

李斐斐,刘朝晖.CMIP5模式对青藏高原中东部夏季降水双极型模拟能力的评估[J].海洋气象学报,2022,42(2):22-32.
LI Feifei, LIU Zhaohui. Evaluation of simulation performance of CMIP5 models for the dipole oscillation of summer precipitation over the central and eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(2): 22-32. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.003. (in Chinese)

CMIP5模式对青藏高原中东部夏季降水双极型模拟能力的评估

李斐斐¹, 刘朝晖²

(1.中国人民解放军军事科学院防化研究院,北京 102205; 2.山东省气象台,山东 济南 250031)

摘要: 青藏高原中东部夏季降水主要表现为东北和东南反位相变化的双极型特征。采用经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分解方法,系统性地评估参与第五次耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)历史模拟试验的47个模式对青藏高原中东部夏季降水双极型变化特征的模拟能力。结果表明,大多数模式基本可以反映青藏高原中东部夏季降水东北部和东南部反位相的变化特征。模式间EOF分析结果表明在35°N以南的东西向模拟偏差是CMIP5模式模拟降水空间型态的主要偏差,且大多数模式对时间系数的模拟效果差于空间型态。文中定义了一个综合评估指标 S_{new} 来定量描述模式对空间型态、时间系数以及方差贡献的综合模拟效果。由定量评估结果来看,MIROC-ESM、HadGEM2-CC和ACCESS1-0(FIO-ESM、HadGEM2-AO和MIROC-ESM-CHEM)模式对观测降水的EOF1(EOF2)模态的综合模拟能力相对较好,而GISS系列模式、CESM1-CAM5和MPI-ESM-LR(CMCC-CESM、MPI-ESM-MR和GFDL-CM3)模式对观测降水的EOF1(EOF2)模态的综合模拟效果较差。由EOF1和EOF2的综合评估结果来看,MIROC-ESM-CHEM模式对观测降水的EOF1和EOF2模态的综合模拟效果最好。

关键词: 青藏高原中东部夏季降水; 双极型; CMIP5; 综合评估

中图分类号: P426.6; P462.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2022)02-0022-11

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.003

Evaluation of simulation performance of CMIP5 models for the dipole oscillation of summer precipitation over the central and eastern Tibetan Plateau

LI Feifei¹, LIU Zhaohui²

(1. Research Institute of Chemical Defense, Academy of Military Sciences, Beijing 102205, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract The summer precipitation over the central and eastern Tibetan Plateau (TP) is mainly characterized by a dipole pattern with seesaw changes in the northeast and southeast. Based on the empirical orthogonal function (EOF) analysis, the abilities of 47 models participating in the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) historical experiments to simulate the dipole oscillation of summer precipitation over the central and eastern TP are systematically evaluated. The results shows that most of the models can reproduce the seesaw structure of summer precipitation anomalies in the northeast and southeast of the central and eastern TP. However, the inter-model EOF analysis shows that

收稿日期: 2021-11-16; 修订日期: 2022-02-09

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(91737307)

通信作者: 李斐斐,女,博士,助理研究员,主要从事耦合资料同化和数值模拟研究,lifeifei007@126.com。

the east-west simulation deviation in the south of 35°N stands out as the most prominent deviation of CMIP5 models in simulating spatial patterns of precipitation. Most of the models are worse at simulating time coefficients than spatial patterns. A comprehensive evaluation index S_{new} is defined to quantitatively describe the comprehensive simulation performances of 47 CMIP5 models on spatial patterns, time coefficients, and variance contribution. From the quantitative evaluation results, MIROC-ESM, HadGEM2-CC, and ACCESS1-0 (FIO-ESM, HadGEM2-AO, and MIROC-ESM-CHEM) models perform relatively well in the comprehensive simulation on EOF1 (EOF2) mode of observed precipitation, while the GISS series models, CESM1-CAM5, and MPI-ESM-LR (CMCC-CESM, MPI-ESM-MR, and GFDL-CM3) models have poor comprehensive simulation performance on EOF1 (EOF2) mode of observed precipitation. Based on the comprehensive evaluation results of EOF1 and EOF2, it is found that MIROC-ESM-CHEM model has the best comprehensive simulation performance on the two leading EOF modes of observed summer precipitation over the central and eastern TP.

Key words summer precipitation over the central and eastern Tibetan Plateau; dipole oscillation; CMIP5; comprehensive evaluation

引言

青藏高原 (the Tibetan Plateau, TP) 是中国最大、世界海拔最高的高原, 被称为“世界屋脊”和“第三极”, 其平均海拔在 4 000 m 以上, 为东亚、东南亚和南亚许多大河流的发源地^[1-3]。在全球变化的大背景下, 青藏高原不仅是最为敏感的区域之一, 其同时也可以对全球气候变化产生重要影响, 成为气候变化的启张器和调节器。该区域的气候变化不仅可以驱动中国东部和西南部地区气候的变化, 而且对北半球具有巨大的影响, 甚至对全球的气候变化也具有明显的敏感性、超前性和调节性^[4-6]。尤其是占全年降水量 60%~70% 的青藏高原区域夏季降水^[7], 会影响该区域的热力状况以及全球水循环, 这会直接影响到亚洲夏季风系统的强弱, 进而对东亚和南亚地区的夏季降水变化产生影响。因此对青藏高原区域夏季降水时空变化的研究具有重要意义。

由于青藏高原区域复杂的地理条件, 对该区域降水的准确观测十分困难, 气候模式成为研究青藏高原气候变化的重要工具之一^[8-10], 因此需要准确评估气候模式对该区域降水的模拟能力, 这对模式模拟的误差归因以及进一步的模式改进工作具有重要意义。目前我国学者在评估气候模式对降水的模拟效果时, 研究区域大多集中在东亚或者整个中国^[11-14], 而对青藏高原区域降水时空变化模拟效果的评估较少, 仅有部分学者评估耦合模式对青藏高原东南部降水^[15-17]或将 90°E 以东的青藏高原东部降水作为一个整体^[18]的模拟效果, 或在耦合模式

对全球降水的评估中仅少量提及对青藏高原区域降水的模拟效果^[13, 19-21]。结果^[22]表明, 由于模式分辨率的限制以及物理参数化方案的不准确等原因, 目前数值模式对该区域的降水模拟存在很大的偏差。

值得注意的是, 青藏高原东北部和东南部夏季降水大致以唐古拉山脉 (35°N) 为界, 表现为东北部和东南部降水存在反位相的双极型变化关系^[23], 而这种反位相的时空差异也体现在青藏高原区域夏季降水经验正交函数 (empirical orthogonal function, EOF) 分解的前两个主模态, 可以明显反映出青藏高原中东部夏季降水的局地变化特征^[24]。并且, 这种反位相的变化关系十分稳定, 是年际尺度上青藏高原夏季降水的主要模态, 即偶极振荡的跷跷板结构^[25-26]。从物理机制上来看, 在耦合的气候系统模式中, 青藏高原中东部夏季降水的双极型特征与春季北大西洋地区三极型海温具有很好的相关性, 北大西洋地区的海温异常通过激发定常波传播 E-P (Eliassen-Palm) 通量对下游青藏高原地区的夏季降水产生影响^[27]。因此对青藏高原区域降水的评估工作需要综合考虑该区域降水的南北差异, 而青藏高原单一子区域的降水评估工作或全区统一的评估工作无法全面展示模式对该区域降水的综合模拟效果。另外, 目前对青藏高原中东部夏季降水双极型模拟效果的模式评估工作尚属空白。

基于此, 本文综合评估 47 个参与第五次耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5) 的耦合模式对青藏高原中东部夏

季降水双极型的模拟效果,评估工作主要针对 EOF 分解的前两个主模态。首先对用于评估的耦合模式以及观测数据进行简要说明,并对评估方法进行简要介绍,然后给出 47 个 CMIP5 模式的主要评估结果,最后对评估结果进行总结和讨论。

1 数据和方法

1.1 数据

降水观测数据来自于“中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集”,该套数据集包含了国家基本气象站、国家基准气候站、一般气象站在内的主要 2 474 个站点 1951 年 1 月以来地面基本气象要素逐日观测数据。从 2 474 个站点中选取青藏高原区域海拔高度在 1 500 m 以上,且 1961—2005 年记录连续的 130 个国家标准气象站的夏季(6—8 月)站点观测值,剔除明显异常值且将逐日数据转化为逐月数据。由于青藏高原西部的站点观测稀

少,因此本文的评估工作集中在 88°E 以东的青藏高原中东部地区。用于比较的数据来自于提交 CMIP5 历史模拟试验的 47 个耦合模式 1961—2005 年的模拟结果,模式结果来自于 http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/AR5/Reference-Archive.html,评估时选取这些模式所有集合成员平均的结果。47 个模式的基本信息如表 1 所示。由于这 47 个模式的水平分辨率不同,为了便于评估,将 47 个模式的模拟结果统一插值到 1°×1° 分辨率的网格上。并且,由于青藏高原中东部夏季降水的双极型特征与春季北大西洋地区三极型海温具有很好的相关性,模式对北大西洋地区三极型海温的模拟效果越好,则该模式对青藏高原中东部夏季降水双极型特征的模拟效果也越好。因此,本文在表 1 的第四列中给出了 CMIP5 各模式与 HadISST 分析资料^[28]中北大西洋三极型海温的相关系数。

表 1 用于评估的 47 个 CMIP5 模式的基本信息

Table 1 Basic information of 47 CMIP5 models used for evaluation

模式名	国家	水平分辨率(纬向格点数×经向格点数)	北大西洋三极型海温相关系数
BCC-CSM1-1	中国	64×128	0.585
BNU-ESM	中国	64×128	0.561
CanCM4	加拿大	64×128	0.175
CanESM2	加拿大	64×128	0.170
CMCC-CESM	意大利	48×96	0.403
CMCC-CM	意大利	240×480	0.036
CMCC-CMS	意大利	96×192	0.239
CNRM-CM5	法国	128×256	0.387
CNRM-CM5-2	法国	128×256	0.501
ACCESS1-0	澳大利亚	145×192	0.493
ACCESS1-3	澳大利亚	145×192	0.441
CSIRO-Mk3-6-0	澳大利亚	96×192	0.467
FIO-ESM	中国	64×128	0.547
EC-Earth	荷兰/爱尔兰	160×320	0.185
INMCM4	俄罗斯	120×180	0.355
IPSL-CM5A-LR	法国	96×96	0.449
IPSL-CM5A-MR	法国	143×144	0.537
IPSL-CM5B-LR	法国	96×96	0.643
FGOALS-g2	中国	60×128	0.265
MIROC-ESM	日本	64×128	0.648
MIROC-ESM-CHEM	日本	64×128	0.727
MIROC4h	日本	320×640	0.321
MIROC5	日本	128×256	0.064
HadCM3	英国	73×96	0.604
HadGEM2-CC	英国	145×192	0.462

续表

模式名	国家	水平分辨率(纬向格点数×经向格点数)	北大西洋三极型海温相关系数
HadGEM2-ES	英国	145×192	0.269
MPI-ESM-LR	德国	96×192	0.424
MPI-ESM-MR	德国	96×192	0.219
MPI-ESM-P	德国	96×192	0.448
MRI-CGCM3	日本	160×320	0.369
MRI-ESM1	日本	160×320	0.243
GISS-E2-H	美国	90×144	-0.423
GISS-E2-H-CC	美国	90×144	-0.514
GISS-E2-R	美国	90×144	-0.418
GISS-E2-R-CC	美国	90×144	0.315
CCSM4	美国	192×288	0.096
CESM1-BGC	美国	192×288	0.056
CESM1-CAM5	美国	192×288	0.326
CESM1-FASTCHEM	美国	192×288	0.139
CESM1-WACCM	美国	96×144	0.179
NorESM1-M	挪威	96×144	0.223
NorESM1-ME	挪威	96×144	0.059
HadGEM2-AO	韩国	145×192	0.642
GFDL-CM2.1	美国	90×144	/
GFDL-CM3	美国	90×144	0.387
GFDL-ESM2G	美国	90×144	/
GFDL-ESM2M	美国	90×144	0.328

注:“/”表示该模式未提交 CMIP5 历史模拟试验海温的模拟结果。

1.2 方法

由于本文研究的青藏高原东南部和东北部的夏季降水为 EOF 分解的结果,站点观测中 EOF 分解第一模态(EOF1)的方差贡献为 23.49%,第二模态(EOF2)的方差贡献为 14.01%,而第三模态(EOF3)的方差贡献仅为 8.95%且并不表现为双极型分布型态,因此主要关注分解后前两个主模态的空间型态、时间系数以及方差贡献这三个方面,并采用多种指标来评估模式的模拟效果。TAYLOR^[29]在 2001 年提出了一种基于相关系数和标准差进行评估的综合指标 S 评分,其定义形式为:

$$S = \frac{(1 + R)^4}{4(SDR + 1/SDR)^2} \quad (1)$$

式(1)中 R 表示模式和观测的相关系数, SDR 表示模式与观测的标准差的比值^[30]。该综合指标 S 评分的范围在 0~1 之间,并且数值越接近于 1,说明模式的模拟效果越好。

对于 EOF1 和 EOF2 的空间型态而言,

$$S_{sp} = \frac{(1 + R_{sp})^4}{4(SDR_{sp} + 1/SDR_{sp})^2} \quad (2)$$

式(2)中 S_{sp} 表示空间型态的综合指标 S 评分, R_{sp} 表示模式与观测的空间相关系数, SDR_{sp} 表示模式

与观测的空间标准差的比值。 S_{sp} 数值越接近于 1,说明该模式对空间型态的综合模拟效果越好。

同理,对于 EOF1 和 EOF2 的时间系数而言,

$$S_{ts} = \frac{(1 + R_{ts})^4}{4(SDR_{ts} + 1/SDR_{ts})^2} \quad (3)$$

式(3)中 S_{ts} 表示时间系数的综合指标 S 评分, R_{ts} 表示模式与观测的时间相关系数, SDR_{ts} 表示模式与观测的时间标准差的比值。 S_{ts} 数值越接近于 1,说明该模式对时间系数的综合模拟效果越好。而对于 EOF1 和 EOF2 的方差贡献而言,模式的方差贡献 D_{mod} 与观测的方差贡献 D_{obs} 的差值的绝对值越小,表示该模式对方差贡献的模拟效果越好。

在综合指标 S_{sp} 和 S_{ts} 评分的基础上定义了一个新的指标 S_{new} 来进一步定量评估 47 个 CMIP5 模式对空间型态、时间系数和方差贡献的综合模拟能力,其具体定义形式为:

$$S_{new} = \sqrt{(1 - S_{sp})^2 + (1 - S_{ts})^2 + (1 - \frac{D_{mod}}{D_{obs}})^2} \quad (4)$$

在该定义下,式(4)结果越接近于 0,表示该模式对空间型态、时间系数和方差贡献的综合模拟效果越好。

2 结果

2.1 EOF1 降水“北少南多”时空特征的模拟效果

图1给出了观测的1961—2005年青藏高原中东部夏季降水 EOF1 的空间型态以及47个CMIP5模式 EOF1 的综合指标 S_{sp} 评分。观测主要表现为大致以 35°N 为界的东北部和东南部降水反位相的变化特征(图1a)。大多数模式可以分解出这种反位相的空间分布型态,尤其是对青藏高原东南部夏季降水的模拟效果优于东北部。47个CMIP5模式 EOF1 的空间相关系数在 $0.162 \sim 0.850$ 之间,其中空间相关系数最大的是 CMCC-CMS 模式,最低的是 HadGEM2-ES 模式,大约有 70% (32/47) 的 CMIP5 模式 EOF1 的空间相关系数高于 0.3。由综合指标 S_{sp} 评分(图1b)来看,得到的 S_{sp} 评分的排名情况与空间相关系数基本一致,CMCC-CMS 和 MPI-ESM-LR 模式对 EOF1 空间型态的综合模拟效果较

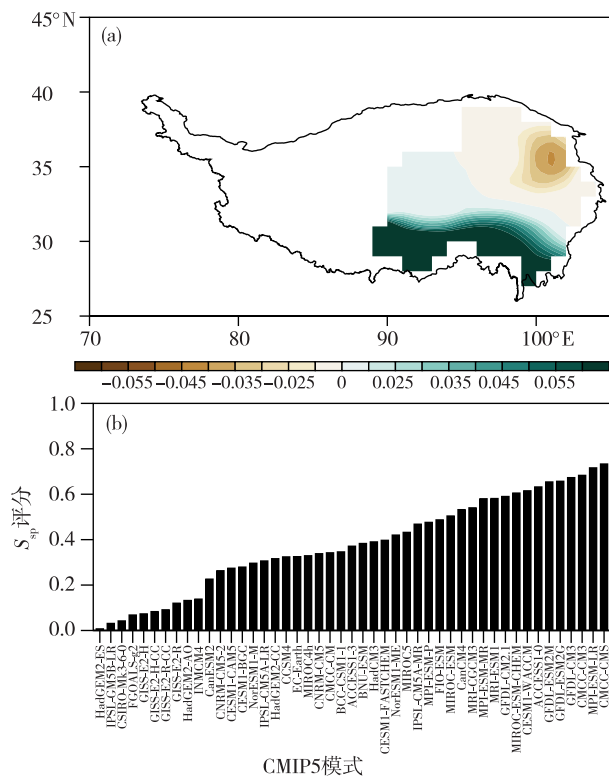


图1 1961—2005年青藏高原中东部站点观测夏季降水的 EOF1 空间型态(a;色阶表示 EOF 分解得到的特征向量值,下同)以及47个CMIP5模式 EOF1 空间型态的综合指标 S_{sp} 评分(b)

Fig.1 Spatial pattern of EOF1 mode of summer precipitation observation at stations over the central and eastern TP from 1961 to 2005 (a; the color scale represents the eigenvector using the EOF technique, the same hereafter) and corresponding S_{sp} with 47 CMIP5 models (b)

好, HadGEM2-ES 和 IPSL-CM5B-LR 模式对 EOF1 空间型态的综合模拟效果较差。

由 EOF1 的时间系数(图2)来看,观测主要表现为 20 世纪 70 年代初期的下降趋势以及 20 世纪 90 年代初期的上升趋势(图 2a)。但是,大多数模式无法表现出这种明显的年代际转折的变化趋势,47 个 CMIP5 模式与观测时间系数的相关系数在 -0.691 (GISS-E2-H-CC) ~ 0.719 (CNRM-CM5) 之间,只有 28% (13/47) 的 CMIP5 模式 EOF1 时间系数的相关系数通过了 95% 的信度检验,接近 64% (30/47) 的 CMIP5 模式时间序列的相关系数为负值。由相应的综合指标 S_{ts} 评分(图 2b)来看,IPSL-CM5B-LR 模式对 EOF1 时间系数的综合模拟效果最好,但是其对 EOF1 空间型态的综合模拟效果却较差,而 GISS-E2-H-CC 和 CMCC-CM 模式对 EOF1 的时间系数几乎没有模拟技巧。

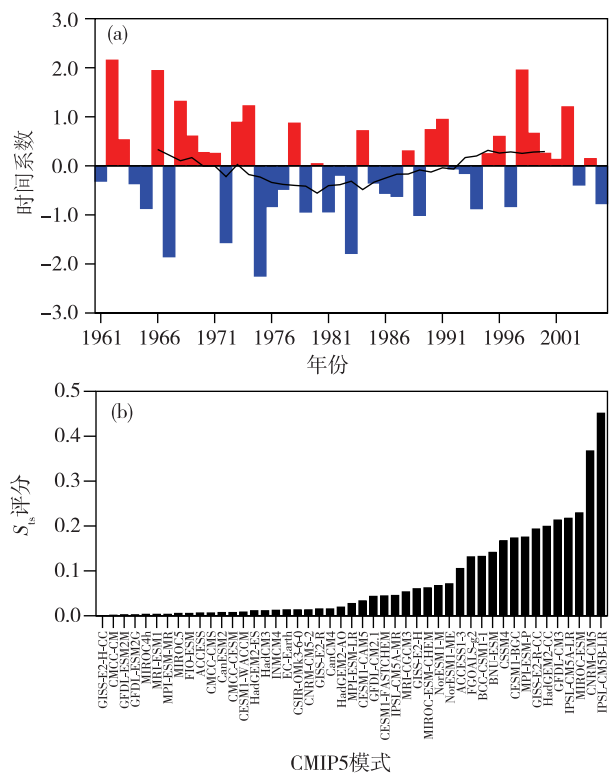


图2 1961—2005年青藏高原中东部站点观测夏季降水的 EOF1 时间系数(a,黑线表示 11 a 滑动平均)以及47个CMIP5模式 EOF1 时间系数的综合指标 S_{ts} 评分(b)

Fig.2 Time coefficients of EOF1 mode of summer precipitation observation at stations over the central and eastern TP from 1961 to 2005 (a, the black line represents 11-year running average) and corresponding S_{ts} with 47 CMIP5 models (b)

为了得到 47 个 CMIP5 模式对 EOF1 的主要模拟偏差,本文采用模式间 EOF 分析方法。模式间 EOF 分析方法与传统 EOF 时空分解方法不同,其主要关注 CMIP5 各模式间具有最大贡献的模拟偏差^[31-32],模式间 EOF 分析的第一主模态和第二主模态的分解结果如图 3 和图 4 所示。第一主模态的方差贡献为 31.979%,从中可以看出,主要表现为在 32°N 以南的东西向模拟偏差(图 3a)。从相应的时间系数中可以看出,NorESM1-M、IPSL-CM5A-MR 和 GISS 系列模式得到的这种东西向模拟偏差最为明显;相反,CanCM4、MIROC-ESM-CHEM、MPI-ESM-P 和 MRI-CGCM3 得到的这种东西向模拟偏差较小(图 3b)。模式间 EOF 分析的第二主模态(方差贡献为 22.473%)表现为 47 个 CMIP5 模式间较为一致的全区模拟偏差(图 4a),并且这种模拟偏差主要集中在 35°N 以南。从相应的时间系数中可以看出,INMCM4、HadGEM2-AO、FGOALS-g2 和

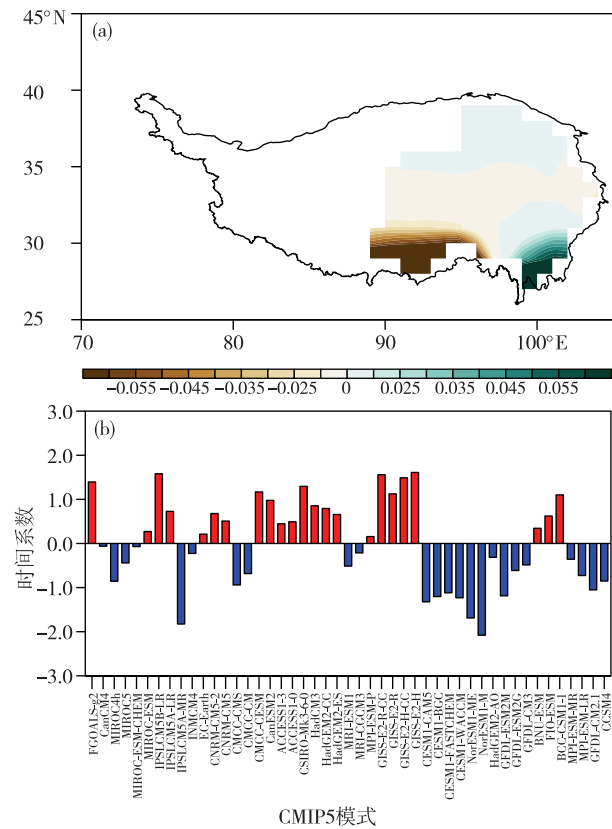


图 3 模式与观测之间 1961—2005 年青藏高原中东部夏季降水 EOF1 空间型态偏差的模式间 EOF 分析第一模态的空间型态(a)及其时间系数(b)

Fig.3 Spatial pattern (a) and corresponding time coefficient (b) of the first inter-model EOF mode of deviations of summer precipitation EOF1 spatial pattern over the central and eastern TP from 1961 to 2005 between models and station observation

NorESM1-M 模式表现为较大的负模拟偏差;MIROC-ESM-CHEM、MIROC-ESM、ACCESS1-3 和 BNU-ESM 模式表现为较大的正模拟偏差(图 4b)。然而,CCSM4、FIO-ESM、BCC-CSM1-1、CESM1-CAM5、CMCC-CMS 和 ACCESS1-0 得到的这种全区一致的模拟偏差较小。

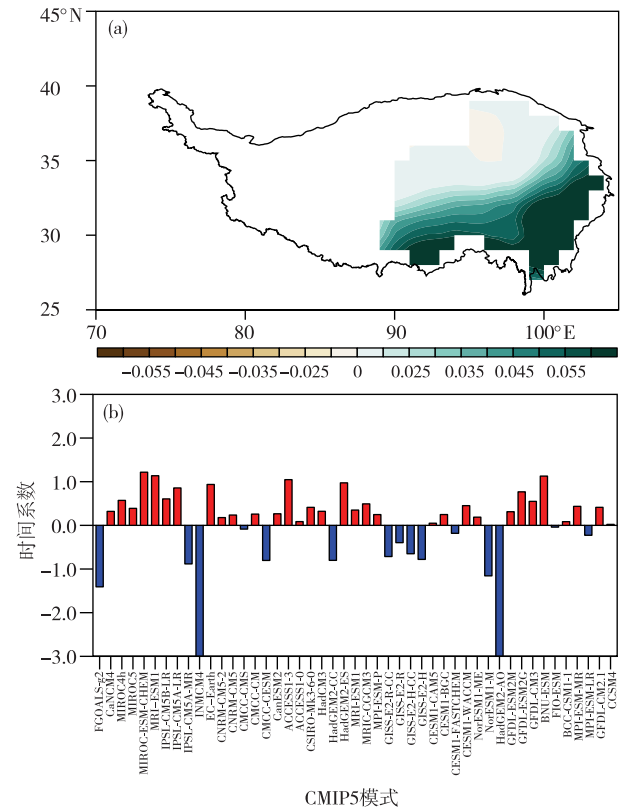


图 4 模式与观测之间 1961—2005 年青藏高原中东部夏季降水 EOF1 空间型态偏差的模式间 EOF 分析第二模态的空间型态(a)及其时间系数(b)

Fig.4 The same as Fig.3, but for the second mode

可以看出,选择不同指标进行模式评估时得到的评估结论不同,因此需要采用一个综合指标来评估模式对空间型态、时间系数以及方差贡献的综合模拟效果。从综合评估指标 S_{new} 中得到的评分排名前 15 和后 15 名的模式如表 2 所示,其中 MIROC-ESM、HadGEM2-CC、ACCESS1-0、MIROC-ESM-CHEM 和 IPSL-CM5A-MR 模式的综合模拟效果较好,但是 GISS 系列模式、CESM1-CAM5 和 MPI-ESM-LR 模式的综合模拟效果较差。并且,从表 1 中可以看出,对青藏高原中东部夏季降水 EOF1 综合模拟效果较好(较差)的模式其春季北大西洋地区三极型海温的模拟相关系数也相对较高(较低),尤其是 GISS 系列模式,其得到的春季北大西洋地区

三极型海温的相关系数基本为负值。

表2 根据模式在模拟1961—2005年青藏高原中东部夏季降水 EOF1 时的综合评估指标 S_{new} 得到的排名前15名和后15名的模式排名情况

Table 2 Ranking of the top (left)/bottom (right) 15 models according to the comprehensive evaluation index S_{new} of the models in simulating summer precipitation EOF1 over the central and eastern TP from 1961 to 2005

排名前15名的模式	排名后15名的模式
MIROC-ESM	GISS-E2-R
HadGEM2-CC	GISS-E2-R-CC
ACCESS1-0	CESM1-CAM5
MIROC-ESM-CHEM	GISS-E2-H
IPSL-CM5A-MR	MPI-ESM-LR
GFDL-CM3	GISS-E2-H-CC
IPSL-CM5A-LR	CanESM2
BNU-ESM	GFDL-ESM2M
ACCESS1-3	CMCC-CM
IPSL-CM5B-LR	CanCM4
MRI-ESM1	EC-Earth
CNRM-CM5	CESM1-WACCM
CMCC-CESM	MIROC5
HadCM3	CESM1-FASTCHEM
MRI-CGCM3	CNRM-CM5-2

注:左列(右列)由上到下表示模式的模拟效果综合排名由高到低(由低到高)。

2.2 EOF2 降水“北多南少”时空特征的模拟效果

图5给出了观测的1961—2005年青藏高原中东部夏季降水 EOF2 的空间型态(图5a)以及47个CMIP5模式对 EOF2 空间型态的综合指标 S_{sp} 评分(图5b)。观测中 EOF2 的空间型态也表现为该区域夏季降水东北部和东南部反位相的变化特征,但是位相与 EOF1 正好相反,表现为大致在 35°N 以南的负位相以及以北的正位相。整体来看,模式对 EOF2 空间型态的整体模拟效果差于 EOF1。例如,MIROC4h、MIROC5、EC-Earth、CNRM-CM5-2 和 GISS 系列模式几乎无法表现出 EOF2 反位相的变化型态;MIROC-ESM、ACCESS1-3、CMCC-CM 和 CESM1-CAM5 模式模拟得到的青藏高原东南部的负位相范围小于观测,而 MPI-ESM-P 却显著高估了东南部负位相的范围和强度;对于东北部,INMCM4、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR 和 HadGEM2-CC 模式明显高估了降水的强度,MIROC-ESM、ACCESS1-3、ACCESS1-0 和 HadGEM2-ES 表现出明显的位置和

强度的模拟偏差(图略)。由空间相关系数来看,空间相关系数在 $-0.569 \sim 0.745$ 之间,其中 IPSL-CM5B-LR 的空间相关系数最大,GFDL-CM3 的空间相关系数最小。由 EOF2 空间型态的综合评估指标 S_{sp} 来看,评估结论与空间相关系数也基本一致,IPSL-CM5B-LR 和 MIROC-ESM-CHEM 模式对 EOF2 空间型态的综合模拟效果较好,GFDL-CM3 和 CMCC-CESM 模式对 EOF2 空间型态的综合模拟效果较差。

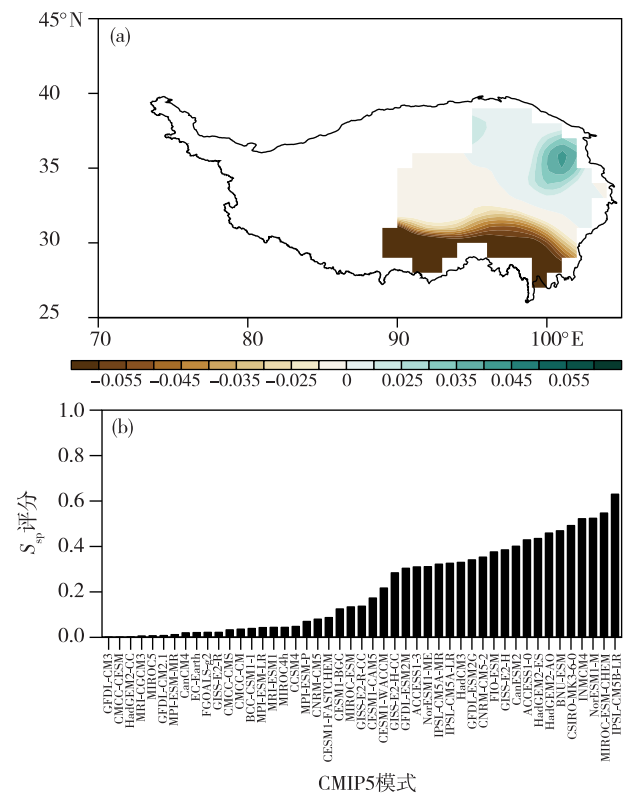


图5 1961—2005年青藏高原中东部站点观测夏季降水的 EOF2 空间型态(a)以及47个CMIP5模式 EOF2 空间型态的综合指标 S_{sp} 评分(b)

Fig.5 The same as Fig.1, but for EOF2 mode

图6给出了 EOF2 相应的时间系数,其变化趋势与 EOF1 的时间系数相反,表现为 20 世纪 70 年代初期的上升趋势和 20 世纪 90 年代初期的下降趋势(图 6a)。但是大多数模式无法很好地抓住这种变化特征,MIROC、IPSL 和 MRI 系列模式甚至无法表现出明显的变率特征,而 INMCM4、CMCC-CESM、ACCESS1-0、CSIRO-Mk3-6-0、HadCM3、HadGEM2-CC、GISS-E2-H-CC、CESM1-WACCM、NorESM1-ME、BNU-ESM、MPI-ESM-MR 和 CCSM4 模式表现出相反的变化趋势。FGOALS-g2 模式可以大致表现出这种变化趋势,但是转折点落后观测大约 5 a。由 47

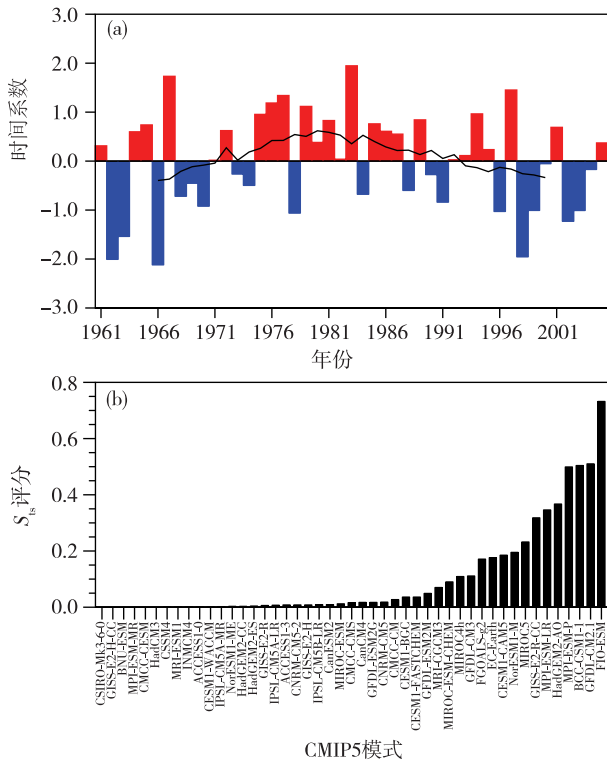


图 6 1961—2005 年青藏高原中东部站点观测夏季降水的 EOF2 时间系数 (a, 黑线表示 11 a 滑动平均) 以及 47 个 CMIP5 模式 EOF2 时间系数的综合指标 S_8 评分 (b)

Fig.6 The same as Fig.2, but for EOF2 mode

个 CMIP5 模式的时间系数与观测的相关系数来看, 其中只有 11 个模式的相关系数通过了 95% 的信度检验, 其中 FIO-ESM 的相关系数最高。由 EOF2 时间系数的综合评估指标 S_8 (图 6b) 来看, 有近乎一半的模式对 EOF2 的时间系数几乎没有模拟能力, 其 S_8 的数值几乎为 0, 但是 FIO-ESM 模式对 EOF2 时间系数的综合模拟效果具有明显优势, 其综合评估指标 S_8 评分很高。

利用模式间 EOF 分析方法, 从其得到的 EOF1 (图 7) 可以看出, 青藏高原中东部夏季降水的第二主模态也主要表现为在 35°N 以南的东西向模拟偏差, 由相应的时间系数可以看出, GISS-E2-R、IPSL-CM5A-LR、ACCESS1-3 和 HadGEM2-ES 模式的该种模拟偏差相对较小, 而 MIROC-ESM-CHEM、CanESM2、CMCC-CESM、CanCM4 和 MIROC5 的该种模拟偏差相对较大。由其得到的 EOF2 (图 8) 可以看出, 第二种主要的模拟偏差位于青藏高原的中东部地区, 并集中在 30°~35°N 之间。从相应的时间系数中可以看出, CanCM4、IPSL-CM5B-LR、CMCC-CMS 和 CESM1-FASTCHEM 的该种模拟偏差相对较

小, 而 MPI-ESM-P、EC-Earth、ACCESS1-3 和 GFDL-CM2.1 的该种模拟偏差相对较大。

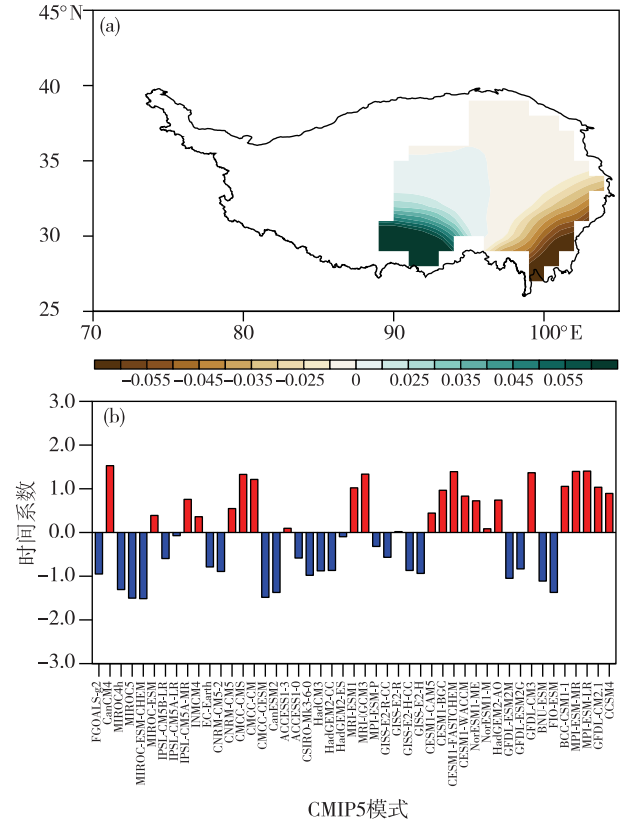


图 7 模式与观测之间 1961—2005 年青藏高原中东部夏季降水 EOF2 空间型态偏差的模式间 EOF 分析第一模态的空间型态 (a) 及其时间系数 (b)

Fig.7 Spatial pattern (a) and corresponding time coefficient (b) of the first inter-model EOF mode of deviations of summer precipitation EOF2 spatial pattern over the central and eastern TP from 1961 to 2005 between models and station observation

从综合评估指标 S_{new} 中得到的 EOF2 评分排名前 15 名和后 15 名的模式如表 3 所示, 从中可以看出, FIO-ESM、HadGEM2-AO 和 MIROC-ESM-CHEM 模式的综合模拟能力相对较好, 而 CMCC-CESM、MPI-ESM-MR 和 GFDL-CM3 的综合模拟能力相对较差。结合 EOF1 的综合评估结果, MIROC-ESM-CHEM 模式对 EOF1 和 EOF2 的综合模拟效果较好, GISS-E2-R 模式对 EOF1 和 EOF2 的综合模拟效果较差。MIROC-ESM-CHEM 模式的分辨率虽然不是最高的, 但是其模拟效果在本文的评估指标中表现最佳, 其原因可能为该模式是跨行业影响模式国际比较计划 (ISI-MIP) 中用于气候变化与极端气候研究的全球模式之一, 其参数符合各种影响模型需求^[33-34], 其对北大西洋地区三极型海温的模拟效果

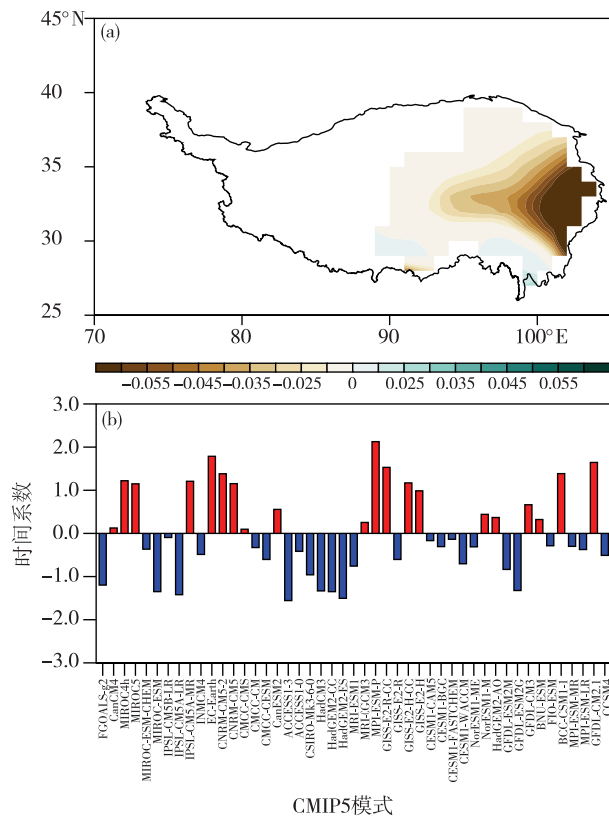


图8 模式与观测之间 1961—2005 年青藏高原中东部夏季降水 EOF2 空间型态偏差的模式间 EOF 分析第二模态的空间型态(a)及其时间系数(b)

Fig.8 The same as Fig.7, but for the second mode

也相对较好,并且 MIROC-ESM-CHEM 模式对肯尼亚^[35]和中国黄河流域^[36]降水的模拟效果也较好。GISS-E2-R 模式的 EOF1 和 EOF2 的综合评估指标 S_{sp} 和 S_{is} 均较低且对 EOF1 方差贡献的模拟结果 (64.40%) 明显偏离观测,且其对北大西洋地区三极型海温的模拟效果也相对较差,导致其在本文的评估指标中综合模拟效果较差。

3 小结

本文评估了参与 CMIP5 历史模拟试验的 47 个模式对青藏高原中东部夏季降水 EOF 分解前两个模态的模拟效果,并定义了一个新的评估指标 S_{new} 来定量评估模式对 EOF 分解前两个模态的空间型态、时间系数以及方差贡献的综合模拟效果。

评估结果表明,由空间型态来看,大多数模式可以表现出大致以 35°N 为界的 EOF1“北少南多”以及 EOF2“北多南少”的空间型态,但是存在降水强度和位相的模拟偏差。由模式间 EOF 分析的结

表3 根据模式在模拟 1961—2005 年青藏高原中东部夏季降水 EOF2 时的综合评估指标 S_{new} 得到的排名前 15 名和后 15 名的模式排名情况

Table 3 Ranking of the top (left)/bottom (right) 15 models according to the comprehensive evaluation index S_{new} of the models in simulating summer precipitation EOF2 over the central and eastern TP from 1961 to 2005

排名前 15 名的模式	排名后 15 名的模式
FIO-ESM	CMCC-CESM
HadGEM2-AO	MPI-ESM-MR
MIROC-ESM-CHEM	GFDL-CM3
BCC-CSM1-1	HadGEM2-CC
MPI-ESM-P	GISS-E2-R
GISS-E2-R-CC	CMCC-CMS
CSIRO-Mk3-6-0	CanCM4
ACCESS1-0	CCSM4
MPI-ESM-LR	MRI-ESM1
CESM1-CAM5	CMCC-CM
INMCM4	CNRM-CM5
BNU-ESM	MRI-CGCM3
CNRM-CM5-2	GISS-E2-H-CC
GFDL-ESM2M	CESM1-FASTCHEM
GFDL-ESM2G	NorESM1-ME

注:左列(右列)由上到下表示模式的模拟效果综合排名由高到低(由低到高)。

果来看,在 35°N 以南的东西向模拟偏差是最主要的模拟偏差,其次表现为全区一致的模拟偏差,但是 EOF1 的全区一致的模拟偏差主要集中在 35°N 以南,EOF2 的主要集中在 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 之间。由时间系数来看,大多数模式对时间系数的模拟效果差于空间型态,不能表现出观测中降水模态在 20 世纪 70 年代和 20 世纪 90 年代的年代际转折。在 47 个模式中,只有 13(11)个模式的 EOF1(EOF2)时间系数的相关系数通过了 95% 的信度检验。从不同方面进行评估得到的评估结论不同,因此本文接着定义了一个同时考虑空间型态、时间系数以及方差贡献的综合指标 S_{new} 来评估模式对 EOF1 和 EOF2 的综合模拟效果。对于 EOF1, MIROC-ESM、HadGEM2-CC、ACCESS1-0、MIROC-ESM-CHEM 和 IPSL-CM5A-MR 模式的综合模拟效果较好,但是 GISS 系列模式、CESM1-CAM5 和 MPI-ESM-LR 模式的综合模拟效果较差。对于 EOF2, FIO-ESM、HadGEM2-AO 和 MIROC-ESM-CHEM 模式的综合模拟能力相对较好,而 CMCC-CESM、MPI-ESM-MR 和 GFDL-CM3 模式的综合模拟能力相对较差。由 EOF1 和 EOF2 的综合评估结果来看,MIROC-ESM-

CHEM 模式对 EOF1 和 EOF2 的综合模拟效果较好, GISS-E2-R 模式对 EOF1 和 EOF2 的综合模拟效果较差。

但是,本文也有三点主要不足。首先,定义的综合评估指标 S_{new} 基于等权重的空间型态、时间系数以及方差贡献,如果要着重考虑其中的某一方面,应加入权重。其次,仅从该模式对春季北大西洋地区三极型海温的模拟效果的角度来分析其对青藏高原中东部双极型降水模拟效果的好坏,未来可以通过例如增加模式分辨率以及耦合资料同化等方式,改进耦合模式对北大西洋地区海温的模拟效果,进而提升该模式对青藏高原中东部夏季降水的模拟效果。最后,由于青藏高原西部观测资料匮乏,本评估工作仅限于青藏高原中东部地区,随着未来气象观测站数量的增加,如果青藏高原西部地区有足够的观测站点,未来应进一步将青藏高原西部地区纳入评估工作之中。

参考文献:

- [1] KUKULIES J, CHEN D L, WANG M H. Temporal and spatial variations of convection, clouds and precipitation over the Tibetan Plateau from recent satellite observations. Part II: precipitation climatology derived from global precipitation measurement mission [J]. *Int J Climatol*, 2020, 40(11): 4858-4875.
- [2] LI M, SHAO Q X. An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data [J]. *J Hydrol*, 2010, 385(1/2/3/4): 51-64.
- [3] WU C, CHEN J M. The use of precipitation intensity in estimating gross primary production in four northern grasslands [J]. *J Arid Environ*, 2012, 82: 11-18.
- [4] 刘珂, 杨明祥, 徐艳红. 青藏高原春季地表感热加热特征及其对黄河源区汛期降水的影响 [J]. *水文*, 2020, 40(2): 72-79.
- [5] MANABE S, BROCCOLI A J. Mountains and arid climates of middle latitudes [J]. *Science*, 1990, 247(4939): 192-195.
- [6] KUTZBACH J E, PRELL W L, RUDDIMAN W F. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau [J]. *J Geol*, 1993, 101(2): 177-190.
- [7] LU H L, SHAO Q Q, LIU J Y, et al. Cluster analysis on summer precipitation field over Qinghai - Tibet Plateau from 1961 to 2004 [J]. *J Geogr Sci*, 2008, 18(3): 295-307.
- [8] JOHN V O, SODEN B J. Temperature and humidity biases in global climate models and their impact on climate feedbacks [J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(18): L18704.
- [9] FU Y H, GAO X J, ZHU Y M, et al. Climate change projection over the Tibetan Plateau based on a set of RCM simulations [J]. *Adv Climate Change Res*, 2021, 12(3): 313-321.
- [10] 王超. GFDL 模式不同类型试验模拟海洋中 CFC-11 分布结果的评估 [J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(2): 40-51.
- [11] 刘敏, 江志红. 13 个 IPCC AR4 模式对中国区域近 40 a 气候模拟能力的评估 [J]. *南京气象学院学报*, 2009, 32(2): 256-268.
- [12] OU T H, CHEN D L, LINDERHOLM H W, et al. Evaluation of global climate models in simulating extreme precipitation in China [J]. *Tellus A*, 2013, 65: 19799.
- [13] CHEN L, FRAUENFELD O W. A comprehensive evaluation of precipitation simulations over China based on CMIP5 multimodel ensemble projections [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2014, 119(10): 5767-5786.
- [14] KAN M Y, HUANG A N, ZHAO Y, et al. Evaluation of the summer precipitation over China simulated by BCC_CSM model with different horizontal resolutions during the recent half century [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2015, 120(10): 4657-4670.
- [15] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测 [J]. *地球物理学报*, 2004, 47(4): 590-596.
- [16] 许崇海, 沈新勇, 徐影. 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*, 2007, 3(5): 287-292.
- [17] FENG L, ZHOU, T J, WU B, et al. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model [J]. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28(2): 464-476.
- [18] SU F G, DUAN X L, CHEN D L, et al. Evaluation of the global climate models in the CMIP5 over the Tibetan Plateau [J]. *J Climate*, 2013, 26(10): 3187-3208.
- [19] WANG X C, WU G X. The analysis of the relationship between the spatial modes of summer precipitation anomalies over China and the general circulation [J]. *Chinese J Atmos Sci*, 1997, 21(2): 133-142.
- [20] WENG H Y, LAU K M, XUE Y K. Multi-scale summer rainfall variability over China and its long-term link to global sea surface temperature variability [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1999, 77(4): 845-857.
- [21] NITTA T, HU Z Z. Summer climate variability in China and its association with 500 hPa height and tropical convection [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1996, 74(4): 425-445.

- [22] CHEN X Y, YOU Q L, SIELMANN F, et al. Climate change scenarios for Tibetan Plateau summer precipitation based on canonical correlation analysis [J]. *Int J Climatol*, 2017, 37(3): 1310-1321.
- [23] JIANG X W, TING M F. A dipole pattern of summertime rainfall across the Indian subcontinent and the Tibetan Plateau [J]. *J Climate*, 2017, 30(23): 9607-9620.
- [24] 刘焕才, 李曼, 石培宏, 等. NAO 对青藏高原中东部夏季降水双极振荡模态影响的时间尺度厘定 [J]. *高原气象*, 2015, 34(3): 633-641.
- [25] LIU X D, YIN Z Y. Spatial and temporal variation of summer precipitation over the eastern Tibetan Plateau and the North Atlantic oscillation [J]. *J Climate*, 2001, 14(13): 2896-2909.
- [26] LIU H C, DUAN K Q, LI M, et al. Impact of the North Atlantic Oscillation on the Dipole Oscillation of summer precipitation over the central and eastern Tibetan Plateau [J]. *Int J Climatol*, 2015, 35(15): 4539-4546.
- [27] LI F F, WANG B, HE Y J, et al. Important role of North Atlantic air-sea coupling in the interannual predictability of summer precipitation over the eastern Tibetan Plateau [J]. *Climate Dyn*, 2021, 56(5/6): 1433-1448.
- [28] RAYNER N A, PARKER D E, HORTON E B, et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D14): 4407.
- [29] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2001, 106(D7): 7183-7192.
- [30] HIROTA N, TAKAYABU Y N. Reproducibility of precipitation distribution over the tropical oceans in CMIP5 multi-climate models compared to CMIP3 [J]. *Climate Dyn*, 2013, 41(11/12): 2909-2920.
- [31] LI G, XIE S P. Origins of tropical-wide SST biases in CMIP multi-model ensembles [J]. *Geophys Res Lett*, 2012, 39(22): L22703.
- [32] LI G, XIE S P. Tropical biases in CMIP5 multimodel ensemble; the excessive equatorial Pacific cold tongue and double ITCZ problems [J]. *J Climate*, 2014, 27(4): 1765-1780.
- [33] 查芊郁, 高超, 杨茹, 等. 全球升温 1.5 °C 和 2.0 °C 情景下淮河上游干流径流量研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(6): 583-592.
- [34] 王艳君, 刘俸霞, 翟建青, 等. 全球升温 1.5 °C 与 2.0 °C 目标下长江流域极端降水的变化特征 [J]. *气象科学*, 2019, 39(4): 540-547.
- [35] MUMO L, YU J H. Gauging the performance of CMIP5 historical simulation in reproducing observed gauge rainfall over Kenya [J]. *Atmos Res*, 2020, 236: 104808.
- [36] 周文翀, 韩振宇. CMIP5 全球气候模式对中国黄河流域气候模拟能力的评估 [J]. *气象与环境学报*, 2018, 34(6): 42-55.