

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.06.018

BCC-CSM2-MR 模式对东亚冬季风气候特征的模拟评估

邹星捷^{1,2}, 朱丽华¹

1. 成都信息工程大学 大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225;

2. 湖南省郴州市气象技术装备中心, 湖南 郴州 423000

摘要: 基于东安格里亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)资料及 NCEP/DOE 再分析数据集, 评估了第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)中 BCC-CSM2-MR 气候模式对东亚冬季风(East Asian Winter Monsoon, EAWM)气候特征的模拟能力。结果表明: BCC-CSM2-MR 模式能够合理再现西伯利亚高压、阿留申低压、850 hPa 偏北风、500 hPa 东亚大槽及 200 hPa 东亚西风急流等 EAWM 环流系统的气候态分布。其中, BCC-CSM2-MR 模式对 500 hPa 高度场的模拟效果最好, BCC-CSM2-MR 模式能够捕捉 EAWM 的年际变化及年代际减弱趋势, 但是模式中 EAWM 的减弱趋势小于观测结果。模式能够模拟出 EAWM 异常对应的西伯利亚高压异常及阿留申低压异常, 但是由于高低压异常中心位置与观测资料的差异, 导致模式中 EAWM 异常对应的东亚低层北风异常相对观测结果偏弱, 2 m 气温负异常也较观测结果偏弱。

关键词: 东亚冬季风; BCC-CSM2-MR 气候模式; 气候态;

年际变化; 模拟评估

中图分类号: P435

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)06-0182-10

Assessment of the Climate Characteristics of the East Asian Winter Monsoon by BCC-CSM2-MR Model

ZOU Xingjie^{1,2}, ZHU Lihua¹

1. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China;

2. Chenzhou Meteorological Technology Equipment Center, Chenzhou Hunan 423000, China

Abstract: Based on the Climatic Research Unit (CRU) dataset and NCEP/DOE reanalysis data, this study evaluates the simulations of the climatological characteristics of the East Asian Winter Monsoon (EAWM)

收稿日期: 2022-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(42075019, 42075081, 42105057); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0102)。

作者简介: 邹星捷, 助理工程师, 主要从事气候变化及其数值模拟研究。

通信作者: 朱丽华, 博士。

with BCC-CSM2-MR climate model, which is part of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). The results reveal that the BCC-CSM2-MR model can reasonably reproduce the climatologic mean of circulation systems of the East Asian winter monsoon, such as the Siberian high, Aleutian low, northerly wind at 850 hPa, East Asian major trough at 500 hPa, and East Asian westerly jet at 200 hPa. Among which, the model has the best simulation effect on the 500 hPa height field. The BCC-CSM2-MR model can capture the interannual variation and decadal weakening trend of EAWM, but the weakening trend of EAWM in the model is smaller than the observation results. The model can simulate the Siberian high anomaly and Aleutian low anomaly corresponding to the EAWM anomaly. However, due to the differences between central position of the high/low pressure anomaly and the observation data, the low-level northerly wind anomaly and the negative anomaly of temperature at 2 m in East Asia are both weaker in the model than in observations.

Key words: East Asian winter monsoon; climate pattern of BCC-CSM2-MR; climatologic mean; interannual variability; simulation evaluation

东亚是世界上人口最密集的地区之一, 占世界人口的 22%。东亚也是最典型的季风气候区, 夏季受来自海洋的水汽影响^[1], 炎热多雨, 冬季低温少雨, 东亚季风是全球最为活跃的季风系统之一^[2-3]。作为东亚季风最重要的成员之一, 东亚冬季风(East Asian Winter Monsoon, EAWM)及其相关环流是北半球冬季最重要的环流系统, EAWM 环流系统控制面积大, 影响时间长, EAWM 的建立引导冷空气向南流动, 给东亚地区带来寒潮、雨雪、大风和沙尘暴等恶劣天气^[4-7], 冷空气向南侵入低纬度地区, 有利于促进中高纬地区与热带地区间的相互作用, 导致东南亚地区出现暴雨和强对流天气, 甚至影响更大尺度的气候变化^[8-11], EAWM 向南流动还可能越过赤道从而对影响澳洲夏季风^[12], 此外, EAWM 的强弱变化会对四川盆地春旱的强度产生影响^[13]。EAWM 的运动和发展甚至会引起全球范围的大气环流变化^[14]。因此, EAWM 的变化及影响研究具有重要的理论价值和现实意义。

气候模式是研究当代气候模式和预估气候变化的重要工具, 但是由于东亚地区气候的复杂性, 使得气候模式对东亚地区气候及气候变化的模拟结果存在很大的不确定性。相对于东亚夏季风的模拟评估, 当前关于 BCC-CSM2-MR 模式对 EAWM 模拟能力的评估工作较少。加强评估气候模式对东亚气候的模拟能力, 是气候模式改进、模式结果推广及应用的关键科学依据和理论参考。

EAWM 以北半球冬季东亚地区近地面“冷涌”的间歇性爆发为特征^[15], 与西伯利亚高压和阿留申低压、对流层中层的东亚大槽、对流层高层的西风急流等的变化密切相关^[4, 16-18], 这些环流系统构成了 EAWM 环流系统的主要成员, 也是评估 BCC-CSM2-MR 模式对 EAWM 模拟性能的关键考察因子。针对高低层环流系统, 王冰笛等^[19]评估了新一代区域气候模式(Regional Climate-Weather Research and Forecasting, CWRf)对 EAWM 环流特征的模拟能力; 金晨曦等^[20]评估了 CMIP5 中 4 个中国气候模式对 EAWM 气候态的模拟能力, 分析了 2 m 气温时空分布特征的模拟表现及影响 EAWM 年际变化率的机理; 尹依雯^[21]评估了 CMIP5 中 17 个模式对 EAWM 气候态及年际变化的模拟能力; 王政琪等^[22]评估了 CMIP5 中 44 个模式对 EAWM 环流系统, 尤其是冬季风指数及其与气温特征和对应环流的模拟能力。近些年, 国家(北京)气候中心在模式发展方面取得重要进展, 其发展的新版本模式 BCC-CSM2-MR 参加了第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6), BCC-CSM2-MR 的大气模式分量为 BCC-AGCM3-MR, 水平分辨率为 T106, 垂直分层 46 层, 对深对流过程、大气辐射和重力波方案进行了改进, 引入了气溶胶间接效应^[23-24]。BCC-CSM2-MR 模式中的海洋模式为美国流体力学实验室发展的 MOM4-L40, 采用三极网格 gx1v1, 热带地区分辨率为 0.3°, 热带到极地地区分辨率逐渐递增至 1°。BCC-CSM2-MR 模式的陆面分量为 BCC-AVIM2, 水平分辨率为 T106^[23]。相对于 BCC-CSM1-1M 模

式,该模式在全球平均气温及中国降水分布方面^[23],以及海温、海冰、大西洋经向翻转环流(Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC)、辐射收支、热带季节内振荡(Madden Julian Oscillation, MJO)和平流层准两年振荡(Quasi-Biennial Oscillation, QBO)等方面^[24]的模拟能力均有明显提高,但是 BCC-CSM2-MR 模式对 EAWM 环流系统的模拟能力如何还存在不确定性。

本研究利用 BCC-CSM2-MR 气候模式的历史模拟试验数据,评估该模式对 EAWM 平均环流、年际、年代际变化以及与东亚冬季气温和环流的关系等方面的模拟能力,以期为模式的发展、改进及其未来的应用提供科学依据。

1 数据资料和方法

1.1 数据资料

本研究所使用的数据资料如下:

1) 由英国 East Anglia 大学东安格利亚大学气候研究中心(Climatic Research Unit, CRU)提供的地面气温逐月资料,资料水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

2) NCEP/DOE 再分析逐月数据集,物理量包括:海平面气压、位势高度、纬向风和经向风,资料水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

3) 国家(北京)气候中心推出的在 CMIP6 中的气候模式 BCC-CSM2-MR,逐月物理量包括:地面气温、海平面气压、位势高度、纬向风和经向风,水平分辨率为 $1.125^\circ \times 1.125^\circ$ 。

为保证数据时间段的一致性,以上资料均选取 1979—2014 年进行分析,本研究中冬季指 12 月至次年 2 月。为了便于讨论,本研究中将 CRU 资料和 NCEP/DOE 再分析资料泛称为“观测资料”。

1.2 研究方法

为了评估模式对以上物理场的模拟效果,参照文献[25]选取区域平均误差(Regional Average Error, RAE)和空间相关系数(Spatial Correlation Coefficient, SCC)作为统计指标,公式分别如下:

$$R_{\text{RAE}} = \bar{X} - \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$S_{\text{SCC}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中: X 为模式模拟平均值; Y 为观测评价价值; x_i 为模式模拟值; y_i 为观测值; n 为样本数量。

2 结果分析

2.1 东亚冬季风气候态特征模拟评估

2.1.1 海平面气压场

模式能否合理再现观测中的气候态特征是评估模型模拟性能的一个重要因素^[26]。研究表明,海陆间气压差是影响 EAWM 强弱及范围的一个重要因子, EAWM 向南发展的程度也受海陆间气压差影响,因此 EAWM 在低层与西伯利亚高压和阿留申低压相关。同时,西伯利亚高压也是影响东亚地区冬季温度、降水的重要环流因子,其强度变化可能是引起我国乃至东亚地区冬季气温变化的原因之一^[27],所以海平面气压场是衡量 EAWM 强弱的一个重要要素场。图 1 分别给出观测和模式中 1979—2014 年冬季海平面气压气候平均态分布。观测结果显示(图 1a),冬季平均状况下,贝加尔湖以西以南地区为显著的高压中心,低压中心位于阿留申群岛, BCC-CSM2-MR 模式(下文简称模式)模拟出的西伯利亚高压中心及阿留申低压中心的位置与观测资料大致相同,但是观测中西伯利亚高压控制的范围略大于模式,强度大致相同,同时,模式

与观测中的阿留申低压强度相近, 模式中的低压范围略大于观测资料(图 1b). 可见, 模式能够较好地模拟出东亚冬季海平面气压场的气候态分布.

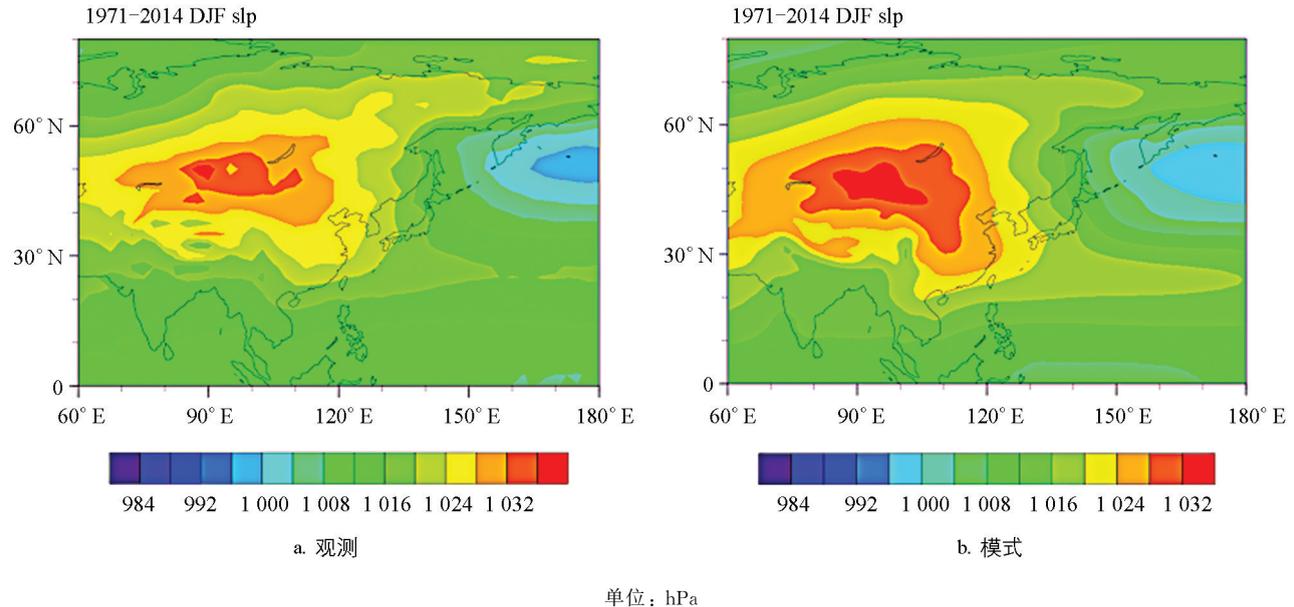


图 1 1979—2014 年冬季海平面气压(SLP)气候平均态

2.1.2 2 m 温度场

无论 EAWM 的环流怎样变化, 最能直接反映冬季地面冷空气活动的物理量就是 2 m 气温^[28]. EAWM 的强弱和西太平洋与高纬大陆间温度差有关, 温度差越大则 EAWM 越强. 图 2 为观测与模式中冬季 2 m 气温气候平均态, 图 2a 中显示, 观测中 2 m 气温由北向南递增, 冷中心位于西伯利亚中部地区. 图 2b 中, 模式模拟的 2 m 气温气候平均态分布显示, 冷区范围大于观测资料, 但是模式的冷中心强度略小于观测. 总而言之, 模式模拟的 2 m 气温场能合理再现冬季气温由北向南递增的分布特征以及西伯利亚地区的强冷中心.

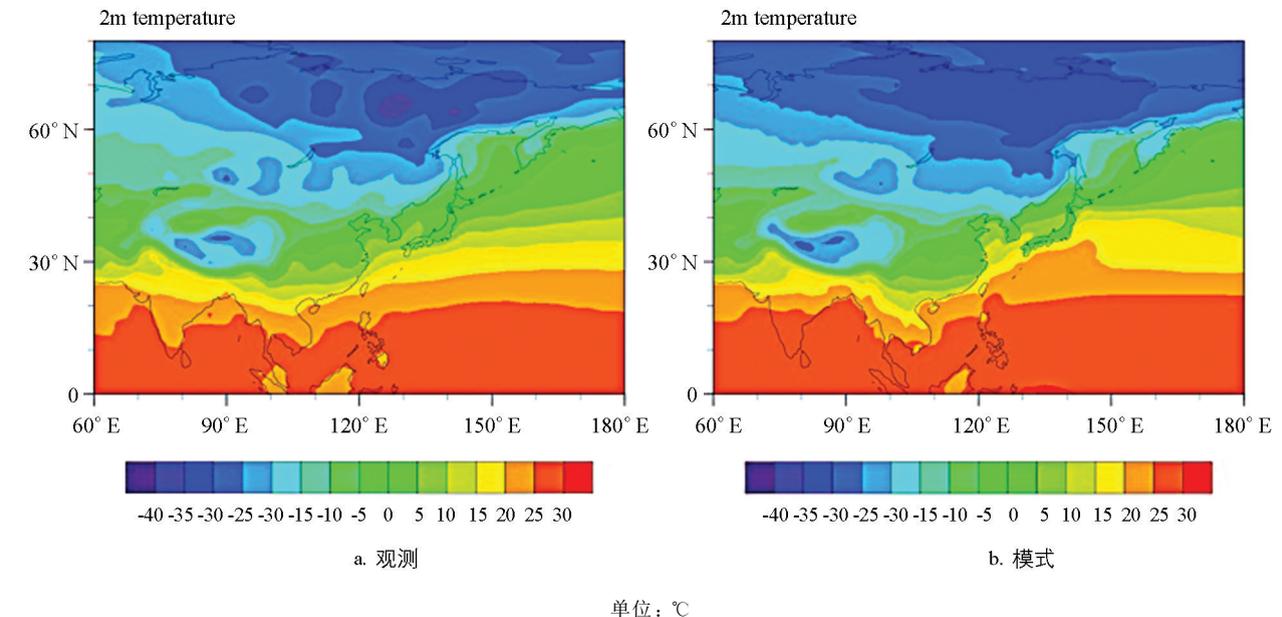
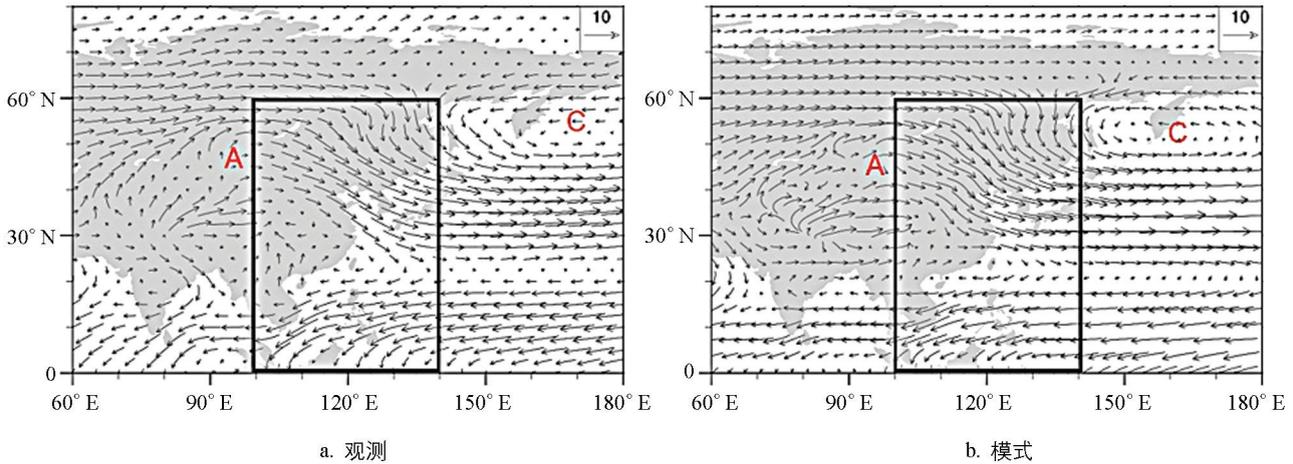


图 2 1979—2014 年冬季 2 m 气温气候平均态

2.1.3 850 hPa 风场

图 3 为冬季多年平均的 850 hPa 风矢量场气候态分布, 图 3a 中东亚陆地地区为反气旋式环流, 阿留申

地区为气旋式环流,分别对应图 1 中的西伯利亚高压和阿留申低压.同时,图 3b 显示,模式能够较好地模拟 850 hPa 上冬季东亚大陆上的反气旋式环流及阿留申地区的气旋式环流,也能较好模拟气旋与反气旋之间东亚区域(20°—60°N, 115°—150°E)的偏北风,但是模式模拟的偏北风强于观测结果.

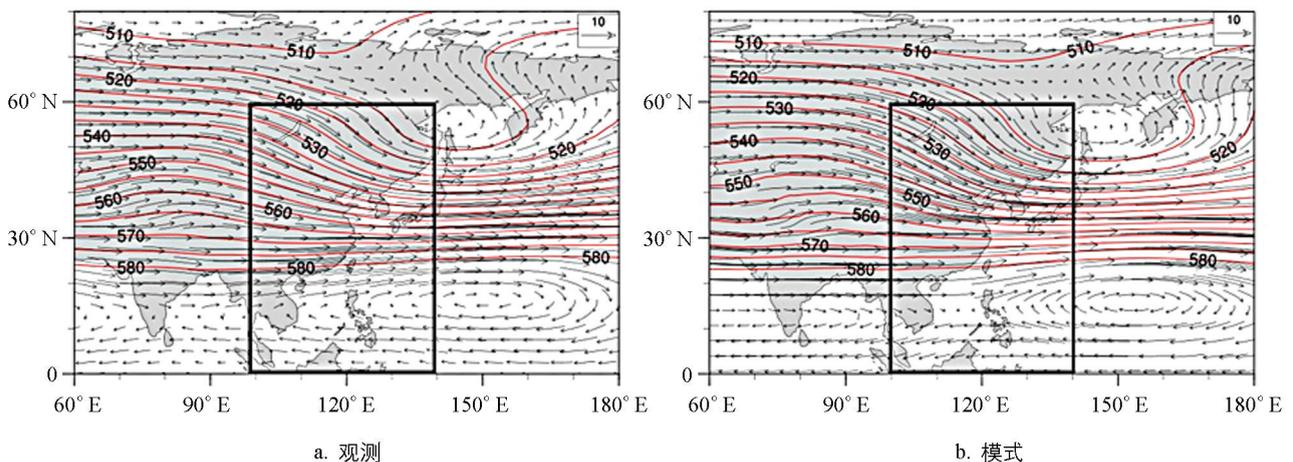


单位: m/s, 黑色方框代表东亚冬季风区,“A”代表反气旋环流,“C”代表气旋环流.

图 3 1979—2014 年冬季 850 hPa 风矢量场气候平均态

2.1.4 500 hPa 高度场

EAWM 区域内的冷空气活动会随着东亚大槽的加深显著加强^[29].东亚大槽通常位于阿留申群岛以西,其槽前为正涡度平流,地面辐合上升增强,对应高空高压和地面低压,地面低压即上文所分析的阿留申低压.槽后为冷平流,负涡度平流,地面辐合上升减弱,对应高空低压和地面高压,即西伯利亚冷高压.当东亚大槽加深(变浅)时,槽前辐合上升加强(减弱),槽后辐合下沉变强(减弱),对应的是阿留申低压加强(减弱),西伯利亚高压加强(减弱),这也就导致了 EAWM 的加强(减弱)^[30].图 4 显示了 500 hPa 多年平均的位势高度和风矢量分布,从图 4a 中可以看出,观测资料中冬季东亚大槽位于东亚大陆沿海地区,东亚大陆受槽后偏北气流控制,同时图 4b 中的模式结果能够较好再现冬季东亚大槽的位置、强度,以及槽后偏北气流对东亚地区的影响.



黑色方框代表东亚冬季风区.

图 4 1979—2014 年冬季 500 hPa 风矢量场(单位: m/s)及位势高度气候平均态(单位: dagpm)

2.1.5 200 hPa 西风急流

EAWM 与高层和西风急流的联系是十分紧密的,西风急流的成因是南北温度梯度的存在,当西风急流增强时,西太平洋与高纬大陆间温度差变大.而且西风急流的强弱与西伯利亚高压、阿留申低压及东亚

大槽的强弱密切相关^[31]. 而地面气温最能直接反映近地面冬季风活动状况, EAWM 南下的一个显著表现就是地面气温的下降. 因此当西风急流加强时, 西伯利亚高压和阿留申低压的气压差增大, 东亚大槽加强, EAWM 也随之加强, 从而引起东亚地区气温下降. 图 5 为冬季多年平均的 200 hPa 纬向风分布, 图 5a 中显示, 观测中对流层上层的西风急流中心轴线位于 25°–36°N 附近, 东亚海上和日本上空的急流风速最强. 图 5b 中模式能够较好地模拟出亚洲冬季对流层高层西风急流的轴线位置和中心强度, 只是模式模拟的急流中心范围略大于观测结果.

综上所述, 就气候平均态而言, BCC-CSM2-MR 模式能够较好地模拟出西伯利亚高压、阿留申低压、850 hPa 东亚大陆的偏北风、500 hPa 的东亚大槽以及 200 hPa 的西风急流等 EAWM 环流系统的位置及大值中心, 只是 BCC-CSM2-MR 模式略高估算了 EAWM 的平均强度.

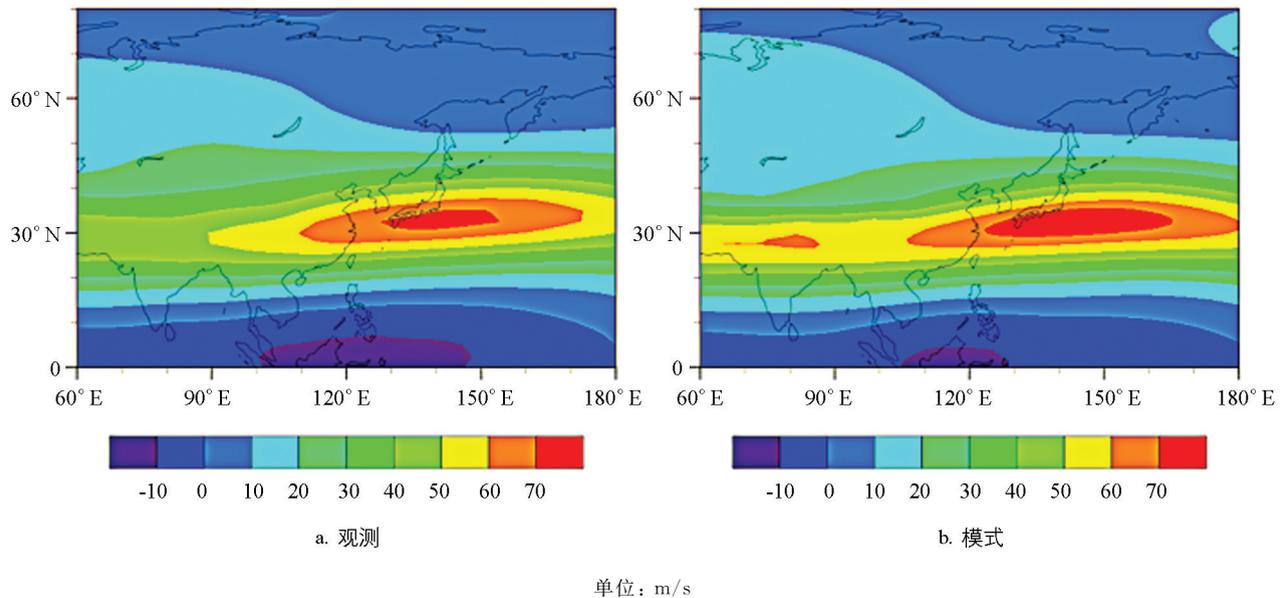


图 5 1979–2014 年冬季 200 hPa 纬向风气候平均态

2.1.6 泰勒图分析

为了定量评估模式对各个物理量场的模拟效果, 图 6 计算了 1979–2014 年 EAWM 环流系统相关区域(0°–80°N, 60°–180°E)各相关物理量气候态分布的观测结果与模式结果比较的泰勒图分布. 图 6 显示, 相对于其他物理量, 模式对东亚冬季 500 hPa 位势高度场气候态分布的模拟结果最接近观测结果, 模式模拟结果与观测结果的空间相关系数超过了 0.96, 均方根误差约为 0.35. 此外, 模式对东亚冬季 200 hPa 纬向风和 2 m 气温气候态分布的模拟也相对较好, 两者与观测结果的空间相关系数都保持在 0.84 左右, 均方根误差在 0.6 左右. 模式对海平面气压场和 500 hPa 纬向风的模拟效果仅次于对 200 hPa

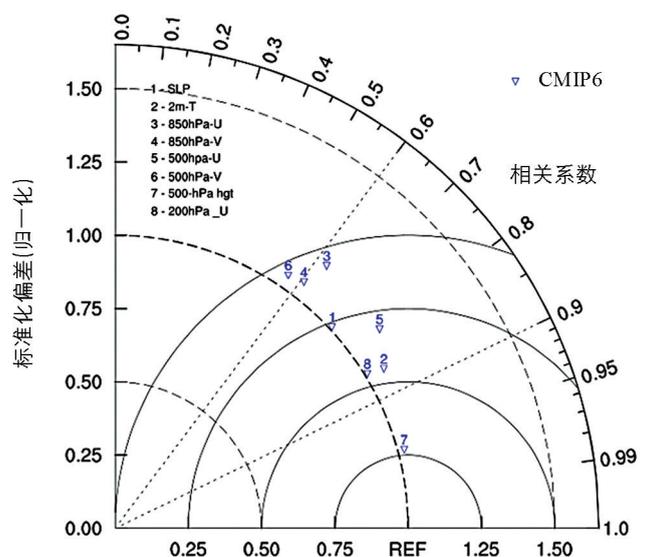


图 6 EAWM 环流系统相关区域(0°–80°N, 60°–180°E)各相关物理量气候态分布的观测结果与模式结果比较的泰勒图分布

纬向风和 2 m 气温的模拟效果, 两者与观测结果的空间相关系数在 0.8 左右, 均方根误差在 0.7 左右.

相对于以上各个物理量场的模拟,模式对 850 hPa 纬向风、850 hPa 经向风及 500 hPa 经向风的模拟效果相对较差,与观测结果的空间相关系数在 0.6 左右,均方根误差约为 0.85.

2.2 EAWM 指数变化模拟评估

2.2.1 EAWM 指数时间变化特征

为了评估模式对 EAWM 变化的模拟能力,选取 EAWM 指数来定量描述 EAWM 强度的年际和年代际变化特征,根据前人研究及上文所述,EAWM 的强度与 500 hPa 位势高度场上东亚大槽的强弱变化密切相关,并且相对于其他物理量,模式对东亚冬季 500 hPa 位势高度场模拟得更好,因此本研究参照文献[32]选取了 1979—2014 年 500 hPa 高度场上(45°—55°N,75°—85°E)与(30°—40°N,130°—140°E)两个区域内高度场的平均值之差来定量描述 EAWM 的强度,指数越大(小)表示 EAWM 越强(弱).由此计算得出的观测资料与模式中的 EAWM 时间序列及其线性趋势如图 7 所示,模式能够较好地模拟出 EAWM 的年际变化,将根据观测资料计算得到的指数时间序列与模式结果进行相关分析,两者的相关系数为 0.69,通过了 99% 的显著性检验.

EAWM 指数的线性趋势分析显示(图 7),无论观测数据还是模式数据,EAWM 指数均呈现减弱趋势,即 EAWM 减弱.观测资料中,EAWM 在 1979—2014 年间显著减弱,该减弱趋势通过了 90% 的显著性检验,模式虽然捕捉到了 EAWM 的减弱趋势,但其减弱趋势并不显著,即 BCC-CSM2-MR 模式低估了 EAWM 的减弱程度.

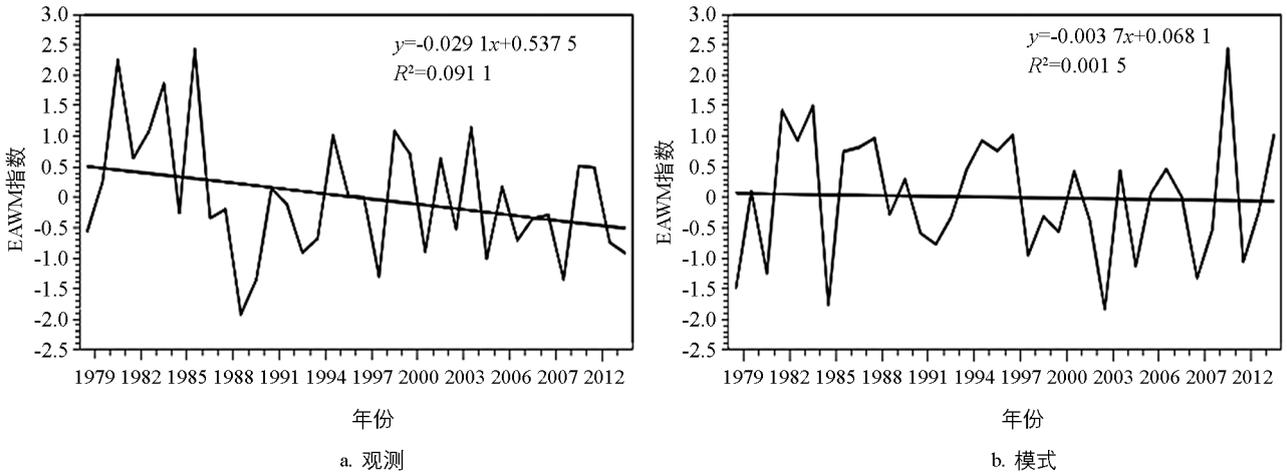
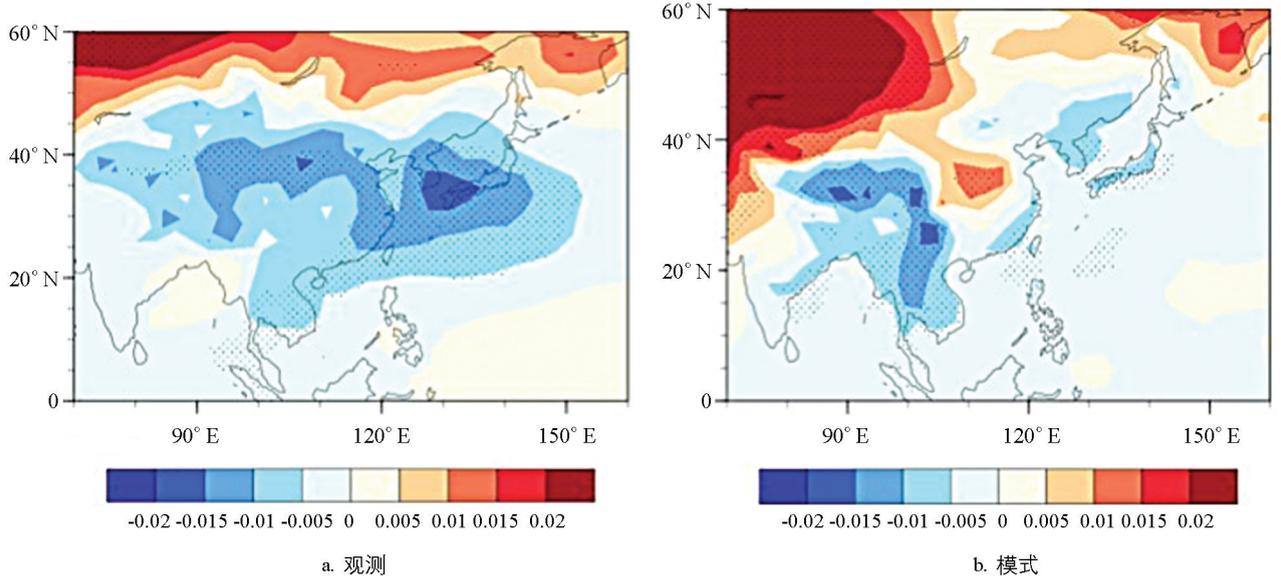


图 7 1979—2014 年 EAWM 指数标准化时间序列及其一元线性趋势图

2.2.2 EAWM 指数与各物理场的回归分析

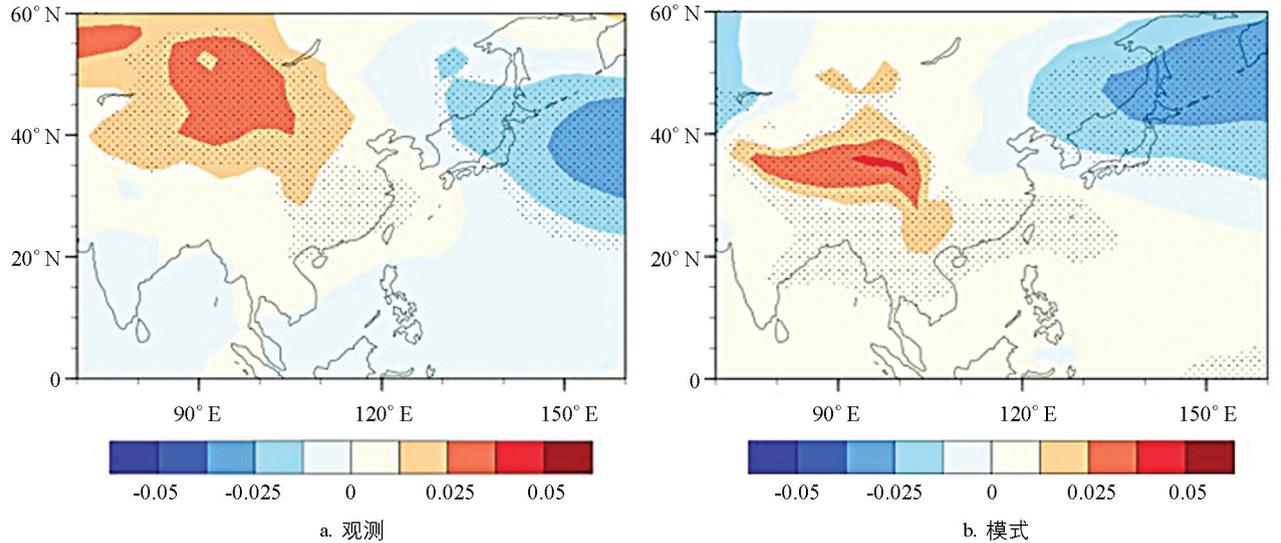
东亚冬季低空环流的变化是 EAWM 变化的最直接反映,为了进一步评估模式关于 EAWM 与近地面气温及低空环流变化关系的模拟效果,图 8—10 分别显示了观测资料与模式资料中 EAWM 指数回归的 2 m 气温、海平面气压场和 850 hPa 风矢量的空间分布.由图 8a 可知,在观测资料中,当 EAWM 偏强时,东亚大部分地区 2 m 气温表现为负异常,中心位于我国黄河流域、东部沿海至朝鲜半岛、日本南部一线,贝加尔湖以北为温度正异常.图 8b 显示,BCC-CSM2-MR 模式高估了 EAWM 对贝加尔湖以西地区气温正异常的影响,低估了 EAWM 对我国中东部地区气温负异常的影响,甚至出现与观测资料相反的现象.在 EAWM 回归的海平面气压场上(图 9),观测资料中(图 9a)当 EAWM 增强时,在贝加尔湖以西以南地区海平面气压表现为正异常,西伯利亚高压偏强,对应 850 hPa 风场在该区域的反气旋式异常环流(图 10a).同时,日本以东的西太平洋地区为负异常,阿留申低压偏强(图 9a),对应 850 hPa 风场在该区域上空为气旋式异常环流(图 10a).而在模式资料中,EAWM 偏强时对应的陆地地区海平面气压场异常偏强中心位置相对于观测资料偏南,同时太平洋区域海平面气压负异常中心位置相对于观测资

料偏北(图 9b), 对应 850 hPa 风场上大陆地区反气旋式环流及海洋上的气旋式异常环流相对于观测资料分别偏南和偏北(图 10b), 因此导致在观测资料中, 大陆的异常反气旋与海洋上的异常气旋之间的东亚地区为强盛的偏北气流控制, EAWM 偏强(图 10a), 而在模式资料中, 反气旋式异常环流与气旋式异常环流之间的异常较观测资料偏弱(图 10b), 从而导致模式资料中 2 m 气温在东亚地区的负异常没有观测资料中明显(图 8b).



单位: $^{\circ}\text{C}$. 图中打点区域通过 95% 的显著性检验.

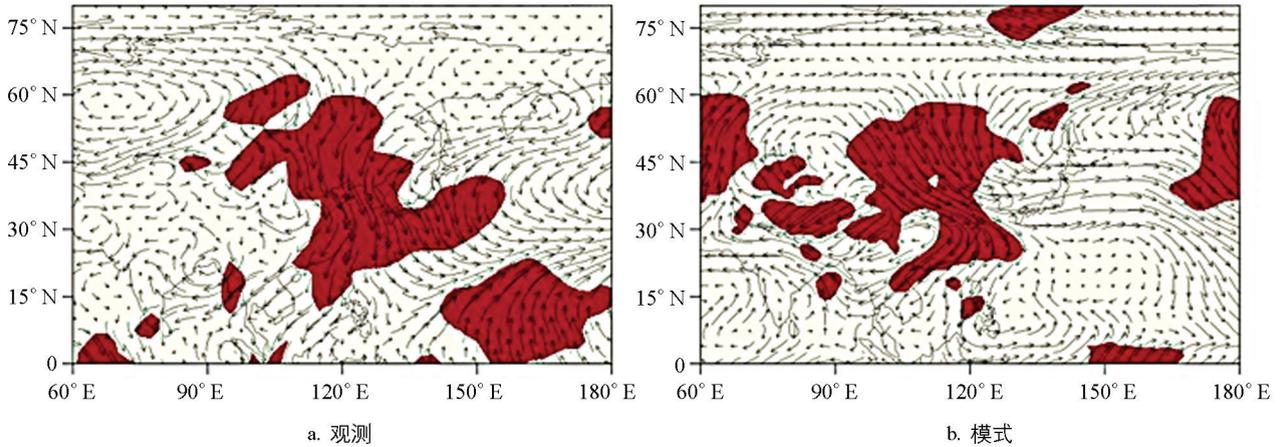
图 8 EAWM 指数回归的冬季 2 m 气温分布



单位: hPa. 图中打点区域通过 95% 的显著性检验.

图 9 EAWM 指数回归的冬季海平面气压场

综上所述, BCC-CSM2-MR 模式能够较好地模拟出观测资料中 EAWM 的年际变化及其年代际减弱趋势, 但是与观测资料结果相比, 模式模拟的冬季风减弱趋势偏小. 同时, 模式能够捕捉冬季风异常时西伯利亚地区的高压异常及阿留申地区的低压异常, 但是由于高低压异常中心在模式和观测中的位置存在差异, 导致模式中东亚低层的北风异常较观测结果偏弱, 2 m 气温负异常相对观测结果也偏弱.



单位: m/s. 图中打点区域为 850 hPa 经向风通过 95% 的显著性检验.

图 10 EAWM 指数回归的 850 hPa 冬季风矢量

3 结论

本研究通过 BCC-CSM2-MR 模式资料和 CRU, NCEP/DOE 资料进行比较, 从气候态、年际、年代际变化以及与气温和环流的关系等方面综合评估了 BCC-CSM2-MR 模式对 EAWM 的模拟能力. 得出如下主要结论:

1) BCC-CSM2-MR 模式对 EAWM 环流系统气候态分布的模拟能力较好, 能够较准确捕捉到海平面气压场上的西伯利亚高压和阿留申低压、东亚地区 850 hPa 的偏北风、500 hPa 的东亚大槽及 200 hPa 的西风急流等 EAWM 的关键环流系统. 相对而言, 模式对 500 hPa 高度场模拟最好, 其次为 200 hPa 纬向风和 2 m 气温场, 模式对海平面气压场和 500 hPa 纬向风的模拟效果再次之, 对 850 hPa 纬向风、850 hPa 经向风和 500 hPa 经向风的模拟效果相对较差.

2) 观测和模式资料中 EAWM 指数变化的相关分析和趋势分析表明, 模式能够较好地模拟出 EAWM 的年际变化, 同时能够捕捉 EAWM 的年代际减弱趋势, 但是模式模拟的 EAWM 减弱趋势小于观测结果.

3) 模式能够模拟出 EAWM 异常时海平面气压场上西伯利亚地区的高压异常和阿留申地区的低压异常, 也能模拟出 850 hPa 上对应区域的异常反气旋和异常气旋性环流, 但是由于高低压异常中心位置与观测资料的差异, 导致模式中 EAWM 异常对应的冬季风区 850 hPa 偏北风异常相对于观测资料偏弱, 同时 2 m 气温负异常也较观测结果偏小.

综上所述, 尽管 BCC-CSM2-MR 模式能够较好地模拟 EAWM 的气候特征, 但是无论在气候态、年际、年代际变化方面, 还是 EAWM 与气温和环流的关系方面, 该模式依然存在不同程度的误差, 而造成这些误差的原因还有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 鄢应燃, 刘睿恺, 杨勋林, 等. 东亚季风区最近 1 000 a 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 空间变化特征及气候意义研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(4): 98-104.
- [2] 陈隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 I. 强弱冬季风影响的对比研究 [J]. 大气科学, 1999, 23(1): 101-111.
- [3] HUANG R H, CHEN J L, WANG L, et al. Characteristics, Processes, and Causes of the Spatio-Temporal Variabilities of the East Asian Monsoon System [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(5): 910-942.
- [4] DING Y. Monsoons over China [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1994: 419.
- [5] WANG B, WU R G, FU X. Pacific-East Asian Teleconnection: How does ENSO Affect East Asian Climate? [J]. Journal of Climate, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [6] WANG L, CHEN W. How Well do Existing Indices Measure the Strength of the East Asian Winter Monsoon? [J]. Ad-

- vances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(4): 855-870.
- [7] ZHOU W, CHAN J C L, CHEN W, et al. Synoptic-Scale Controls of Persistent Low Temperature and Icy Weather over Southern China in January 2008 [J]. Monthly Weather Review, 2009, 137(11): 3978-3991.
- [8] TAO S Y, CHEN L X. A Review of Recent Research on the East Asian Summer Monsoon in China [M]. Oxford: Oxford University Press, 1987: 60-92.
- [9] YANG S, LAU K M, KIM K M. Variations of the East Asian Jet Stream and Asian-Pacific-American Winter Climate Anomalies [J]. Journal of Climate, 2002, 15(3): 306-325.
- [10] HUANG R H, ZHOU L T, CHEN W. The Progresses of Recent Studies on the Variabilities of the East Asian Monsoon and Their Causes [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(1): 55-69.
- [11] CHANG C P, HARR P, CHEN H. Synoptic Disturbances over the Equatorial South China Sea and Western Maritime Continent during Boreal Winter [J]. Monthly Weather Review, 2005, 133: 489-503.
- [12] 刘言志, 左瑞亭, 彭军, 等. 东亚冬季风的变化及其影响的研究进展 [J]. 科学与财富, 2011(1): 91-92.
- [13] 王春学, 张顺谦, 周斌, 等. 四川盆地春旱日数准 2 年周期特征及其对东亚冬季风的响应 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 130-138.
- [14] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理与方法 [M]. 4 版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [15] 丁一汇. 东亚冬季风的统计研究 [J]. 热带气象, 1990, 6(2): 119-128.
- [16] CHEN W, GRAF H F, HUANG R H. The Interannual Variability of East Asian Winter Monsoon and Its Relation to the Summer Monsoon [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2000, 17(1): 48-60.
- [17] 高辉. 东亚冬季风指数及其对东亚大气环流异常的表征 [J]. 气象学报, 2007, 65(2): 272-279.
- [18] 况雪源, 张耀存, 刘健. 对流层上层副热带西风急流与东亚冬季风的关系 [J]. 高原气象, 2008, 27(4): 701-712.
- [19] 王冰笛, 李清泉, 沈新勇, 等. 区域气候模式 CWRf 对东亚冬季风气候特征的模拟 [J]. 地球科学进展, 2020, 35(3): 319-330.
- [20] 金晨曦, 周天军. 参加 CMIP5 的四个中国气候模式模拟的东亚冬季风年际变率 [J]. 大气科学, 2014, 38(3): 453-468.
- [21] 尹依雯. CMIP5 模式对东亚冬季风年际变化的评估及其预估 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [22] 王政琪, 徐影, 周波涛. CMIP5 模式对东亚冬季风指数变化及其与冬季大气环流和气温关系的模拟评估 [J]. 地球物理学报, 2017, 60(9): 3315-3324.
- [23] 辛晓歌, 吴统文, 张洁, 等. BCC 模式及其开展的 CMIP6 试验介绍 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 533-539.
- [24] WU T W, LU Y X, FANG Y J, et al. The Beijing Climate Center Climate System Model (BCC-CSM): main progress from CMIP5 to CMIP6 [J]. Geoscientific Model Development, 2019, 12(4): 1573-1600.
- [25] JIANG D B, WANG H J, LANG X M. Evaluation of East Asian Climatology as Simulated by Seven Coupled Models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2005, 22(4): 479-495.
- [26] YING S, YIHUI D. An Assessment on the Performance of IPCC AR4 Climate Models in Simulating Interdecadal Variations of the East Asian Summer Monsoon [J]. Journal of Meteorological Research, 2008, 22: 472-488.
- [27] 龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究 [J]. 地理学报, 1999, 54(2): 125-133.
- [28] 赵平, 张人禾. 东亚-北太平洋偶极型气压场及其与东亚季风年际变化的关系 [J]. 大气科学, 2006, 30(2): 307-316.
- [29] 孙柏民, 李崇银. 冬季东亚大槽的扰动与热带对流活动的关系 [J]. 科学通报, 1997, 42(5): 500-504.
- [30] 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究 [J]. 大气科学, 2014, 38(5): 974-992.
- [31] 毛睿, 龚道溢, 房巧敏. 冬季东亚中纬度西风急流对我国气候的影响 [J]. 应用气象学报, 2007, 18(2): 137-146.
- [32] 张自银, 龚道溢, 胡森, 等. 多种东亚冬季风指数及其与中国东部气候关系的比较 [J]. 地理研究, 2012, 31(6): 987-1003.