

• 四川大学建校 130 周年特刊约稿 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202600469



本刊网刊

全球变暖驱动下黄河水源涵养区径流模拟及趋势预估

王国庆^{1,2}, 孙高霞^{1,2}, 鞠 琴³, 张建云^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029;
3. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘 要:变化环境下水资源演变趋势不仅是国际水科学研究的重点,也是流域水利部门关注的核心。以黄河水源涵养区为研究对象,构建了基于动态下垫面的 RCCC-DWBM 模型,进行径流过程模拟;利用 13 个 CMIP6 模式在共享社会经济路径不同排放情景下的气候预测数据,分析了未来气温与降水的变化趋势,并动态模拟了黄河流域未来水资源情势。结果表明:所构建的 RCCC-DWBM 模型能够较好地模拟变化环境下黄河流域干支流的水文过程,30 个水文站的径流模拟纳什效率系数大多高于 0.6,相对误差总体控制在 $\pm 5\%$ 以内。未来黄河水源涵养区气温将持续显著升高;与基准期(1985—2015 年)相比,流域降水总体可能增加,但预估结果存在较大不确定性。在低排放情景下,黄河水源涵养区径流量总体呈增加趋势;而在中、高排放情景下,渭河与伊洛河的径流量均表现为减少趋势。受冰川、积雪等因素影响,兰州站以上河段的径流量在未来近期可能略有增加(增幅小于 2%),未来中期则可能转为减少。总体而言,全球变暖将加剧黄河流域水资源供需矛盾。研究可为变化环境下黄河流域水资源的高效开发利用与管理提供科学依据。

关键词:黄河水源涵养区;RCCC-DWBM 模型;气候模式;水资源趋势

中图分类号:P333

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)05-0302-10

全球变暖已是不争的事实,政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告表明,2011—2020 年全球陆地平均气温较工业化前(1850—1900 年)升高了 1.09 °C,极端降水事件具有增多、增强的趋势^[1]。随着经济社会的快速发展,土地利用、流域下垫面发生显著变化^[2-3]。变化环境下中国主要江河实测径流发生显著变化,北方地区径流减少更为明显^[4]。中国水资源短缺,水是经济社会发展的刚性约束,径流的丰枯变化及演变趋势直接关系到经济社会的稳定发展。

环境变化下水资源情势及其应对是区域可持续发展关注的焦点。国际水文科学协会(International Association of Hydrological Sciences, IAHS)新一阶段的十年(2023—2032 年)科学计划“IAHS-HELPING”(Hydrology Engaging Local People IN one Global world)旨在研究提出全球水危机的解决方案^[5];联合国教科文组织(United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO)也在国际水文计划第九阶段(IHP-

IX, 2022—2029 年)研究计划中将科学构筑变化环境下水安全世界作为该阶段的核心主题^[6]。科学预估水资源情势,是全球水危机情势解析和水安全保障的重要基础。

未来气候和水资源演变趋势,不仅是国际水科学研究的重点,也是流域管理机构 and 地方水利部门关注的焦点。第六次国际耦合模式比较计划(The Coupled Model Intercomparison Project Phase Six, CMIP6)中,气候模式及其共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)已成为分析未来气候变化最主要的模式和情景^[7-9]。然而,气候变化预估最大的问题是不确定性,水资源影响评估正从依赖单一模型向集成化、多情景方向发展,多模型集合方法正逐步成为降低预测不确定性的重要路径^[10]。Mengistu 等^[11]提出一种气候变化影响下水资源脆弱性的多模型评估框架,通过整合多个气候模式与水文模型的输出结果,有效减小了单一模型带来的系统偏差,为脆弱性评估提供了更具稳健性的技术路线。

流域水文模型是评估气候变化影响最主要的工

收稿日期:2026-05-30 修回日期:2026-07-17 网络出版日期:2026-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(U2243228;52121006);国家重点研发计划项目(2021YFC3201100)

作者简介:王国庆(1971—),男,正高级工程师,博士。研究方向:气候变化;流域水文模拟;生态水文过程。E-mail: gqwang@nhri.cn

具^[12],气候变化对水文的影响评估范围也逐步向生态水文过程、供水安全等方面拓展^[13-14]。Mengistu等^[15]通过水文模拟评估了气候变化对埃塞俄比亚青尼罗河上游区域水资源供给的影响,发现降水格局改变与干旱频率增加将显著加剧该流域的水资源压力;Wang等^[16]聚焦青藏高原及周边的亚洲水塔区域,警示冰川加速退缩将削弱该区域作为亚洲大河水源地的供给功能,其影响波及亚洲十余国,涉及数十亿人口的用水安全。总体上,气候变暖将加剧水文循环,导致水资源时空分布显著改变^[17]。然而,目前的水文模拟及未来水资源趋势研究均对下垫面变化的影响考虑不足^[18]。

黄河以全国2%的水资源量支撑了接近全国15%的人口、经济和超过25%的能源生产^[19-20]。在以全球变暖为特征的环境变化驱动下,21世纪以来,黄河实测径流锐减30%以上^[21],直接影响到黄河流域生态保护和高质量发展战略实施。本文以黄河水源涵养区为研究对象,在构建基于动态下垫面的流域水文模型基础上,结合未来气候变化情景,预估未来气候变化下径流演变趋

势,以期有效支撑黄河流域未来水资源规划与管理。

1 黄河水源涵养区界定及资料来源

黄河是中国第二大河,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓,河流跨越青藏高原、黄土高原和黄淮海平原,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省份或自治区,在山东利津附近入海,干流全长5464 km,流域面积为 $79.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均径流量为 $490 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。黄河水资源时空极其不均,水量主要来源于黄河上游、渭河南山支流和伊洛河流域^[22]。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》^[23]明确了黄河流域生态保护的“一带五区多点”空间布局,其中,“五区”指以三江源、秦岭、祁连山、六盘山、若尔盖等重点生态功能区为主的水源涵养区。结合流域气候水文特征,将黄河水源涵养区界定为黄河上游兰州站以上地区、渭河华县以上(不包括泾河和北洛河)地区和伊洛河流域(图1)。黄河水源涵养区面积合计 $30.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,占黄河流域面积的37%;天然径流量合计 $413 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占黄河天然径流量的84%^[24]。

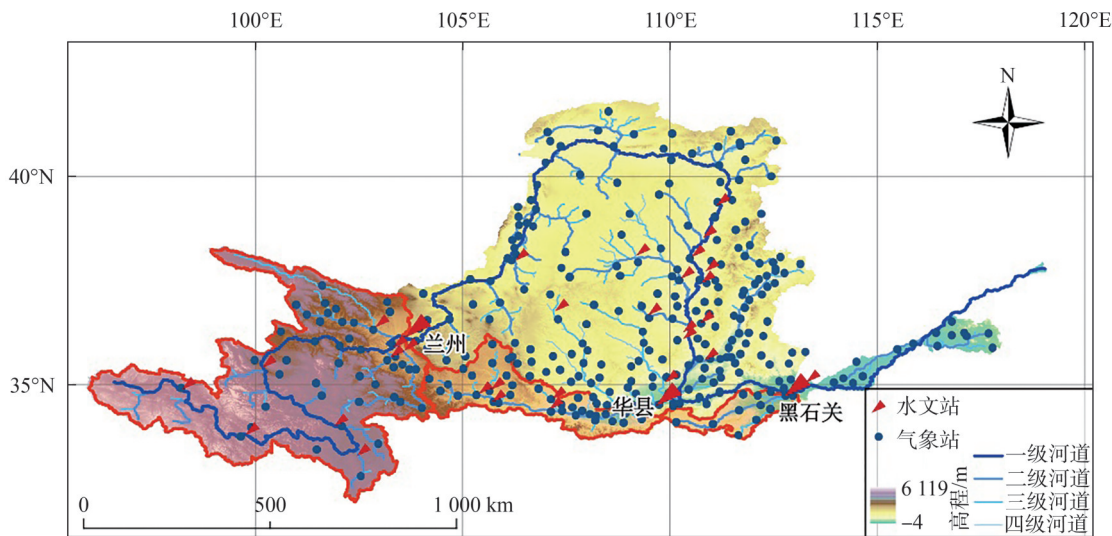


图1 黄河流域水系、水文站、气象站及水源涵养区地理位置

Fig. 1 Geographical location of river system, hydrometric stations, meteorological stations, and water conservation area of the Yellow River

综合考虑站点空间分布、流域地貌、水文及气候的区域特征等因素,在黄河流域选取了286个气象站和33个水文站用于模型参数率定,其中包括黄河水源涵养区的103个雨量站和16个水文站,系统收集了黄河流域上述站点1960—2020年的逐月流量及气候要素资料。统计结果表明:黄河源区气温最低(黄河沿站 -3.57°C),源区支流径流深普遍较高。相比而言,黄土高原支流气温较高,降水偏低,其中,支流苦水河流域年降水仅287.5 mm,为全域最低;同时,蒸散发能力较强,普遍超900 mm,但多数站点径流深不足30 mm,产流相对较

弱。黄河中游下段渭河、伊洛河流域年降水量较高,径流深较大,其中,渭河径流深55.4 mm;伊洛河植被较好,其归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)超过0.7,为植被峰值区域。整体而言,气温、降水、植被自西向东、自北向南具有持续升高或增加的态势。采用气候模式情景驱动流域水文模型是评估气候变化对水资源影响的重要途径^[25-27]。本文收集了CMIP6中的气候模式数据(<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6>),包括地表平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、风速和降水等,全球气候模式历史模拟及

未来预估数据时间段为 1850—2100 年^[28-29]。

同时,收集了 1981—2022 年的 GIMMS NDVI 植被数据集,该植被数据由美国国家航天航空局 (NASA) 全球监测与模型研究组 (GIMMS) 基于 NOAA/AVHR 遥感数据获得,其空间分辨率为 8 km×8 km,时间分辨率为 1 个月 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>)。

2 基于动态下垫面的 RCCC-DWBM 模型及径流模拟

RCCC-WBM (water balance model developed by Research Center for Climate Change) 模型是由水利部应对气候变化研究中心团队研发的具有一定物理机制解释的大尺度水文模型^[30]。模型输入包括气温、降水和水面蒸发;模型根据气温进行雨雪分割;基于超渗和蓄满

两种产流机制进行地面径流计算;基于降雪过程进行积雪和融雪过程刻画;降雨下渗进入土壤层,以线性水库出流理论估算地下径流,3 种径流线性叠加形成流域出口径流量^[31]。在采用研究流域若干年水文气象资料率定 RCCC-WBM 模型时,优化的模型参数反映了对应时期平均的下垫面状态。然而,在全球变暖和生态修复等人类活动的影响下,一方面,流域植被的年代际和季节变化通过影响蒸发和产流调控河川径流;另一方面,高寒地区的季节性和常年冻土层对全球变暖非常敏感,气温升高在一定程度上使冻土活动层增厚、包气带扩大,通过改变下渗影响径流过程。Wang 等^[32]充分考虑动态植被和气温对水文循环过程的直接和间接影响,在 RCCC-WBM 模型的基础上构建了基于动态下垫面的 RCCC-DWBM 模型,其结构如图 2 所示。图 2 中, $D_{s, \max, i}$ 为动态土壤最大蓄水容量,为第 i 时段温度的函数。

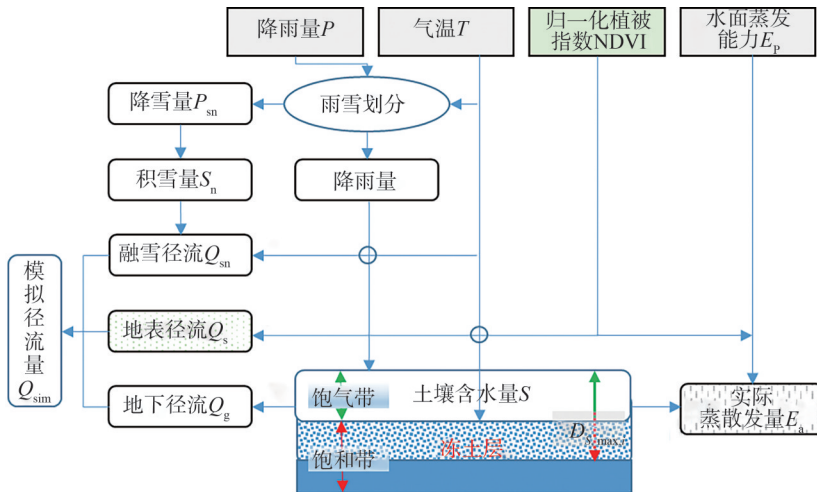


图 2 RCCC-DWBM 模型结构框架

Fig. 2 Structural framework of the RCCC-DWBM model

相较 RCCC-WBM 模型,构建的 RCCC-DWBM 模型增加了植被参数 NDVI 的输入;在模型参数和产流计算方面,提出基于气温的动态最大蓄水容量参数,以最大蓄水容量参数的动态变化反映气温驱动下冻土层变化对产流的影响,计算公式如式(1)所示;构建了基于 NDVI 的地表径流和蒸散发计算公式,以反映植被变化对径流和蒸发的影响,计算公式如(2)、(3)所示。

$$D_{s, \max, i} = \left[1 + \arctan[(T_i - 4)/\pi] / \pi^2 \right] \times S_{\max} \quad (1)$$

式中: T_i 为第 i 时段的流域气温; $S_{\max}$ 为模型参数,表征了流域平均气温状态下流域的最大土壤蓄水容量。

$$Q_{sv, i} = \frac{k_s}{1 + k_s \times k_{NDVI, i}} \times \frac{S_{i-1}}{D_{s, \max, i}} \times P_{rain, i} \quad (2)$$

式中: $Q_{sv, i}$ 为计算的第 i 时段的地表径流量; $k_{NDVI, i}$ 为第 i 时段的流域平均植被指数,基于卫星遥感影像解译获得; $P_{rain, i}$ 为第 i 时段流域面平均降雨量,在 RCCC-

WBM 模型中根据气温和降水量进行雪雨划分获得; S_{i-1} 为流域前期(第 $i-1$ 时段)土壤含水量,是流域的状态变量; k_s 为模型参数。

$$E_{av, i} = k_e \times \left(1 + k_{NDVI, i} \right) \times \frac{S_{i-1}}{S_{\max}} \times E_{p, i} \quad (3)$$

式中: $E_{av, i}$ 为计算的第 i 时段流域实际蒸散发量; $E_{p, i}$ 为第 i 时段的流域蒸发能力,一般采用 E601 蒸发皿量测值或者利用彭曼公式计算得到; k_e 为模型参数,即植被蒸散发系数。

针对不同空间尺度的流域,该模型采取了差异化的模拟策略。对于小尺度流域,可基于其平均气象数据开展集总式水文模拟;对于中、大尺度流域,通过构建网格系统来实现分布式水文模拟^[33]。为获取最优模型参数,选取纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)和总量相对误差(relative error, RE)作为优化目标函数,并采用 Rosenbrock 数值优化与手

动调参相结合的途径进行参数率定^[34]。

由于植被数据从 1981 年开始,在进行 1960—2020 年径流模拟时,采用 1981—1985 年每个月的 NDVI 均值作为前期各月的 NDVI 值;为验证模型的适应性,将 1960 年作为预热期,1961—2000 年作为率定期,

2001—2020 年作为验证期,进行参数率定和径流模拟效果验证。

图 3 为 33 个典型流域率定期和验证期的纳什效率系数 NSE 和总量相对误差 RE;图 4 为上游享堂站和中游华县站 1990—2010 年实测与模拟的月径流量过程。

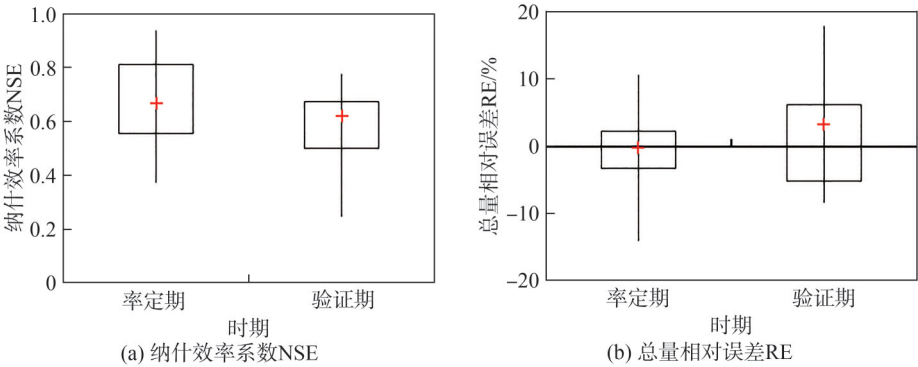


图3 黄河流域 33 个典型支流率定期和验证期径流模拟效果评价指标统计

Fig. 3 Statistics of evaluation metrics for runoff simulation during calibration and validation periods in 33 typical tributaries of the Yellow River Basin

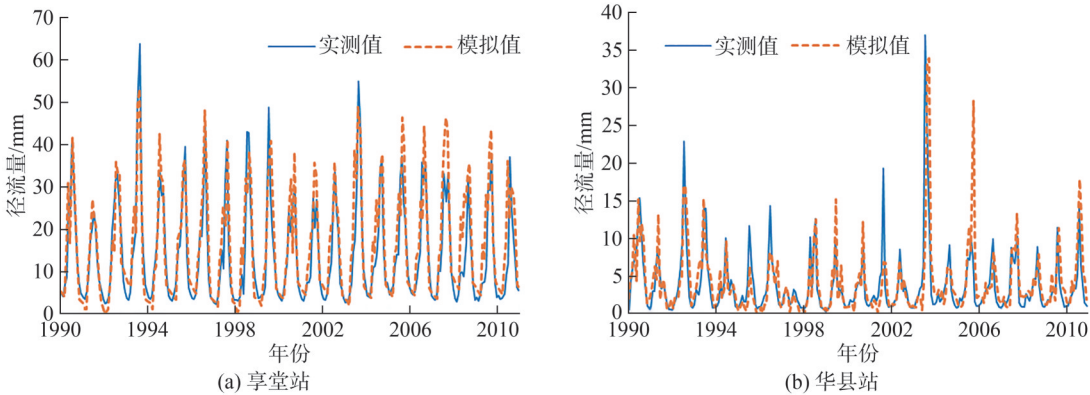


图4 黄河上游享堂站和中游华县站 1990—2010 年实测与模拟的月径流量过程

Fig. 4 Observed and simulated monthly runoff hydrographs at Xiangtang Station in the upper Yellow River and Huaxian Station in the middle Yellow River from 1990 to 2010

由图 3 可以看出,率定期和验证期 NSE 均值均超过 0.6,其中:率定期均值为 0.67,介于 0.38~0.94 之间;验证期 NSE 均值为 0.62,介于 0.25~0.78 之间;整体拟合效果良好。从模拟误差来看,率定期和验证期模拟误差均值均不超过 5%,其中:率定期 RE 均值为 -0.17%,介于 -14.10%~10.60% 之间;验证期 RE 均值为 3.32%,波动范围为 -8.28%~17.87%;整体偏差为可接受水平。相比而言,验证期 NSE 均值和最大值明显下降,RE 均值及最大值升高,部分时段 NSE 偏低、误差偏大。由图 4 可以看出:享堂站和华县站实测与模拟月径流量总体吻合良好,个别峰值模拟误差相对较大,同时后期径流量模拟值大多高于实测值;尽管模型考虑了动态植被和下垫面的影响,但并未充分考虑流域内其他人类活动,说明模型泛化能力与强人类活动下的稳定性有待进一步提升。

3 黄河水源涵养区未来气候变化趋势

CMIP6 预估的气候情景是全球气候变化及影响研究中采用的最为广泛的模式数据^[28-29]。鞠琴等^[35]评估了 CMIP6 气候模式在黄河流域的适应性,研究发现,EC-Earth3-Veg,FGOALS-g3 和 MIROC6 等 13 个模式在黄河流域具有较好适应性,模式的基本信息见表 1。

考虑到复杂地形对气候特征的影响,孙小茜等^[36]研发了基于复杂地形和多边界条件的气候情景降尺度技术,基于上述 13 个 CMIP6 气候模式情景,构建了 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 这 3 种排放情景下黄河流域 0.25° 格点的气候情景。Gao 等^[37]提出一种优化的多模式集合方法 (optimal reliability ensemble averaging, REA),该方法基于历史实测气候要素资料和 GCMs 模式模拟资料,确定最优的模

表 1 遴选的 13 个 CMIP6 气候系统模式的基本信息
Tab. 1 Basic information of the 13 selected CMIP6 climate system models

编号	模式	所属国家或地区	所属机构简称	水平分辨率 (经向数× 纬向数)
1	ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	CSIRO	192×145
2	BCC-CSM2-MR	中国	BCC	320×160
3	CNRM-CM6-1	法国	CNRM	256×128
4	EC-Earth3	欧洲	EC-Earth	512×256
5	EC-Earth3-Veg	瑞典	Europe	512×256
6	FGOALS-f3-L	中国	CAS	288×180
7	FGOALS-g3	中国	CAS	180×80
8	INM-CM4-8	俄罗斯	INM	180×120
9	INM-CM5-0	俄罗斯	INM	180×120
10	MIROC6	日本	JAMSTEC	256×128
11	MPI-ESM1-2-LR	德国	MPI	192×96
12	MRI-ESM2-0	日本	MPI	320×160
13	TaiESM1	中国台湾	RCEC	288×192

式子集。基于构建的黄河流域气候情景和 REA 集合方法,图 5 给出了黄河流域未来气温、降水演变趋势。为分析未来不同排放情景下气候要素演变的阶段性,将未来(2026—2085 年)分为 3 个时段,即近期(2026—2045 年)、中期(2046—2065 年)和远期(2066—2085 年)。

由图 5 可以看出,对于气温而言:1)基准期(1985—2015 年)年均气温为 1.72 °C,介于 0.50~2.70 °C,1985—1997 年和 1998—2014 年两个时间段的年平均气温差异明显;2)未来气温总体呈现升温态势,相比而言,SSP5-8.5 高排放情景下升温幅度更大,SSP1-2.6 低排放情景下升温速率相对较低,从近期到远期,气温增幅逐步增大;3)3 种排放情景下,3 个未来时段的多年平均气温都高于基准期,但差异较大。

对降水而言:1)基准期(1985—2015 年)年降水量介于 420~610 mm,多年平均年降水量为 517.4 mm,波动较为剧烈,2000 年之后年降水量明显偏高;2)未来降水量呈现自然波动性变化,但变化幅度较大,3 种排放情景下,年降水量差异相对较小。

统计结果表明:1)SSP1-2.6 情景下,未来年均气温介于 2.5~3.5 °C 之间,从集合平均来看,未来 3 个时段气温较基准期升高 1.07、1.40 和 1.38 °C;SSP2-4.5 情景下,年均气温分布在 2.4~4.3 °C,未来 3 个时段气温较基准期升高 1.12、1.59 和 2.02 °C;SSP5-8.5 情景下,年均气温介于 2.6~5.6 °C 之间,未来 3 个时段气温较基准期升高 1.26、2.22 和 3.12 °C。2)SSP1-2.6 情景下,

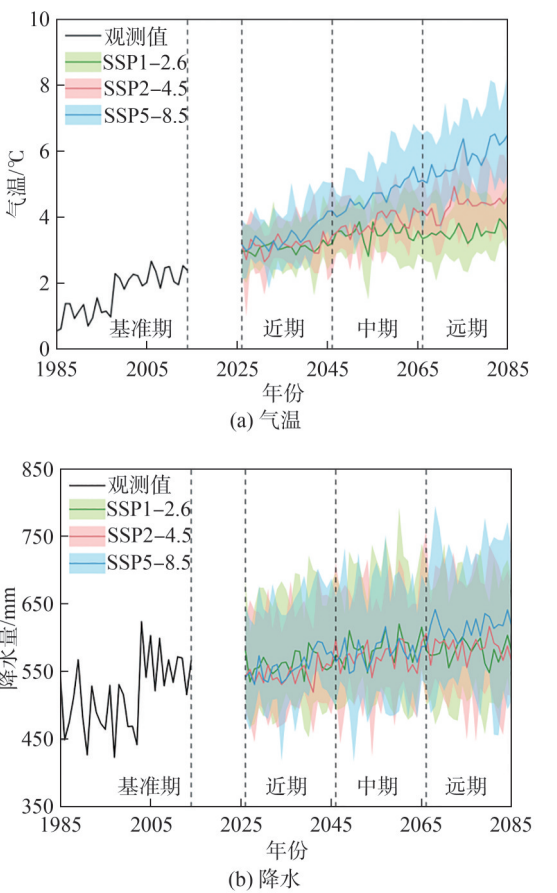


图 5 黄河水源涵养区不同排放情景下未来气温和降水演变趋势

Fig. 5 Future evolution trends of temperature and precipitation in the water source conservation area of the Yellow River under different emission scenarios

未来 3 个时段年降水量较基准期分别增多 1.20%、1.70% 和 2.01%;SSP2-4.5 情景下,未来近期降水量略有减少(-0.68%),未来中期和远期分别增加 3.98% 和 1.87%;在 SSP5-8.5 情景下,未来 3 个时段年降水量均较基准期有所增多,分别增加 2.47%、1.64% 和 2.70%。

就气温变化的空间分布而言,未来不同阶段黄河兰州站以上地区上升幅度较大,渭河流域与伊洛河流域气温变化趋势基本相当;3 个区域的未来降水变化均以自然波动为主,多数模式预估的降水略具增加趋势,其中,兰州站以上地区降水增加趋势相对明显。

4 黄河水源涵养区未来径流量演变趋势

全球气候模式不仅可以输出未来气温、降水等气候要素资料,而且可以预估未来的植被信息(叶面积指数等)。采用由降尺度气候情景和气候模式预估的植被信息资料驱动构建的 RCCC-DWBM 模型,模拟未来气候变化与动态下垫面协同驱动下水源涵养区 0.25°格点的径流量过程,分析不同区域未来径流量演变态势,结果如图 6 所示。

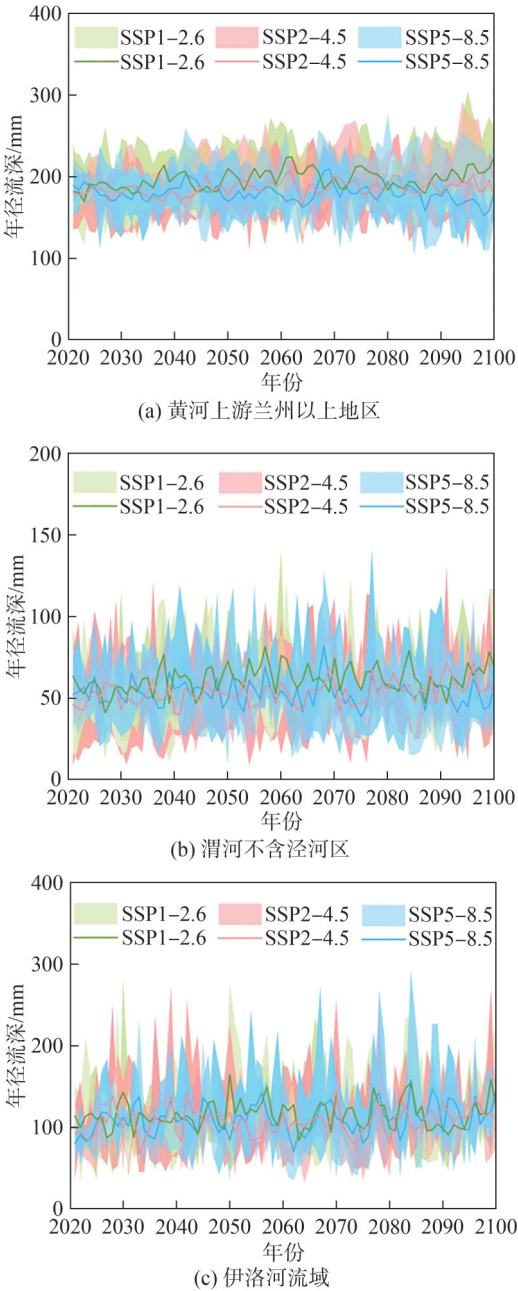


图6 不同排放情景下未来黄河水源涵养区径流量演变趋势

Fig. 6 Future runoff evolution trends in the water source conservation area of the Yellow River under different emission scenarios

由图6可以看出:

- 1)从 SSP1-2.6(低排放情景)到 SSP5-8.5(高排放情景),各区域年径流的年际波动幅度、极端事件频率及多模式集合不确定性均呈显著上升趋势,尤其在2050年之后,高排放情景下径流变率的增幅更为突出,这表明高气候强迫会加剧水文系统的不稳定性,显著提升旱涝灾害的发生风险。
- 2)水量条件相对丰沛的区域(图6(a))径流变化趋势平缓,对排放情景的敏感性较低;而偏干旱/半干旱区域(图6(b)和(c))的径流响应更为敏感,高排放

情景下极端水文事件的增幅与预测不确定性均显著高于丰水区域。

3)2050年之后,3种情景下的多模式预测结果差异均呈扩张趋势,其中 SSP5-8.5 情景的不确定性增长最为显著,说明未来气候排放路径的选择对中长期水资源规划至关重要,也凸显了多模式集合分析在水文预测中的必要性。

4)在 SSP1-2.6 情景下,各区域径流的波动幅度、极端事件强度及预测不确定性均显著低于中、高排放情景,表明减缓气候变化、控制温室气体排放能够有效提升未来水文系统的稳定性,降低水资源管理与灾害防控的压力。

未来30~50年水资源变化情势是流域管理部门关注的重点。以1985—2015年为基准期,表2给出了 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 排放情景下兰州站以上地区,渭河、伊洛河区域近中期径流量较基准期的变化,可以得出如下结论。

表2 不同排放情景下黄河水源涵养区未来径流量较基准期的变化

Tab. 2 Changes in future runoff compared to the baseline period in the water conservation area of the Yellow River under different emission scenarios

		%		
时期	排放情景	伊洛河	兰州站以上地区	渭河
未来近期	SSP1-2.6	-0.58	9.62	8.48
	SSP2-4.5	-7.98	1.74	-8.27
	SSP5-8.5	-3.10	1.13	-3.21
未来中期	SSP1-2.6	6.93	2.30	16.19
	SSP2-4.5	-7.53	-0.41	-4.93
	SSP5-8.5	-1.24	-5.92	-2.95

1)兰州站以上地区近期在3种情景下径流均有增加,其中,SSP1-2.6情景增幅最高(+9.62%);但中期发生分化,SSP1-2.6情景仍保持增加(+2.30%),而 SSP2-4.5(-0.41%)和 SSP5-8.5(-5.92%)转为下降,且排放强度越高,降幅越大,呈现出“先增后减”的特征,反映高排放的长期负向影响逐渐凸显。

2)渭河流域对低排放情景的正向响应最为强烈,近期 SSP1-2.6 情景径流增加8.48%,中期增幅进一步扩大至16.19%;而 SSP2-4.5(近期-8.27%、中期-4.93%)与 SSP5-8.5(近期-3.21%、中期-2.95%)情景下径流持续低于基准期,但中期降幅较近期有所收窄,未出现进一步恶化。

3)伊洛河在3种情景下的近期径流均呈下降趋势,其中:SSP2-4.5情景降幅最大(-7.98%),SSP1-2.6情景降幅最小(-0.58%);中期仅 SSP1-2.6 情景径流转为增

加(+6.93%),SSP2-4.5(-7.53%)和SSP5-8.5(-1.24%)仍维持下降,说明低排放路径可显著改善其长期径流状况,中高排放则持续抑制径流。

整体而言:低排放情景能够有效提升各区域径流量,降低水资源压力;中高排放情景下径流普遍偏低且不同区域的敏感性差异显著,其中,伊洛河对中排放情景的负向响应最敏感,兰州站以上地区在高排放情景下长期径流衰减风险更高,渭河虽在中高排放情景下径流有所下降,但对低排放情景的正向反馈最为明显。

5 结 语

环境变化的水文效应是国际水文科学研究的核心前沿问题。在气候与下垫面变化的协同作用下,水资源演变趋势直接关系到水资源的可持续开发利用。黄河流域水资源匮乏,未来气候变化背景下水源涵养区径流量的丰枯变化将直接影响黄河流域生态保护和高质量发展国家战略的实施。

在全球变暖背景下,黄河水源涵养区的气温将持续升高,未来降水量可能略有增加。在中、高排放情景下,未来近期黄河上游径流量将略有增加,而渭河与伊洛河则呈现减少趋势;至未来中期,黄河水源涵养区径流量整体多呈减少态势。气候与下垫面因素的协同作用,将使黄河流域水资源安全面临严峻挑战。

相对而言,低排放情景可在一定程度上增加区域径流量,缓解水资源压力;而中、高排放情景下,径流普遍偏低,水资源压力显著增大。因此,控制温室气体排放、减缓气候变化进程、科学应对气候变化影响,是降低气候风险、增强灾害防控能力、实现水资源可持续利用的重要路径。

【致谢】感谢水利部应对气候变化研究中心研究生王乐扬、刘小妮、宁忠瑞、徐奕丹在分析计算、图件绘制等方面的支持。

参考文献:

- [1] IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021—The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [2] Xia Junnan, Zhou Kan, Wei Wei, et al. Evolution patterns and influencing factors of territorial spatial morphology in China[J]. Resources Science, 2026, 48(1): 256–271. [夏俊楠, 周侃, 魏伟, 等. 中国国土空间形态演化模式及其影响因素[J]. 资源科学, 2026, 48(1): 256–271.]
- [3] Bai Xuemei, Shi Peijun. China's urbanization at a turning point—Challenges and opportunities[J]. Science, 2025, 388(6747): eadw3443.
- [4] Wang Yueyang, Li Qingzhou, Wang Jinxing, et al. The variation characteristics of recorded runoff and its annual distribution in north China during the recent 60 years in the context of environment change[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2020, 41(2): 36–42. [王乐扬, 李清洲, 王金星, 等. 变化环境下近60年来中国北方江河实测径流量及其年内分配变化特征[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 36–42.]
- [5] Arheimer B, Cudennec C, Grimaldi S, et al. Setting up the new Scientific Decade of IAHS: Science for Solutions with HELPING[J/OL]. EGU General Assembly, 2024[2026–05–01]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-14824>.
- [6] UNESCO—IHP. IHP–IX strategic plan: Science for a water secure world in a changing environment(2022–2029)[R]. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization(UNESCO), 2022.
- [7] Chen Ziyang, Su Buda, Zhao Mengxia, et al. Projected changes of runoff in the Upper Yellow River Basin under shared socioeconomic pathways[J]. Frontiers of Earth Science, 2024, 18(4): 849–863.
- [8] Wang Cong, Li Jia, Chen Min, et al. Simulation and evaluation of future meteorological conditions in the water source area of the west route of South-to-North Water Transfer Project under CMIP6 model[J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 2025(2025–06–18) [2026–05–10]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20250616.1404.002>. [王聪, 李嘉, 陈旻, 等. CMIP6模式下南水北调西线工程水源区未来气象条件模拟评估[J/OL]. 工程科学与技术, 2025(2025–06–18) [2026–05–10]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.tb.20250616.1404.002>.]
- [9] Yang Xiaoli, Ma Huijun, Wu Fan, et al. Spatiotemporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 40–49. [杨肖丽, 马慧君, 吴凡, 等. 基于CMIP6的全球及干旱带干旱时空演变[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 40–49.]
- [10] Sobkowiak L, Wrzesiński D. Impacts of climate change on water resources: Assessment and modeling—Second Edition[J]. Water, 2025, 17(23): 3421.
- [11] Mengistu T D, Chang S W, Chung I M. Modeling and prediction of climate change impacts on water resources vulnerability: A multi-model approach[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 388: 126025.
- [12] Wang Yueyang, Zhang Jianyun, Ning Zhongrui, et al. Effects of climate change on inflow and small hydropower generation in Southern China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(2): 1–9. [王乐扬, 张建云, 宁忠瑞, 等. 气候变化对

- 南方典型小水电站入库径流及发电的影响[J]. 水利水运工程学报, 2024(2): 1–9.]
- [13] Bai Jiayi, Wang Genxu, Sun Shouqin, et al. Study on the evolution characteristics of water–carbon relationship in typical watershed of southwest mountainous area under the synergistic influence of climate change and ecological engineering[J/OL]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025(2025–12–31) [2026–05–10]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20251230.1801.002>. [白嘉怡, 王根绪, 孙守琴, 等. 气候变化与生态工程协同影响下西南山区典型流域水碳关系演变特征研究[J/OL]. *工程科学与技术*, 2025(2025–12–31) [2026–05–10]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20251230.1801.002>.]
- [14] Ruan Yuli, Zhang Jianyun, Ning Zhongrui, et al. Research on spatiotemporal variation characteristics and future trends of dry water encounter probability in the Yangtze River and Yellow River Basins[J]. *Water Resources Protection*, 2026, 42(1): 13–21. [阮俞理, 张建云, 宁忠瑞, 等. 长江和黄河流域枯水遭遇概率时空演变特征及未来趋势研究[J]. *水资源保护*, 2026, 42(1): 13–21.]
- [15] Mengistu D, Bewket W, Dosio A, et al. Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile(Abay) River Basin, Ethiopia[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125614.
- [16] Wang Lei, Long Junshui, Yao Tandong, et al. Climate change will undermine the pivotal role of Asian water tower in water resources supply[J]. *Science Bulletin*, 2025, 70(22): 3753–3757.
- [17] Zhu Junjie, Bao Zhenxin, Ruan Yuli, et al. Runoff trend in the Yangtze River Basin under future climate change[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2026(3): 85–100. [朱俊杰, 鲍振鑫, 阮俞理, 等. 未来气候变化下长江流域径流变化趋势预估研究[J]. *水利水运工程学报*, 2026(3): 85–100.]
- [18] Wang Guoqing, Zhang Jianyun. Research progress on runoff effects of environmental changes and prospects for research on the Yellow River water source conservation area[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(2): 1–8. [王国庆, 张建云. 环境变化的径流效应研究进展及黄河水源涵养区研究展望[J]. *水资源保护*, 2024, 40(2): 1–8.]
- [19] Zhang Jianyun, Wang Guoqing, Jin Junliang, 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. [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.]
- [20] Wang Guoqing, Yu Xuejin, Wang Jie, et al. Evolution and causes of water resources and water consumption in China from 2015 to 2024[J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(6): 949–958. [王国庆, 于学锦, 王婕, 等. 2015–2024年中国水资源和用水结构的时空演变及成因[J]. *水科学进展*, 2025, 36(6): 949–958.]
- [21] Wang Yueyang, Zhang Jianyun, Bao Zhenxin, et al. Spatiotemporal evolution of river runoff across major water regions in China: Observed trends and regional disparities (1960–2024) [J/OL]. *Engineering*, 2026 [2026–05–02]. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2026.05.002>.
- [22] Liu Xiaoyan. The water and sediment situation and countermeasure[J]. *Yellow River*, 2020, 42(9): 34–40. [刘晓燕. 关于黄河水沙形势及对策的思考[J]. *人民黄河*, 2020, 42(9): 34–40.]
- [23] 中共中央国务院. 黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[M]. 北京: 人民出版社, 2021.
- [24] Wang Guoqing. Definition of water conservation areas in the Yellow River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(2): 65. [王国庆. 黄河流域水源涵养区界定[J]. *水文*, 2022, 42(2): 65.]
- [25] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [26] Piao Shilong, Ciais P, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43–51.
- [27] Guan Xiaoxiang, Jin Junliang, Huang Aiming, et al. Typical hydro–meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River Basin[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(5): 36–43. [管晓祥, 金君良, 黄爱明, 等. 黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2019(5): 36–43.]
- [28] Devadarshini E, Geethalakshmi V, McDermid S P, et al. A systematic review of climate downscaling and extremes in Coupled Model Intercomparison Project 6(CMIP6)[J]. *Environmental Development*, 2025, 56: 101280.
- [29] Fan Xuewei, Miao Chiyuan, Gou Jiaojiao, et al. Coupled Model Intercomparison Project and its research progress in simulation performance[J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(6): 1204–1215. [范雪薇, 缪驰远, 苟娇娇, 等. 国际耦合模式比较计划及其模拟能力研究进展[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(6): 1204–1215.]
- [30] Wang G Q, Zhang J Y, Jin J L, et al. Regional calibration of a water balance model for estimating stream flow in ungauged areas of the Yellow River Basin[J]. *Quaternary International*, 2014, 336: 65–72.
- [31] Lu Kaidong, Cui Tingting, Wang Yintang, et al. Prediction of future runoff in the Lancang River Basin based on CMIP6 under climate change[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, 59: 102413.
- [32] Wang Yueyang, Bao Zhenxin, Zhang Jianyun, et al. Integrat-

ing dynamic land surface processes and machine learning into a hydrological modeling framework: Application to the Yellow River Basin[J].*Journal of Hydrology*,2026,667: 134869.

[33] Liu Huan,Du Junkai,Jia Yangwen, et al. Improvement of watershed subdivision method for large scale regional distributed hydrology model[J]. *Advanced Engineering Sciences*,2019,51(1):36–44.[刘欢,杜军凯,贾仰文,等. 面向大尺度区域分布式水文模型的子流域划分方法改进[J]. *工程科学与技术*,2019,51(1):36–44.]

[34] Nash J E,Sutcliffe J V.River flow forecasting through conceptual models Part I —A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*,1970,10(3):282–290.

[35] 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.[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.]

[36] Sun Xiaoqian,Wang Xingping,Zhao Yang,et al.Study on two downscaling models for precipitation and temperature based on CMIP6: A case study of the upper Yellow River above Lanzhou[J].*Hydro-Science and Engineering*,2025(4):33–44. [孙小茜,王兴平,赵阳,等. 基于 CMIP6 的降水和气温两种降尺度模型研究—以黄河兰州以上为例[J]. *水利水电*

工程学报,2025(4):33–44.]

[37] Gao Yiyao, 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.

【校友简介】



王国庆,博士,博士生导师,南京水利科学研究院正高级工程师(二级);1989—1993年在成都科学技术大学学习并获得陆地水文专业学士学位。目前兼任国际水文科学协会中国国家委员会副主席,入选“国家高层次人才特殊支持计划”领军人才、“国家百千万人才工程”,是科技部重点领域创新团队“水利应对气候变化研究创新团队”负责人、国家重点研发计划项目首席科学家。主要从事气候变化、水资源评价、生态水文过程等方面的科学研究,主持国家或省部级科研项目30余项,发表学术论文300余篇(SCI论文200余篇),授权国家发明专利/软件著作权30余项;获国家科学技术进步奖二等奖1项,省部级以上奖励9项。先后获得“全国优秀科技工作者”、“国家级有突出贡献的中青年专家”等荣誉称号,为享受国务院政府特殊津贴专家。

Modeling Runoff Processes and Projecting Water Resource Trends in the Water Source Conservation Area of the Yellow River Under Global Warming

WANG Guoqing^{1,2}, SUN Gaixia^{1,2}, JU Qin³, ZHANG Jianyun^{1,2}

(1.The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2.Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;

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

Abstract:

Objective Understanding the trajectory of water resources under environmental change is a frontier in hydrological science and a critical need for basin-scale water management. The water source conservation area of the Yellow River Basin, which supplies a substantial portion of the river’s flow, faces increasing uncertainty under future climate warming. However, quantitative assessments that explicitly account for dynamic underlying surface conditions and multi-scenario climate forcing remain limited in this region. This study aimed to develop a distributed hydrological modeling framework to project future runoff changes under multiple emission pathways and identify the spatial and temporal patterns of runoff responses to warming and precipitation variability.

Methods The distributed water balance model with dynamic underlying surface conditions (RCCC–DWBM) was employed to simulate runoff processes across the water source conservation area of the Yellow River Basin. The model was calibrated and validated using observed hydrometeorological data from 33 hydrological stations covering the mainstream and major tributaries. To project future water availability, the model was forced with bias-corrected climate outputs from 13 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) general circulation models under three Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios: SSP1–2.6 (low emissions), SSP2–4.5 (medium emissions), and SSP5–8.5 (high emissions). Future periods were defined as the near term (2026–2045) and mid-term (2046–2065), with the baseline period of 1985–2015 used for calculating anomalies. Model performance was evaluated using the Nash–Sutcliffe efficiency (NSE) and relative error in total runoff. Runoff changes were analyzed separately for three subregions: upstream of Lanzhou, the Weihe River basin, and the Yiluo River basin.

Results and Discussions The RCCC–DWBM model showed good performance in simulating historical runoff. At the 33 hydrological stations, the NSE values for runoff simulations mostly exceeded 0.6, and the relative errors in total runoff were generally within ±5%, indicating that the model

was suitable for scenario-based projections.

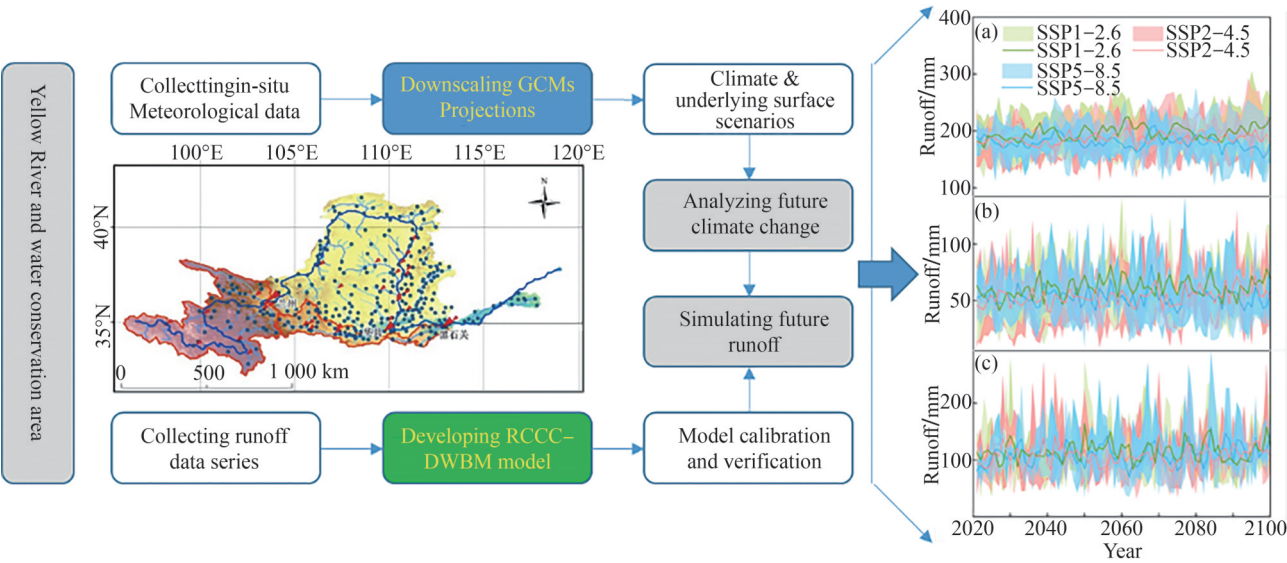
Future temperature projections under all SSP scenarios indicated a consistent warming trend, with the greatest warming under SSP-8.5 and comparatively moderate warming under SSP1-2.6. The magnitude of warming increased progressively from the near term to the mid-term. Spatially, the region upstream of Lanzhou experienced more pronounced warming than the Weihe and Yiluo basins. In contrast, precipitation showed substantial interannual variability without a consistent unidirectional trend. Most models projected a slight increasing tendency, particularly upstream of Lanzhou, although the changes were dominated by natural variability.

Runoff responses differed markedly across scenarios and subregions. Under SSP1-2.6, runoff generally exhibited an increasing trend. Relative to the baseline, only the Yiluo River showed a modest reduction (−0.58%) in the near term, whereas runoff upstream of Lanzhou and in the Weihe River increased by 9.62% and 8.48%, respectively. In the mid-term, runoff increased across all three regions, with the Weihe River registering the largest increase (16.19%) among all scenario–region combinations. Under SSP2-4.5, runoff changes were more heterogeneous. In the near term, only the region upstream of Lanzhou exhibited a marginal increase (+1.74%), whereas runoff in the Yiluo and Weihe basins decreased by 7.98% and 8.27%, respectively. By the mid-term, all three regions showed negative anomalies, with runoff upstream of Lanzhou decreasing by 0.41% and the midstream tributaries continuing to experience substantial declines. Under SSP5-8.5, runoff upstream of Lanzhou increased marginally (+1.13%) in the near term but declined by 5.92% in the mid-term, with concurrent runoff deficits across all three regions. Spatially, the region upstream of Lanzhou benefited from snow and glacial meltwater, which provided a short-term buffer against warming-induced runoff losses. However, under prolonged extreme warming, this buffering capacity was progressively depleted, leading to a marked reduction in runoff generation. In contrast, the mid-stream Yiluo and Weihe basins exhibited greater sensitivity to thermal perturbations, with runoff reductions exceeding 7% even under the medium-emission scenario. Temporally, although short-term meltwater replenishment locally augmented runoff, the long-term increase in evapotranspiration associated with sustained warming eventually outweighed the combined contributions of precipitation and meltwater, resulting in an overall contraction in basin-wide water availability.

Conclusions The findings demonstrated that sustained lowcarbon development (SSP1-2.6) was conducive to maintaining runoff stability in the Yellow River water source conservation area, with runoff projected to increase or remain relatively stable through the mid-term. In contrast, continued medium- to high-emission pathways (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) resulted in persistent runoff reductions and exacerbated water supply-demand imbalances by the mid-21st century. These findings provide a scientific basis for adaptive water resource management under a warming climate and highlight the importance of emission mitigation in preserving hydrological services in this vulnerable region.

Key words: water source conservation area of the Yellow River; RCCC-DWBM model; climate scenarios; water resource trends

Graphical abstract:



(编辑 李轶楠)

引用格式: Wang Guoqing, Sun Gaoxia, Ju Qin, et al. Modeling runoff processes and projecting water resource trends in the water source conservation area of the Yellow River under global warming[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(5): 302–311. [王国庆, 孙高霞, 鞠琴, 等. 全球变暖驱动下黄河水源涵养区径流模拟及趋势预估[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(5): 302–311.]