

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.05.001

基于统计降尺度和SPI的黄河流域干旱预测

杨肖丽^{1,2}, 郑巍斐^{1,2}, 林长清^{1,2}, 任立良^{1,2}, 王雨茜^{1,2},
张梦如^{1,2}, 袁 飞^{1,2}, 江善虎^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于黄河流域101个气象站点的实测气象数据和国际耦合模式比较计划第5阶段(coupled model intercomparison project phase 5, CMIP5)3种排放情景下的6个模型1961—2099年的降水和气温数据,采用等距离累积分布函数法(equidistant cumulative distribution function matching method, EDCDFm)进行统计降尺度;通过历史阶段(1961—2005年)实测站点数据对降尺度后的降水和气温进行精度评估;在此基础上,通过标准化降水指数(standard precipitation index, SPI)对黄河流域气象干旱进行预估。结果表明,EDCDFm的降尺度方法能够明显提高气候模式所模拟的气温和降水精度,尤其对极值的模拟精度;黄河流域气象干旱的预估显示,3种气候情景下21世纪初的干旱情况相对于基准期均变得比较严重,但是世纪末的干旱程度均明显减轻,近期黄河流域的防旱工作形势仍然严峻。

关键词: 等距离累积分布函数法;CMIP5;降水;气温;黄河流域;SPI

中图分类号: P338^{+.6} **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)05-0377-07

Prediction of drought in the Yellow River based on statistical downscale study and SPI

YANG Xiaoli^{1,2}, ZHENG Weifei^{1,2}, LIN Changqing^{1,2}, REN Liliang^{1,2}, WANG Yuqian^{1,2},
ZHANG Mengru^{1,2}, YUAN Fei^{1,2}, JIANG Shanhu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the measured data in 101 meteorological stations over the Yellow River Basin, and the precipitation and temperature data dating from 1961 to 2099 of the six CMIP5 models under three scenarios, statistical downscale study is conducted by using equidistant cumulative distribution function matching method (EDCDFm). The accuracy of the downscaled data is evaluated by validating against the measured data dating from 1961 to 2005. After that, the meteorological drought around the Yellow River Basin is predicted by means of standard precipitation index (SPI). The results show that the accuracy of the raw models simulated temperature and precipitation has been significantly improved by using EDCDFm method, it is especially true with the modelling accuracy of their extreme values. The predicted results of the drought around the Yellow River Basin indicate that, the drought condition at the beginning of the 21st century has become more severe than that of the reference period under three scenarios, but is likely to be obviously mitigated at the end of this century. Notwithstanding, preventing drought around the Yellow River Basin is still a tough job in recent years.

Key words: equidistant cumulative distribution function matching method; CMIP5; precipitation; temperature; Yellow River Basin; SPI

收稿日期: 2016-09-22

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFA0601504);国家自然科学基金(51579066,41201031);中央高校基本科研业务费专项(2015B14514);国家留学人员回国科研启动基金(515025512)

作者简介: 杨肖丽(1976—),女,河北邯郸人,副教授,博士,主要从事气候变化与人类活动对水文循环影响的模拟与预测研究。E-mail: yangxl@hhu.edu.cn

全球气温的持续上升加速了全球水循环,导致全球不同尺度水资源的重新分配^[1],加剧了极端水文事件(水旱灾害)发生的概率和频率,干旱成为对人类社会影响最严重的气候灾害之一,也是目前国内外气候学和水文学领域研究的热点。处于干旱半干旱区的黄河流域,近年来干旱呈现出加剧与连续之势,对该地区的生产、生活、生态造成了严重的影响。国内相关研究^[2]认为干旱灾害的发生具有特定的气候背景,是有规律可循的,故开展黄河流域气候变化的时空特征,预估其干旱发展趋势的分析与研究,将有利于深入地研究和预测该类地区水资源的变化规律与趋势^[3]。

全球气候系统模式(global circulation models, GCMs)是目前国内外学者进行气候模拟和预估未来气候变化研究的重要工具。但其较粗的空间分辨率难于给出区域气候的细节,使得区域尺度研究结果存在很大的不确定性,从而限制了其在区域气候变化及其影响研究中的应用^[4],降尺度方法成为连接气候模式与区域陆地模式的桥梁。统计降尺度方法不用考虑 GCMs 所提供的边界条件对预测结果的影响,具有计算量小、模型易于构建、方法众多和简单灵活等特点,是国际上气象和水文领域研究中应用比较广泛并且发展相对较成熟的一种方法^[5-7]。在统计降尺度过程中,气候模式数据的内在误差以及所应用的插值方法的局限性等因素会造成误差,必须对模拟结果进行误差修正。Li 等^[8]提出一种基于分位数函数法的等距离累积分布函数法(equidistant cumulative distribution function matching method, EDCDFm),利用 GCMs 模拟的气候要素与区域观测的气候要素的累积分布特征之间的差异,对未来时期气候模式模拟的气候要素进行偏差校正,能有效捕捉气候要素的极值,进而提高气候要素的模拟精度,近年来受到越来越多的关注。

笔者应用等距离累积分布函数法对黄河流域 GCMs 国际耦合模式比较计划第 5 阶段发布(coupled model intercomparison project phase 5, CMIP5)的 3 种排放情景下(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)的 6 个气候模式的月降水和气温进行统计降尺度处理,建立历史时期(1961—2005 年)和未来时期(2006—2009 年)的气候降尺度数据,并结合实测站点数据评价降尺度历史时期的模拟精度,分析未来时期该区域气温和降水的变化趋势;利用标准化降水指数(standard precipitation index, SPI)分析预估黄河流域的干旱变化趋势。

1 研究区概况

黄河流域横跨南温带、中温带和高原气候区 3 个气候带,流经 9 个省,流域面积 79.5 万 km²,地理位置介于 94°E~119°E,32°N~42°N 之间,是我国重要的农业生产基地。该流域具有下垫面复杂多样、地表植被空间异质性大、对气候变化和人为扰动的响应敏感等特点,是受全球气候变化影响最显著的地区之一,也是干旱化表现比较剧烈的流域,成为目前区域气候变化研究的重点^[9-11]。该流域气温季节变化差异性大,年均温度呈现东南部高,西北部相对较低的特征。冬季寒冷干燥,夏季雨水较多,东南多雨、西北干旱,平原降水多于高原,山地多于盆地。地形复杂,高程从西北部源头的 6 127 m 到出海口逐渐降低。从 20 世纪 60 年代中期开始,该流域出现气温升高、降水和径流减少的变化趋势^[12],严重影响了沿黄流域工农业生产和人民生活,亟待以有效方法分析、评价和预测气候变化。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与处理

收集了 CMIP5 的 6 个气候模式(BCC-CSM1-1、CanESM2、CCSM4、CSIRO-Mk3.6.0、MRI-CGCM3 和 NorESM1-M)历史时期(1961—2005 年)和未来时期(2006—2009 年)3 种气候情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)的逐月降水量、气温格点气候数据(<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>),各模式及观测资料分辨率不同(表 1),故使用双线性插值统一插值到 0.5°×0.5°的网格数据,计算模式集合时,采用加权平均法,权重系数与单个模式的模拟偏差成反比。收集了中国气象数据网站(<http://data.cma.cn/>)的黄河流域 101 个气象站的观测数据,这些站点分布均匀,能大体反映该区域的气候变化特征(图 1)。实测站点气象数据(降水和气温)采用克里格方法插值成 0.5°×0.5°的网格数据。

表 1 CMIP5 气候模式基本信息

Table 1 The basic information of CMIP5 models in this study

模式名称	研制单位	模式分辨率
BCC-CSM1-1	北京气象中心	2.8°×2.8°
CanESM2	加拿大气候建模与分析中心	2.81°×2.79°
CCSM4	美国国家大气研究中心	1.25°×0.94°
CSIRO-Mk3.6.0	澳大利亚 CSIRO 大气研究中心	1.875°×1.85°
MRI-CGCM3	日本气象研究中心	1.125°×1.121°
NorESM1-M	挪威气候中心	2.5°×1.89°

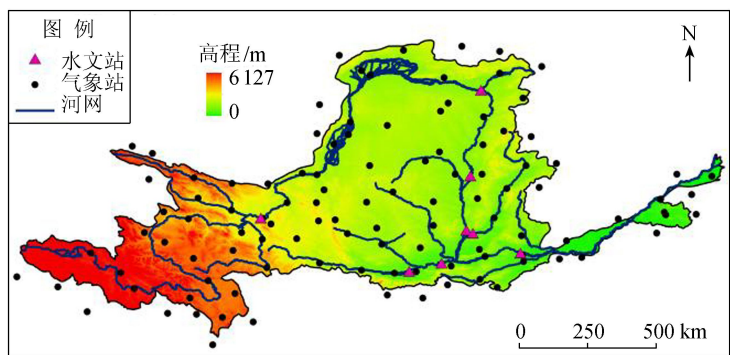


图 1 黄河流域高程、气象站空间分布

Fig.1 The spatial distribution of the elevation and meteorological stations over the Yellow River Basin

2.2 研究方法

2.2.1 统计降尺度方法

EDCDFm 是基于分位数函数法的等距离累积分布函数法,该方法利用 GCMs 模拟的气候要素与区域观测的气候要素的累积分布特征之间的差异,对未来时期气候模式模拟的气候要素进行偏差校正,能有效捕捉气候要素的极值,改进气候模式数据的内在误差以及所应用的插值方法的局限性,进而提高气候要素的模拟精度,其公式为

$$\hat{x}_{m-p} = x_{m-p} + F_{o-c}^{-1}(F_{m-p}(x_{m-p})) - F_{m-c}^{-1}(F_{m-p}(x_{m-p}))$$
 (1)

式中: $\hat{x}_{m-p}$ ——修正后的未来时期降尺度数据; x_{m-p} ——历史时期模式模拟的气候要素; F_{o-c}^{-1} ——实测数据的分位数函数; F_{m-c}^{-1} ——历史时期模式数据的分位数函数; F_{m-p} ——模式未来时期数据的累计分布函数(CDF)。

2.2.2 模拟精度评价方法

分别采用平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和相对偏差评价降尺度模型的模拟结果。其中 MAE 是所有单个观测值与算术平均值的偏差的绝对值的平均,既能表示模式模拟结果与实测数据之间时间序列的接近程度,也能模拟出格点尺度上二者的偏差水平^[13]。

2.2.3 标准化降水指数

SPI 是通过降水量出现的概率来反映干旱情况的一种指数^[14],该指数不仅可以反映干旱的强度以及持续的时间长短,而且可以反映不同时间尺度的干旱情况。SPI 计算简便、时间尺度灵活、空间可比性强,在越来越多的国家和地区得到检验和使用^[15-16]。计算 SPI 首先需针对不同时间尺度构建月降水量滑动累积序列,并根据降水量滑动累积数据的结束月份划分为 12 季(season),即构建 12 组时间序列,然后采用 12 个偏态分布(通常采用伽玛或皮尔逊 III 型分布)分别拟合这 12 组时间序列,以考虑降水的季节性差异;将偏态分布的降水数据进行标准正态化转换,从而计算出特定降水数据所对应的 SPI。其中标准正态化过程需对特定时间尺度的 12 个季节实际序列分别进行,然后将所计算的 SPI 按自然时间顺序排列,从而获得逐月的 SPI 时间序列。

3 分析与讨论

3.1 降尺度模型时间尺度模拟能力

黄河流域历史时期 6 个降尺度模式的年平均气温和降水趋势对比可以发现(图 2,图中阴影部分表示 6 个模式涵盖的气温变化范围,OBS 为实测数据),降尺度模式模拟结果与实测数据的拟合度较好,数值变化范围和波动趋势较为一致,而原始数据的模拟结果与实测数据相差较大,其气温模拟明显低于观测数据,而降水则明显高于实测数据。降尺度后的气温仅在 1988 年和 2002 年偏差略大,其余年份与观测数据的偏差都在 1℃ 以内,阴影区的相对变化值分别为-11% 和 8%。降尺度后的降水模拟精度虽然低于气温的降尺度效果,但是其模拟结果与实测数据相差约 100 mm/a,精度高于原始数据的模拟效果(400 mm/a)。部分年份如 1963 年、1964 年、1985 年和 2002 年模式数据没有很好地拟合出实测数据,偏差分别为+30%、-19%、-18% 和+6.7%,虽然模拟精度不及气温,但相对偏差除了 1963 年基本都在±20% 之内。这表明双线性内插结合等距离分位数偏差校正的降尺度结果与实测数据具有较好的拟合性。

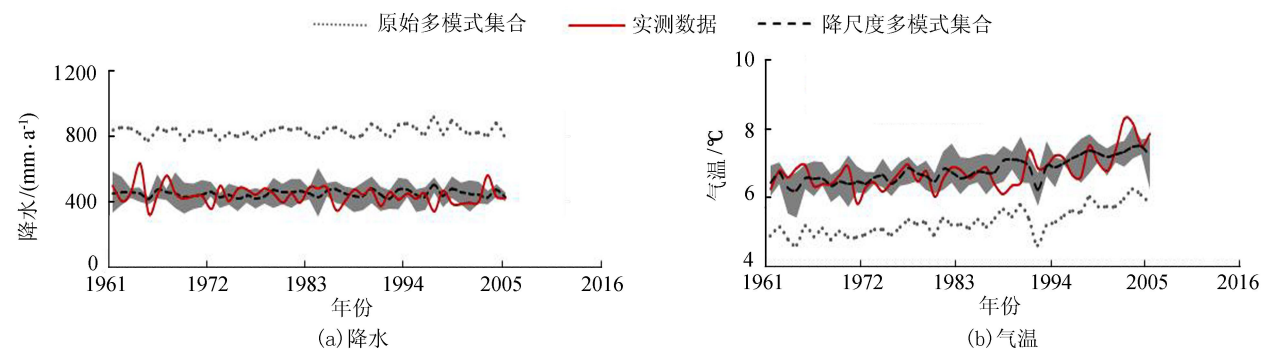


图2 黄河流域历史时期降尺度气候模式年平均降水和气温

Fig.2 Annual average precipitation and temperature from model simulation and observation during the historical period(1961—2005) over Yellow River Basin

通过对比历史时期6个降尺度模式以及多模式集合模拟的年平均气温和年降水相对实测数据的平均绝对误差(表2)可以看出,降尺度后各模式气温与实测数据的平均绝对误差相较原始数据(0.5~1.5℃)的要小。6个模式模拟的气温与实测数据之间的MAE大部分在0.33~0.45℃之间,并都控制在0.5℃之内。6个模式模拟的降水与实测数据的MAE在61~71mm之间,模式MRI-CGCM3与实测数据的MAE为71mm,模拟的降水量偏高。相比原始数据,降尺度模式集合的MAE都明显小于单个模式的MAE值。

由表3可知,多模式集合的原始模型所模拟的月降水量均高于实测数据,其中5—9月的差值更大,而气温的模拟则是冬季差值较大,夏季较小。降尺度后月降水值的差值在±3.5mm之内,模拟精度明显提高,其中夏季的模拟都明显高于其他几个季节;气温的拟合效果好于降水,气温的差值(±0.03℃)明显小于原始多模式集合的气温差值(−3~−1.3℃),尤其是对于冬夏的低温和高温的模拟精度更好。这表明,在时间尺度上,等距离分位数法降尺度后的多模式集合与实测数据吻合较好,能够如实反映研究区气候要素的变化趋势。

表2 黄河流域历史时期降尺度后气温、降水平均绝对误差

Table 2 The MAE value of downscaled data of temperature and precipitation over the Yellow River Basin (1961—2005)

模式	平均绝对误差	
	气温/℃	降水/mm
多模式集合	0.32	51
BCC-CSM1-1	0.38	68
CanESM2	0.33	67
CCSM4	0.45	65
CSIRO-Mk3.6.0	0.39	61
MRI-CGCM3	0.37	71
NorESM1-M	0.39	62

表3 黄河流域历史时期多模式集合月降水和气温绝对偏差

Table 3 The absolute deviation of monthly precipitation and temperature between raw and downscaled ensemble data from 1961 to 2005

月份	绝对偏差				月份	绝对偏差			
	原始降水/mm	原始气温/℃	降尺度降水/mm	降尺度气温/℃		原始降水/mm	原始气温/℃	降尺度降水/mm	降尺度气温/℃
1	7.9	−2.89	−0.3	−0.01	7	53.0	−1.3	−3.3	0.01
2	12.0	−2.95	0.3	−0.03	8	56.0	−1.5	−3.0	−0.01
3	26.0	−3.00	−0.5	0	9	64.0	−2.2	0	0.01
4	43.0	−2.32	0	0.03	10	42.0	−3.0	−1.1	0
5	60.0	−1.90	−1.5	0.01	11	17.0	−2.7	−0.1	0.01
6	59.0	−1.60	0	0.01	12	8.4	−2.9	−0.3	−0.03

3.2 降尺度模型空间模拟能力

由黄河流域历史时期降尺度后各月降水量多模式集合与实测数据相对偏差的空间分布(图3)可以看出,降水的负偏差较大,主要分布在年降水量较少的流域西北部,从西北部往东南部偏差减小。降尺度模拟的降水量在降水相对较少的1—3月、11月和12月与实测降水量相对偏差较大(最大值−2%),而在降水比较丰沛的夏季(6—8月)相对偏差最小(−0.2%~−0.5%)。表明降尺度模型能够较好地模拟月降水的高值,而对于低值的模拟会出现负偏差略大的情况(图3)。相对而言,月平均气温的模拟效果较好,整个流域的气温偏差在0.02%以内,除了源头区域的个别栅格的负偏差略大(−0.06%左右)(图4)。表明本研究采用的降尺度方法能够较好地体现黄河流域降水和气温的时空分布特征,该方法所获得该流域历史和未

来时期的降水和气温数据可以用于进一步分析该流域的气候变化特征分析与预估。

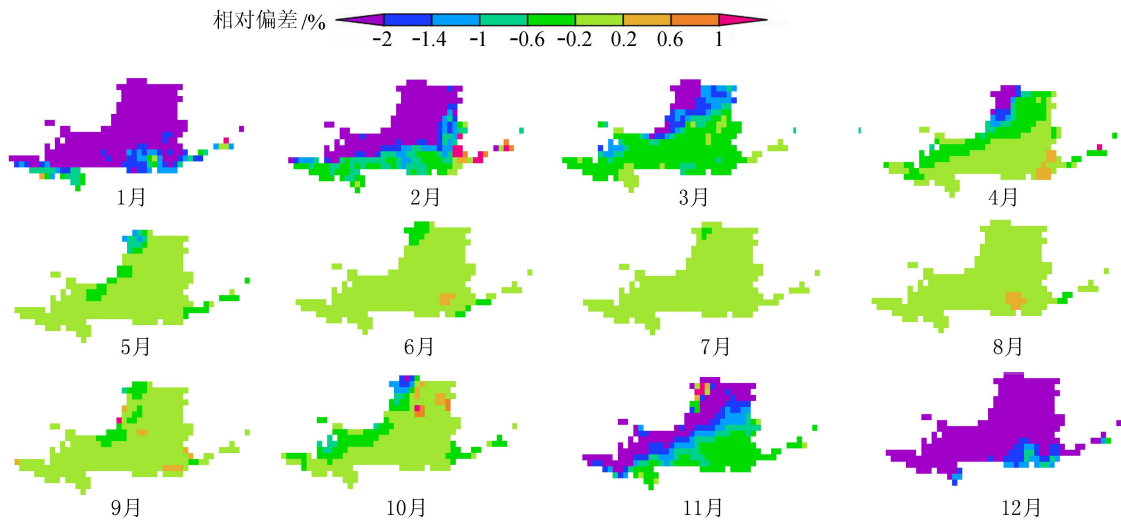


图 3 黄河流域历史时期降尺度模型集合多年月平均降水与实测数据相对偏差空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of monthly average precipitation deviation between downscaled and observed data during the historical period

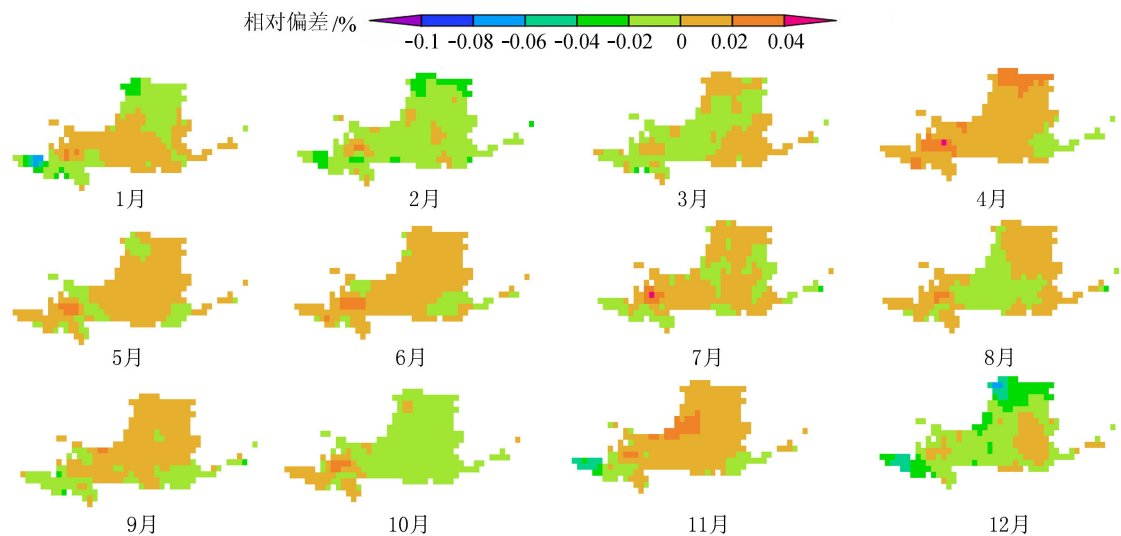


图 4 黄河流域历史时期降尺度模型集合多年月平均气温与实测数据相对偏差空间分布

Fig.4 Spatial distribution of monthly average temperature deviation between downscaled and observed data during the historical period

3.3 黄河流域气温和降水变化趋势

图 5 是黄河流域未来时期(2006—2099 年)3 种情景下 6 个降尺度模型多模式集合的平均气温、降水序

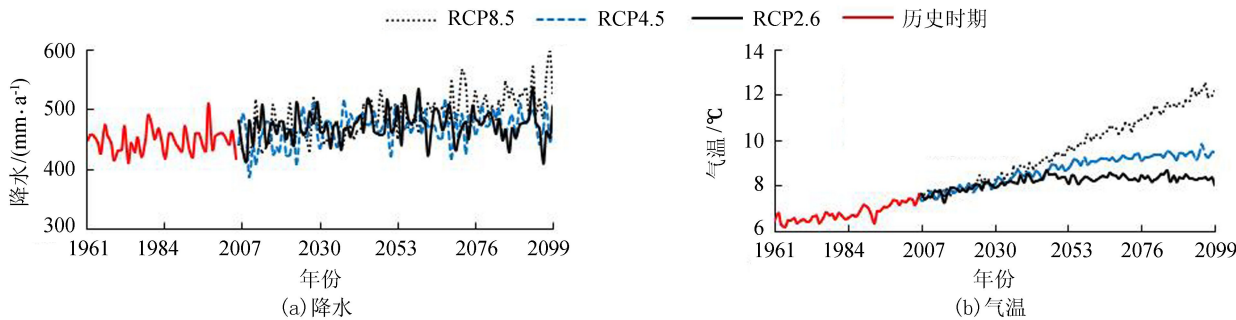


图 5 黄河流域 1961—2099 年多模式集合年平均降水、气温
Fig. 5 Annual average precipitation and emperature of downscaled multi-model ensemble from 1961 to 2099 over the Yellow River Basin

列。从图 5(a)可以看出,黄河流域未来时期的降水相对于历史时期变化并不明显,在历史值的范围上下波动,3 种气候情景之间的差距并不大,尤其是在 2006—2066 年之间,年降水量较为接近,RCP8.5 的降水在 2067 年后相比其他两种情景的预估值明显增高。其中 RCP2.6 的线性增加率(0.09 mm/a)比历史时期的增长率(0.14 mm/a)略微减少,RCP4.5 情景线性增加率较历史时期有所增加(0.34 mm/a),RCP8.5 的增幅较为明显(0.92 mm/a)。相对于历史时期,黄河流域 3 种情景下未来时期的气温增高的趋势非常显著(图 5(b)),其中,RCP8.5 的温度范围在 $7.8\sim 12^{\circ}\text{C}$ 之间;RCP4.5 的温度范围在 $7.8\sim 9^{\circ}\text{C}$ 之间;RCP2.6 的温度范围在 $7.8\sim 8.5^{\circ}\text{C}$ 之间,但在 2066 年之后,其气温基本呈现出持平趋势。

3.4 黄河流域 SPI 变化趋势

图 6 对比分析了 3 种排放情景下年尺度 SPI(SPI12)在黄河上中下游区域年尺度的干旱特征。可以看出,黄河流域上中下游的干旱变化存在着明显的时空差异。上游区域在 2006—2099 年期间 SPI 值有略微增加的趋势,表明干旱在未来时期有所减弱。其中,RCP2.6 和 RCP8.5 排放情景下除了 21 世纪初期有明显的干旱外,未来时期干旱发生的频率较低,持续时间较短;RCP4.5 排放情景下上游区域在 2026 年以前有明显的干旱,之后干旱呈现明显减少的趋势。中游区域在 2026 年以前在 RCP8.5 排放情景下有明显的干旱发生,而另外 2 种排放情景的模拟结果显示 2010 年以后干旱呈现明显减少的趋势。下游区域 RCP2.6 排放情景下的干旱程度和发生年份明显低于其他 2 种排放情景。整个黄河流域未来时期世纪初(2011—2040 年)和世纪末(2061—2090 年)相较基准期(1961—1990 年)的平均干旱年统计表明:相对于基准期的干旱年数,世纪初的干旱年份发生的概率有所减少,而世纪末有极旱年发生(表 4)。

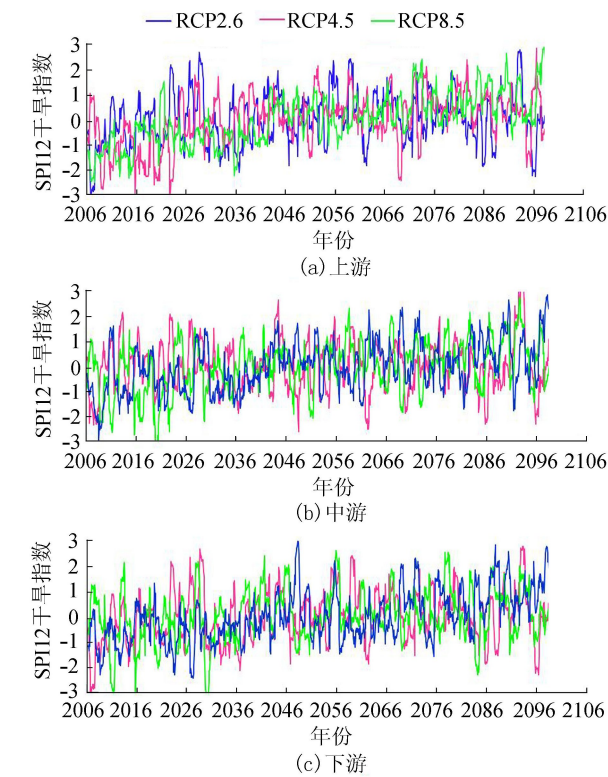


图 6 黄河流域上中下游 3 种情景下 SPI12 干旱指数时间序列

Fig.6 SPI12 of RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 for upstream, midstream, and downstream of the Yellow River Basin

表 4 黄河流域未来时期 3 种情景下平均干旱年概率统计
Table 4 Statistics of the average drought year for RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 in the future over the Yellow River Basin

旱情	RCP	概率/%		
		基准期	世纪初	世纪末
轻旱	2.6	0.47	0.47	0.23
	4.5	0.47	0.43	0.13
	8.5	0.47	0.37	0.1
中旱	2.6	0.2	0.13	0
	4.5	0.2	0.13	0
	8.5	0.2	0.3	0
重旱	2.6	0.1	0.03	0
	4.5	0.1	0.1	0.03
	8.5	0.1	0.13	0
极旱	2.6	0	0	0.03
	4.5	0	0.1	0
	8.5	0	0	0

4 结 论

- a. 等距离分位数法的模拟结果与实测数据在时间和空间尺度上拟合性较好,6 个模型及其多模式集合的平均绝对误差与相对偏差都明显低于原始数据,多模式集合平均的模拟结果比单个模式的降尺度数据更为接近观测值,表明该降尺度方法在黄河流域具有较好的适应性。
- b. 黄河流域未来时期 RCP2.6 的降水变化趋势并不显著,而 RCP4.5 和 RCP8.5 除了 CSIRO-Mk3.6.0 和 BCC-CSM1-1 其他气候模式均呈现增加的趋势。3 种情景下气温均呈现增加的趋势,其中 RCP4.5 以大约 0.02°C/a 的趋势逐渐增加,RCP85 的线性增加程度更显著(约 0.05°C/a),RCP2.6 的气温增加最缓慢(约

0.01℃/a)。

c. 未来时期黄河流域的气象干旱指数 SPI 结果显示:黄河流域上中下游区域在未来 3 种情景下,SPI 值呈现逐渐增加的趋势;该流域 21 世纪初期干旱发生的严重程度和概率较大,21 世纪中后期干旱发生的严重程度和概率均呈现减少的趋势。

参考文献:

[1] ALEXANDER L, SIMON BINDOFF N L. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report climate change 2013: the physical science basis summary for policymakers (No. Bajados de Internet/2013) [EB/OL]. [2016-09-22]. www.mendeley.com/research-papers/working-group-i-contribution-ipcc-fifth-assessment-report-climate-change-2013-physical-science-basis-33/

[2] 秦建国,张泉荣,洪国喜,等. 太湖地区 2011 年春季严重干旱成因与预测[J]. 水资源保护,2012,28(6):29-32. (QIN Jianguo, ZHANG Quanrong, HONG Guoxi, et al. Causes of a severe drought in spring of 2011 in Taihu Lake area and drought prediction [J]. Water Resources Protection, 2012,28(6):29-32. (in Chinese))

[3] 邵晓梅,许月卿,严昌荣,等. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2006,42(4):503-509. (SHAO Xiaomei, XU Yueqing, YAN Changrong, et al. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River Basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006,42(4):503-509. (in Chinese))

[4] WANG L, CHEN W. Equiratio cumulative distribution function matching as an improvement to the equidistant approach in bias correction of precipitation[J]. Atmospheric Science Letters, 2014,15(1):1-6.

[5] WOOD A W, MAURER E P, KUMAR A, et al. Longrange experimental hydrologic forecasting for the eastern United States[J]. Journal of Geophysical Research,2002,107(D20):4429.

[6] WOOD A W, LEUNG L R, SRIDHAR V, et al. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs[J]. Climatic Change,2004,62(1):189-216.

[7] 范丽军,符淙斌,陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(3):320-329. (FAN Lijun, FU Congbin, CHEN Deliang. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques[J]. Advances in Earth Science,2005,20(3):320-329. (in Chinese))

[8] LI H, SHEFFIELD J, WOOD E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching[J]. Journal of Geophysical Research, 2010,115(D10):985-993.

[9] 王晓燕,杨涛,郝振纯. 基于统计降尺度的黄河源区气象极值预测[J]. 水电能源科学,2011,29(4):1-4. (WANG Xiaoyan, YANG Tao, HAO Zhenchun. Climate extreme forecasting in headwater catchment of Yellow River based on statistical downscaling menthod[J]. Water Resoures and Power,2011,29(4):1-4. (in Chinese))

[10] 郝振纯,时芳欣,王加虎. 统计降尺度法在黄河源区未来降水变化分析中的应用[J]. 水电能源科学,2011,29(3):1-4. (HAO Zhenchun, SHI Fangxin, WANG Jiahu. Research and analysis of change of precipitation in headstream region of Yellow River by using statistical downscaling model[J]. Water Resources and Power,2011,29(3):1-4. (in Chinese))

[11] 段小兰,郝振纯,陈奕. 基于 BCSD 降尺度方法的黄河源区气候变化预测[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(3):195-199. (DUAN Xiaolan, HAO Zhenchun, CHEN Yi. Climate change forecasting in source region of Yellow River Based on BCSD downscaling method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014,42(3):195-199. (in Chinese))

[12] 马柱国. 黄河径流的历史演变规律及成因[J]. 地球物理学报,2005,48(6):1270-1275. (MA Zhuguo. Historical regular patterns of the discharge in the Yellow River and the cause of their formation[J]. Chinese Journal of Geophysics. 2005,48(6):1270-1275. (in Chinese))

[13] WILLMOTT C J, MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance [J]. Climate Research, 2005,30(1):79-82.

[14] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLIEST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]//Anon. In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology. Boston: American Meteorological Society, 1993:179-183.

[15] HAYES M J, SVOBODA M D, WILHITE D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999,80(3):429-438.

[16] LIVADA I, ASSIMAKOPOULOS V D. Spatial and temporal analysis of drought in greece using the Standardized Precipitation Index (SPI) [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007,89(3):143-153.