姜燕敏,黄安宁,吴昊旻. 2015. 不同水平分辨率 BCC\_CSM 模式对中亚地面气温模拟能力评估 [J]. 大气科学, 39 (3): 535–547, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14133. Jiang Yanmin, Huang Anning, Wu Haomin. 2015. Evaluation of the performance of Beijing climate center climate system model with different horizontal resolution in simulating the annual surface temperature over Central Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 535–547.

# 不同水平分辨率 BCC\_CSM 模式对中亚地面 气温模拟能力评估

姜燕敏<sup>1,2</sup> 黄安宁<sup>1</sup> 吴昊旻<sup>1,2</sup>

1 南京大学大气科学学院,南京 210093 2 丽水市气象局,丽水 323000

摘 要 本研究基于 IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change: Fifth Assessment Report)中 BCC\_CSM1.1(Beijing Climate Center Climate System Model version 1.1)和 BCC\_CSM1.1(m)(Beijing Climate Center Climate System Model version 1.1)和 BCC\_CSM1.1(m)(Beijing Climate Center Climate System Model version 1.1 with a Moderate Resolution) 气候模式的历史试验结果和 CRU (Climatic Research Unit)资料,采用趋势分析和滑动平均等方法检验了两个版本 BCC\_CSM 模式对中亚地区 1948~2011 年平均地表 气温、各热通量及其趋势的模拟性能,并讨论了不同模式水平分辨率的影响,结果显示: BCC\_CSM1.1 和 BCC\_CSM1.1(m)两个模式均能够模拟出中亚地区显著增温以及感热通量、长/短波净辐射等要素由南向北递减的总体 趋势。其中,BCC\_CSM1.1(m)在对中亚地面年平均气温、感热通量和长/短波净辐射空间分布的模拟结果好于 BCC\_CSM1.1,但对于气温标准差的模拟,BCC-CSM1.1模式略好于 BCC-CSM1.1(m)。模式分辨率的提高,能够更 好地表现出地形的影响,对气温和各热通量模拟性能改善较大,在中亚地区年平均气温的模拟中表现出了一定的优势。 关键词 中亚 地面气温 水平分辨率 BCC\_CSM

文章编号 10060-9895(2015)03-0535-13 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.14133 中图分类号 P467

文献标识码 A

## Evaluation of the Performance of Beijing Climate Center Climate System Model with Different Horizontal Resolution in Simulating the Annual Surface Temperature over Central Asia

JIANG Yanmin<sup>1, 2</sup>, HUANG Anning<sup>1</sup>, and WU Haomin<sup>1, 2</sup>

School of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093
Lishui Meteorological Bureau, Lishui 323000

**Abstract** The temporal and spatial distributions of the mean annual surface air temperature and annual precipitation over Central Asia during 1948–2011 have been studied using trend analysis and moving average methods based on the Climatic Research Unit (CRU) dataset and the output of the historical experiments from the Beijing Climate Center Climate System Model version 1.1 (BCC\_CSM1.1) and the Beijing Climate Center Climate System Model version 1.1 with a Moderate Resolution (BCC\_CSM1.1(m)) for the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on

通讯作者 黄安宁, E-mail: anhuang@nju.edu.cn

收稿日期 2014-03-03; 网络预出版日期 2014-09-10

**资助项目** 科技部公益性行业(气象)科研专项 GYHY201306020,国家重点基础研究计划(973计划)项目 2010CB951001,国家自然科学基金项目 41175086

作者简介 姜燕敏,女,1984年生,工程师,硕士生,主要从事应用气象、气候变化及模拟等相关研究。E-mail: ziyajiang1984@163.com

Climate Change (IPCC AR5). Heat flux and radiation flux were imported to further assess the capability of the two BCC\_CSM versions in simulating the climate over Central Asia. The results show that these two versions effectively simulated the significant upward trend and north–south increasing characteristic of sensible heat flux and radiation flux over Central Asia. The performance of BCC\_CSM1.1(m) in simulating the spatial distribution of air temperature, heat flux, and long/short radiation flux improved significantly compared with the results of BCC\_CSM1.1. However, the performance of BCC\_CSM1.1 in simulating the spatial distribution of air temperature was better than BCC\_CSM1.1(m). The improvement in model resolution more clearly demonstrated the topographic effects and improved the model simulation performance for heat flux and radiation flux. The high-resolution model displayed advantages in simulating the air temperature over Central Asia.

Keywords Central Asia, Surface air temperature, Horizontal resolution, BCC\_CSM

# 1 引言

长期以来气候系统模式被认为是进行气候模 拟和未来气候变化预估的重要工具(Zhou et al., 2007),他们在自然和人类活动外强迫下能够较好 地模拟出全球变暖的主要特征 (Zhou and Yu, 2006)。在将全球气候模式应用到区域气候模拟过 程中,由于计算机能力和资源的限制,模式水平分 辨率一般较低,难以较好地描述区域地形和中小尺 度物理和化学等作用过程,从而造成较大的模拟偏 差(IPCC, 2007; Xu et al., 2010)。高学杰等(2006) 曾使用区域气候模式 RegCM2,采用不同的水平分 辨率对东亚降水进行了一系列的模拟试验,指出数 值模式的水平分辨率对东亚和中国降水模拟的影 响是非常重要的; Leung and Qian (2003)发现高 水平分辨率提高了沿海岸山坡及盆地区域的降 水模拟效果,但在某些地区也可能过高估计降水 量; Giorgi and Marinucci (1996) 分析表明, 降水 量、云量、陆面能量通量和降水强度分布对水平分 辨率比对地形强迫的作用要更加敏感,并指出物理 方案对分辨率的敏感性可以明显调整地形强迫的 作用;田芝平和姜大膀(2013)结合观测和再分析 资料系统评价了模式水平分辨率对东亚和中国气 候模拟的影响,发现不同水平分辨率对不同要素的 模拟能力存在较大差异。

以往的气候模式模拟工作多集中在对湿润区 气候的评估(覃卫坚等,2010;蒋晓武等,2010), 对干旱半干旱地区的分析少见,尤其是中亚地区。 气候系统模式对干旱地区气候的模拟能力如何还 有待深入地揭示和研究。中亚地处干旱和半干旱 区,生态环境较为脆弱,我国西北的新疆地区也是 该区域的一部分。该地区包括了乌兹别克斯坦、吉 尔吉斯斯坦、土库曼斯坦、塔吉克斯坦、哈萨克斯 坦、中国新疆和阿富汗北部等地区。由于地处欧亚 大陆腹地,尤其是东南缘高山阻隔了来自印度洋、 太平洋的暖湿气流, 该地区气候为典型的大陆性温 带沙漠、草原气候。研究表明近百年来中亚气候的 变暖幅度大于中国东部季风区, 甚至是后者变化幅 度的两倍多(Chen et al., 2009),就我国西北干旱区 而言,特别是新疆自 1987 年以来气候出现由"暖 干"向"暖湿"转型现象 (Shi et al., 2007)。陈发 虎等(2011)分析了中亚干旱区近 80 年来的降水 变化特征及其区域差异,结果发现中亚干旱区降水 对全球变暖的响应复杂, 西风环流变化可能是影响 中亚干旱区降水变化的主要因素。吴昊旻等(2013) 利用气候模式 BCC-CSM1.1 的历史试验和4 类典型 浓度路径 RCP (Representative Concentration Pathways) 下未来预估试验结果, 研究 2011~2060 年期间中亚地区年平均气温的时空演变特征。

随着模式水平分辨率的提高,气候系统模式能 够更加真实地刻画下垫面类型,为研究干旱半干旱 地区的气候变化提供了有力的研究工具,但是在利 用不同水平分辨率的气候系统模式研究这些区域 的气候变化之前,有必要深入分析模式水平分辨率 的提高到底对这些地区的模拟性能有怎样的影响。 基于这样的目的,本研究选取参与 IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change: Fifth Assessment Report) 第五次耦合模式比较计划 (CMIP5)的两种水平分辨率的 BCC CSM(Beijing Climate Center Climate System Model) 气候系统模 式的历史回报(Historical)试验结果,利用气候统 计学方法来评估这两个不同水平分辨率的模式版 本对中亚地区年平均地面气温气候要素的模拟性 能,以考察模式水平分辨率对 BCC CSM 气候系统 模式模拟中亚气候能力的影响,为该气候系统模式 的进一步改进和完善提供必要的参考。

# 2 模式资料与方法

## 2.1 资料

目前,国家气候中心推出了两个版本的气候系 统模式: BCC CSM1.1 (BCC CSM version 1.1) 和 BCC\_CSM1.1(m) (BCC\_CSM version 1.1 with a moderate resolution)。 BCC CSM1.1 模式 [全球分 辨率约为 2.8125°(纬度) × 2.8125°(经度)] 是由 北京气候中心研发的气候系统模式。该模式是一个 全球海洋--陆地--海冰--大气多圈层耦合的全球 气候—碳循环耦合模式,以美国大气研究中心 (NCAR) 气候系统模式 CCSM2 的通量耦合器 CPL5 为基础,把国家气候中心研发的全球大气环 流模式 BCC AGCM2.1 和陆面过程模式 BCC AVIM1.0, 与基于美国地球流体动力学实验室 (GFDL)研发的全球海洋环流模式 MOM4 L40 和 全球动力热力学海冰模式 SIS 实现全动态的耦合, 并加入碳循环模块,能够模拟人类活动碳排放引起 大气CO2浓度变化和全球气候的影响,可满足IPCC AR5 的模拟试验要求, 详见 Wu (2012)。大气模式 BCC AGCM2.1 是一个全球谱模式,水平分辨率为 T42 波谱截断(全球分辨率约为 2.8125°×2.8125°), 垂直分为 26 层。海洋分量模式 MOM4\_L40, 水平 分辨率是 1°×1°, 经向在热带地区加密到 (1/3)°, 垂直方向为 40 层。海冰分量为 GFDL 发展的模式 SIS, 水平分辨率与 MOM L40 相同。

BCC\_CSM1.1(m) 模式是由BCC\_CSM1.1发展 而来的中等分辨率模式(全球分辨率约为 1.125°×1.125°),与BCC\_CSM1.1版本的区别在于 大气模块的水平分辨率,BCC\_CSM1.1(m)模式的 大气环流模式为BCC\_AGCM2.2,该环流模式水平 分辨率为T106波谱截断。两个BCC模式垂直方向 上均分为26层,顶层为2.914 hPa(王璐等,2009; 颉卫华和吴统文,2010),使用了相同的动力框架 和物理过程,两者的陆面、海洋和海冰分量是相同 的(辛晓歌等,2012)。

两个 BCC\_CSM 气候系统均耦合了全球碳循 环,能够较好的模拟出 20 世纪包含人为碳排放的 全球碳浓度及其时间演变特征(Wu et al., 2014)。 不少科学研究中对两个模式的模拟结果,尤其是地 面气温和降水的空间和季节演变特征进行了细致 分析,如石彦军等(2012)对 BCC\_CSM 模式模拟 中国区域 500 hPa 不同季节的位势高度场、温度场 等气象要素的能力进行检验; 高峰等(2012)评估 了 BCC\_CSM1.1 模式年代际试验对 10 年尺度全球 及区域地表温度的预测能力。Wu et al. (2013)检 验了 BCC\_CSM1.1 模式对工业化前到现在对陆地 和海洋碳收支情况的模拟能力,并指出全球大气 CO<sub>2</sub>浓度与厄尔尼诺振荡周期密切相关,这与观测 结果一致。Xin et al. (2013)对比了 BCC\_CSM1.0 和 BCC\_CSM1.1 模式对中国 20 世纪平均地面气温 的模拟性能后发现,BCC\_CSM1.1 模式能够更好地 模拟出平均地面气温的时间演变特征,比如中国 1961~1990年 1°C 左右的增暖幅度,BCC\_CSM1.1 模式的模拟结果与观测数据相一致。

本研究所使用的模式资料主要是由参与 IPCC AR5 第五次耦合模式比较计划(CMIP5)的 BCC\_CSM1.1 和 BCC\_CSM1.1(m)模式提供的 1901~2011 年的历史气候模拟试验(简称 Historical试验)的模式结果。

观测资料使用的是英国东英吉利亚(East Anglia)大学的CRU(Climatic Research Unit)最近 释放的1901~2011年全球陆面月平均地面数据集 CRU\_TS\_3.2,其空间水平分辨率达到0.5°×0.5° (http://badc.nerc.ac.uk/browse/badc/cru/data[2014-0 5-20])。CRU资料在重建过程中包括了严格的时间 均一性检验,空间分辨率更高,时间尺度更长,一 直以来是IPCC评估报告采用的系列数据之一 (IPCC, 2001)。该数据集提供了包括平均温度、 最高温度、最低温度、降水等要素在内的10个地 表变量,在全球气候变化的科学研究中得到广泛应 用(Folland et al., 2001; Jones et al., 2001)。

再分析资料为 NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996)和 ERA-40 提供的数据集。NCEP/NCAR 数据集是美国国家环境预报中心 (NCEP)和美国国家大气研究中心 (NCAR)利用观测资料、预报模式和同化系统对全球从 1948 年到目前的气象资料进行再分析形成的格点资料 (施晓晖等, 2006)。 ERA-40 是欧洲中期数值预报中心 (ECMWF)于 2003 年完成第二代再分析资料。相对于第一代再分析资料。化CEP-1、NCEP-2和 ERA-15)来说,ERA-40无论在空间分辨率还是时间尺度上都有较大的改进 (Simmons and Gibson, 2000; Uppala et al., 2004)。

## 2.2 方法

为了研究气候要素的年际变率,对观测数据和

模拟结果的标准差进行了计算。标准差可以反映数据的离散程度,将标准差运用到时间上可以反映变率。BCC\_CSM1.1的水平分辨率为T42波谱截断,BCC\_CSM1.1(m)的水平分辨率为T106波谱截断,而CRU观测数据为0.5°×0.5°,NCEP再分析资料中辐射和地表热通量变量分辨率为1.9°×1.9°。为了能够对不同分辨率的资料作对比分析,本研究在做历史回报结果检验时,将BCC\_CSM1.1和BCC\_CSM1.1(m)的降水和气温数据通过双线性插值方法插值到CRU资料分辨率0.5°×0.5°网格上;做辐射和地表热通量分析时,将两个BCC模式的模拟结果插值到NCEP的1.9°×1.9°网格以及ERA-40的1.125°×1.125°网格(为减少插值误差)。

气温是构成气候的重要气象要素,本研究在年时间尺度上研究BCC\_CSM两种分辨率的气候模式 对 1948~2011 年期间中亚地区地面气温的模拟能 力,并结合辐射和地表热通量等要素,进一步分析 模式分辨率提高对中亚气候模拟性能的影响,从而 为模式改进提供参考。

## 3 结果分析

## 3.1 中亚地面气温气候态和年际变率

图 1 是中亚地区(35°N~55°N, 50°E~95°E) 区域平均的 BCC\_CSM1.1 和 BCC\_CSM1.1(m) 历 史模拟试验结果和 CRU 资料的年平均地面气温在 1948~2011 年间的时间变化特征。两个模式与观测 结果的相关系数分别为 0.613 和 0.633,均通过了 99%的信度检验。趋势分析的结果显示观测结果和 两个模式的模拟结果均呈显著的增温趋势, BCC\_CSM1.1 模式结果的增温趋势与 CRU 资料更 为接近。10 年滑动平均可以较好反映年代际变化特 征,从该曲线来看,三者的时间演变特征大致相同。 图 2a 是中亚地区年平均地面气温观测结果的 空间分布图。从数值高低分布来看,CRU数据中气 温低于零度的区域,主要出现在中国新疆南部以及 中国、蒙古和俄罗斯三国的交界处。高值中心(大 于12°C)区域主要分布在乌兹别克斯坦和土库曼斯 坦,在中国新疆塔里木盆地中也有高值中心出 现。在乌兹别克斯坦、土库曼斯坦和哈萨克斯坦南 部,年平均气温由南向北递减。由图 2b 和图 2c 可 知,两个 BCC 模式均能模拟出中亚地区地面气温 由南向北递减的分布趋势,尤其是乌兹别克斯坦、 土库曼斯坦和哈萨克斯坦南部一带。BCC-CSM1.1 模式能够部分模拟出中国新疆的地面气温分布,但 数值和位置差异较大。BCC-CSM1.1(m)较 BCC-CSM1.1 有较大改进,对新疆塔里木盆地地区的地 面气温空间分布模拟较好,只是数值略为偏低。

从差异场 (图 2d 和图 2e) 来看两个模式对中 亚地区的气温模拟同时存在高估(正值区)和低估 (负值区)。从等值线数值来看,高估的程度远低 于低估。高估的误差数值范围在 0~2℃, 其区域主 要集中在哈萨克斯坦境内和乌兹别克斯坦的西北 部,在中国新疆有零星的分布。低估的误差远大于 高估,主要体现在中国新疆的塔里木盆地。 BCC CSM1.1 模式的误差大于 10℃, 且低估的区域 较大。 BCC CSM1.1(m) 的模拟效果优于 BCC CSM1.1,误差数值减小,同时低估区域缩小, 在中国新疆的塔里木盆地表现尤为明显。从两个模 式间的地面气温差异场 (图 2f) 来看, 差异较大的 区域位于中国新疆塔里木盆地, BCC CSM1.1(m) 较 BCC CSM1.1 更加接近观测值。另外在中国、蒙 古和俄罗斯三国交界处,以及哈萨克斯坦东南部到 土库曼斯坦东部一带也有较显著的改进, 差异数值 在 2℃ 左右。可能由于 BCC CSM1.1(m)气候模式



图 1 1948~2011 年中亚区域年平均地面气温演变特征(直线:线性拟合;虚线:10年滑动平均;单位:℃)

Fig. 1 Time series of the mean annual surface air temperature regionally averaged over Central Asia during 1948–2011 (Straight lines: linear fitting; dashed curves: 10-year running mean; units: °C)

水平分辨率的提高,能较好地刻画新疆中部沙漠地 区的下垫面特征。

图 3 是过去 64 年来观测和模拟的中亚年平均 地面气温标准差以及模拟结果和观测之间差异的 空间分布。CRU 资料显示,年平均地面气温标准差 呈现由南向北递增的趋势。中亚北部的哈萨克斯坦 北部和俄罗斯,标准差大于 1.0°C,在蒙古西部出 现了 1.2°C 的高值区域。而低值区域主要集中在中 国新疆、阿富汗北部以及塔吉克斯坦一带。在中国 新疆南部和东部,数值小于 0.7°C。BCC\_CSM1.1 和BCC\_CSM1.1(m)两个模式较好地再现了中亚年 平均地面气温标准差由南向北递增的总体趋势,但 在细节处差异较明显。在中亚北部地区,两个模式 均存在较明显的高估,BCC-CSM1.1 模式略好于 BCC-CSM1.1(m)。对中国新疆低值区域的模拟,整 体趋势一致,但 BCC-CSM1.1 模式比 BCC-CSM1.1 (m)更接近于观测数值。

图 3d 和图 3e 是两个 BCC CSM 模式与 CRU 观测数据标准差的差值场。两个模式的标准差较 CRU 观测资料同时存在偏高与偏低,在中亚北面以 偏高为主,南面以偏低为主。相对于 BCC CSM1.1 (m), BCC\_CSM1.1 模式与观测数据更为接近, 仅 在哈萨克斯坦北部和俄罗斯、中国新疆东部以及阿 富汗北部到吉尔吉斯斯坦一带高于 0.8℃。 BCC CSM1.1(m) 模式模拟结果的标准差在俄罗 斯、中国新疆东部和中部地区偏高 0.4℃ 以上,仅 在哈萨克斯坦西南部、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦 一带的偏差小于 0.1℃。图 3f 是两个 BCC 模式的差 异场, BCC\_CSM1.1(m) 模式标准差较 BCC\_ CSM1.1 的整体偏高,差异最大的区域集中在中国 新疆北部、哈萨克斯坦东部到俄罗斯和蒙古交界一 带,数值达到 0.3℃ 以上,其次是里海北部沿岸, 范围较小,数值在0.3°C。

### 3.2 中亚地区地面感热通量分析

陆气间动量和热量交换对于气候变化和大气 环流起着不容忽视的作用,为了进一步研究两种 BCC模式的模拟能力差异,引入了感热通量、潜热 通量。图 4a 是 NCEP 再分析资料显示中亚地区的 年感热通量空间分布。整个中亚地区,感热通量以 正值为主,在俄罗斯境内出现负值区域,在中国、 俄国、蒙古交界处以北有一个小的负值中心。高值 区域位于里海沿岸,最大值出现在土库曼斯坦、乌 兹别克斯坦、伊朗及阿富汗北部,数值达到 50 W m<sup>-2</sup>以上。此外,在中国的新疆东部地区也出现 了高值区域,数值在 40 W m<sup>-2</sup>左右。对比图 2a, 感热通量的分布与年平均气温较为相似,高低值中 心的空间分布总体上保持对应关系。两个 BCC 模 式对中亚区域的年感热通量空间分布模拟结果尚 可(图 4b 和图 4c),对土库曼斯坦、乌兹别克斯坦、 伊朗及阿富汗北部的高值区域模拟较好。但对俄罗 斯境内的负值区域,模拟效果不理想。

539

从模式与 NCEP 再分析资料的差异场看(图 4d 和图 4e),多数区域的误差在 10 W m<sup>-2</sup> 以下,主要 有哈萨克斯坦和中国新疆大部分区域。两个模式的 模拟误差分布较为接近,偏高的区域均集中在中亚 北部的俄罗斯和中国、塔吉克斯坦和阿富汗交界 处。偏低区域分布于里海沿岸地区。其中 BCC\_ CSM1.1(m) 模式模拟偏高区域较 BCC\_CSM1.1小, 且偏高的数值减小,俄罗斯境内的偏高误差减小较 为明显;但对于里海沿岸模拟偏低区域,BCC\_ CSM1.1 的模拟效果略好于 BCC\_CSM1.1(m)。

图 4f 是两个模式模拟的感热通量差异场。在大部分区域,两个模式的差异在 5 W m<sup>-2</sup>以下。将该差异场结合图 4d 进行分析,模式差异场中的负值 区域,主要集中在俄罗斯境内、里海沿岸以及中国 新疆南部及北部等地区,在图 4d 中显示为正值; 而模式差异场中的正值区域,位于中国新疆西部的 塔里木盆地,在图 4d 中表现为负值。这说明,在 上述区域内,BCC\_CSM1.1(m)模式模拟结果相对 于 BCC\_CSM1.1 模式改进较为明显。对比图 4f 和 图 2f (年平均气温模拟差异场),二者高低值分布 较为相似,存在对应关系,在中国的新疆地区表现 尤为明显。

图 5a 是中亚地区 NCEP 再分析资料年潜热通 量的空间分布。与感热通量(图 4a)和年平均气温 (图 2a)的空间分布近乎相反,潜热通量的低值中 心出现在哈萨克斯坦南部、土库曼斯坦、乌兹别克 斯坦及阿富汗北部一带以及中国新疆的东部地区。 高值中心主要位于中亚北面的俄罗斯境内、里海及 沿岸以及中国新疆南部和西藏地区。两个 BCC 模 式的模拟误差以模拟偏低为主,误差最大的区域位 于中亚北部的俄罗斯境内,BCC-CSM1.1(m)模式 比 BCC-CSM1.1 略好,误差的数值有所减小。模拟 偏高的区域则出现在里海沿岸,即哈萨克斯坦西南 部,呈现一个小的高值中心。

从两个模式的差值场(图 5f)来看,整体的模



图 2 1948~2011 年中亚地区气候态的(a) CRU 年平均地面气温、(b) BCC\_CSM1.1 和(c) BCC\_CSM1.1(m) 模拟结果、(d) BCC\_CSM1.1 和(e) BCC\_CSM1.1(m) 模拟结果与观测数据差异场以及(f) 两个模式结果之间差异场的空间分布(单位: ℃)

Fig. 2 The spatial distribution of the climatology of (a) the CRU observed, (b) BCC\_CSM1.1 and (c) BCC\_CSM1.1(m) modeled mean annual surface air temperature, differences between observations and the simulation from (d) BCC\_CSM1.1 and (e) BCC\_CSM1.1(m), and (f) modeled mean annual surface air temperature differences between the two models over Central Asia averaged over 1948–2011 (units: °C)



图 3 1948~2011 年: (a) CRU 观测; (b) BCC\_CSM1.1 和 (c) BCC\_CSM1.1(m) 模拟的中亚地区年平均地面气温标准差; (d, e) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果与观测以及 (f) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果差异场的空间分布 (单位: ℃)

Fig. 3 The spatial distribution of standard deviation of (a) the CRU observed, (b) BCC\_CSM1.1 and (c) BCC\_CSM1.1(m) modeled mean annual surface air temperature, differences between observations and the simulation from (d) BCC\_CSM1.1 and (e) BCC\_CSM1.1(m), and (f) modeled standard deviation of mean annual surface air temperature differences of the two models over Central Asia averaged over 1948–2011 (units: °C)

541



图 4 1948~2011 年: (a) NCEP 再分析资料感热通量空间分布; (b) BCC\_CSM1.1 和 (c) BCC\_CSM1.1(m) 模拟的中亚地区年平均地面感热; (d、 e) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果与 NCEP 再分析资料之间差异场的空间分布以及 (f) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果之间差异场的空间分布 (单位: W m<sup>-2</sup>)

Fig. 4 The spatial distribution of the (a) NCEP reanalysis, (b) BCC\_CSM1.1 and (c) BCC\_CSM1.1(m) modeled mean annual surface sensible heat fluxes, and difference between NCEP reanalysis and the simulation from (d) BCC\_CSM1.1 and (e) BCC\_CSM1.1(m), and (f) modeled mean annual surface sensible heat flux differences of the two models over Central Asia averaged over 1948–2011 (units: W m<sup>-2</sup>)



图 5 1948~2011 年: (a) NCEP 再分析资料潜热通量空间分布; (b) BCC\_CSM1.1 和 (c) BCC\_CSM1.1(m) 模拟的中亚地区年平均地面潜热; (d、 e) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果与 NCEP 再分析资料之间差异场的空间分布以及 (f) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果之间差异场的空间分布 (单位: W m<sup>-2</sup>) Fig. 5 The spatial distribution of the (a) NCEP reanalysis, (b) BCC\_CSM1.1 and (c) BCC\_CSM1.1(m) modeled mean annual surface latent heat fluxes, and difference between NCEP reanalysis and the simulation from (d) BCC\_CSM1.1 and (e) BCC\_CSM1.1(m), and (f) modeled mean annual surface latent heat flux differences of the two models over Central Asia averaged over 1948–2011 (units: W m<sup>-2</sup>)

拟结果差别较小,里海地区的差异最大,其次是中国、哈萨克斯坦、俄罗斯交界处以及中国新疆地区。 结合图 5d 进行分析,BCC\_CSM1.1(m)模式相对 BCC\_CSM1.1 改进的区域主要表现为:(1)在图 5d 中显示为负值,而在图 5f 中对应呈现正值的区 域,主要出现在中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、蒙古 交界处到中国新疆北部、中国新疆西南部到阿富汗 北部以及里海地区;(2)在图 5d 显示为正值而在 图 5f 中呈现负值的区域,主要位于中国新疆塔里木 盆地地区。图 5f 中的高低值空间分布与图 4f 的近 乎相反,这些正负区域出现的位置,同时也是 BCC\_CSM1.1(m)模式相对BCC\_CSM1.1改进的地 方。对比这些区域与图 2f,除了数值相反之外,其 高低值空间分布存在着一定的对应关系,在中国新 疆地区表现比较明显。

关于再分析资料的优缺点及适用性,不少专家 和学者做了研究,如: Josey (2001)利用海上浮标 测量资料比较 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料 的表面热通量的差异,结果表明,相比于 NCEP/ NCAR 再分析资料, ERA-40 再分析资料的热通量 更接近于实际观测的结果;周连童(2009)利用台 站观测资料以及 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资 料,计算并比较了在我国西北地区春夏季感热输送 的差异,并指出从年代际时间尺度上,ERA-40 再 分析资料的感热数据更接近于实际台站观测资料 计算得到的感热数据;赵天保和符淙斌(2006)就 中国区域气温和降水两种基本气候变量在空间分 布及其变化趋势上对 ERA-40 和 NCEP-2 与观测资 料之间的差异做了一些比较和分析,结果表明:两 套再分析资料基本上都能反映出中国区域的温度 场和降水场的时空分布,再分析资料在东部地区的 可信度高于西部,温度场的可信度要高于降水场, ERA-40 可信度要高于 NCEP-2; 王同美等 (2011) 对 NCEP-1、NCEP-2 和 ERA-40 这 3 类资料中的垂 直积分的总加热率和地表感热通量进行比较,并指 出垂直积分的总非绝热加热在空间分布上三套资 料基本一致,NCEP 两套资料在大值中心的分布上 相似,但量值上 NCEP-2 和 ERA-40 比较接近。为 了进一步佐证模式分辨率提高对模式性能的提升, 利用欧洲中心的 ERA-40 再分析资料,对 1958~ 2001 的感热和潜热数据作进一步探讨。

图 6a 是 ERA-40 资料中亚地区年平均感热的空间分布图。将其与实况 CRU (图 2a)相比, ERA-40

的空间分布特征与观测数据基本一致,主要的高低 值区域分布的范围与位置和实况基本对应。ERA-40 与 NCEP 资料(图 4a)相比,ERA-40 在乌兹别克 斯坦、土库曼斯坦和阿富汗北部一带的数值较 NCEP 要低,并且与北部俄罗斯境内的低值中心不 一致。两个 BCC 模式对中亚地区感热的模拟以高 估为主,从差值场看,随着模式水平分辨率的提高, BCC\_CSM1.1(m)的模拟性能较BCC\_CSM1.1有较 大改善,在哈萨克斯坦北部地区模拟偏高的区域数 值减少了 5 W m<sup>-2</sup>以上。结合图 6f 和图 6d,模式性 能改善最大的区域集中在正负值中心区域,如中国 新疆塔里木盆地和新疆北部,中国、俄罗斯、哈萨 克斯坦、蒙古交界处等,与前面利用 NCEP 资料的 分析结论一致。

图 7a 是 ERA-40 年平均潜热空间分布, 乌兹别 克斯坦中部和土库曼斯坦一带的低值区域以及在 俄罗斯境内的高值区域, 均较 NCEP 要小, 但中国 新疆南部的低值区域远大于 NCEP 资料。两个 BCC 模式对中亚地区感热的模拟结果与 ERA-40 差异总 体上小于 10 W m<sup>-2</sup>, 以低估为主, 仅在中国新疆塔 里木盆地和里海东岸为高估。由差值场(图 7d 和 图 7e)能够看出,随着模式水平分辨率的提高, BCC\_CSM1.1(m)的模拟性能较 BCC\_CSM1.1有较 大改善, 与 ERA-40 再分析资料更为接近, 主要表 现为哈萨克斯坦中部和中国新疆,模拟误差减少 2 W m<sup>-2</sup>以上。结合图 7f 和图 7d, BCC\_CSM1.1(m) 相 对于 BCC\_CSM1.1 模式的改进区域与图 5f 所示相 同。

#### 3.3 地表辐射分析

由图 6 和图 7 的分析可知, NCEP 资料与 ERA-40 均能够较好的反应中亚地区的气候变化特征,两 类再分析资料与 BCC 模式的分析结论一致。因 此,在后面的分析中,仅加入了 NCEP 资料的辐射 通量,以对两个模式的模拟效果做进一步检验。图 8 是中亚地区 NCEP 再分析资料的年地面短波净辐 射,两个 BCC 模式的模拟结果以及差值场的空间 分布。从图 8a 可见,中亚地区的短波净辐射总体 呈现由南向北递减的趋势,高值中心出现在中国西 藏及新疆南部和土库曼斯坦南部及阿富汗北部一 带。在中亚北部的俄罗斯境内出现最低值。地面短 波净辐射受地形影响较大,图中塔吉克斯坦、吉尔 吉斯斯坦一带的数值明显较同纬度地区要低。 BCC-CSM1.1 和 BCC-CSM1.1(m) 模式均能够模拟



图 6 1958~2001 年: (a) ERA-40 再分析资料感热通量空间分布; (b) BCC\_CSM1.1 和 (c) BCC\_CSM1.1(m) 模拟的中亚地区年平均地面感热; (d、 e) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果与 ERA-40 再分析资料以及 (f) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果之间差异场的空间分布 (单位: W m<sup>-2</sup>) Fig. 6 The spatial distribution of the (a) ERA-40 reanalysis, (b) BCC\_CSM1.1 and (c) BCC\_CSM1.1(m) modeled mean annual surface sensible heat fluxes, and difference between ERA-40 reanalysis and the simulation from (d) BCC\_CSM1.1 and (e) BCC\_CSM1.1(m) and (f) modeled mean annual surface sensible heat flux differences of the two models over Central Asia averaged over 1958–2001 (units: W m<sup>-2</sup>)



图 7 1958~2001 年: (a) ERA-40 再分析资料潜热通量空间分布; (b) BCC\_CSM1.1 和 (c) BCC\_CSM1.1(m) 模拟的中亚地区年平均地面潜热; (d, e) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果与 ERA-40 再分析资料以及 (f) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果之间差异场的空间分布 (单位: W m<sup>-2</sup>) Fig. 7 The spatial distribution of the (a) ERA-40 reanalysis, (b) BCC\_CSM1.1 and (c) BCC\_CSM1.1(m) modeled mean annual surface latent heat fluxes, and difference between ERA-40 reanalysis and the simulation from (d) BCC\_CSM1.1 and (e) BCC\_CSM1.1(m) and (f) modeled mean annual surface latent heat flux differences of the two models over Central Asia averaged over 1958–2001 (units: W m<sup>-2</sup>)

出中亚地区短波净辐射由南向北递减的趋势特征,并且对土库曼斯坦及阿富汗北部一带的高值区域模拟较好。BCC-CSM1.1(m)模式较 BCC-CSM1.1 有所改进。BCC-CSM1.1(m)模式较 BCC-CSM1.1 有所改进。BCC-CSM1.1的模拟结果,在中国新疆 西部与吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦交界处呈现出 一个低值区域。在 BCC-CSM1.1(m)模式下,该误差 区域不仅数值减小,而且区域明显缩小。结合图 2a 分析短波净辐射对年平均气温分布的影响,在乌兹 别克斯坦、土库曼斯坦和哈萨克斯坦南部,年平均 气温由南向北递减的趋势与图 8a 中的较为一致, 可以推测,该地区的年平均气温空间差异主要是由 于太阳短波辐射所引起。地形和下垫面对年平均气 温数值分布的影响不可忽略,在中国新疆塔里木盆 地和新疆南部表现较为明显。

图 8d 和图 8e 是 BCC 模式和 NCEP 资料的差 值场。BCC-CSM1.1 模式模拟结果主要体现为偏低 10 W m<sup>-2</sup> 为主,在中国的新疆南部地区,偏低程度 最高。仅仅在阿富汗北部一带以及中国的新疆北部 出现模拟偏高区域。BCC-CSM1.1(m)模式与 BCC-CSM1.1 相比,除了有模拟偏低区域,还存在 较明显的偏高区域,以阿富汗北部、吉尔吉斯斯坦 和塔吉克斯坦一带最为明显,此外还出现在中国新 疆北部及哈萨克斯坦南部。图 8f 是两个 BCC 模式 之间的差异场,在整个中亚地区以正值为主。两个 模式最大差异出现在中国新疆南部的塔里木盆地 地区,其次是哈萨克斯坦东南部、塔吉克斯坦和吉 尔吉斯斯坦一带。两个模式差异为正的区域,在图 8d 中表现为负值,这说明 BCC CSM1.1(m) 模式对 短波净辐射的模拟效果在整个中亚地区较 BCC CSM1.1 有较大改进, 尤其是中国新疆塔里木 盆地一带。模式分辨率的提高,能够更好地表现出 地形及下垫面的影响。

图 9 是中亚地区 NCEP 再分析资料及模式模拟 的年长波净辐射空间分布及模式与实况及模式之 间的差异场。由图 9a 可知,中亚地区的年均长波 辐射分布主要表现为由南向北递减的趋势。最低值 出现在俄罗斯境内,数值在 60 W m<sup>-2</sup> 以下。高值区 域集中于土库曼斯坦和阿富汗北部地区以及中国 新疆南部和西藏北部一带,数值超过 100 W m<sup>-2</sup>。 两个 BCC 模式对中亚地区长波净辐射由南向北递 减的趋势均模拟较好,但高、低值区域的分布仍存 在差异。BCC-CSM1.1 模式对俄罗斯境内低值中心 的模拟偏低 10 W m<sup>-2</sup>,对土库曼斯坦和阿富汗北部 高值区域的模拟较好,但对中国新疆和西藏北部的 高值区域模拟效果较差,仅模拟出一小块 90~100 W m<sup>-2</sup> 的区域。BCC-CSM1.1(m) 模式较 BCC-CSM1.1 有较大改进。对俄罗斯境内低值区域的模 拟,数值和区域位置与实况较为接近。对于中国新 疆地区高值区域的模拟较 BCC-CSM1.1 有较大改 进,模拟数值更接近实况,只是区域范围偏北。

图 9d 和图 9e 是两个 BCC 模式对中亚长波净 辐射模拟结果与实况的差异场。两个模式对中国新 疆南部和西藏北部区域的模拟均呈现较明显的偏 低, 数值差异在 50 W m<sup>-2</sup> 以上。BCC CSM1.1 模式 对中亚地区的模拟以偏低为主, 仅在阿富汗北部地 区出现偏高区域; BCC-CSM1.1(m) 模式的模拟效 果要好于 BCC-CSM1.1 模式,模拟误差在-2~2 W m<sup>-2</sup> 的区域明显增多,模拟偏高的区域也多于 BCC-CSM1.1 模式,主要体现在中国新疆北部及塔 里木盆地、乌兹别克斯坦南部、土库曼斯坦西部和 阿富汗北部一带,误差在 20 W m<sup>-2</sup> 以下。图 9f 是 两个 BCC 模式的差异场。整体来看, BCC-CSM1.1 (m) 模式比 BCC-CSM1.1 的模拟偏高, 差异最大的 地方位于中国新疆的塔里木盆地,数值达到了 30 W m<sup>-2</sup>,其次是新疆南部、哈萨克斯坦南部到阿 富汗北部一带以及中蒙交界处。

## 4 结论

(1) BCC\_CSM1.1 和 BCC\_CSM1.1(m) 两个模 式均能够模拟出中亚地区显著增温以及地面气温 标准差由南向北递增的总体趋势。BCC\_CSM1.1(m) 对中亚地面年平均气温空间分布的模拟效果优于 BCC\_CSM1.1,误差数值减小,同时低估区域缩小, 在中国新疆的塔里木盆地表现尤为明显。而对中亚 年平均地面气温标准差的模拟,BCC-CSM1.1 模式 略好于 BCC-CSM1.1(m),其模拟结果与观测数据更 为接近。

(2)两个 BCC 模式对中亚地区年感热通量空间分布的模拟结果中,对土库曼斯坦和乌兹别克斯 坦等地的高值区域模拟较好,但对俄罗斯境内的负 值区域,模拟效果不理想;两个模式对中亚地区的 年潜热模拟误差均以偏低为主。与 BCC-CSM1.1 模 式相比,BCC-CSM1.1(m)对中亚地区热通量的模 拟效果改进最大的区域集中在中国、俄罗斯、哈萨 克斯坦、蒙古交界处到中国新疆北部、中国新疆西 南部到阿富汗北部以及里海地区。

545







图 9 1948~2011 年: (a) NCEP 再分析资料长波净辐射; (b) BCC\_CSM1.1 和 (c) BCC\_CSM1.1(m) 模拟的中亚地区年平均地面长波净辐射; (d、 e) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果与 NCEP 再分析资料以及 (f) 两个 BCC\_CSM 模式模拟结果之间差异场的空间分布 (单位: W m<sup>-2</sup>)

Fig. 9 The spatial distribution of the (a) NCEP reanalysis, (b) BCC\_CSM1.1 and (c) BCC\_CSM1.1(m) modeled mean annual surface net longwave radiation, and difference between NCEP reanalysis and the simulation from (d) BCC\_CSM1.1 and (e) BCC\_CSM1.1(m) and (f) modeled mean annual surface net longwave radiation differences of the two models over Central Asia averaged over 1958–2001 (units: W m<sup>-2</sup>)

(3) BCC-CSM1.1 和 BCC-CSM1.1(m) 模式均 能够模拟出中亚地区短波净辐射和长波辐射由南 向北递减的趋势特征。模式分辨率的提高,能够更 好地表现出地形对长/短波辐射分布的影响。 BCC-CSM1.1(m) 模式的模拟结果较 BCC-CSM1.1 有较大改进,数值和区域位置与实况较为接近,对 于中国新疆地区短波净辐射数值模拟以及长波净 辐射高值区域模拟改进明显,模拟数值更接近实 况。

比较两个 BCC 模式对地面净通量(包含长/ 短波辐射、感热、潜热等)与地面气温的模拟误差,两者的数值大小和空间分布均有较好的对应关系。模式对地面净通量模拟性能提高的区域,同时 也是地面气温模拟性能得到改善的地方。尽管不同 水平分辨率的 BCC 模式对不同气象要素的模拟能 力存在较大差异,但大气模式、陆面过程模式分辨 率的提升,对气温及与之相关的感热通量模拟性能 的改善均影响较大。

Gao et al. (2013)利用 BCC\_CSM1.1 模式的历 史试验结果以及 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下对未来 气候预估结果来驱动区域气候模式 RegCM4.0 (分 辨率为 50 km),进而对两个模式的模拟性能进行检 验,结果表明:模式分辨率的提高,使 RegCM4.0 模式能够更好地模拟出气温和降水气候变化信号 在空间上的细节,比如高分辨率的 RegCM4.0 模式 对中国东部地区气温的模拟能力较 BCC\_CSM1.1 有较大改进;高分辨率模式才能精确重现降水量的 空间分布,尤其是地形效应所引起的降水。本研究 的结论与上述文献基本一致,高分辨率模式在中亚 地区气温模拟中表现出了一定优势,不过低分辨率 也有少数优于高分辨率的地方。因此,全面提高模 式模拟性能不仅需要提高分辨率,而且同时要对其 他方面(如对流、积云等)进行改进。

#### 参考文献(References)

- Chen F H, Wang J S, Jin L Y, et al. 2009. Rapid warming in mid-latitude Central Asia for the past 100 years [J]. Frontiers of Earth Science in China, 3 (1): 42–50.
- 陈发虎,黄伟,靳立亚,等. 2011. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化 特征及其空间差异 [J]. 中国科学:地球科学,41 (11): 1647–1657. Chen F H, Huang W, Jin L Y, et al. 2011. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming [J]. Science China Earth Sciences, 54 (12): 1812–1821.
- Folland C K, Rayner N A, Brown S J, et al. 2001. Global temperature change and its uncertainties since 1861 [J]. Geophys. Res. Lett., 28 (13):

2621-2624.

- Gao X J, Wang M L, Giorgi F. 2013. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC\_CSM1.1-RegCM4.0 [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 6 (5): 381–386.
- 高峰, 辛晓歌, 吴统文. 2012. BCC\_CSM1.1 对 10 年尺度全球及区域温 度的预测研究 [J]. 大气科学, 36 (6): 1165–1179. Gao F, Xin X G, Wu T W. 2012. A study of the prediction of regional and global temperature on decadal time scale with BCC\_CSM1.1 model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1165–1179.
- 高学杰, 徐影, 赵宗慈, 等. 2006. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降 水模拟影响的试验 [J]. 大气科学, 30 (2): 185–192. Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. 2006. Impacts of horizontal resolution and topography on the numerical simulation of East Asian precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 185–192.
- Giorgi F, Marinucci M R. 1996. An investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implications for climate studies [J]. Mon. Wea. Rev., 124 (1): 148–166.
- IPCC. 2002. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 881pp.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Solomon, S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 996pp.
- 蒋晓武,孙卫国,张庆奎,等. 2010. 全球变暖背景下江淮地区气候变化 趋势预估 [J]. 安徽农业科学, 38 (23): 12608–12610. Jiang X W, Sun W G, Zhang Q K, et al. 2010. Multi-model reliability ensemble projection of climate change over the Yangtze-Huaihe region under global warming [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese), 38 (23): 12608–12610.
- 颉卫华,吴统文. 2010. 全球大气环流模式 BCC\_AGCM2.0.1 对 1998 年 夏季江淮流域强降水过程的回报试验研究 [J]. 大气科学, 34 (5): 962–978. Jie W H, Wu T W. 2010. Hindcast for the 1998 summer heavy precipitation in the Yangtze and Huaihe River valley using BCC\_AGCM2.0.1 model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 962–978.
- Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. 2001. The evolution of climate over the last millennium [J]. Science, 292 (5517): 662–667.
- Josey S A. 2001. A comparison of ECMWF, NCEP-NCAR and SOC surface heat fluxes with moored buoy measurements in the subduction region of the Northeast Atlantic [J]. J. Climate, 14 (8): 1780–1789.
- 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.
- Leung L R, Qian Y. 2003. The sensitivity of precipitation and snowpack simulations to model resolution via nesting in regions of complex terrain [J]. J. Hydrometeor., 4 (6): 1025–1043.
- 覃卫坚, 王咏青, 覃志年. 2010. 全球气候变暖背景下广西降水集中程度的变化特征研究 [J]. 安徽农业科学, 38 (21): 11224–11227. Qin W J, Wang Y Q, Qin Z N. 2010. Study on the features of precipitation concentration in Guangxi under background of global warming [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences (in Chinese), 38 (21): 11224–11227.
- Shi Y F, Shen Y P, Kang E, et al. 2007. Recent and future climate change in

Northwest China [J]. Climatic Change, 80 (3-4): 379-393.

- 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. 2006. NCEP/NCAR 再分析风速、表面气温距 平在中国区域气候变化研究中的可信度分析 [J]. 气象学报, 64 (6): 709–722. Shi X H, Xu X D, Xie L A. 2006. Reliability analyses of anomalies of NCEP/NCAR reanalysis wind speed and surface temperature in climate change research in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (6): 709–722.
- 石彦军, 任余龙, 张宇, 等. 2012. BCC\_CSM 气候模式对中国区域 500 hPa 气候要素模拟能力的检验 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 48 (6): 54-62. Shi Y J, Ren Y L, Zhang Y, et al. 2012. Evaluation of climate at 500 hPa in China as simulated by BCC\_CSM [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 48 (6): 54-62.
- Simmons A J, Gibson J K. 2000. ERA-40 Project Plan [R]. ERA-20 Project Rep. 1, ECMWF, 62.
- 田芝平, 姜大勝. 2013. 不同分辨率 CCSM4 对东亚和中国气候模拟能力 分析 [J]. 大气科学, 37 (1): 171–186. Tian Z P, Jiang D B. 2013. Evaluation of the performance of low-to high-resolution CCSM4 over East Asia and China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 171–186.
- Uppala S, Kallberg P, Angeles H, et al. 2004. ERA-40: ECMWF 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957–2002 [J]. ECMWF Newsletter Meteorology, 101: 2–21.
- 王同美, 吴国雄, 应明. 2011. NCEP/NCAR(I、II)和 ERA40 再分析加热 资料比较 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 50 (5): 128–134. Wang T M, Wu G X, Ying M. 2011. Comparison of diabatic heating data from NCEP/NCAR (I, II) and ERA40 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 50 (5): 128–134.
- 王璐,周天军,吴统文,等. 2009. BCC 大气环流模式对亚澳季风年际变 率主导模态的模拟 [J]. 气象学报, 67 (6): 973–982. Wang L, Zhou T J, Wu T W, et al. 2009. Simulation of the leading mode of Asian–Australian monsoon interannual variability with the Beijing Climate Center atmospheric general circulation model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (6): 973–982.
- Wu T W. 2012. A mass-flux cumulus parameterization scheme for large-scale models: Description and test with observations [J]. Climate Dyn., 38 (3–4): 725–744.
- Wu T W, Song L C, Li W P, et al. 2014. An overview of BCC climate system model development and application for climate change studies [J].

J. Meteor. Res., 28 (1): 34-56.

- 吴昊旻,黄安宁,何清,等. 2013. 北京气候中心气候模式 1.1 版预估中 亚地区未来 50 年地面气温时空变化特征 [J]. 气象学报, 71 (2): 261– 274. Wu H M, Huang A N, He Q, et al. 2013. Projection of the spatial and temporal variation characteristics of surface air temperature over Central Asia in the next 50 years in the Beijing Climate Center climate system model V1.1 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71 (2): 261–274.
- Wu T W, Li W P, Ji J J, et al. 2013. Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center climate system model for the last century [J]. J. Geophys. Res., 118 (10): 4326–4347.
- Xin X G, Wu T W, Li J L, et al. 2013. How well does BCC\_CSM1.1 reproduce the 20th century climate change over China? [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 6 (1): 21–26.
- 辛晓歌, 吴统文, 张洁. 2012. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介 绍 [J]. 气候变化研究进展, 8 (5): 378–382. Xin X G, Wu T W, Zhang J. 2012. Introduction of CMIP5 experiments carried out by BCC climate system model [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 8 (5): 378–382.
- Xu Y, Gao X J, Giorgi F. 2010. Upgrades to the reliability ensemble averaging method for producing probabilistic climate-change projections [J]. Climate Research, 41 (1): 61–81.
- 赵天保, 符淙斌. 2006. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测 资料的初步比较与分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 14–32. Zhao T B, Fu C B. 2006. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis and observations over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 14–32.
- Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. J. Climate, 19 (22): 5843–5858.
- Zhou T J, Yu Y Q, Liu H L, et al. 2007. Progress in the development and application of climate ocean models and ocean–atmosphere coupled models in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (6): 1109–1120.
- 周连童. 2009. 比较 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料与观测资料计算 得到的感热资料的差异 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 9–20. Zhou L T. 2009. A comparison of NCEP/NCAR, ERA-40 reanalysis and observational data of sensible heat in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 9–20.