austria, 17pp.
 Collins W D, Rasch P J, Eaton B E, et al. 2001. Simulating aerosols using a chemical transport model with assimilation of satellite aerosol retrievals: Methodology for INDOEX [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D7): 7313–7336.
 Collins W D, Rasch P J, Eaton B E, et al. 2002. Simulation of aerosol distributions and radiative forcing for INDOEX: Regional climate impacts [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D19): 8082, doi: 10.1029/2000JD000032.
 Cooke W F, Lioussse C, Cachier H, et al. 1999. Construction of a 1°×1° fossil fuel emission data set for carbonaceous aerosol and implementation and radiative impact in the ECHAM4 model [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D18): 22137–22162.
 Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Change 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.
 Gong S L, Barrie L A, Lazare M. 2002. Canadian Aerosol Module (CAM): A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models 2, Global sea-salt aerosol and its budgets [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D24): 4779, doi: 10.1029/2001JD002004.
 Gong S L, Barrie L A, Blanchet J P, et al. 2003. Canadian aerosol module: A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models 1, Module development [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D1), doi: 10.1029/2001JD002002.
 Hack J J. 1994. Parameterization of moist convection in the National Center for Atmospheric Research community climate model (CCM2) [J]. *J. Geophys. Res.*, 99: 5551–5568.
 Hasumi H, Emori S. 2004. K-1 coupled GCM (MIROC) description [R]. Center for Climate System Research, University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, Frontier Research Center for Global Change, Tokyo, Japan, 38.
 Hauglustaine D A, Brasseur G P, Walters S, et al. 1998. MOZART: A global chemical transport model for ozone and related chemical tracers, 2, Model results and evaluation [J]. *J. Geophys. Res.*, 103: 28291–28335.
 Hourdin F, Armengaud A. 1999. The use of finite-volume methods for atmospheric advection of trace species, Part 1. Test of various formulations in a general circulation model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127: 822–837.
 Hurrell J W, Hack J J, Shea D, et al. 2008. A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the community atmosphere model [J]. *J. Climate*, 21 (19): 5145–5153.
 Kettle A J, Andreae M O. 2000. Flux of dimethylsulfide from the oceans: A comparison of updated data sets and flux models [J]. *J. Geophys. Res.*,

- 105: 26793–26808.
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1998. The national center for atmospheric research community climate model: CCM3 [J]. *J. Climate*, 11: 1131–1149.
- Kiehl J T, Gent P R. 2004. The community climate system model, version two [J]. *J. Climate*, 17: 3666–3682.
- Lioussse C, Penner J E, Chuang C, et al. 1996. A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D14): 19411–19432.
- 马井会, 张华, 郑有飞, 等. 2007. 沙尘气溶胶光学厚度的全球分布及分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (2): 156–164. Ma Jinghui, Zhang Hua, Zheng Youfei, et al. 2007. The optical depth global distribution of dust aerosol and its possible reason analysis [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (2): 156–164.
- Marticorena B, Bergametti G. 1995. Modeling the atmospheric dust cycle, 1: Design of a soil-derived dust emission scheme [J]. *J. Geophys. Res.*, 100: 16415–16430.
- Miller R L, Tegen I. 1998. Climate response to soil dust aerosols [J]. *J. Climate*, 11: 3247–3267.
- Nightingale P D, Malin G, Law C S, et al. 2000. Upstill-Goddard RC in situ evaluation of air-sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 14: 373–387.
- Numaguti A, Takahashi M, Nakajima T, et al. 1995. Development of an atmospheric general circulation model [R]. CCSR, Tokyo, Reports of a new program for creative basic research studies, studies of global environment change with special reference to Asia and Pacific regions, Rep. 1–3, pp27.
- Olivier J, Berdowski J, Peters J, et al. 2002. Applications of EDGAR including a description of EDGAR V3.0: Reference database with trend data for 1970–1995 [R]. NRP Report, 410200051, RIVM, Bilthoven, The Netherlands.
- 钱云, 符淙斌, 王淑瑜. 1999. 沙尘气溶胶与气候变化 [J]. 地球科学进展, 14 (4): 391–394. Qian Yun, Fu Congbin, Wang Shuyu. 1999. Soil dust aerosol and climate change [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 14 (4): 391–394.
- Roeckner E, Arpe K, Bengtsson L, et al. 1996. The atmospheric general circulation model (ECHAM-4): Model description and simulation of the present-day climate [R]. Max-Planck-Institute für Meteorologie, Hamburg, Germany.
- Roeckner E, Bäuml G, Bonaventura L, et al. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5, Part I: Model description [R]. Max-Planck-Institute for Meteorology, Report No. 349, Hamburg, Germany.
- Roeckner E, Brokopf R, Esch M, et al. 2004. The atmospheric general circulation model ECHAM5 Part II: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution [R]. Max-Planck-Institute for Meteorology, Report No. 354, Hamburg, Germany.
- Sadourny R, Laval K. 1984. January and July performance of the LMD general circulation model [M] // Berger A, Nicolis C. *New Perspectives in Climate Modelling*. New York: Elsevier, 173–198.
- Schmidt G A, Ruedy R, Hansen J E, et al. 2006. Present day atmospheric simulations using GISS Model E: Comparison to in-situ, satellite and reanalysis data [J]. *J. Climate*, 19: 153–192.
- Smith S D. 1988. Coefficient for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 93: 15467–15472, doi: 10.1029/JC093iC12p15467.
- Stier P, Feichter J, Kinne S, et al. 2005. The aerosol-climate model ECHAM5-HAM [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 5: 1125–1156.
- Van der Werf G R, Randerson J T, Collatz G J, et al. 2004. Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period [J]. *Science*, 303: 73–76.
- 王志立, 张华, 郭品文. 2009a. 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. 2009a. Effects of black carbon aerosol in South Asia on Asian summer monsoon [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 28 (2): 419–424.
- 王志立, 郭品文, 张华. 2009b. 黑碳气溶胶直接辐射强迫及其对中国夏季降水影响的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 14 (2): 161–171. Wang Zhili, Guo Pinwen, Zhang Hua. 2009b. A simulation study of effect of direct radiative forcing due to black carbon aerosol on the summer precipitation in China [J]. *Climate and Environment Study* (in Chinese), 14 (2): 161–171.
- Wu T W, Wu G X. 2004. An empirical formula to compute snow cover fraction in GCMs [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21: 529–535, doi: 10.1007/BF02915720.
- Wu T, Yu R, Zhang F. 2008. A modified dynamic framework for the atmospheric spectral model and its application [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65: 2235–2253, doi: 10.1175/2007JAS2514.1.
- Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al. 2010. The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: Description and its performance for the present-day climate [J]. *Climate Dyn.*, 34: 123–147, doi: 10.1007/s00382-008-0487-2.
- 颜宏. 1987. 复杂地形条件下嵌套细网格模式的设计 (二): 次网格物理过程参数化 [J]. 高原气象, 6 (增刊): 64–139. Yan Hong. 1987. Design of a nested fine-mesh model over the complex topography, Part two: Parameterization of the subgrid physical processes [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 6 (Suppl.): 64–139.
- 杨慧玲, 肖辉, 洪延超. 2011. 气溶胶对云宏观特性和降水影响的研究进展 [J]. 气候与环境研究, 16 (4): 525–542. Yang Huiling, Xiao Hui, Hong Yanchao. 2011. Progress in impacts of aerosol on cloud properties and precipitation [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 16 (4): 525–542.
- 杨溯, 张武, 史晋森, 等. 2010. 半干旱地区黑碳气溶胶特征初步分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (6): 756–764. Yang Su, Zhang Wu, Shi Jinsen, et al. 2010. Preliminary analyses of the characteristics of black carbon in the semi-arid area [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15(6): 756–764.
- Yu F, Luo G. 2009. Simulation of particle size distribution with a global aerosol model: Contribution of nucleation to aerosol and CCN number concentrations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9: 7691–7710.
- Zhang G J, McFarlane N A. 1995. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian Climate Centre general circulation model [J]. *Atmos. Ocean*, 33: 407–446.
- Zhang G J, Mu M Q. 2005. Effects of modifications to the Zhang McFarlane

convection parameterization on the simulation of the tropical precipitation in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model, version 3 [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D09109, doi: 10.1029/2004JD005617.

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. A modeling study of the global distribution of the radiative forcing of black carbon aerosol [J]. *Journal of Atmospheric Science* (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]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (1): 57–66.

Zhang H, Wang Z L, Wang Z Z, et al. 2012. Simulation of direct radiative forcing of aerosols and their effects on East Asian climate using an interactive AGCM–aerosol coupled system [J]. *Climate Dyn.*, 38: 1675–1693, doi: 10.1007/s00382-011-1131-0.