

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.06.002

气候变化对黄河流域生态径流影响预估

刘绿柳¹, 魏麟骁², 徐影¹, 辛晓歌¹, 肖潺¹

(1. 国家气候中心, 北京 100081; 2. 重庆市气候中心, 重庆 401147)

摘要: 人类活动和气候变化严重改变了黄河水文情势和生态径流, 分析未来气候变化对河流生态的影响对流域水资源管理和长期规划意义重大。本文对第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)的13个全球气候模式数据进行偏差订正, 驱动水文模型进行径流模拟, 应用流量历时曲线方法分析SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5情景下2026年至21世纪末年、季节尺度的花园口生态径流变化。结果表明: 订正能明显降低降水、气温模拟偏差; 人类活动严重影响了1986—2010年花园口生态径流; 2026—2100年年均气温和年降水量增加趋势显著, 低排放情景增速慢, 高排放情景增速快; 气候变化可在一定程度上缓解水库调控、水土保持等人类活动对生态径流的负面影响, SSP5-8.5情景缓解程度最高, 冬季缓解程度最高, 夏、秋季最低。

关键词: 生态径流; 气候变化; 偏差订正; 生态盈余; 生态赤字; 黄河流域

中图分类号: P435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2021)06-0824-10

为了充分开发和利用水资源, 各类水利工程建设逐年增加, 改变了河流在漫长的自然演变过程中形成的天然流量量值、时间、历时、频率等水文情势, 进而改变河流生态系统的水环境和生物多样性, 直接影响流域生态系统^[1]; 气候变化通过降水、气温等气候条件的变化影响径流, 间接对河流健康和流域生态系统形成威胁。探索流域生态流量一直是水文、生态、环境多学科交叉融合研究的重要内容。水文学法通过研究流量的变化将河流水文变化特征与河流生态需水联系起来^[2], 是研究生态流量的主要方法之一。1996年Richter等^[3]提出了基于日流量序列描述流量变化的水文变化指标体系(Indicators of Hydrological Alteration, IHA), 之后进一步提出基于IHA的变化范围法^[4-5], 用于定量评估水文情势改变程度及其对生态环境的可能影响。后来研究发现, IHA指标之间存在相关性, 容易造成信息冗余, 为避免由此带来的低效环境流管理决策, 学者开始尝试不同方法从中筛选出部分代表性指标。如Yang等^[6]以美国伊利诺伊河为例筛选出了6个代表性指标, Wang等^[7]通过研究长江三峡大坝影响筛选出5个代表性指标, 周星宇等^[8]以金沙江流域华弹水文站为研究对象筛选出7个代表性指标, 王鸿翔等^[9]以长江三口为例筛选出15个代表性指标。2007年Vogel等^[10]提出了生态盈余、生态赤字2个生态径流指标, 这2个指标与IHA指标具有高相关性, 能够反映IHA的参数信息, 有效解决了指标之间的冗余与相关关系, 可作为衡量河流生态需水的定量指标独立反映流域的生态径流信息、深入剖析河流水文健康情势演变特征, 为当前及未来风险的预测与应对提供重要科学信息^[11-15]。

黄河流域水库众多, 各类型水库逾3000座, 其中大中型水库170多座。水库运行不同程度地改变了流域地表天然水文过程的季节变化规律^[11,16-18]。研究表明, 气候变化和人类活动(本文中指水库调控、水土保持等)引起的径流过程变异对上游唐乃亥站的河流生态破坏风险低, 对花园口及下游孙口、利津站风险高。20世纪80年代至21世纪初, 黄河从上游到下游河流生态盈余均为0, 生态赤字程度从上游到下游逐级加重, 流域河道生态需水处于极度缺乏状态^[11]。全球气候变暖将持续对流域径流产生影响, 势必会通过改变河流水文情势影响河流生态径流。花园口站作为黄河流域重要水文站, 控制着全流域97%的集水面积, 天然径流量占全流域的95%以上^[19]。研究未来气候变化如何影响黄河流域径流过程, 以及流量变化能否缓解

收稿日期: 2021-05-20; 网络出版日期: 2021-10-27

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20211026.2126.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0605004; 2018YFE0196000)

作者简介: 刘绿柳(1973—), 女, 河北衡水人, 研究员, 博士, 主要从事气候变化影响评估。E-mail: liull@cma.gov.cn

河道需水缺乏问题、改善河流生态环境, 对于黄河流域生态保护和水利工程运行规划非常重要。

本研究拟通过研究花园口站未来不同气候变化情景下的生态盈余、生态赤字, 揭示气候变化对黄河河流生态的可能影响, 为黄河流域生态保护和水资源规划管理提供科学信息。

1 数据和方法

1.1 基础数据

气候模式数据来源于世界气候研究计划的耦合模式比较计划第6阶段(CMIP6)的13个全球气候模式(表1)1961—2100年降水和气温逐日数据。考虑到模式分辨率较粗且日尺度模拟偏差大, 本研究对不同分辨率的气候模式数据进行降尺度及偏差订正处理, 得到偏差较小的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率的日数据。气候模式订正所用的气候观测数据为基于2400余个中国地面气象台站观测资料经距平逼近方法插值建立的中国 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率的降水和气温数据^[20-21]。

1986—2010年花园口日观测流量序列来源于黄河流域水文资料, 用于计算基准期的生态盈余和生态赤字。

表1 13个CMIP6 GCMs模式基本信息
Table 1 General information of 13 CMIP6 GCMs

序号	模式	机构	分辨率(纬度×经度)
1	ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Bureau of Meteorology	$1.2^\circ \times 1.8^\circ$
2	ACCESS-ESM-1-5	Australian Research Council of Excellent for Climate System Science (Australia)	$1.2^\circ \times 1.8^\circ$
3	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration (China)	$1.1^\circ \times 1.1^\circ$
4	CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	$2.8^\circ \times 2.8^\circ$
5	CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Météorologiques-Centre Européen de Recherche et de	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$
6	CNRM-ESM2-1	Formation Avancée en Calcul Scientifique (France)	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$
7	HadGEM3-GC31-LL	Met Office Hadley Centre (United Kingdom)	$1.3^\circ \times 1.9^\circ$
8	INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics (Russia)	$1.5^\circ \times 2.0^\circ$
9	INM-CM5-0		$1.5^\circ \times 1.5^\circ$
10	IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace (France)	$1.3^\circ \times 2.5^\circ$
11	MIROC6	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, and R-CCS (Japan)	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$
12	MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	$0.9^\circ \times 0.9^\circ$
13	MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (Japan)	$1.1^\circ \times 1.1^\circ$

1.2 气候模式订正及检验评估

1.2.1 订正方法

在进行区域或流域尺度的气候变化及其影响预估研究时, 气候模式是目前获取未来气候信息的最常用方法, 而其较粗的空间分辨率及较大的日和次日尺度的模拟偏差降低了其应用于区域或流域气候变化及其影响评估的可靠性, 通常采用降尺度或订正方法以获取高分辨率、低模拟偏差的气候预估信息^[22-25]。本文应用空间降尺度和基于累积概率分布的等距离偏差订正结合的方法对参与CMIP6计划的13个全球气候模式的日降水和日气温数据进行订正。考虑到气候观测数据自1961年开始稳定, 而气候模拟数据历史时期截止到2014年, 为尽可能多地利用观测气候信息, 选取1961—2014年为训练期。

(1) 空间降尺度。假定当前粗分辨率数据中所反映的地形和气候特征在降尺度过程中保持不变。在此前提下, 先将观测数据的多年平均月降水量或月平均气温插值至模式分辨率, 计算插值后的观测气温与模式气温的差, 对于降水则计算插值后观测数据与模式数据的比值。然后将偏差场插值回观测数据分辨率, 并与原

观测数据相加或相乘,得到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率的CMIP6模式空间降尺度数据。

(2) 基于累积概率分布的等距离偏差订正。该方法是气候变化影响预估研究中常用且成熟的偏差订正方法^[26-27]。首先建立训练期实测序列、训练期模式模拟序列、预估期模式模拟序列的累积概率分布函数;然后,假定给定累积概率下训练期实测和模拟值的差值在未来时段保持不变,应用公式(1)对第一步得到的CMIP6模式空间降尺度气候预估值加以订正,得到订正后的逐日降水或逐日气温。其中,降水采用Gamma分布拟合,温度采用正态分布拟合。

$$C_{v,cor} = C_v + F_{ot}^{-1}(F_{mc}(C_v)) - F_{mt}^{-1}(F_{mc}(C_v)) \quad (1)$$

式中: $C_{v,cor}$ 为预估期模式订正值; C_v 为经过空间降尺度的预估期模式模拟值; F 为累积概率分布; F^{-1} 为逆累积概率分布;下标ot、mc、mt分别为训练期观测值、经过空间降尺度的订正期模式模拟值和经过空间降尺度的训练期模式模拟值。

1.2.2 订正效果检验评估

以1961—2014年多年平均观测场为参考系,分别计算订正前、订正后模拟场与观测场的皮尔逊相关系数(R_y)、相对标准差($\hat{\sigma}_y$)、中心化均方根误差(\hat{E}_{RMS})和泰勒技巧评分(S)4个指标^[28],定量评估该方法对研究区气温和降水的订正效果。其中, R_y 、 $\hat{\sigma}_y$ 和 S 值越接近1, \hat{E}_{RMS} 越接近0,表明模拟场与观测场越接近、偏差越小,反之,偏差越大。

$$R_y = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sigma_y \sigma_x} \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_y = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N}}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}} \quad (3)$$

$$\hat{E}_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y}) - (x_i - \bar{x})]^2}{N}} \quad (4)$$

$$S = \frac{(1 + R_y)^4}{4 \hat{\sigma}_y + \frac{1}{\hat{\sigma}_y}} \quad (5)$$

式中: y_i 为流域内第*i*个格点模拟值; x_i 为流域内第*i*个格点观测值; \bar{y} 为流域内所有格点模拟值平均值; \bar{x} 为流域内所有格点观测值平均值; N 为序列长度,等于54; σ_y 为流域内所有格点模拟值标准差; σ_x 为流域内所有格点观测值标准差。

1.3 未来气候及河流生态环境变化预估

1.3.1 基准期和预估时段

前人研究揭示花园口年径流在1985年发生突变^[29-30],花园口年实测径流与年天然径流比值变化也显示自1985年该比值明显降低。因此,本文取1985年为变异年,认为花园口观测年径流在1985年之后由于受到大规模水库调控、取用水等人类活动的影响明显减少。结合气候模式历史模拟数据和所获取的花园口日观测流量序列,将基准期确定为1986—2010年。

未来气候变化和生态径流预估针对2026—2050年(P1)、2051—2075年(P2)、2076—2100年(P3)3个时段展开,分别代表近期、中期、远期(或世纪末)。

1.3.2 天然径流重建与未来径流预估

水文模型是径流重建和未来气候变化情景下径流预估的常用方法之一。HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) 水文模型最初由瑞典国家水气象局开发,由于参数少、对输入数据要求低的特点不断被改进形成了多个版本,在全球得到广泛应用。其中的 HBV-D 模型针对大尺度流域水文模拟开发^[31],研究表明该模型能够较好地模拟不受人类活动影响的黄河花园口径流过程,率定期和验证期的纳什效率系数超过 0.7,径流量模拟偏差低于 5.5%^[17,32]。本研究利用已经率定好的研究区 HBV-D 水文模型,应用观测气候驱动水文模型得到基准期天然径流序列,应用气候模式订正数据驱动水文模型模拟基准期和预估期不受人类活动影响情况下的径流序列。

1.3.3 气候变化预估

应用气温距平、降水距平百分率定量分析 3 种气候变化情景 (SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5) 下近期、中期、远期 3 个时段黄河流域气温和降水相对基准期的变化。SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 分别代表可持续发展路径的低强迫 (低排放)、中度发展路径的中等强迫 (中等排放)、不平衡发展路径的高强迫 (高排放) 情景。为了消除预估结果中气候模式结构的不确定性,先分别计算 13 个模式对应的降水和气温,然后对算术平均值进行分析。

1.3.4 生态径流估算

生态剩余和生态赤字是基于流量历时曲线 (Flow Duration Curve, FDC) 的一种量纲一化生态径流指标,最初由 Vogel 等^[10]于 2007 年提出。FDC 可以简单直观地表现径流大小和频率的关系,由选择时间段的日流量数据得到。对时段内日流量数据由大到小排列,计算该时段内某个流量与等于或大于该流量所对应的概率,从而得到流量与超越概率的关系曲线。以水文变异前的中位数 FDC 作为阈值,将生态盈余定义为某个时期 (如年、季节、月) 高于变异前中位数 FDC 与当年 FDC 围成的面积与变异前多年平均值之比,生态赤字则为低于变异前中位数 FDC 与当年 FDC 围成的面积与变异前多年平均值之比。Gao 等^[33]2012 年对该定义做了改进,不再以变异前中位数 FDC 作为阈值,而是用 75% 分位数 FDC 定义生态盈余阈值,用 25% 分位数 FDC 定义生态赤字阈值。在量纲一化处理时考虑到多年平均值易受极值流量影响,本研究采用 Wang 等^[7]2017 年提出的中位数方法进行量纲一化处理,生态径流阈值采用 25% 和 75% 分位数方法确定^[33]。

考虑到水库调控主要通过改变径流的年内分配对季节生态径流产生影响,从年和季节 2 个时间尺度分别分析生态赤字和生态盈余的变化。基于 1986—2010 年的年、春季、夏季、秋季、冬季天然径流量,分别取各个序列 25%、75% 分位数对应年份的相应时间尺度的日流量 FDC 作为生态赤字、生态盈余的阈值曲线,中位数年份对应的相应时间尺度的日流量 FDC 面积进行量纲一化处理。为了便于考虑 1986—2010 年整个时段人类活动特别是水库调控引起的平均生态盈余和生态赤字变化,用各个相应时间尺度的观测径流序列的中位数对应年份的日径流与阈值曲线间的面积表示,然后对之进行量纲一化处理。

在分析气候变化能否缓解当前人类活动对花园口生态径流的负面影响时,采用同样的阈值曲线和量纲一化处理方法。不同的是,用预估时段逐年的年、春季、夏季、秋季、冬季的日径流序列计算相应时间尺度的逐年生态赤字和生态盈余。用生态盈余与生态赤字之差表示综合生态径流,用综合生态径流与基准期生态赤字的比值表示缓解程度。为了消除气候模式带来的不确定性,采用与气候变化预估类似的方法,先分别计算 13 个模式对应的生态径流,然后用其算术平均值预估生态径流变化。

2 结果分析

2.1 气候模式订正效果评估

2.1.1 气温

表 2 列出了气候模式直接输出与模式订正数据对研究区年均气温的模拟性能评估结果。从表中可以看

出,模式气温的中心化均方根误差超过1.28,订正气温的小于0.13,较模式更接近于0;观测与模式气温的相关系数为0.95~0.98,与订正气温的相关系数更接近1;模式气温的相对标准差为0.84~1.23,订正气温接近1;模式气温的泰勒技巧评分为0.93~0.97,订正气温为0.97~1.00;即订正气温的这3个指标值更接近1。表明订正气温的空间分布形态与观测场非常接近,能更好地再现黄河流域年均气温。

2.1.2 降水

表2列出了气候模式直接输出与模式订正数据对研究区年降水量的模拟性能评估结果。从表中可以看出,模式模拟降水的中心化均方根误差超过0.47,订正降水的小于0.17,较模式模拟更接近于0;观测与模式模拟降水的相关系数为0.56~0.87,与订正降水的相关系数接近1;模式降水的相对标准差为1.59~3.03,订正降水为0.99~1.09;模式降水的泰勒技巧评分为0.22~0.68,订正降水均大于0.97;即订正降水的这3个指标值更接近1。表明订正降水的空间分布形态与观测场更为接近,能更好地再现黄河流域年降水量。

表2 模式直接输出和订正的年均气温、年降水量的模拟能力比较

Table 2 Performance of mean annual temperature and precipitation by climate models and bias correction

模式 序号	年均气温								年降水量							
	R_y		$\hat{\sigma}_y$		\hat{E}_{RMS}		S		R_y		$\hat{\sigma}_y$		\hat{E}_{RMS}		S	
	模式	订正	模式	订正	模式	订正	模式	订正	模式	订正	模式	订正	模式	订正	模式	订正
1	0.97	1.00	0.91	1.00	1.28	0.02	0.96	1.00	0.74	1.00	2.15	1.03	0.82	0.04	0.44	1.00
2	0.96	1.00	0.84	1.00	1.47	0.02	0.93	1.00	0.75	1.00	1.75	1.02	0.85	0.03	0.57	1.00
3	0.97	1.00	0.93	1.00	1.80	0.01	0.96	0.97	0.77	1.00	1.64	1.09	0.74	0.17	0.62	0.97
4	0.95	1.00	0.89	1.00	3.48	0.13	0.94	1.00	0.76	1.00	2.47	0.99	1.16	0.04	0.37	1.00
5	0.97	1.00	1.22	1.00	3.19	0.05	0.94	1.00	0.76	1.00	1.84	1.00	0.54	0.08	0.55	1.00
6	0.98	1.00	1.23	1.00	2.51	0.08	0.94	1.00	0.77	1.00	1.78	1.00	0.51	0.08	0.57	1.00
7	0.96	1.00	1.02	1.00	1.48	0.03	0.96	1.00	0.85	1.00	1.63	1.01	0.64	0.04	0.68	1.00
8	0.96	1.00	1.01	1.00	1.60	0.03	0.96	1.00	0.64	1.00	2.94	0.99	1.93	0.03	0.25	1.00
9	0.95	1.00	1.02	1.00	1.49	0.02	0.95	1.00	0.56	1.00	3.03	1.00	1.90	0.03	0.22	1.00
10	0.97	1.00	1.19	1.00	4.17	0.09	0.94	1.00	0.87	1.00	1.67	0.99	0.47	0.04	0.68	1.00
11	0.96	1.00	0.93	1.00	2.95	0.04	0.95	1.00	0.86	1.00	2.03	1.04	1.14	0.05	0.55	1.00
12	0.97	1.00	1.03	1.00	1.59	0.07	0.97	1.00	0.83	1.00	1.78	1.05	0.59	0.03	0.61	1.00
13	0.97	1.00	1.10	1.00	1.29	0.02	0.96	1.00	0.67	1.00	1.59	1.06	0.50	0.05	0.57	1.00

2.2 未来气候变化预估

2.2.1 年均气温变化

SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5情景下多模式集合平均的年均气温在2026—2100年期间分别以0.1℃/10a、0.3℃/10a、0.6℃/10a的速度显著升高。从图1(a)给出的近期、中期、远期3种情景下多模式集合平均的年均气温箱线图可以看出,低排放情景升温最慢,近期年均气温相对基准期升高1.5℃,到21世纪末期升高2.1℃;中等排放情景升温幅度从近期1.6℃增加到21世纪末的3.1℃;高排放情景升温最快,升温幅度从近期的2.0℃增加到21世纪末的5.1℃,个别年份升温达6℃。温度变化与前人得到的3种情景(RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5)下流域温度升高、且高排放情景升温幅度高于低排放情景的研究结论一致^[32-33]。

2.2.2 年降水量变化

SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5情景下多模式集合平均的年降水量在2026—2100年期间分别以0.7mm/10a、1.8mm/10a、4.0mm/10a的速度增加。从图1(b)给出的近期、中期、远期3种情景下多模式集合平均的年降水量箱线图可以看出,低排放情景增速最慢,时段平均的降水距平百分率从近期的11.7%逐渐增加到21世纪末的15.4%;中等排放情景则在近期增加10.9%,到21世纪末增加19.6%;高排放情景增速最快,3个时段分别增加13.2%、22.7%、32.7%,个别年份降水量增加达40%。降水增加趋

势与前人研究得到的 RCPs (Representative Concentration Pathways) 情景下该流域降水变化预估结论一致^[32,34]。

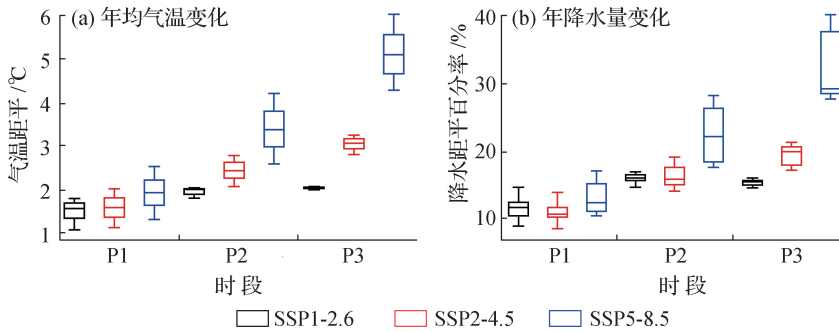


图 1 不同情景下 3 个时段多模式集合平均的年均气温和年降水量相对基准期变化

Fig. 1 Changes in annual mean temperature and annual precipitation of the multi-models relative to baseline for 2026—2050, 2051—2075, and 2076—2100 under scenarios of SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5

2.3 基准期生态径流

根据 1.3.4 节计算方法, 人类活动引起的基准期年和 4 个季节生态盈余均为 0, 生态赤字依次为 0.295、0.150、0.222、0.375、0.030。表明人类活动严重影响了花园口生态径流, 其中, 秋季生态径流受影响最严重, 其次是夏季, 冬季受影响最小。

2.4 未来生态径流预估

2.4.1 年生态径流预估

表 3 列出了 3 种情景下 (SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5) 2026—2100 年集合平均的年和季节尺度的生态径流变化速度及其显著性。从表中可以看出, SSP1-2.6、SSP5-8.5 情景下多模式集合平均的年生态盈余在 2026—2100 年期间分别以 0.003/10 a、0.014/10 a 的速度显著增加。其中, SSP5-8.5 情景增速最快, 从近期的 0.106 逐步增加到 21 世纪末的 0.172; SSP2-4.5 情景表现出先增加后减少的阶段性变化 (图 2(a)), 近期、中期、远期集合平均值分别为 0.110、0.115、0.109。图 2(a) 进一步显示, 尽管存在年际变化和阶段性变化, 3 种情景下 2026 年至 21 世纪末年生态盈余均为正值, 大于基准期 0 生态盈余。3 个情景在 2026—2050 年期间相差不大, 但 21 世纪末期 SSP5-8.5 情景明显大于其他 2 个情景。

表 3 不同情景下 2026—2100 年集合平均的年、季节生态径流变化速度

Table 3 Rate of changes in multiple model mean of annual and seasonal ecological flow under scenarios of SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 during 2026—2100

时间尺度	生态盈余			生态赤字			综合生态径流		
	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
年	0.003 **	9×10^{-5}	0.014 **	5×10^{-4}	0.001 **	-0.001 **	0.002 **	-0.001 *	0.015 **
春季	0.004 **	-1×10^{-5}	0.008 **	-1×10^{-4}	0.001 **	8×10^{-4} **	0.004 **	-0.001	0.007 **
夏季	0.001	3×10^{-4}	0.009 **	-2×10^{-4}	0.004 **	7×10^{-4}	0.001	-0.004 **	0.008 **
秋季	0.003 *	0.002	0.022 **	-2×10^{-4}	7×10^{-4} *	-9×10^{-4} **	0.003	0.002	0.023
冬季	0.003 *	0.006 **	0.038 **	8×10^{-5}	-0.0001	-0.001 **	0.003 **	0.006 **	0.039 **

注: * 表示通过 0.05 显著性水平检验; ** 表示通过 0.01 显著性水平检验。

SSP5-8.5 情景下集合平均的年生态赤字以 0.001/10 a 的速率显著下降, 逐步从近期的 0.034 下降到 21 世纪末的 0.031; SSP2-4.5 情景下则以 0.001/10 a 的速度显著增加, 从近期低于 0.039 逐渐增加到 21 世纪末的 0.044; SSP1-2.6 情景下略有增加, 但趋势不显著, 3 个时段平均值为 0.032 ~ 0.036。3 个情景间, SSP2-4.5 较

其他2个情景赤字严重,特别是21世纪末(图2(b))。另外,未来气候变化引起的生态赤字远远小于基准期人类活动引起的生态赤字。

SSP1-2.6、SSP5-8.5情景下的年综合生态径流为显著增加趋势,而SSP2-4.5情景下显著减少。SSP5-8.5情景下生态盈余增加,生态赤字减少,导致年综合生态径流较生态盈余增速更快(表3),高于其他2个情景,特别是21世纪末期,可达0.141(图2(c))。与人类活动引起的基准期0.295生态赤字相比,未来气候变化能够在一定程度上缓解基准期人类活动对生态径流的负面影响,21世纪末SSP2-4.5情景下缓解程度最低,约缓解22%的生态赤字,同期SSP5-8.5缓解最多,约缓解48%。

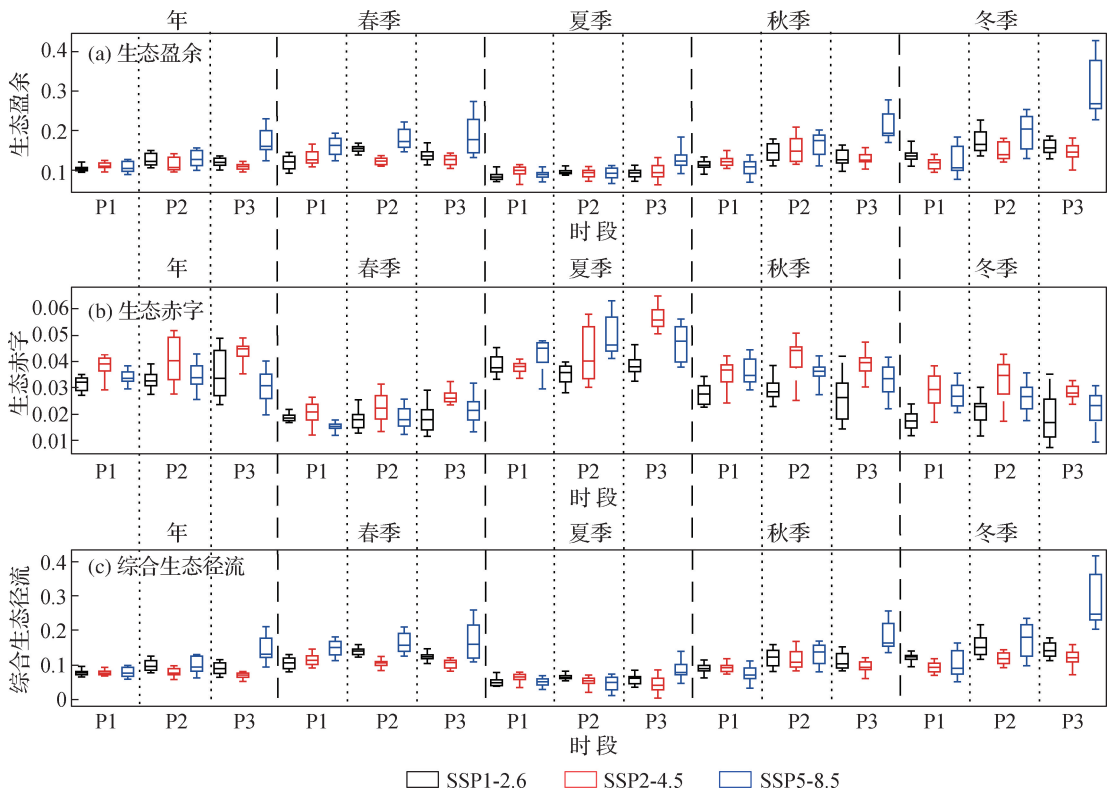


图2 不同情景下3个时段多模式集合平均的年、季节生态盈余

Fig.2 Multi-models mean of annual and seasonal eco-surplus, eco-deficit and net eco-flow for three periods under different scenarios

2.4.2 季节生态径流预估

从表3可以看出,2026—2100年间,集合平均的春季生态盈余在SSP1-2.6、SSP5-8.5情景下分别以0.004/10 a、0.008/10 a的速率显著增加,而SSP2-4.5情景下无趋势性变化;生态赤字在SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下为显著增加趋势,且SSP2-4.5情景增速更快,逐步从近期的0.021增加到21世纪末的0.027,而SSP1-2.6情景下略有减少。夏季,生态盈余在SSP5-8.5情景下以0.009/10 a的速率显著增加,而SSP1-2.6、SSP2-4.5情景下没有显著趋势性变化;生态赤字在SSP2-4.5情景下以0.004/10 a的速率增加显著,其他2个情景无明显趋势性变化。秋季,生态盈余在SSP1-2.6、SSP5-8.5情景下以0.003/10 a和0.022/10 a的速率显著增加,SSP2-4.5情景下增加不显著;生态赤字在SSP2-4.5情景下显著增加,SSP5-8.5情景下减少。冬季,生态盈余在3种情景下均显著增加,高排放情景增速最快;生态赤字在SSP5-8.5情景显著减少,其他2个情景下无显著趋势性变化。

图2表明,季节生态盈余和生态赤字都具有明显的年际变化、阶段性变化和情景间差异。春季生态盈余在21世纪末高于前期和中期,SSP5-8.5情景明显大于其他2个情景;生态赤字在SSP2-4.5情景下高于其他2个情景。夏季,生态盈余在SSP5-8.5情景下大于其他2个情景远期,且远期明显大于近期和中期,约为近

期的4.5倍;生态赤字最大值出现在21世纪末中等排放情景,约为近期值的1.5倍。秋季,生态盈余在SSP1-2.6、SSP2-4.5情景下中期大于近期和远期,分别为0.146、0.132,SSP5-8.5在21世纪末最大,约为2026—2050年的2倍。冬季,生态盈余在SSP5-8.5情景下远期最大,达0.304,为2026—2050年的2.4倍;生态赤字最大值出现在SSP2-4.5情景,约0.033,最小值出现于SSP5-8.5情景下21世纪末期。

综合表3和从图2,可以看出气候变化引起的生态赤字明显小于生态盈余,综合生态径流为正,夏季低于其他3个季节。春季综合生态径流在SSP1-2.6、SSP5-8.5情景下显著增加,SSP2-4.5情景下为减少趋势;夏季综合生态径流在SSP1-2.6情景下不显著增加,SSP5-8.5情景下显著增加,而SSP2-4.5显著减少,最大生态径流出现于21世纪末期SSP5-8.5情景,最小值出现在同时期的SSP2-4.5情景,分别为0.078、0.038;秋季综合生态径流在3种情景下不显著增加,最大生态径流出现的SSP5-8.5情景21世纪末期,达0.17,最小值出现在2050年前,为0.07;冬季综合生态径流在3种情景下显著增加,SSP5-8.5情景增速最大,21世纪末达0.272,最小值出现在2050年前的中等排放情景,为0.089。

与基准期人类活动引起的各季节生态赤字相比,3种情景下近期、中期、远期未来气候变化约能缓解基准期人类活动负面影响的百分比在春季达65%以上、在夏季为17%~35%、在秋季为19%~46%,在冬季达90%以上。

3 结 论

依据偏差订正后的CMIP6全球气候模式数据驱动下的径流模拟数据和FDC河流生态径流计算方法,开展了黄河流域未来生态径流变化预估研究,得到以下主要结论:

(1)与气候模式直接输出结果相比,订正后的降水和气温能更好地再现黄河流域降水和气温空间分布形态,从而提高流域气候变化和径流预估结果的可靠性。2026—2100年3种情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5)下,年降水量增加、年均气温上升,低排放情景增速最慢,高排放情景增速最大。

(2)水库调控严重影响了1986—2010年的花园口生态径流,生态盈余为0,生态赤字秋季最大、冬季最小,分别为0.375、0.030。

(3)2026—2100年,气候变化将不同程度减缓基准期人类活动对年尺度、季节尺度生态径流的负面影响,其中高排放情景缓解程度最高。4个季节中,冬季缓解程度最高,其次是春季,夏季和秋季缓解程度最低,意味着未来这2个季节仍面临严重的生态缺水问题。

(4)21世纪末期,3种排放情景下气候变化将缓解基准期人类活动对年生态径流负面影响的22%~48%左右、对春季负面影响的65%或更多、对夏季负面影响的17%~35%、对秋季负面影响的19%~46%,以及对冬季的大部分负面影响。

参考文献:

- [1] 舒畅,刘苏峡,莫兴国,等.基于变异性范围法(RVA)的河流生态流量估算[J].生态环境学报,2010,19(5):1151-1155.(SHU C,LIU S X,MO X G,et al.Estimation of instream ecological flow based on RVA[J].Ecology and Environmental Sciences,2010,19(5):1151-1155.(in Chinese))
- [2] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较[J].水动力学研究与进展(A辑),2003,18(3):294-301.(YANG Z F,ZHANG Y.Comparison of methods for ecological and environmental flow in river channels[J].Journal of Hydrodynamics,2003,18(3):294-301.(in Chinese))
- [3] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,POWELL J,et al.A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems[J].Conservation Biology,1996,10(4):1163-1174.
- [4] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,WIGINGTON R,et al.How much water does a river need?[J].Freshwater Biology,1997,37(1):231-249.
- [5] RICHTER B D,BAUMGARTNER J V,BRAUN D P,et al.A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network

- [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1998, 14(4): 329-340.
- [6] YANG Y C E, CAI X M, HERRICKS E E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: a data mining approach for fish community analysis[J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(4): W04412.
- [7] WANG Y K, WANG D, LEWIS Q W, et al. A framework to assess the cumulative impacts of dams on hydrological regime: a case study of the Yangtze River[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(17): 3045-3055.
- [8] 周星宇, 黄晓荣, 赵洪彬. 基于主成分分析法的河流水文改变指标优选[J]. *人民长江*, 2020, 51(6): 101-106. (ZHOU X Y, HUANG X R, ZHAO H B. Optimization of hydrological alteration indicators based on principal component analysis[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(6): 101-106. (in Chinese))
- [9] 王鸿翔, 李萌萌, 马志军, 等. 长江荆江三口环境流变化研究[J]. *水力发电*, 2019, 45(5): 1-6. (WANG H X, LI M M, MA Z J, et al. Study on environmental flow variation of the three outlets of Jingjiang River of Yangtze River[J]. *Water Power*, 2019, 45(5): 1-6. (in Chinese))
- [10] VOGEL R M, SIEBER J, ARCHFIELD S A, et al. Relations among storage, yield, and instream flow[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(5): W05403.
- [11] 张宗娇, 张强, 顾西辉, 等. 水文变异条件下的黄河干流生态径流特征及生态效应[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2021-2033. (ZHANG Z J, ZHANG Q, GU X H, et al. Changes of eco-flow due to hydrological alterations in the Yellow River basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12): 2021-2033. (in Chinese))
- [12] GAO Y X, VOGEL R M, KROLL C N, et al. Development of representative indicators of hydrologic alteration[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1/2): 136-147.
- [13] ZHANG Q, GU X H, SINGH V P, et al. Evaluation of ecological instream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 711-722.
- [14] 温庆志, 姚蕊, 孙鹏, 等. 变异条件下淮河流域生态径流变化特征及驱动因子[J]. *生态学报*, 2020, 40(8): 2621-2635. (WEN Q Z, YAO R, SUN P, et al. Change characteristics and driving factors in nonstationary ecological flow condition across the Huai River basin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2621-2635. (in Chinese))
- [15] 江善虎, 周乐, 任立良, 等. 基于生态流量阈值的河流水文健康演变定量归因[J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 356-365. (JIANG S H, ZHOU L, REN L L, et al. Quantifying attribution of the river hydrological health variation based on ecological-flow threshold method[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 356-365. (in Chinese))
- [16] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 153-161. (ZHANG J Y, WANG G Q, JIN J L, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))
- [17] YANG T, ZHANG Q, CHEN Y D, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the Middle and Lower Yellow River, China[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(18): 3829-3843.
- [18] LIU L L, LIU Z F, REN X Y, et al. Hydrological impacts of climate change in the Yellow River basin for the 21st century using hydrological model and statistical downscaling model[J]. *Quaternary International*, 2011, 244(2): 211-220.
- [19] LIU L L, WU Y, ZHANG P Q, et al. Predictability of seasonal streamflow forecasting based on CSM: case studies of top three largest rivers in China[J]. *Water*, 2021, 13(2): 162.
- [20] 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. (in Chinese))
- [21] XU Y, GAO X J, SHEN Y, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 763-772.
- [22] INES A V M, HANSEN J W. Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138(1/2/3/4): 44-53.
- [23] PIANI C, WEEDON G P, BEST M, et al. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 395(3/4): 199-215.
- [24] 刘绿柳, 任国玉. 百分位统计降尺度方法及在 GCMs 日降水订正中的应用[J]. *高原气象*, 2012, 31(3): 715-722. (LIU L L, REN G Y. Percentile statistical downscaling method and its application in the correction of GCMs daily precipitation in China [J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(3): 715-722. (in Chinese))

- [25] SU B D, HUANG J L, GEMMER M, et al. Statistical downscaling of CMIP5 multi-model ensemble for projected changes of climate in the Indus River basin[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 178/179: 138-149.
- [26] LI H B, 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: Atmospheres*, 2010, 115(D10): D10101.
- [27] JIANG T, SU B D, HUANG J L, et al. Each 0.5 °C of warming increases annual flood losses in China by more than US \$ 60 billion[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, 101(8): E1464-E1474.
- [28] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D7): 7183-7192.
- [29] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 313-323. (WANG G Q, ZHANG J Y, GUAN X X, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [30] WANG X J, YUAN P X, YUAN X M, et al. Power law distribution characteristics of daily streamflow in the Yellow River basin under a changing environment[J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2020, 11(4): 1603-1618.
- [31] KRYSANOVA V, BRONSTERT A, MÜLLER-WOHLFEIL D I. Modelling river discharge for large drainage basins: from lumped to distributed approach[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 1999, 44(2): 313-331.
- [32] LIU L L, JIANG T, XU H M, et al. Potential threats from variations of hydrological parameters to the Yellow River and Pearl River basins in China over the next 30 years[J]. *Water*, 2018, 10(7): 883.
- [33] GAO B, YANG D W, ZHAO T, et al. Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 448/449: 30-38.
- [34] 王国庆, 乔翠平, 刘铭璐, 等. 气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析[J]. *水利水运工程学报*, 2020(2): 1-8. (WANG G Q, QIAO C P, LIU M L, et al. The future water resources regime of the Yellow River basin in the context of climate change[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(2): 1-8. (in Chinese))

Projection of climate change impacts on ecological flow in the Yellow River basin*

LIU Lyuliu¹, WEI Linxiao², XU Ying¹, XIN Xiaoge¹, XIAO Chan¹

(1. *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*;

2. *Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China*)

Abstract: Climate change and human activities has severely changed streamflow and eco-flow in the Yellow River basin. It is of great significance for the long-term management and planning of water resources to analyze whether future climate change will alleviate the impacts of human activities on the river. Here, daily runoff was simulated using hydrological model which was driven by the dataset of 13 climate models from Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) after correction. Then, both annual and seasonal variation of eco-flow at Huayankou station from 2026 to 2100 were estimated based on the method of flow duration curve under scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. The results suggest that bias was reduced obviously after correction, human activities severely affected eco-flow at the Huayankou station during 1986—2010, the increasing trends of annual mean temperature and annual precipitation will be significant from 2026 to 2100 with the smallest rate under SSP1-2.6 but the largest rate under SSP5-8.5, and climate change will alleviate the negative impacts of human activities on eco-flow in the Yellow River Basin to some extent, with the most under scenario SSP5-8.5, and the most in winter but the least in summer and autumn.

Key words: eco-flow; climate change; bias correction; eco-surplus; eco-deficit; Yellow River basin

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No.2017YFA0605004; No.2018YFE0196000).