

引用格式:李晓菲,徐长春,李路,等. CMIP5 模式对西北干旱区典型流域气温模拟能力评估:以开都-孔雀河为例[J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1141-1153. [Li X F, Xu C C, Li L, et al. Evaluation of air temperature of the typical river basin in desert area of Northwest China by the CMIP5 models: A case of the Kaidu-Kongqi River Basin[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1141-1153.] DOI:10.18402/resci.2019.06.13

CMIP5 模式对西北干旱区典型流域气温模拟能力评估

——以开都-孔雀河为例

李晓菲^{1,2}, 徐长春^{1,2}, 李路^{1,2}, 罗映雪^{1,2}, 杨秋萍^{1,2}, 杨媛媛^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要:西北干旱区水资源问题突出,全球变暖将进一步加剧其水资源短缺,研究未来气候变化对流域水资源合理分配和使用具有重要意义。本文利用 CRU(Climatic Research Unit)数据和 DCHP(Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate and Hydrology Projections)提供的 32 个经 BCSD 降尺度的 CMIP5(全球耦合模式比较计划第五阶段)模式气温数据,采用线性倾向估计、滑动平均、M-K(Mann-Kendall)检验及滑动 T(MMT)等检验法,以西北干旱区典型流域开都-孔雀河流域为例,通过对 1950—2005 年的年平均气温、年平均最高气温与年平均最低气温 3 个指标的变化趋势及突变年份进行检测,评估各模式及模式集合平均对气温变化的模拟能力。研究结果表明:①12 个模式能够准确模拟出 1950—2005 年流域内各气温指标的显著增加趋势,8 个模式能够模拟出部分气温指标的增温趋势,但均低估了增温速率,集合平均也存在同样问题;②除 FIO-ESM 与 MPI-ESM-MR 能够准确模拟出气温突变时间外,绝大多数模式不能够准确模拟出。基于优选模式的集合平均 PM-PLS 和 PM-EE 对突变的模拟能力总体上优于单个模式,其中 PM-PLS 模拟能力更优;③对 PM-PLS 模式集合平均进一步评价,发现其能较好地再现流域气温线性趋势的时空变化总体特征,但仍存在增温速率低估的问题。采用气候模式进行未来气候预估仍需加强模式优选及多模式集合平均方法的深入研究。

关键词:气温;泰勒图;多模式集合平均;Mann-Kendall;突变检验;开都-孔雀河流域

DOI :10.18402/resci.2019.06.13

1 引言

全球气候模式(GCMs)是进行气候模拟与未来气候变化预测的重要工具^[1],近年来取得了迅速发展^[2]。自 2008 年 9 月,世界气候研究计划(WCRP)启动了耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)以来,CMIP5 模式数据被广泛应用于气温、降水等气候要素的模拟预测研究^[3-5]。如王铭昊等^[6]利用 6 个 CMIP5 模式,研究了各模式对全球降水不同时间尺度气候变率的模拟能力;张飞跃等^[7]利用 21 个

CMIP5 气候模式集合结果对南亚大河流域气温、降水进行了模拟能力评估,进而预估了流域未来气候变化情况。

随着气候模式的应用与发展,多模式集合平均(Multi-Model Ensemble Mean, MME)法被广泛地运用于气候模拟与预估研究,研究表明此方法能降低未来气候预报中所存在的不确定性^[8,9],且模拟效果优于单个模式^[10]。为更加准确地模拟出不同尺度上的气候变化情况,多模式统计降尺度集合(SDMME)方

收稿日期:2018-11-16 修订日期:2018-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41561023);2017 新疆研究生科研创新项目(XJGRI2017009)。

作者简介:李晓菲,女,新疆博乐人,硕士生,主要从事干旱区气候变化研究。E-mail: lxf_0306@163.com

通讯作者:徐长春,女,新疆阿勒泰人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事干旱区水资源、环境与气候变化研究。E-mail: xcc0110@163.com

法引起了越来越多的学者关注。Krishnamurti等^[11]首次提出了统计降尺度与多模式超级集合相结合的方法,并显著提高了印度季风区的降水预报准确率。近期,中国学者陈鹏翔等^[12]基于变形典型相关分析的统计降尺度集合方法预估了中亚春季降水情况,得到了较好模拟效果。周莉等^[13]利用19个降尺度高分辨率的CMIP5模式数据,集合预报了长江中下游极端降水情况,结果表明,多模式统计降尺度集合数据能很好地模拟出该地区极端降水的空间结构。刘长征等^[14]发现统计降尺度与集合研究对中国气温有较好的模拟效果。杨肖丽等^[15]利用等距离累积分布函数的统计降尺度法对6个CMIP5模式进行降尺度处理并集合模拟了黄河流域气温和降水,发现其模拟结果的平均绝对误差明显小于单个模式。这些研究结果均表明,多模式统计降尺度集合的模拟效果优于单个模式,但多模式如何进行集合平均仍是需要深入研究和探讨的问题。

开都-孔雀河流域位于中国西北干旱区,地形自西北向东南倾斜(图1)。该流域深居欧亚大陆腹地,远离海洋,靠近塔克拉玛干大沙漠,属于典型的大陆性温带干旱气候,是全球气候变化响应的敏感地区^[16]。开都-孔雀河流域位于丝绸之路经济带核心区,其发展对“一带一路”建设具有重要作用。过去20年,流域水资源短缺问题日益突出,已严重制约了当地社会经济以及生态环境的健康发展。“有水即为绿洲,无水皆为荒漠”,可见水资源对于干旱区的重大意义。此外,气候变暖将进一步加速流域水循环,改变水资源时空分配,导致干旱、高温等极

端气候事件频发、多发以及重发,给当地居民生命财产安全造成重大威胁并严重制约社会经济发展。因此,正确认识开都-孔雀河流域未来气候变化对于流域的经济社会发展和生态文明建设以及水资源预测与合理分配均具有重要意义。

模式对历史气候的模拟能力是判断其是否能够准确预估未来气候的重要标准。已有研究^[17,18]表明,不同模式在不同地区的模拟能力表现出差异性,同时,也因气候要素的不同而异。因此,评估所利用气候模式对过去气候的模拟能力是重要且必要的。对气候模式的评估需要从多个角度综合开展。以往研究多是从气候年、季时间尺度的趋势及变率开展,指标较为单一,评估结果可靠性不足。气候突变现象是区域气候变化的重要特征,对数据序列同时进行突变检测能进一步提高模式评估结果的可靠性。

本文以开都-孔雀河流域为研究区,基于1950—2005年32个降尺度的CMIP5模式数据集及CRU数据,首先进行集合平均前的模式优选,进而从泰勒图、变化趋势及突变等几个方面,分别评价模式及模式集合平均结果模拟流域年平均气温、年平均最高气温及年平均最低气温的能力,并在评估结果的基础上选出最优模式,进一步从时空变化角度评估其模拟能力。通过研究,确定适宜于研究区历史气候变化模拟的最佳模式,以期为流域未来气候预估奠定基础。

2 数据来源、处理与研究方法

2.1 数据来源与处理

(1)观测数据。东英吉利大学气候研究所(Climatic Research Unit, CRU)仅使用简单的数学方法对地面观测站和其他辅助性数据源进行整合和插值,重建了一套覆盖完整、高分辨率且无缺测的月平均地表气候要素数据集。本文采用2017年9月其所发布的数据集(TS v4.01,空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$)作为观测资料用于验证模式的模拟效果。为便于对比分析,选取的时段与模式资料时段保持一致。目前,较多数据集都存在对中国东部台站较密集区模拟效果好,而对西部台站稀疏区的模拟效果差的情况^[19],为验证CRU数据集在中国西北地区的适用性,本文将其与中国西北干旱区71个观测站点的月平均气温、月平均最高气温与月平均最低气温作了相关性分析。由图2可知,CRU数据与站点气温整体上具有很高的相关性,94%站点的相关性都达到

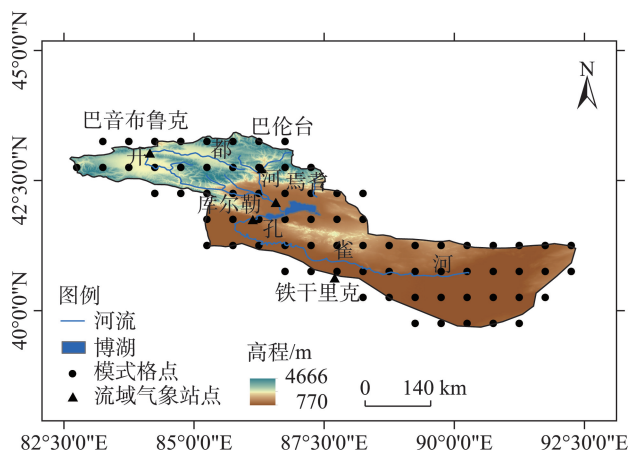


图1 开都-孔雀河流域高程及模式格点分布

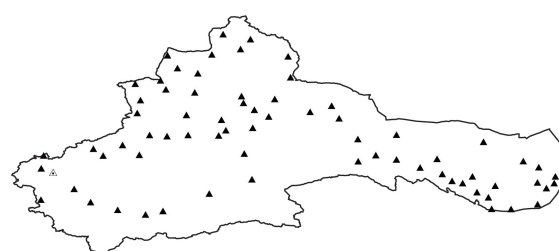
Figure 1 Elevation of the Kaidu-Kongqi River Basin and the general circulation model (GCM) grids

2019年6月

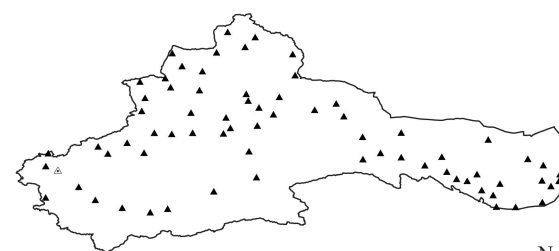
a. 月平均气温站点观测与CRU的相关性



b. 月平均最高气温站点观测与CRU的相关性



c. 月平均最低气温站点观测与CRU的相关性



图例
△ 0.000~0.500 △ 0.500~0.900 ▲ 0.900~1.000

0 400 km N

图2 西北干旱区各站点观测气温与CRU TS v4.01数据集的相关性

Figure 2 Correlation of air temperature between CRU TS v4.01 data and observed station data in the arid area of Northwest China

0.900以上,仅有少数站点相关性较低,说明该数据集可用于西北干旱区的研究的。表1列出了1961—2005年CRU月平均气温、月平均最高气温与月平均最低气温数据与同期流域5个气象站点(巴音布鲁克、巴伦台、焉耆、库尔勒、铁干里克)之间的相关系数,可得CRU气温资料与5个站点资料具有很强的相关性(均通过了99%的显著性检验),相关系数均

在0.950以上,最高可达0.998。通过以上分析可得,CRU资料在开都-孔雀河流域具有较高的代表性,可用于该流域气温变化分析。

(2)模式数据。本文采用的CMIP5模式资料为经过偏差订正-空间分解技术(Bias-Correction and Spatial Disaggregation, BCSD)统计降尺度后得到的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的全球逐月气温数据。通过BCSD法,能有效去除全球气候模式在区域尺度上的模拟偏差。考虑数据的完整性及其运行试验结果的一致性,采用其中32个模式(表2)“r1i1p1”运行结果下的月平均气温、月平均最高气温与月平均最低气温历史模拟数据(1950—2005年)。该数据可通过“Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate and Hydrology Projections, DCHP”网页获取。本文所需年平均气温、年平均最高气温与年平均最低气温基于月序列结果求得。

2.2 研究方法

本文主要基于泰勒图、气候变化趋势及突变结果进行模拟效果评估。气候变化趋势采用线性倾向估计^[20],突变结果采用Mann-Kendall(M-K)检验^[20]及滑动T(MMT)检验^[21]法。在M-K突变检验中,给定0.05的显著性水平,即 $U_{0.05}=\pm 1.96$,当UF与UB在临界线内出现交点,那么此交点对应的年份便是突变开始的年份。为了验证M-K法得出的突变年份可信度,本文采用子序列 $n_1=n_2=5$ 、 $n_1=n_2=10$ 和 $n_1=n_2=15$ 的滑动T(MMT)检验法加以分析。

(1)多模式集合平均。包含等权与加权集合平均,相比于等权集合平均,加权集合平均更具合理性,且模拟效果也更好^[22,23]。本文采用偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLS)方法来确定各模式的权重大小,并将等权集合平均(EE)和偏最小二乘平均(PLS)结果与各模式进行对比,评估其模拟能力。

(2)泰勒图。泰勒图能够将两个场的相关系

表1 CRU气温数据与同期开都-孔雀河流域5个站点观测数据的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of air temperature between CRU data and observed station data in the Kaidu-Kongqi River Basin

站点	巴音布鲁克	巴伦台	焉耆	库尔勒	铁干里克
月平均气温	0.983**	0.983**	0.995**	0.997**	0.998**
月平均最高气温	0.973**	0.974**	0.986**	0.997**	0.993**
月平均最低气温	0.974**	0.950**	0.979**	0.996**	0.997**

注:**,*分别表示通过了置信度为99%,95%的显著性检验。

数、均方根误差以及标准差放在一张极坐标图中,可直观而全面地评估多个模式的模拟能力及差异^[24]。当模式点与观测点之间的距离越近时,代表该模式的模拟能力越强。

3 结果与分析

3.1 较优模式的选择

由于CMIP5模式对不同的气候要素表现出不同的模拟性能,且性能较差的模式会影响到集合平

表2 基于BCSD的降尺度模式及其模拟分析结果

Table 2 Climate model information and simulation analysis results based on bias-correction and spatial disaggregation (BCSD) downscaling ($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)

序号	模式名称	研究机构简称 及所属国家	年平均气温			年平均最高气温			年平均最低气温		
			线性 趋势	相关 系数	是否较 优模式	线性 趋势	相关 系数	是否较 优模式	线性 趋势	相关 系数	是否较 优模式
1	ACCESS1-0	CSIRO-BOM(澳大利亚)	0.26**	0.56**	✓	0.29**	0.51**	✓	0.24**	0.54**	✓
2	BCC-CSM1-1	BCC(中国)	0.22**	0.49**	✓	0.20**	0.39**	✓	0.25**	0.54**	✓
3	BCC-CSM1-1-M	BCC(中国)	0.24**	0.57**	✓	0.25**	0.52**	✓	0.25**	0.57**	✓
4	BNU-ESM	GCESS(中国)	0.20**	0.38**	✓	0.21**	0.30*	\	0.23**	0.45**	✓
5	CanESM2	CCCma(加拿大)	0.25**	0.62**	✓	0.21**	0.49**	✓	0.28**	0.66**	✓
6	CCSM4	NCAR(美国)	0.18**	0.35**	✓	0.17**	0.25	\	0.19**	0.40**	✓
7	CESM1-BGC	NSF-DOE-NCAR(美国)	0.24**	0.52**	✓	0.24**	0.39**	✓	0.26**	0.58**	✓
8	CESM1-CAM5	NSF-DOE-NCAR(美国)	0.13**	0.30*	\	0.13*	0.27*	\	0.14**	0.32*	\
9	CMCC-CM	CMCC(意大利)	0.19**	0.30*	\	0.18**	0.22	\	0.18**	0.32*	\
10	CNRM-CM5	CNRM-CERFACS(法国)	0.10*	0.39**	\	0.07	0.36**	\	0.14**	0.39**	✓
11	CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE(澳大利亚)	0.05	0.30*	\	0.03	0.24	\	0.06	0.33*	\
12	FGOALS-g2	LASG-CESS(中国)	0.24**	0.43**	✓	0.23**	0.27*	\	0.25**	0.53**	✓
13	FIO-ESM	FIO(中国)	0.20**	0.38**	✓	0.21**	0.34*	\	0.20**	0.39**	✓
14	GFDL-CM3	NOAA GFDL(美国)	0.08	0.23	\	0.08	0.19	\	0.08	0.27*	\
15	GFDL-ESM2G	NOAA GFDL(美国)	0.21**	0.45**	✓	0.21**	0.36**	✓	0.22**	0.49**	✓
16	GFDL-ESM2M	NOAA GFDL(美国)	0.19**	0.59**	✓	0.18**	0.56**	✓	0.21**	0.59**	✓
17	GISS-E2-R	NOAA GISS(美国)	0.12*	0.28*	\	0.07	0.18	\	0.17**	0.34**	\
18	GISS-E2-R-CC	NOAA GISS(美国)	0.20**	0.52**	✓	0.16**	0.39**	✓	0.24**	0.61**	✓
19	HadCM3	MOHC(英国)	0.12*	0.32*	\	0.11	0.22	\	0.13*	0.38**	\
20	HadGEM2-AO	NIMR/KMA(韩国/英国)	0.22**	0.51**	✓	0.19**	0.41**	✓	0.26**	0.57**	✓
21	INMCM4	INM(俄罗斯)	0.12**	0.22	\	0.04	0.03	\	0.16**	0.28*	\
22	IPSL-CM5A-LR	IPSL(法国)	0.23**	0.45**	✓	0.21**	0.42**	✓	0.14**	0.28*	\
23	IPSL-CM5A-MR	IPSL(法国)	0.26**	0.42**	✓	0.18**	0.34**	✓	0.19**	0.37**	\
24	IPSL-CM5B-LR	IPSL(法国)	0.11*	0.26	\	0.13**	0.29*	\	0.06	0.12	\
25	MIROC4h	MIROC(日本)	0.24**	0.49**	✓	0.23**	0.38**	✓	0.25**	0.56**	✓
26	MIROC5	MIROC(日本)	0.09	0.32*	\	0.08	0.20	\	0.11	0.40**	\
27	MIROC-ESM	MIROC(日本)	0.10*	0.37**	\	0.10	0.28*	\	0.11*	0.43**	\
28	MIROC-ESM-CHEM	MIROC(日本)	0.15*	0.18	\	0.13*	0.04	\	0.18**	0.31*	\
29	MPI-ESM-LR	MPI-M(德国)	0.23**	0.35**	✓	0.22**	0.30*	\	0.24**	0.38**	✓
30	MPI-ESM-MR	MPI-M(德国)	0.24**	0.48**	✓	0.22**	0.37**	✓	0.26**	0.54**	✓
31	MRI-CGCM3	MRI(日本)	0.10	0.18	\	0.09	0.10	\	0.11*	0.23	\
32	NorESM1-M	NCC(挪威)	0.23**	0.55**	✓	0.24**	0.45**	✓	0.24**	0.57**	✓
33	EE		0.18**	0.73**		0.17**	0.62**		0.19**	0.80**	
34	PM-EE		0.23**	0.77**		0.21**	0.68**		0.23**	0.83**	
35	PLS		0.21**	0.80**		0.19**	0.69**		0.22**	0.85**	
36	PM-PLS		0.23**	0.81**		0.22**	0.69**		0.25**	0.86**	
	CRU		0.34**			0.27**			0.40**		

注:**,*分别表示通过了置信度为99%,95%的显著性检验;“✓”为选中较优模式,“\”为未选中模式。

2019年6月

均结果^[25,26],因此,本文根据模式的模拟能力筛选出较优模式,并在此基础上进行集合平均。文中将所有模式参与的集合平均根据权重确定方法分别称为EE与PLS,将较优模式参与的集合平均分别称为PM-EE和PM-PLS。本文筛选标准设置为:①年平均气候要素的模拟变化趋势在观测趋势大小的正负50%之内,并且变化趋势通过99%的显著性检验;②年平均气候要素的模拟与观测之间的相关系数通过99%的显著性检验。根据以上标准,从年平均气温、年平均最高气温与年平均最低气温分别选出19、14和18个较优模式(表2),并在此基础上进行EE与PLS集合平均研究。

3.2 模式模拟效果评估

3.2.1 基于泰勒图的模拟能力评估

图3给出了32个模式及集合平均模拟的开都-孔雀河流域年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温的泰勒图。图中的数字分别表示不同的模式及集合平均结果,红色五角星代表观测结果。泰勒图结果显示,降尺度后32个单个模式中大多数模式对气温时间序列的模拟能力较为接近,对于年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温,不同模式又表现出一定的差异性。从单个模式来看,年平均气温(图3a)与年平均最低气温(图3c)各模式模拟效果十分接近,大部分模式与观测值的相关系数在0.2~0.6之间,均方根误差在0.6~1.0之间,标准差集中于0.6~0.8之间,与观测值的标准差较为接近,说明大部分模式能够较好地模拟出平均与最低气温的变率。而年平均最高气温(图3b)的模拟结果与上述方法的不同在于相关系数集中区域,结果略低(0.2~0.5),说明一些模式对最高气温的模拟能力偏

弱。综合3个指标,CanESM2、GFDL-ESM2M、NorESM1-M等3个模式对年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温均显示出较好的模拟能力。对于4个多模式集合平均(EE、PLS、PM-EE与PM-PLS)而言,气温模拟结果更接近于观测值,相关系数介于0.62~0.86之间,均方根误差在0.43~0.53之间,而标准差与观测值相差较大,位于0.35~0.47范围内。

总体而言,多模式集合平均表现出更好的模拟性能。PM-EE与PM-PLS集合平均的模拟效果要分别优于EE和PLS集合平均,说明进行较优模式的筛选有助于集合平均模拟性能的提升,这与以往的一些研究结论一致^[27-29]。此外,结果显示择优前后,通过PLS法进行的集合平均结果也均优于EE。由此可以看出,对各模式赋予不同的权重同样有助于模拟效果的增强。

3.2.2 气温变化趋势模拟能力

采用线性倾向估计法分析了开都-孔雀河流域各个模式及1950—2005年观测资料中平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温的时间序列变化趋势,并用Mann-Kendall(M-K)非参数统计方法进行趋势的显著性检验(表3)。由表3可知,近56年来,流域年平均气温、年平均最高气温和年平均最低气温均呈显著增加趋势,且各模式及集合平均结果均模拟了气温的变化趋势,但模拟的变化幅度普遍偏小。从年平均气温来看,各模拟结果的增长速率(0.05~0.26℃/10a)均低于观测结果。其中,CSIRO-Mk3-6-0、GFDL-CM3、MIROC5与MRI-CGCM3等4个模式的模拟趋势明显低于观测值(0.34℃/10a),且均未通过显著性检验。模拟结果最为接近的模式

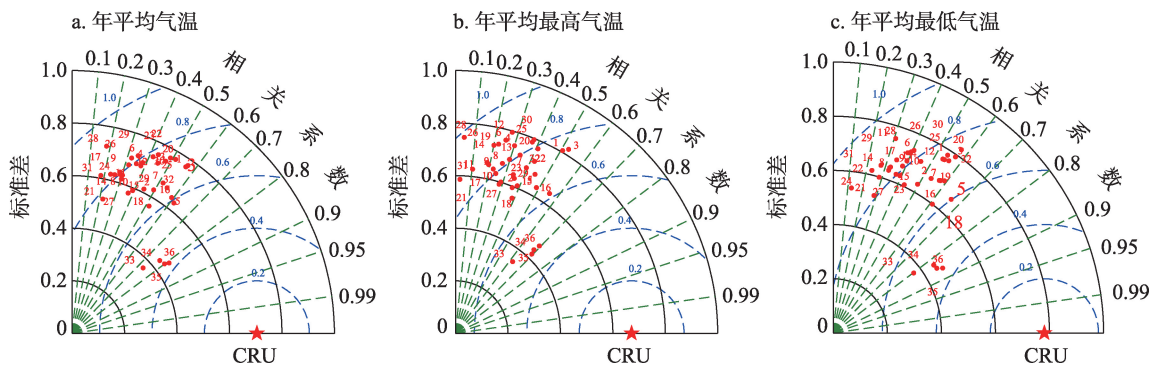


图3 1950—2005年开都-孔雀河流域模拟气温与观测气温的泰勒图,模式及集合序号参照表2

Figure 3 Taylor diagrams for temporal variability of regionally air temperature of the Kaidu-Kongqi River Basin between the observations and simulation results, 1950-2005. Each number represents a model ID listed in Table 2

为 ACCESS1-0 与 IPSL-CM5A-MR, 其增长速率 ($0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 较观测值偏低 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。针对年平均最高气温, 其变化趋势与年平均气温相同, 然而增长速率较之偏低 $0.07^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。除了 ACCESS1-0 模拟

的增长速率 ($0.29^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 略高于观测结果 ($0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 外, 其他模式及集合结果模拟的增长速率都相对低, 其中 CSIRO-Mk3-6-0 的模拟结果 ($0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 仅为观测值的 1/9。相较于观测的年平均气温、年平

表3 CMIP5 模式模拟及观测的 1950—2005 年开都-孔雀河流域气温突变年份

Table 3 Abrupt change years of air temperature in the Kaidu-Kongqi River Basin from 1950-2005 by the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) models and Climate Research Unit (CRU) data

序号	模式名称	年平均气温	年平均最高气温	年平均最低气温
1	ACCESS1-0	1997	1997	1997
2	BCC-CSM1-1	1984	1982	1984
3	BCC-CSM1-1-M	1985	1975	1977
4	BNU-ESM	1984	1984	1983
5	CanESM2	1996	1997	1995
6	CCSM4	1995	1995	1997
7	CESM1-BGC	1980	1980	1980
8	CESM1-CAM5	1994	1985	1993
9	CMCC-CM	1996	2000	1986
10	CNRM-CM5	1997	1998	1996
11	CSIRO-Mk3-6-0	1956,2003	1955,2002	1951,1956,2003
12	FGOALS-g2	1993	1993	1990
13	FIO-ESM	1986	1986	1985
14	GFDL-CM3	2000	1999	2001
15	GFDL-ESM2G	1993	1994	1996
16	GFDL-ESM2M	1995	1995	1994
17	GISS-E2-R	1996	1997,2001,2004	1993
18	GISS-E2-R-CC	1997	1997	1982
19	HadCM3	1954,1958,2003	1952,1959,2004	2004
20	HadGEM2-AO	1995	1993	1996
21	INMCM4	1984	1997	1980
22	IPSL-CM5A-LR	1992	1993	1993
23	IPSL-CM5A-MR	1982	1982	1979
24	IPSL-CM5B-LR	1983	1971	1993
25	MIROC4h	1993	1986	1993
26	MIROC5	2004	1952,1954,2004	2004
27	MIROC-ESM	2003	1998	1999,2000,2004
28	MIROC-ESM-CHEM	1984	1991,1998	1987
29	MPI-ESM-LR	1978	1981	1975
30	MPI-ESM-MR	1987	1987	1985
31	MRI-CGCM3	1975	1977	1975
32	NorESM1-M	1992	1992	1992
33	EE	1994	1995	1994
34	PM-EE	1986	1987	1988
35	PLS	1994	1995	1993
36	PM-PLS	1987	1990	1987
	CRU	1987	1987	1987

注:加粗数据表示经过滑动 T 检验法验证通过的年份。

2019年6月

均最高气温的增长速率,年平均最低气温相对较高,为 $0.40^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。32个模式中,大多数模拟结果通过了95%的显著性检验,并且其中的多数通过了99%的显著性检验。相比之下,年平均最高气温的模拟中,未通过显著性检验的模式明显多于年平均气温与年平均最低气温。这说明,有一些模式虽不能很好地模拟年平均最高气温的增长速率,却对年平均气温与年平均最低气温表现出较好的模拟能力,其中最突出的为INMCM4模式。此外,也存在对3个气温要素趋势变化模拟表现均不好的模式,分别为CSIRO-Mk3-6-0、GFDL-CM3和MIROC5。

综合气温模拟结果来看,虽然大部分模式能模拟出气温的变化趋势,但对于增长速率大小的模拟能力要弱很多,仅有部分模式能相对接近地模拟出增温大小。对比集合平均与各模式模拟结果,发现集合结果并不是最好的,反而一些单模式的增温速率模拟结果更接近于观测值,这或许与集合平均具有平滑作用有关,使得模拟增长速率低于观测速率,与赵天保等^[30]的研究结果一致。

3.2.3 气温突变模拟能力

从年平均气温(图4a)的M-K检验来看,从1955年开始,UF的值均大于0,说明年平均气温呈现增加趋势,并于1980年超过临界值,呈显著增加趋势。UF与UB于1987年左右出现交点,但位于临界线以外,无法确定其是否为突变年份。结合MTT检验可确定突变年份为1987年,且通过了0.05的显著性检验;两种检验方法对年平均最高气温(图4b)的突变检验结果一致,突变年份也在1987年前后,1961年以来一直呈增加趋势,并于1982至1988年间,UF值在临界线上下波动,1988年以后一直处于临界值以上,说明年平均最高气温增加显著。图4c给出了年平均最低气温的M-K检验,其趋势变化与

年平均气温十分相似,均在1987年左右于临界线以外相交,并与MTT检验结果一致,同样在1955年以来呈增加趋势。对比发现,开都-孔雀河流域的年平均气温、年平均最高气温与年平均最低气温的突变时间均在1987年前后,处于梁珑腾等^[31]研究中国北方地区气温突变所得时间范围内。

采用同样的检验方法对32个模式及集合平均结果模拟的突变年份进行分析,发现绝大多数模式不能较为准确地模拟出气温的突变。为了判断出能够合理模拟出突变年份的模式,我们认为模式模拟的突变年份需位于观测的突变年份前后两年以内^[32]。综合模式模拟的开都-孔雀河流域气温的M-K与MTT检验(图略,见表3)来看,对于年平均气温,能够合理模拟出突变年份的模式有FIO-ESM和MPI-ESM-MR;能模拟年平均最高气温有3个模式,分别为:FIO-ESM、MIROC4h和MPI-ESM-MR;年平均最低气温有CMCC-CM、FIO-ESM和MPI-ESM-MR。

通过以上对单个模式的模拟情况来看,FIO-ESM与MPI-ESM-MR这两个模式对气温的突变能力模拟较强,能准确地模拟出气温的突变年份。对于集合平均结果,我们发现,择优之前,EE与PLS模拟的突变时间均晚于观测6~8年,而择优之后则能合理地模拟出突变年份;总体来看,PM-PLS相比于PM-EE的模拟结果更接近于观测值。说明较优模式的筛选及赋予的权重同样能够提高气温突变的模拟能力。

3.3 PM-PLS模拟气温时空变化的能力

通过上述气温模拟能力的评估,发现基于较优模式的PLS集合平均结果具有最好的模拟效果,因此,我们就此方法的模拟结果,进一步从时空变化角度评估其模拟能力。

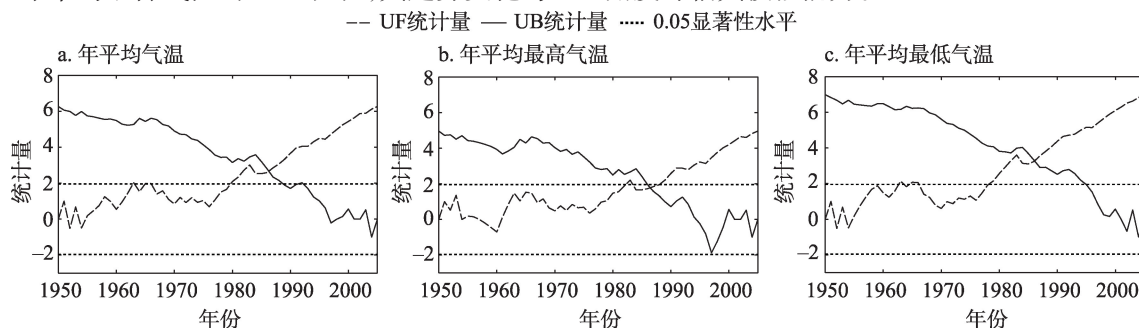


图4 1950-2005年开都-孔雀河流域气温突变

Figure 4 Abrupt changes of air temperature for the period 1950-2005 from the Climate Research Unit (CRU) observations

3.3.1 时间变化

图5给出了1950—2005年开都-孔雀河流域观测与PM-PLS模拟的气温年际变化情况。从年平均气温(图5a)来看,1950—2005年流域年平均气温整体呈显著上升趋势,通过了99%的显著性检验,其增长速率为 $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,略高于西北干旱区平均增温速率($0.31^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[33]。通过图5a滑动平均曲线,发现年平均气温呈波动上升趋势。其中,1963、1973、1981、1989和2000年为波峰,2000年为波峰的最大值,1952、1968、1974、1986和1994年为波谷,1952

年为波谷的最小值。图5b给出了PM-PLS法模拟出的平均气温年际变化图,可以看出,其增温速率($0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)明显低于观测值,图5年滑动平均曲线的波动幅度也偏小,波峰最大值与波谷最小值分别在2003与1966年,均晚于观测结果。年平均最高气温(图5c)于1950—2005年期间呈显著上升趋势,增温速率为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,与祁连山中东段及附近地区增温速率($0.27^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[34]一致。从5年滑动平均曲线来看,年平均最高气温呈波动上升趋势,存在1963、1981、1989和1999年的波峰,1952、1968、1986

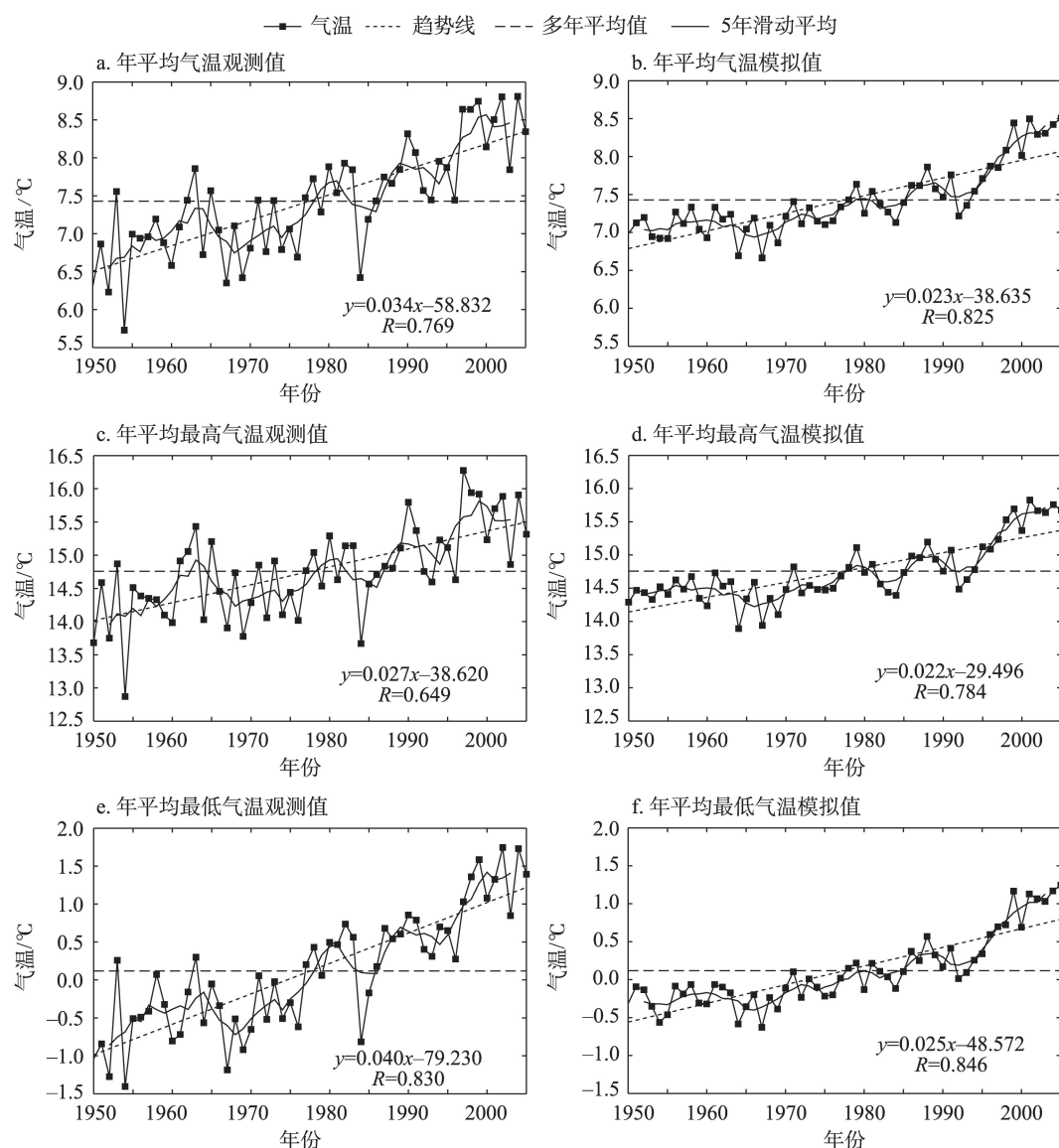


图5 1950—2005年开都-孔雀河流域观测与模拟气温线性趋势变化

Figure 5 Linear trends of air temperature for the period 1950-2005 from Climate Research Unit (CRU) observations and partial least squares regression ensemble mean of preferred models (PM-PLS) ensemble mean

2019年6月

和1994年的波谷,其中最暖年份出现在1999年,最冷年份出现在1952年;PM-PLS模拟的年平均最高气温(图5d)呈显著增加趋势,增温速率($0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)小于观测值 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,5年滑动平均曲线显示波峰最高值为2003年,波谷最低值为1996年。年平均最低气温(图5e)在1950—2005年期间表现为逐渐上升趋势,增长速率为 $0.40^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,略高于中国大陆的增温速率($0.37^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[35];在此期间有4次明显的波动,分别在1964、1981、1989和2000年达到波峰,1952、1968、1986和1994年达到波谷,波峰最大值与波谷最小值分别出现在2000年与1952年;模拟(图5f)增温速率($0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)明显低于观测值,5a滑动平均的结果显示波峰与波谷出现的年份与年平均气温模拟结果一致。

对比观测气温的增温速率,发现年平均最低气

温>年平均气温>年平均最高气温,与西北干旱区气温变化一致^[36],同时也说明,年平均最低气温对整个气候系统的增温作用最强。对于模拟结果,PM-PLS能够准确地模拟出流域气温的多年平均值及变化趋势,然而此方法虽能够模拟出气温的增温趋势及各气温指数增温规律,对增温速率的模拟却不尽人意,模拟结果均小于观测,其中差别最大的为年平均最低气温。此外,5年滑动平均曲线显示,模拟气温的波峰最大值与波谷最小值出现的时间均晚于观测值,且集合平均模拟的振幅明显小于观测值,这或许与集合平均对极值具有平滑的作用有关^[37]。

3.3.2 空间变化

为进一步考察PM-PLS集合平均对开都-孔雀河流域气温空间变化的模拟效果,图6给出了模拟与观测结果的相关性以及气温线性趋势的空间分

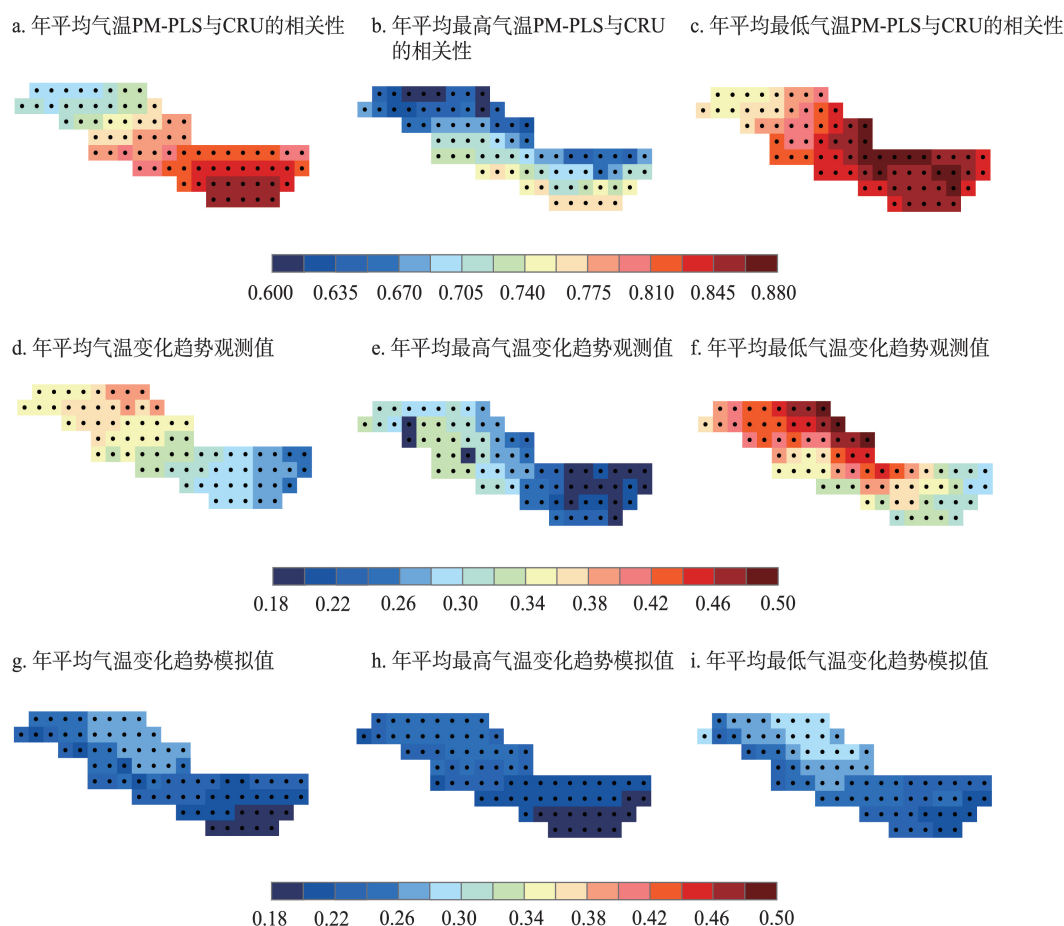


图6 1950—2005年多模式集合平均与观测气温的相关性及线性趋势空间分布变化趋势(单位: $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)

图中黑点表示通过99%的显著性检验

Figure 6 Spatial distribution of the correlation and linear trends between the multi-model ensemble means and observations for air temperature in 1950-2005. The black dots indicate statistical significance at the 99% confidence level

布。由相关系数的空间分布(图 6a-c)可以看出,模拟与观测结果具有较强的相关性(通过了 99% 的显著性检验)。其中,年平均气温的相关系数在 0.670~0.880 之间,并由西北向东南方向逐渐增加。年平均最高气温的相关性位于 0.600~0.775 范围内,其较大值主要集中于流域东南地区。与前两类气温相比,模拟与观测的年平均最低气温相关性总体偏高,相关系数最小值(0.740)比年平均、最高气温分别高 0.070、0.140。

从年平均气温变化趋势空间分布(图 6d,6g)来看,1950—2005 年观测的开都-孔雀河流域年平均气温一直处于增温状态(通过 99% 的显著性检验),增幅因区域不同而产生差异,整体表现为由西北向东南逐渐减小,幅度范围介于 0.24~0.40℃/10a,此结论与姜燕敏^[38]等通过 CRU 数据分析得到的中亚地区年平均气温增加幅度(0.2~0.4℃/10a)接近;PM-PLS 集合模拟很好地再现了年平均气温的空间变化趋势,而最大增温速率为 0.28℃/10a,明显小于观测值。50 年来,年平均最高气温(图 6e)增温速率(0.18~0.34℃/10a)偏小,增幅较大的是西北部,这与先前北疆的研究结论具有相似之处^[39];图 6h 显示了集合模拟的年平均最高气温(0.18~0.26℃/10a),对比发现,观测结果的增温速率相对较大。年平均最低气温(图 6f)的最大增温速率比年平均气温与年平均最高气温分别高 0.10℃/10a、0.16℃/10a,其增温速率在 0.28~0.50℃/10a 之间,此结果小于天山北坡增加幅度(0.33~0.62℃/10a)^[40];与观测值相比,模拟(图 6i)结果存在最大的速率偏差,最小与最大增温速率分别低于观测值 0.08℃/10a 和 0.20℃/10a。

通过以上分析可知,PM-PLS 集合平均结果能够较好地模拟出观测气温在开都-孔雀河流域的空间变化特征,但模拟增温速率普遍偏小。同时,出现西北部的速率偏差相比于东南部更大的情况,这可能与流域复杂的下垫面物理特性有关。

4 结论与讨论

本文以 CRU 逐月气温为观测资料,检验了 32 个降尺度的 CMIP5 模式数据及集合平均结果对 1950—2005 年开都-孔雀河流域年平均气温、年平均最高气温与年平均最低气温的模拟能力,并基于最优集合平均法,进一步从时空变化角度评估其模拟能力。主要研究结论如下:

(1)通过对集合平均前模式筛选标准的制定,最终对年平均气温、年平均最高与年平均最低气温分别筛选出了 19、14 和 18 个较优模式,说明各模式对气温的模拟效果存在差异性。

(2)泰勒图结果显示,CanESM2、GFDL-ESM2M、NorESM1-M 等 3 个模式对年平均气温、年平均最高和年平均最低气温均具有较好的模拟能力,而多模式集合平均结果优于单个模式。

(3)1950—2005 年开都-孔雀河流域年平均气温、年平均最高与年平均最低气温均呈显著($p=0.01$)增加趋势,大多数模式能较好地模拟出这种增加趋势,但模拟增温速率普遍偏小,仅个别模式能相对接近地模拟出增温速率,而多模式集合平均模拟的增温速率却不及个别单一模式,说明无论是单个模式还是集合平均均低估了气温增加幅度。

(4)流域年平均气温、年平均最高气温与年平均最低气温均在 1987 年发生了显著性突变,但大多数模式并不能准确模拟出突变时间,相比较而言 FIO-ESM 与 MPI-ESM-MR 这两个模式对气温的突变具有较强的模拟能力。对比集合平均结果,EE 与 PLS 模拟突变时间的能力相较于 PM-EE 和 PM-PLS 明显偏弱。

(5)对于年平均气温、年平均最高气温与年平均最低气温,PM-PLS 集合平均能较好地再现开都-孔雀河流域年际增温趋势以及由西北至东南逐渐减小的空间分布规律,但也存在模拟出的增温速率偏小的问题,且在西北部偏差相对较大。

综上,PM-PLS 集合方案优于大多数单个模式及其他 3 种集合平均法,但在研究过程中发现,此方法仍然存在低估增温速率问题,今后应在此方面开展进一步的研究。此外,为了消除模拟的不确定性,区域气候模式已逐渐应用于中国气候模拟与预估的研究,并取得了较好的模拟效果^[41-43],但对气候模拟仍存在误差,未来也有必要在此方面深入研究,以期得到更可靠的结果^[44]。与此同时,观测资料的不确定性同样会影响到模拟精度,未来可引入多种观测数据进行对比分析,以提高模型筛选精度。通过多方面提高,以期开都-孔雀河流域在“一带一路”战略统领下应对气候变化问题提供科学依据和理论支持。

2019年6月

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 吴迪, 严登华. SRES 情景下多模式集合对淮河流域未来气候变化的预估[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 565-575. [Wu D, Yan D H. Projections of future climate change over Huaihe River basin by multimodel ensembles under SRES scenarios[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(4): 565-575.]
- [3] 刘兆飞, 王蕊, 姚治君. 蒙古高原气温与降水变化特征及 CMIP5 气候模式评估[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 956-969. [Liu Z F, Wang R, Yao Z J. Air temperature and precipitation over the Mongolian Plateau and assessment of CMIP5 climate models[J]. Resources Science, 2016, 38(5): 956-969.]
- [4] Wang X Y, Yang T, Li X L, et al. Spatio-temporal changes of precipitation and temperature over the Pearl River basin based on CMIP5 multi-model ensemble[J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2017, 31(5): 1077-1089.
- [5] Zhu B L, Xue L Q, Wei G H, et al. CMIP5 projected changes in temperature and precipitation in arid and humid basins[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2018, 136(3-4): 1133-1144.
- [6] 王铭昊, 李焕连, 孙小婷. 中国 6 个 CMIP5 模式对全球降水年际-年代际变率模拟的定量评估[J]. 气象, 2018, 44(5): 634-644. [Wang M H, Li H L, Sun X T. Quantitative evaluation on the interannual and interdecadal precipitation variability simulated by six CMIP5 models of China[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(5): 634-644.]
- [7] 张飞跃, 姜彤, 苏布达, 等. CMIP5 多模式集合对南亚大河气候变化模拟评估及未来情景预估[J]. 热带气象学报, 2016, 32(5): 734-742. [Zhang F Y, Jiang T, Su B D, et al. Simulation and projection of climate change in the south Asian river basin by CMIP5 multi-model ensembles[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(5): 734-742.]
- [8] Wang B, Lee J Y, Kang I S, et al. Advance and prospectus of seasonal prediction: assessment of the APCC/CLIPAS 14-model ensemble retrospective seasonal prediction(1980-2004)[J]. Climate Dynamics, 2009, 33(1): 93-117.
- [9] Almazroui M, Islam M N, Saeed S, et al. Assessment of uncertainties in projected temperature and precipitation over the Arabian peninsula using three categories of cmip5 multimodel ensembles [J]. Earth Systems & Environment, 2017, DOI: 10.1007/s41748-017-0027-5.
- [10] 陶纯芳, 姜超, 孙建新. CMIP5 多模式集合对东北三省未来气候变化的预估研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(10): 3580-3591. [Tao C W, Jiang C, Sun J X. Projection of future changes in climate in Northeast China using a CMIP5 multi-model ensemble[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3580-3591.]
- [11] Krishnamurti T N, Mishra A K, Chakraborty A, et al. Improving global model precipitation forecasts over India using downscaling and the FSU superensemble. Part I: 1-5-day forecasts[J]. Monthly Weather Review, 2009, 137(9): 2713-2735.
- [12] 陈鹏翔, 江志红, 彭冬梅. 基于 BP-CCA 统计降尺度的中亚春季降水的多模式集合模拟与预估[J]. 气象学报, 2017, 75(2): 236-247. [Chen P X, Jiang Z H, Peng D M. Multi-model statistical downscaling of spring precipitation simulation and projection in central Asia based on canonical correlation analysis[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(2): 236-247.]
- [13] 周莉, 兰明才, 蔡荣辉, 等. 21 世纪前期长江中下游流域极端降水预估及不确定性分析[J]. 气象学报, 2018, 76(1): 47-61. [Zhou L, Lan M C, Cai R H, et al. Projection and uncertainties of extreme precipitation over the Yangtze River valley in the early 21st century[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2018, 76(1): 47-61.]
- [14] 刘长征, 杜良敏, 柯宗建, 等. 国家气候中心多模式解释应用集成预测[J]. 应用气象学报, 2013, 24(6): 677-685. [Liu C Z, Du L M, Ke Z J, et al. Multi-model downscaling ensemble prediction in national climate center[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(6): 677-685.]
- [15] 杨肖丽, 郑巍斐, 林长清, 等. 基于统计降尺度和 SPI 的黄河流域干旱预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 377-383. [Yang X L, Zheng W F, Lin C Q, et al. Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 377-383.]
- [16] Dai A. Drought under global warming: A review[J]. Climatic Change, 2011, 2: 45-65.
- [17] 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. [Xu C H, Shen X Y, Xu Y. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(5): 287-292.]
- [18] 冯双磊, 靳双龙, 刘晓琳, 等. CMIP5 全球气候模式对 1981-2005 年东北地表温度的模拟分析[J]. 气象科技, 2018, 46(6): 1154-1164. [Feng S L, Jin S L, Liu X L, et al. Land surface temperature simulations of CMIP5 models over Northeast China during 1981-2005[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(6): 1154-1164.]
- [19] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1102-1111. [Wu J, Gao X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111.]
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei F Y. Modern Climate Statistic Diagnosis and Forecasting Technique[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.]
- [21] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2004. [Huang J Y. Methods of Meteorological Statistical Analysis and Prediction[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004.]
- [22] 张学珍, 李侠祥, 徐新创, 等. 基于模式优选的 21 世纪中国气候

- 变化情景集合预估[J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1555–1568. [Zhang X Z, Li X X, Xu X C, et al. Ensemble projection of climate change scenarios of China in the 21st century based on the preferred climate models[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(9): 1555–1568.]
- [23] 智协飞, 赵欢, 朱寿鹏, 等. 基于CMIP5多模式回报资料的地面气温超级集合研究[J]. 大气科学学报, 2016, 39(1): 64–71. [Zhi X F, Zhao H, Zhu S P, et al. Superensemble hindcast of surface air temperature using CMIP5 multimodel data[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2016, 39(1): 64–71.]
- [24] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(7): 183–192.
- [25] 张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5模式对中国地区气温模拟能力评估与预估[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 10–19. [Zhang Y W, Zhang L, Xu Y. Simulations and projections of the surface air temperature in China by CMIP5 models[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2016, 12(1): 10–19.]
- [26] 苏琪骅, 周任君, 柯宗建, 等. 中国大陆地区温度集合预报的7最优权重模型设计及其区域应用[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 48(3): 199–209. [Su Q H, Zhou R J, Ke Z J, et al. Optimal weighted model for ensemble forecast of the surface air temperature in mainland China and its regional applications[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2017, 48(3): 199–209.]
- [27] 胡琴, 姜大膀, 范广洲. CMIP5全球气候模式对青藏高原地区气候模拟能力评估[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 924–938. [Hu Q, Jiang D B, Fan G Z. Evaluation of CMIP5 models over the Qinhai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(5): 924–938.]
- [28] 蒋帅, 江志红, 李伟, 等. CMIP5模式对中国极端气温及其变化趋势的模拟评估[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(1): 11–24. [Jiang S, Jiang Z H, Li W, et al. Evaluation of the extreme temperature and its trend in china simulated by CMIP5 models[J]. *Advances in Climate Change Research*, 13(1): 11–24.]
- [29] 张武龙, 张井勇, 范广州. CMIP5模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估[J]. 大气科学, 39(3): 559–570. [Zhang W L, Zhang J Y, Fan G Z. Evaluation and projection of dry and wet-season precipitation in southwestern China using CMIP5 models[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 39(3): 559–570.]
- [30] 赵天保, 陈亮, 马柱国. CMIP5多模式对全球典型干旱半干旱区气候变化的模拟与预估[J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1148–1163. [Zhao T B, Chen L, Ma Z G. Simulation of historical and projected climate change in arid and semiarid areas by CMIP5 models[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(12): 1148–1163.]
- [31] 梁珑腾, 马龙, 刘廷玺, 等. 1951–2014年中国北方地区气温突变与变暖停滞的时空变异性[J]. 中国环境科学, 2018, 38(5): 1601–1615. [Liang L T, Ma L, Liu T X, et al. Spatiotemporal variation of the temperature mutation and warming hiatus over northern China during 1951–2014[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5): 1601–1615.]
- [32] 伍清, 蒋兴文, 谢洁. CMIP5模式对西南地区气温的模拟能力评估[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 358–370. [Wu Q, Jiang X W, Xie J. Evaluation of surface air temperature in Southwestern China simulated by the CMIP5 models[J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(2): 358–370.]
- [33] 吴晶, 罗毅, 李佳, 等. CMIP5模式对中国西北干旱区模拟能力评价[J]. 干旱区地理, 2014, 37(3): 499–508. [Wu J, Luo Y, Li J, et al. Evaluation of CMIP5 model's simulation ability in the northwest arid areas of China[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(3): 499–508.]
- [34] 付建新, 曹广超, 李玲琴, 等. 1960–2014年祁连山东中段及其附近地区气温时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(3): 549–561. [Fu J X, Cao G C, Li L Q, et al. Spatiotemporal variation of air temperature in the middle and eastern parts of the Qilian Mountains and nearby regions during the Period of 1960–2014[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(3): 549–561.]
- [35] 周丹, 张勃, 李小亚, 等. 1961–2010年中国大陆地面气候要素变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 549–558. [Zhou D, Zhang B, Li X Y, et al. Analysis of variations of climatic elements in surface ground of Mainland China during 1961–2010[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(4): 549–558.]
- [36] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近54a中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 68–76. [Shang S S, Lian L S, Ma T, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in northwest China in recent 54 years[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(1): 68–76.]
- [37] 陶纯苇, 姜超, 孙建新. CMIP5模式对中国东北气候模拟能力的评估[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(3): 357–366. [Tao C W, Jiang C, Sun J X. Evaluation of CMIP5 models performance on climate simulation in Northeast China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2016, 21(3): 357–366.]
- [38] 姜燕敏, 吴昊旻. 20个CMIP5模式对中亚地区年平均气温模拟能力评估[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 110–116. [Jiang Y M, Wu H M. Simulation capabilities of 20 CMIP5 models for annual mean air temperatures in central Asia[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2013, 9(2): 110–116.]
- [39] 丁之勇. 北疆地区近53年极端气温事件及其影响因素分析[J]. 地球环境学报, 2018, 9(2): 159–171. [Ding Z Y. Spatiotemporal variation characteristics of extreme temperature and its influencing factors in recent 53 years in Northern Xinjiang, China[J]. *Journal of Earth Environment*, 2018, 9(2): 159–171.]
- [40] 丁之勇, 董义阳, 鲁瑞洁. 1960–2015年中国天山南、北坡与山区极端气温时空变化特征[J]. 地理科学, 2018, 38(8): 1379–1390. [Ding Z Y, Dong Y Y, Lu R J. Spatio-temporal variability of temperature extremes in Tianshan Mountains area, Northwest China, During 1960–2015[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(8): 1379–1390.]
- [41] 吴婕, 高学杰, 徐影. RegCM4模式对雄安及周边区域气候变化的集合预估[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 696–705. [Wu J, Gao X J, Xu Y. Climate change projection over Xiong'an district and its

- adjacent areas: An ensemble of RegCM4 simulations[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(3): 696–705.]
- [42] 张冬峰, 韩振宇, 石英. CSIRO-Mk3.6.0 模式及其驱动下 RegCM4.4 模式对中国气候变化的预估[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(6): 557–568. [Zhang D F, Han Z Y, Shi Y. Comparison of climate projection between the driving CSIRO-MK3.6.0 and the downscaling simulation of RegCM4.4 over China[J]. Advances in Climate Change Research, 2017, 13(6): 557–568.]
- [43] 吕哲敏, 李志, 李京京, 等. 区域气候模式(PRECIS)对黄土高原降水模拟能力的评估[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6618–6627. [Lv Z M, Li Z, Li J J, et al. Verifying the applicability of PRECIS-simulated precipitation on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 6618–6627.]
- [44] Wu J, Gao X J, Xu Y L, et al. Regional climate change and uncertainty analysis based on four regional climate model simulations over China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2015, 8(3): 147–152.

Evaluation of air temperature of the typical river basin in desert area of Northwest China by the CMIP5 models:

A case of the Kaidu-Kongqi River Basin

LI Xiaofei^{1,2}, XU Changchun^{1,2}, LI Lu^{1,2}, LUO Yingxue^{1,2}, YANG Qiuping^{1,2}, YANG Yuanyuan^{1,2}

(1. College of Resource and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Global warming will result in severe water shortage, aggravating the existing outstanding water problem in the Kaidu-Kongqi River Basin. Studies on the future climate change will contribute to the rational distribution and utilization of water in the basin. Based on the CRU (Climate Research Unit) dataset and 32 BCSD-downscaled CMIP5 model air temperature dataset from DCHP (Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate and Hydrology Projections), the paper assessed the simulation ability of both 32 models and multi-model ensemble mean through the test of long-term trend and abrupt change of annual average, maximum and minimum air temperature in the Kaidu-Kongqi River Basin over the period of 1950–2005 by using the methods of linear trend calculation, moving average, Mann-Kendall (M-K) test and moving T-test (MMT). Results show that (1) 12 of 32 models are capable of reproducing the significant warming trend of three temperature indicators during 1950–2005, 8 of 32 models can only simulate that of some temperature indicators, but all of them underestimate the warming rate, so does the multi-model ensemble mean. (2) Most models failed to simulate the time of abrupt change accurately except two, FIO-ESM and MPI-ESM-MR. The ensemble mean of preferred models, PM-PLS and PM-EE, are superior to the individual model in simulating abrupt change. Between them, PM-PLS is better. (3) The further evaluation indicates that the multi-model ensemble PM-PLS can better capture the linear trend of spatio-temporal characteristics, but the problem of underestimating the warming rate still exists. It appeals to strengthen the study of model optimum selection and multiple models assemble in the future climate prediction using climate models.

Key words: air temperature; Taylor diagram; multi-model ensemble mean; Mann-Kendall; abrupt change; Kaidu-Kongqi River Basin