

韩忠青, 刘招, 肖瑜, 等. 未来气候情景下引汉济渭工程水源区水文情势演变规律研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 26-38. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.003

HAN Zhongqing, LIU Zhao, XIAO Yu, et al. Research on the evolution law of hydrological situation in the water source area of the Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project under future climate scenarios[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 26-38. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.003

# 未来气候情景下引汉济渭工程水源区水文情势演变规律研究

韩忠青<sup>1,2,3</sup>, 刘招<sup>1,2,3</sup>, 肖瑜<sup>4</sup>, 张嘉琪<sup>1,2,3</sup>, 张晋霞<sup>1,2,3</sup>, 岳甲寅<sup>1,2,3</sup>, 申思齐<sup>1,2,3</sup>

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西西安 710054; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安 710054; 3. 长安大学水利部旱区生态水文与水安全重点实验室, 陕西西安 710054; 4. 陕西水务发展科技集团, 陕西西安 710054)

**摘要:**【目的】为探究气候变化条件下引汉济渭工程水源区的水资源情势, 保障跨流域调水重大工程高效和持续运行, 【方法】采用第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)中CMCC-ESM2气候模式下的3种情景(SSP1-2.6、SSP3-7.0、SSP5-8.5)数据, 驱动引汉济渭工程水源区SWAT模型, 分析未来气候情景下引汉济渭工程水源区水文情势演变趋势。【结果】结果显示: 未来2025—2100年, SSP1-2.6情景下, 水源区降水和径流均呈减少趋势, 最高、最低气温呈增加趋势, 但近期(2025—2050年)、中期(2051—2075年)和远期(2076—2100年)降水量和径流量均高于基准期(1980—2020年); SSP3-7.0情景下降水、径流和最高、最低气温均呈增加趋势, 但SSP3-7.0情景下近期、中期和远期降水量均低于基准期, 近期径流量也低于基准期; SSP5-8.5情景下降水、径流和最高、最低气温也呈增加趋势, 近期、中期和远期降水量和径流量均高于基准期。【结论】未来随着辐射强迫的增加, 引汉济渭工程水源区有变暖、变湿的趋势。通过对未来气候变化进行模拟, 分析引汉济渭工程水源区水文情势演变趋势, 可为引汉济渭工程水资源调配和管理, 区域水资源利用提供科学依据和理论支撑。

**关键词:** 气候变化; 引汉济渭工程; SWAT; CMIP6; 径流模拟; 降水; 全球变暖; 水文情势

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.003

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV121

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0026-13



## Research on the evolution law of hydrological situation in the water source area of the Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project under future climate scenarios

HAN Zhongqing<sup>1,2,3</sup>, LIU Zhao<sup>1,2,3</sup>, XIAO Yu<sup>4</sup>, ZHANG Jiaqi<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jinxia<sup>1,2,3</sup>, YUE Jiayin<sup>1,2,3</sup>, SHEN Siqu<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Subsurface

收稿日期: 2024-04-20; 修回日期: 2024-06-18; 录用日期: 2024-06-18; 网络出版日期: 2024-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42207084); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-QN-0372)

作者简介: 韩忠青(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 2743997686@qq.com

通信作者: 刘招(1975—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: lz975@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of Ministry of Water Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Shaanxi Water Development Technology Group, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the water resource situation in the water source area of the Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project under climate change conditions, and to ensure the efficient and sustainable operation of major cross basin water transfer projects. [Methods] Three scenarios (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5) under the CMCC-ESM2 climate model in the 6th International Coupled Model Intercomparison Program (CMIP6) were used to drive the SWAT model of the water source area of the Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project, and to analyze the evolution trend of hydrological conditions in the water source area of the Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project under future climate scenarios. [Results] The result showed that from 2025 to 2100, under the SSP1-2.6 scenario, the precipitation and runoff in the water source area showed a decreasing trend, while the highest and lowest temperatures showed an increasing trend. However, the precipitation and runoff in the near future (2025—2050), medium term (2051—2075), and long term (2076—2100) were higher than those in the reference period (1980—2020); Under the SSP3-7.0 scenario, precipitation, runoff, and highest and lowest air temperatures all show an increasing trend. However, under the SSP3-7.0 scenario, the precipitation in the near, medium, and long term is lower than the baseline period, and the recent runoff is also lower than the baseline period; Under the SSP5-8.5 scenario, precipitation, runoff, and maximum and minimum temperatures also show an increasing trend, with recent, medium-term, and long-term precipitation and runoff all higher than the baseline period. [Conclusion] In the future, with the increase of radiation forcing, there will be a trend of warming and wetting in the water source area of Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project. By simulating future climate change and analyzing the evolution trend of hydrological conditions in the water source area of the Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project, scientific basis and theoretical support can be provided for the allocation and management of water resources in the project and the utilization of regional water resources.

**Keywords:** climate change; Hanjiang-to-Weihe River Valley Water Diversion Project; SWAT; CMIP6; runoff simulation; precipitation; global warming; hydrological situation

## 0 引言

跨流域调水工程是解决水资源空间分布不均,保障区域用水安全的重要举措,引汉济渭工程是国家“十四五”规划的重点跨流域调水工程,是陕西省水资源优化配置、破解水资源瓶颈制约的重要战略举措。引汉济渭工程从黄金峡三河口水库引水,将汉江流域丰沛的水资源调配到水资源短缺的渭河流域,有效地缓解了关中地区水资源短缺带来的供需矛盾。

当前,随着碳排放的持续增加,全球气温持续上升,地球气候系统正在经历一次以变暖为主要特征的显著变化<sup>[1]</sup>。IPCC 第六次评估报告指出,全球平均表面气温将在未来 20 a 内达到或超过 1.5 °C,平均降水也将增加<sup>[2]</sup>。全球气温的不断上升将加速全球水文循环的过程,更改降水和气温的时空分布特征<sup>[3]</sup>。全球变暖趋势的加剧,也对跨流域调水工程产生了重大影响<sup>[4]</sup>。王蕊等<sup>[5]</sup>基于 DTVGM 模型模拟了未来气候条件下南水北调中线工程受水区潜水位的变化,结果表明未来气候条件下,受水区潜水位普遍抬升。WANG 等<sup>[6]</sup>基于 CMIP6 预测了引汉济渭工程

受水区和取水区同时发生干旱的可能性,结果发现未来受水区和取水区并发干旱的可能性将增加。何静等<sup>[7]</sup>采用 Copula 函数分析了气候变化情景下滇中引水工程水源区与受水区降水丰枯变化趋势,认为水源区与受水区降水区域差异变大,时空差异显著。邓乐乐等<sup>[8]</sup>基于 Budyko 框架及径流变化情势指标同气象因子的拟合关系,开展汉江上游年均径流、汛期平均径流和非汛期平均径流情势变化及归因研究,认为汉江所有径流指标均发生变异且明显减小。因此,分析未来气候情景下降水、气温和径流的变化规律,可以为引水工程水资源管理调度提供参考意见。

全球气候模式可以较为精确地模拟地面气温、降水、风速等气象要素,是目前用来预测未来气候变化的重要工具之一<sup>[9-12]</sup>。CMIP6 是世界气候研究计划 (World Climate Research Program) 开发的最新耦合模式比较计划。CMIP6 是 CMIP 计划实施以来参与模式数量最多、实验数据模拟量最庞大的一次,同时相较于 CMIP5, CMIP6 融入了未来共享社会经济 (SSPs) 和典型浓度路径 (RCPs)<sup>[13-14]</sup>。已有研究表明 CMIP6 模式数据在中国区域有较好的适用性。YANG 等<sup>[15]</sup>

评估了 20 个 CMIP6 耦合模式在模拟中国降水和气温方面的模拟性能, 结果发现 CMIP6 模式在模拟温度和降水的气候空间分布方面表现较好, 对温度的模拟效果优于对降水的模拟效果。ZHANG 等<sup>[16]</sup>评估了 42 个 CMIP6 气候模式对新疆 1995—2014 年气温和降水的模拟能力, 发现大多数模式高估了新疆地区降水量, 并且普遍对温度和降水的空间变异性模拟较差。

本文以引汉济渭工程水源区为研究对象, 基于 CMCC-ESM2 模式下的 3 种情景数据 (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5), 采用 Delta 统计降尺度模型, 模拟未来 2025—2100 年的气候变化, 并耦合 SWAT 模型, 预测了不同气候情景下的径流, 进而探究不同气候情景模式下引汉济渭工程水源区水文情势演变规律, 以期对引汉济渭工程水资源管理调度和水资源风险管理提供理论支撑。

## 1 研究区及数据

### 1.1 研究区概况

引汉济渭工程水源区主要包括石泉水文站以上汉江流域, 汉江发源于秦岭南麓, 是长江最大的支流。石泉以上的汉江流域 (E105° 50'—E108° 40', N32°20'—N34°15') 总汇流面积 2.41 万 km<sup>2</sup>, 约占汉江上游流域面积的 25%。研究区地理概况及气象站点分布如图 1 所示。研究区地形呈现西北高、东南低的特点, 流域水系呈羽毛状分布, 区域内气候属于典型的亚热带季风气候, 流域降水年内分配不均匀, 主要集中于 5—10 月, 流域内径流主要由降雨产生, 因而导致流域内径流变差系数较大。

### 1.2 数据来源

构建 SWAT 模型需要数字高程模型 (DEM)、土地利用、土壤类型、气象水文等基础数据。本文采用的石泉以上汉江流域 DEM 数据, 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 分辨率为 30 m。土地利用栅格数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所 (<http://www.resdc.cn/>), 精度为 30 m。土壤数据选用于来源于世界粮农组织 FAO (Food and Agriculture Organization) 的世界土壤数据库 HWSO (Harmonized World Soil Database) 中的中国土壤数据

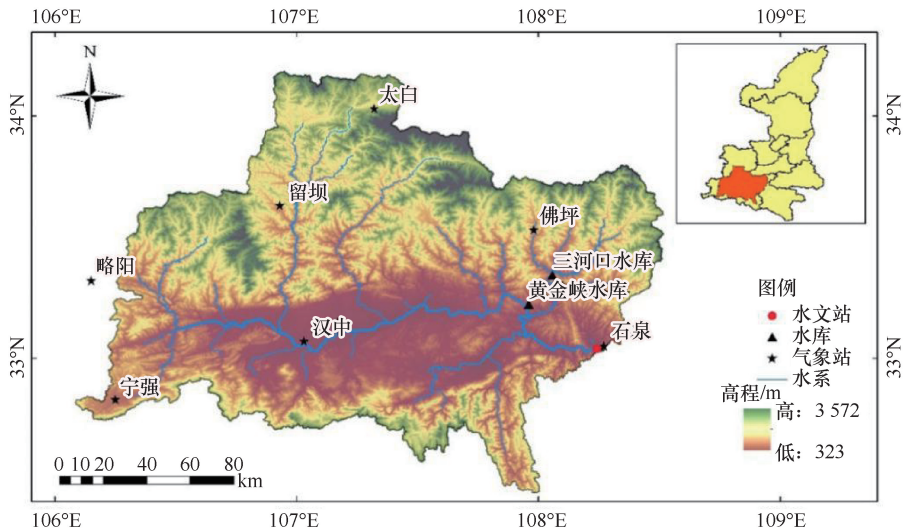


图 1 汉江石泉以上流域地理位置

Fig. 1 Geographical location map of the watershed above Shiquan in the Han River

库。气象数据来源于研究区域内太白、留坝、佛坪、石泉、汉中、略阳、宁强七个气象站的 1970—2020 年实测日资料数据, 气象站点数据获取自国家气象科学数据中心 (<http://data.cma.cn/>)。参考以往研究成果<sup>[17-18]</sup>, 未来气候模式数据选用 CMCC-ESM2 模式 SSP1-2.6、SSP3-7.0、SSP5-8.5 情景下 2025—2100 年降水和气温逐日数据。

## 2 研究方法

### 2.1 气候情景降尺度

由于全球气候模式 (GCM) 输出数据原始空间分辨率过粗, 与水文模型输入数据尺度不匹配, 采用 Delta 方法对 GCM 模拟数据进行修正。Delta 方法是一种广泛应用的空间要素降尺度方法, 其模拟的气候变化是相对变化而不是绝对变化<sup>[19-20]</sup>。Delta 方法将气象要素实测数据与模拟格点的同期模拟的气象要素数据的相对变化或绝对变化叠加到未来气候情景下的 GCMs 格点上, 从而获得站点或区域未来气候变化情景。其计算公式如下

$$P_{day, GCMs\_revised} = P_{day, GCMs} \times \frac{P_{month, reference}}{P_{month, GCMs}} \quad (1)$$

$$T_{day, GCMs\_revised} = P_{day, GCMs} + (T_{month, reference} - T_{month, GCMs}) \quad (2)$$

式中,  $P_{day, GCMs\_revised}$ 、 $T_{day, GCMs\_revised}$  分别为校正后的日降水和日气温;  $P_{day, GCMs}$ 、 $T_{day, GCMs}$  分别为 GCMs 模式未来的日降水和日气温;  $P_{month, reference}$ 、 $T_{month, reference}$  分别为历史观测数据多年月平均降水和多年月平均气温;  $P_{month, GCMs}$ 、 $T_{month, GCMs}$  分别为 GCMs 模式历史多

年月平均降水和多年月平均气温<sup>[21]</sup>。

## 2.2 水文过程模拟

SWAT 模型是美国农业部农业中心研发的分布式水文模型, 该模型具有较强的物理机制, 是一款在国内外被广泛使用的水文模型。SWAT 模型可以较为准确地模拟天然径流过程, 反映流域径流的变化特征<sup>[21]</sup>。通常基于 SWAT-CUP 对径流相关参数进行敏感性分析, 并且结合自动率定和手动调整的方式率定模型参数。使用决定性系数  $R^2$ 、纳什效率系数  $NSE$ 、标准误差比率  $RSR$  评价模型对径流过程的模拟效果。评价指标计算公式如下

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})(Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4)$$

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (5)$$

式中,  $Q_{obs,i}$  为实测径流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q_{sim,i}$  为模拟径流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\bar{Q}_{obs}$  为实测平均径流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\bar{Q}_{sim}$  为模拟平均径流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

一般情况下, 认为当  $R^2 > 0.7$ 、 $NSE > 0.6$ , 且  $RSR < 0.7$  时, 即可认为模型模拟效果较好<sup>[22-24]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 未来气候情景模式适用性分析

为验证 CMCC-ESM2 气候模式对引汉济渭工程水源区气温和降水模拟的准确性和适宜性, 本文将 1980—2020 年作为验证期, 对流域月平均降水量、月平均最高气温、月平均最低气温降尺度模拟值与流域实测值进行验证对比, 基于决定性系数  $R^2$  和均方根误差  $RMSE$  来评估 CMCC-ESM2 气候模式的模拟能力(见表 1)。由表 1 可知, 月平均最高气温和月平均最低气温的相关系数  $R^2$  均大于 0.9, 均方根误差  $RMSE$  均小于  $2\text{ }^\circ\text{C}$ , 月平均降水量相关系数  $R^2$  为 0.5, 均方根误差为  $1.74\text{ mm}$ , CMCC-ESM2 气候模式在模拟气温方面的表现优于其在模拟降水方面的表现。由图 2 可知, 验证期内, 年最高气温、年最低气温和年降水量观测值和模拟值在空间上分布变化趋势

相一致。综上所述, CMCC-ESM2 气候模式在引汉济渭工程水源区有较好的适用性。

表 1 月平均降水量、月平均最高气温、月平均最低气温模拟效果评价

Table 1 Evaluation of simulation effects on monthly average precipitation, monthly average maximum temperature, and monthly average minimum temperature

项 目	$R^2$	$RMSE$
月平均降水量	0.50	1.74 mm
月平均最高气温	0.91	1.90 $^\circ\text{C}$
月平均最低气温	0.97	1.37 $^\circ\text{C}$

### 3.2 模型参数率定和验证

#### 3.2.1 参数敏感性分析

本文利用水源区 DEM 高程数据、土壤数据、实测气象资料数据构建水源区 SWAT 模型。将研究区域划分为 37 个子流域, 571 个水文响应单元。构建 SWAT 模型时输入的 DEM、土壤类型、土地利用类型和水系的空间分布情况, 如图 3(a)(d)(c)(b) 所示。

为了提高模型模拟的效率和精确度, 需要对 SWAT 模型参数进行敏感性分析。结合以往研究<sup>[25]</sup>, 本文选取了 20 个与径流相关的参数进行分析, 通过 SUFI-2 算法确定最优参数组合, 利用 SWAT-CUP 全局敏感性方法进行参数敏感性分析, 结合  $t$  值和  $p$  值判断参数的敏感性,  $t$  值绝对值越大说明参数越敏感,  $p$  值越接近于 0 说明参数越敏感。参数敏感性排序如表 2 所列。其中, 基流因子、平均坡长、土壤饱和和容重、主河道河床有效水力传导度是流域径流敏感性最高的几个参数。

#### 3.2.2 率定和验证

根据石泉水文站实测径流数据, 从月尺度层面对水源区径流进行率定和验证。其中, 将 1980—1985 年作为模型预热期, 1986—2005 年作为模型率定期, 2006—2019 年作为模型验证期。表 3 为在率定期和验证期月平均径流模拟结果与实测数据的统计值, 图 4 为月径流模拟结果。由表 3 和图 4 可见, 石泉水文站月径流的模拟值和实测值拟合效果较好,  $R^2$  均大于 0.7,  $NSE$  均大于 0.6, 且  $RSR$  均小于 0.7。以上综合表明, 构建的 SWAT 模型在水源区具有较好的适用性, 可以进一步用来模拟未来气候情景下的径流。

### 3.3 未来气候变化预估

#### 3.3.1 不同情景下未来气候变化预估

以 1980—2020 年为基准期, 基于 CMCC-ESM2

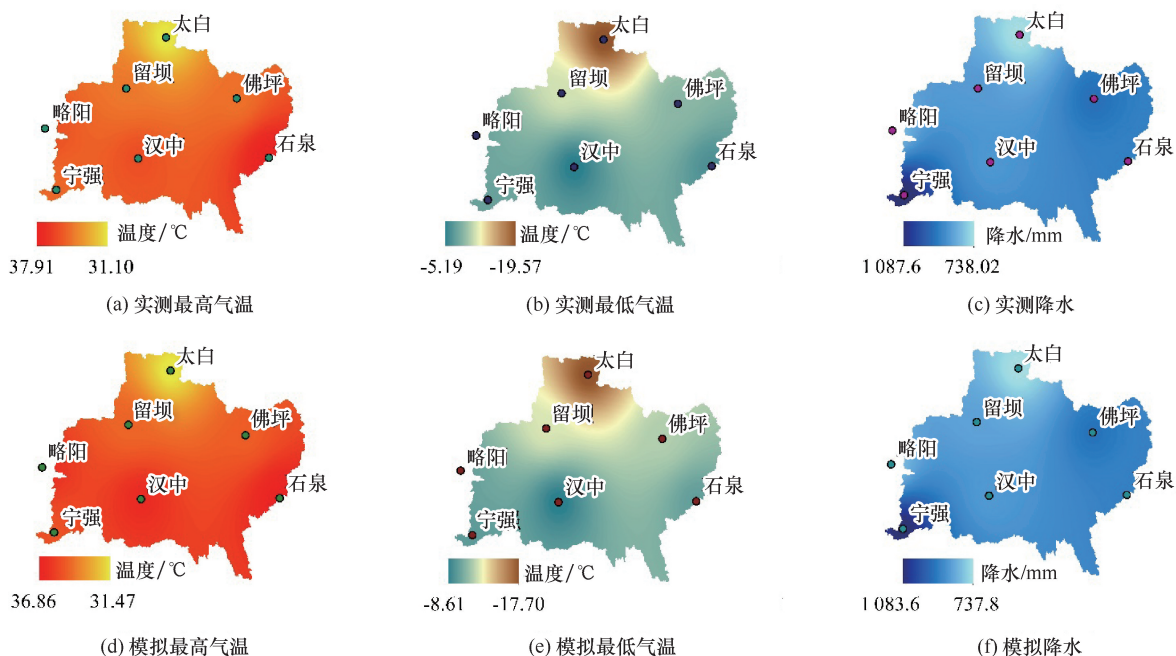


图 2 多年平均最高气温、最低气温和降水空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over multiple years

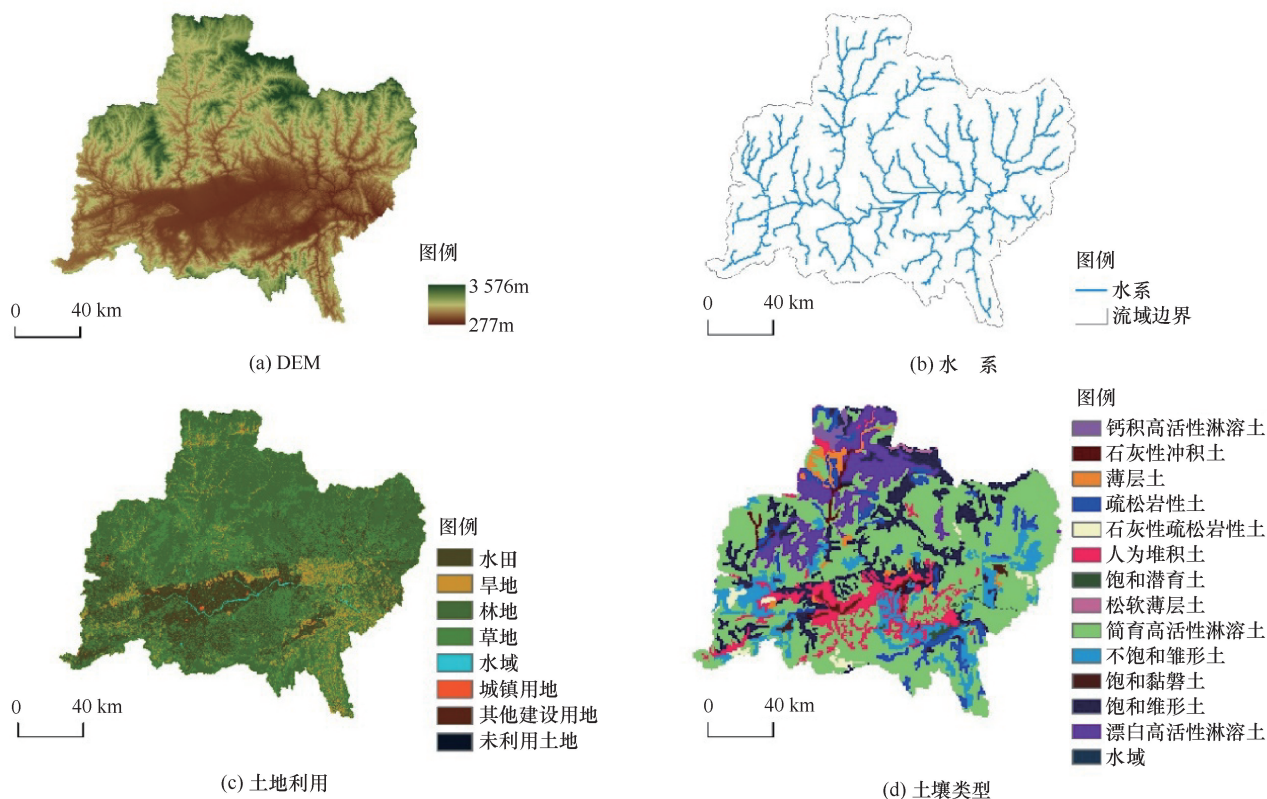


图 3 水源区 DEM、水系、土地利用类型和土壤类型空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of DEM, water system, land use type, and soil type in the water source area

模式在 3 种 SSP 情景下的气候数据, 预估未来近期 (2025—2050 年)、中期 (2051—2075 年) 和远期 (2076—2100 年) 水源区各个气象站点的降水、最高

气温和最低气温的变化趋势, 并根据泰森多边形计算水源区平均值。未来 3 种情景下不同时期的降水、最高气温、最低气温相对基准期的变化如表 4 所列, 未

表 2 SWAT 模型参数敏感性分析

Table 2 Sensitivity analysis of SWAT model parameters

参数	物理意义	t 值	p 值	参数范围	率定结果
V_ _ALPHA_BF. gw	基流因子	84.36	0	0 ~ 1	0.44
V_ _SLSUBBSN. hru	平均坡长/mm	-34.81	0	10 ~ 150	19.44
R_ _SOL_BD(. .). sol	土壤饱和容重/mg · m <sup>-3</sup>	24.75	0	-0.5 ~ 0.5	0.24
V_ _CH_K2. rte	主河道河床有效水力传导度/mm · h <sup>-1</sup>	-20.15	0	-0.01 ~ 500	238.66
V_ _HRU_SLP. hru	平均坡度	11.20	0	0 ~ 1	0.19
V_ _GW_REVAP. gw	地下水再蒸发系数	10.84	0	0.02 ~ 0.2	0.16
R_ _SOL_K(. .). sol	土壤饱和水传导度/mm · h <sup>-1</sup>	10.53	0	-0.5 ~ 0.5	-0.12
R_ _CN2. mgt	SCS 径流曲线数	7.28	0	-0.5 ~ 0.5	0.15
V_ _CH_N2. rte	主河道河床曼宁系数	2.17	0.03	-0.01 ~ 0.3	0.15
V_ _OV_N. hru	坡面漫流的曼宁系数	1.92	0.05	0.01 ~ 30	26.34
V_ _SFTMP. bsn	降雪温度/℃	1.79	0.07	-20 ~ 20	0.61
V_ _TIMP. bsn	积雪温度滞后系数	1.51	0.12	0 ~ 1	0.79
V_ _ESCO. hru	土壤蒸发补偿系数	-1.44	0.14	0 ~ 1	0.36
V_ _SMFMN. bsn	12月21日的融雪因子/mm · (℃ · d) <sup>-1</sup>	-0.95	0.33	0 ~ 20	8.92
V_ _SMFMX. bsn	6月21日的融雪因子/mm · (℃ · d) <sup>-1</sup>	-0.83	0.40	0 ~ 20	14.10
R_ _SOL_AWC(. .). sol	土壤层有效水容量/mm · mm <sup>-1</sup>	0.36	0.71	-0.5 ~ 0.5	0.39
V_ _REVAPMN. gw	渗透到深层防水层的阈值深度/mm	0.23	0.81	0 ~ 500	112.83
V_ _EPCO. hru	植物吸收补偿因子	-0.20	0.83	0 ~ 1	0.67
V_ _SURLAG. bsn	地表径流滞后系数	0.17	0.85	0.05 ~ 24	10.99
R_ _USLE_P. mgt	USLE 水土保持措施因子	0.03	0.97	0 ~ 1	0.69

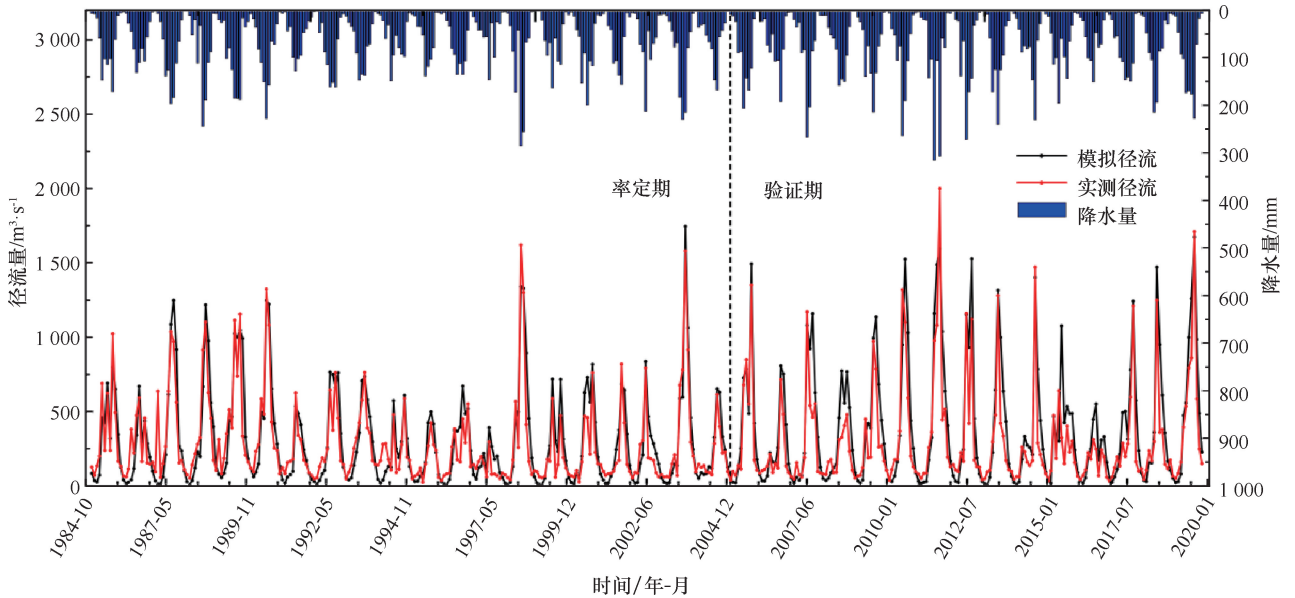


图 4 石泉站控制流域降水量及月径流模拟结果

Fig. 4 Simulation results of monthly runoff and precipitation in the Shiquan station control basin

表 3 石泉站月平均径流量模拟结果与实测数据统计值

Table 3 Simulation results of monthly average runoff at Shiquan Station and statistical values of measured data

阶段	时间段	R <sup>2</sup>	NSE	RSR
率定期	1986—2005	0.82	0.77	0.48
验证期	2006—2019	0.79	0.65	0.59

来整个时期(2025—2100年)降水、最高气温、最低气温整体变化趋势如图 5—图 7 所示。

SSP1-2.6 属于低辐射强迫情景, 为可持续发展路径。该情景下, 三个时期降水相对于基准期的变幅分别为 1.5%、0.16%和 0.45%, 其中近期降水量相较于基准期有所增多; 三个时期最高气温相对于基准期的变幅分别为 2.97%、5.65%和 6.82%, 最低气温相对于基准期的变幅分别为 -5.01%、4.68%和 12.6%。其中, 远期最高气温、最低气温相对于基准期变化较大。

表 4 不同情景下未来气候预估

Table 4 Future climate estimation under different scenarios

气候要素	基准期 均值	近 期			中 期			远 期		
		SSP1-2.6	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP3-7.0	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP3-7.0	SSP5-8.5
降水量/mm	873.458	887.09	803.47	877.52	873.60	871.27	939.74	877.47	870.20	921.67
最高气温/℃	35.02	36.06	36.00	36.07	37.00	36.90	37.25	37.41	38.23	39.70
最低气温/℃	-8.98	-9.43	-10.58	-9.85	-8.56	-6.63	-6.71	-7.85	-7.54	-4.53

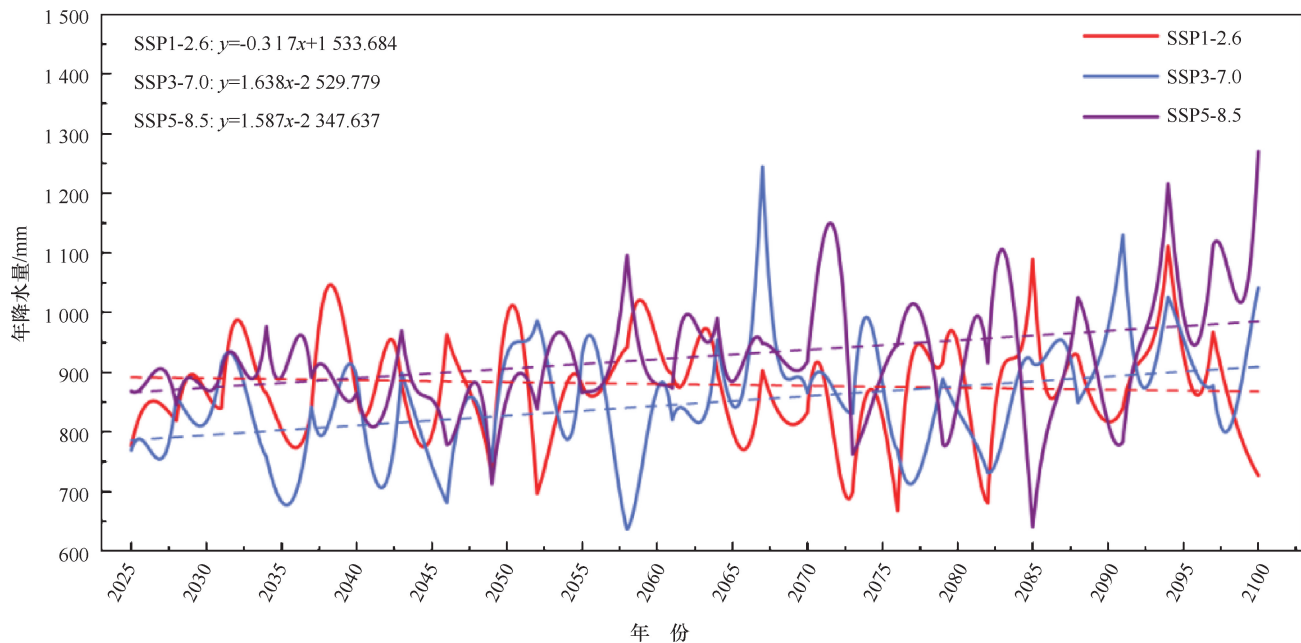


图 5 不同情景下年降水量变化趋势

Fig. 5 Trend chart of annual precipitation variation under different scenarios

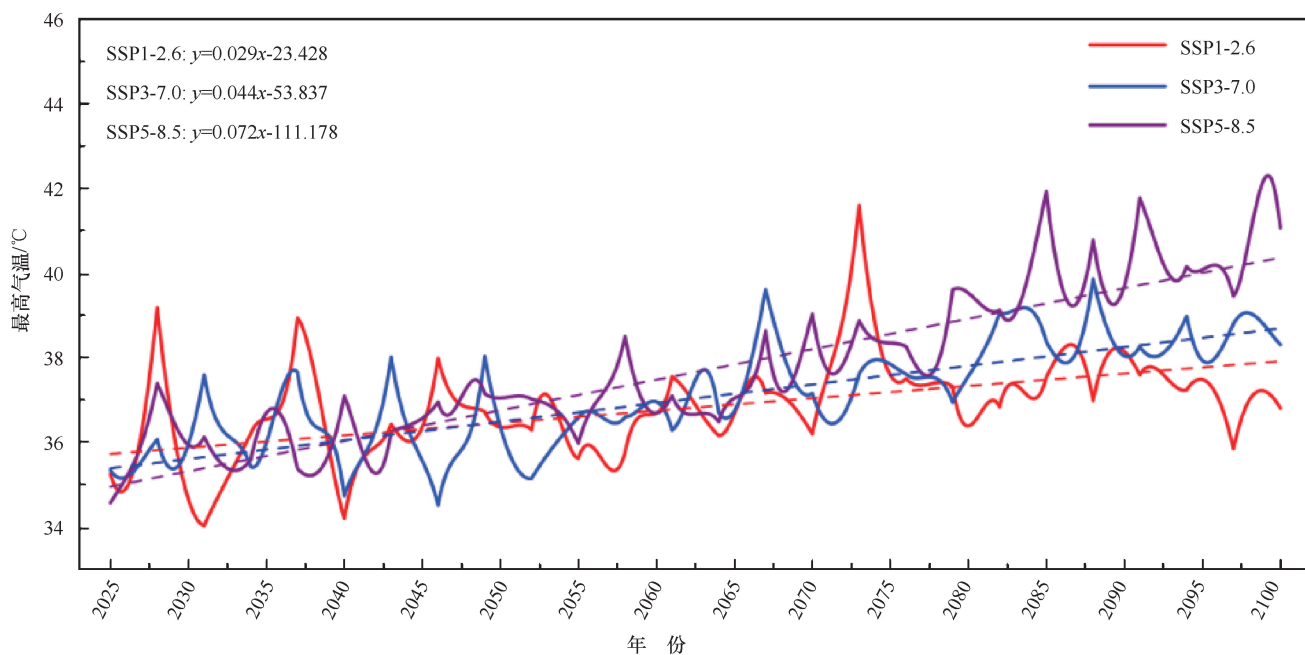


图 6 不同情景下最高气温变化趋势

Fig. 6 Trend chart of maximum temperature changes under different scenarios

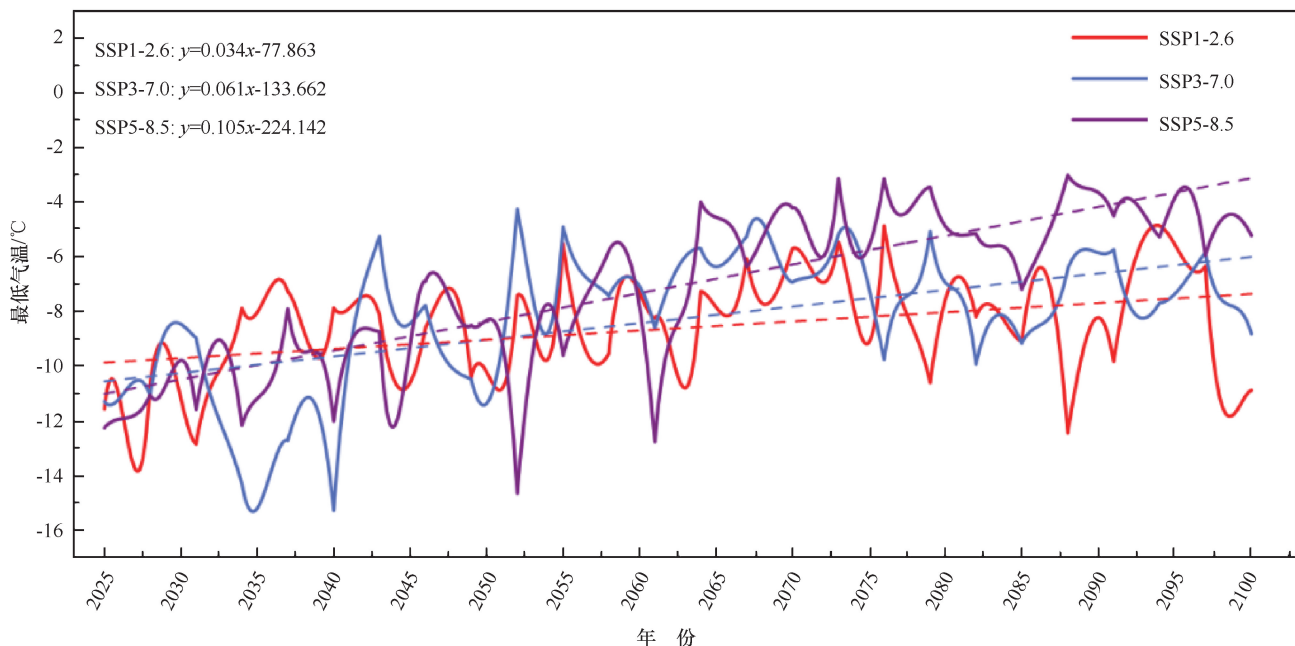


图7 不同情景下最低气温变化趋势

Fig. 7 Trend chart of minimum temperature changes under different scenarios

SSP3-7.0 属于中高辐射强迫情景, 为区域竞争发展路径。该情景下三个时期降水相对于基准期的变幅分别为 $-8.01\%$ 、 $-0.25\%$ 和 $-0.37\%$ , 三个时期降水量相对于基准期均有减少; 三个时期最高气温相对于基准期的变幅分别为 $2.72\%$ 、 $5.36\%$ 和 $9.17\%$ , 最低气温相对于基准期的变幅分别为 $17.8\%$ 、 $-26.2\%$ 和 $-49.6\%$ , 其中近期最低气温低于基准期均值。

SSP5-8.5 属于高辐射强迫情景, 该情景下不同时期降水量相对于基准期的变幅分别为 $4.78\%$ 、 $12.21\%$ 和 $10.05\%$ , 三个时期降水量相对于基准期均有增加, 其中中期降水量增幅较为明显; 三个时期最高气温相对于基准期的变幅分别为 $2.99\%$ 、 $6.36\%$ 和 $13.36\%$ , 最低气温相对于基准期的变幅分别为 $9.68\%$ 、 $25.27\%$ 和 $49.55\%$ , 其中最低气温相对于基准期在不同时期都有显著变化。

由图5可以看出, 整个未来时期, SSP1-2.6 情景下年降水量有减少趋势, SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下, 年降水量均有增加趋势, 年降水量变化率随着辐射强迫的增加先增加后减少, 具体分别为 $-0.317 \text{ mm/a}$ ,  $1.638 \text{ mm/a}$ 和 $1.587 \text{ mm/a}$ 。由图6和图7可以看出, 3种情境下, 整个未来时期最高气温、最低气温均有上升趋势, 且最高气温、最低气温的增温速率随着辐射强度的增加而增加, 3种情景下最高气温的增温速率分别为 $0.029 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 、 $0.044 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 和 $0.072 \text{ }^\circ\text{C/a}$ , 最低气温的增温速率分别为 $0.034 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 、

$0.061 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 和 $0.105 \text{ }^\circ\text{C/a}$ 。

### 3.3.2 不同情景下降水量年内分配情况

引汉济渭工程水源区未来不同情景下降水量年内分配情况如图8所示。从图8可以看出, 3种情景下近期、中期和远期降水量都集中在5—9月, 11月到次年3月的降水量都普遍较少。SSP1-2.6 和 SSP3-7.0 情景下, 不同时期降水量变化趋势较为一致, 1—7月呈增加趋势, 8—12月降水量呈减少趋势, 与基准期降水量变化趋势相一致; SSP5-8.5 情景下, 不同时期降水量变化趋势相一致, 1—7月降水量呈先增加后减少再增加的趋势, 8—12月降水量呈先减少后增加再减少的趋势, 与基准期降水量变化趋势有较大差异。

SSP1-2.6 情景下, 不同时期的峰值降水量均出现在7月, 分别为 $167.7 \text{ mm}$ 、 $167.83 \text{ mm}$ 和 $167.27 \text{ mm}$ , 相较于基准期7月份峰值降水量( $170.67 \text{ mm}$ )均有所减少; SSP3-7.0 情景下, 近期和中期的峰值降水量出现在7月, 分别为 $185.76 \text{ mm}$ 和 $173.39 \text{ mm}$ , 远期的峰值降水量出现在9月, 为 $149.08 \text{ mm}$ , 远期峰值降水量较基准期峰值降水量有明显减少; SSP5-8.5 情景下, 不同时期峰值降水量均出现在9月, 分别为 $167.47 \text{ mm}$ 、 $173.96 \text{ mm}$ 和 $169.04 \text{ mm}$ , 与基准期峰值降水量相差不多。

## 3.4 未来径流变化趋势

### 3.4.1 不同情景下未来径流变化趋势

结合引汉济渭工程水源区 SWAT 分布式水文模

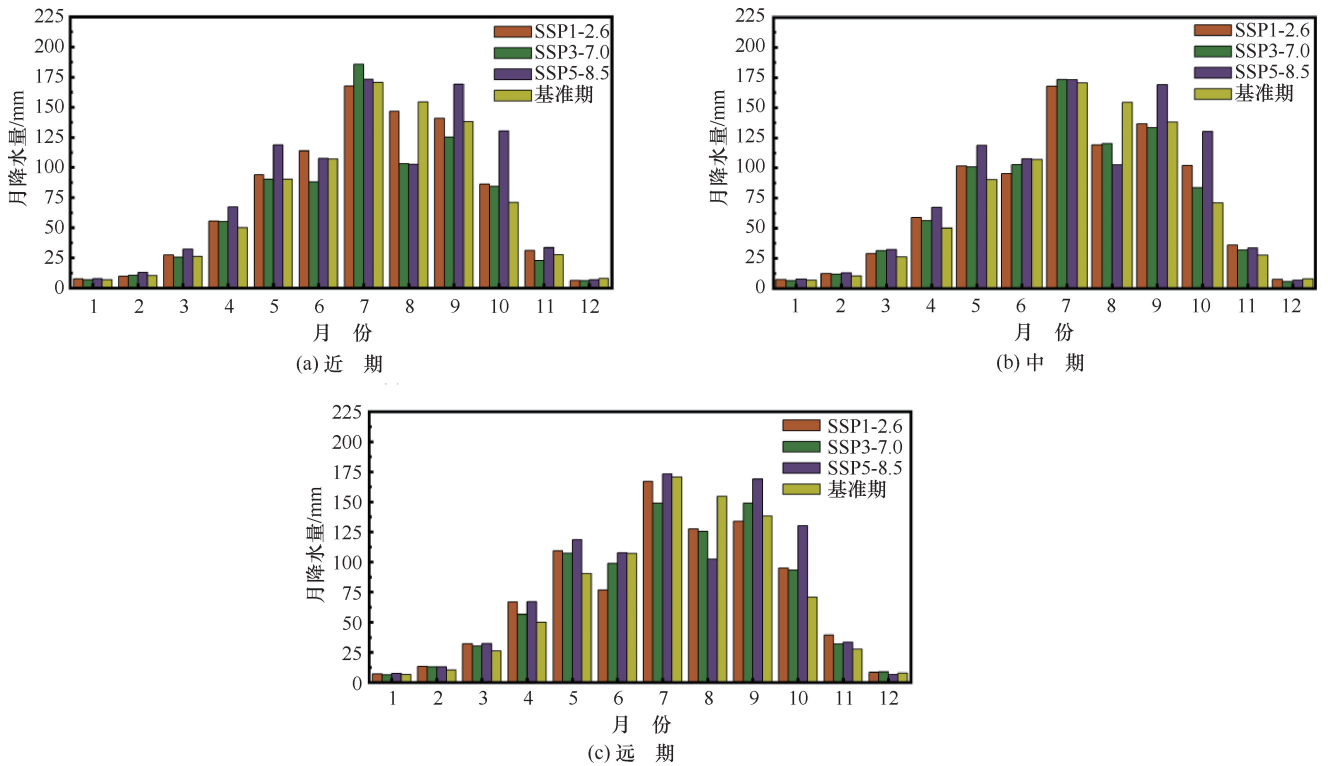


图 8 不同情景下降水量年内分配情况

Fig. 8 Annual distribution of precipitation in different scenarios

型和不同情境下未来气候数据, 计算得到不同情景下引汉济渭工程水源区未来径流变化。基准期、近期、中期和远期石泉水文站多年年均径流量如表 5 所列, 不同情境下未来径流量变化趋势如图 9 所示。由表 5 可以看出, SSP1-2.6 情景下, 近期、中期和远期年均径流量均比基准期高, 三个时期的变幅分别为 17.11%、10.53% 和 9.58%, 其中近期年均径流量相较于基准期有明显增多。SSP3-7.0 情景下, 近期年均径流量相较于基准期有明显减少, 中期和远期年均径流量均高于基准期, 三个时期的变幅分别为 -3.96%、9.13% 和 2.55%。SSP5-8.5 情景下, 三个时期的年均径流量均高于基准期, 变幅分别为 14.70%、24.80% 和 19.98%。由图 9 可以看出, SSP1-2.6 情景下, 年径流量呈减少趋势, SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下, 年径流量均呈增加趋势, 3 个情景下的径流量变化率分别为  $-6.72 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$ 、 $6.71 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$  和  $2.47 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$ , 年径流量变化率随辐射强迫的增加呈先增加后减少的趋势。未来整个时期年径流量的变化情况与降水相似, 表明未来径流量受降水影响较大。

### 3.4.2 不同情景下未来径流年内分配情况

未来不同情景下引汉济渭工程水源区石泉水文站多年月平均径流量变化如图 10 所示, 由图 10 可以看

表 5 未来情景下不同时期年均径流量

Table 5 Annual average runoff in different periods under future scenarios

情景	年均径流量			
	基准期均值	近期	中期	远期
SSP1-2.6	3 505.036	4 104.90	3 874.21	3 840.96
SSP3-7.0		3 366.01	3 825.14	3 594.59
SSP5-8.5		4 020.47	4 374.36	4 205.34

出, 3 种情景下, 三个时期 4—10 月径流量均呈增加趋势, 其他月份径流量均呈减少趋势, 与基准期径流量变化趋势较一致; 径流量均主要集中在 7—11 月, 且 1—5 月份径流量均较基准期有明显降低, 8—12 月径流量均较基准期有明显增加; 近期 SSP1-2.6 和 SSP3-7.0 情景下的峰值径流量出现在 10 月, 分别为  $788.20 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $617.05 \text{ m}^3/\text{s}$ , SSP5-8.5 情景下的峰值径流量出现在 9 月, 为  $926.53 \text{ m}^3/\text{s}$ , 3 种情景下的峰值径流量较基准期 10 月峰值径流量 ( $636.87 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 的变幅分别为 23.76%、-3.11% 和 45.48%, 中期 SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下的峰值径流量出现在 10 月, 分别为  $729.89 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $926.50 \text{ m}^3/\text{s}$ , SSP3-7.0 情景下的峰值径流量出现在 9 月, 为  $707.85 \text{ m}^3/\text{s}$ , 3 种情景下的峰值径流量较基准期峰值径流量的变幅分别为 14.60%、11.14% 和 45.47%; 远期 SSP1-2.6、

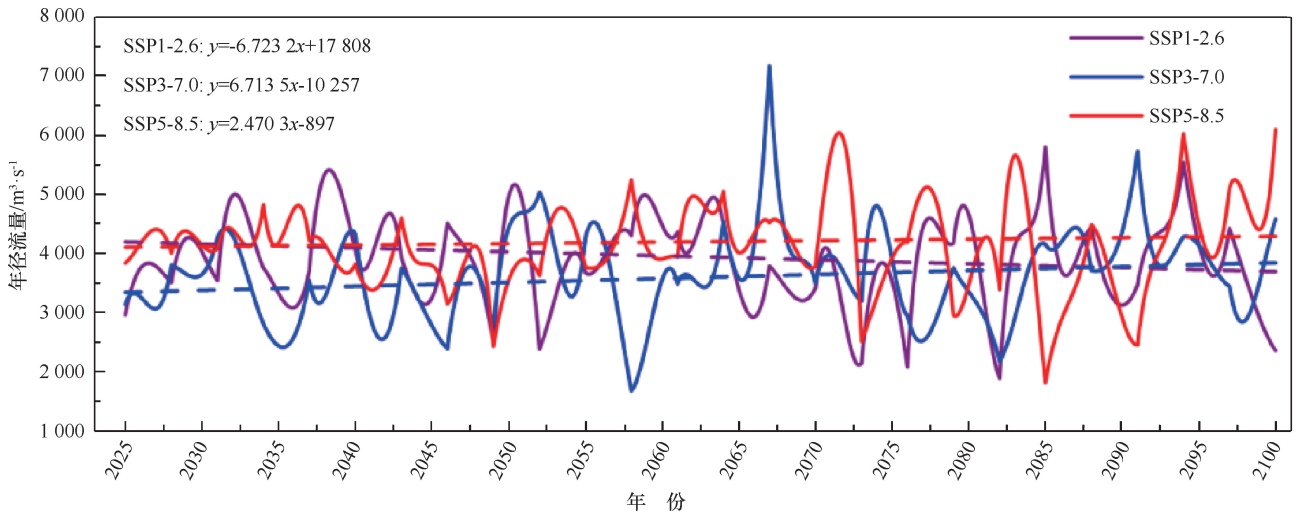


图9 不同情景下未来径流量变化趋势

Fig. 9 Future runoff trends under different scenarios

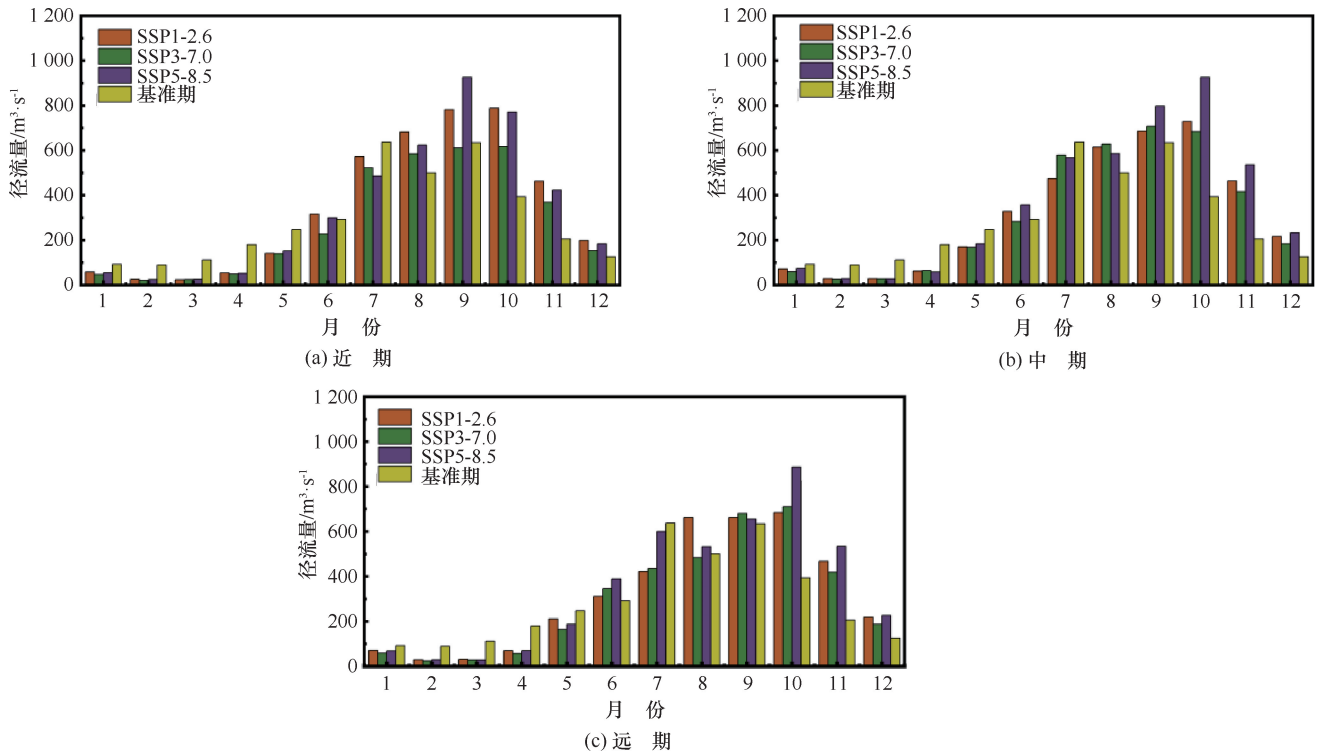


图10 不同情景下未来径流年内分配情况

Fig. 10 Annual distribution of future runoff under different scenarios

SSP3-7.0 情景和 SSP5-8.5 情景下的峰值径流量均出现在 10 月, 分别为  $684.34 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $710.80 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $855.78 \text{ m}^3/\text{s}$ , 3 种情景下的峰值径流量较基准期峰值径流量的变幅分别为 7.45%、11.61%和 34.37%。

### 3.5 讨论

王立等<sup>[26]</sup>基于 CanESM2 模式预估汉江上游流域未来降水、气温和径流都呈上升趋势; 田晶等<sup>[27]</sup>基于 BCC-CSM1.1 和 BNU-ESM 模式预估汉江流域未来

径流呈增加趋势, 本文结果与前人研究结果具有相似性。然而, 本文研究结果发现 CMCC-ESM2 模式下 SSP1-2.6 情景下未来降水和径流呈下降趋势, 与部分研究结果<sup>[28-29]</sup>有一定差别, 这一点可能与 SSP1-2.6 情景下的低辐射强迫有关。引汉济渭工程的建设优化了陕西省水资源配置格局, 解决了关中地区缺水的历史难题, 改善了渭河水生态环境, 随着水源区未来降水、径流的增加, 有望增加引汉济渭工程

的可供输水量,有助于提升区域水生态安全保障能力,同时,也可缓解调水工程对水源区的影响。未来可进一步研究气候变化情景下引汉济渭工程调水区和受水区干旱及丰枯变化对引汉济渭工程供水保障率的影响。

分析不同时期峰值降水量和峰值径流量的出现时间,发现峰值径流量较峰值降水量有明显的滞后,可能是由于前汛期土壤含水量低,产流系数较低引起的;同时,使用单一的SWAT模型来模拟水源区未来径流变化,未来径流的模拟存在诸多不确定性因素,例如模型参数率定、时空降尺度和预报偏差等<sup>[30]</sup>。分析和研究水文模拟过程中的不确定性是当前水文学研究面临的难点问题。完善水文模型的物理机制和多模型组合(BMA)预报能有效降低水文模拟过程中的不确定性,提高径流模拟的准确性<sup>[31-32]</sup>。本文仅考虑了气候变化对引汉济渭工程水源区未来水文情势的影响,未考虑人类活动(例如水库修建和运行、下垫面条件改变等)对水文情势演变的影响,未来需综合考虑降水、气温和径流变化的驱动因子,进一步了解变化环境下水文情势演变的机理,以期对引汉济渭工程水资源调度和管理提供可靠依据。

## 4 结论

本文在建立引汉济渭工程水源区SWAT分布式水文模型的基础上,基于CMIP6下的CMCC-ESM2模式数据,量化分析未来气候变化情景下水源区水文情势的演变特征,结果表明以下3点:

(1)未来整个时期(2025—2100年)在CMCC-ESM2的3种情景下最高气温、最低气温均处于上升趋势,增温速率随辐射强迫的增强而增大;SSP1-2.6情景下年降水量呈减少趋势,其余情景下年降水量呈增加趋势,年降水量的变化率随辐射强迫的增强呈先增大后减小的趋势,即引汉济渭工程水源区未来有变暖、变湿的趋势。

(2)未来整个时期,SSP1-2.6情景下未来年径流量呈减少趋势,其余情景下未来径流量呈增加趋势,年径流量变化率随辐射强迫的增加呈先增大后减小的趋势,与年降水量的变化趋势相似,说明未来径流量受降雨量影响较大。

(3)未来气候情景下降水量、径流量年内分配存在差异。3种情景下不同时期的降水量均主要集中在6—11月,其余月份降水量较少,说明未来水源区降水年内分配差异较大;3种情景下不同时期的径流量年内分配与降水量类似,均主要集中在6—11月,但

相比降水量,径流量年内分配更集中。3种情景下不同时期径流量峰值出现时间多集中在9月、10月。

## 参考文献(References):

- [1] 秦鹏程,刘敏,夏智宏,等.气候变化对我国水资源和重大水利工程影响研究进展[J].气象科技进展,2022,12(6):7-15.  
QIN Pengcheng, LIU Min, XIA Zhihong, et al. Progress in assessing the impacts of climate change on China's water resources and major water conservancy projects[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2022, 12(6): 7-15.
- [2] 周天军,陈梓明,陈晓龙,等. IPCC AR6 报告解读:未来的全球气候:基于情景的预估和近期信息[J].气候变化研究进展,2021,17(6):652-663.  
ZHOU Tianjun, CHEN Ziming, CHEN Xiaolong, et al. Interpreting IPCC AR6: future global climate based on projection under scenarios and on near-term information[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 652-663.
- [3] 张丹,梁瀚续,何小聪,等.基于CMIP6的金沙江流域径流及水文干旱预估[J].水资源保护,2023,39(6):53-62.  
ZHANG Dan, LIANG Hanxu, HE Xiaocong, et al. Estimation of runoff and hydrological drought in the Jinsha River Basin based on CMIP6[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 53-62.
- [4] BAI T, LI L, MU P F, et al. Impact of Climate Change on Water Transfer Scale of Inter-basin Water Diversion Project [J]. Water Resour Manag, 2023, 37(6-7): 2505-2525.
- [5] 王蕊,王中根,夏军,等.气候变化及南水北调中线工程对白洋淀流域水文的影响[J].水力发电学报,2012,31(2):14-19.  
WANG Rui, WANG Zhonggen, XIA Jun, et al. Effects of climate change and the south-north water transfer project on hydrology in Baiyangdian basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 14-19.
- [6] WANG X H, LIU X F, SUN G P. Increasing probability of concurrent drought between the water intake and receiving regions of the Hanjiang to Weihe River Water Diversion Project, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32(10): 1998-2012.
- [7] 何静,吕爱锋,张文翔.气候变化背景下滇中引水工程水源区与受水区降水丰枯遭遇分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(6):1097-1108.  
HE Jing, LYU Aifeng, ZHANG Wenxiang. Synchronous-asynchronous encounter probability of high-low precipitation between the water source and water receiving area in the Water Transfer Project in Central Yunnan under climate change [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1097-1108.
- [8] 邓乐乐,郭生练,田晶,等.汉江上游径流情势变化及归因分析[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(4):761-769.

- DENG Lele, GUO Shenglian, TIAN Jing, et al. Runoff variation and attribution analysis in the upper Han River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 761-769.
- [9] 邹星捷, 朱丽华. BCC-CSM2-MR 模式对东亚冬季气候特征的模拟评估[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(6): 182-191.
- ZOU Xingjie, ZHU Lihua. Assessment of the Climate Characteristics of the East Asian Winter Monsoon by BCC-CSM2-MR Model[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2023, 45(6): 182-191.
- [10] GONZALEZ P, NEILSON R P, LENIHAN J M, DRAPEK R J. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change[J]. Global Ecology & Biogeography, 2010, 19: 755-768.
- [11] 张逸飞, 曾建军. 疏勒河流域气候变化的时空分布特征分析[J]. 水利发展研究, 2024, 24(10): 126-136.
- ZHANG Yifei, ZENG Jianjun. Temporal and spatial distribution of climate change in Shule River Basin [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(10): 126-136.
- [12] TAN Y G, GUZMAN S M, DONG Z C, et al. Selection of effective GCM bias correction methods and evaluation of hydrological response under future climate scenarios[J]. Climate, 2020, 8(10): 21.
- [13] 贾何佳, 李谢辉, 文军, 等. 黄河源区径流变化模拟及未来趋势预估[J]. 资源科学, 2022, 44(6): 1292-1304.
- JIA Hejia, LI Xiehui, WEN Jun, et al. Runoff change simulation and future trend projection in the source area of the Yellow River[J]. Resources Science, 2022, 44(6): 1292-1304.
- [14] RIAHI K, VAN VUUREN DP, KRIEGLER K, et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview[J]. Global Environmental Change, 2017, 42: 153-168.
- [15] YANG X L, ZHOU BT, XU Y, et al. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China[J]. Adv Atmos Sci, 2021, 38(5): 817-830.
- [16] ZHANG X L, HUA L J, JIANG D B. Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang, China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2022, 15(2): 100128.
- [17] 李伯新, 姜超, 孙建新. CMIP6 模式对中国西南部地区植被碳利用效率模拟能力综合评估[J]. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1211-1224.
- LI Boxin, JIANG Chao, SUN Jianxin. Comprehensive assessment of vegetation carbon use efficiency in Southwestern China simulated by CMIP6 models[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(9): 1211-1224.
- [18] 吴琛. 基于 CMIP6 模式的淮河中上游流域极端气候变化评估及成因分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- WU Chen. Assessment and Cause Analysis of Extreme Climate Change in the Upper and Middle Reaches of Huai River Based on CMIP6[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [19] 武磊, 李奋华, 李常斌, 等. GCMs 降尺度及其在讨赖河上游径流预报中的应用[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(11): 41-49.
- WU Lei, LI Fenhua, LI Changbin, et al. Application of GCMs downscaling to mountainous discharges forecasting in the upper reaches of Taolai River Basin[J]. Journal of Yangze River Scientific Research Institute, 2022, 39(11): 41-49.
- [20] 赵芳芳, 徐宗学. 统计降尺度方法和 Delta 方法建立黄河源区气候情景的比较分析[J]. 气象学报, 2007(4): 653-662.
- ZHAO Fangfang, XU Zongxue. Comparative analysis on downscaled climate scenarios for headwater catchment of yellow river using SDS and Delta methods[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007(4): 653-662.
- [21] 曹灿, 孙瑞, 吴志祥, 等. 基于 SWAT 模型的南渡江上游流域径流对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 255-264.
- CAO Can, SUN Rui, WU Zhixiang, et al. Responses of streamflow to climate change in upstream of Nandujiang River Basin based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 255-264.
- [22] ZHANG X, YANG H, ZHANG W S, et al. Hydrologic impacts of cascading reservoirs in the middle and lower Hanjiang River basin under climate variability and land use change [J]. Journal of Hydrology-Regional Studies, 2022, 44.
- [23] 霍艾迪, 赵志欣, 王星, 等. 马莲河流域固沟保塬工程水文响应变化及优化[J]. 水科学进展, 2023, 34(6): 867-876.
- HUO Aidi, ZHAO Zhixin, WANG Xing, et al. Hydrologic response change and optimization of gully consolidation and highland protection in the Malian river basin based on CMADS and SWAT model[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(6): 867-876.
- [24] DU B L, WU L, RUAN B N, et al. CMADS and CFSR Data-Driven SWAT modeling for impacts of climate and land-use change on runoff [J]. Water, 2023, 15(18): 22.
- [25] 杨倩. 汉江上游径流演变规律和实际蒸散发变化分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- YANG Qian. Analysis of runoff evolution law and actual evapotranspiration change in the upper reach of Han river[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [26] 王立, 翟文亮, 张爵宏, 等. 基于 RBF-SWAT 的气候变化下汉江上游流域径流预测及特征分析[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(4): 31-36.
- WANG Li, ZHAI Wenliang, ZHANG Juehong, et al. Impact of future climate change on runoff in the upper Han River Basin based on RBF? SWAT [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(4): 31-36.

- [27] 田晶, 郭生练, 刘德地, 等. 气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(11): 2307-2318.  
TIAN Jing, GUO Shenglian, LIU Dedi, et al. Impacts of climate and land use/cover changes on runoff in the Hanjiang River basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(11): 2307-2318.
- [28] ZHOU X, CHEN W, LIU Q T, et al. Future runoff forecast in Hanjiang River Basin based on Wetspa model and CMIP6 model[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 980949.
- [29] WU L Z, SU X L, ZHANG T. Challenges of typical inter-basin water transfer projects in China: Anticipated impacts of climate change on streamflow and hydrological drought under CMIP6 [J]. Journal of Hydrology, 2023, 627: 130437.
- [30] SINHA T, SANKARASUBRAMANIAN A, MAZROOEI A, et al. Decomposition of sources of errors in monthly to seasonal streamflow forecasts in a rainfall-runoff Regime [ J ]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(6): 2470-2483.
- [31] 冯平, 张立斌, 李建柱, 等. 目标函数对滦河流域 SWAT 模型径流模拟不确定性的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 17-24.  
FENG Ping, ZHANG Libin, LI Jianzhu, et al. Influence of objective function on uncertainty of SWAT model runoff simulation in the Luanhe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 17-24.
- [32] 宋晓猛, 占车生, 孔凡哲, 等. 大尺度水循环模拟系统不确定性研究进展(英文)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(5): 801-819.  
SONG Xiaomeng, ZHAN Chesheng, KONG Fanzhe, et al. Advances in the study of uncertainty quantification of large-scale hydrological modeling system [J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(5): 801-819.

(责任编辑 王海锋)