

长江上游流域水文干旱历史演变及未来预估

王云^{1,2,3}, 李文鑫^{1,2,3,4}, 张建云^{1,2,3,5,6}, 刘翠善^{1,2,3}, 阮俞理^{1,2,3}, 虞畅^{2,3,5,6,7},
金君良^{1,2,3,5,6}, 王国庆^{1,2,3,5,6*}, 贺瑞敏^{1,2,3}

(1. 南京水利科学研究院, 南京 210029; 2. 水利部水旱灾害防御重点实验室, 南京 210029; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 南京 210029; 4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065; 5. 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098; 6. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 南京 210098; 7. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 受全球气候变化影响, 长江流域水文干旱事件频发且强度不断增加, 严重威胁粮食安全和经济发展。本文利用水量平衡(RCCC-WBM)模型, 分析了长江上游直门达、朱沱、寸滩、宜昌4个水文站及以上流域的水文要素历史演变和未来发展趋势, 并基于标准化径流指数(SRI)识别了长江上游流域的水文干旱事件及特征。结果表明: ①1961—2020年, 朱沱、寸滩和宜昌3个水文站的径流量及对应长江上游干流区、岷沱江、嘉陵江及乌江各子流域的SRI均呈减少趋势, 即微弱变旱化趋势, 而直门达水文站径流及以上金沙江流域SRI呈增加趋势, 即无旱化趋势。②2021—2090年, 各水文站及以上流域SRI均呈增大趋势, 说明长江上游流域未来呈无旱化趋势, 这可能与未来预估降水、径流大幅增加密切相关; 未来水文干旱频次、频率、历时及烈度均表现为近期较强, 远期较弱。鉴于长江上游流域极端水文干旱现象日益显著, 防旱减灾工作紧迫, 建议完善抗旱机制体制, 提升基础设施建设和应急管理, 强化数字技术赋能, 构建智慧防旱减灾体系并突出创新驱动, 以强化防旱减灾科技支撑。

关键词: 长江上游流域; 水文干旱; CMIP6; RCCC-WBM模型; 标准化径流指数

中图分类号: P467; S423 文献标识码: A

Historical Evolution and Future Prediction of Hydrological Droughts in the Upper Yangtze River Basin

Wang Yun^{1,2,3}, Li Wenxin^{1,2,3,4}, Zhang Jianyun^{1,2,3,5,6}, Liu Cuishan^{1,2,3}, Ruan Yuli^{1,2,3},
Yu Chang^{2,3,5,6,7}, Jin Junliang^{1,2,3,5,6}, Wang Guoqing^{1,2,3,5,6*}, He Ruimin^{1,2,3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Flood and Drought Disaster Defense, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Research Centre for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 4. POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China; 5. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 6. National Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 7. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Under the influence of global climate change, hydrological drought events in the Yangtze River have occurred frequently with an

收稿日期: 2024-11-26; 修回日期: 2024-12-18

通讯作者: *王国庆, 南京水利科学研究院教授级高级工程师, 研究方向为气候变化与水文水资源; Email: gqwang@nhri.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3202301); 中国工程院咨询项目“健康水平衡构建与国土高质量保护利用战略(一期)”(2022-PP-04), “长江大保护与深水航道效益发挥对策研究”(JS2022XZ06), “新形势下长江流域发展与安全战略研究”(2023-HYZD-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

increasing intensity, seriously threatening food security and economic development. This study uses the monthly water balance model developed by the Research Center for Climate Change (i.e., the RCCC-WBM model) to analyze the historical evolution and future trends of hydrological features in four hydrological stations (Zhimenda, Zhutuo, Cuntan, and Yichang) in the upper reaches of the Yangtze River and the basins above. Meanwhile, hydrological drought events and their characteristics are identified based on the Standardized Runoff Index (SRI). The results show that: (1) From 1961 to 2020, the runoffs of Zhutuo, Cuntan, and Yichang hydrological stations, along with the SRI of the main stream area in the upper reaches of the Yangtze River and the sub-basins of the Minjiang, Tuojiang, Jialing, and Wujiang River, exhibited a decreasing trend, indicating a slight drying trend, while the runoff of the Zhimenda hydrological station and the SRI of the Jinsha River basin above it showed an increasing trend, suggesting no drought tendency. (2) From 2021 to 2090, the SRI of each hydrological station and its upstream basins all showed an increasing trend, indicating that the upper reaches of the Yangtze River have no drought tendency in the future; this may be closely related to the significant increase in projected precipitation and runoff. The frequency, occurrence rate, duration, and intensity of hydrological droughts will be stronger in the near term and weaker in the long term. Given the increasingly prominent extreme hydrological droughts in the upper reaches of the Yangtze River, drought prevention and disaster reduction becomes urgent. It is recommended to improve the drought combating mechanism and system, strengthen infrastructure construction and emergency management capabilities, promote the digital technology to build a smart drought-prevention and disaster-reduction system, and highlight technological innovation to strengthen the scientific and technological support for drought prevention and mitigation.

Keywords: upper Yangtze River basin; hydrological drought; CMIP6; RCCC-WBM model; Standardized Runoff Index

一、前言

联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在第六次评估报告中指出, 人类活动已成为加剧全球气候变暖的主要驱动力。全球气候变暖导致极端水文事件 (如洪水、干旱等) 的发生频率与强度显著增加^[1], 改变了降水的时空分布格局, 加剧了发生区域性旱涝灾害的风险^[2]。21 世纪以来, 长江流域在 2011 年、2013 年、2019 年、2022 年均发生了严重的水文干旱, 造成了巨大的经济损失^[3-6]。其中, 2022 年, 长江流域出现了大范围的异常高温干旱复合事件, 多地日最高气温突破历史纪录, 干旱过程综合强度为 1961 年以来最强, 对流域内的自然环境和人类社会发展产生了广泛影响^[3,7]。长江上游流域是整个长江流域以及我国重要的水源涵养区和水电能源基地^[8]。水文干旱会直接影响供水和水力发电, 目前长江上游流域水文干旱频发, 径流量减少, 威胁着长江中下游流域的居民农业生产和生活用电等, 不利于我国经济发展和生态保护^[9]。

长江流域历史时期水文干旱状态呈加重态势^[10-12], 干旱频率呈上升趋势, 多年平均干旱率为 18.21%, 特别是长江上游流域的干旱历时、干旱烈度、特旱事件的频次与区域均呈增加趋势^[13,14]。在未来演变趋势方面, 长江上游流域远期干旱强度将有所缓解, 整体将朝湿润化方向发展^[15]。目前, 聚焦长江流域历史时期水文干旱演变态势、围绕典型水文干旱事件特征与归因分析的研究已较为成熟; 而基于第六次国际耦合模式比较计划 (CMIP6) 的多个气候模式数据, 开展长江上游流域未来水文干

旱变化趋势预估的研究亟待深化。明确气候变化背景下的长江上游流域历史水文干旱演变态势和未来水旱灾害的发展趋势, 有助于降低水安全风险, 促进社会和经济可持续发展。

本文以直门达、朱沱、寸滩和宜昌 4 个水文站及以上流域为研究对象, 基于历史实测气象水文数据和 CMIP6 多个气候模式预估的未来气象数据, 运用水量平衡 (RCCC-WBM) 模型, 分析 1961—2020 年的径流演变情势和 2021—2090 年的径流变化趋势。运用标准化径流指数 (SRI) 评估长江上游流域的水文干旱程度及干旱特征^[16], 分析长江上游流域水文干旱的历史演变情况及未来发展趋势, 提出长江上游流域应对极端水文干旱灾害和气候变化的对策建议, 为长江流域干旱预测与抗旱减灾提供科学依据。

二、研究区域与数据

长江上游流域位于 90°13'~111°30' E、24°37'~35°54' N, 自青藏高原各拉丹东至湖北省宜昌段, 面积为 1.006×10^6 km², 约占长江流域总面积的 55.9%^[8], 全长约为 4500 km, 约占全流域总长度的 71.4%^[14]。长江上游流域的主要干支流有金沙江、雅砻江、岷江、沱江、嘉陵江、乌江, 年径流量约为 4×10^{11} m³^[17], 约占全流域年径流量的 40.4%。长江上游流域的年降水量为 723~1134 mm^[18], 汛期集中在每年的 4~9 月, 降水丰沛, 约占全年降水量的 80%^[19]; 多年平均气温为 8.6~16.8 °C^[19], 气候分属青藏高寒区和亚热带季风区, 受多种气候带影响,

属于典型的气候变化敏感地区。20 世纪以来, 全球气候变化导致长江流域水旱灾害频发, 严重威胁沿岸地区及下游居民的生命财产安全^[20]。

本文的研究数据主要包括实测气象水文数据和未来气候变化情景下的 CMIP6 全球气候模式预估数据。① 气象数据来源于国家气候中心提供、由全国 2400 多个气象站资料插值生成的再分析数据集 CN05.1, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 包括 1961—2020 年长江上游流域直门达、朱沱、寸滩、宜昌 4 个水文站实测的气温和降水数据; 实测水文数据来源于《长江流域水文年鉴》, 包括 1961—2020 年实测的上述 4 个水文站的月尺度流量数据。② CMIP6 全球气候模式预估数据包括低辐射强迫路径 (SSP1-2.6)、中等辐射强迫路径 (SSP2-4.5) 和高辐射强迫路径 (SSP5-8.5) 3 种排放情景下 10 种气候模式预估的 2021—2090 年气温、降水数据。气候模式包括 BCC-CSM2-MR、CanESM5、EC-Earth3、GFDL-ESM4、INM-CM4-8、KACE-1-0-G、MIROC6、MPI-ESM1-2-HR、NorESM2-LM、UKESM1-0-LL, 这些模式在极端降水和气温模拟方面效果较好, 且 CMIP6 相较 CMIP5 对极端气候的模拟能力有所提升^[21-23]。

三、研究方法

(一) 水文干旱指标

本文采用 SRI 来评估长江上游流域的水资源短缺状况, 识别水文干旱演变趋势^[24,25]。以 1 年为单位, 运用皮尔逊 III 型概率分布函数对逐月平均径流序列进行拟合, 计算其累积概率并进行正态标准化处理后得到 SRI 值^[26]。基于 SRI 的水文干旱等级划分标准^[27]如表 1 所示。

(二) 水文干旱识别

一次水文干旱事件定义为 SRI 连续低于干旱阈值的月份序列。参考以往研究, 选取水文干旱阈值为 -1 ^[28,29]。具体来说, 当 SRI 值 ≤ -1 时, 干旱开始; 当 SRI 值 > -1 时, 干旱结束。从开始月份到结束月份为一次水文干旱事件, 对于间隔仅一个月的相邻干旱事件, 将其合并为一次干旱事件^[30]。在识别水文干旱事件后, 计算并提取每次水文干旱事件的干旱特征, 包括干旱频次、干旱频率、干旱历时和干旱烈度。其中, 干旱频率为干旱月数与时段总月数之比; 干旱历时指每一次干旱事件从起始至终止所历经的完整时间跨度; 干旱烈度反映干旱的严重程度, 用单次干旱事件中的 SRI 值与干旱阈值之差 (取绝对值后累加) 来量化。在数据合并时, 对应干旱特征需相应调整计算。

为 -1 ^[28,29]。具体来说, 当 SRI 值 ≤ -1 时, 干旱开始; 当 SRI 值 > -1 时, 干旱结束。从开始月份到结束月份为一次水文干旱事件, 对于间隔仅一个月的相邻干旱事件, 将其合并为一次干旱事件^[30]。在识别水文干旱事件后, 计算并提取每次水文干旱事件的干旱特征, 包括干旱频次、干旱频率、干旱历时和干旱烈度。其中, 干旱频率为干旱月数与时段总月数之比; 干旱历时指每一次干旱事件从起始至终止所历经的完整时间跨度; 干旱烈度反映干旱的严重程度, 用单次干旱事件中的 SRI 值与干旱阈值之差 (取绝对值后累加) 来量化。在数据合并时, 对应干旱特征需相应调整计算。

(三) RCCC-WBM 模型

RCCC-WBM 模型是由水利部应对气候变化研究中心团队自主研发的水文模型, 合理概化了超渗、蓄满两种产流机制, 充分考虑了旱区降雪、积雪和融雪过程^[31], 具有结构清晰、参数少、率定简单等特点, 可以广泛适用于多种气候条件。该模型的输入数据为逐月降水量、气温以及蒸发能力, 其中蒸发能力通过彭曼公式间接估算获得^[32]; 输出数据为径流量, 包括地表径流量、地下径流量和融雪径流量。为验证模拟径流过程与实测径流过程的模型拟合情况, 本文以纳什效率系数 (E_{NS})、相对误差 (E_R) 为目标函数进行参数率定。 E_{NS} 值趋近于 1 且 E_R 值趋近于 0 时, 说明模拟效果越好^[33]。

本文选取 1961—2020 年的气象水文资料来率定和验证 RCCC-WBM 模型, 分别选取 1961—2000 年、2001—2020 年作为 RCCC-WBM 模型的率定期、验证期。由表 2 可知, 长江上游流域各水文站月径流模拟结果与实测数据高度拟合, E_{NS} 均大于 0.75, E_R 均介于 $\pm 7.5\%$, 表明本文所构建的 RCCC-WBM 模型在长江上游流域具有较好的适用性与准确性, 可用于未来气候变化情景下的径流模拟。

表 1 基于 SRI 的水文干旱等级划分

干旱等级	SRI 值	类型
1	$[-0.5, +\infty)$	无旱
2	$(-1.0, -0.5)$	轻旱
3	$(-1.5, -1.0]$	中旱
4	$(-2.0, -1.5]$	重旱
5	$(-\infty, -2.0]$	特旱

表 2 RCCC-WBM 模型月径流模拟过程

水文站名称	率定期 (1961—2000 年)		验证期 (2001—2020 年)	
	E_{NS}	$E_R/\%$	E_{NS}	$E_R/\%$
宜昌	0.92	1.67	0.80	5.89
寸滩	0.93	1.35	0.88	3.72
朱沱	0.93	-1.84	0.87	6.21
直门达	0.77	7.18	0.78	3.18

四、结果与分析

(一) 长江上游流域历史水文干旱分析

1. 历史径流变化

基于长江上游流域直门达、朱沱、寸滩和宜昌4个水文站在1961—2020年的逐日实测径流量数据，在年尺度上进行数据处理，分析长江上游流域各水文站径流量的历史变化趋势（见图1），并运用曼-肯德尔趋势检验法进行径流量变化趋势的显著性检验。研究结果显示，长江上游流域各水文站的年径流量变化趋势呈现出一定的差异性。具体表现为：朱沱、寸滩和宜昌3个水文站的径流呈不显著下降趋势，趋势变化率分别为 $-8.06 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $-2.62 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $-7.99 \text{ mm}/10\text{a}$ ，反映了长江上游干流区、岷沱江、嘉陵江及乌江各子流域的径流减少；相比之下，直门达水文站的径流则呈现不显著上升趋势，趋势变化率为 $6.08 \text{ mm}/10\text{a}$ ，反映了长江源区金沙江上段通天河区域的径流增加。这一差异性的变化态势主要归因于长江源区青藏高原1961—2020年的平均气温增加趋势显著，冰川融雪、冻土融化带来的基本径流增加，再加上年降水量呈明显增加趋势，共同导致了年平均径流量的增加。4个水文站的径流变化特征可以反映出长江上游流域的径流变化情况：长江上游西部金沙江上段流域径流整体上呈现增加趋势，而东部地势相对较低的上游干流区、岷沱江、嘉陵江及乌江各子流域径流整体上趋于减少。

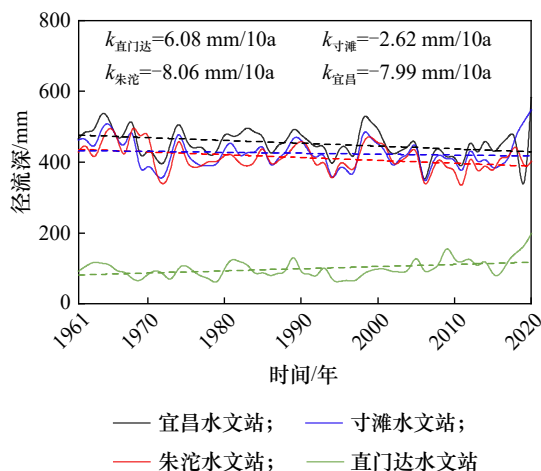


图1 各水文站及以上流域1961—2020年的逐年径流量变化趋势

注： k 表示趋势变化率，单位为 $\text{mm}/10\text{a}$ ，表示每10年的变化量。 k 值为正时，表示呈增加趋势； k 值为负时，表示呈减少趋势。下同。

2. 基于历史实测径流的SRI演变及水文干旱特征分析

图2为朱沱、寸滩、宜昌、直门达4个水文站及以上流域在1961—2020年的SRI变化趋势。可以发现：朱沱、寸滩和宜昌3个水文站及以上流域的SRI均呈现减小趋势，趋势率为 $-0.13/10\text{a}$ ~ $-0.11/10\text{a}$ ，表明长江上游干流区、岷沱江、嘉陵江及乌江各子流域水文干旱状况逐渐由无旱转为轻旱，干旱态势趋于严重；而直门达水文站及以上流域的SRI呈增大趋势，趋势率为 $0.16/10\text{a}$ ，表明长江源区金沙江上段通天河区域的水文干旱状况趋于无旱。与水文干旱阈值相比，宜昌、寸滩和朱沱3个水文站及以上流域的SRI指标变化态势基本一致，水文干旱基本同步；而直门达水文站及以上流域与上述三者的SRI变化存在较大差异。这种差异可能归因于长江源区青藏高原近年来气温、降水量增幅均较大，使得径流量趋于增加，进而推动水文干旱状况减缓、无旱化趋势上升。整体上，长江上游金沙江流域水文干旱状况呈现无旱化趋势，而上游干流区、岷沱江、嘉陵江及乌江各子流域干旱状况整体上趋于恶化，逐渐由无旱转为轻旱。

表3给出了1961—2020年直门达、朱沱、寸滩、

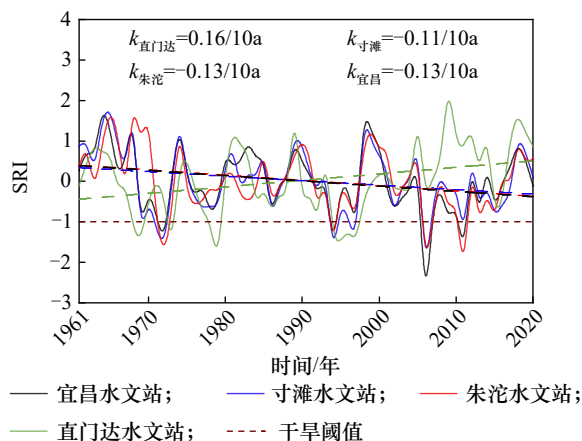


图2 各水文站及以上流域1961—2020年的SRI变化趋势

表3 各水文站及以上流域1961—2020年的水文干旱特征

水文站名称	干旱频次/次	干旱频率/%	干旱平均历时/月	干旱平均烈度	重旱特旱频次/次
直门达	41	15.95	2.71	4.13	18
朱沱	43	17.10	2.77	4.06	18
寸滩	50	18.53	2.58	3.69	23
宜昌	52	15.95	2.13	3.15	21

宜昌4个水文站及以上流域的水文干旱特征，即干旱频次为41~52次、干旱频率为15.95%~18.53%、干旱平均历时为2.13~2.77个月、干旱平均烈度为3.15~4.13。具体到各个水文站及以上流域的情况来看：①宜昌水文站及以上流域，即长江上游干流区及乌江流域，出现水文干旱事件的频次最高，但干旱频率、干旱平均历时和干旱平均烈度都最低，表明该区域虽然水文干旱事件频发，但持续时间短、强度低。②寸滩水文站及以上流域，即嘉陵江流域，出现水文干旱事件的频次和频率最高，平均历时和平均烈度相对较低，说明该区域水文干旱较为频繁且干旱历时和烈度波动性较大。③朱沱、直门达2个水文站及以上流域，即金沙江和岷沱江流域，出现水文干旱事件的频次较低，但平均历时、平均烈度均较高，说明该区域每次干旱事件的历时较长且烈度较大，对生态环境和生产活动的影响带来较大影响。此外，各子流域发生特旱事件的频次均较高，超过总干旱事件次数的40%，直门达、朱沱、寸滩、宜昌4个水文站及以上流域出现的重旱特旱事件占比分别为43.9%、41.86%、46%、

40.38%；其中单次干旱最大历时不超过10个月，多数干旱事件历时为1~4个月，最大干旱烈度达到15.19，多数烈度为2~6。总体上，长江上游干流区及乌江流域水文干旱事件最为频发，但历时短、烈度低；嘉陵江流域水文干旱频次较多，但干旱历时和干旱烈度不确定性较大；金沙江流域和岷沱江流域发生水文干旱的频次较少，但极端性较强，易引发生态恶化、农业减产等；整个长江上游流域的重特旱事件普遍多发。

(二) 长江上游流域未来水文干旱预估

本文将10种全球气候模式预估的未来气温、降水数据进行均值处理，基于多模式气温、降水均值模拟得出径流量数据，再基于模拟径流量计算得出未来多年的SRI序列。与10种单模式模拟结果相比，多个模式的集合平均模式与实测数据拟合程度更高、模拟效果更佳^[34]，有利于预估和分析未来气象数据的演变趋势。

1. 未来径流变化趋势分析

图3给出了SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5排放

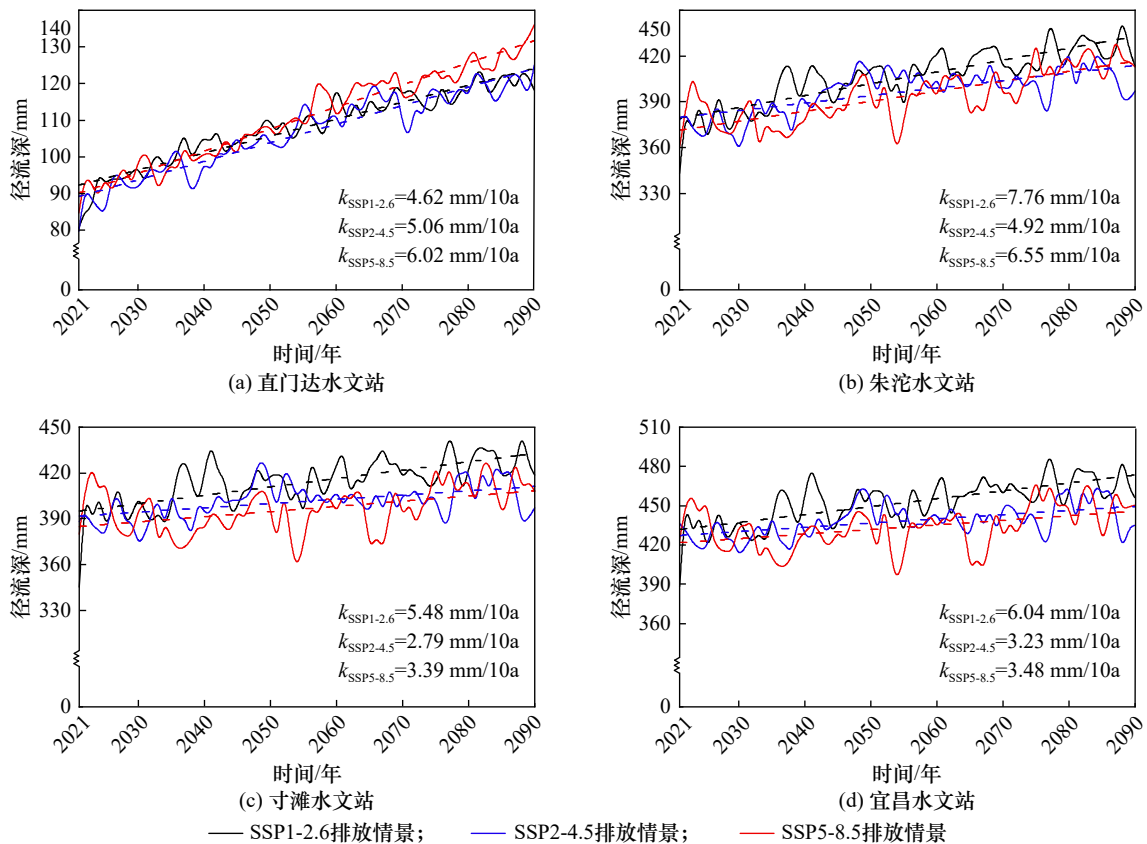


图3 3种排放情景下长江上游流域2021—2090年的模拟径流量变化趋势

情景下长江上游流域直门达、朱沱、寸滩、宜昌4个水文站2021—2090年的模拟径流量变化情况。在SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5排放情景下，未来长江上游流域各水文站的径流量均呈显著增加趋势，这可能与降水大幅增加、青藏高原气温升高导致冰川冻土融化等^[35]补充了径流有关。对比长江上游流域历史阶段（1961—2018年）和未来近期（2021—2055年）、远期（2056—2099年）的径流变化，结果表明：相较于历史阶段，长江上游各水文站多年平均径流在未来近期增幅较大，直门达、朱沱、寸滩、宜昌4个水文站的径流变化区间分别为-17.46%~20.41%、-17.04%~1.68%、-18.09%~4.82%、-14.61%~6.22%；在未来远期变化幅度较小，4个水文站径流变化区间分别为8.12%~37.11%、-9.13%~8.43%、-12.97%~6.64%、-12.83%~8.54%。总体上，基于多种气候模式集合的平均模式预估得出：长江上游流域未来径流量整体呈增加趋势，具体表现为未来近期径流增幅较大、远期变化幅动较小。

2. 基于未来模拟径流的SRI趋势及干旱特征预估

图4给出了2021—2090年4个水文站及以上流

域的年尺度SRI序列的变化趋势。由图4可知，各水文站及以上流域在3种排放情景下的SRI均呈不显著增大趋势，这表明整个长江上游流域未来将朝着无旱化方向发展。直门达、朱沱、寸滩、宜昌4个水文站及以上流域的SRI变化在3种排放情景下的增速均相差不大，分别为0.44/10a~0.47/10a、0.3/10a~0.36/10a、0.19/10a~0.27/10a、0.18/10a~0.31/10a。对比不同排放情景下的增速情况，可以发现，各水文站存在一定差异性。一般地，SSP1-2.6排放情景下的增速相对高，SSP5-8.5排放情景下的增速相对低。对比各水文站及以上流域SRI序列的波动情况，可以发现：直门达水文站及以上流域未来SRI变化更稳定，波动较小；而其他3个水文站及以上流域波动幅度较大。

表4为2021—2090年不同排放情景下各水文站及以上流域的水文干旱特征情况。比较各水文站及以上流域在未来近期和远期的水文干旱特征可以发现：4个子流域发生水文干旱事件的频次、频率、平均历时、平均烈度及重旱特旱事件发生的频次均表现出近期较强、远期减弱的特征。具体来说，在3种排放情景下，4个子流域近期的干旱频次为27~33次、

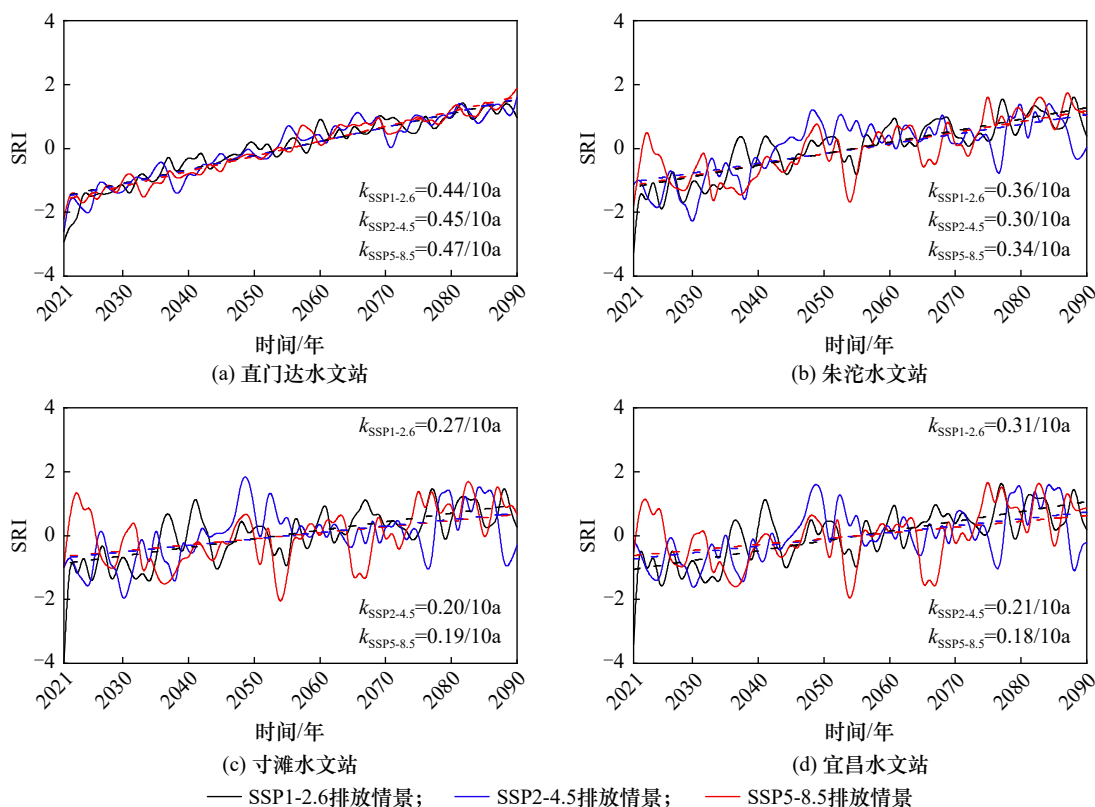


图4 各水文站及以上流域2021—2090年的年尺度SRI变化趋势

表4 不同排放情景下各水文站及以上流域 2021—2090 年的水文干旱特征

水文站名称	排放情景	时期	干旱频次/次	干旱频率/%	平均历时/月	平均烈度	重旱特旱频次/次
直门达	SSP1-2.6	近期	28	29.05	4.36	7.47	15
		远期	3	0.95	1.33	1.75	1
	SSP2-4.5	近期	28	31.67	4.75	7.96	14
		远期	1	0.24	1.00	1.17	0
	SSP5-8.5	近期	31	29.05	3.94	6.57	15
		远期	4	0.95	1.00	1.80	3
朱沱	SSP1-2.6	近期	29	26.43	3.83	7.16	15
		远期	7	1.67	1.00	1.22	0
	SSP2-4.5	近期	32	22.38	2.94	5.29	18
		远期	10	6.43	2.70	3.56	4
	SSP5-8.5	近期	33	19.52	2.48	4.48	19
		远期	15	9.05	2.53	4.20	9
寸滩	SSP1-2.6	近期	27	23.57	3.67	6.51	17
		远期	8	3.33	1.75	2.23	2
	SSP2-4.5	近期	31	18.81	2.55	4.56	16
		远期	23	9.29	1.70	2.71	9
	SSP5-8.5	近期	32	16.90	2.22	3.86	15
		远期	16	11.67	3.06	4.92	11
宜昌	SSP1-2.6	近期	31	26.19	3.55	5.87	21
		远期	8	2.86	1.50	2.15	2
	SSP2-4.5	近期	31	18.33	2.48	4.36	14
		远期	24	12.38	2.17	3.43	13
	SSP5-8.5	近期	31	17.14	2.32	3.80	17
		远期	23	14.76	2.70	4.29	15

干旱频率为 16.9%~31.67%、干旱平均历时为 2.22~4.75 个月、干旱平均烈度为 3.8~7.96、重旱特旱频次为 14~21 次。相比之下，远期各子流域干旱事件发生的频次和频率显著降低，干旱平均历时、平均烈度和重旱特旱频次也相对降低：在 3 种排放情景下，4 个子流域远期的干旱频次为 1~24 次、干旱频率为 0.24%~14.76%、干旱平均历时为 1~3.06 个月、干旱平均烈度为 1.17~4.92、重旱特旱频次为 0~15 次。

比较各水文站及以上流域在 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 不同排放情景下水文干旱特征的变化趋势，可以看出：长江上游流域水文干旱事件在 3 种排放情景下的干旱频次相差不大。在近期，干旱平均频率、平均历时、平均烈度基本表现为 SSP1-2.6 排放情景较强，SSP2-4.5 排放情景较弱，SSP5-8.5 排放情景最弱；与之相反，在远期表现为由 SSP1-2.6 排放情景向 SSP5-8.5 排放情景逐渐增强。鉴于全球范围内气候减缓措施的持续推进，SSP2-4.5 排放情景

在未来气候预测中展现出了更高的代表性和实际意义，因而受到了水文领域的广泛关注。将未来 SSP2-4.5 排放情景与 SSP1-2.6 排放情景相比，除直门达水文站外，其他 3 个水文站未来近期在 SSP2-4.5 排放情景下的干旱频率、平均历时和平均烈度都相对较低；远期在 SSP2-4.5 排放情景下，干旱发生的频次、频率、平均历时、平均强度以及重旱特旱频次均明显增多。

对比 1961—2020 年（见表 3）和 2021—2090 年的水文干旱特征（见表 4）可以发现：长江上游流域未来干旱频次将呈减少趋势，干旱频率、平均历时、平均烈度以及重旱特旱频次均表现为在未来近期增强而远期减弱。具体来说，在历史时期干旱频次为 41~52 次、干旱频率为 15.95%~18.53%、干旱平均历时为 2.13~2.77 个月、干旱平均烈度为 3.15~4.13、重旱特旱事件有 18~21 次。而未来近期的干旱频次为 27~33 次、干旱频率为 16.9%~31.67%、干

旱平均历时为2.22~4.75个月、干旱平均烈度为3.8~7.96、重旱特旱频次为14~21次；在未来远期的干旱频次为1~24次、干旱频率为0.24%~14.76%、干旱平均历时为1~3.06月、干旱平均烈度为1.17~4.92、重旱特旱频次为0~15次。整体来看，长江上游流域未来水文干旱事件发生的可能性降低，但长历时、高烈度的极端干旱事件在未来近期将趋于频发，且影响范围将更大，即长江上游流域未来近期极端干旱事件发生的可能性将显著增加。

(三) 讨论

长江上游流域未来径流对气温、降水变化的响应将直接影响该流域的水文干旱状况。本文进一步讨论了长江上游流域未来气温和降水量的变化情况，以更清晰地揭示该流域水文干旱的演变规律。

未来气温（多模式均值）变化主要通过影响蒸散发强度间接导致径流变化，从而引起长江上游流

域水文干旱演变。图5给出了不同排放情景下的长江上游流域未来气温变化情况，可以看出：在3种排放情景下，未来各水文站及以上流域将呈现显著温升趋势；气温变化基本同步，变化幅度相差不大，仅直门达水文站及以上流域的平均气温较其他三者气温增幅略高0.01~0.36℃。具体来看，在SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5排放情景下，各水文站及以上流域气温较基准期多年平均气温在近期将分别升高约1.75℃、1.93℃、2.35℃，在远期将分别升高约2.12℃、2.89℃、4.43℃，未来气温的增长幅度明显加剧。

未来降水（多模式均值）变化将直接影响长江上游流域径流变化，从而影响水文干旱的特征及演变趋势。图6给出了不同排放情景下的长江上游流域未来降水变化情况，可知：多模式集合平均模式在3种排放情景下预估的未来降水量变化以显著增加趋势为主。对比4个水文站及以上流域降水增幅

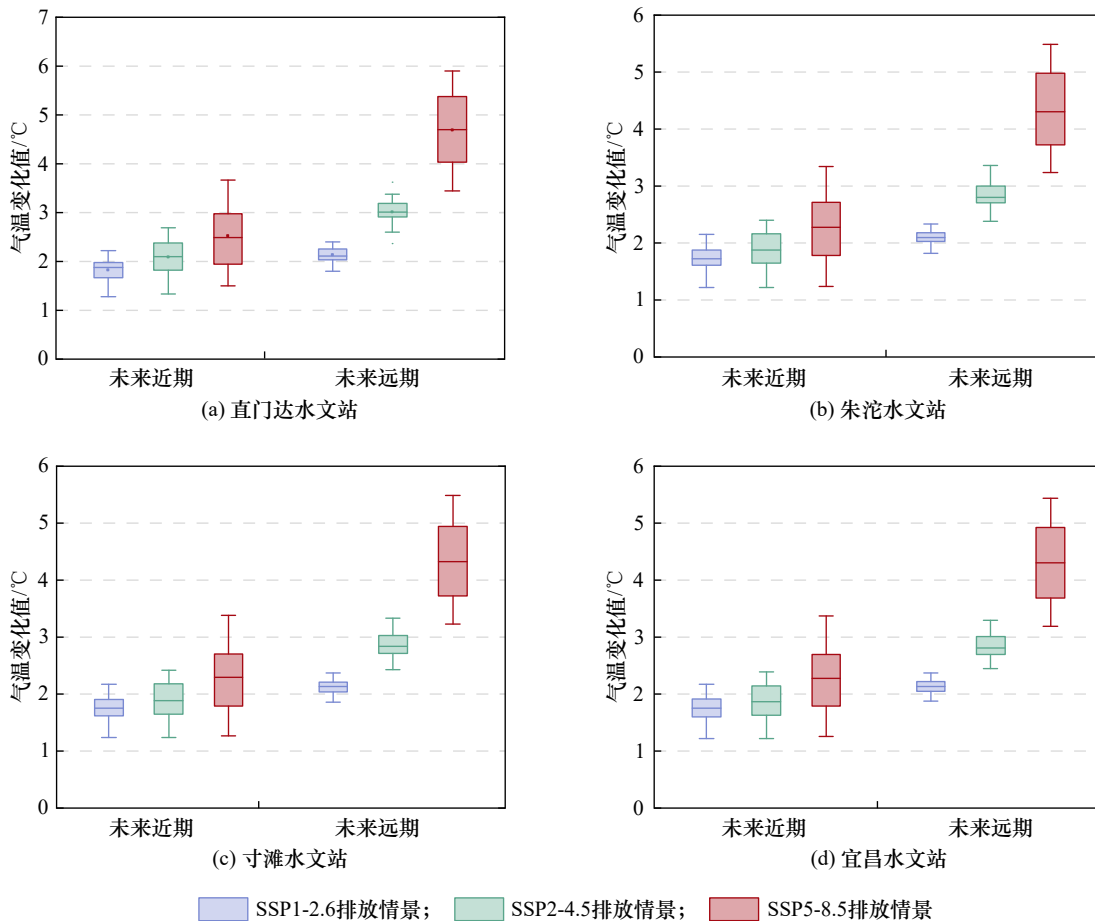


图5 不同排放情景下长江上游流域的未来气温变化

注：箱线图上的、下的横线分别代表最大值与最小值，上、下边界分别代表分位数75%与25%的值，中间横线代表中位数值。下同。

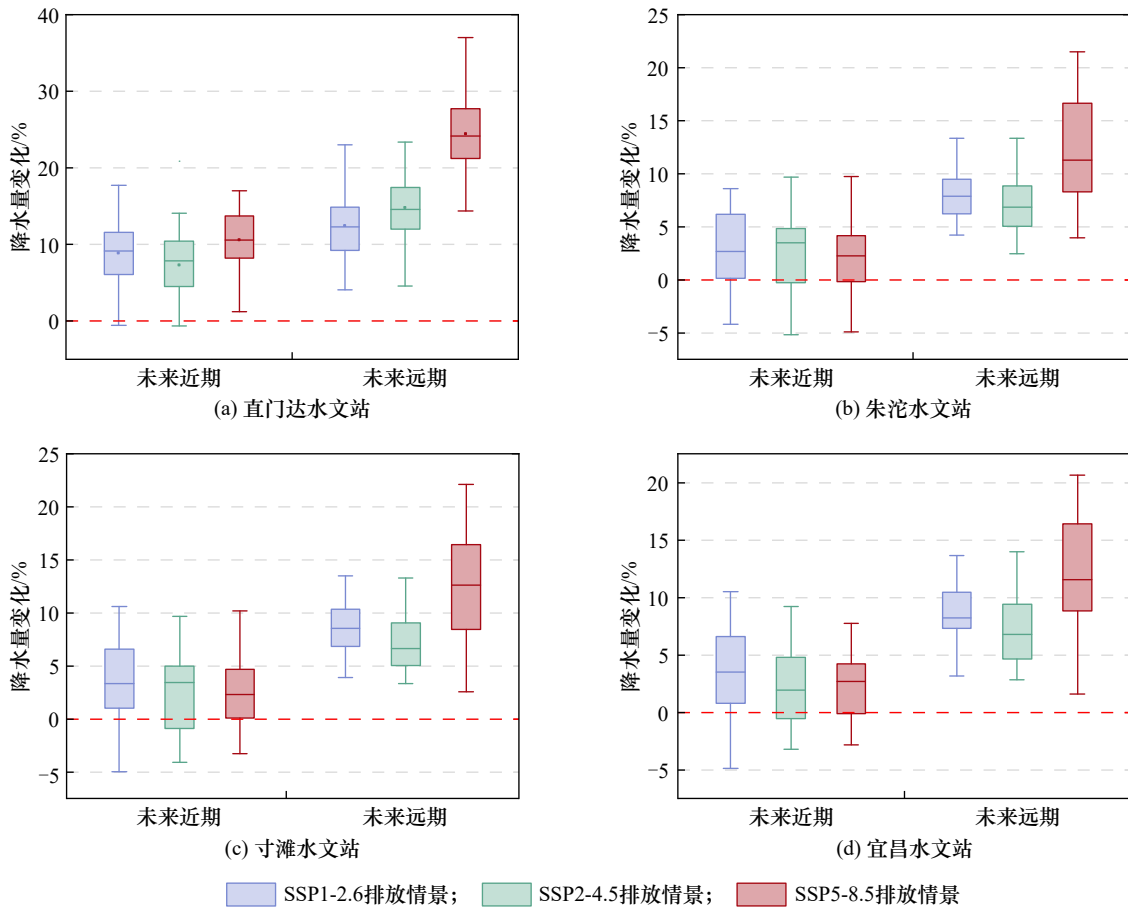


图6 不同排放情景下的长江上游流域未来降水变化

发现：朱沱、寸滩、宜昌3个水文站及以上流域的降水量增幅相差不大，在3种排放情景下近期增幅分别为3.09%~3.56%、2.56%~2.8%、2.19%~2.44%；远期增幅分别为8.06%~8.7%、7.05%~7.3%、12.22%~12.35%。而直门达水文站及以上流域的降水量增幅相对较大，在3种排放情景下的近期增幅分别为8.86%、7.29%、10.6%，远期增幅分别为12.45%、14.78%、24.42%。

结合未来径流量变化预测结果来看，2021—2090年，长江上游流域将出现气温升高、降水量增加、径流量增大的趋势，与已有研究^[19]得出的变化趋势一致。同时径流量显著增大的结果，与第二次青藏科考研究发现“亚洲水塔”冰川融水变化对长江流域年径流的影响^[30]一致。长江上游流域未来气温将显著升高，降水量和径流量将大幅增加，使得未来水文干旱指标SRI呈上升趋势，表征该流域的水文干旱状况趋于无旱化。因此，长江上游流域未来水文干旱状况趋于减弱的可能性较大。

五、结论与建议

(一) 研究结论

受全球气候变化影响，长江上游流域干旱事件愈发凸显，极端水文干旱事件出现频率和强度逐渐增加，导致整个长江流域农业减产、沿岸地区及中下游流域居民生活和工业生产中水资源与电力供应的显著短缺。针对长江上游流域历史水文干旱演变情势及未来发展趋势，研究结果表明：① 1961—2020年，朱沱、寸滩和宜昌3个水文站的径流呈不显著下降趋势，反映了长江上游干流区、岷沱江、嘉陵江及乌江各子流域的径流减少；仅直门达水文站的径流呈不显著上升趋势，反映了长江源区金沙江上段通天河区域的径流增加，这与气候变暖导致的融雪径流增加密切相关。朱沱、寸滩和宜昌3个水文站及其对应子流域的SRI均呈现不显著下降趋势，反映了长江上游干流区、岷沱江、嘉陵江及乌江各子流域的干旱状况将逐渐由无旱转为

轻旱，即呈微弱变干趋势；而直门达水文站及以上流域的SRI呈不显著增加趋势，反映了长江上游金沙江流域历史时期干旱状况整体上趋于无旱化。

② 2021—2090年，各水文站及以上流域在3种排放情景下的SRI均呈增大趋势，表明长江上游流域未来干旱程度将减弱，朝无旱化趋势发展。这可能与未来预估降水量、径流量大幅增加密切相关。未来长江上游流域的干旱特征表现为近期较强、远期较弱。

(二) 应对长江上游流域水文干旱的建议

1. 完善抗旱机制体制，科学编制城市干旱防御应急预案，加强培训和预演，切实提升应急管理能力和

优化抗旱领导组织体系，健全党政同责的地方抗旱工作责任制，完善应急、水利、气象及电力等部门联动协调机制。强化流域协作，健全长江流域抗旱减灾联合调度机制，优化长江上游大型水库群运用方式。坚持“预防为主、防抗救相结合”的原则，着力强化干旱风险预防和动态监管。完善干旱灾害应急预案体系，强化应急预案培训和预演，健全气象水文干旱预警预报与应急响应联动机制，完善极端干旱情况下的“熔断”启动机制，提升应急响应决策能力。加强应急救援队伍建设，提高干旱灾害综合救援能力。

2. 完善水利基础设施建设，提升抗旱能力

对标100年一遇防治要求，完善水利基础设施，有效衔接国土空间规划，及时修订长江流域干旱减灾规划，优化储蓄水设施体系布局。开展防旱减灾工程达标建设，加强水库、堤防等设施建设和维护，修复潜在隐患、提升设施的耐久性，确保结构稳固、功能完善，以便有效地调节和储存水资源，为流域内的农业灌溉、工业生产及居民生活提供稳定的水源保障。

3. 强化数字技术赋能，构建智慧防旱减灾体系

构建长江流域智慧防旱减灾体系。坚持先进与实用并重，建立“空天地”一体、空间全覆盖的气象水文干旱立体监测体系；打破信息壁垒，整合和共享跨部门、跨地区信息资源，夯实干旱灾害治理的数据基础，实现人—水—物信息的透彻感知。实现极端干旱、江河径流的精准预报，提升干旱早期预警能力；按照数字孪生流域建设标准，高水平构

建长江流域调度系统，实现预报调度一体化和防旱联防联控，满足复杂场景推演应用需求，提升流域生命线和重要保护对象安全保障能力。

4. 突出创新驱动，强化防旱减灾科技支撑

发挥长江流域的独特优势，打造具有国内乃至国际影响力的防旱减灾科技研发高地。加大研发投入，提高水文干旱和沿岸城市防旱减灾基础科学理论、关键技术、先进实用装备、政策制度创新与应用等方面的支持力度；建设长江流域干旱灾害科学观测试验基地和应急抢险实训基地，充分发挥现有科技创新平台及智库作用；推动长江流域防旱减灾科技的高水平、高层次对外交流合作。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 26, 2024; **Revised date:** December 18, 2024

Corresponding author: Wang Guoqing is a professor-level senior engineer from Nanjing Hydraulic Research Institute. His major research fields include climate change and hydrology and water resources. Email: gqwang@nhri.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2022YFC3202301); Chinese Academy of Engineering project “Healthy Water Balance Construction and High-Quality Land Protection and Utilization Strategy (Phase I)” (2022-PP-04), “Research on the Yangtze River Protection and the Countermeasures for Giving Play to the Benefits of Deep Waterway” (JS2022XZ06), “Research on Development and Security Strategies of the Yangtze River Basin under the New Situation” (2023-HYZD-02)

参考文献

- [1] 姜大膀, 王娜. IPCC AR6 报告解读: 水循环变化 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 699–704.
Jiang D B, Wang N. Water cycle changes: Interpretation of IPCC AR6 [J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 699–704.
- [2] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713–718.
Zhou B T, Qian J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6 [J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713–718.
- [3] 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 J, Chen J, She D X. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1143–1153.
- [4] 邹旭恺, 高荣, 陈鲜艳, 等. 2022 年长江流域夏伏旱监测评估 [J]. 中国防汛抗旱, 2022, 32(10): 12–16.
Zou X K, Gao R, Chen X Y, et al. Monitoring and assessment of summer drought in the Yangtze River basin in 2022 [J]. China Flood & Drought Management, 2022, 32(10): 12–16.
- [5] 李瞳, 王文, 蔡晓军. 2013 年长江中下游夏季高温干旱演变过程及环流异常成因简析 [J]. 气象科学, 2017, 37(4): 505–513.

- Li T, Wang W, Cai X J. Evolution and abnormal causes for high temperature and drought in the middle and lower reaches of Yangtze River in summer of 2013 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2017, 37(4): 505–513.
- [6] 李俊, 袁媛, 王遵娅, 等. 2019年长江中下游伏秋连旱演变特征 [J]. *气象*, 2020, 46(12): 1641–1650.
- Li J, Yuan Y, Wang Z Y, et al. Evolution characteristics of continuous drought in late summer and autumn in the middle and lower reaches of Yangtze River valley in 2019 [J]. *Meteorological Monthly*, 2020, 46(12): 1641–1650.
- [7] 梅梅, 高歌, 李莹, 等. 1961—2022年长江流域高温干旱复合极端事件变化特征 [J]. *人民长江*, 2023, 54(2): 12–20.
- Mei M, Gao G, Li Y, et al. Change characteristics in compound high temperature and drought extreme events over Yangtze River basin from 1961 to 2022 [J]. *Yangtze River*, 2023, 54(2): 12–20.
- [8] 胡玉厚, 邱忠恩, 陈明华. 长江上游水资源开发与中下游经济、社会、环境发展的关系 [J]. *人民长江*, 1993, 24(6): 12–16, 61–62.
- Hu Y H, Qiu Z E, Chen M H. Upper Yangtze water resources development and its impact on middle—Lower Yangtze economy, society and environment [J]. *Yangtze River*, 1993, 24(6): 12–16, 61–62.
- [9] Brleković T, Tadić L. Hydrological drought assessment in a small lowland catchment in Croatia [J]. *Hydrology*, 2022, 9(5): 79.
- [10] 杨肖丽, 崔周宇, 任立良, 等. 1966—2015年长江流域水文干旱时空演变归因 [J]. *水科学进展*, 2023, 34(3): 349–359.
- Yang X L, Cui Z Y, Ren L L, et al. Patterns and attributions of hydrological drought in the Yangtze River basin from 1966 to 2015 [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(3): 349–359.
- [11] Chen S D, Zhang L P, Liu X, et al. The use of SPEI and TVDI to assess temporal-spatial variations in drought conditions in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin, China [J]. *Advances in Meteorology*, 2018, 2018: 9362041.
- [12] 刘君龙, 袁喆, 许继军, 等. 长江流域气象干旱演变特征及未来变化趋势预估 [J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(10): 28–36.
- Liu J L, Yuan Z, Xu J J, et al. Meteorological drought evolution characteristics and future trends in the Yangtze River basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(10): 28–36.
- [13] 张午朝, 高冰, 马育军. 长江流域1961—2015年不同等级干旱时空变化分析 [J]. *人民长江*, 2019, 50(2): 53–57.
- Zhang W Z, Gao B, Ma Y J. Temporal and spatial variation characteristics of different drought grades from 1961 to 2015 in Yangtze River basin [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(2): 53–57.
- [14] 李帅, 曾凌, 张存杰, 等. 长江上游近120年来气象干旱和水文干旱时空变化关系及其传递特征 [J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(3): 263–277.
- Li S, Zeng L, Zhang C J, et al. Spatio-temporal variations and propagation from meteorological to hydrological drought in the Upper Yangtze River basin over last 120 years [J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(3): 263–277.
- [15] Sun F Y, Mejia A, Zeng P, et al. Projecting meteorological, hydrological and agricultural droughts for the Yangtze River basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 134076.
- [16] 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 B F, Xiao D L, Wan W, 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.
- [17] 郭海晋, 陈玺. 长江上游径流持续偏枯地区贡献度及成因研究 [J]. *水资源研究*, 2017, 6(4): 309–316.
- Guo H J, Chen X. Spatial contribution and cause analysis for runoff decreasing in the upstream of Yangtze River [J]. *Journal of Water Resources Research*, 2017, 6(4): 309–316.
- [18] 刘玉婷, 许继军, 刘思敏, 等. 长江上游地区生态需水量变化研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(8): 120–131.
- Liu Y T, Xu J J, Liu S M, et al. Study on change of eco-water demand in region of Upper Yangtze River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(8): 120–131.
- [19] 秦鹏程, 刘敏, 杜良敏, 等. 气候变化对长江上游径流影响预估 [J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(4): 405–415.
- Qin P C, Liu M, Du L M, et al. Climate change impacts on runoff in the Upper Yangtze River basin [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(4): 405–415.
- [20] 何奇芳. 长江上游地区气象水文过程时空演变及未来情景预估 [D]. 武汉: 华中科技大学(硕士学位论文), 2018.
- He Q F. Temporal and spatial evolution of meteorological and hydrological processes in the upper reaches of the Yangtze River and prediction of future scenarios [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (Master's thesis), 2018.
- [21] 舒章康, 李文鑫, 张建云, 等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 116–125.
- Shu Z K, Li W X, Zhang J Y, et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 116–125.
- [22] Luo N, Guo Y, Gao Z B, et al. Assessment of CMIP6 and CMIP5 model performance for extreme temperature in China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2020, 13(6): 589–597.
- [23] 王予, 李惠心, 王会军, 等. CMIP6全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与CMIP5的比较 [J]. *气象学报*, 2021, 79(3): 369–386.
- Wang Y, Li H X, Wang H J, et al. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2021, 79(3): 369–386.
- [24] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): L02405.
- [25] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(3): 80–86.
- Shi P, Zhan H J, Qu S M, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 80–86.
- [26] 吴桂场, 陈杰, 陈启会, 等. 金沙江流域近50年气象水文干旱时空变化特征 [J]. *人民长江*, 2019, 50(11): 84–90.
- Wu G Y, Chen J, Chen Q H, et al. Spatiotemporal variation of hydro-meteorological drought in Jinsha River basin in recent 50 years [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(11): 84–90.
- [27] 邵进, 李毅, 宋松柏. 标准化径流指数计算的新方法及其应用 [J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(6): 79–87.
- Shao J, Li Y, Song S B. New computing method for standardized

- runoff index and its application [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(6): 79–87.
- [28] Liang H X, Zhang D, Wang W S, et al. Evaluating future water security in the Upper Yangtze River basin under a changing environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 889: 164101.
- [29] 李昱, 席佳, 张弛, 等. 气候变化对澜湄流域气象水文干旱时空特性的影响 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 508–519.
- Li Y, Xi J, Zhang C, et al. Impact of climate change on the spatio-temporal characteristics of meteorological and hydrological drought over the Lancang–Mekong River basin [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 508–519.
- [30] Ju X P, Wang Y K, Wang D, et al. A time-varying drought identification and frequency analyzation method: A case study of Jinsha River basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 126864.
- [31] 赵建华, 王国庆, 张建云, 等. RCCC-WBM水量平衡模型在北方典型流域的适用性研究 [J]. *水文*, 2018, 38(2): 25–29, 14.
- Zhao J H, Wang G Q, Zhang J Y, et al. Suitability of RCCC-WBM model to typical river catchments in North China [J]. *Journal of China Hydrology*, 2018, 38(2): 25–29, 14.
- [32] 鞠琴, 高慧滨, 王国庆, 等. 基于能量平衡原理的潜在蒸散发模型构建 [J]. *水科学进展*, 2022, 33(5): 794–804.
- Ju Q, Gao H B, Wang G Q, et al. Modeling potential evapotranspiration based on energy balance [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 794–804.
- [33] 管晓祥, 刘悦, 张成凤, 等. RCCC-WBM模型区域适用性及参数敏感性分析 [J]. *水文*, 2020, 40(2): 55–61.
- Guan X X, Liu Y, Zhang C F, et al. Regional suitability and parameter sensitivity analysis of RCCC-WBM [J]. *Journal of China Hydrology*, 2020, 40(2): 55–61.
- [34] 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 D, Liang H X, He X C, 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.
- [35] 张强, 王港, 赵佳琪, 等. 亚洲水塔水循环和水资源研究进展与展望 [J]. *科学通报*, 2023, 68(36): 4982–4994.
- Zhang Q, Wang G, Zhao J Q, et al. Water circulation and water resources of Asia's water tower: The past and future [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(36): 4982–4994.
- [36] 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响 [J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1203–1209.
- Yao T D, Wu G J, Xu B Q, et al. Asian water tower change and its impacts [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1203–1209.