

王彪, 夏春龙, 宋峥, 等. 未来气候变化情景下嫩江流域极端水文演变特征[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 109-123. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.008

WANG Biao, XIA Chunlong, SONG Zheng, et al. Characteristics of extreme hydrological evolution in Nenjiang River Basin under future climate change scenarios [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 109-123. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.008

未来气候变化情景下嫩江流域极端水文演变特征

王彪¹, 夏春龙², 宋峥³, 吴燕锋⁴, 章光新⁴, 戴长雷¹

(1. 黑龙江大学 水利电力学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 辽宁省抚顺水文局, 辽宁 抚顺 113005; 3. 嫩江尼尔基水利水电有限责任公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 4. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要:【目的】嫩江流域地处中高纬度地区, 对全球气候变化极为敏感, 因此, 需进一步探究未来气候变化下嫩江流域极端水文变化趋势, 为区域洪旱灾害管理提供理论支撑。【方法】选取嫩江流域控制水文站—大赉水文站, 以 1963—2018 年为历史时期, 以 CMIP6 不同 SSP 情境下 (SSP126、SSP370 和 SSP585) 气象要素数据为驱动, 采用率定和验证后的 HYDROTEL 模型模拟未来气候变化下 2025—2100 年日径流量, 并提取洪峰流量指标 (最大日流量、最大 5 d 流量和丰水天数) 和枯水流量指标 (枯水天数和连续干旱天数), 分析未来气候变化下嫩江流域极端水文演变特征。【结果】结果表明: (1) 未来气候变化下, 嫩江流域不同 SSP 情景下极端水文风险变化趋势差异明显。三种情景下洪峰流量指标均无显著性变化趋势; 在 SSP1-2.6 情景下枯水流量指标呈显著上升趋势, 而在 SSP3-7.0 情景下枯水流量指标呈显著下降趋势; 在 SSP5-8.5 情景下连续干旱天数呈显著性下降趋势。(2) 不同时段, 洪峰流量指标和枯水流量指标变化趋势和波动特征有所差异。三种情景下在近期 (2025—2050 年)、中期 (2051—2070 年) 和远期 (2071—2090 年) 不同指标均值相较于历史时期存在一定差异, 特别在 SSP5-8.5 情景下远期最大日流量、最大 5 d 流量均值相较于历史时期分别偏高 44.3%、38.2%。【结论】未来随着辐射强迫的增加, 发生洪涝的强度和频次呈明显的上升趋势, 发生干旱的强度和频次呈一定的下降趋势。分析未来气候变化情景下嫩江流域极端水文演变特征, 可为嫩江流域的农业旱涝风险对应、流域水安全保障以及水资源综合管理等提供了一定的参考。

关键词: 嫩江流域; 历史时期; 未来气候变化; 极端水文指标; 变化趋势; 时空变化; 极端降水; 洪水

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.008

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)07-0109-15



Characteristics of extreme hydrological evolution in Nenjiang River Basin under future climate change scenarios

WANG Biao¹, XIA Chunlong², SONG Zheng³, WU Yanfeng⁴, ZHANG Guangxin⁴, DAI Changlei¹

(1. Heilongjiang University, School of Hydraulic and Electric Power, Harbin 150080, Heilongjiang, China; 2. Fushun Hydrology Bureau, Liaoning Province, Fushun 113005, Liaoning, China; 3. Nenjiang Nierji Water Conservancy and Hydropower

收稿日期: 2024-10-11; 修回日期: 2024-10-27; 录用日期: 2024-10-29; 网络出版日期: 2025-01-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC3200302); 国家自然科学基金项目 (U2243230, 421010514, 42207088)

作者简介: 王彪 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文与水资源方面研究。E-mail: 488675247@qq.com

通信作者: 戴长雷 (1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事寒区地下水及国际河流方向的教学和科研。E-mail: daichanglei@126.com

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

Co., Ltd., Qiqihar 161005, Heilongjiang, China; 4. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China)

Abstract: [Objective] Global climate change causes frequent occurrence of extreme hydrology, threatening regional water security and ecological security. The Nenjiang River Basin is located in the middle and high latitudes and is highly sensitive to global changes. However, how hydrological extremes will evolve under future climate change remains unclear. [Methods] Selecting the Dalain Hydrological Station, a control hydrological station in the Nenjiang River Basin, changes in hydrological extremes were investigated under future climate change. The meteorological data under different SSP scenarios (SSP126, SSP245, and SSP585) of CMIP6 were used as driving climatic factors. The calibrated and validated HYDROTEL model was employed to simulate the daily runoff volume from 2025 to 2100 under future climate change. Peak flow indicators (maximum daily flow, maximum 5-day flow, and flood days) and low-flow indicators (low-flow days and consecutive dry days) were extracted to analyze the extreme hydrological evolution characteristics of the Nenjiang River Basin under future climate change. [Results] The result showed as follows: (1) Under future climate change, the variation trend of extreme hydrological risk in Nenjiang River Basin under different SSP scenarios will be divergent. There is no significant change trend in the peak discharge index under the three scenarios. In the SSP1-2.6 scenario, the low water flow index will witness a significant upward trend, while in the SSP3-7.0 scenario, the low water flow index will experience a significant downward trend. Under the SSP5-8.5 scenario, the number of consecutive drought days will witness a significant decreasing trend. (2) The change trend and fluctuation characteristics of peak flood discharge index and low water discharge index are different in different periods. In the three scenarios, the mean values of different indicators in the near term (2025—2050), the medium term (2051—2070) and the long term (2071—2090) show certain differences compared with the historical period. Particular in the scenario of SSP5-8.5, the mean values of the long-term maximum daily flow and the maximum 5 d flow will be 44.3% and 38.2% higher than during historical period respectively. [Conclusion] Under the future climate change, the intensity and frequency of floods will show a significant upward trend, while the intensity and frequency of droughts will show a certain downward trend in the Nenjiang River Basin. It can provide important references for the mitigation of agricultural drought and flood risks, water security guarantee, and comprehensive water resources management in the Nenjiang River Basin.

Keywords: Nenjiang River Basin; historical period; future climate; extreme hydrological index; trend; spatiotemporal changes; extreme precipitation; flood

0 引言

随着全球性的气候变化加剧以及区域性人类活动影响的不断增强, 极端水文事件更加趋于广发、频发和并发^[1-2]。例如, 2020年, 长江流域发生的大洪水造成直接经济损失近700亿元; 2021年7月, 河南省特大暴雨造成直接经济损失超过1200亿元。2022年, 长江流域遭遇1961年以来最严重的气象干旱, 仅江西省所遭受的直接经济损失多达58.22亿元。洪涝干旱事件的频发给生态环境、人类生活以及社会发展造成了重大损失^[3]。因此, 研究气候变化下极端水文演变, 对维护流域生态安全、防洪减灾和防旱抗旱等具有重要的现实意义。

近年来, 国内外专家学者对于极端水文演变特征开展了大量研究^[4], 发现极端水文演变与气候变化密切相关^[5]。其中, 气候异常变化改变全球尺度和区域尺度水文循环的现状, 对降水、蒸发、径流、土壤湿度等造成直接影响, 导致极端洪水和干旱等的频

次、强度和持续时间等发生改变^[6]。尤其在未来气候变化下, 水循环将进一步改变, 增加极端洪水和干旱发生的概率^[7-8]。李文鑫等^[9]利用CMIP6的22个气候模式模拟发现, 未来气候变化下, 2061—2090年嘉陵江流域将升温2℃, 流域水循环加快, 最大洪峰流量与年最大5d洪量50a一遇值的重现期将缩短为10~20a。梅嘉洛等^[10]对未来不同气候情景变化下旬河流域水文响应进行了分析, 认为其未来气温和降水都有着明显的升高趋势, 并且全年洪峰流量也有着显著的增加趋势。WU等^[11]研究发现与RCP4.5情景相比, 在RCP8.5情景下嫩江流域将经历更多的极端降水事件, 进而导致更高的洪水风险。SUN等^[12]从历史和未来气候变化的角度研究东北区域嫩江流域水库运行是否以及在多大程度上可以减轻极端水文的风险, 发现: 在未来不同情景下, 每年发生洪水的概率将超过48%, 远高于历史时期的22.2%; 在SSP370情景下, 预计近期干旱频率将增加139.20%。嫩江

流域尼尔基水库运行在很大程度上为降低的历史洪水和干旱风险做出了贡献, 然而无法完全消除未来洪水和干旱日益增长的风险。虽然目前对于极端径流的研究备受关注^[13], 但在对全球变化极为敏感的中国高纬度地区, 相关的研究却比较少。

嫩江流域是我国重要的商品粮基地和生态功能区, 水文演变关乎区域粮食安全和湿地生态安全。由于地处中高纬度, 对全球变化的敏感性较高^[14-15], 其近 50 a 来年均气温增加趋势为 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 明显高于全国平均增温幅度^[16]。已有研究表明, 嫩江流域近些年来的极端水文事件频发, 尤其是近 20 a 以来水文干旱情况更为频繁和极端^[17], 对当地的农业生产造成了较大的影响。然而, 未来气候变化下, 嫩江流域极端水文事件是否将更为频繁, 强度是否进一步增大, 仍不清楚。为此, 本研究选取嫩江流域为研究区, 采用历史实测数据以及第六次耦合模式比较计划(Phase Six of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP6)和 HYDROTEL 模型驱动模拟的三种未来 SSP(SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5)情景下日流量数据, 在提取和计算极端水文指标(洪峰流量和枯水流量)的基础上, 对比分析了历史和未来嫩江流域洪峰流量和枯水流量指标, 系统分析气候变化情景下嫩江流域极端水文演变特征。研究结果可为嫩江流域的农业旱涝风险对应、流域水安全保障以及水资源综合管理等提供一定的参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 嫩江流域概况

嫩江流域位于黑龙江、吉林和内蒙古自治区 3 省交界处, 其地理坐标为 $119^{\circ}12'E-127^{\circ}54'E$, $44^{\circ}02'N-51^{\circ}42'N$, 流域控制面积为 29.7 万 km^2 。嫩江发源于黑龙江省大兴安岭支脉伊勒呼里山, 全长 1370 km , 是松花江最长的支流^[18]。嫩江流域中水蒸气主要来自太平洋^[19]。在夏季, 海洋上温暖潮湿的气团被太平洋季风向北传递, 水汽更丰富, 温度更高。流域年最大降水量为 937.4 mm , 最小年降水量为 152.5 mm , 夏季降水量约占年降水量的 82% ^[20-21]。嫩江流域年平均气温在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 历史最低温度为 $-39.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最高温度为 $40.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[22]。嫩江市以上为上游段, 山高谷深, 森林密布, 河网密度大, 且支流较多。嫩江市至莫力达瓦达斡尔族自治旗驻地均为嫩江中游段, 是山地到平原的过渡地带。从莫力达瓦达斡尔族自治旗驻地至三岔河口为嫩江下游段。松嫩平原位于嫩江下游地区, 是我

国重要的粮食产区以及生态屏障功能区^[23]。由于地处温带大陆性季风气候区, 嫩江流域夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥。嫩江流域极端水文频发, 尤其是近年来极端洪水和干旱的频次和强度均呈增加趋势^[24-25], 威胁区域水安全、生态安全和粮食安全。

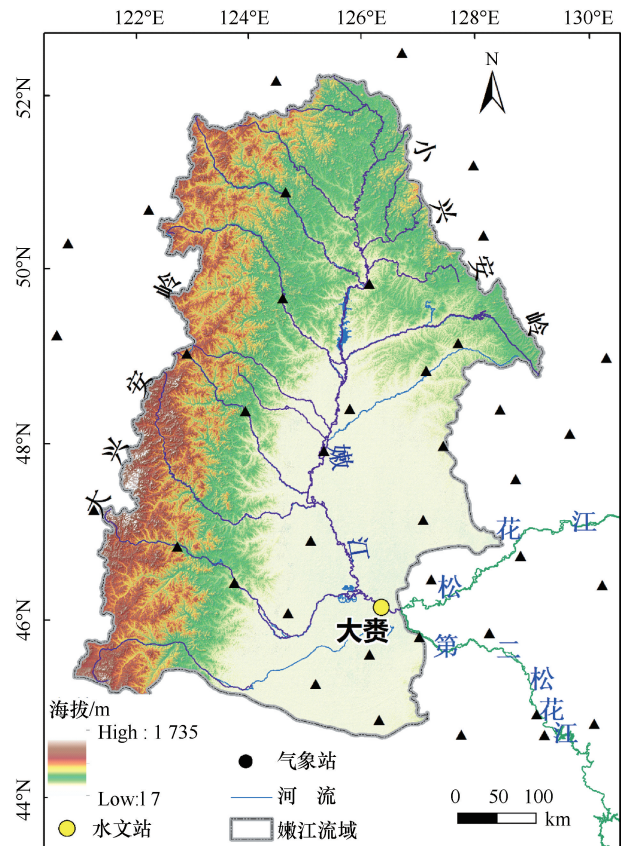


图1 嫩江流域地形、河网水系和大赉水文站分布

Fig. 1 Sketch map of topography, river network and Dalai hydrological stations in the Nenjiang River Basin

1.2 数据来源

本研究采用的数据包括观测数据和模拟数据。其中, 观测数据包括嫩江流域及其周边 39 个气象站的观测数据和大赉水文站观测的 1963—2018 年的日径流量; 模拟数据包括 CMIP6 情景模拟的气象数据和水文模型模拟的日流量数据。气象数据用于驱动水文模型, 日流量用于提取极端水文指标。

大赉水文站位于嫩江下游, 集水面积为 $22.17 \times 10^4\text{ km}^2$, 为嫩江下游的总控制站。本研究采用 CMIP6 情景数据中的三种 SSP(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)情景组合数据: SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 三个组合情景, 代表了不同的辐射强迫水平^[26]。SSP1-2.6 情景代表低辐射强迫水平, 即 2100 年辐射强迫稳定在 2.6 W/m^2 ; SSP3-7.0 情景代表中高等辐射强迫水平, 即 2100 年辐射强迫稳定在

7.0 W/m²; SSP5-8.5 情景代表高等辐射强迫水平, 即 2100 年辐射强迫稳定在 8.5 W/m²。本研究采用广泛认可的五种气候模式情景数据(GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 和 UKE-SM1-0-LL)^[11]。考虑到水文模型的数据要求, 我们下载了五种气候模式情景的逐日降水量、最高气温和最低温度数据。然后, 我们采用 CMhyd 软件对数据进行偏差校正^[27-28], 并采用 ANUSPLIN 软件包对偏差校正后的数据空间降尺度至 1 km^[29]。由于模式内部的初始化条件和众多物理过程的参数化不同, 对于相同的强迫力, 全球气候模式会有不同的气候响应, 这意味着气候预估必然存在或大或小的不确定性^[30-31]。多模式集合方案能够发挥集合的优势, 避免单个模式的不足, 以降低未来预估的不确定性, 提高可靠性。其中算术平均是最简单和常用的多模式集合方案。因此, 为减少每种模式的特异性, 将五种模式进行集合平均处理, 有效降低模式之间的差异。根据 DOTTO-RI 等^[32-33]之前的研究, 确定了未来情景中全球变暖水平的不同时间预期。具体来说, 选取 1963—2018 年作为基准年, 将未来 2025—2090 年划分为三个研究时段: 近期(2025—2050 年), 中期(2051—2070 年)和远期(2071—2090 年)。近期、中期和远期分别表示未来情景下全球升温 1.5 °C、2.0 °C 和 3.0 °C 的时期。利用集合平均数据驱动水文模型, 实现不同强迫情景下嫩江流域水文过程的模拟。

2 研究方法

为研究未来气候变化下嫩江流域极端水文演变特征, 基于历史和模拟的日径流量数据, 计算了洪峰流量和枯水流量指标作为极端水文指标^[34], 并通过对比分析历史时期和不同 SSPs 情景下模拟的极端水文指标的差异性。同时, 采用了 Mann-Kendall 趋势分析法判断极端水文指标的变化趋势和突变特征。

2.1 基于 HYDROTEL 模型的径流模拟

本研究利用率定和验证后的 HYDROTEL 模型在嫩江流域开展未来气候变化下日径流模拟。HYDROTEL 是由加拿大国立科学研究所水土环境研究中心开发的一个基于物理机制的分布式水文模型, 适用于不同土地利用和土壤类型条件的大、中和小流域^[35]。该模型主要由 8 个模块构成(见表 1)。每一个模块包含多种可供选择的算法, 本研究分别选取泰森多边形法、度日物质能量平衡模型^[36]、Penman-Monteith 法^[37]、土温计算方程^[38]、水文等同湿地概念法、三

层垂向水量收支平衡模块^[39]和运动波方程^[40]法构建水文模型。

表 1 HYDROTEL 模型的子模块及本研究采用的算法

Table 1 Sub-modules of HYDROTEL and available algorithms for simulation

水文过程模块	模块算法
气象数据空间插值模块	泰森多边形法
积雪覆盖模块	度日物质能量平衡模型
蒸散发模块	Penman-Monteith
冻土模块	土温计算方程
湿地模块	水文等同湿地概念法分布式耦合模拟
垂向水量收支平衡模块	三层垂向水量收支平衡
坡面汇流模块	运动波方程
河道径流模块	运动波方程

气象模块需要最高气温、最低气温和降水量(降雨数据或者降雪数据)。模块中, 基于气温和太阳辐射产生的能量计算蒸散发、升华及融雪过程。采用泰森多边形法对气象要素插值(包含三个参数: 气温与降水的垂直递减率及降水-降雪的气温阈值)。积雪覆盖模块首先计算达到雪盖的热通量, 然后计算这些热量引起的融雪量, 最后对积雪融水进行汇流计算。根据降水、气温和土地利用类型, HYDROTEL 采用 RILEY 等^[36]提出的能量收支平衡模型对模拟积雪和融雪过程。蒸散发模块考虑了潜在蒸散发和实际蒸散发。本研究采用 Penman-Monteith^[37]计算潜在蒸散发。

冻土模块考虑到寒区的季节性冻土的水热过程, 采用改进的 KARVONEN 等^[38](1988)提出的土温计算公式, 将积雪冻融与土壤冻融的物理过程耦合, 计算公式为

$$T_{*}^{t+1} = T_{*}^{t} + \frac{\Delta t K_T}{C_A (2Z_S)^2} [T_{AIR}^{t} - T_{*}^{t}] \quad (1)$$

式中, T_{*}^{t+1} 为 $t+1$ 时刻深度为 Z_s 的土层的土温(°C); T_{*}^{t} 为前一日的深度为 Z 的土层的土温(°C); K_T 为土壤热传导系数[W/(m·°C)]; T_{AIR}^{t} 为 t 时刻的气温(°C); C_A 为土壤比热容[kJ/(kg·°C)]; Δt 为时间变化量(d)。

积雪覆盖对土温的影响采用以下经验公式^[41]

$$T_{*}^{t+1} = T_{*}^{t} e^{-f_s D_s} \quad (2)$$

式中, f_s 为阻尼参数(m⁻¹); D_s 为积雪深度(m)。

垂向水量收支平衡模块(BV3C)^[39]考虑了土壤物理过程, 并与遥感及 GIS 数据耦合。该模块将土壤分为三层, 首层和二层土壤反映土壤对降雨过程的动态响应; 第三层土壤反映降雨过程影响的缓慢变化过

程,其需要预先定义相对均质的水文响应单元,从而可以近似地模拟大尺度水文过程中的土壤入渗和垂向水量平衡过程等。涉及的物理参数主要有:饱和水力传导度、土壤基质势、土壤饱和含水量、田间持水量、凋萎系数、植被的消光系数和基流的退水系数等。

在基于 BV3C 模块完成网格尺度的水量平衡模拟的基础上,进一步在 RHHU 尺度计算坡面的产流过程。坡面产汇流模块采用动力波方程计算^[40]。河道径流模块采用运动波方程完成河道汇流过程的计算^[42]。

HYDROTEL 需要湿地特征数据、土地覆盖类型分类图、土壤类型图、气象数据(逐日气温和降水等)以及不同河段控制水文站的逐日径流数据(用于模型拟合和验证)作为输入,可以开展日尺度的拟合、验证和模拟研究,其在水文过程模拟、径流预测和流域湿地水文模拟等领域得到了广泛应用。吴燕锋等^[43]在嫩江流域构建了耦合湿地模块的 HYDROTEL 水文模型,并对模拟效率进行评价,结果表明在率定和验证期间的模型的纳什系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, *NSE*)分别达到 0.74 和 0.73,克林效率系数(Kling-Gupta efficiency, *KGE*)分别达到 0.79 和 0.78,模型能较好地模拟嫩江流域水文过程曲线,可以用于开展未来气候变化下水文过程模拟。因此,基于在嫩江流域构建的水文模型,以 CMIP6 的三种排放情景数据为驱动,开展未来气候变化下日径流模拟。

表 2 嫩江流域水文模型率定和验证结果

Table 2 Model performance for calibration and validation periods in the Nenjiang River Basin

控制断面	时段	拟合优度指数			
		<i>NSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>P-Bias</i>	<i>KGE</i>
大赉水文站	拟合期	0.74	13.8	2.5	0.79
	验证期	0.73	15.5	-5.6	0.78

2.2 极端水文指标计算

本文选取洪峰流量指标和枯水流量指标作为极端径流指标(见表 3)。洪峰流量指标包括最大日流量、最大 5 d 流量和丰水天数;枯水流量指标包括枯水天数和连续干旱天数。最大日流量和最大 5 d 流量从强度上反应极端径流变化情况;丰水天数、枯水天数和连续干旱天数从量级上反应径流变化情况。采用大赉水文站的 1963—2018 年历史日径流量数据和三种 SSP 情景下(SSP1-2.6、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5)模拟的 2025—2100 年日径流量数据,分别计算了洪峰流

量指标和枯水流量指标。

表 3 极端径流指数定义

Table 3 Definition of hydrological extremes

类型	指数名称	定义	单位
洪峰流量指标	最大日流量	年最大日流量	m ³ /s
	最大 5 d 流量	年最大 5 d 平均流量	m ³ /s
	丰水天数	日径流量>95 th 分位流量的年总天数	d
枯水流量指标	枯水天数	日径流量<15 th 分位流量的年总天数	d
	连续干旱天数	日径流量<10 th 分位流量的最大连续天数	d

2.3 趋势分析与突变检验

采用 Mann-Kendall 法^[44-45]对洪峰流量指标和枯水流量指标序列进行趋势分析和突变检验。Mann-Kendall 趋势分析法是一种非参数的假设检验方法,可以用来检验各种类型的时间序列数据中所发生的趋势性变化,并且不受异常值的影响,在对水文和气象等要素时间序列变化趋势分析中得到了广泛的应用。

3 研究结果

3.1 洪峰流量演变

年际尺度上,历史时期最大日流量[见图 2(a)]和最大 5 d 流量[见图 2(b)]总体经历了先增加、后减少、再增加的变化特征。其中在 1963—1999 年,最大日流量、最大 5 d 流量呈先增加后大幅度减少的趋势,并在 2010—2018 年呈增加趋势;历史时期丰水天数总体变化幅度较大[见图 2(c)],其在 1963—1984 年呈增加趋势,在 1985—1995 年呈降低趋势,在 1996—1998 年又呈大幅度增加趋势,之后在 1999—2008 年呈降低趋势,在 2009—2013 年呈增加趋势,随后呈大幅度降低趋势,最后在 2016—2018 年呈现大幅度增加趋势。

SSP1-2.6 和 SSP3-7.0 情景下最大日流量、最大 5 d 流量年际波动与历史时期相近。SSP5-8.5 情景下最大日流量(1 115~25 429 m³/s)、最大 5 d 流量(1 021~10 384 m³/s)年际波动明显强于历史时期最大日流量(866~14 533 m³/s)和最大 5 d 流量(715~12 447 m³/s)。尤其是在 2083 年,SSP5-8.5 情景下最大日流量、最大 5 d 流量均达到最大,为别为 25 428.2 m³/s、18 432.4 m³/s,远高于历史时期。SSP1-2.6、SSP5-8.5 情景(0~84 d)和 SSP3-7.0 情景(0~78 d)下丰水天数年际波动均强于历史时期(0~68 d);丰水天数在 SSP1-2.6 情景下 2042 年和在 SSP5-8.5 情景下 2071 年达到最大值,为 84 d。此外,

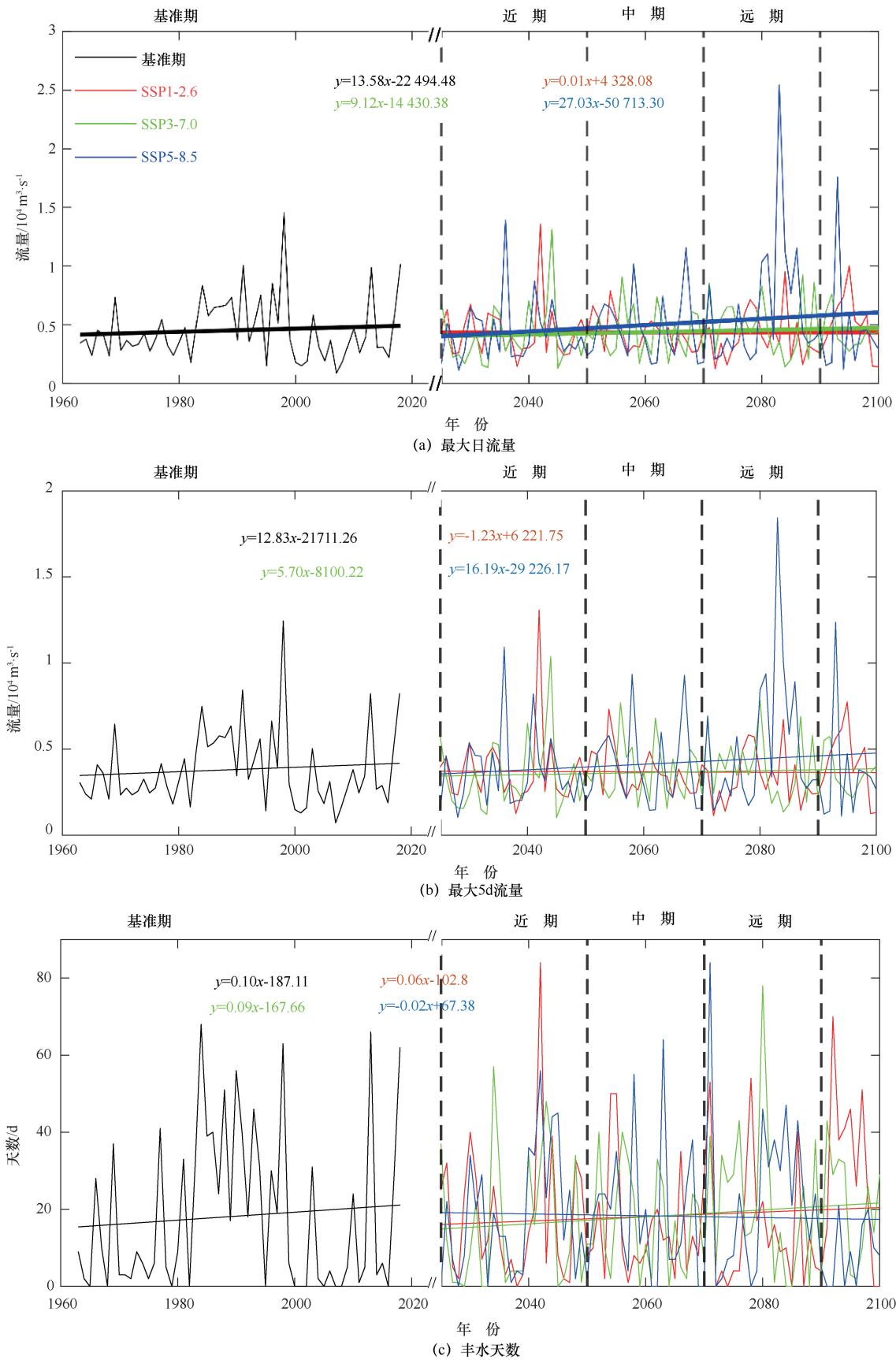


图 2 历史时期和未来气候变化下大赉站洪峰流量指标的变化

Fig. 2 Changes in peak flow indexes including annual maximum daily flow, maximum 5-day flow and duration of wet season at the Dalai Station for the historical period and future climate change conditions

在 SSP1-2.6 和 SSP3-7.0 情景下最大日流量、最大 5 d 流量变异系数均低于历史时期(见表 4), 而 SSP5-8.5 情景下最大日流量、最大 5 d 流量变异系数均高于历史时期; 三种情景下丰水天数变异系数均小于历史时期。

表 4 历史时期和未来气候变化下大赛站最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数、枯水天数和连续干旱天数的变异系数

Table 4 The coefficient of variation of the maximum daily flow, maximum 5-day flow, duration of wet season, dry water days and consecutive dry days at the Dalai Station for the historical period and future climate change conditions

情景指标	历史时期	SSP1-2.6	SSP3-7.0	SSP5-8.5
最大日流量	0.58	0.49	0.51	0.79
最大 5d 流量	0.58	0.49	0.50	0.73
丰水天数	1.12	0.99	0.91	0.96
枯水天数	0.70	0.55	0.61	0.51
连续干旱天数	0.95	0.71	0.65	0.62

从不同时段来看, 在 SSP1-2.6 情景下、SSP3-7.0 情景下近期和中期、SSP5-8.5 情景下近期最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数均值低于历史时期(见表 5); 在 SSP3-7.0 情景下远期、SSP5-8.5 情景下中期和远期最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数均值都高于历史时期。其中, 在 SSP5-8.5 情景下的远期, 最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数均值达到最大, 相较于历史时期分别偏高 44.3%、38.2%、26.2%。

历史时期, 最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数分别以 $13.58(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $12.83(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $0.1 \text{ d}/\text{a}$ 的速率增加(见图 2)。在 SSP1-2.6 情景下最大日流量、丰水天数分别以 $0.01(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $0.06 \text{ d}/\text{a}$ 的速率增加, 增加速率明显低于历史时期; 而最大 5 d 流量则以 $1.23(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 的速率减少。

表 5 历史时期和未来气候变化下大赛站最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数、枯水天数和连续干旱天数的均值

Table 5 Mean annual maximum daily flow, maximum 5-day flow, duration of wet season, dry water days and consecutive dry days at the Dalai Station for the historical period and future climate change conditions

基准期		最大日流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	最大 5 d 流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	丰水天数/d	枯水天数/d	连续干旱天数/d
		4 537.0	3 822.2	18.3	54.8	18.1
SSP1-2.6	近 期	4 363.1	3 738.2	18.1	39.4	15.0
	中 期	4 299.8	3 659.8	16.0	58.9	17.9
	远 期	3 957.9	3 276.3	14.5	64.0	23.2
SSP3-7.0	近 期	4 064.0	3 425.7	15.6	70.1	23.6
	中 期	4 342.7	3 684.5	16.5	50.4	18.8
	远 期	4 855.6	3 900.5	21.6	38.8	12.2
SSP5-8.5	近 期	4 266.4	3 653.2	17.9	56.3	19.1
	中 期	4 755.1	4 006.6	18.9	54.2	18.7
	远 期	6 547.1	5 281.2	23.1	58.5	17.7

在 SSP3-7.0 情景下最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数分别以 $9.12(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $5.70(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $0.09 \text{ d}/\text{a}$ 的趋势速率且增加速率均低于历史时期。在 SSP5-8.5 情景下最大日流量、最大 5 d 流量分别以 $27.03(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $16.19(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 的速率增加且增加速率远高于历史时期, 而丰水天数以 $0.02 \text{ d}/\text{a}$ 的速率减少。

在历史时期和三种情景下最大日流量、最大 5 d 流量均呈现非显著性上升趋势(见表 6); 历史时期、SSP1-2.6 和 SSP3-7.0 情景下丰水天数呈现非显著性上升趋势, 而 SSP5-8.5 情景下丰水天数呈现非显著性下降趋势。

在历史时期 1963—1983 年以及 2008—2018 年期间最大日流量的 UF 曲线在 0.05 显著性水平上下限以内运行(见图 3), 取值围绕 0 值上下波动, 说明该时间段里无明显变化性趋势, 而在 1984—2007 年呈较为明显的上升趋势, 其中在 1987—2001 年呈显著性上升的趋势; 在 SSP1-2.6 情景下 2025—2037 年、2061—2068 年以及 2079—2086 年期间大日流量无明显变化性趋势, 在其余时间段内呈较为明显的下降趋势; SSP3-7.0 情景下 2039 年为突变点, 从 2025—2039 年最大日流量呈非显著性下降性趋势, 从 2040—2090 年则呈非显著性上升趋势; 在 SSP5-8.5 情景下 2025—2030 年以及 2072—2081 年期间大日流量无明显变化性趋势, 在其余时间段内呈较为明显的上升趋势。

在 1963—1983 年以及 2006—2018 年期间最大 5 d 流量无明显变化趋势(见图 4), 在 1984—2005 年期间呈较为明显的上升趋势, 其中在 1986—2001 年呈显著性上升的趋势。在 SSP1-2.6 情景下大部分时期无明显变化趋势, 仅在 2038—2043 年以及 2072—2078 年内呈较为明显的下降趋势。在 SSP3-7.0 情景

表 6 历史时期和未来气候变化下大赛站最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数、枯水天数和连续干旱天数趋势分析结果
Table 6 Trend analysis results of maximum daily flow, maximum 5-day flow, duration of wet season, dry water days and consecutive dry days at the Dalai Station for the historical period and future climate change conditions

情景指标	历史时期	SSP1-2.6	SSP3-7.0	SSP5-8.5
大日流量	0.247	0.076	0.946	0.614
最大 5 d 流量	0.516	0.148	1.045	0.435
丰水天数	0.035	0.300	1.278	-0.614
枯水天数	-0.481	2.852*	-2.278*	-0.915
连续干旱天数	-0.452	2.431*	-2.117*	-2.032*

注: 表格内数字代表趋势系数; * 为变化趋势通过了 0.05 显著性水平检验。

下 2039 年为突变点, 从 2025—2039 年最大 5 d 流量呈非显著性下降性趋势, 从 2040—2090 年则呈非显著性上升趋势。在 SSP5-8.5 情景下 2025—2030 年以及 2072—2081 年期间无明显变化趋势, 在其余时间段内呈较为明显的上升趋势。

在历史时期 1963—1984 年期间丰水天数无明显变化趋势(见图 5), 在 1984—2005 年期间呈较为明显的上升趋势, 其中在 1988—1999 年呈现显著性上升的趋势; 而在 2006—2018 年期间呈现较为明显的

下降趋势。在 SSP1-2.6 情景下 2025—2036 年无明显变化趋势, 在 2036—2090 年呈现较为明显的下降趋势。在 SSP3-7.0 情景下在 2025—2042 年丰水天数下降趋势明显, 2042—2090 年则呈非显著性上升趋势。在 SSP5-8.5 情景下 2042—2049 年期间丰水天数呈较为明显的上升趋势, 在其余时间段内无明显变化趋势。

3.2 枯水流量演变

年际尺度上, 历史时期枯水天数[见图 6(a)]和连续干旱天数[见图 6(b)]总体经历了先增加、后减少、再增加、再减少的变化特征。历史时期枯水天数在 1963—1979 年呈先增加后大幅度减少的趋势, 并在 1994—2006 年呈增加趋势, 最后在 2006—2018 年呈现下降趋势。连续干旱天数在 1963—1979 年呈先增加后大幅度减少的趋势, 之后在 1995—2012 年呈增加趋势, 最后在 2012—2018 年呈下降趋势。

SSP1-2.6 情景下枯水天数、连续干旱天数年际波动与历史时期相近。SSP3-7.0 情景下枯水天数年际波动(0~156 d)远强于历史时期(0~121 d), 而 SSP5-8.5 情景下枯水天数年际波动与历史时期相同; SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下, 连续干旱天数年际波

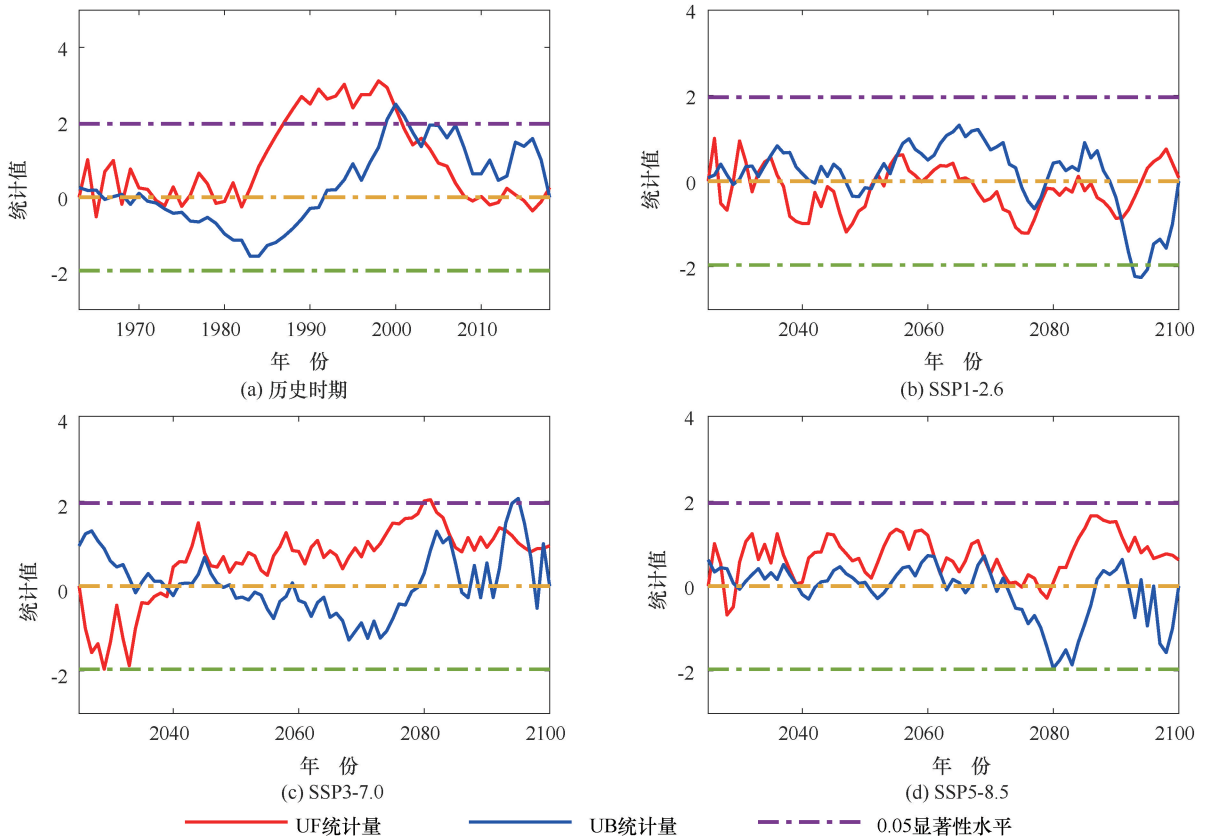


图 3 历史时期和未来气候变化下最大日流量突变检测

Fig. 3 Abrupt analysis of maximum daily flow for the historical period and future climate change conditions

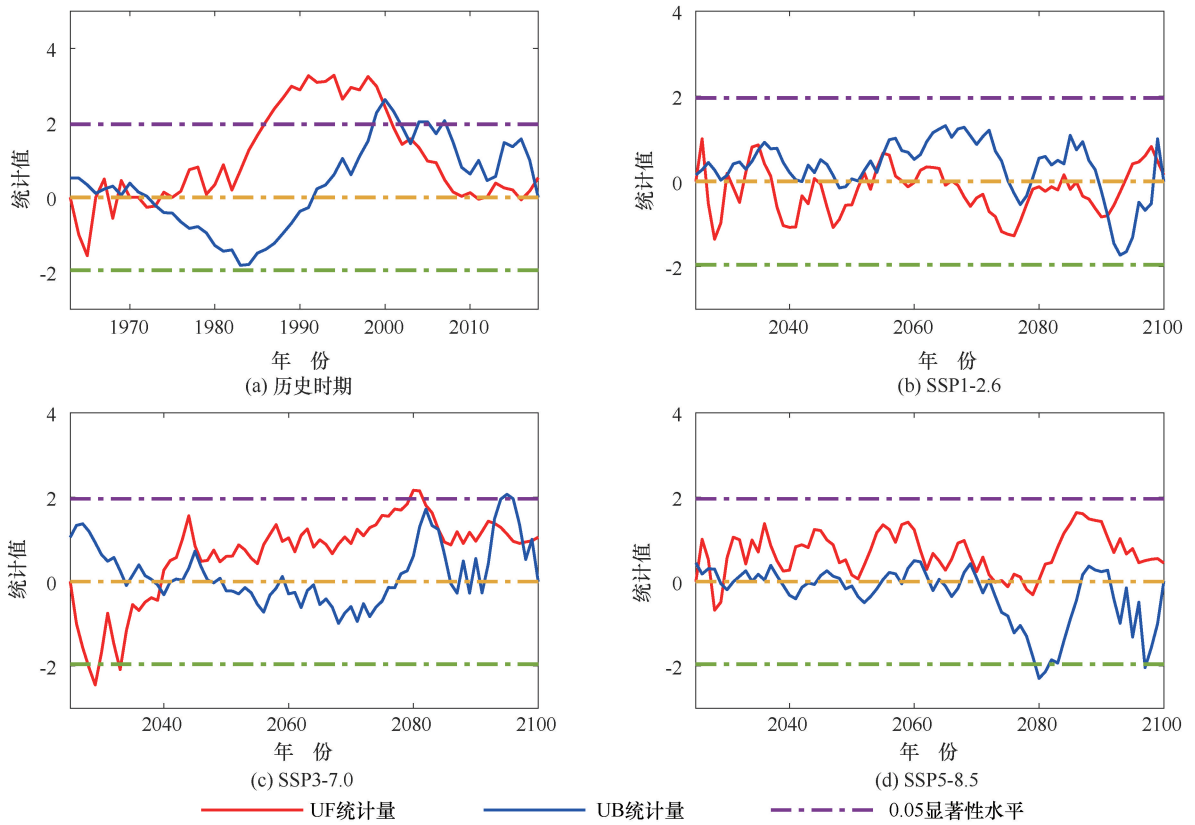


图4 历史时期和未来气候变化下最大5 d流量突变检测

Fig. 4 Abrupt analysis of maximum 5-day flow for the historical period and future climate change conditions

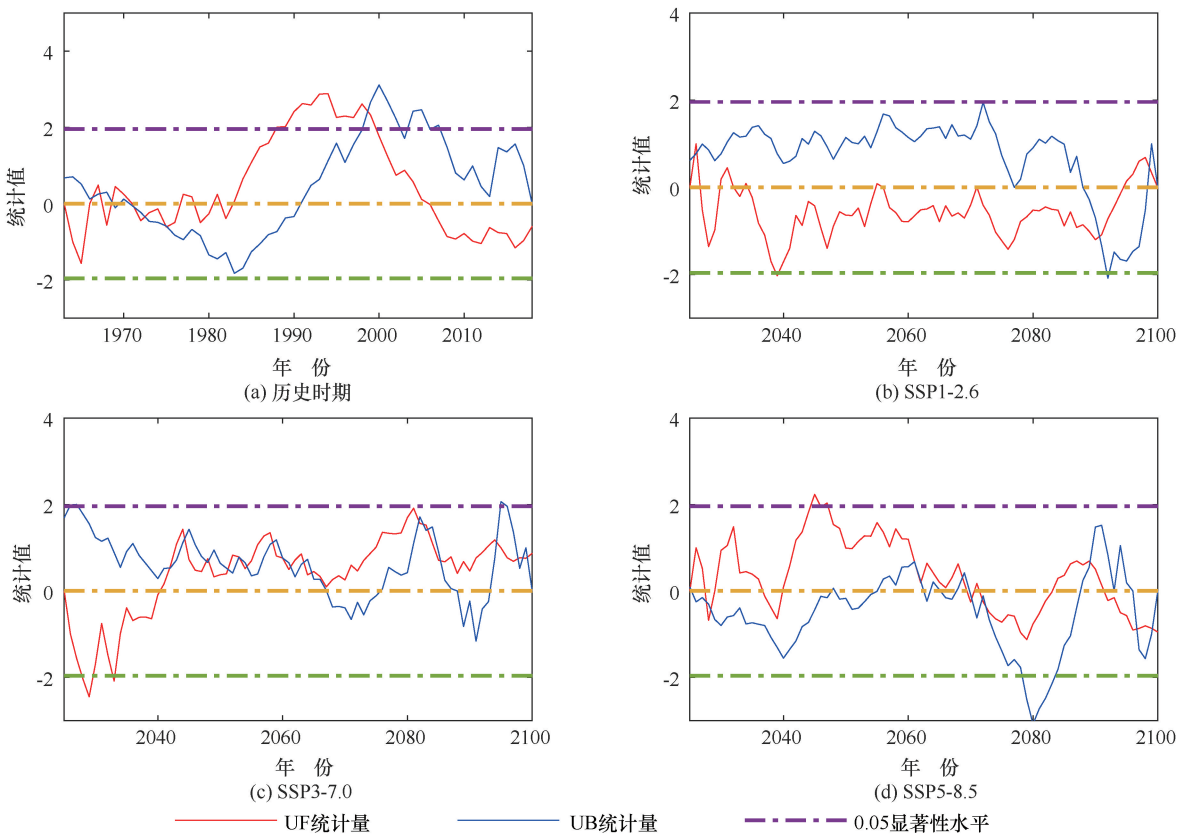


图5 历史时期和未来气候变化下丰水天数突变检测

Fig. 5 Abrupt analysis of duration of wet season for the historical period and future climate change conditions

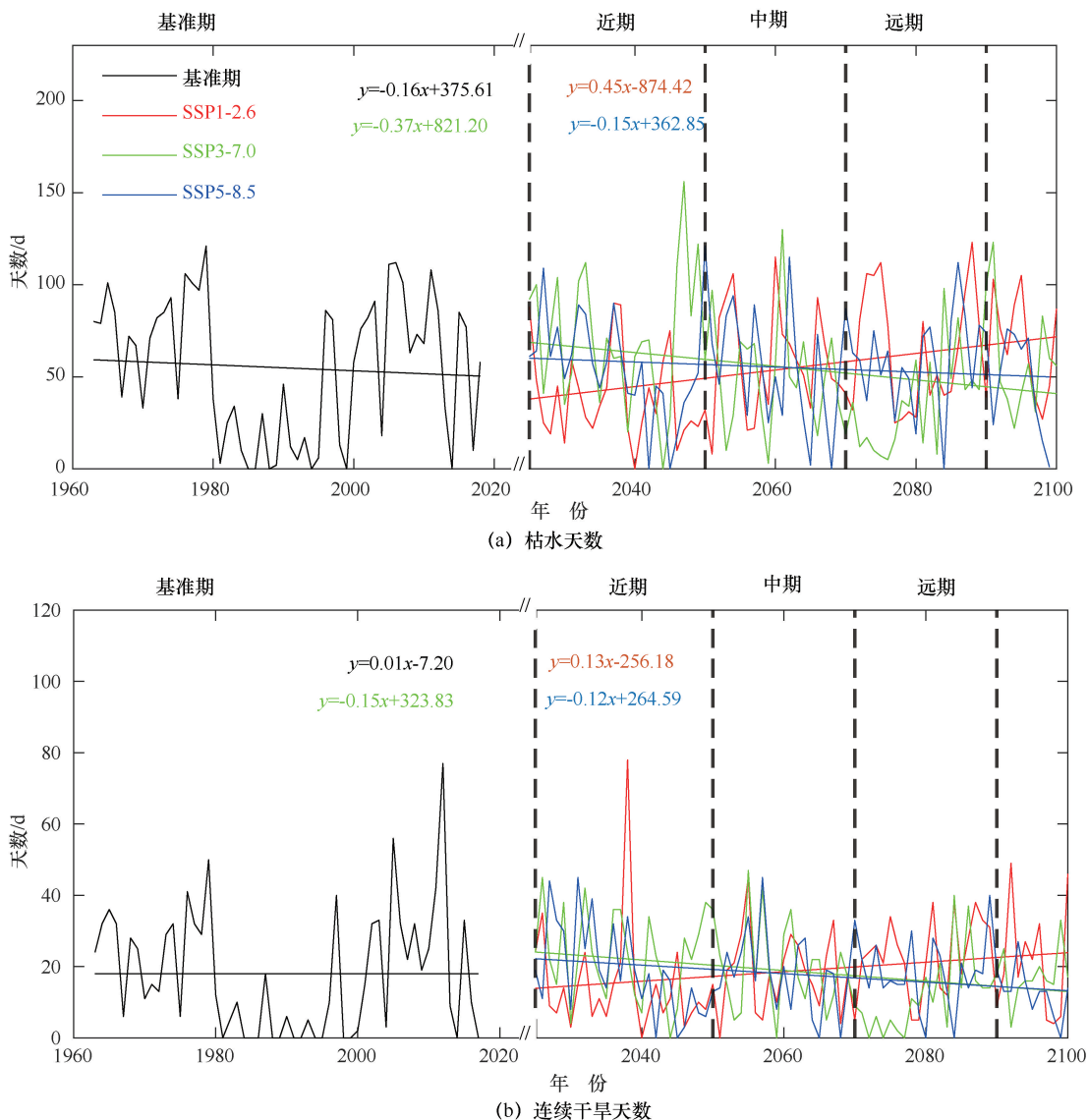


图 6 历史时期和未来气候变化下大赉站枯水流量指标的变化

Fig. 6 Changes in dry water days and consecutive dry days at the Dalai Station for the historical period and future climate change conditions

动(0~47 d)明显弱于历史时期(0~77 d)。在 2047 年, SSP3-7.0 情景下枯水天数达到最大, 为 156 d, 远高于历史时期。此外, 三种情景下枯水天数、连续干旱天数变异系数均低于历史时期(见表 4)。

从不同时段来看, 在 SSP1-2.6 情景下近期、SSP3-7.0 情景下中期和远期以及 SSP5-8.5 情景下中期, 枯水天数均值低于历史时期(见表 5); 在 SSP1-2.6 情景下中期和远期、SSP3-7.0 情景下近期以及 SSP5-8.5 情景下近期和远期, 枯水天数均值都高于历史时期。在 SSP1-2.6 情景下近期和中期、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下的远期连续干旱天数均值低于历史时期; 在 SSP1-2.6 情景下远期、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下的近期和中期, 连续干旱天数均值

都高于历史时期。其中, SSP3-7.0 在情景下的近期枯水天数、连续干旱天数均值分别达到 70.1 d、23.6 d, 相较于历史时期分别偏高 27.9%和 30.4%。

历史时期, 枯水天数以 0.16 d/a 的速率减少, 而连续干旱天数以 0.01 d/a 的速率增加(见图 6)。在 SSP1-2.6 情景下枯水天数和连续干旱天数分别以 0.45 d/a、0.13 d/a 的速率增加, 且连续干旱天数增加速率远高于历史时期; 在 SSP3-7.0 情景下枯水天数和连续干旱天数分别以 0.37 d/a、0.15 d/a 的速率减少; SSP5-8.5 情景下枯水天数、连续干旱天数分别以 0.15 d/a 的速率减少。

在历史时期枯水天数、连续干旱天数均呈非显著性下降趋势(见表 6); 在 SSP1-2.6 情景下枯水天数、

连续干旱天数均呈显著性上升趋势;在 SSP3-7.0 情景下枯水天数、连续干旱天数均呈显著性下降趋势。SSP5-8.5 情景下枯水天数呈非显著性下降趋势,而连续干旱天数呈显著性下降趋势。

历史时期枯水天数在 1963—1968 年、1973—1977 年和 2008—2018 年期间无明显变化趋势(见图 7),在其余时间段呈较为明显的下降趋势,其中在 1986—2006 年呈现显著性下降的趋势。在 SSP1-2.6 情景下 2059 年为突变点,在 2025—2059 年枯水天数呈非显著性下降趋势;在 2059—2090 年呈明显的上升趋势。在 SSP3-7.0 情景下枯水天数 2025—2035 年无明显变化,在 2035—2070 年呈非显著性下降趋势,2070—2090 年呈显著性下降趋势。在 SSP5-8.5 情景下枯水天数在 2025—2038 年无明显变化,在 2038—2042 年、2053—2090 年非显著性下降趋势,其中在 2042—2053 年期间呈显著性下降趋势。

历史时期在 1982—2018 年期间连续干旱天数呈明显的下降趋势(见图 8),其中在 1984—2010 年呈现显著性下降的趋势。在 SSP1-2.6 情景下 2066 年为突变点,在 2025—2060 年连续干旱天数呈非显著性下降趋势;在 2061—2090 年呈非显著性上升趋势,仅在 2087—2090 年呈显著性上升趋势。在 SSP3-7.0

情景下连续干旱天数整体呈明显下降趋势,在 2025—2070 年呈非显著性下降趋势,在 2070—2090 年呈现出显著性下降趋势。在 SSP5-8.5 情景下在 2040—2090 年期间连续干旱天数呈明显下降趋势,在 2044—2055 年期间呈显著性下降趋势。

4 结果讨论

气候变化和人类活动通过影响降水、冰川和积雪融化以及改变下垫面等影响流域水文过程^[46]。然而,不同流域、不同因素对径流的影响程度不同,而下垫面对径流量的影响非常明显^[47-49]。近几十年来,嫩江流域下垫面条件发生强烈的改变,特别是在 1996—2000 年,沼泽、林地面积大幅度减少^[50],流域生态系统水源涵养功能大幅度下降,增加了是嫩江流域洪涝和干旱灾害风险。本文在此基础上通过以嫩江流域大赉水文站 1963—2018 年日径流量作为基准期的数据,基于 CMIP6 气候情景数据和 HYDROTEL 模型模拟未来气候变化下的 2025—2100 年日径流量数据并分别提取洪峰流量指标和枯水流量指标评估其变化趋势。

通过研究发现,不同情景下极端水文风险变化趋势差异明显。特别在 SSP5-8.5 情景下最大日流量、最

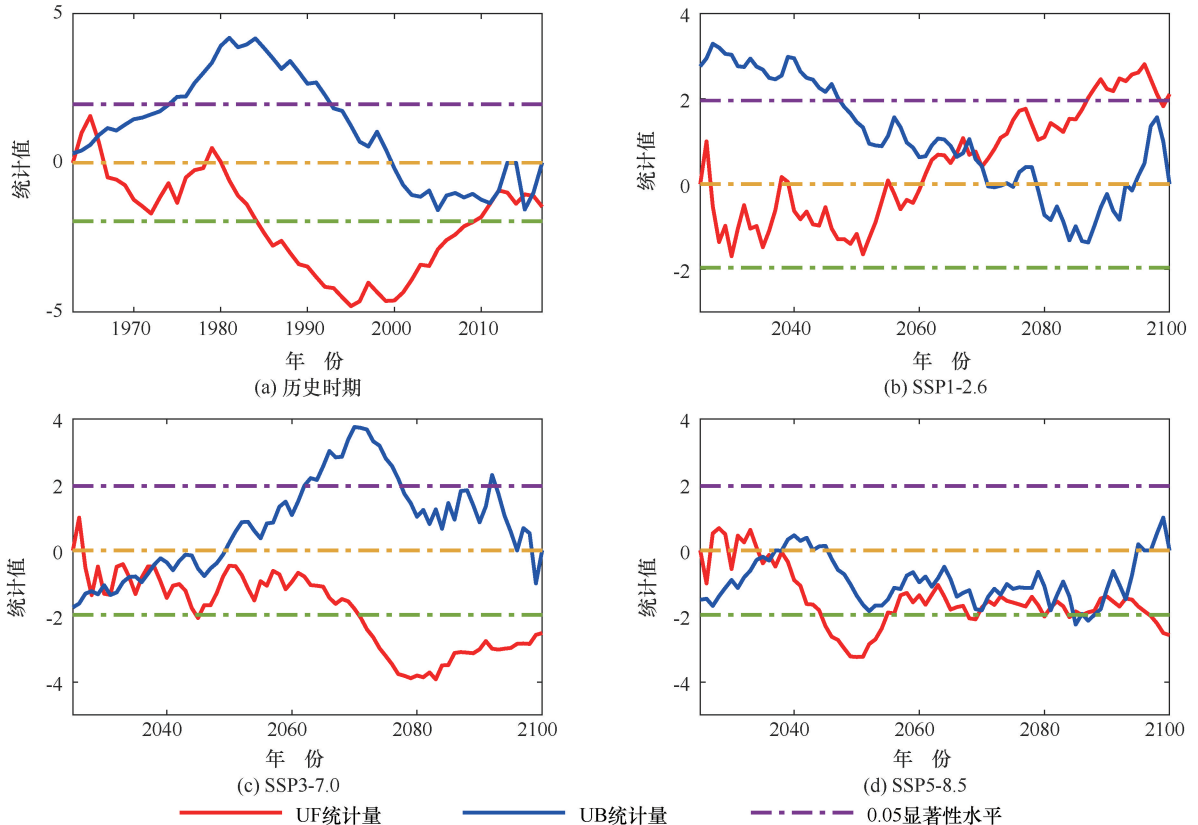


图 7 历史时期和未来气候变化下枯水天数突变检测

Fig. 7 Abrupt analysis of dry water days for the historical period and future climate change conditions

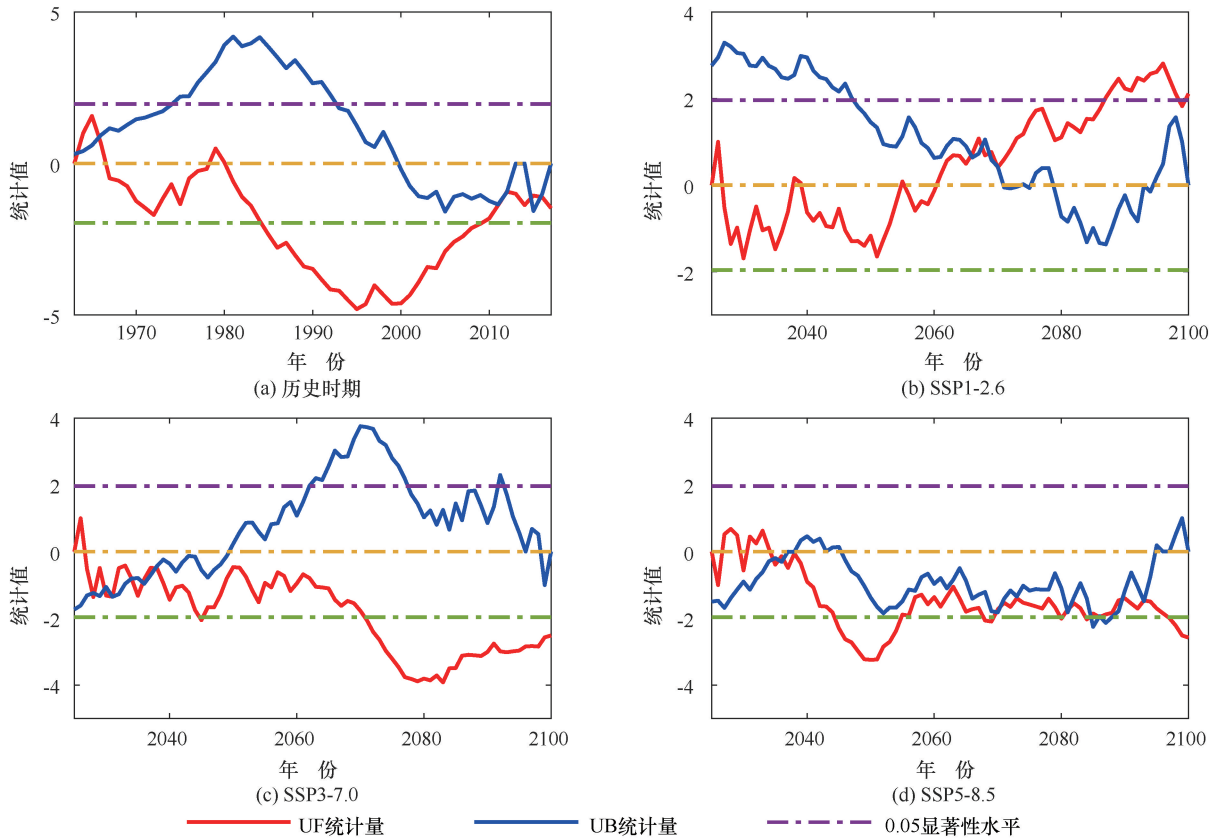


图8 历史时期和未来气候变化下连续干旱天数突变检测

Fig. 8 Abrupt analysis of consecutive dry days for the historical period and future climate change conditions

大5 d流量分别以 $27.03(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $16.19(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 的速率增加,且增加速率远高于历史时期、SSP1-2.6情景和SSP3-7.0情景。SSP5-8.5情景为高强度情景,此情景下 CO_2 的排在21世纪末期达到顶峰并逐渐下降且气温上升速度和气温的波动范围都达到最大;气温快速升高会导致流域内的冰川积雪加速融化,使局部气候暖湿化,降水增多,从而导致在此情景下嫩江流域最大日流量、最大5 d流量指标以远超历史时期的速率增加,发生洪涝灾害的风险明显增加,这与WU等^[11]和SUN等^[12]发现具有一致性。然而,本文仅从未来气候变化的角度分析嫩江流域的极端水文演变特征,并未综合考虑人类活动的影响。实际上,在不同流域气候变化和人类活动对径流量的贡献率不同。如WANG等^[51]建立了分布式月水量平衡模型,发现白河流域气候变化对径流减少的贡献率为44%,人类活动导致下垫面变化使径流减少达54%;潮河流域气候变化对径流减少的贡献率为24%,而人类活动对径流减少的贡献率高达74%,是引发径流衰减的主要原因。因此,考虑到极端水文事件的复杂性,未来需要更进一步综合考虑人类活动的影响以期今后嫩江流域有效

应对洪水、干旱风险提供决策依据。

本研究采用五种模式的均值数据驱动HYDRO-TEL模型开展的未来气候变化下极端水文演变研究。但是,已有研究发现,简单的算术平均并不是最稳妥的办法,选择不当的模式集合构成会降低气候预估的整体精度^[52]。因此,本研究模拟的径流数据存在一定的不确定性。未来可以采取同时考虑模式性能和独立性的加权方案^[53],用交叉验证的实现多模式的集合平均,最大程度地降低研究的不确定性。

5 结论

本文选取对全球变化敏感的中国高纬度地区—嫩江流域为研究区,基于CMIP6气候情景数据和HYDROTEL模型模拟未来气候变化下的日径流量并提取洪峰流量指标和枯水流量指标,用Mann-Kendall趋势分析法和突变检验法对上述指标进行显著性检验和评估其变化趋势,主要得出以下结论。

(1)在SSP1-2.6情景下最大日流量、丰水天数分别以 $0.01(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $0.06 \text{ d}/\text{a}$ 的速率增加,增加速率明显低于历史时期;而最大5 d流量则以 $1.23(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 的速率减少;且三种指标在近期、

中期、远期均值均小于历史时期。枯水天数和连续干旱天数分别以 0.45 d/a、0.13 d/a 呈显著性上升趋势;在远期枯水天数和连续干旱天数均值达到最大,相较于历史时期分别偏高 16.8%、28.2%。因此,与历史时期相比,SSP1-2.6 情景下发生干旱的强度和频次显著性上升。

(2)在 SSP3-7.0 情景下最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数分别以 $9.12(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $5.70(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $0.09 \text{d}/\text{a}$ 的速率增加且增加速率均低于历史时期;最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数在近期、中期均值小于历史时期,而远期均值大于历史时期。枯水天数和连续干旱天数分别以 0.37 d/a、0.15 d/a 呈显著性下降趋势。在远期枯水天数和连续干旱均值最小,相较于历史时期分别偏低 29.2%、32.6%。与历史时期相比,SSP3-7.0 情景下发生干旱的强度和频次显著性下降。

(3)在 SSP5-8.5 情景下最大日流量、最大 5 d 流量分别以 $27.03(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 、 $16.19(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})/\text{a}$ 的速率增加且增加速率远高于历史时期,而丰水天数以 $0.02 \text{d}/\text{a}$ 的速率减少。最大日流量、最大 5 d 流量、丰水天数年际波动明显强于历史时期,其近期均值小于历史时期,而中期、远期均值大于历史时期。枯水天数以 $0.15 \text{d}/\text{a}$ 的速率减少,其近期、远期均值大于历史时期,而中期连续干旱天数均值小于历史时期。连续干旱天数以 $0.12 \text{d}/\text{a}$ 呈显著性下降趋势;其近期、中期均值大于历史时期,而远期均值小于历史时期。与历史时期相比,SSP5-8.5 情景下发生洪涝的强度和频次呈明显的上升趋势;发生干旱的强度和频次呈一定的下降趋势。

(4)在 SSP1-2.6、SSP3-7.0 情景下最大日流量、最大 5 d 流量变异系数均低于历史时期,而在 SSP5-8.5 情景下最大日流量、最大 5 d 流量变异系数均高于历史时期。三种情景下丰水天数、枯水天数、连续干旱天数变异系数均低于历史时期。

(5)通过 Mann-Kendall 突变分析表明:在 SSP1-2.6 情景下枯水天数、连续干旱天数存在明显突变,突变点分别出现在 2059 年、2066 年;在 SSP3-7.0 情景下最大日流量、最大 5 d 流量突变点均为 2039 年。在其他情况下无明显突变。

参考文献 (References):

[1] STEVENSON S, COATS S, TOUMA D, et al. Twenty-first century hydroclimate: A continually changing baseline, with more frequent extremes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*,

2022, 119(12): e2108124119.

- [2] 郑芳,李芳然,甘义群,等. 极端气候事件对洞庭湖水文连通性变化的影响[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(1): 67-79.
ZHENG F, LI F R, GAN Y Q, et al. The impact of extreme climatic events on hydrological connectivity of Dongting Lake [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(1): 67-79.
- [3] 罗爽,许有鹏,王强,等. 城市化背景下年最大日径流演变及影响因素研究:以长江下游秦淮河流域为例[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(6): 2123-2132.
LUO Shuang, XU Youpeng, WANG Qiang, et al. Study on the evolution of annual maximum daily runoff and its influencing factors under the background of urbanization: A case study of Qinhuai River Basin in the Lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Science*, 2019, 35(6): 2123-2132.
- [4] 宋晓猛,张建云,孔凡哲,等. 北京地区降水极值时空演变特征[J]. *水科学进展*, 2017, 28(2): 161-173.
SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, KONG Fanzhe, et al. Spatial and temporal evolution of precipitation extremes in Beijing [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 161-173.
- [5] 虞畅,金君良,王国庆,等. 黄河源区典型流域水文要素演变及其对气候变化的响应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2024, 22(5): 845-855.
YU C, JIN J L, WANG G Q, et al. Evolution of hydrological elements in typical watersheds of the Yellow River source area and their response to climate change [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(5): 845-855.
- [6] AGHAKOUCHAK A, MIRCHI A, MADANI K, et al. Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities [J]. *Reviews of Geophysics*, 2021, 59(2): e2019RG000683.
- [7] PARK T, HASHIMOTO H, WANG W, et al. What does global land climate look like at 2° C warming? [J]. *Earth's Future*, 2023, 11(5): e2022EF003330.
- [8] 刘洁,黄本胜,陈晓宏,等. GPM 遥感降水产品在广东省的极端降水事件适用性分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(1): 87-94.
LIU J, HUANG B S, CHEN X H, et al. Applicability analysis of GPM remote sensing precipitation products in extreme precipitation events in Guangdong Province [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(1): 87-94.
- [9] 李文鑫,金君良,舒章康,等. 气候变化对嘉陵江流域水资源和极端水文事件的影响[J]. *水利水电工程学报*, 2024(2): 20-33.
LI Wenxin, JIN Junliang, SHU Zhangkang, et al. Impacts of climate change on water resources and extreme hydrological events in Jialing River Basin [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2024(2): 20-33.
- [10] 梅嘉洺,唐亚男,李仪,等. 基于 SWAT 模型的旬河流域气候变化水文响应研究[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(3): 7-13.
MEI Jiaming, TANG Yanan, LI Yi, et al. Study on hydrological

- response to climate change in the Shizhe River Basin based on SWAT model [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(3): 7-13.
- [11] WU Y, SUN J, XU Y J, et al. Projection of future hydrometeorological extremes and wetland flood mitigation services with different global warming levels: A case study in the Nenjiang river basin[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 108987.
- [12] SUN J, CHEN W, HU B, et al. Roles of reservoirs in regulating basin flood and droughts risks under climate change: Historical assessment and future projection[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2023, 48: 101453.
- [13] 林程, 吴辉明. 龙岗河流域2023年“9·7”极端特大暴雨洪涝反演分析[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(10): 117-125.
- LIN Cheng, WU Huiming. Inverse analysis of flood caused by 2023 “9·7” extreme rainstorm in Longgang River Basin [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(10): 117-125.
- [14] 王绍强, 周成虎, 刘纪远, 等. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析[J]. *地理学报*, 2001, 56(4): 390-400.
- WANG Shaoqiang, ZHOU Chenghu, LIU Jiyuan, et al. Simulation of terrestrial carbon cycle balance in Northeast China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 390-400.
- [15] 李洁, 张远东, 顾峰雪, 等. 中国东北地区近50年净生态系统生产力的时空动态[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1490-1502.
- LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al. Spatial and temporal dynamics of net ecosystem productivity in Northeast China over the past 50 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1490-1502.
- [16] 董满宇, 吴正方. 近50年来东北地区气温变化时空特征分析[J]. *资源科学*, 2008(7): 1093-1099.
- DONG Manyu, WU Zhengfang. Spatial and temporal characteristics of temperature change in Northeast China in recent 50 years [J]. *Resources Science*, 2008(7): 1093-1099.
- [17] 门宝辉, 庞金凤, 张腾, 等. 嫩江流域水文干旱归因分析及未来演变规律[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(10): 60-74.
- MEN Baohui, PANG Jinfeng, ZHANG Teng, et al. Attribution analysis and future evolution of hydrological drought in Nenjiang River Basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(10): 60-74.
- [18] 朱光磊, 佟守正, 赵春子. 嫩江流域参考作物蒸散量时空变化及其气候归因[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 201-209.
- ZHU Guanglei, TONG Shouzheng, ZHAO Chunzi. Temporal and spatial variation of Reference crop evapotranspiration in Nenjiang River Basin and its climatic attribution [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(1): 201-209.
- [19] DONG L, ZHANG G. The dynamic evolution and hydrological driving factors of marsh in Nenjiang River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(2): 177-183.
- [20] WU Y F, ZHANG G X, SHEN H, et al. Attribute analysis of aridity variability in North Xinjiang, China [J]. *Advances in Meteorology*, 2016, (3): 1-11.
- [21] LI F, ZHANG G, LI H, et al. Land use change impacts on hydrology in the Nenjiang River Basin, Northeast China [J]. *Forests*, 2019, 10(6): 476.
- [22] ZHENG Y, ZHANG G, WU Y, et al. Dam effects on downstream riparian wetlands: the Nenjiang River, Northeast China [J]. *Water*, 2019, 11(10): 2038.
- [23] 华悦, 叶磊, 张海荣, 等. 嫩江下游多变量水文干旱特征研究 [J]. *水文*, 2021, 41(4): 88-89.
- HUA Yue, YE Lei, ZHANG Hairong, et al. Study on multivariate hydrological drought characteristics in the lower reaches of Nenjiang River [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 41(4): 88-89.
- [24] WU Y, SUN J, HU B, et al. Can the combining of wetlands with reservoir operation reduce the risk of future floods and droughts? [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, 27(14): 2725-2745.
- [25] WU Y, ZHANG G, ROUSSEAU A N, et al. On how wetlands can provide flood resilience in a large river basin: A case study in Nenjiang river Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 125012.
- [26] 姜彤, 吕嫣冉, 黄金龙, 等. CMIP6模式新情景(SSP-RCP)概述及其在淮河流域的应用 [J]. *气象科技进展*, 2020, 10(5): 102-103.
- JIANG Tong, LV Yanran, HUANG Jinlong, et al. Overview of CMIP6 model New Scenario (SSP-RCP) and its application in Huaihe River Basin [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2019, 10(5): 102-103.
- [27] BOSSHARD T, KOTLARSKI S, EWEN T, et al. Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(9): 2777-2788.
- [28] SHAFEEQUE M, LUO Y. A multi-perspective approach for selecting CMIP6 scenarios to project climate change impacts on glacio-hydrology with a case study in Upper Indus river basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 599: 126466.
- [29] HUTCHINSON M F, XU T. ANUSPLIN version 4.4 user guide [M]. Canberra: Centre for Resource and Environmental Studies, The Australian National University, 2004.
- [30] KNUTTI R, MASSON D, GETTELMAN A. Climate model genealogy: Generation CMIP5 and how we got there [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1194-1199.
- [31] ZHU H, JIANG Z, LI J, et al. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37: 1119-1132.
- [32] DOTTORI F, SZEWCZYK W, CISCAR J C, et al. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(9): 781-786.
- [33] PATRA A, MIN S K, KUMAR P, et al. Changes in extreme ocean wave heights under 1.5 C, 2 C, and 3 C global warming [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2021, 33: 100358.
- [34] 章燕喃. 密云水库流域近三十年径流变化及归因分析 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- ZHANG Yannan. Runoff change and attribution analysis in Miyun

- Reservoir Basin in recent 30 years [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [35] 吴燕锋. 嫩江流域湿地水文过程模拟及其功能定量评估[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.
- WU Yanfeng. Simulation of wetland hydrological process and quantitative assessment of its function in Nenjiang River Basin [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and AgroEcology, Chinese Academy of Sciences), 2020.
- [36] RILEY J P, ISRAELSEN E K, EGGLESTON K O. Some Approaches to Snowmelt Prediction [M]. NY: IAHS, 1973.
- [37] 葛诗阳, 关铁生, 刘艳丽, 等. 多源潜在蒸散发产品在雅鲁藏布江流域的适用性评估与融合[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(3): 491-501.
- GE S Y, GUAN T S, LIU Y L, et al. Applicability evaluation and fusion on multi-source potential evapotranspiration products in the Yarlung Zangbo River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(3): 491-501.
- [38] RANKINEN K, KARVONEN T, BUTTERFIELD D. A simple model for predicting soil temperature in snow-covered and seasonally frozen soil: model description and testing[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2004, 8(4): 706-716.
- [39] FORTIN J P R, TURCOTTE S, MASSICOTTE R, et al. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 2: Application to the Chaudière watershed [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2001, 6(2): 100-108.
- [40] NOËL P, ROUSSEAU A N, PANICONI C, et al. Algorithm for delineating and extracting hillslopes and hillslope width functions from gridded elevation data[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2014, 19(2): 366-374.
- [41] RANKINEN K, KARVONEN T, BUTTERFIELD D. A simple model for predicting soil temperature in snow-covered and seasonally frozen soil: model description and testing [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2004, 8(4): 706-716.
- [42] FORTIN V. Le Modèle Météo-apport HSAMI: Historique, Théorie et Application [R]. Varennes, Québec, Canada: Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ), 1995.
- [43] 吴燕锋, 章光新, 齐鹏, 等. 耦合湿地模块的流域水文模型模拟效率评价[J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 326-336.
- WU Yanfeng, ZHANG Guangxin, QI Peng, et al. Evaluation of simulation efficiency of basin hydrological model coupled with wetland module [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(3): 326-336.
- [44] BAIN L J, ENGELHARDT M, WRIGHT F T. Tests for an increasing trend in the intensity of a Poisson process: A power study[J]. Journal of the American Statistical Association, 1985, 80(390): 419-422.
- [45] BISAI D, CHATTERJEE S, KHAN A, et al. Application of sequential Mann-Kendall test for detection of approximate significant change point in surface air temperature for Kolkata weather observatory, west Bengal, India[J]. International Journal of Current Research, 2014, 6(2): 5319-5324.
- [46] 汤秋鸿, 徐锡蒙, 周羽暄, 等. 全球变化背景下黄河流域水旱灾害演变及应对策略[J]. 水利发展研究, 2025, 25(2): 13-20.
- TANG QiuHong, XU Ximeng, ZHOU Yuxuan, et al. Evolution of floods and droughts in the Yellow River Basin under global change and relevant coping strategies [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(2): 13-20.
- [47] FICKLIN D L, LUO Y, LUEDELING E, et al. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT [J]. Journal of hydrology, 2009, 374(1/2): 16-29.
- [48] GUO Junting, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al. Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1559-1567.
- [49] WU Mengying, WANG Zhonggen, DANG Suzhen. Simulation and analysis of runoff in the upper reaches of the Heihe River Basin[J]. Resources Science, 2012, 34(10): 1913-1921.
- [50] 徐东霞, 章光新, 尹雄锐. 近50年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 416-421.
- XU Dongxia, ZHANG Guangxin, YIN Xiongrui. Runoff variation and its impacting factor in Nenjiang River during 1956—2006 [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 416-421.
- [51] WANG G, XIA J, CHEN J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: A case study of the Chaobai River basin in northern China [J]. Water resources research, 2009, 45(7): 56-64.
- [52] 朱欢欢, 江志红, 李肇新, 等. 统一框架下中国气候预估多模式集合策略对比[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(9): 2155-2171.
- ZHU Huanhuan, JIANG Zhihong, LI Zhaoxin, et al. Intercomparison of multi-model ensemble-processing strategies within a consistent framework for climate projection in China [J]. Science China Earth Sciences, 2023, 53(9): 2155-2171.
- [53] KNUTTI R, SAEDLÁ E K J, SANDERSON B M, et al. A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(4): 1909-1918.

(责任编辑 王海锋)