

田芝平, 姜大膀, 张冉, 等. 2012. CCSM4.0 的长期积分试验及其对东亚和中国气候模拟的评估 [J]. 大气科学, 36 (3): 619–632, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11092. Tian Zhiping, Jiang Dabang, Zhang Ran, et al. 2012. Long-term climate simulation of CCSM4.0 and evaluation of its performance over East Asia and China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 619–632.

CCSM4.0 的长期积分试验及其对东亚和中国气候模拟的评估

田芝平^{1,2} 姜大膀^{1,3,4} 张冉⁴ 隋月^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

4 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

摘 要 本文利用通用气候系统模式 CCSM4.0 的低分辨率 (T31, 约 $3.75^\circ \times 3.75^\circ$) 版本进行了 700 年的长期积分试验, 将中国地表气温、降水及东亚海平面气压、500 hPa 和 100 hPa 位势高度、850 hPa 风场的最后 100 年模拟结果与观测和再分析资料进行了定性比较, 并对前三个要素的不同统计量值进行了定量计算, 系统评估了 CCSM4.0 对东亚及我国气候的模拟能力。结果表明, 模式能够合理模拟各变量的基本分布形态, 但幅度与观测有所差别, 其中地表气温的模拟效果最好, 降水的相对最差。具体而言, 地表气温空间分布型与观测一致, 但全年青藏高原地表气温模拟值偏高, 位于塔里木盆地的暖中心未能模拟出来; 降水空间分布型模拟较差, 除冬季不明显之外, 我国中南部全年都存在一个虚假降水中心, 并在夏季达到最强; 冬季东亚地区海陆热力对比大于观测, 夏季海平面气压场整体模拟效果不如冬季; 模式对冬、夏季 500 hPa 东亚大槽和西北太平洋副热带高压的主要特征刻画较好, 但模拟结果整体比观测偏强; 夏季 100 hPa 南亚高压强度与观测接近, 但高压范围及中心位置存在偏差; 850 hPa 东亚冬季风和夏季风环流模拟较好, 但冬季西北气流偏强, 夏季索马里越赤道气流偏弱、我国东部西南气流偏强。总的来说, CCSM4.0 对东亚和我国大尺度气候特征具备合理的模拟能力, 尽管在定量上还存在着不足。

关键词 通用气候系统模式 长期积分 东亚 中国 评估

文章编号 1006-9895 (2012) 03-0619-14

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11092

Long-Term Climate Simulation of CCSM4.0 and Evaluation of Its Performance over East Asia and China

TIAN Zhiping^{1,2}, JIANG Dabang^{1,3,4}, ZHANG Ran⁴, and SUI Yue^{1,2}

1 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

收稿日期 2011-05-18, 2011-09-16 收修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05120703, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-EW-QN202, 国家自然科学基金资助项目 40975050、41175072

作者简介 田芝平, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事古气候模拟研究。E-mail: tianzhiping@mail.iap.ac.cn

Abstract A 700-year long-term climate simulation is performed by the Community Climate System Model version 4.0 (CCSM4.0) with a low atmospheric horizontal resolution (T31, an equivalent grid spacing of about 3.75°). To systematically evaluate the capability of the model over East Asia and China, the last 100-year results of surface air temperature and precipitation in China, sea level pressure, geopotential height at 500 hPa and 100 hPa, and wind field at 850 hPa over East Asia are qualitatively compared to observation and reanalysis data, and a few statistical variables of the former three climatic elements are quantitatively examined. Results show that the model can reasonably reproduce the basic spatial patterns of the above climatic fields, though the magnitudes are somewhat different from observations. The best (worst) performance is found for surface air temperature (precipitation) as a whole. Specifically, the simulated geographical distribution of surface air temperature agrees with observations. However, it is overestimated on the Qinghai-Tibetan Plateau, and the warm center on the Tarim Basin is missed by the model throughout the year. The spatial distribution of precipitation is poorly simulated. A fake precipitation center, which is the strongest in summer, occurs over central southern China all year around except in winter. The simulation of sea level pressure is generally better in winter than in summer, though the simulated thermal contrast between the East Asian continent and adjacent oceans is larger than observations. The model can well capture the East Asia major trough and subtropical high over the western North Pacific at 500 hPa during winter and summer, though the values are larger than observations. The simulated intensity of the South Asia high at 100 hPa in summer is consistent with observations, whereas the extent and center location exhibit some deviations. The East Asian winter and summer monsoon circulations at 850 hPa are well simulated. However, the northwesterly flow is overestimated in winter. In summer, the Somalia cross-equatorial flow is underestimated, while the southwesterly flow over eastern China is overestimated. Collectively, CCSM4.0 has a reliable capability to simulate the large-scale climate features over East Asia and China, though some deficiencies still exist in a quantitative manner.

Key words Community Climate System Model, long-term simulation, East Asia, China, evaluation

1 引言

气候模式是研究过去、现在和未来气候及其变化的重要工具,近些年来,在大气环流模式的基础上,各种耦合模式快速发展。自2001年政府间气候变化专门委员会(IPCC)第三次评估报告发布以来,全球海气耦合模式的研发工作有了长足的进步,并有23个全球海气耦合模式参与了IPCC第四次评估报告(AR4)。与此同时,国际耦合模式比较计划第三阶段中的“20世纪气候耦合模式模拟”(20C3M)计划为全球耦合模式比较与评估提供了试验平台,全球气候模式在模拟20世纪气候和气候变化特征方面取得了丰硕成果(Zhou and Yu, 2006; 孙颖和丁一汇, 2008)。然而,在将全球模式应用于区域尺度气候模拟过程中,由于其水平分辨率通常较低,一般难以较好地描述区域地形,无法描述中尺度或小尺度气候演变过程,从而导致较大的模拟误差(江滢等, 2009)。为了能够更加深入地研究区域尺度气候,评估全球气候模式对区域气候的模拟能力就显得尤为重要。

地处东亚,中国气候不仅受中纬度西风带的影

响,还具有明显的季风气候特征,加之青藏高原大地形的复杂作用,全球气候模式对于它的模拟能力通常具有局限性。近些年来,气候模式对于中国气候模拟能力的评估工作已经得到了一定程度的开展(Ding et al., 2007)。例如, Liang et al. (2001) 利用国际大气模式比较计划中的模式结果对东亚气候进行了分析,指出我国中部(东北)降水相对于观测的负(正)异常是由于模拟的东亚急流发生了极向偏移,从而造成急流诱导的经向环流上升支偏北,并指出模拟的降水和风场年循环偏差之间有着密切的内部联系。高学杰等(2004)利用观测海洋表面温度强迫的全球大气环流模式CCM3对中国气候进行了模拟,表明无论是对基本气候态还是汛期气候的模拟,均是地表气温效果较好,降水效果较差。随后,高学杰等(2006)又评估了区域气候模式RegCM2对东亚降水的模拟能力,指出模式分辨率越高,模拟效果越好,分辨率与地形相比起着至少同等重要的作用。其间,全球大气环流模式(Wang et al., 2000; 杨军丽等, 2007; 乐旭和王会军, 2009; Zhou et al., 2009)、全球海气耦合模式(赵宗慈等, 1995; 徐影等, 2002; 王淑瑜和熊喆,

2004; Jiang et al., 2005; Zhou et al., 2006; 许崇海等, 2007; 张莉等, 2008)、区域气候模式(鞠丽霞和王会军, 2006; 冯锦明和符淙斌, 2007; Gao et al., 2008)、地球系统动力学模式(曾庆存等, 2008)的相关数值试验或者模式资料分析工作综合表明, 气候模式对东亚气候都具备一定的模拟能力, 但模拟效果是因模式而异的; 就整体而言, 地表气温的模拟效果比降水要好, 大多数模式对北半球冬季气候的模拟效果要优于夏季。全球海气耦合模式的模拟误差相对较为明显, 多数模式存在地表气温模拟值偏低、降水模拟值偏高的不足。与单个模式相比, 多模式集合通常能够更好地反映气候变化的趋势, 使模拟能力在一定程度上得到提高, 但单个模式对某一变量的模拟性能好坏会影响到集合平均结果, 因此集合之前对所选模式性能进行评估是非常必要的。

古气候模拟是过去气候变化研究领域的核心研究内容, 将模拟结果与代用资料相结合可以揭示过去气候自然变化的原因, 这对于理解当代气候、预测与预估气候变化具有重要的意义。例如, 针对过去千年气候变化, 科研人员采用全球海气耦合模式在自然和人为强迫条件下进行了数值模拟试验, 并以此研究了东亚夏季降水时空变率、近 530 年中国东部的旱涝事件, 通过与代用资料的比较, 表明气候模式对东亚及我国千年尺度气候具有一定的模拟能力(彭友兵和徐影, 2009; Peng et al., 2009; Shen et al., 2009)。在我们采用国际上新一代的气候系统模式开展东亚和中国古气候模拟工作之初, 十分有必要检验模式对于目标区域现代气候主要特征的模拟能力。为此, 本文对通用气候系统模式 CCSM4.0 进行了长时间的积分, 结合观测和再分析资料, 评估了它对中国地表气温、降水以及东亚地区海平面气压、500 hPa 和 100 hPa 位势高度、850 hPa 风场的模拟能力, 以此为后续利用 CCSM4.0 开展东亚和中国古气候模拟研究工作奠定基础。

2 模式和资料

2.1 模式介绍与试验

通用气候系统模式(Community Climate System Model, 简称 CCSM)是国际上新一代的耦合气候系统模式之一, 系由美国国家科学基金会和能

源部支持、国家大气研究中心开发的气候模式(Blackmon et al., 2001)。该模式由大气、海洋、陆面、海冰和耦合器五大模块组成, 并通过耦合器来实现其它四个物理子模块间的耦合。CCSM 支持多种分辨率, 可以对各模块进行不同的组合, 以达到模拟过去和现在地球气候系统、预测和预估气候变化等目的。

CCSM 自 1996 年推出以来, 先后经历了从 CCSM1.0、CCSM1.2、CCSM1.4、CCSM2.0、CCSM 2.0.1、CCSM3.0 到现在的 CCSM4.0、CESM1.0 多个版本的改进和发展, 并且参与了 IPCC 系列评估报告。其中 CCSM4.0 于 2010 年 4 月初发布, 模式整体性能相对于以往有了较大改进(Gent et al., 2011)。除了支持更高精度的分辨率(共 17 种分辨率)之外, 各模块在参数化方案、物理过程和计算能力方面均有明显改进; 该版本模式在数据读取和插值方面也有了较大提高。关于 CCSM4.0 更详细的模式介绍及各分量特征, 请参见 <http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm4.0/> [2011-06-24]。

在 CCSM4.0 发布之前, 该模式前身已被广泛应用于工业革命前期气候模拟(Otto-Bliesner et al., 2006)、末次盛冰期和全新世中期气候模拟(Shin et al., 2003; Levis et al., 2004; Brandefelt and Otto-Bliesner, 2009; 周波涛和赵平, 2009; Zhou and Zhao, 2009)、气候模式结果的不确定性分析(陈显尧等, 2008)以及次表层海温同化模拟试验研究(凌铁军等, 2009), 取得了很多成果。在 CCSM4.0 发布之后, 王秀成等(2010)将其中的最新海冰模式 CICE4 替代了 LASG/IAP(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室)气候系统模式中的海冰模式, 并利用这一新的耦合模式对 20 世纪中后期的全球气候进行了模拟, 检验表明 CICE4 对极地气候模拟能力有一定程度的改进作用。

本文采用大气(CAM4)、海洋(POP2)、陆面(CLM4)、海冰(CICE4)完全耦合的模式分量设计。其中大气模块和陆面模块在水平方向均采用 T31 波截断, 即全球范围内经向 48 个格点, 纬向 96 个格点(约 $3.75^\circ \times 3.75^\circ$), 垂直方向采用混合 σ 坐标, 共分为 26 层; 海洋模块和海冰模块水平分辨率近似为 $3^\circ \times 3^\circ$ 。之所以采用这一相对较低分辨率是因为我们的最终目的是进行古气候模拟研究,

相关试验通常需要上千年的积分时间长度,低分辨率能够使模式快速运行,以最小的计算代价得到所需的气候平衡态,进而可能对过去大尺度上的长期气候变化特征进行模拟研究。

为检验 CCSM4.0 对现代气候的模拟能力,我们选用 2000 年的初、边值条件进行了长时间积分试验,其中初始条件包括大气和海洋表面温度,边值条件包括太阳常数 (1361.27 W/m^2)、温室气体浓度 [甲烷为 1760 ppb ($1 \text{ ppb}=10^{-9}$)、二氧化碳为 368.9 ppm ($1 \text{ ppm}=10^{-6}$)、氧化亚氮为 316 ppb、三氯氟甲烷为 653.45 ppt ($1 \text{ ppt}=10^{-12}$)、二氯二氟甲烷为 535 ppt] 及地球轨道参数 (轨道年为 1990 年)。数值试验过程中不改变模式参数和边界条件,一共连续积分了 700 年。如图 1 所示,模式在最初的几百年处于调整状态,鉴于最后 100 年全球年平均地表气温的变化趋势为 $0.03^\circ\text{C}/100\text{a}$,在 $0.05^\circ\text{C}/100\text{a}$ 的趋势范围之内,可以认为模式达到了准平衡态 (Braconnot et al., 2007),因此,本文根据 601~700 年共 100 年的模式资料计算得到 CCSM4.0 的模拟试验气候态,用于与观测和再分析资料作比较。

2.2 资料

为了检验模式的模拟能力,选取中国和东亚作为主要分析区域。与模拟结果进行比较的观测和再分析资料 (以下统称为观测资料) 包括:国家气候中心发展的 CN05 (Xu et al., 2009) 日平均格点气温资料,CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) (Xie and Arkin,

1997) 月平均格点降水资料,以及 NCEP-DOE2 (Kanamitsu et al., 2002) 月平均海平面气压、850 hPa 经向和纬向风以及 500 hPa 和 100 hPa 位势高度场的再分析资料。所有资料选取的时段均为 1979~2008 年。由于本文的目的在于比较模式结果和观测资料的现代气候平均态,因此模式结果为积分试验后 100 年平均所得到的气候态,所有观测和再分析资料均取 30 年平均作为其气候态,在现代气候平均态的意义上两者之间具有可比性。

2.3 分析方法

考虑到除地表气温外,所有观测和再分析资料的水平分辨率均为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,而模式输出资料的水平分辨率为 $3.75^\circ \times 3.75^\circ$,为便于定量分析,模式资料都用双线性插值方法统一插值到了 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格点分辨率上。CN05 地表气温格点资料水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,为此使用区域平均的插值方法将其插值到 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 分辨率上。在评估模式模拟能力的过程中,首先比较了模拟和观测的地表气温、降水等要素气候平均态的空间分布特征,然后分别计算中国区域 172 个格点的地表气温和降水、以及东亚地区 ($15^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $70^\circ\text{E} \sim 140^\circ\text{E}$) 范围内 551 个格点的海平面气压场的不同统计量值,以此来定量衡量模拟和观测值之间的相似性及空间差异。用于定量分析的统计量包括:区域平均值 (RA, V_{RA})、区域平均误差 (RAE, V_{RAE})、空间相关系数 (SCC, V_{SCC})、标准差之比 (RSD, V_{RSD})、均方根误差 (RMSE, V_{RMSE}) 和去除模式系统性误差的均方根误差 (RMSE2, V_{RMSE2}),具体定义如

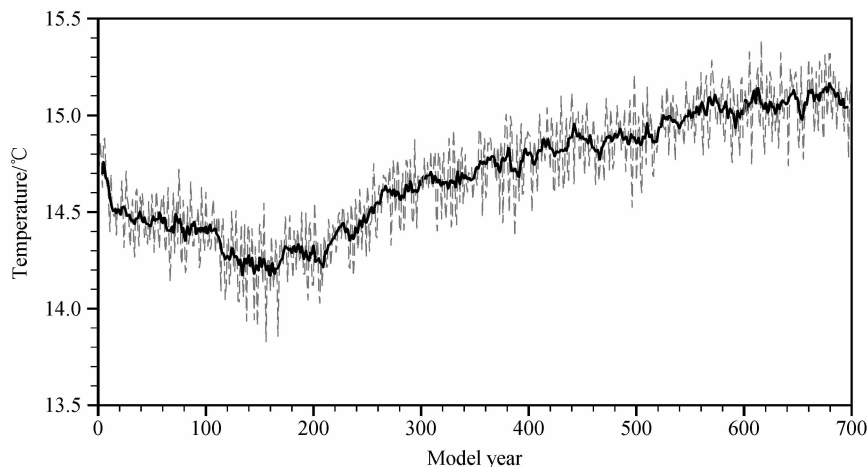


图 1 全球年平均地表气温序列 (单位: $^\circ\text{C}$)。黑实线表示 9 年滑动平均值

Fig. 1 Time series of globally averaged annual surface air temperature. Black solid line indicates the 9-year running mean

下:

$$V_{RA} = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

$$V_{RAE} = \bar{x} - \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (2)$$

$$V_{SCC} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

$$V_{RSD} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

$$V_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (5)$$

$$V_{RMSE2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_i - y_i - (\bar{x} - \bar{y})]^2}, \quad (6)$$

其中, $x_i(y_i)$ 代表第 i 个空间格点的气候态模拟(观测)值, n 表示中国(或东亚)区域内的格点总数。根据以上定义可知, RAE 可以反映模拟与观测场的区域平均差异, SCC 表示模拟与观测空间分布型的相似度, RSD 表征了模拟与观测气候态空间变率的相对大小, RMSE 表示模式与观测之间的绝对差异, 包括模式内部误差和系统性误差两部分, 前者由 RMSE2 表示, 后者则可由 RMSE 与 RMSE2 的差值来衡量。Jiang et al. (2005) 曾将这些统计量应用于七个全球海气耦合模式对我国气候模拟能力的评估工作, 表明这些统计量能够从定量的角度较好地刻画各模式对我国气候的模拟效果。

3 结果分析

3.1 地表气温

地表气温是最基本、最受关注的气候要素, 是气候变化的主要指标, CCSM4.0 对中国地表气温的模拟能力如何需要重点检验。图 2 为我国年、冬季、夏季平均地表气温的观测场以及模拟与观测的偏差分布图(观测和模式资料分别用区域平均和双线性插值方法统一插值到 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格点上)。根据年平均地表气温实况分布(图 2a), 在 105°E 以东地表气温自南向北逐渐降低; 青藏高原由于高海拔地形作用表现为大范围的低温区, 中心位于高原

西北部, 地表气温低于 -6°C ; 与此相对, 新疆大部分地区地表气温则为正值, 最高达 12°C , 中心位于地势较低的塔里木盆地。CCSM4.0 对我国 105°E 以东地区地表气温的模拟结果与观测接近(图略), 偏差为 $-3 \sim 3^\circ\text{C}$ (图 2b), 尤其是地表气温由南向北递减的走势模拟得较好。但由于分辨率相对较粗的原因, 模拟的地表气温等值线整体上比观测要更加平滑, 进而难以精确地模拟出观测的区域尺度气候特征, 例如青藏高原低温中心强度模拟偏弱 $3 \sim 6^\circ\text{C}$; 模式未能模拟出塔里木盆地的暖中心, 该地区最大偏差达 9°C 。

为了定量评估模式对地表气温的模拟能力, 表 1 列出了中国区域 172 个格点上年平均和各季节平均地表气温的各个统计量值。就年平均而言, 模拟比观测的区域平均地表气温偏高 0.1°C ; SCC 和 RSD 值均较高, 分别为 0.88 和 1.0, 表明模式较好地刻画出了年平均地表气温的空间分布型和变率; RMSE 与 RMSE2 值相等, 这说明模拟与观测的差异来源于模式的内部误差, 这与模式本身的物理过程和参数化方案等有关。

表 1 中国地区地表气温统计量值

Table 1 Values of statistical variables for surface air temperature in China

	观测 RA/ $^\circ\text{C}$	模拟 RA/ $^\circ\text{C}$	RAE/ $^\circ\text{C}$	SCC	RSD	RMSE/ $^\circ\text{C}$	RMSE2/ $^\circ\text{C}$
年平均	6.7	6.8	0.1	0.88	1.0	3.5	3.5
冬季	-6.3	-8.2	-1.9	0.94	1.0	4.0	3.6
春季	7.5	8.1	0.6	0.86	1.0	4.0	3.9
夏季	18.4	20.2	1.8	0.82	0.7	4.2	3.9
秋季	7.1	7.1	0.0	0.89	0.9	3.4	3.4

注: 表格中 SCC 值均通过了 99% 信度水平的学生 t 检验。

冬季和夏季地表气温分布状况如图 2c - f 所示, 与年平均类似, 模拟与观测的地表气温空间分布型一致, 但幅度有所差异, 这主要体现在青藏高原及新疆地区, 尤其是在塔里木盆地。由图 2d 和图 2f 的偏差分布情况可以看出, 冬季模拟值在青藏高原西部及东部略有偏高, 而在高原中部略微偏低; 高原低温中心夏季模拟值整体偏高 $3 \sim 9^\circ\text{C}$, 最大偏差位于高原西侧。位于塔里木盆地的暖中心在模拟结果中均未表现出来, 且该模拟误差在夏季比冬季要大。冬季, 除青藏高原东、西部及新疆西部

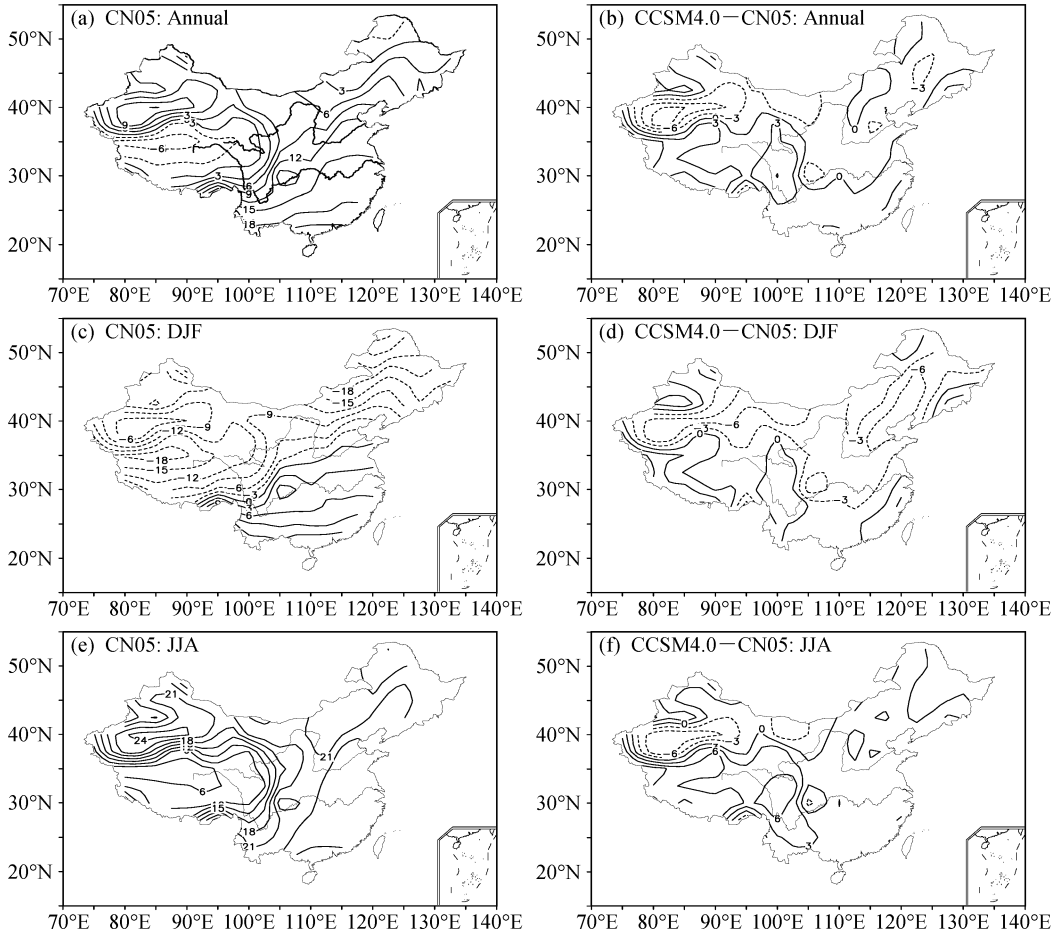


图2 1979~2008年中国平均地表气温的(a、c、e)观测场以及(b、d、f)模拟与观测的偏差分布图(单位:°C): (a、b)年平均; (c、d)冬季; (e、f)夏季。等值线间隔:3°C

Fig. 2 Surface air temperature in China for (a, c, e) 1979–2008 climatology from CN05 observation data and (b, d, f) the differences between simulations and observations (units: °C): (a, b) Annual mean; (c, d) winter; (e, f) summer. Contour interval is 3°C

以外,全国大部分地区地表气温模拟值较观测偏低,最大偏差达6°C;夏季,我国东部地表气温模拟值偏高约3°C。进一步由表1可知,夏季SCC值为0.82,RSD仅为0.7,均为年平均及各季节平均的最小值;冬季SCC值最高,为0.94;冬、夏季RMSE与RMSE2的差值分别为0.4°C和0.3°C,反映出一定的模式系统性误差。另外,RAE绝对值在冬季最大,达1.9°C,其次为夏季(RAE值为1.8°C),其他季节该差值均较小,其中冬季模拟与观测的地表气温区域平均误差为零。

由以上结果可以看出,模式对中国地区地表气温的模拟能力总体上较好。根据空间相关系数,冬季模拟效果最好,夏季效果相对最差;模拟与观测的差异主要表现在对青藏高原区域地表气温模拟值偏高和对塔里木盆地暖中心模拟值的不足,这和模

式的内部误差有很大关系。

3.2 降水

中国地处东亚季风区,季风降水的时空分布及其变化对人们的生产、生活和我国经济社会的发展有着重要的影响,因此了解气候模式对我国降水的模拟能力是十分必要的。科研人员的已有研究表明,由于受东亚季风的影响,我国降水的模拟能力存在很大不足,以往模式对东亚季风降水的模拟效果也不尽相同(Jiang et al., 2005; 高学杰等, 2006; 张莉等, 2008)。

图3为CMAP和CCSM4.0模拟的中国区域年、冬季、夏季平均降水量分布情况。对比年平均降水分布型可以发现(图3a、b),模式能够在一定程度上模拟出中国降水南方多、北方少的特点。然而,与以往的模式结果类似(高学杰等, 2003,

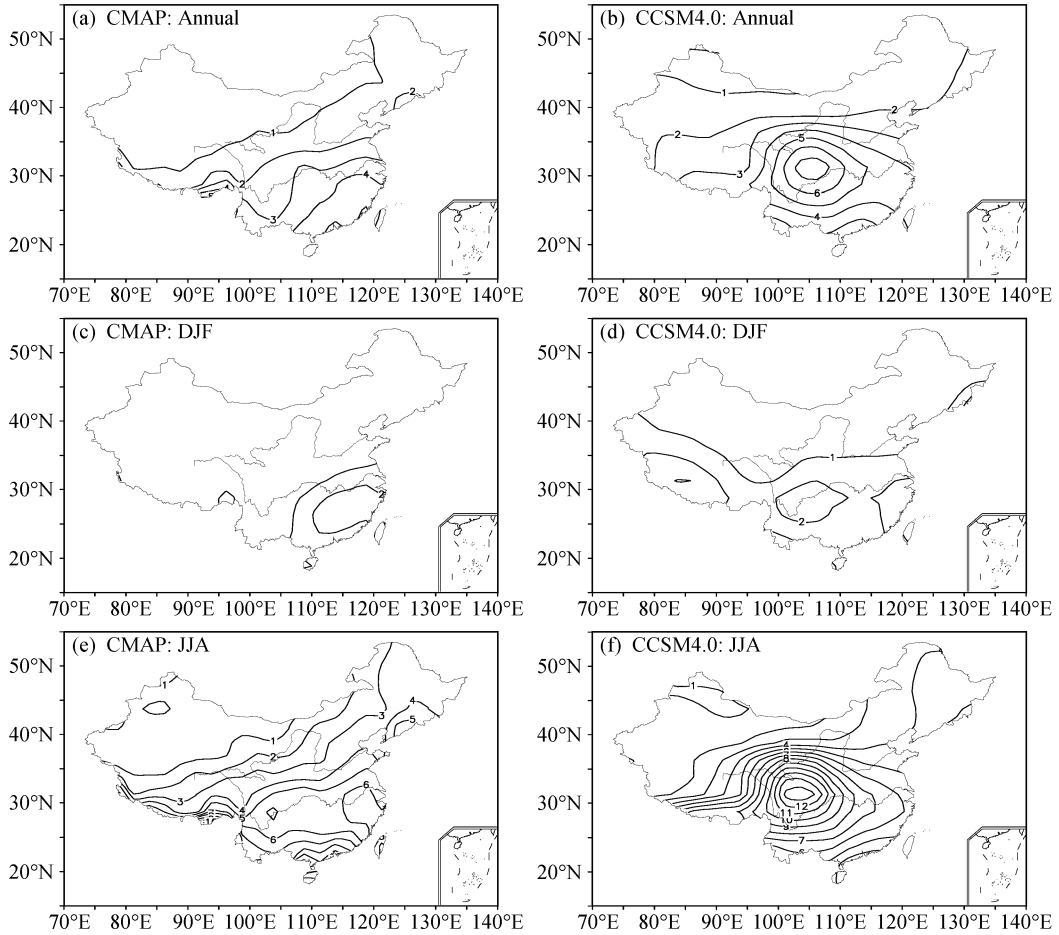


图3 中国降水量的 (a, c, e) 1979~2008 年气候平均 CMAP 资料以及 (b, d, f) CCSM4.0 模拟结果 (单位: mm/d): (a, b) 年平均; (c, d) 冬季; (e, f) 夏季。等值线间隔: 1 mm/d

Fig. 3 Precipitation in China for (a, c, e) 1979–2008 climatology from CMAP and (b, d, f) CCSM4.0 simulations (units: mm/d): (a, b) Annual mean; (c, d) winter; (e, f) summer. Contour interval is 1 mm/d

2006; Jiang et al., 2005; Xu et al., 2010), 在我国中南部地区出现了一个虚假的降水中心, 最大降水超过 7 mm/d, 这主要是源于夏季降水模拟误差 (图 3f); 而观测中降水最大值仅为 4 mm/d 左右, 且位于我国东南部。这种降水模拟的差异除了与地形有关以外, 还可能与模式分辨率有关。高学杰等 (2006) 研究指出, 要消除上述虚假降水中心, 选取 60 km (约 0.5°) 及更高的水平分辨率可能是必要的。此外, 我国西部年降水较观测偏强 1~2 mm/d, 东南部则偏弱 1~2 mm/d。进一步由表 2 可知, 就年平均而言, 我国区域平均降水模拟值比观测大 1.2 mm/d; 模拟与观测降水场的相关系数为 0.64, 低于年均地表气温的相关系数; RMSE 与 RMSE2 分别为 1.8 mm/d 和 1.3 mm/d, 由二者之差所反映的模式系统性误差为 0.5 mm/d。

表 2 中国地区降水统计量值

Table 2 Values of statistical variables for precipitation in China

	观测 RA/ mm·d ⁻¹	模拟 RA/ mm·d ⁻¹	RAE/ mm·d ⁻¹	SCC	RSD	RMSE/ mm·d ⁻¹	RMSE2/ mm·d ⁻¹
年平均	1.6	2.8	1.2	0.64	1.2	1.8	1.3
冬季	0.5	1.1	0.6	0.53	1.2	0.9	0.7
春季	1.5	3.1	1.6	0.62	1.2	2.3	1.6
夏季	3.3	4.7	1.4	0.64	1.3	2.7	2.4
秋季	1.2	2.4	1.2	0.61	1.6	1.8	1.3

注: 表格中 SCC 值均通过了 99% 信度水平的学生 *t* 检验。

冬季和夏季降水模拟情况如图 3c-f 所示。冬季, 全国降水偏少, 最大值仅为 2 mm/d, 位于我国东南部, 而模拟结果在我国东部沿岸、西南地区及青藏高原西麓均出现了等量的降水大值区, 除我国

南部少数地区外, 全国大部冬季降水模拟值偏高。夏季, 模拟的我国中南部虚假降水中心十分明显, 不仅范围很大, 强度也很强, 中心降水量超过 13 mm/d, 而观测中最大降水仅为 9 mm/d 左右, 且位于台湾和两广地区。我国中部地区模拟与观测的夏季降水偏差比年平均更大, 最大降水偏差达 9 mm/d (图略)。此外, 我国 25°N 以南地区的夏季降水偏弱 1~5 mm/d。由此可见, 除冬季不明显外, 年平均和夏季模拟中均出现了虚假降水中心, 使得我国降水的整体模拟水平大大降低, 这可以进一步通过表 2 反映出来。各季节模拟与观测降水的 RA 值之差较大, 其中冬季和春季的 RAE 值分别为 0.6 mm/d 和 1.6 mm/d, 均超过了对应季节观测的 RA 值 (0.5 mm/d 和 1.5 mm/d)。各季节降水场的 RSD 值均大于 1, SCC 也相对较低, 其中冬季仅为 0.53, 表明模拟与观测场的相似性在冬季最差。另外, 各季节降水模拟的系统性误差也不尽相同, 其中春季 RMSE 与 RMSE2 差值最大, 达 0.7 mm/d, 而冬、夏季降水模拟系统性误差值则相

对较小。

上述分析表明, CCSM4.0 对中国降水的模拟效果不如地表气温, 具体表现在模拟与观测场之间的相关系数较低、模式结果的系统性误差较大。其中, 在我国中南部地区模拟的虚假降水中心是造成模拟效果较差的直接原因, 这可能与模式水平分辨率较低所导致的高原地形处理不当有关。

3.3 海平面气压

海平面气压场是描述海陆热力对比、进而反映大气环流状况的一个重要气候要素。图 4 分别给出了东亚地区模拟和观测的冬、夏季海平面气压场分布, 选取的范围为 (15°N~60°N, 70°E~140°E), 表 3 是该区域内 551 个格点的海平面气压统计量值。总的来说, 模拟的海平面气压场空间型与观测的基本一致, 但幅度有所不同。冬季, 东亚海平面气压西高东低的分布型模拟得较好, 其中 SCC 高达 0.91; 另一方面, RMSE 和 RMSE2 差值为 1.1 hPa, 反映了一定的模式系统性误差。观测中亚洲冷高压主体位于蒙古以西, 而模拟的高压强度

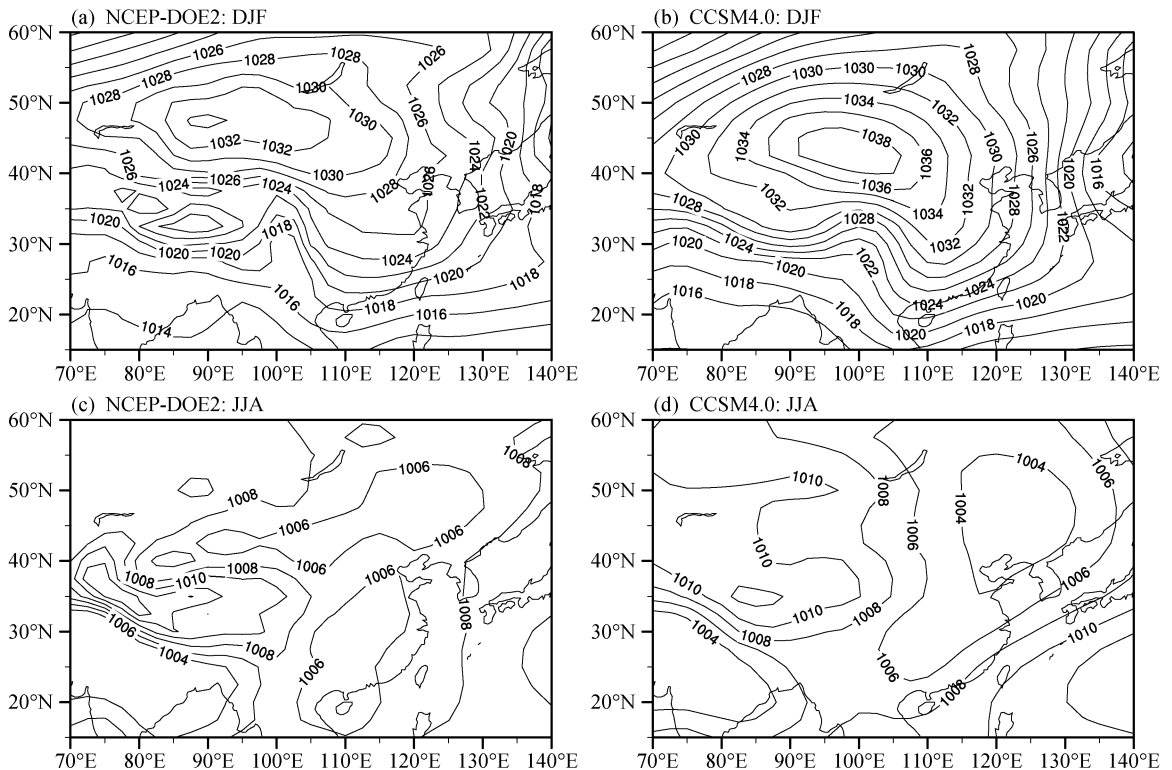


图 4 东亚地区 (a, b) 冬季 (DJF) 和 (c, d) 夏季 (JJA) 海平面气压 (单位: hPa): (a, c) 1979~2008 年气候平均 NCEP-DOE2 再分析资料; (b, d) CCSM4.0 模拟结果。等值线间隔: 2 hPa

Fig. 4 Sea level pressure (units: hPa) in East Asia in (a, b) winter (DJF) and (c, d) summer (JJA) for (a, c) 1979-2008 climatology from NCEP-DOE2 reanalysis data and (b, d) CCSM4.0 simulations. Contour interval is 2 hPa

偏强、范围扩大,中心气压值超过 1038 hPa,比观测大 4 hPa,高压中心位置向南、向东各偏移了约 5°,超过 1030 hPa 气压值的高压范围也扩展至东亚大部分地区。由此可见,模拟的亚洲高压对东亚及我国气候产生影响的强度和范围比实际要大。

夏季,海平面气压场模拟效果较差,SCC 值仅为 0.71。图 4c 实况中位于新疆地区的低压中心对应图 2e 中该地区的暖中心,其中心气压值低于 1006 hPa,但模式却未能模拟出这一热低压区,这与模式不能模拟出该地区夏季地表气温中心是一致的。该热低压以南的高压中心对应夏季青藏高原的低温中心,但模拟的高压偏弱,这与青藏高原夏季地表气温模拟值偏高有关。除此之外,东北地区的低压模拟偏强。由表 3 可以发现,夏季模拟与观测的东亚区域平均气压差 (0.2 hPa) 远小于冬季值 (2.7 hPa),表明气压幅度夏季模拟稍好;但 SCC 值却显著低于冬季值,反映出气压场空间分布型在夏季模拟稍差。综合而言,CCSM4.0 对夏季海平面气压场的整体模拟效果不如冬季。

表 3 东亚地区海平面气压统计量值

Table 3 Values of statistical variables for sea level pressure over East Asia

	观测 RA/ hPa	模拟 RA/ hPa	RAE/ hPa	SCC	RSD	RMSE/ hPa	RMSE2/ hPa
冬季	1021.5	1024.2	2.7	0.91	1.2	3.9	2.8
夏季	1007.2	1007.4	0.2	0.71	1.1	2.1	2.1

注:表格中 SCC 值均通过了 99% 信度水平的学生 t 检验。

总体看来,CCSM4.0 能够合理模拟出东亚地区海平面气压场的基本分布形态。在冬季,大陆冷高压模拟偏强,东亚纬向气压差大于观测,使得海陆热力对比加大,由大陆指向海洋的气压梯度力增大,模拟的东亚地区大气环流也相应增强。夏季,东亚海陆热力对比变化不明显。另外,夏季模拟和观测的海平面气压场分布与地表气温分布有很好的对应关系。

3.4 500 hPa 位势高度

我国大部位于北半球中纬度,气候条件受到中纬度西风带的重要影响,因此对流层中、低层大气环流在很大程度上决定了我国的气候状况。观测表明,冬季 500 hPa 东亚大槽很强,最低等值线处达 5120 gpm,且大槽主体位于海上;欧洲浅槽相对较

弱(图 5a)。模式对东亚大槽和欧洲浅槽都有很好的模拟能力,只是模拟的东亚大槽强度偏强,出现一个闭合的低值中心,强度达 5080 gpm,该低槽的加深有利于北方强冷空气的入侵,造成我国东北冬季地表气温模拟值偏低;欧洲浅槽也比观测更为明显(图 5b)。除此之外,模式结果中位于低纬度海洋上空的副热带高压偏强,闭合中心强度达 5920 gpm,而该高压中心在 NCEP-DOE2 再分析资料中并未显现,低纬最大位势高度仅为 5840 gpm。夏季,东亚大槽相对冬季东移减弱,模式较好地再现了这一特点(图 5c、d)。观测中夏季副热带高压较冬季明显加强,其中位于非洲大陆北部的 5880 gpm 等位势高度线范围较大,而位于西北太平洋的副热带高压范围较小;在模拟结果中,西北太平洋副热带高压比观测更强、范围更大,且高压单体向西伸至南海,有利于气流沿高压前缘向我国输送水汽,造成长江流域夏季降水较观测增加(图 3f);与冬季相比,模拟的西北太平洋副热带高压西伸明显、范围增大、位置偏北。

综上所述,CCSM4.0 对东亚地区冬、夏季 500 hPa 位势高度场上的基本系统模拟能力较好,其中包括东亚大槽在冬季强、在夏季弱、西北太平洋副热带高压在冬季弱、在夏季强的主要分布特点。与此相对,模拟结果整体上比观测偏强,主要体现在东亚大槽和西北太平洋副热带高压的强度和范围上。

3.5 夏季 100 hPa 位势高度

北半球夏季在 100 hPa 层上存在一个强大且稳定的大气环流系统,即南亚高压,它是夏季出现在青藏高原及其邻近地区上空对流层上部的大尺度高压系统,对我国夏季大范围旱涝分布及亚洲气候都有重要的影响。图 6 是夏季 100 hPa 位势高度场分布情况。在 NCEP-DOE2 再分析资料中,南亚高压中心大致位于 (30°N, 70°E),中心强度超过 16760 gpm,且闭合高压范围大体以 30°N 为东西轴线,延伸至整个东半球。模拟的南亚高压分布与观测较为接近,高压中心强度和观测一致;不同的是高压中心位置不仅南移了约 5 个纬度,且东移至约 90°E 的青藏高原南部上空,高压范围也比观测要小。若高压稳定在青藏高原上空,会使高原南部及其邻近地区遭受干旱。由此可见,模拟的南亚高压对我国夏季气候产生的影响比观测要大。

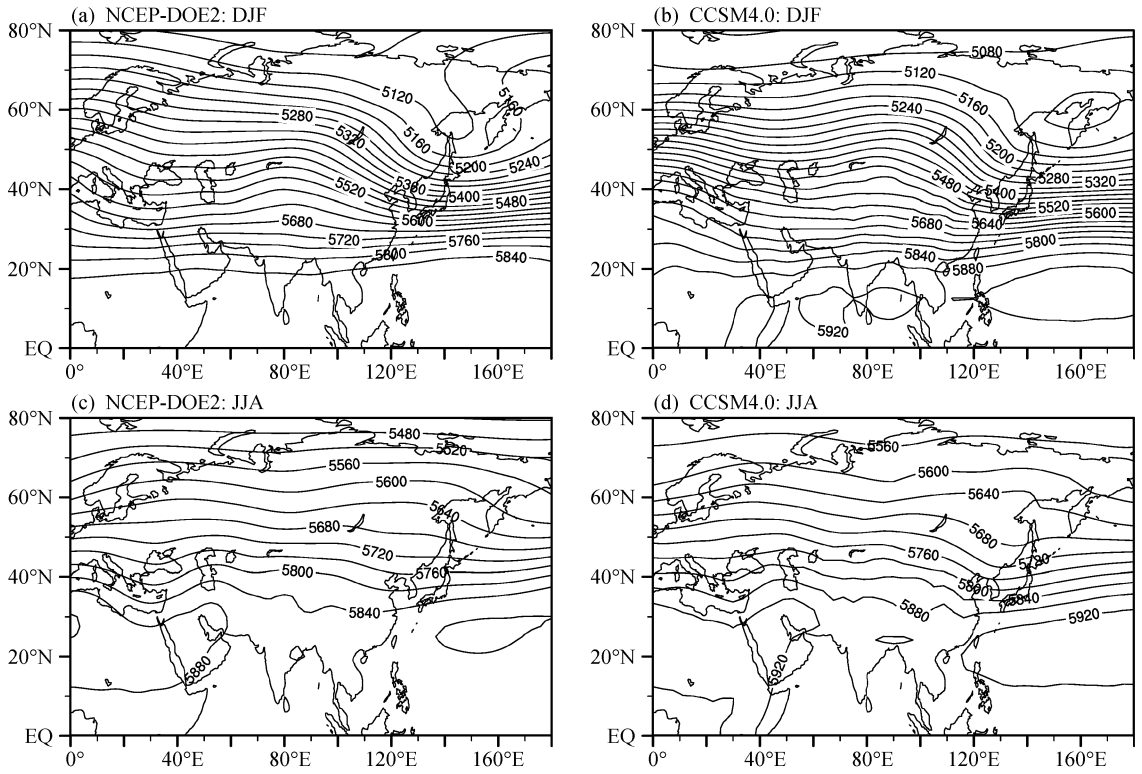


图5 (a、b) 冬季 (DJF) 和 (c、d) 夏季 (JJA) 500 hPa 位势高度 (单位: gpm): (a、c) 1979~2008 年气候平均 NCEP-DOE2 再分析资料; (b、d) CCSM4.0 模拟结果。等值线间隔: 40 gpm

Fig. 5 Geopotential height (units: gpm) at 500 hPa in (a, b) winter (DJF) and (c, d) summer (JJA) for (a, c) 1979 - 2008 climatology from NCEP-DOE2 reanalysis data and (b, d) CCSM4.0 simulations. Contour interval is 40 gpm

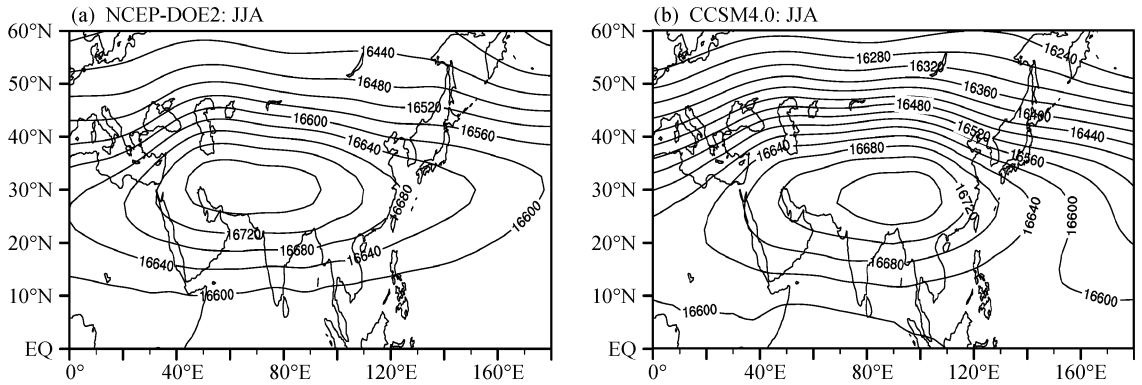


图6 夏季 (JJA) 100 hPa 位势高度 (单位: gpm): (a) 1979~2008 年气候平均 NCEP-DOE2 再分析资料; (b) CCSM4.0 模拟结果。等值线间隔为 40 gpm

Fig. 6 Summer (JJA) geopotential height (units: gpm) at 100 hPa for (a) 1979 - 2008 climatology from NCEP-DOE2 reanalysis data and (b) CCSM simulations. Contour interval is 40 gpm

3.6 850 hPa 风场

我国气候除了受中纬度西风带的作用以外,还受到东亚季风的显著影响。东亚冬季风和夏季风是我国冬、夏季气候干湿和冷暖变化的主要调控因子。东亚冬季风强盛时期,北方强冷空气入侵,能

造成我国大范围大风和降温天气;当夏季风强盛时期,我国东部降水通常偏多,主雨带位置也会相应发生变化。其中,850 hPa 风场是表征东亚大尺度季风环流状况的主要气候要素。

图7 分别给出了冬季和夏季 850 hPa 风的观测

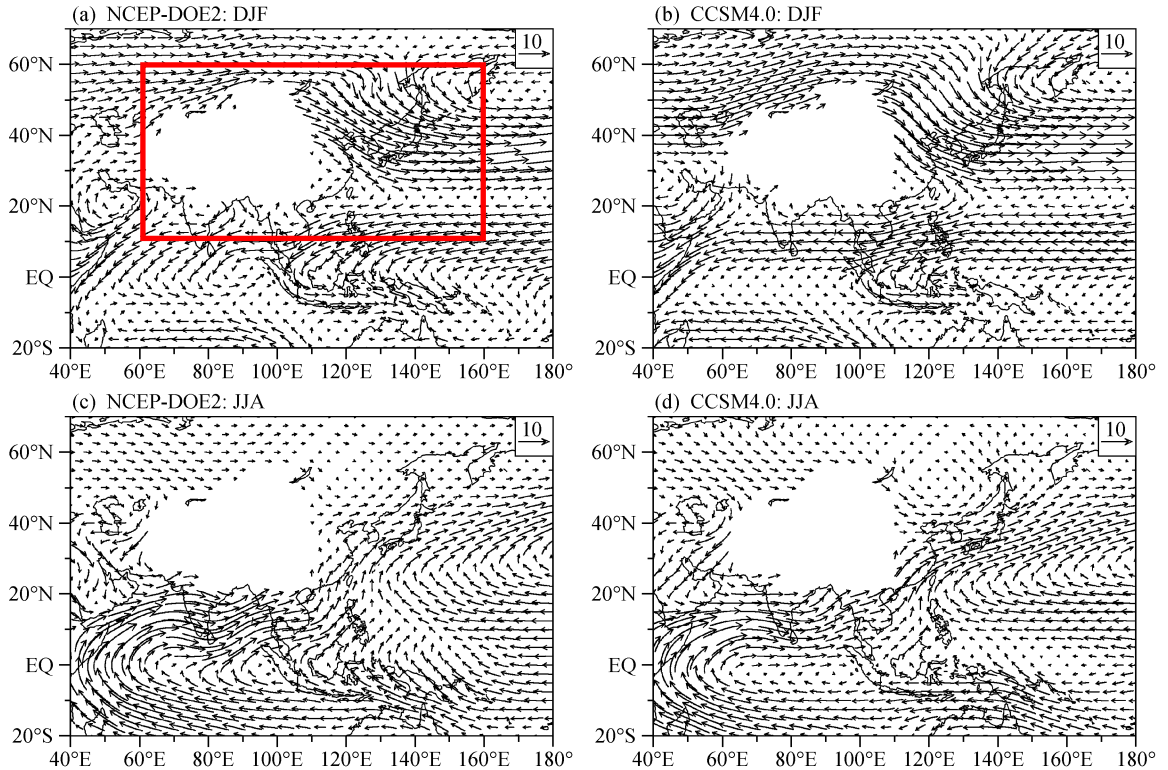


图 7 (a、b) 冬季 (DJF) 和 (c、d) 夏季 (JJA) 850 hPa 风场 (单位: m/s), 其余同图 4

Fig. 7 850-hPa wind fields (units: m/s) in (a, b) winter (DJF) and (c, d) summer (JJA). Others are the same as Fig. 4

和模拟场。在冬季实况场中 (图 7a), 来自西伯利亚的西北气流十分强盛, 量级达到 10 m/s, 它与 500 hPa 层上东亚大槽的槽后位置相对一致, 南海和热带西北太平洋等低纬度地区盛行东北风。模式对我国北方的西北气流有很好的模拟能力, 但强度较观测偏强, 这与前述冬季模式结果中东亚大槽偏深有关, 从而造成我国东北及华北地表气温偏低 (图 2d); 南海东北气流模拟得较好, 而与观测不同, 热带西北太平洋和低纬度越赤道气流为盛行东风。在夏季再分析资料中 (图 7c), 源于澳大利亚的越赤道气流、索马里低空急流和西北太平洋副热带高压西侧的西南气流在我国东部汇合, 使得我国东部至朝鲜、日本一带盛行西南风, 给我国南方和东部提供了充沛的水汽条件, 造成这些地区夏季降水较多 (图 3e)。CCSM4.0 对该水汽输送通道气流的模拟情况较好, 但澳大利亚越赤道气流和索马里急流比观测明显偏弱, 使得来自印度洋的水汽减少, 从而造成我国南方夏季降水模拟偏少 (图 3f)。另一方面, 我国东部沿岸的西南气流模拟偏强, 加之西北太平洋副热带高压较观测偏强、位置偏西

(图 5d), 造成长江流域降水增加 (图 3f)。

从总体比较结果来看, 东亚季风环流主要组件均能被 CCSM4.0 合理地模拟出来, 其中包括: 850 hPa 冬季我国北方盛行的西北气流, 夏季澳大利亚越赤道气流、索马里低空急流以及我国东南部的西南气流。然而也应该看到, 模拟的风场强度和方向与观测仍然存在不同程度的差异, 例如冬季风模拟偏强, 夏季索马里越赤道气流偏弱、我国东部西南气流偏强。另外, 对流层低层风场与中层大气环流系统相互配合, 与我国部分地区地表气温和降水的空间分布型紧密相关。

4 结论

本文利用新一代全球耦合气候系统模式 CCSM4.0 对现代气候进行了长期积分试验模拟, 并将中国地表气温、降水及东亚地区海平面气压、500 hPa 和 100 hPa 位势高度、850 hPa 风场的模拟结果与观测和再分析资料作了比较分析, 分别从定性和定量的角度评估了 CCSM4.0 对东亚及我国气候态的模拟能力, 得到以下结论:

(1) CCSM4.0 对中国地表气温的模拟能力较好,能再现地表气温的主要空间分布特征,其中冬季模拟效果最好,夏季相对最差。不管是年平均还是冬、夏季平均,青藏高原地表气温模拟值均偏高,而位于塔里木盆地的暖中心均未能模拟出来。

(2) CCSM4.0 对中国降水的模拟效果相对较差,存在较大的系统性误差。与观测资料不同,模式结果中我国中南部地区出现了虚假降水中心,该中心在冬季不明显,在夏季达到最强,这可能与模式水平分辨率较低有关。

(3) CCSM4.0 能合理模拟出东亚地区海平面气压场的基本分布特点,其中冬季模拟能力较好,夏季则相对较差。冬季模拟的东亚地区海陆热力对比要大于观测。

(4) CCSM4.0 对 500 hPa 和 100 hPa 位势高度场模拟能力较好。在 500 hPa 层上,模式能够较好地模拟出东亚大槽冬强夏弱、西北太平洋副热带高压冬弱夏强的主要特征。另一方面,冬季东亚大槽模拟偏强,冬季和夏季西北太平洋副热带高压强度和范围比观测大。夏季,位于 100 hPa 层上的南亚高压中心强度与观测接近,但位置向南、向东均有所偏移,且高压范围比观测要小。

(5) CCSM4.0 能够模拟出 850 hPa 东亚冬、夏季风环流的主要系统,包括冬季我国北方的西北气流和夏季我国东南部的西南气流。但与观测相比,冬季风模拟偏强,夏季索马里越赤道气流偏弱、我国东部西南气流偏强,造成模式结果中我国南部季风降水偏少、长江流域季风降水增加。

综上所述,CCSM4.0 对东亚及中国气候态模拟效果总体上合理,可用于东亚和我国区域气候模拟工作。同时也应当看到,模拟结果与观测和再分析资料之间仍然存在着不同程度的差异,这可能是由多方面原因引起的。一方面,本试验过程中选取的模式水平分辨率较低,无法模拟中、小尺度气候过程,这和前人利用全球气候模式进行区域气候模拟得出的结果是一致的(高学杰等,2004;江滢等,2009);另一方面,虽然是新一代气候系统模式,模式本身整体性能较以往版本有所提高,但模式系统性误差以及与内部物理过程、参数化方案等有关的模式内部误差依然存在。最后需要说明的是,本文所进行的 700 年积分试验是以目前的温室气体浓度值作为边界条件,因此仅适用于现代气候模拟评

估,而后续进行的古气候模拟控制试验将另行设计。

致谢 感谢两位审稿人的宝贵审阅意见,感谢美国国家大气研究中心提供气候系统模式 CCSM4.0。

参考文献 (References)

- Blackmon M, Boville B, Bryan F, et al. 2001. The community climate system model [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (11): 2357 - 2376.
- Braconnot P, Otto-Bliesner B L, Harrison S, et al. 2007. Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum—Part 1: Experiments and large-scale features [J]. *Climate of the Past*, 3: 261 - 277.
- Brandefelt J, Otto-Bliesner B L. 2009. Equilibration and variability in a Last Glacial Maximum climate simulation with CCSM3 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36: L19712, doi:10.1029/2009GL040364.
- 陈显尧, 宋振亚, 赵伟, 等. 2008. 气候模式系统模拟结果的不确定性分析 [J]. *海洋科学进展*, 26 (2): 119 - 125.
- Chen Xianyao, Song Zhenya, Zhao Wei, et al. 2008. Uncertainty analysis of results simulated by climate model system [J]. *Advances in Marine Science (in Chinese)*, 26 (2): 119 - 125.
- Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, et al. 2007. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (6): 954 - 971.
- 冯锦明, 符淙斌. 2007. 不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较 [J]. *大气科学*, 31 (5): 805 - 814.
- Feng Jinming, Fu Congbin. 2007. Inter-comparison of long-term simulations of temperature and precipitation over China by different regional climate models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (5): 805 - 814.
- 高学杰, 林万涛, Kucharsky F, 等. 2004. 实况海温强迫的 CCM3 模式对中国区域气候的模拟能力 [J]. *大气科学*, 28 (1): 78 - 89.
- Gao Xuejie, Lin Wantao, Kucharsky F, et al. 2004. A simulation of regional climate in China by using CCM3 and observed SST [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (1): 78 - 89.
- Gao X J, Shi Y, Song R, et al. 2008. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100 (1 - 4): 73 - 86.
- 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 Xuejie, Xu Ying, Zhao Zongci, 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.
- 高学杰, 周广庆, 陈嘉滨. 2003. 仅引入质量守恒律的 T63 模式对

- 全球大气环流和中国气候的模拟 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 338 - 347. Gao Xuejie, Zhou Guangqing, Chen Jiabin. 2003. Simulation of global circulation and climate in China by T63 model with mass conservation law [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 338 - 347.
- Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, et al. 2011. The community climate system model version 4 [J]. J. Climate, 24, 4973 - 4991, doi:10.1175/2011JCLI4083.1.
- Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (4): 479 - 495.
- 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 2009. 近 50 年中国风速变化多气候模式模拟检验 [J]. 气象学报, 67 (6): 923 - 934. Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci. 2009. Evaluation of wind speeds in China as simulated by global climate models [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (6): 923 - 934.
- 鞠丽霞, 王会军. 2006. 用全球大气环流模式嵌套区域气候模式模拟东亚现代气候 [J]. 地球物理学报, 49 (1): 52 - 60. Ju Lixia, Wang Huijun. 2006. Modern climate over East Asia simulated by a regional climate model nested in a global gridpoint general circulation model [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (1): 52 - 60.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83: 1631 - 1643.
- Levis S, Bonan G B, Bonfils C. 2004. Soil feedback drives the mid-Holocene North African monsoon northward in fully coupled CCSM2 simulations with a dynamic vegetation model [J]. Climate Dyn., 23: 791 - 802.
- Liang X Z, Wang W C, Samel A N. 2001. Biases in AMIP model simulations of the East China monsoon system [J]. Climate Dyn., 17: 291 - 304.
- 凌铁军, 王彰贵, 王斌, 等. 2009. 基于 CCSM3 气候模式的同化模拟试验 [J]. 海洋学报, 31 (6): 9 - 21. Ling Tiejun, Wang Zhanggui, Wang Bin, et al. 2009. Assimilation modeling by using CCSM3 model [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 31 (6): 9 - 21.
- Otto-Bliesner B L, Tomas R, Brady E C, et al. 2006. Climate sensitivity of moderate- and low-resolution versions of CCSM3 to pre-industrial forcings [J]. J. Climate, 19: 2567 - 2583.
- 彭友兵, 徐影. 2009. 过去 530 年中国东部旱涝事件模拟研究初探 [J]. 第四纪研究, 29 (6): 1095 - 1103. Peng Youbing, Xu Ying. 2009. A modeling study on drought and flood events of the last 530 years in east China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 29 (6): 1095 - 1103.
- Peng Y B, Xu Y, Jin L Y. 2009. Climate changes over eastern China during the last millennium in simulations and reconstructions [J]. Quaternary International, 208 (1 - 2): 11 - 18.
- Shen C, Wang W C, Peng Y, et al. 2009. Variability of summer precipitation over eastern China during the last millennium [J]. Climate of the Past, 5: 129 - 141.
- Shin S I, Liu Z, Otto-Bliesner B, et al. 2003. A simulation of the Last Glacial Maximum climate using the NCAR-CCSM [J]. Climate Dyn., 20: 127 - 151.
- 孙颖, 丁一汇. 2008. IPCC AR4 气候模式对东亚夏季风年代际变化的模拟性能评估 [J]. 气象学报, 66 (5): 765 - 780. Sun Ying, Ding Yihui. 2008. Validation of IPCC AR4 climate models in simulating interdecadal change of East Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 765 - 780.
- Wang H J, Matsuno T, Kurihara Y. 2000. Ensemble hindcast experiments for the flood period over China in 1998 by use of the CCSR/NIES atmospheric general circulation model [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 78 (4): 357 - 365.
- 王淑瑜, 熊喆. 2004. 5 个海气耦合模式模拟东亚区域气候能力的初步分析 [J]. 气候与环境研究, 9 (2): 240 - 250. Wang Shuyu, Xiong Zhe. 2004. The preliminary analysis of 5 coupled ocean-atmosphere global climate models simulation of regional climate in Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (2): 240 - 250.
- 王秀成, 刘骥平, 俞永强, 等. 2010. 海冰模式 CICE4.0 与 LASG/IAP 气候系统模式的耦合试验 [J]. 大气科学, 34 (4): 780 - 792. Wang Xiucheng, Liu Jiping, Yu Yongqiang, et al. 2010. Experiment of coupling sea ice model CICE4.0 to LASG/IAP climate system model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 780 - 792.
- Xie P 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.
- 许崇海, 沈新勇, 徐影. 2007. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析 [J]. 气候变化研究进展, 3 (5): 287 - 292. Xu Chonghai, Shen Xinyong, Xu Ying. 2007. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (5): 287 - 292.
- 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 2002. 近 30 年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估 [J]. 应用气象学报, 13 (5): 513 - 525. Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. 2002. Detection and evaluation of effect of human activities on climatic change in East Asia in recent 30 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (5): 513 - 525.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (4): 763 - 772.
- 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: 61 - 81.
- 杨军丽, 郭裕福, 王斌. 2007. 亚洲季风降水的多模式模拟结果分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (4): 533 - 545. Yang Junli, Guo Yufu, Wang Bin. 2007. Analysis of AGCMs in Asian monsoon

- precipitation simulations [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (4): 533-545.
- 乐旭, 王会军. 2009. CCM3/NCAR 的辐射方案在 IAP-AGCM 模式中的应用 [J]. *大气科学*, 33 (1): 16-28. Yue Xu, Wang Huijun. 2009. The application of the CCM3/NCAR radiation scheme in IAP-AGCM [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (1): 16-28.
- 曾庆存, 周广庆, 浦一芬, 等. 2008. 地球系统动力学模式及模拟研究 [J]. *大气科学*, 32 (4): 653-690. Zeng Qingcun, Zhou Guangqing, Pu Yifen, et al. 2008. Research on the earth system dynamic model and some related numerical simulations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 653-690.
- 张莉, 丁一汇, 孙颖. 2008. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验 [J]. *大气科学*, 32 (2): 261-276. Zhang Li, Ding Yihui, Sun Ying. 2008. Evaluation of precipitation simulation in East Asian monsoon areas by coupled ocean-atmosphere general circulation models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (2): 261-276.
- 赵宗慈, 丁一汇, 李晓东, 等. 1995. 海气耦合模式在东亚地区的可靠性评估 [J]. *应用气象学报*, 6 (增刊): 9-18. Zhao Zongci, Ding Yihui, Li Xiaodong, et al. 1995. Evaluation of CGCMCL climate simulation in East Asia region [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 6 (Suppl.): 9-18.
- 周波涛, 赵平. 2009. 中全新世时期我国西南风气候季节演变的数值模拟结果分析 [J]. *第四纪研究*, 29 (2): 211-220. Zhou Botao, Zhao Ping. 2009. Coupled simulation result of seasonal evolution of southwesterly wind climate over eastern China in mid-Holocene [J]. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 29 (2): 211-220.
- Zhou B T, Zhao P. 2009. Inverse correlation between ancient winter and summer monsoons in East Asia? [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54 (20): 3760-3767.
- Zhou N F, Yu Y Q, Qian Y F. 2006. Simulations of the 100-hPa South Asian High and precipitation over East Asia with IPCC coupled GCMs [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23 (3): 375-390.
- Zhou T J, Wu B, Wang B. 2009. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the Asian-Australian monsoon? [J]. *J. Climate*, 22: 1159-1173.
- 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: 5843-5858.