

未来气候情景下秦岭北麓水资源涵养区径流组分的结构性演化

郝 帅^{1,2}, 张洪波^{1,3}, 杨佳雯^{1,2}, 刘 芳^{1,2}, 宁致远^{1,2}, 李艺航^{1,2}

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 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. 水利部旱区生态水文与水安全重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:为科学认识黄河流域水资源演化格局,探究未来气候情景下秦岭北麓水资源涵养区径流组分的结构性演化过程,以秦岭北麓黑峪口水文站控制流域为研究对象,基于 CMIP6 全球气候模式数据,采用 SWAT 模型和 DWT-LSTM 耦合模型模拟了 2030—2050 年不同气候情景下的径流组分结构性演化过程。结果表明:在 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下,秦岭北麓水资源涵养区未来均呈现变暖、变湿的趋势;SSP2-4.5 情景下,未来基流量显著下降导致径流总量呈下降趋势,基流量、地表径流量以及径流总量相较于历史期的衰减率分别为 19%、15.4% 和 17%;SSP5-8.5 情景下,未来区域基流量、地表径流量以及径流总量均呈上升趋势,相较于历史期的增长率分别为 2.6%、11.2% 和 7.5%;两种情景下,未来基流指数均值均小于历史期,水资源涵养能力将有所降低。

关键词:水资源涵养区;径流演化;基流分割;气候情景;CMIP6;SWAT;秦岭北麓

中图分类号:P333;TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0169-11

Structural evolution of runoff components in water resources conservation area at northern foot of the Qinling Mountains under future climate scenarios//HAO Shuai^{1,2}, ZHANG Hongbo^{1,3}, YANG Jiawen^{1,2}, LIU Fang^{1,2}, NING Zhiyuan^{1,2}, LI Yihang^{1,2} (1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Eco-hydrology and Water Security in Arid and Semi-arid Regions of the Ministry of Water Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to scientifically understand the evolution pattern of water resources in the Yellow River Basin and explore the structural evolution process of runoff components in the water resources conservation area at the northern foot of the Qinling Mountains under future climate scenarios, the control basin of the Heiyukou hydrological station at the northern foot of the Qinling Mountains was taken as the research object. Based on CMIP6 global climate model data, the SWAT model and DWT-LSTM coupled model were used to simulate the structural evolution process of runoff components under different climate scenarios from 2030 to 2050. The results indicate that, in both the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, the water resources conservation area at the northern foot of the Qinling Mountains will show a trend of warming and humidification in the future. In the SSP2-4.5 scenario, a significant decrease in future baseflow leads to a decreasing trend in total runoff, and the attenuation rates of baseflow, surface runoff, and total runoff are 19%, 15.4%, and 17%, respectively, compared to the historical period. In the SSP5-8.5 scenario, the future regional baseflow, surface runoff, and total runoff all show an upward trend, with increase rates of 2.6%, 11.2%, and 7.5%, respectively, compared to the historical period. In both scenarios, the average future baseflow index will be lower than the historical period, indicating a decrease in water conservation capacity.

Key words: water resources conservation area; runoff evolution; baseflow separation; climate scenarios; CMIP6; SWAT; northern foot of the Qinling Mountains

气候变化对全球水文循环和生态系统的影响日趋显化,已导致很多地区的气候模式和水文条件相 较以往发生了较为明显的改变,且未来仍有可能持续强化。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六

基金项目:国家自然科学基金项目(52379003,51979005);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JC-LHJJ-03,2023-JC-YB-385);中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102293201)

作者简介:郝帅(2000—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:2022129016@chd.edu.cn

通信作者:张洪波(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:hbzhang@chd.edu.cn

次评估报告预测,2021—2040 年全球升温预计将达到或超过 1.5℃,大气升温以及降雨模式的改变会显著影响流域水文循环速度和径流形成过程,进而加剧干旱、洪水等极端水文事件的发生^[1-2]。因此,科学认识气候变化的水文响应及其次生影响,已成为气象水文领域学者普遍关注的全球性话题^[3-4]。目前,有很多学者基于第六阶段耦合模式比较计划(CMIP6)对未来径流和旱涝情势进行预估,获得了很多有价值的有关气候变化对水文影响的研究成果^[5-7]。CMIP6 相比于 CMIP5,其时间范围更广泛,空间分辨率更高,也提供了更多的比较计划,并添加了新的强迫情景,正逐步成为学界和国际社会探索气候变化影响的重要工具^[8]。

针对气候变化对区域径流的影响,国内已有大量研究成果,主要从流域尺度探索了未来气候情景下河川径流量的演变趋势及归因^[9-11]。例如:Wang 等^[12]基于 CMIP6 数据预测了典型干旱区石羊河流域 2015—2100 年不同情景下降雨与径流的变化,指出各情景下的年降水量均呈增加趋势,SSP1-2.6 情景下径流呈增加趋势,而 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下呈减少趋势;杨晨辉等^[13]聚焦碳达峰和碳中和对赣江流域的水文影响,发现“双碳”路径下赣江流域年径流将呈增加趋势,且“双碳”路径下极端水文事件强度小于“高碳”路径下的强度。梳理相关文献,不难发现现有研究成果多聚焦于未来不同区域气候变化对河川径流的整体影响,而对径流组分中地表径流及基流变化研究鲜有涉及。基流是枯季或干旱地区维持河流稳定与生态健康的重要因素,也是区域水资源涵养能力的关键表征,其变化不仅关联枯季或旱区的水安全,也是区域地表水与地下水交互强度和水资源涵养能力改变的重要指征,对认识气候变化对区域水文平衡的影响具有重要指示作用^[14-16]。因此,可通过解析未来气候情景下流域或区域基流变化更深入地理解气候变化对水资源涵养区水文过程的影响,进而有效预警未来干旱、洪水、生态系统退化等风险^[17-19]。

秦岭是黄河和长江流域的重要水源涵养地,其北麓是渭河及其众多支流的重要水源补给区和发源地,对关中地区乃至黄河流域的社会经济发展至关重要^[20]。近年来,秦岭北麓受气候、环境变化及人类活动的持续影响,其产水能力与水资源涵养功能均呈现一定程度的退化^[21-23]。为有效保护秦岭生态环境,维持其中央水塔功能,国家已采取了一系列治理措施,以期恢复和保护秦岭水生态环境,提升区域水资源涵养能力,保障区域水资源良性循环与可持续利用^[24-25]。然而,由于秦岭北麓监测数据相对

缺乏,且水文过程扰动机制复杂,对区域水资源涵养的本底值及演化规律一直未能形成科学认识,对气候变化可能诱发的不确定性影响也未得到有效评估。因此,亟须通过水文模拟与情景分析等方式,解析秦岭北麓水资源涵养区径流组分的结构性演变规律,以期为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学参考。

鉴于此,本文聚焦秦岭北麓水资源涵养区的典型流域——黑峪口水文站控制流域,采用 SWAT 模型模拟未来气候情景下地表径流演化过程,通过构建离散小波变换-长短期记忆网络(discrete wavelet transform-long short-term memory, DWT-LSTM)耦合模型实现对未来气候情景下基流演化过程的预测,并进一步解析未来气候情景下典型流域径流组分的结构性演化特征,以期为气候变化影响下秦岭北麓水资源涵养区的适应性管理提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

秦岭北麓一般被界定为秦岭分水岭至渭南南缘的广大地区^[26],在陕西省境内主要涉及西安、宝鸡、渭南 3 市的 15 个县(区),总面积约 1.49 万 km²,其中,平原区面积约占 42%^[27]。本文讨论的秦岭北麓范围主要指广义上的秦岭北麓陕西段,大部分面积坡度为 0~25°,分布有大面积的山前冲洪积扇,区域内河网发达,水资源相对丰富。黑河位于该区域内,属渭河的一级支流,位于渭河右岸,发源于秦岭北麓的太白山,其干流总长 125.8 km,集水面积 2258 km²。黑河流域地理位置为 38°N~42°N、98°E~101°E,多年平均气温为 13℃,多年平均降水量为 697.6 mm,多年平均潜在蒸散发量为 788.15 mm,多年平均径流量约为 8.17 亿 m³,流域内植被主要以针叶阔叶林为主,植被覆盖情况整体较好^[28],区域内分布有大量的水源涵养林,是秦岭北麓重要的水资源涵养区。本文选择秦岭北麓的黑河流域为典型流域,以流域下游黑峪口水文站控制流域为研究区,面积约 1474 km²。研究区地形变化如图 1 所示。

1.2 数据来源

采用的数据主要包括模型的驱动数据和未来气候情景下的 CMIP6 全球气候模式数据。模型的驱动数据主要包括黑峪口水文站的逐日流量数据、流域内及周边气象站气象数据、土地利用数据以及土壤数据。模型的驱动数据来源及说明如表 1 所示。

未来气候情景下的 CMIP6 全球气候模式数据来自国家青藏高原科学数据中心提供的中国区域

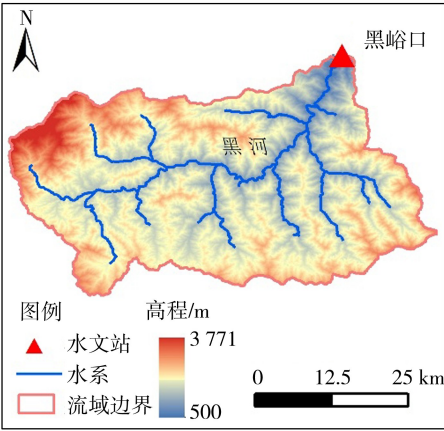


图1 研究区地形变化

Fig. 1 Topographic variation of study area

表1 模型的驱动数据来源及说明

Table 1 Sources of driving data for model and description

数据类型	时间跨度	空间分辨率	数据来源
数字高程		30 m×30 m	地理空间数据云
土地利用	1980 年、2020 年	30 m×30 m	中国科学院资源 环境科学数据中心
土壤数据		1 km×1 km	世界土壤数据库 (V1.2)
气象数据	1974—2019 年		国家气象科学数据中心
径流数据	1974—2019 年		《黄河水文数据年鉴》

0.25°日降水量、最高温度、最低温度和近地表全风速驱动数据集 (<https://data.tpdc.ac.cn/home>), 涵盖 6 个 CMIP6 模式 (CanESM5、FGOALS-g3、GFDL-CM4、IPSL-CM6A-LR、MPI-ESM1-2-HR 和 MRI-ESM2-0), 该数据集基于等距离累积分布函数法对各模式的日降水量、最高温度和最低温度进行降尺度偏差校正, 得到未来 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下的栅格数据。经检验, 降尺度后的月降水量、最高温度和最低温度栅格数据的平均绝对误差大幅度下降, 与实测值的相关系数接近于 1, 可用于驱动水文模型以获得较好的径流模拟结果^[6,8]。

2 研究方法

2.1 SWAT 模型

SWAT 模型是综合分布式的流域模型, 它将复杂的流域划分为多个子流域和水文响应单元, 充分考虑地形、土壤、土地利用等多种因素, 实现了对流域水循环过程的精细刻画, 在流域径流模拟方面得到广泛应用^[29]。模型输入数据为数字高程数据、土地利用数据、土壤数据以及气象数据, 输出数据为流域出口的径流量。文中模型预热期设置为 1975—1976 年, 以确保建立模拟的基本流量条件; 率定期设置为 1977—1979 年, 验证期设置为 1982—1984 年, 时间尺度为月尺度。为确保模拟结果的准确性, 采用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 算法对模型进

行校正, 并以决定系数 (R^2) 和纳什效率系数 (E_{NS}) 对校正结果的精度进行评价。一般认为, 当 $R^2 > 0.60$ 、 $E_{NS} > 0.50$ 时, 模拟精度达到要求^[30]。

2.2 径流组划分方法

Stoelzle 等^[31]对基流指数 (baseflow index, BFI) 改进后提出了延迟流量指数 (delay-flow index, DFI), DFI 为延迟流量总和与流量总和之比。基于 DFI 的径流组划分方法具体步骤为:

- a. 将逐日径流序列按固定时间窗口 (N) 划分为连续不重叠的时段。
- b. 计算每个时段的最小流量值 (Q_t), 将 Q_t 与两个相邻时段流量的最小值 (Q_{t-1} 和 Q_{t+1}) 进行比较, 当 $0.9Q_t$ 小于或等于相邻时段流量的最小值时, 则定义该点为转折点。
- c. 用直线连接各转折点, 形成延迟流过程线, 使用线性插值法填充转折点之间的流量值。为确保延迟流量 (即过程线下的面积) 不超过原始观测流量, 若插值得到的延迟流量值大于原始流量, 则用原始流量值替代。
- d. 根据不同 N 值划分延迟流, 绘制延迟流特征曲线, 以确定 3 个分离参数: 最大延迟时间 T_{max} (延迟流特征曲线趋于平缓时, 对应的 N 值)、断点 1、断点 2。依据延迟流特征曲线斜率的变化, 在 $N=0$ 和 T_{max} 之间使用 R 语言 segmented 包确定断点 1 和断点 2。
- e. 通过断点和 T_{max} 依次从实测流量中分离出 4 个延迟类别, 分别为短延迟类别 (DS, 在 $N=0$ 和断点 1 之间的序列)、中延迟类别 (DI, 在断点 1 和断点 2 之间的序列)、长延迟类别 (DL, 在断点 2 和 T_{max} 之间的序列) 和基线延迟类别 (DB, T_{max} 之后的序列)。

采用该方法对黑峪口水文站 1974—2019 年逐日径流数据进行径流组划分, 可得到 4 类不同的径流组分。为确定径流组分中的基流分量, 将 SWAT 模型模拟得到的地表径流量与 DS、DI、DL 径流组分及其组合进行比对, 将与地表径流量模拟值相当且相关性较高的组合作为地表径流部分, 其余组合的累加值作为基流的近似值。

2.3 DWT-LSTM 耦合模型

LSTM 是一种特殊的循环神经网络, 通过提出门机制 (遗忘门、输入门和输出门), 引入记忆单元来解决数据序列的长期依赖问题, 目前已被广泛应用在水文预测领域^[32-33]。气候条件和季节性变化常对降雨影响较大, 导致降雨数据具有强烈的波动性特征, 而基流受地下水缓释影响, 对气候条件和季节性变化的响应并不显著, 其变化也相对平稳。因

此,本文运用 LSTM 模型,以降雨、温度为输入,对基流序列进行模拟时,需通过 DWT 方法对降雨数据进行预处理,即有效降低降雨序列中混叠的噪声,以实现有效信息区分。同时,通过将波动强烈且具有多重周期的降雨序列分解为不同频率的稳态分量,亦可达到平稳化处理的效果,进而进一步提升 LSTM 模型的模拟精度^[34]。DWT-LSTM 耦合模型以降雨、气温数据作为模型输入,以基流数据作为模型输出,辅以 CMIP6 全球气候模式下降雨和气温情景数据,实现对未来气候情景下基流演化过程的预测,并采用 R^2 和 E_{NS} 对模型精度进行评价。

3 数据分析与模型构建

3.1 气象水文要素变化趋势及突变特征解析

对黑峪口水文站控制流域 1974—2019 年降水量、气温以及断面径流量进行 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验^[35],结果如图 2(a)~(c)所示。研究区年降水量总体呈现不显著下降趋势,具体表现为增加、减少、增加、减少的波动性变化,其中 1994—2006 年降水量下降趋势明显。研究期内,气温整体呈显著上升趋势,尤其是 1996 年之后上升趋势更为明显。流域径流量整体呈不显著下降趋势,相应降水量也呈现出波动变化,值得注意的是 1996 年后受到降水量减少、气温上升以及人类活动的综合影响,径流量下降趋势明显。

从图 2(a)~(c)可以看出,年降水量、气温和径流量 UF 线和 UB 线的交点分别出现在 1976 年、1994 年和 1994 年附近,且基本为单交点,表明降水

量非平稳变化发生较早,但由于其改变量级相对较小,并未诱发径流序列的改变,而其是否为变异点有待进一步交叉验证。采用 Pettitt 突变检验法^[36]同步验证不同时间序列的突变特征,结果表明,年降水量、气温、径流量序列分别于 1985 年、1994 年、1994 年发生变异(图 2(d)~(f),图中 p 为显著性检验指标),与 M-K 趋势变异检验结果较为接近。综合两种方法得到的变异检验结果,考虑降水量时序变化的特征,最终选择黑峪口水文站控制流域年降水量、气温、径流量的变异时间依次为 1985 年、1994 年、1994 年。

3.2 SWAT 模型参数率定与验证

基于 DEM 数据、土地利用数据和土壤数据,将研究区划分为 29 个子流域和 198 个水文响应单元,实现了对研究区的分布式描述。基于序列不确定性拟合算法 SUF1-2,在 SWAT-CUP 中对模型进行多次率定和验证,得到 SWAT 模型参数最优值,如表 2 所示。将模型率定期和验证期月均流量模拟值与实测值进行对比,结果如图 3(a)(b)所示。图 3(c)(d)则给出了率定期和验证期的模拟效果,率定期 R^2 和 E_{NS} 均为 0.94,验证期 R^2 和 E_{NS} 分别为 0.87、0.81。评价指标满足校验标准,说明建立的 SWAT 模型可用于后续 CMIP6 全球气候模式下地表径流的模拟。但 SWAT 模型对地下水模拟模块的简化处理^[37-39]导致其很难准确掌握河道基流的演化规律,有必要通过其他方法进一步解析。

3.3 径流组划分与基流估算

为了进一步解析秦岭北麓水资源涵养区典型流

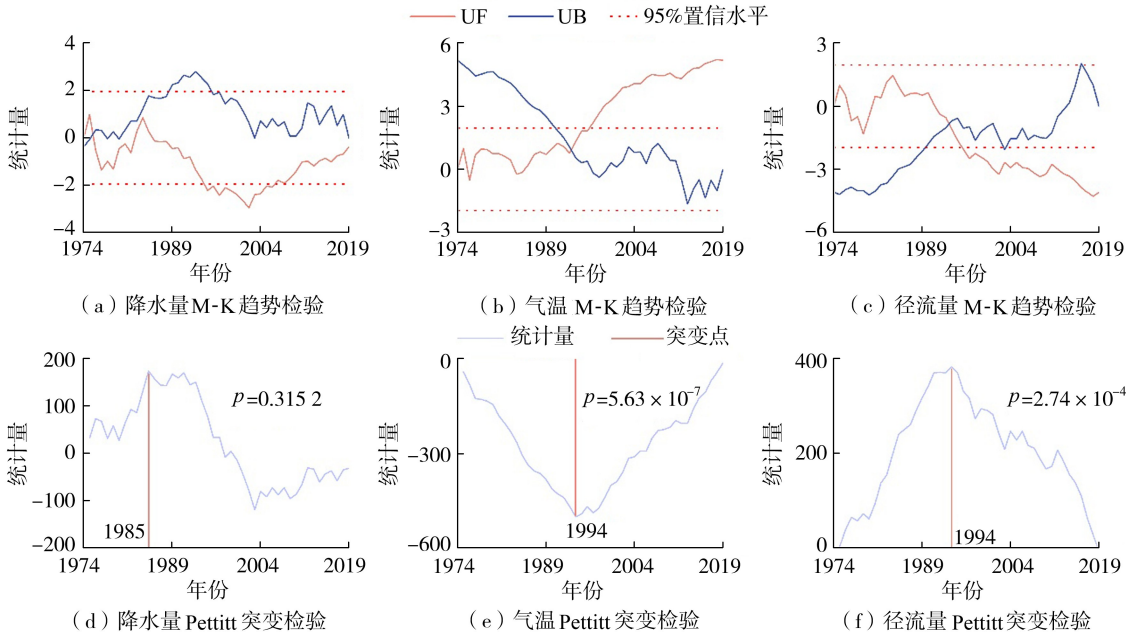


图 2 气象水文要素趋势检验及突变检验结果

Fig. 2 Meteorological and hydrological element trend test and mutation test results

表 2 SWAT 模型参数初始范围及最优值

Table 2 Initial ranges and optimal values of SWAT

model parameters

参数	单位	初始范围	最优值
r_CN2. mgt		-0.5~0.5	0.36
v_CANMX. hru	mm	0~100	5.60
v_EPCO. hru		0~1	0.76
r_SOL_BD(1). sol	g/cm ³	0~0.5	0.50
r_SOL_AWC(1). sol	mm	-0.5~0.5	0.24
r_SOL_K(1). sol	mm/h	-0.8~0.8	0.53
v_GW_DELAY. gw	d	0~500	232.11
v_ALPHA_BF. gw	d ⁻¹	0~1	0.23
v_GWQMN. gw	mm	0~3 000	2 541.30
v_GW_REVAP. gw		0.02~0.2	0.18
v_CH_N2. rte		0~0.3	0.23
v_CH_K2. rte	mm/h	0~300	278.84

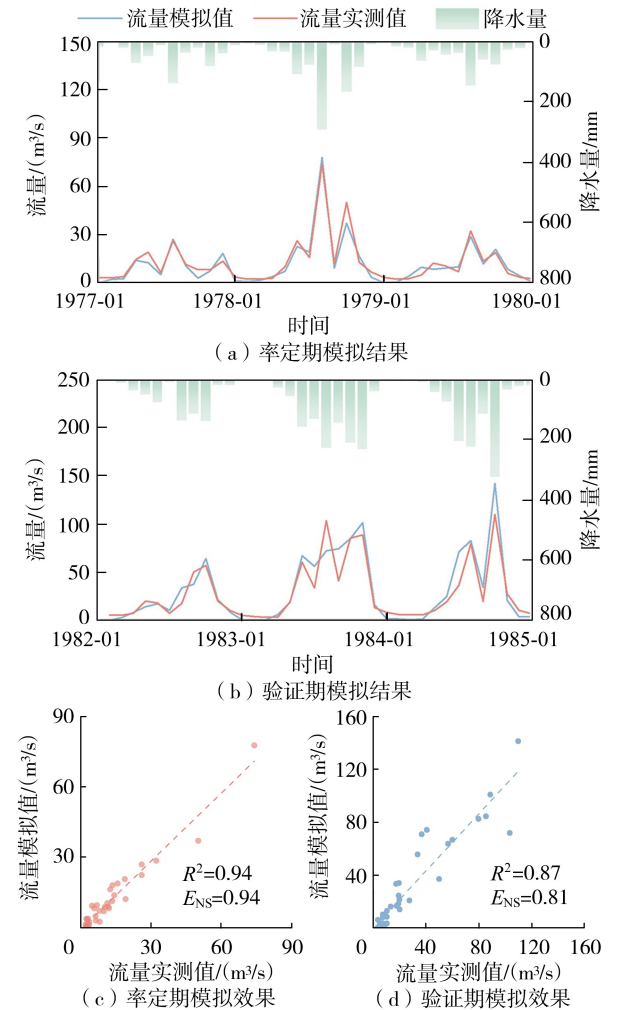


图 3 SWAT 模型模拟结果

Fig. 3 Simulation results of SWAT model

域的基流变化,首先基于 DFI 对黑峪口水文站 1974—2019 年逐日径流序列进行分割,并绘制延迟流特征曲线,如图 4(a)所示。DFI 随着 N 增大而减小,从响应快的组分逐渐过渡到响应较慢的组分,延迟流特征曲线趋于平缓时对应的 $T_{\max} = 60$ d。通过

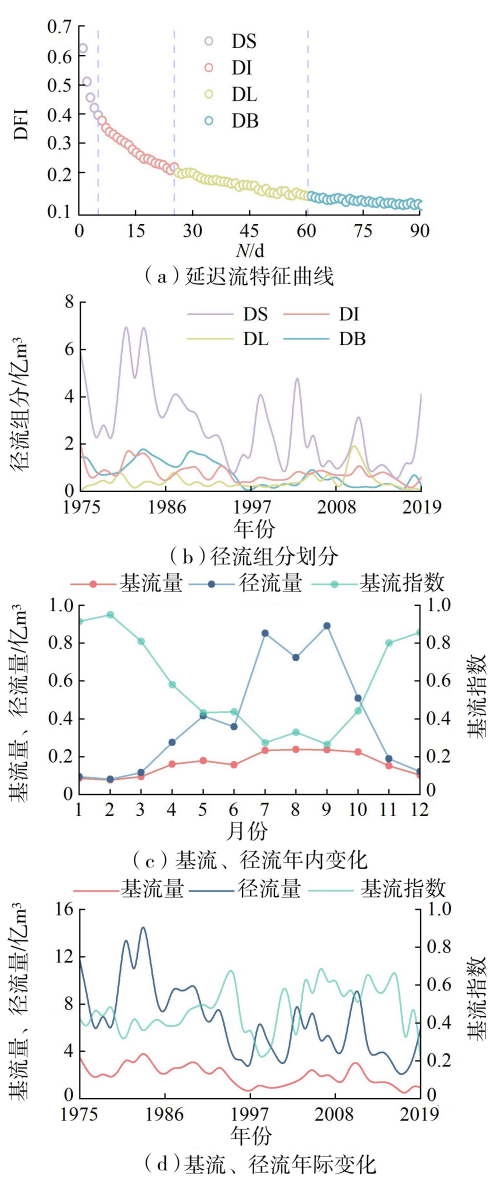


图 4 径流组分划分及基流演化特征

Fig. 4 Classification of runoff components and baseflow evolution characteristics

判别 $N = 0$ 和 $T_{\max}$ 之间的曲线斜率变化,可确定出 2 个断点的 N 值,分别为 5、25 d。由确定的两个断点及 $T_{\max}$ 对径流进行组分划分,可得到 DS、DI、DL 和 DB 4 个径流组分,如图 4(b)所示。从图 4(b)可以看出,DS 径流组分变化较为明显且剧烈,而 DI、DL 和 DB 径流组分变化范围则相对较小。究其原因,应是短延迟 DS 过程对降雨响应强烈且迅速,故波动较大。DI、DL 和 DB 径流组分受到流域汇流、土壤或地下水缓释等影响,对降雨的响应不强烈且存在一定滞时,均表现出相对稳定的状态变化。

将 SWAT 模型模拟得到的地表径流量与 DS、DI、DL 径流组分及其组合进行比对,结果如表 3 所示。从表 3 可以看出,地表径流量与 DS 径流组分平均流量最为接近且相关性较高,故把 DI、DL、DB 径流组分的累加值作为基流的近似值,其年内和年

际变化分别如图 4(c)(d) 所示。

表 3 地表径流与不同径流组分组合对比结果
Table 3 Comparison results of surface runoff and different runoff component combinations

时段	径流组分组合	平均流量/ (m ³ /s)	R ²	E _{NS}	RMSE/ (m ³ /s)
率定期	地表径流	5.77			
	DS	6.73	0.91	0.89	3.42
	DS+DI	9.20	0.88	0.60	6.47
	DS+DI+DL	10.29	0.87	0.46	7.51
验证期	地表径流	17.74			
	DS	17.43	0.91	0.89	7.88
	DS+DI	22.17	0.89	0.79	10.97
	DS+DI+DL	23.11	0.89	0.77	11.47

由图 4(c) 可知,基流量与径流量的年内变化基本呈现同向性,即丰水期主要集中在 7—9 月,充沛的降水量使径流量与基流量均得到有效补给。但两者变化的量级存在一定差异,这也导致基流指数在年内变化相对剧烈。从数值上看,1—3 月、11—12 月的基流指数均大于 0.8,而 7—9 月的基流指数则均保持在 0.3 左右,说明基流是秦岭北麓枯水期径流的主要来源,而在丰水期受降雨产流影响,基流量在河道径流量中的占比则相对较小。由图 4(d) 可知,在年际变化上研究区的基流量与径流量呈现同向性,均表现出了下降趋势,基流量与径流量下降速率分别为 -0.038 亿、-0.11 亿 m³/a。不同点在于,基流的整体衰减态势相对平稳,且衰减幅度远小于河川径流。统计结果显示,1975—2019 年流域多年平均基流量为 1.96 亿 m³,最大值出现在 1983 年(4.08 亿 m³),最小值出现在 2017 年(0.28 亿 m³)。从基流指数的整体变化可以发现,基流指数的平均值约为 0.47,表明研究期流域内河道径流量近一半来自地下水补给,水资源涵养能力对秦岭北麓诸河的河流健康与供水保障至关重要;基流指数呈现明显的上升趋势,即基流量在河道径流中的占比不断增加,说明基流的衰减速度相比河川径流相对缓慢,但这意味着基流在现阶段河道健康维持和供水安全方面的作用日益凸显,已成为保障区域水资源安全的关键因素,尤其是在干旱季节或极端气候事件期间,基流的稳定性对维持秦岭北麓区域生态环境与社会稳定极为关键。

3.4 DWT-LSTM 耦合模型训练及验证

SWAT 模型可实现对 CMIP6 全球气候模式的地表径流预测,而对基流的预测则具有极大的不确定性或偏差,为此,本文基于历史降雨、气温和分割得到的基流数据构建 DWT-LSTM 耦合模型,实现对未来气候情景下基流演化过程的预测。将黑峪口水文站 1976—2019 年的逐月降雨、气温和基流数据划

分为训练集和验证集,其中,模型训练集包括 1976—2008 年共 396 月的数据,验证集包括 2009—2019 年共 132 月的数据。经调参训练和模型模拟性能测试,最终确定模型最优参数为:隐藏层神经元数为 7,迭代次数为 250,初始学习率为 0.042,学习率下降系数为 0.77。

图 5(a) 为训练期和验证期 DWT-LSTM 耦合模型的基流模拟结果,训练期的 R² 和 E_{NS} 均为 0.75 (图 5(b)),而验证期的 R² 和 E_{NS} 则分别为 0.60 和 0.59(图 5(c)),满足模型应用要求。此外,从训练期的模拟结果(图 5(a)) 可以发现,模型能够反映气象要素与基流过程间的数据协同关系,有效捕捉基流变化过程和极值点,能够较好地模拟流域的基流演化趋势和特征。因此,构建的 DWT-LSTM 耦合模型可用于秦岭北麓水资源涵养区基流过程模拟。

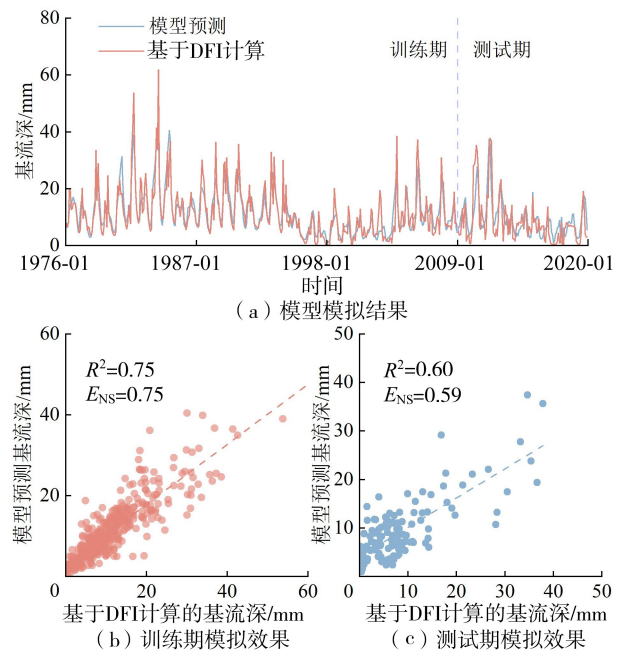


图 5 DWT-LSTM 耦合模型模拟结果
Fig. 5 Simulation results of DWT-LSTM coupled model

4 结果与分析

4.1 气象要素

为规避单模式的随机误差及系统误差,对 6 种气候变化模式采用等权重集合平均法进行后处理统计,以更好地进行结果分析。图 6 给出了 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下 2030—2050 年黑峪口水文站控制流域综合模式下气象要素的年际变化趋势。结果显示,就年降水量而言,两种情景下的变化规律具有一致性,即均呈现出缓慢上升趋势,年代际倾向率 k 分别为 2.11、8.86 mm/a。在气温变化上,两种情景下的变化规律同样表现出一致性,都呈现出变暖的趋势。最高气温在两种气候情景下的年代际倾

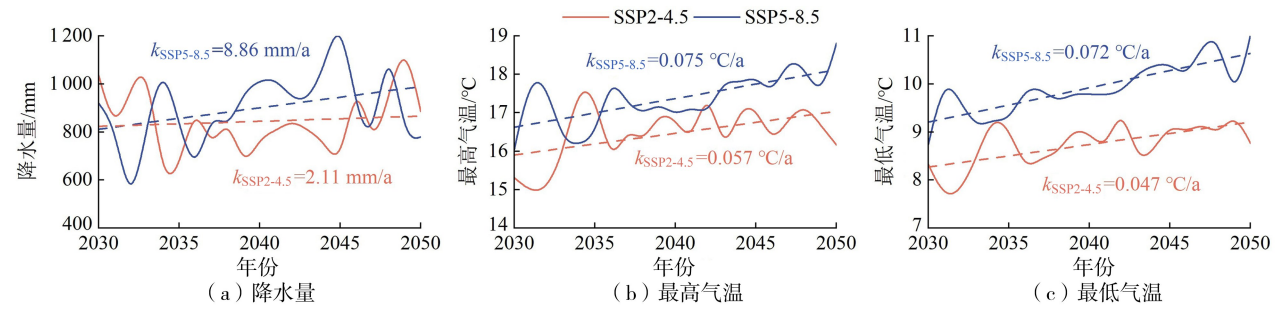


图6 未来气象要素年际变化趋势

Fig.6 Interannual variation trends of meteorological elements in future

向率分别为 0.057、0.075 °C/a,而最低气温的年代际倾向率则分别为 0.047、0.072 °C/a。由此可知,更高的辐射强迫通常会引发更快的变暖,而更高的温度会增加大气中的水汽含量,并增加潜在降水的频率和强度,即暖湿化。这与当前诸多研究中提出的“西北暖湿化”论断相符^[40]。

4.2 径流组分

基于 SWAT 模型对未来气候情景下的地表径流过程进行数值模拟,基于 DWT-LSTM 耦合模型对未来情景下的河道基流变化进行数据驱动预测,耦合两部分结果,即可得到未来秦岭北麓水资源涵养区典型流域的径流组分变化过程。图 7 给出了 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下 2030—2050 年黑峪口水文站控制流域基流量、地表径流量以及径流总量的年际变化趋势。

在 SSP2-4.5 情景下,流域基流量在 2030—2050 年呈现下降趋势。该情景下未来流域降水量和气温均呈上升趋势,虽然降水量增加,但气温的升高也会导致蒸发量增加。根据表 4,该情景下最高气温与基流量的相关系数绝对值大于降水量与基流量的相关系数,基流量未来呈现减少趋势的原因是气温对基流量的负面影响,该影响削弱甚至超过降水补给对基流量的累积影响。由图 7(a)可以看出,基流量在 2035 年附近随着降水量显著减少和温度显著上升而减少,并在很长一段时间内保持低值且相对稳定。图 7(b)表明未来流域地表径流量呈

表 4 不同情景下气象要素与径流组分的相关性

Table 4 Correlation between meteorological elements and runoff components in different scenarios

情景	气象要素	相关系数	
		地表径流量	基流量
历史期	降水量	0.74 *	0.54 *
	最高气温	-0.61 *	-0.70 *
	最低气温	-0.40 *	-0.49 *
SSP2-4.5	降水量	0.95 *	0.61 *
	最高气温	-0.41	-0.63 *
	最低气温	-0.18	-0.49 *
SSP5-8.5	降水量	0.96 *	0.60 *
	最高气温	-0.05	-0.17
	最低气温	0.22	-0.55

注: * 表示通过 0.05 显著性检验。

现上升趋势,且其变化与降水量的趋势保持高度同步性。两者耦合后,基流量的显著减少会导致径流总量呈现下降趋势(如图 7(c)),即未来流域河川径流会持续减少,可能威胁区域生态健康与供水安全。

在 SSP5-8.5 情景下,流域基流量在 2030—2050 年呈现上升趋势,究其原因,该情景下未来流域降水量和气温均呈上升趋势,根据表 4,该情景下降水量与基流量的相关系数大于气温与基流量相关系数的绝对值,降水量的增加对基流量的影响更为显著,因此流域基流量未来呈现上升趋势。地表径流量随着降水量的增加呈现显著上升趋势,此情景下,二氧化碳大量排放会影响大气环境,导致未来暴雨、洪水等自然灾害的发生频率大大增加^[41],这也

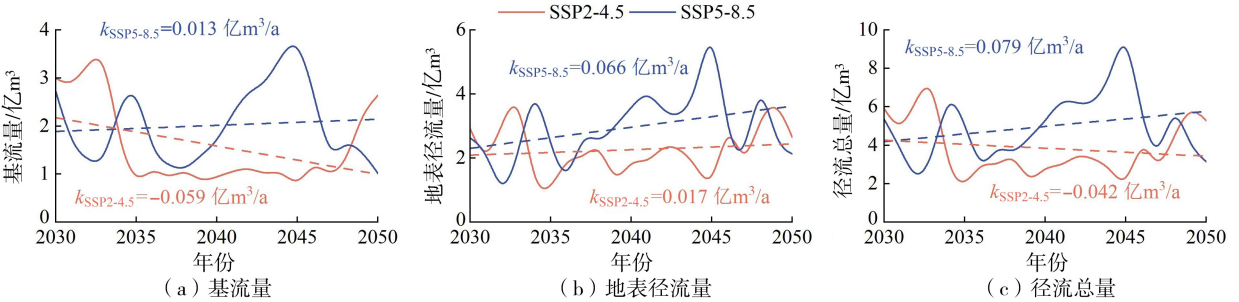


图7 未来径流组分年际变化趋势

Fig.7 Interannual variation trends of runoff components in future

是流域在该情景下产生大量径流的潜在原因。

图 8 对比了历史期和未来两种情景下径流组分和基流指数。由图 8 可知,在 SSP2-4.5 情景下,未来流域的基流量、地表径流量和径流总量的均值分别为 1.58 亿、2.26 亿、3.84 亿 m^3 ,均小于历史期并呈现衰减态势,衰减率分别为 19%、15.4% 和 17%。相较于历史期,SSP2-4.5 情景下径流总量和径流组分减小的原因为气温升高导致蒸散发量增大,可用于补给河流和地下水的的核心水分减少。图 8(a) 表明,SSP2-4.5 情景下基流指数均值为 0.41,同样小于历史期,其原因为基流量的减少幅度将大于地表径流量的减少幅度,意味着受气候变化影响,秦岭北麓水资源涵养能力可能将有所降低。

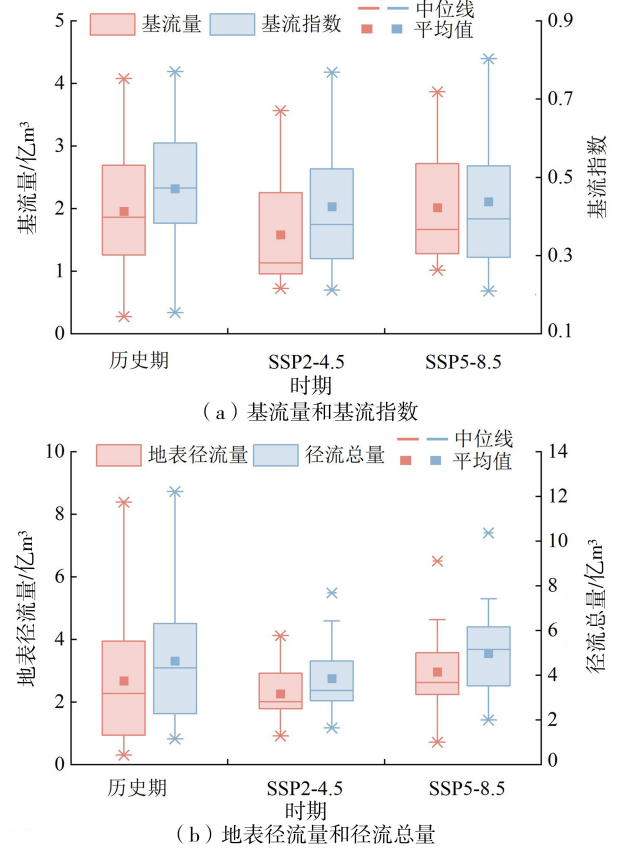


图 8 不同时期年径流总量和径流组分变化对比
Fig. 8 Comparison of changes in annual total runoff and its components in different periods

在 SSP5-8.5 情景下,基流量、地表径流量和径流总量与 SSP2-4.5 情景下有所不同,均值分别为 2.01 亿、2.97 亿、4.98 亿 m^3 ,径流总量和径流组分均大于历史期,增长率分别为 2.6%、11.2% 和 7.5%,但基流指数的均值(0.40)变化不大,亦小于历史期。深度聚焦 SSP5-8.5 情景下的气候变化与水文影响不难发现,该情景下未来降雨会更加集中,降雨强度也将显著增长,进而导致更多的地表产流,而地下水补给的增加并不显著,导致了基流指数略

有降低。从基流指数的变化上看,秦岭北麓水资源涵养能力并未因情景的不同而有显著区别。

5 结 论

a. SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 两种情景下,秦岭北麓水资源涵养区将呈现出变暖、变湿的趋势,与西北地区气候演化格局总体相符,且 SSP5-8.5 情景下这种趋势更为显著。在降雨和蒸发蒸腾的同增期,空间异质性格局变化应重点关注。

b. SSP2-4.5 情景下,基流量显著下降导致径流总量呈现下降趋势,即未来流域河川径流将持续减少,可能威胁区域生态健康和供水安全;而 SSP5-8.5 情景下,基流量、地表径流量以及径流总量呈现上升趋势,且气候系统的稳定性变差,未来暴雨、洪水等自然灾害的发生频率将大大增加。

c. SSP2-4.5 情景下,未来基流量衰减率大于地表径流量和径流总量,意味着秦岭北麓的水资源涵养能力受气候变化影响,可能有所降低;而 SSP5-8.5 情景下,未来降雨更加集中,降雨强度也将显著增加,进而导致更多的地表产流,但水资源涵养能力并不会因情景的不同而有显著区别。

参考文献:

[1] 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. (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. (in Chinese))

[2] SUN Peng, ZOU Yifan, YAO Rui, et al. Compound and successive events of extreme precipitation and extreme runoff under heatwaves based on CMIP6 models[J]. Science of the Total Environment, 2023, 878: 162980.

[3] COOK B I, MANKIN J S, MARVEL K, et al. Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios[J]. Earth's Future, 2020, 8(6): e2019EF001461.

[4] 崔豪,江善虎,任立良,等. 基于四元驱动的非平稳水文干旱评估方法[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 71-78. (CUI Hao, JIANG Shanhu, REN Liliang, et al. A non-stationary hydrological drought assessment method based on four-source driven[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 71-78. (in Chinese))

[5] 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. (in Chinese))
- [6] ZHOU Jiayue, LU Hui, YANG Kun, et al. Projection of China's future runoff based on the CMIP6 mid-high warming scenarios [J]. Science China Earth Sciences, 2023,66(3):528-546.
- [7] YAO Yutong, LI Jiake, JIANG Yishuo, et al. Evaluating the response and adaptation of urban stormwater systems to changed rainfall with the CMIP6 projections [J]. Journal of Environmental Management, 2023,347:119135.
- [8] 周嘉月,卢麾,阳坤,等. 基于 CMIP6 的中高温升情景对中国未来径流的预估 [J]. 中国科学:地球科学, 2023, 53(3):505-524. (ZHOU Jiayue, LU Hui, YANG Kun, et al. Projection of China's future runoff based on the CMIP6 mid-high warming scenarios [J]. Science China Earth Sciences, 2023,53(3):528-546. (in Chinese))
- [9] 徐宗学,班春广,张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1):1-8. (XU Zongxue, BAN Chunguang, ZHANG Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1):1-8. (in Chinese))
- [10] 李发文,陶仁杰. 变化环境下子牙河流域水文过程影响要素分析 [J]. 水资源保护, 2023, 39(5):9-17. (LI Fawen, TAO Renjie. Analysis of factors influencing hydrological processes in the Ziya River Basin under changing environment [J]. Water Resources Protection, 2023,39(5):9-17. (in Chinese)).
- [11] 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. (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. (in Chinese))
- [12] WANG Qingzheng, SUN Yunfan, GUAN Qingyu, et al. Exploring future trends of precipitation and runoff in arid regions under different scenarios based on a bias-corrected CMIP6 model [J]. Journal of Hydrology, 2024, 630:130666.
- [13] 杨晨辉,王艳君,苏布达,等. SSP“双碳”路径下赣江流域径流变化趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(2):177-187. (YANG Chenhui, WANG Yanjun, SU Buda, et al. Runoff variation trend of Ganjiang River Basin under SSP “double carbon” path [J]. Climate Change Research, 2022,18(2):177-187. (in Chinese))
- [14] 徐晋轩,李一阳,潘兴瑶,等. 多时空尺度协同的场次降雨水资源量评价方法 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1):19-25. (XU Jinxuan, LI Yiyang, PAN Xingyao, et al. Evaluation method of precipitation water resources based on multiple temporal and spatial scale coordination [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(1):19-25. (in Chinese))
- [15] 叶婷,石朋,钟华,等. 基于 Budyko 假设和微分方程的淮河中中游径流变化归因分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5):25-32. (YE Ting, SHI Peng, ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5):25-32. (in Chinese))
- [16] 江善虎,任明明,章二子,等. 基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2):1-7. (JANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in source region of the Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2):1-7. (in Chinese))
- [17] 尚文绣,尚弈,严登明,等. 基于模糊逻辑的黄河流域水安全综合评价方法研究 [J]. 水利学报, 2022, 53(3):369-378. (SHANG Wenxiu, SHANG Yi, YAN Dengming, et al. Comprehensive assessment method of water security in Yellow River Basin based on fuzzy logic [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3):369-378. (in Chinese))
- [18] 王辉,马巍,杨智,等. 基于数字滤波和 LOADEST 模型的思茅河基流氮磷输出通量估算 [J]. 水资源保护, 2023, 39(6):186-194. (WANG Hui, MA Wei, YANG Zhi, et al. Estimation of base flow nitrogen and phosphorus output flux in the Simao River based on digital filtering and LOADEST model [J]. Water Resources Protection, 2023,39(6):186-194. (in Chinese))
- [19] 郑帅,翁白莎,严登华,等. 基于水循环全过程的旱涝级联效应研究框架 [J]. 水资源保护, 2024, 40(1):60-70. (ZHENG Shuai, WENG Baisha, YAN Denghua, et al. Research framework of drought-food cascade effect based on water cycle processes [J]. Water Resources Protection, 2024,40(1):60-70. (in Chinese))
- [20] 范亚宁,刘康,陈姗姗,等. 秦岭北麓陆地生态系统水源涵养功能的格局 [J]. 水土保持通报, 2017, 37(2):50-56. (FAN Yaning, LIU Kang, CHEN Shanshan, et al. Spatial pattern analysis on water conservative functionality of land ecosystem in northern slope of Qinling Mountains [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(2):50-56. (in Chinese))
- [21] 杨璐莹,霍艾迪,赵志欣,等. 基于 CMIP6 的秦岭北麓未来极端降水洪涝风险分析 [J]. 人民黄河, 2024, 46(2):55-60. (YANG Luying, HUO Aidi, ZHAO Zhixin, et al. Risk analysis of future extreme precipitation flooding in the northern foot of Qinling Mountains based on CMIP6 [J]. Yellow River, 2024,46(2):55-60. (in Chinese))
- [22] 张召鹏,段克勤. 1970—2015 年秦岭北麓径流重建及变

- 化[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 206-211. (ZHANG Zhaopeng, DUAN Keqin. Change and retrieval of runoff in the northern foothills of Qinling Mountains from 1970 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 206-211. (in Chinese))
- [23] WU Guangdong, LIU Yuanqing, LIU Bo, et al. Hanjiang River runoff change and its attribution analysis integrating the inter-basin water transfer[J]. Water, 2023, 15(16): 2974.
- [24] 张百平. 中国南北过渡带研究的十大科学问题[J]. 地理科学进展, 2019, 38(3): 305-311. (ZHANG Baiping. Ten major scientific issues concerning the study of China's north-south transitional zone[J]. Progress in Geography, 2019, 38(3): 305-311. (in Chinese))
- [25] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 425-438. (DENG Chenhui, BAI Hongying, GAO Shan, et al. Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 425-438. (in Chinese))
- [26] YU Fei, LI Chenlu, YUAN Zuoqiang, et al. How do mountain ecosystem services respond to changes in vegetation and climate? An evidence from the Qinling Mountains, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110922.
- [27] 马瑞婷, 黄领梅, 沈冰. 秦岭北麓典型流域年径流序列的突变分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 76-79. (MA Ruiting, HUANG Lingmei, SHEN Bing. Mutation analysis of annual runoff series in typical basin of northern region of Qinling Mountains[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(2): 76-79. (in Chinese))
- [28] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析[J]. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2783-2792. (WANG Bei, ZHAO Jun, HU Xiufang. Spatial pattern analysis of ecosystem services based on InVEST in Heihe River Basin[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(10): 2783-2792. (in Chinese))
- [29] 王鹏全, 李润杰. 基于水文学法和 SWAT 模型的北川河流域生态需水量分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 118-127. (WANG Pengquan, LI Runjie. Ecological water demand analysis based on hydrological methods and SWAT model in the Beichuan River Basin[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 118-127. (in Chinese))
- [30] 张洪波, 支童, 卫星辰, 等. 基于 SWAT-MODFLOW 的黄河中游区径流过程模拟及对黄土高原变绿的响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 1-10. (ZHANG Hongbo, ZHI Tong, WEI Xingchen, et al. Simulation of runoff process in the middle reaches of the Yellow River based on SWAT-MODFLOW model and its response to the greening of the Loess Plateau[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 1-10. (in Chinese))
- [31] STOELZLE M, SCHUETZ T, WEILER M, et al. Beyond binary baseflow separation: a delayed-flow index for multiple streamflow contributions[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(2): 849-867.
- [32] 党池恒, 张洪波, 陈克宇, 等. 长短期记忆神经网络在季节性融雪流域降水-径流模拟中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 10-18. (DANG Chiheng, ZHANG Hongbo, CHEN Keyu, et al. Application of the long short-term memory neural network for rainfall-runoff simulation in seasonal snowmelt basin[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 10-18. (in Chinese))
- [33] 郭明辰, 张润润, 闻余华. 基于 PSO-LSTM 模型的平原河网汛期水位预测[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 64-70. (GUO Mingchen, ZHANG Runrun, WEN Yuhua. Prediction of water level of plain river network during flood season based on PSO-LSTM model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 64-70. (in Chinese))
- [34] 王文川, 杨静欣, 臧红飞. 基于 WD-COA-LSTM 模型的月降水量预测[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(4): 8-13. (WANG Wenchuan, YANG Jingxin, ZANG Hongfei. Monthly precipitation prediction based on WD-COA-LSTM model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(4): 8-13. (in Chinese))
- [35] 张姣, 胡庆芳, 黄璟胜, 等. 基于 ITA 法和 Mann-Kendall 法的漓江流域极端降水变化解析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 15-22. (ZHANG Jiao, HU Qingfang, HUANG Jingsheng, et al. Analysis of extreme precipitation changes in Lijiang River Basin based on ITA and Mann-Kendall methods[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 15-22. (in Chinese))
- [36] 张洪波, 张姝琪, 李吉程, 等. 基于 TFPW-DT-ICSS 法的渭河水文序列方差变异识别与诊断[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 47-53. (ZHANG Hongbo, ZHANG Shuqi, LI Jicheng, et al. Detection and diagnosis of the change points in variance of hydrological time series in the Weihe River Basin based on TFPW-DT-ICSS method[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017, 38(4): 47-53. (in Chinese))
- [37] 刘路广, 崔远来. 灌区地表水-地下水耦合模型的构建[J]. 水利学报, 2012, 43(7): 826-833. (LIU Luguang,

CUI Yuanlai. Construction of integrated surface water and groundwater model for irrigation area[J]. Shuili Xuebao, 2012,43(7):826-833. (in Chinese))

[38] 赖格英,吴敦银,钟业喜,等. SWAT模型的开发与应用进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(3):243-251. (LAI Geying, WU Dunyin, ZHONG Yexi, et al. Progress in development and applications of SWAT model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012,40(3):243-251. (in Chinese))

[39] SHI Wenhai, HUANG Mingbin. Predictions of soil and nutrient losses using a modified SWAT model in a large hilly-gully watershed of the Chinese Loess Plateau[J]. International Soil and Water Conservation Research,2021, 9(2):291-304.

[40] 丁一汇,柳艳菊,徐影,等. 全球气候变化的区域响应:中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2023,38(6):551-562. (DING Yihui, LIU Yanju, XU Ying, et al. Regional responses to global climate change:progress and prospects for trend, causes, and projection of climatic warming-wetting in Northwest China [J]. Advances in Earth Science,2023,38(6):551-562. (in Chinese))

[41] SINGH D, VARDHAN M, SAHU R, et al. Machine-learning- and deep-learning-based streamflow prediction in a hilly catchment for future scenarios using CMIP6 GCM data[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2023, 27 (5):1047-1075.

(收稿日期:2024-09-30 编辑:施业)

+++++

(上接第158页)

[19] 夏军,陈进,余敦先. 2022年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. 水利学报,2022,53(10):1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(10):1143-1153. (in Chinese))

[20] 戴志军,李九发,赵军凯,等. 特枯2006年长江中下游径流特征及江湖库径流调节过程[J]. 地理科学,2010,30(4):577-581. (DAI Zhijun, LI Jiufa, ZHAO Junkai, et al. Adjustment processes of runoff among river, lake and reservoir along mid-lower reaches of Changjiang River during 2006 extreme drought year [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30 (4): 577-581. (in Chinese))

[21] 陈鲜艳,周兵,钟海玲,等. 2011年长江中下游春旱的气候特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(1):139-145. (CHEN Xianyan, ZHOU Bing, ZHONG Hailing, et al. Climate characteristics of the 2011 spring drought in the mid-lower Yangtze Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(1):139-145. (in Chinese))

[22] 张明波,戴明龙,熊丰,等. 2022年长江流域极端干旱分析及思考[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(7):9-15. (ZHANG Mingbo, DAI Minglong, XIONG Feng, et al. Analysis and reflection on extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. China Flood & Drought Management,2023,33(7):9-15. (in Chinese))

[23] 孟长青,董子娇,刘柯莹,等. 嘉陵江流域骤发干旱时空演变特征分析[J]. 水利水电科技进展,2024,44(4):23-30. (MENG Changqing, DONG Zijiao, LIU Keying, et al. Analysis of spatiotemporal evolution characteristics of flash droughts in Jialing River Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (4):23-30. (in Chinese))

[24] 荣艳淑,石丹丹,吕星玥,等. 拉尼娜事件对长江中下游旱涝的影响[J]. 水资源保护,2019,35(3):14-24. (RONG Yanshu, SHI Dandan, LU Xingyue, et al. Influence of La Niña events on drought and flood in middle and lower reaches of Yangtze River[J]. Water Resources Protection,2019,35(3):14-24. (in Chinese))

[25] 吴志勇,施怡然,刘杨合,等. 长江流域干旱形成演变机制与预测研究进展[J]. 人民长江,2024;1-13[2025-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1202.TV.20241220.1528.003.html>. (WU Zhiyong, SHI Yiran, LIU Yanghe, et al. Advances in drought manifestation and propagation mechanism, and its prediction over Yangtze River Basin[J]. Yangtze River,2024;1-13[2025-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1202.TV.20241220.1528.003.html>. (in Chinese))

[26] 郑博福,肖德利,万炜,等. 长江流域干旱评估指标、时空特征及成因研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(5):18-28. (ZHENG Bofu, XIAO Deli, WAN Wei, et al. Research progress on assessment indicators, spatio-temporal characteristics and causes of drought in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024,40(5):18-28. (in Chinese))

(收稿日期:2024-10-23 编辑:施业)