

气候变化情景下黄河水源涵养区水源涵养量预测及不确定性分析

鞠 琴¹, 徐奕丹¹, 周旻霏², 林 慧¹, 吴金雨^{3,4}, 金君良¹, 马 静¹, 王怡宁⁵

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室; 2. 中国雅江集团有限公司; 3. 水利部南京水利水文自动化研究所; 4. 江苏南水科技有限公司; 5. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室)

摘要: 基于 InVEST 模型分析了 1980—2023 年黄河水源涵养区水源涵养量的时空特征, 结合优选的 6 种 CMIP6 全球气候模式(GCMs)与 3 种共享社会经济路径(SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5)预测了未来近期(2026—2035 年)与未来远期(2036—2050 年)的水源涵养量, 并采用“内部变率-模式-情景”三源分解的不确定性量化方法评估了预测结果的不确定性。结果表明: 1980—2023 年研究区多年平均水源涵养量为 25.11 mm, 时间上总体呈上升趋势, 2002 年发生突变, 突变后增幅为 8.75%, 空间上呈现西南高、东北低的特点; 基准期多年平均降水量为 557.4mm, 整体为增加趋势, SSP1-2.6、SSP5-8.5 情景下未来降水量高于基准期, SSP2-4.5 情景略低于基准期; 6 种 GCMs 驱动下的 2026—2050 年水源涵养量预测值差异显著, 在 SSP1-2.6 情景下, 各 GCMs 驱动预测的水源涵养量均呈上升趋势, SSP5-8.5 情景结果波动最大, SSP2-4.5 情景预测增幅略低于其他两种情景, 空间上高值区位于黄河源区, 唐乃亥-兰州地区次之, 渭河-伊洛河流域最低; GCMs 不确定性为水源涵养量预测结果的主要不确定性来源, 排放情景不确定性次之, 内部变率影响最小, 总的相对不确定度未来远期大于未来近期。

关键词: CMIP6 气候模式; 水源涵养量; InVEST 模型; 不确定性; 黄河水源涵养区

Prediction and uncertainty analysis of water conservation capacity in the Yellow River water conservation area under climate change scenarios // Ju Qin¹, Xu Yidan¹, Zhou Minpei², Lin Hui¹, Wu Jinyu^{3,4}, Jin Junliang¹, Ma Jing¹, Wang Yining⁵ (1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 2. China Yajiang Group Co., Ltd.; 3. Nanjing Research Institute of Hydrology and Water Conservation Automation, Ministry of Water Resources; 4. Jiangsu NIHWA Technology Co., Ltd.; 5. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute)

Abstract: This study analyzed the spatiotemporal characteristics of water conservation capacity of the Yellow River water conservation area from 1980 to 2023 using the InVEST model. Six optimally selected CMIP6 Global Climate Models (GCMs) under three Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5) were integrated to project water conservation capacity for the near future (2026-2035) and the distant future (2036-2050). The uncertainty of projections was quantified through a triple-source “internal variability-model-scenario” decomposition approach. The results indicate that the multi-year average water conservation of the study area during 1980 to 2023 was 25.11 mm, exhibiting an overall increasing trend with an abrupt change in 2002 (post-change increase rate is 8.75%). Spatially, water conservation was characterized by higher values in the southwest and lower values in the northeast. Baseline precipitation averaged 557.4 mm with an increasing trend. Future precipitation under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios slightly exceeded baseline levels, while SSP2-4.5 was slightly lower than the baseline. Projections from the six CMIP6 GCMs diverged significantly. All GCMs indicated increasing water conservation under SSP1-2.6, while SSP5-8.5 exhibited the largest fluctuations. The projected increase under SSP2-4.5 was slightly lower than under other scenarios. The areas with the highest values are located in the Yellow River source area, followed by the Tangnaihailanzhou area, while the Wei River-Yiluo River basin has the lowest values. GCMs uncertainty constituted the primary source of projection uncertainty, followed by scenario uncertainty, with internal variability having minimal impact. Total fractional uncertainty was greater in the long term than in the near term of future.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202401); 国家自然科学基金项目(52525902, 52279018); 江苏省大学生创新创业项目(S202510294004)

作者简介: 鞠琴(1980—), 女, 教授, 博士, 主要从事气候变化下水文响应研究。E-mail: juqin@hhu.edu.cn

通信作者: 徐奕丹(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事气候变化下水文响应研究。E-mail: 241301010091@hhu.edu.cn

水源涵养作为生态系统服务的重要组成部分,是维系区域水文循环、保障水资源供给和维持生态安全的关键过程^[1],其功能主要体现在维持河流基流、减少水土流失、地下水补给、净化水质以及流域调蓄等方面^[2]。在全球气候变化背景下,极端降水事件频发、气温升高的态势愈发显著,叠加城镇化的快速扩张等人类活动干扰,生态系统结构与过程被显著改变^[3],进而对水源涵养的时空格局产生深刻影响。未来气候模式与不同气候情景下的水源涵养量预测及不确定性量化是厘清气候变化对生态系统水文调节功能的影响及支撑区域水资源安全保障与生态保护决策的关键科学基础^[4]。

对水源涵养功能的量化评估是了解其生态价值、开展流域管理和政策制定的重要前提。传统水源涵养能力评估方法主要包括土壤蓄水能力法、林冠截留剩余量法、综合蓄水能力法、降水贮存法、水量平衡法、多因子回归法等^[5]。传统方法能够在一定程度上评估区域水源涵养能力,但存在参数粗糙、空间分辨率低、对气候变化响应不足等局限性^[6]。随着计算机技术和地理信息系统的不断发展,基于过程模型的水源涵养能力评估方法逐渐成为研究热点^[7]。国内外研究学者常用的模型包括 SCS 模型^[8]、SWAT 模型、温度植被干旱指数(TVDI)模型^[9]、供水压力指数(WaSSI)生态水文模型、生态系统服务与权衡综合评估(InVEST)模型等。Li 等^[10]基于 SWAT 模型研究发现,气候变暖湿润化导致三江源区水源涵养量总体呈增加趋势,其中降水增加是主要驱动因素。陈书林^[11]基于遥感数据利用 TVDI 模型估算了森林及不同树种的水源涵养量。这些水文模型计算过程繁杂,参数众多,而 InVEST 模型因其操作简便、数据需求少、计算效率高等优点被更广泛应用于水源涵养能力评估研究^[12]。Li 等^[13]基于 InVEST 模型分析了 2000—2019 年丹江流域水源涵养量的时空动态特征以及水源涵养量对气候、土地利用和土壤变化的响应。张秀霞等^[14]基于 InVEST 模型分析了 2000—2023 年黄河流域水源涵养时空演变特征及影响因素,发现年降水量是水源涵养年际变化的主导因子。盖莹莹等^[15]基于 InVEST 模型探究了黄河流域生态系统服务驱动因素,结果表明降水量是水源涵养服务供给量主要的驱动因素。徐凡奇等^[16]基于 CA-Markov 和 InVEST 模型,分析了 2000—2020 年黄河水源涵养区水源涵养与土壤保持时空演变特征及其影响要素,发现降

水量是主要影响因素,而土地利用贡献率极低,土地利用对水源涵养的贡献率仅为 0.13%~0.85%。以上研究均指出降水量是影响水源涵养生态系统服务功能的关键驱动因子,因此对未来水源涵养量的预测研究中需考虑未来不同排放情景下气候变化的驱动作用。气候变化影响评估中不确定性的来源包括气候模式、排放情景、降尺度方法和水文模型等多个方面^[17-18],定量评估水文模拟预测结果的不确定性一直是水循环研究中的难点。

黄河水源涵养区作为黄河流域主要供水区,其生态功能稳定是保障流域防洪抗旱、生态修复及高质量发展的关键^[19],亟须揭示其在未来气候变化情景下水源涵养量的时空演变规律。近年来,共享社会经济路径(SSP)与全球多气候模式(GCMs)结合的未来情景分析成为研究热点。基于此,本文利用 InVEST 模型系统分析黄河水源涵养区 1980—2023 年水源涵养量的时空演变规律,结合国际耦合模式比较计划 CMIP6 中优选的 6 种 GCMs,在分析 3 种典型 SSP 排放情景下未来降水变化特征的基础上,预测 2026—2050 年水源涵养量的变化趋势并定量评估预测结果的不确定性,揭示预测结果的不确定性在气候模式、排放情景和内部变率 3 种来源之间的差异,为黄河水源涵养区的生态保护与水资源管理提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河水源涵养区(32°N~39°N,96°E~114°E)位于黄河流域上游,横跨青海、甘肃、四川、宁夏、陕西及山西,自西向东包括黄河源区、唐乃亥-兰州地区和渭河-伊洛河流域,面积为 30.44 万 km²,占黄河流域总面积的 38.3%。该区域是黄河流域的主要水量来源区^[20],天然径流量占黄河流域的 84.1%,受青藏高原、黄土高原等地形起伏影响,区内气候时空异质性显著,导致生态环境脆弱,研究区概况如图 1 所示。

1.2 数据来源

研究数据包括土地利用数据、降水数据、潜在蒸散发数据、数字高程数据和根系深度数据。吴金雨等^[21]评估了 CMIP6 20 个 GCMs 对黄河水源涵养区降水的模拟能力,优选出 6 个模拟综合能力较好的模式,基本信息见表 1。这 6 种 GCMs 为本文提供了 2026—2050 年 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 排放

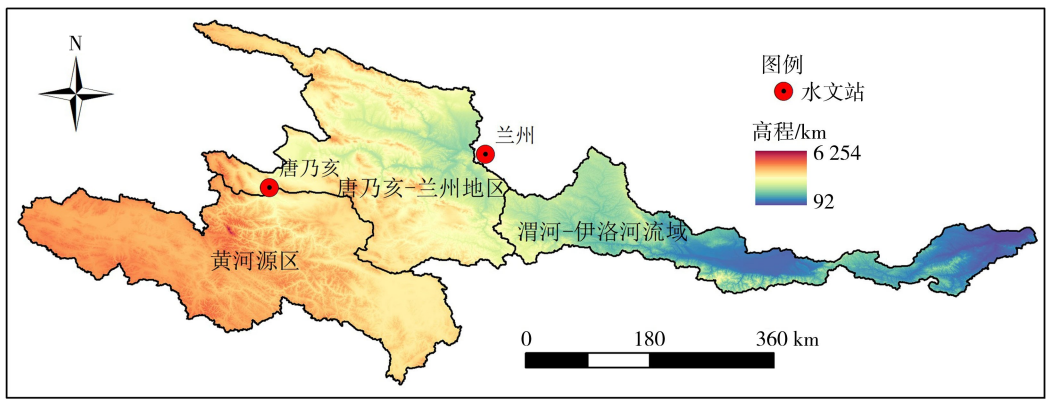


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

情景下的降水数据。由于黄河水源涵养区的降水对水源涵养的贡献率超过80%，土地利用的贡献率仅为0.13%~0.85%，所以未来土地利用均以2020年数据为基础。数据基本信息见表2。将所有数据投影坐标系统一为WGS_1984_UTM_Zone_48N，并采用双线性插值法插值为1 km×1 km分辨率的网格。

表1 GCMs的基本信息

Table 1 Basic information of GCMs

气候模式	研究机构	国家/地区	分辨率
CanESM5	CCCMA	加拿大	2.813°×2.813°
EC-Earth3	EC-Earth	瑞典	0.703°×0.703°
EC-Earth3-Veg	EC-Earth	瑞典	0.703°×0.703°
MIROC6	MIROC	日本	1.406°×1.406°
MRI-ESM2-0	MRI	日本	1.125°×1.125°
TaiESM1	RCEC	中国	1.250°×0.938°

2 研究方法

2.1 InVEST模型

InVEST模型是由美国自然资本项目组开发的生态系统服务功能评估工具^[22]，包括淡水、海洋和陆地生态系统三大评估模块，可以用于量化生境质量、碳储存、产水量、土壤保持、水源涵养等多种生态系统服务功能及其权衡关系^[23-24]。

2.1.1 产水量计算

InVEST模型产水量评估模块基于Budyko水热耦合平衡假设和水量平衡原理^[25]，计算公式为：

$$Y_x = (1 - ET_{Ax}/P_x)P_x \quad (1)$$

表2 数据基本信息

Table 2 Basic information of data

数据类型	数据来源	数据精度	数据处理方法
土地利用	国家青藏高原科学数据中心 https://data.tpdc.ac.cn/	1000 m×1000 m	重分类
降水量、蒸散发	国家青藏高原科学数据中心 https://data.tpdc.ac.cn/	1000 m×1000 m	直接获取
数字高程、道路河流	地理空间数据云 https://www.gscloud.cn/	90 m×90 m	构建图集
基岩深度	https://doi.org/10.1038/s41597-019-0345-6	1000 m×1000 m	计算根系深度
未来降水量、潜在蒸散发	CMIP6气候模式 https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/	1.125°×1.125°	SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5

式中： Y_x 为栅格单元 x 的年产水量； ET_{Ax} 为栅格单元 x 的年实际蒸散发量； P_x 为栅格单元 x 的年降水量。 ET_{Ax} 与 P_x 的关系为：

$$ET_{Ax}/P_x = 1 + ET_{Px}/P_x - [1 + (ET_{Px}/P_x)^{\omega_x}]^{\frac{1}{\omega_x}} \quad (2)$$

其中 $\omega_x = ZW_{ACx}/P_x + 1.25$

式中： ET_{Px} 为栅格单元 x 的潜在蒸散发量； ω_x 为栅格单元 x 的描述自然气候与土壤性质的经验参数； Z 为季节常数，为表征降水季节性特征的常数，根据杨洁等^[26]研究取值为3.6； W_{ACx} 为栅格单元 x 的植被可利用含水量。

2.1.2 水源涵养计算

基于InVEST模型计算得到的产水量，结合地形指数、土壤饱和导水率、流速系数计算水源涵养量，计算公式为：

$$W_{Rx} = Y_x \min\{1, 249/v\} \min\{1, 0.9I_1/3\} \cdot \min\{1, K_{sat}/300\} \quad (3)$$

其中 $I_1 = \lg \frac{n}{DS}$

式中： W_{Rx} 为栅格单元 x 的水源涵养量； v 为流速系数； K_{sat} 为土壤饱和导水率； I_1 为地形指数； n 为集水区栅格数量； D 为土壤深度； S 为百分比坡度，根据DEM计算得到。

2.2 不确定性分析

采用Hawkins等^[27]提出的“内部变率-模式-情

景”三源分解法量化水源涵养量预测结果的不确定性。该方法将不确定性来源分为气候系统的内部变率、气候模式以及排放情景 3 部分,通过分离和量化这 3 部分不确定性来源,实现总不确定性的分解与贡献评估。

对于每个独立预测结果,采用普通最小二乘法拟合 1980—2050 年的平滑四次多项式。不同模式 (m)、不同情景 (s)、不同时间 (t) 的原始预测值 $X_{m,s,t}$ 可表示为:

$$X_{m,s,t} = x_{m,s,t} + i_{m,s} + \varepsilon_{m,s,t} \quad (4)$$

式中: $x_{m,s,t}$ 为平滑拟合值; $i_{m,s}$ 为参考水源涵养量,即 1980—2023 年平滑拟合结果的均值; $\varepsilon_{m,s,t}$ 为残差。

内部变率指气候系统内部动态过程产生的自然波动,不依赖外部强迫导致的模拟偏差,通过各模式残差方差的多模式均值计算:

$$V = \sum_m \frac{1}{n} \text{Var}(\varepsilon_{m,s,t}) \quad (5)$$

式中: V 为内部变率; n 为模式数量,本文 $n = 6$; $\text{var}(\cdot)$ 为跨情景和时间的方差。

模式不确定性指在相同的辐射强迫下,不同的模式模拟的气候变化有所不同,通过各情景拟合值的方差均值计算:

$$M_t = \frac{1}{N_s} \sum_s \text{Var}(x_{m,s,t}) \quad (6)$$

式中: M_t 为模式不确定性; N_s 为情景数量,本文 $N_s = 3$; $\text{var}(\cdot)$ 为跨模式的方差。

情景不确定性指由不同排放情景的强迫差异引发的预测趋势差异,通过各情景多模式均值的方差计算:

$$S_t = \text{Var}\left(\sum_s \frac{1}{n} x_{m,s,t}\right) \quad (7)$$

式中: S_t 为情景不确定性。

三种不确定性来源相互独立,总方差 T_t 可以表示为线性叠加:

$$T_t = V + M_t + S_t \quad (8)$$

全体预测均值变化 G_t 与 90% 置信水平的相对不确定度 F_t 计算公式为:

$$G_t = \frac{1}{N_s} \sum_{m,s} \frac{1}{n} x_{m,s,t} \quad (9)$$

$$F_t = 1.65 \sqrt{T_t} / G_t \quad (10)$$

内部变率、模式不确定性和情景不确定性对 F_t 的贡献分别为 $1.65 \sqrt{V} / G_t$ 、 $1.65 \sqrt{M_t} / G_t$ 以及 $1.65 \sqrt{S_t} / G_t$,三者方差占比分别为 V/T_t 、 M_t/T_t 和 S_t/T_t 。

3 结果与分析

3.1 研究区水源涵养时空演变特征

基于 InVEST 模型预测了 1980—2023 年黄河水源涵养区的水源涵养量,并采用 Pettitt 检验法进行了突变性检验,结果如图 2 所示。由图 2 可见,研究区多年平均水源涵养量为 25.11 mm,年际波动较大;年水源涵养量分布为 19~32 mm,总体呈上升趋势,每 10 a 上升速率为 0.54 mm,与徐凡奇等^[16] 得出黄河水源涵养区 2000 年、2010 年、2020 年水源涵养量分别为 24.29、26.71、28.05 mm 的结果相近。2002 年的 Pettitt 检验统计量 K 最大值为 219,对应的统计值 $p < 0.05$,表明研究区的水源涵养量在 2002 年发生显著突变,突变前后的时段均值分别为 24.01 mm 和 26.11 mm,突变后增加了 2.10 mm (变幅为 8.75%)。

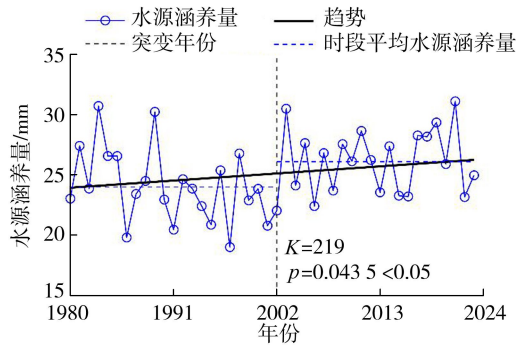


图 2 1980—2023 年研究区水源涵养量及突变分析结果
Fig. 2 Analysis of water conservation capacity and abrupt changes of study area from 1980 to 2023

图 3 为不同年份研究区水源涵养量的空间分布。由图 3 可见,受气候和地形要素影响,研究区水源涵养量整体呈现西南高,东北低的特点,高值区域主要分布在黄河源区,多年平均水源涵养量为 36.82 mm,该结果与沈琦等^[28] 研究得出 1980—2019 年黄河源区多年平均水源涵养量为 (41.15 ± 14.55) mm 结果相近。低值集中在渭河-伊洛河流域,水源涵养量为 17.97 mm,唐乃亥-兰州地区为 20.54 mm。

3.2 未来不同气候变化情景下水源涵养演变特征

3.2.1 未来不同气候情景下降水变化趋势

为了更好地认识降水量与水源涵养量之间的关系,将 1980—2023 年作为基准期,未来时段分为近期 (2026—2035 年) 和远期 (2036—2050 年)。图 4 为研究区在基准期及未来不同情景下的降水量变化趋势,图中阴影部分表示未来降水量波动范围。由图 4 可见,研究区基准期年降水量分布范围为 450~660 mm,多年平均降水量为 557.4 mm,波动较为剧

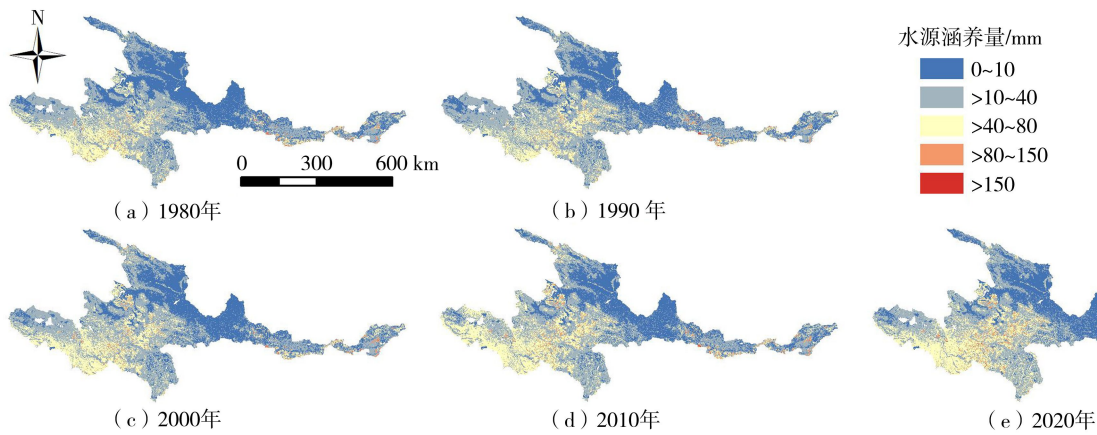


图3 不同年份研究区水源涵养量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water conservation capacity of study area in different years

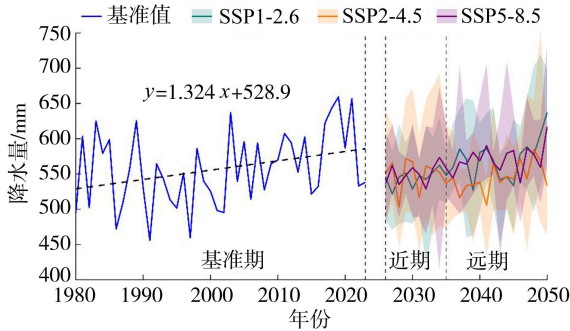


图4 研究区在基准期及未来不同情景下降水量年际变化趋势

Fig. 4 Change trend of precipitation of study area during baseline period and in different future scenarios

烈,整体呈现上升趋势。SSP1-2.6 情景下未来时段多模式多年平均降水量为 561.4 mm,较基准期增加 4.0 mm, SSP2-4.5 情景为 546.0 mm,较基准期下降 11.4 mm, SSP5-8.5 情景为 563.4 mm,较基准期增加 6.0 mm,总体上变化较小。3 种 SSP 情景下年降水量在未来近期分布差异较小,未来远期差异较明显,且 SSP5-8.5 情景波动最剧烈。

2026—2050 年 6 种 GCMs 在不同情景下的降水量均值及其相对基准期的增幅如表 3 所示,各模式的降水预估值差异较大,变幅范围为 -5.12% ~ 7.44%。其中仅 CanESM5 模式在 3 种 SSP 情景下多年平均降水量较基准期均有所增加。SSP1-2.6 情景下降水多模式集合平均增幅为 0.71%, EC-Earth3 及 MRI-ESM2-0 两种模式低于基准期;而

表 3 2026—2050 年 6 种 GCMs 在不同情景下的降水量均值及其相对基准期的增幅

Table 3 Mean precipitation of six GCMs under different scenarios from 2026 to 2050 and their increase magnitude compared to baseline period

情景	CanESM5		EC-Earth3		EC-Earth3-Veg		MIROC6		MRI-ESM2-0		TaiESM1	
	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%
SSP1-2.6	576.7	3.46	552.1	-0.95	573.7	2.93	557.7	0.06	539.0	-3.31	569.1	2.10
SSP2-4.5	579.4	3.95	546.8	-1.89	528.9	-5.12	536.7	-3.72	539.0	-3.30	545.3	-2.18
SSP5-8.5	598.9	7.44	562.9	0.99	547.3	-1.80	539.5	-3.20	568.4	1.97	563.5	1.09

SSP2-4.5 情景下平均增幅为 -2.04%, 仅 CanESM5 模式高于基准期; SSP5-8.5 情景下多模式变幅范围为 -3.20% ~ 7.44%, 离散程度最大。

3.2.2 不同气候模式及情景下水源涵养量预估差异

采用 6 种 GCMs 降水数据驱动 InVEST 模型, 进一步分析 2026—2050 年 3 种 SSP 情景下研究区的水源涵养量变化, 结果如图 5 所示。3 种 SSP 情景下水源涵养量均延续了基准期年际波动较大的特征, 未来远期的波动幅度要略大于未来近期, 且受气候模式差异影响, 呈现出不同的增幅。由图 5(a) 可见, SSP1-2.6 低辐射强迫情景下各模式预测的水源涵养量波动范围为 20 ~ 38 mm。其中, MRI-ESM2-0 模式波动幅度最大, 其余模式相对平缓。由图 5(b) 可见, SSP2-4.5 中等辐射强迫情景对应中等社会经济发展与碳排放路径, 多数模式的波动峰值集中在 2030 年前后, CanESM5 模式的预测值在 2049 年达到峰值 (36.92 mm)。由图 5(c) 可见, 在 SSP5-8.5 高强迫情景下, 水源涵养量波动幅度显著大于前两种情景。MRI-ESM2-0 与 CanESM5 模式的峰值超过 35 mm, 而 MIROC6 模式则出现 18.51 mm 的低谷, 模式间离散度最大。

图 6 为 2026—2050 年 6 种 GCMs 在不同情景下水源涵养量预测值分布箱线图。由图 6 可见, CanESM5 及 MRI-ESM2-0 模式在各情景下的多年平均水源涵养量箱体长度显著长于其他模式, 说明其年际波动较大。相比之下, MIROC6 模式在 3 种 SSP

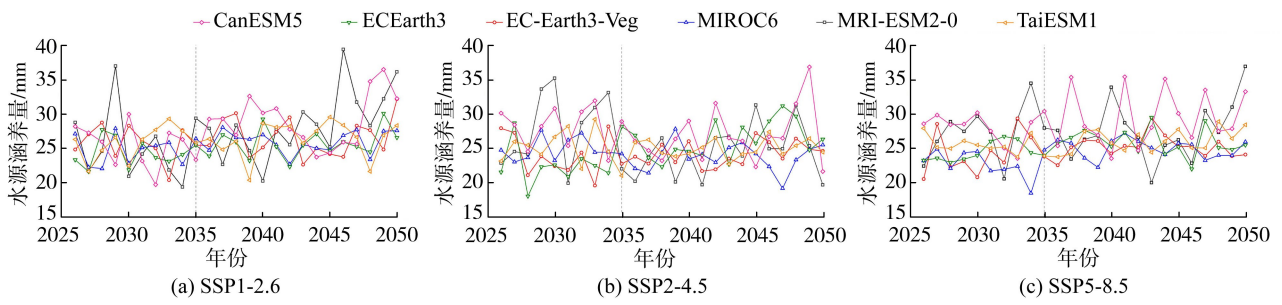


图 5 2026—2050 年 6 种 GCMs 在不同情景下水源涵养量预测值

Fig. 5 Water conservation capacity estimates from six GCMs under different scenarios from 2026 to 2050

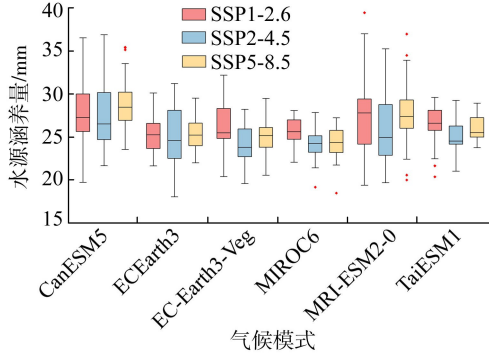


图 6 2026—2050 年 6 种 GCMs 在不同情景下水源涵养量预测值分布箱线图

Fig. 6 Box plot of water conservation capacity estimates from six GCMs under different scenarios from 2026 to 2050

情景下箱体均较短,其年际波动最小。CanESM5 模式在 3 种 SSP 情景下水源涵养预测结果均较高,这与其在 3 种情景下降水量均呈增加趋势直接相关。SSP5-8.5 情景下部分模式离散点更为突出,与该情景下降水预估波动更大、模式间离散度更高的特征相呼应。

3.2.3 未来多气候情景下水源涵养量时空演变特征

图 7 为研究区在基准期及未来不同情景下的水源涵养量变化趋势,图中阴影区域代表 6 种气候模式预测结果的范围。表 4 为 2026—2050 年 6 种 GCMs 在不同情景下的水源涵养量均值及其相对基准期的增幅。由图 7 和表 4 可见,在 SSP1-2.6 情景下,未来水源涵养量总体呈现缓慢上升趋势,多模式多年平均水源涵养量为 26.40 mm,相较基准期增幅为 5.14%,6 种 GCMs 预测结果多年平均值相较基准期均有所增加,变幅范围在 0.52%~10.18%。

表 4 2026—2050 年 6 种 GCMs 在不同情景下的水源涵养量均值及其相对基准期的增幅

Table 4 Mean water conservation capacity of six GCMs under different scenarios from 2026 to 2050 and their increase magnitude compared to baseline period

情景	CanESM5		EC-Earth3		EC-Earth3-Veg		MIROC6		MRI-ESM2-0		TaiESM1	
	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%
SSP1-2.6	27.66	10.18	25.24	0.52	26.30	4.76	25.52	1.65	27.38	9.07	26.28	4.66
SSP2-4.5	27.42	9.21	24.94	-0.65	24.15	-3.80	24.27	-3.36	25.83	2.87	25.08	-0.12
SSP5-8.5	28.94	15.28	25.40	1.16	24.93	-0.71	24.17	-3.73	27.56	9.76	25.94	3.33

SSP2-4.5 情景下,多模式均值为 25.28 mm,略低于其他两种情景,变幅范围为-3.80%~9.21%,仅 MRI-ESM2-0 和 CanESM5 模式预测上升。SSP5-8.5 情景多模式均值为 26.16 mm,相较基准期增幅 4.18%,变幅范围-3.73%~15.28%。综合来看,不同情景下水源涵养量多模式集合平均值较基准期均有所增加,但各气候模式间存在显著差异,且各 GCMs 在 3 种 SSP 情景下水源涵养变化趋势与降水演变特征近似,进一步验证了降水量是影响水源涵养的关键因素。

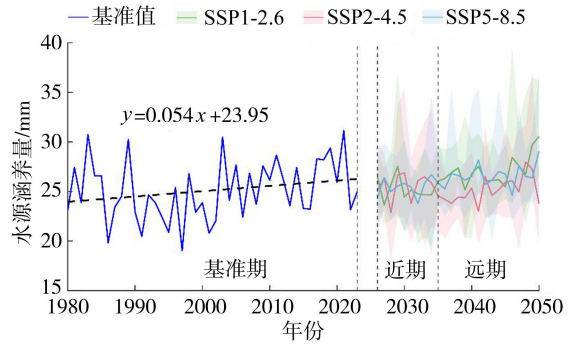


图 7 研究区在基准期及未来不同情景下的水源涵养量变化趋势

Fig. 7 Change trend of water conservation capacity of study area during baseline period and in different future scenarios

图 8 为研究区在未来不同情景下水源涵养量的空间分布。由图 8 可见,水源涵养量的空间格局保持稳定,均呈现西南高,东北低的特征。黄河源区作为流域上游重要水源涵养区,其水源涵养量始终处于较高水平,唐乃亥-兰州地区处于流域中游过渡地带,其水源涵养量次之,渭河-伊洛河流域位于流域

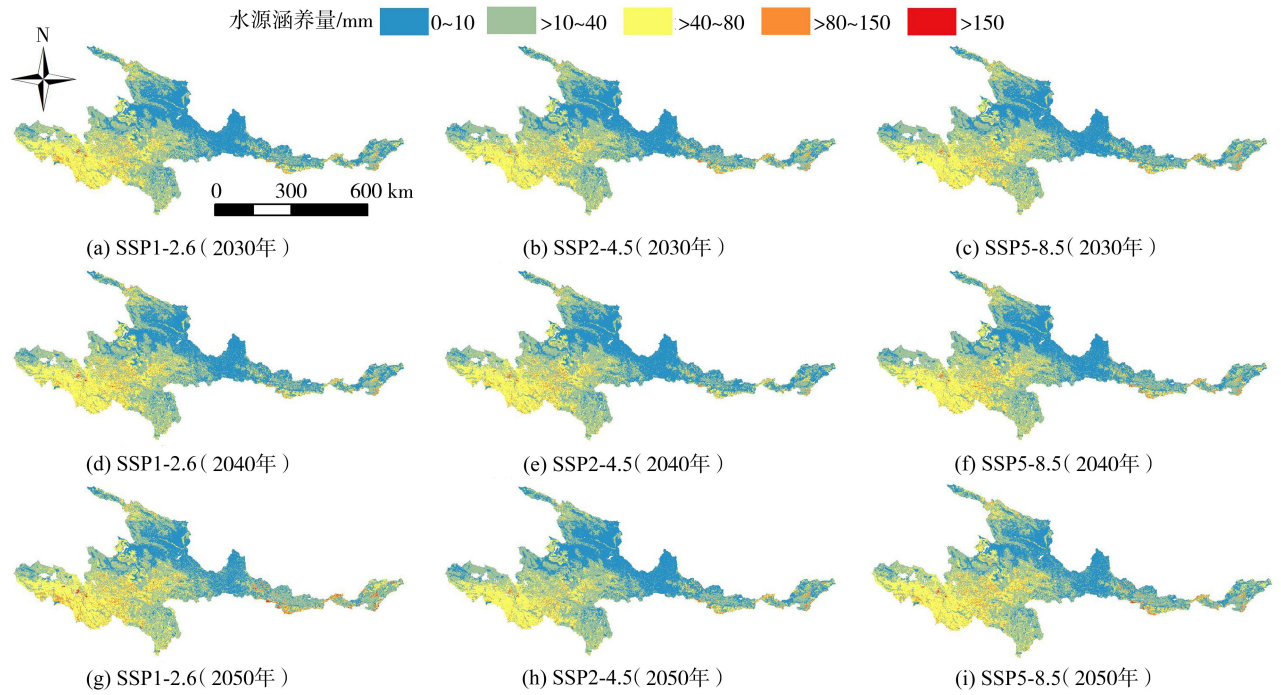


图8 研究区未来不同情景下水源涵养量的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of water source conservation of study area in different scenarios of future

东部,水源涵养量整体水平较低,受地理环境和人类活动紧密影响,空间变化较为显著。但随时间推移,不同分区的变化幅度在不同气候模式与情景之间存在明显差异。

表5为不同分区未来不同情景下水源涵养量多模式集合平均值及相对基准期的增幅。由表5可见,SSP1-2.6情景下黄河源区整体水源涵养量较高,且呈增加趋势,2030年较基准期增幅2.14%,变幅范围为-13.28%~25.31%,到2050年增幅扩大到15.14%,变幅范围为4.94%~30.53%;唐乃亥-兰州地区在2030年略有下降,2040年有所上升,到2050年增幅为6.05%;渭河-伊洛河流域整体偏低,2030年较基准期下降22.56%,未来远期逐步上升。SSP2-4.5情景下黄河源区增幅整体弱于SSP1-2.6情景;唐乃亥-兰州地区水源涵养量低于基准期,到

2050年降幅扩大至18.65%,变幅范围为-40.6%~5.11%,不确定性较为显著;渭河-伊洛河流域水源涵养量最低,且较基准期显著下降。SSP5-8.5情景下模式间差异显著增大,黄河源区呈上升趋势,2030年增幅为2.93%,2050年增幅升至13.63%,变幅范围扩大至-9.56%~46.63%;唐乃亥-兰州地区2030及2040年水源涵养量均低于基准期,到2050年增幅为7.88%;渭河-伊洛河流域2030年降幅为13.71%,未来远期有所上升但仍未达到基准期水平,2050年变幅范围为-21.26%~24.32%。

3.3 不确定性分析

基于“内部变率-模式-情景”三源分解法,结合6种GCMs3种SSP情景的预测结果,量化研究区水源涵养量预测的不确定性,结果如图9所示。由图9(a)可见,总相对不确定度在未来近期无明显变

表5 不同分区未来不同情景下水源涵养量多模式集合平均值及相对基准期的增幅

Table 5 Multi-model ensemble averages of water conservation capacity and increase magnitude relative to baseline period under different future scenarios for various sub-regions

分区	年份	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
		均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%	均值/mm	增幅/%
黄河源区	2030	37.61	2.14	37.10	0.76	37.90	2.93
	2040	41.45	12.58	39.12	6.26	38.35	4.16
	2050	42.39	15.14	35.54	-3.47	41.84	13.63
唐乃亥-兰州地区	2030	17.72	-13.75	17.80	-13.35	19.29	-6.09
	2040	20.55	0.02	17.98	-12.49	19.15	-6.75
	2050	21.78	6.05	16.71	-18.65	22.16	7.88
渭河-伊洛河流域	2030	13.92	-22.56	16.07	-10.57	15.51	-13.71
	2040	14.60	-18.78	13.17	-26.70	16.84	-6.32
	2050	21.27	18.37	15.76	-12.29	17.82	-0.83

化,表明该阶段水源涵养预测值可靠性较高,未来远期则呈轻微上升趋势。由图 9(b)可见,模式不确定性为总不确定性的主要来源,其相对不确定度从年际变化上看差异不显著,但明显大于情景和内部变率的相对不确定度,未来近期占比约 52%,2035 年后逐渐下降。情景的相对不确定度在未来近期微弱上升,未来远期呈现显著上升趋势,由 0.71 上升至 0.96,不确定性占比从约 37% 上升至约 45%。3 种不确定性来源中内部变率不确定性占比最小,始终保持在 10% 左右。

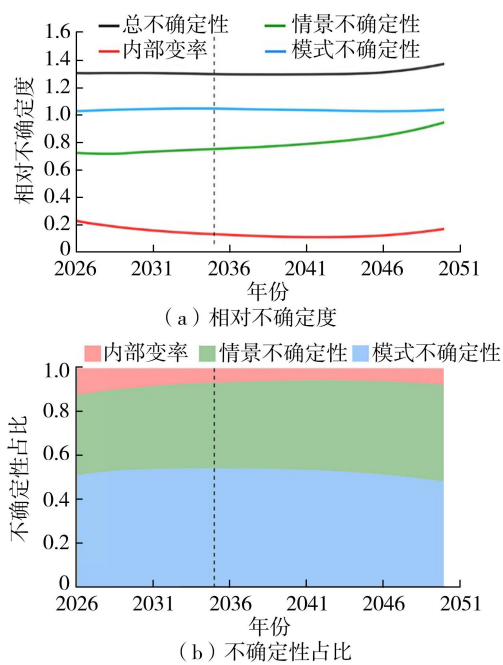


图 9 研究区水源涵养量预测的不确定性

Fig. 9 Uncertainty in predicting water conservation capacity in study area

综上所述,研究区水源涵养量预测的不确定性在未来近期可靠性较高,未来远期因气候系统长期累积效应,总相对不确定度略有上升,但整体仍处于可接受范围,未出现剧烈波动。不确定性来源的主次与动态变化表明,模式不确定性是总不确定性的主要来源,情景不确定性的贡献则呈现显著增长趋势。这一结果反映排放情景的长期累积效应会加剧气候系统差异,成为未来远期不确定性的关键驱动因素,内部变率的影响最小。鞠琴等^[29-30]的研究表明气候模式是预估未来降水的重要工具,尽管 CMIP6 模式通过提升分辨率与物理参数化方案优化了性能,但对关键过程的描述仍存在显著不足。这种结构性的缺陷导致模式在模拟气候的降水时空分布、极端降水频率等各组分的分配时产生系统性偏差,这些偏差受内外部条件的制约会直接传递到未来情景预估中,存在一定的不确定性。Gao 等^[31]在对我国多个区域未来降水和气温预估的不确定性

研究中指出,气候模式是不确定性的主要来源; Prudhomme 等^[32]基于多模型框架评估英国河流未来径流预测的不确定性,发现气候模式是最大不确定性来源,降尺度技术与排放情景的不确定性量级相近且通常小于气候模式。这些关于探讨不同因素对未来预测整体不确定性的影响与本文结果一致。总之,在区域尺度上由于选取的气候模式物理过程、参数化方案的不同,每个模式都存在不同程度的系统性偏差^[33]。后期将结合更多的气候模式和水文模型,发展不确定性分析方法,从不同层面解析水源涵养量变化过程,降低预估水源涵养量的不确定性。

4 结论

a. 1980—2023 年黄河水源涵养区水源涵养量呈上升趋势,每 10 a 上升速率为 0.54 mm,多年平均值达 25.11 mm,年际波动较大。经 Pettitt 检验,2002 年出现显著突变,突变后增幅达 8.75%。空间上呈现西南高、东北低的特点,高值区集中于黄河源区,低值区分布在渭河-伊洛河流域。

b. 黄河水源涵养区基准期多年平均降水量为 557.4 mm,在 450~660 mm 区间剧烈波动且整体呈上升趋势。2026—2050 年 SSP1-2.6、SSP5-8.5 情景下降水略高于基准期,SSP2-4.5 情景下降水低于基准期。6 种 GCMs 中仅 CanESM5 模式降水量在 3 种 SSP 情景下均呈增长,且远期各模式降水波动幅度大于近期。

c. 2026—2050 年不同 GCMs 及 SSP 情景下黄河水源涵养区的水源涵养量演变特征差异明显。SSP1-2.6 情景下 6 种 GCMs 预测结果均呈上升趋势,各模式多年均值为 26.40 mm,高于基准期; SSP2-4.5 情景预测结果略低于其他两种情景; SSP5-8.5 情景下的预测结果波动幅度最大,且未来远期大于未来近期。空间上呈现西南高、东北低的格局,黄河源区水源涵养量最高,唐乃亥-兰州地区次之,渭河-伊洛河流域最低,且在 SSP5-8.5 情景下各模式间差异更显著。

d. 水源涵养量预测总相对不确定度在未来远期略大于未来近期,其中气候模式不确定性占主导地位,年际差异较小,显著高于排放情景内部变率的不确定性。排放情景的不确定性占比从未来近期的 37% 增加至未来远期的 45%,未来远期呈显著上升趋势。内部变率的不确定性影响最小,其不确定性占比基本保持在 10% 左右。

参考文献:

[1] Zuo Depeng, Chen Guo, Wang Guoqing, et al. Assessment

- of changes in water conservation capacity under land degradation neutrality effects in a typical watershed of Yellow River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148:110145.
- [2] 勾志涛,张鹏,贾夏,等. 基于 InVEST-PLUS 模型的秦岭水源涵养量时空演变及多情景预测[J]. *环境科学*, 2026, 47(5):3013-3024. (Gou Zhitao, Zhang Peng, Jia Xia, et al. Spatiotemporal evolution and multi-scenario prediction of water conservation in Qinling Mountains based on the InVEST-PLUS model [J]. *Environmental Science*, 2026, 47(5):3013-3024. (in Chinese))
- [3] 王晶,赵美茹,高紫妍,等. 京津冀水-能-粮-生态系统脆弱性与经济韧性脱钩分析[J]. *水利经济*, 2025, 43(6):72-80. (Wang Jing, Zhao Meiru, Gao Ziyang, et al. Decoupling analysis of water-energy-food-ecology system vulnerability and economic resilience in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2025, 43(6):72-80. (in Chinese))
- [4] 王辉源,宋进喜,吴琼. 未来气候及土地利用变化对水源涵养量的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5):226-234. (Wang Huiyuan, Song Jinxi, Wu Qiong. Influence of future climate and land use changes on water conservation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5):226-234. (in Chinese))
- [5] 刘亦晟,侯鹏,王平,等. 生态系统水源涵养服务功能定量评估方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(1):275-288. (Liu Yisheng, Hou Peng, Wang Ping, et al. Research advance on quantitative assessment methods of ecosystem water conservation service functions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(1):275-288. (in Chinese))
- [6] 贾雨凡,王国庆. 基于 InVEST 模型的伊洛河流域水源涵养能力评估[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3):101-108. (Jia Yufan, Wang Guoqing. Assessment of water conservation capacity of yiluo river basin based on the InVEST model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3):101-108. (in Chinese))
- [7] 贾雨凡,杨勤丽,胡非池,等. 变化环境下的水源涵养能力评估研究进展[J]. *水利水运工程学报*, 2022(1):37-47. (Jia Yufan, Yang Qinli, Hu Feichi, et al. Prospect and progress of water conservation capacity evaluation in a changing environment [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(1):37-47. (in Chinese))
- [8] Al-Ghobari H, Dewidar A Z. Integrating GIS-based MCDA techniques and the SCS-CN method for identifying potential zones for rainwater harvesting in a semi-arid area [J]. *Water*, 2021, 13(5):704.
- [9] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3):213-224.
- [10] Li Mei, Di Zhenhua, Yao Yunjun, et al. Variations in water conservation function and attributions in the Three-River Source Region of the Qinghai-Tibet Plateau based on the SWAT model [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 349:109956.
- [11] 陈书林. 基于 TVDI 模型的森林生态系统水源涵养服务功能研究[J]. *生态经济*, 2016, 32(12):182-186. (Chen Shulin. Estimating forest ecosystem service function of water conservation based on TVDI [J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(12):182-186. (in Chinese))
- [12] 刘娇,郎学东,苏建荣,等. 基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(20):8099-8111. (Liu Jiao, Lang Xuedong, Su Jianrong, et al. Evaluation of water conservation function in the dry-hot valley area of Jinsha River Basin based on InVEST model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20):8099-8111. (in Chinese))
- [13] Li Mingyue, Liang Dong, Xia Jun, et al. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286:112212.
- [14] 张秀霞,杜衡,李旺平,等. 基于 InVEST 模型的黄河流域水源涵养时空演变及其影响因素[J]. *生态学报*, 2025, 45(24):12324-12336. (Zhang Xiuxia, Du Heng, Li Wangping, et al. Spatiotemporal evolution and driving factors of water conservation in the Yellow River Basin using the InVEST Model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(24):12324-12336. (in Chinese))
- [15] 盖莹莹,赵衡,王富强. 黄河流域生态系统服务供需变化及其驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2025, 46(6):3672-3680. (Gai Yingying, Zhao Heng, Wang Fuqiang. Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand in the Yellow River Basin [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(6):3672-3680. (in Chinese))
- [16] 徐凡奇,蔡辉艺,申同庆,等. 气候和土地利用变化情景下黄河水源涵养区土壤保持与水源涵养量预测[J/OL]. *环境科学*, 1-19 [2025-09-29]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202506024>. (Xu Fanqi, Cai Huiyi, Shen Tongqing, et al. Prediction of soil conservation and water conservation in the Yellow River water conservation area under climate and land use change scenarios [J/OL]. *Environmental Science*, 1-19 [2025-09-29]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202506024>. (in Chinese))
- [17] Dobler C, Hagemann S, Wilby R L, et al. Quantifying different sources of uncertainty in hydrological projections in an Alpine watershed [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(11):4343-4360.
- [18] 吴辉明,严萌,周帅. 基于 CMIP6 气候情景的西江流域未来径流预测及其不确定性分析[J]. *人民珠江*, 2025, 46(7):11-19. (Wu Huiming, Yan Meng, Zhou Shuai.

- Runoff prediction and uncertainty analysis for Xijiang River Basin based on CMIP6 climate scenarios[J]. *Pearl River*, 2025, 46(7): 11-19. (in Chinese))
- [19] 鞠琴,刘小妮,刘娣,等. 基于遥感和通量观测的实际蒸发散时空变化特征:以黄河流域水源涵养区为例[J]. *水科学进展*, 2024, 35(2): 338-347. (Ju Qin, Liu Xiaoni, Liu Di, et al. Spatiotemporal variation characteristics of actual evapotranspiration based on remote sensing and flux observations: case study in the water conservation area of the Yellow River Basin[J]. *Advances in Water Science*, 2024, 35(2): 338-347. (in Chinese))
- [20] 王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. *水文*, 2022, 42(2): 65. (Wang Guoqing. Definition of water conservation areas in the Yellow River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(2): 65. (in Chinese))
- [21] 吴金雨,鞠琴,刘小妮,等. CMIP6 模式对黄河水源涵养区降水和气温模拟能力的评估[J]. *水利水运工程学报*, 2023(6): 1-12. (Wu Jinyu, Ju Qin, Liu Xiaoni, et al. Assessment of precipitation and temperature in the water conservation region of the Yellow River Basin using CMIP6 models[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(6): 1-12. (in Chinese))
- [22] 张徐,李云霞,吕春娟,等. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展[J]. *生态科学*, 2022, 41(1): 237-242. (Zhang Xu, Li Yunxia, Lyu Chunjuan, et al. Research progress on application of ecosystem service functions based on InVEST model[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(1): 237-242. (in Chinese))
- [23] 侯红艳,戴尔阜,张明庆. InVEST 模型应用研究进展[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(4): 62-67. (Hou Hongyan, Dai Erfu, Zhang Mingqing. A review on InVEST model for the evaluation of ecosystem service function[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 39(4): 62-67. (in Chinese))
- [24] 鞠琴,卜媛媛,申同庆,等. 黄河水源涵养区生态系统服务要素时空演变及权衡与协同分析[J]. *水资源保护*, 2025, 41(2): 38-46. (Ju Qin, Bu Yuanyuan, Shen Tongqing, et al. Spatiotemporal evolution and trade-off and synergy analysis of ecosystem service factors in the Yellow River water conservation area[J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(2): 38-46. (in Chinese))
- [25] 顾晋怡,李一平,杜薇. 基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养能力评价及其变化特征分析[J]. *水资源保护*, 2018, 34(3): 62-67. (Gu Jinyi, Li Yiping, Du Wei. Evaluation on water source conservation capacity and analysis of its variation characteristics of Taihu Lake Basin based on InVEST model[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(3): 62-67. (in Chinese))
- [26] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(08): 2731-2739. (Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(8): 2731-2739. (in Chinese))
- [27] Hawkins E, Sutton R. The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(8): 1095-1108.
- [28] 沈琦,罗栋梁,陈方方,等. 1980—2019 年黄河源区冻土影响下水源涵养空间格局[J]. *地理研究*, 2025, 44(3): 876-890. (Shen Qi, Luo Dongliang, Chen Fangfang, et al. Spatial patterns of water conservation under the influence of permafrost in the Source Area of the Yellow River from 1980 to 2019 [J]. *Geographical Research*, 2025, 44(3): 876-890. (in Chinese))
- [29] 鞠琴,吴金雨,王兴平,等. 机器学习算法在降水和气温多模式集成中的应用[J]. *水资源保护*, 2024, 40(3): 106-115. (Ju Qin, Wu Jinyu, Wang Xingping, et al. Application of machine learning algorithms in multimodal integration of precipitation and temperature [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(3): 106-115. (in Chinese))
- [30] 鞠琴,马啸赞,刘艳丽,等. 基于秩评分方法的 CMIP6 全球气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力评估[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(6): 12-20. (Ju Qin, Ma Xiaozan, Liu Yanli, et al. Evaluation for CMIP6 global climate models in simulating precipitation and temperature over the Huaihe River Basin based on rank score method [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(6): 12-20. (in Chinese))
- [31] Gao Yiyan, Yu Zhongbo, Zhou Minpei, et al. Optimal reliability ensemble averaging approach for robust climate projections over China [J]. *International Journal of Climatology*, 2024, 44(9): 2852-2875.
- [32] Prudhomme C, Davies H. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: future climate [J]. *Climatic Change*, 2009, 93(1/2): 197-222.
- [33] 武传号,逯家宝,周君,等. 基于 CMIP6 多模式集合的中国洪水热浪复合极端事件特征预测[J]. *水资源保护*, 2025, 41(3): 20-30. (Wu Chuanhao, Lu Jiabao, Zhou Jun, et al. Characteristic projection of successive flood-heatwave extreme events in China based on CMIP6 multi-model ensembles [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(3): 20-30. (in Chinese))

(收稿日期:2025-10-15 编辑:王芳)