

基于CMIP6的气候变化下汉江流域气象干旱特征研究

王磊¹, 曾思栋², 阳林翰², 黄珊珊¹, 毛文耀¹, 夏军³

(1. 长江设计集团有限公司水利部水网工程与调度重点实验室, 湖北武汉 430010; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 3. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北武汉 430072)

摘要:为明晰气候变化下汉江流域气象干旱的演变特征,选取CMIP6中10个气候模式,考虑每个气候模式历史情景与4种共享社会经济路径(SSPs)情景,基于标准化降水蒸散指数分析了汉江流域气象干旱特征的变化规律。结果表明:未来汉江流域年降水量与潜在蒸散量最大差值逐渐增大,增长速率为0.92~2.40 mm/a,最小差值在不同SSPs情景下变化趋势不同,在SSP1-2.6和SSP3-7.0情景下逐渐缩小,而在SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下持续增大;历史情景下流域干旱累计时长表现为东西短、中部长,而未来流域中下游干旱累计时长减小,上游略有增大,且干旱在年内发生时间相对提前;未来低重现期干旱烈度不会发生明显变化,但极端干旱烈度将显著上升,100年一遇干旱烈度增长幅度为7.1%~25.6%。

关键词:气候变化;干旱特征;CMIP6;标准化降水蒸散指数;汉江流域

中图分类号:P426

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)05-0039-07

CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River Basin// WANG Lei¹, ZENG Sidong², YANG Linhan², HUANG Shanshan¹, MAO Wenyao¹, XIA Jun³(1. Key Laboratory of Water Grid Project and Regulation of Ministry of Water Resources, Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Corporation, Wuhan 430010, China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To clarify the impact of climate change on meteorological drought characteristics in the Hanjiang River Basin, 10 climate models of CMIP6 were selected, considering historical scenario and four shared socioeconomic pathways (SSPs). The standardized precipitation evapotranspiration index was calculated and variation of meteorological drought characteristics was studied. The results indicate that the maximum difference between the annual precipitation and potential evapotranspiration in the Hanjiang River Basin in the future gradually increases, with a growth rate ranging from 0.92 to 2.40 mm/a, while the minimum difference has different trends under different SSPs, with a relative decrease in SSP1-2.6 and SSP3-7.0 scenarios and a continuous increase in SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. In the historical scenario, the cumulative drought duration in a year is shorter in the east and west, but longer in the middle of the basin. In SSPs scenarios, the cumulative drought duration in a year is expected to decrease in the middle and lower reaches, but increase slightly in the upper reaches, and droughts are likely to occur earlier in a year. In the future, the intensity of drought with short return periods will not change significantly, but the intensity of extreme drought will increase substantially, with a growth rate of 7.1% to 25.6% for drought with a return period of 100 years.

Key words: climate change; drought characteristics; CMIP6; standardized precipitation evapotranspiration index; Hanjiang River Basin

干旱是对人类社会影响最为严重的气象灾害之一,其频率高、持续时间长、波及范围广,对全球范围内生态、经济和农业系统造成了严重的影响^[1],相关研究表明,全球范围内干旱的频率和强度正不断

增加^[2]。2022年长江流域遭遇了自1961年有完整气象观察记录以来最严重的特大干旱,对长江经济带社会发展产生了重大影响^[3]。汉江是长江第一大支流,汉江流域地处秦岭南部的北亚热带季风气

基金项目:中国工程院战略研究与咨询项目(2023-DFZD-44)

作者简介:王磊(1985—),男,高级工程师,硕士,主要从事水资源规划研究。E-mail:wanglei@cjwsjy.com.cn

通信作者:曾思栋(1987—),男,研究员,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zengsidong@cigit.ac.cn

候区,位于中国南北气候分界线,对气候和环境变化比较敏感^[4]。汉江在防洪、抗旱、供水和生态保护等方面,对国家社会经济发展和生态文明建设作出了突出贡献^[5]。作为南水北调中线工程的重要水源地以及鄂北水资源配置工程的关键区域,汉江流域的旱涝变化直接关系到京津冀地区和鄂北地区水资源供应^[6-7]。因此,深入分析汉江流域干旱的变化趋势,明确不同等级干旱时空格局,对于优化流域水资源配置、促进工农业绿色发展等具有极其重要的意义。

近年来,汉江流域的干旱问题引发了广泛关注,多项研究通过不同方法分析了汉江流域的干旱特征及变化趋势。例如:韩昊宇等^[8]利用 GRACE 卫星数据,采用水储量亏损方法建立了模型,反演了 2004—2014 年汉江流域的干旱,结果表明汉江流域 2006 年、2007 年、2011 年、2013 年发生了比较明显的干旱;冉鹏羽等^[9]基于 13 个站点 1960—2017 年逐月降水和平均气温资料,计算了不同时间尺度下的标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI),发现年尺度下轻旱和中旱发生频率为 5%~24%,汉江流域西部干旱发生更频繁;汪琳等^[10]通过分析 1961—2018 年格点降水资料,采用标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI) 定量分析了汉江流域的干旱趋势、频率及强度,结果表明,自 20 世纪 90 年代以来,汉江流域中部地区呈现干旱化趋势,而东部和西部地区则趋于湿润;谢南茜等^[11]同样采用 SPEI 分析了汉江流域 1982—2018 年干旱频次、强度和历时的时空特征,发现流域内年尺度和季尺度干旱均呈增多趋势,尤其是流域中部累计干旱强度较大,累计历时较长。除了针对历史时期干旱特征研究外,张奇谋等^[12]以典型浓度路径 (representative concentration pathways, RCP) 的 RCP2.6 和 RCP8.5 的日降雨预估数据为基础,计算了 2020—2059 年 SPI 的变化趋势,得到了汉江流域轻度和中度干旱相对减少,而严重干旱有所增多的结论;邓翠玲等^[13]计算了不同 RCP 下 2020—2099 年长江中下游区域 SPI 和 SPEI,发现整个汉江流域未来 SPI 增加幅度较大,认为该区域干旱趋势有所缓解。总体来看,汉江流域干旱问题研究已取得一定成果,但已有研究中选择的气候模式相对较少,且对不同等级干旱的分析需要深入。

全球耦合模式比较计划第 6 阶段 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6, CMIP6) 已经正式启动。CMIP6 的核心内容之一是共享社会经济路径 (shared socioeconomic pathways, SSPs),这些路径揭示了辐射强迫与社会经济发展的关系,并将

成为 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 最新报告的重要理论基础^[14-15]。与 CMIP5 相比,CMIP6 在模拟气候物理过程方面取得了显著进步,降低了降水、气温等要素模拟结果的不确定性。同时,CMIP6 模型显示出更大的升温速率和降水增幅,预示着未来极端干湿情况可能更为严重^[16-17]。因此,本文基于 CMIP6 的 10 种全球气候模型 (global climate models, GCMs),系统性解析汉江流域在气候变化下气象干旱的时空格局,量化干旱烈度的变化特征,研究成果可为汉江流域水旱灾害防治及流域水资源管理提供科学支撑。

1 研究区概况和数据来源

汉江发源于陕西省汉中市宁强县的蟠冢山,是长江最大的支流,全长 1 577 km,主要流经陕西、河南和湖北,在武汉市汉口镇汇入长江中游^[18]。汉江流域地处亚热带季风气候区,流域面积约 15.9 万 km²,处于 30°10'N~34°20'N、106°15'E~114°15'E 之间,是中国南北气候分界线。其气象条件复杂,流域年降水量起伏较大,年降水量为 700~1 800 mm,自西北向东南呈递增分布^[19]。受季风环流影响,夏秋两季降雨较为集中,7—9 月降水量占全年总量的约 70%。受气候波动和人类活动的双重影响,汉江流域降水呈现减少趋势,上游年径流量下降明显^[20]。此外,南水北调中线工程对流域中下游水质和水量产生了影响^[21],多因素共同造成了近年来汉江流域时常出现持续性干旱问题。汉江流域概况见图 1。

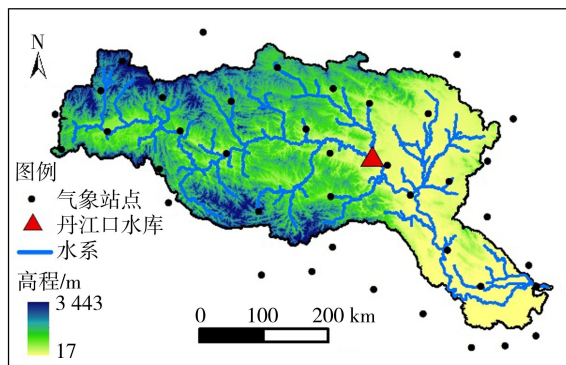


图 1 汉江流域概况

Fig. 1 Overview of the Hanjiang River Basin

本文数据包括气象台站观测数据和未来气候模式数据。气象台站数据选取了汉江流域及周边 44 个气象站点 1980—2020 年逐日气象资料,数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.gov.cn/>)。选择的未来全球气候模式资料为 CMIP6 的 10 个气候模式模拟的逐日降水、气温、风速和辐射数据等,包含了 1980—2014 年基准期和 2020—

2100 年的未来模拟数据。每个气候模式考虑了 4 种 SSPs, 分别为 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0、SSP5-8.5。

干旱对气温和降水较为敏感^[22], 为了减小气候模式数据的不确定性, 提升研究可靠性, 采用分位数映射法, 按照春、夏、秋、冬 4 个季节, 对未来气候模式的温度和降水数据进行校正, 并利用校正后的气象数据计算干旱指数。与未校正的数据相比, 校正后温度和降水的相对误差分别从 20% 和 30% 下降至 10% 和 15% 以内。气候模式数据校正具体方法及结果详见文献[23]。本文采用的气候模式相关信息见表 1。

表 1 气候模式相关信息

Table 1 Climate model information

国家或区域	模式名称	空间分辨率/(°)	
		经向	纬向
澳大利亚	ACCESS-CM2	1.8	1.2
挪威	NorESM2-LM	1.9	2.5
	NorESM2-MM	0.9	1.3
德国	MPI-ESM1-2-HR	0.9	0.9
	MPI-ESM1-2-LR	1.9	1.9
欧洲	EC-Earth3	1.125	1.125
	IPSL-CM6A-LR	1.26	2.5
日本	MIROC6	1.4	1.4
	MRI-ESM2-0	1.125	1.125
加拿大	CanESM5	2.8	2.8

2 研究方法

a. 潜在蒸散发。采用 Penman-Monteith 法计算潜在蒸散发 (potential evapotranspiration, PET), 该方法考虑了维持蒸发的热通量、转移水蒸气的机械动力、空气动力学阻抗和植物群落阻抗, 基于气象数据估算在特定条件下植被覆盖区域可能发生的水分蒸散量, 被广泛应用于流域蒸散发研究^[24]。

b. SPEI。SPEI 在 SPI 的基础上, 综合考虑了温度、降水和蒸散发的影响, 能够较为准确地反映干旱特征^[25]。通过计算流域逐月降水与 PET 差值的数据序列, 利用三参数 log-logistic 概率分布函数拟合差值数据序列的累积概率并正态化, 进而计算每个差值对应的 SPEI^[11,25]。为了更好地解析未来气候变化下干旱特征, 本文仅考虑中等及以上干旱, 中等干旱、严重干旱、极端干旱对应的 SPEI 值范围分别为 $>-1.5 \sim -1.0$ 、 $>-2.0 \sim -1.5$ 、 ≤ -2.0 。

c. 游程理论。游程理论是干旱研究中识别和描述干旱特征的重要方法, 通过分析干旱指数时间序列数据, 将其划分为正游程和负游程。正游程代表序列中超过阈值的数据部分, 而负游程表示数据低于该阈值的部分。干旱历时定义为干旱指数持续

低于既定阈值的时间长度。干旱烈度指在特定历时长内, 累积干旱指数绝对值的总和。干旱发生频率指在特定时间内干旱的发生次数。为了避免单月干旱对结果产生干扰, 本文提取了连续 2 月、SPEI 小于或等于 -1.0 的干旱事件, 用于定量分析气候变化情景下汉江流域干旱特征的变化。

3 结果与分析

3.1 气候变化下汉江流域气象干旱时空分布特征

汉江流域年降水量与 PET 差值的变化趋势如图 2 所示, 其中折线为相同 SSP 情景下 CMIP6 的 10 个气候模式集合平均值, 而面积填充部分则代表最大差值与最小差值的变化范围。历史时期与未来时期汉江流域年降水量与 PET 差值的平均值未出现明显变化, 两个时期的均值分别为 -27.0 mm 和 -62.0 mm。但在 4 种未来 SSPs 情景下, 汉江流域年降水量与 PET 的最大差值均呈现逐渐增大的趋势, 2020—2100 年, SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下年降水量与 PET 最大差值的增大速率分别为 0.92、1.00、2.40、2.11 mm/a。不同情景下年降水量与 PET 最小差值的变化趋势不同, SSP1-2.6 和 SSP3-7.0 情景下呈现减小的趋势, 减小速率分别为 0.40 mm/a 和 0.10 mm/a; SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下则相对增大, 增大速率分别为 1.21 mm/a 和 1.48 mm/a。年降水量与 PET 差值逐渐增大, 意味着未来情景下极端干旱发生的可能性将逐渐上升, 干旱的影响将随着年降水与 PET 差值的增大而增大。

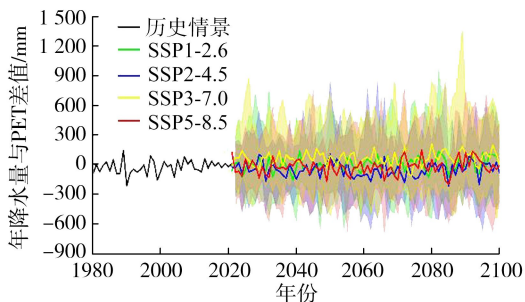


图 2 汉江流域年降水量与潜在蒸散量的差值
Fig. 2 Difference between annual precipitation and PET in the Hanjiang River Basin

为了统一未来气候模式数据的分辨率, 方便流域干旱管理, 综合考虑地形、土地利用类型和土壤类型等因素后, 以子流域作为基本计算单元。通过计算汉江流域不同区域的 SPEI, 并按照干旱等级划分标准, 研究了历史情景以及 4 种 SSPs 情景下汉江流域每年发生中等及以上干旱的累计时长, 结果见图 3。分析表明, 各情景下每年发生中等及以上

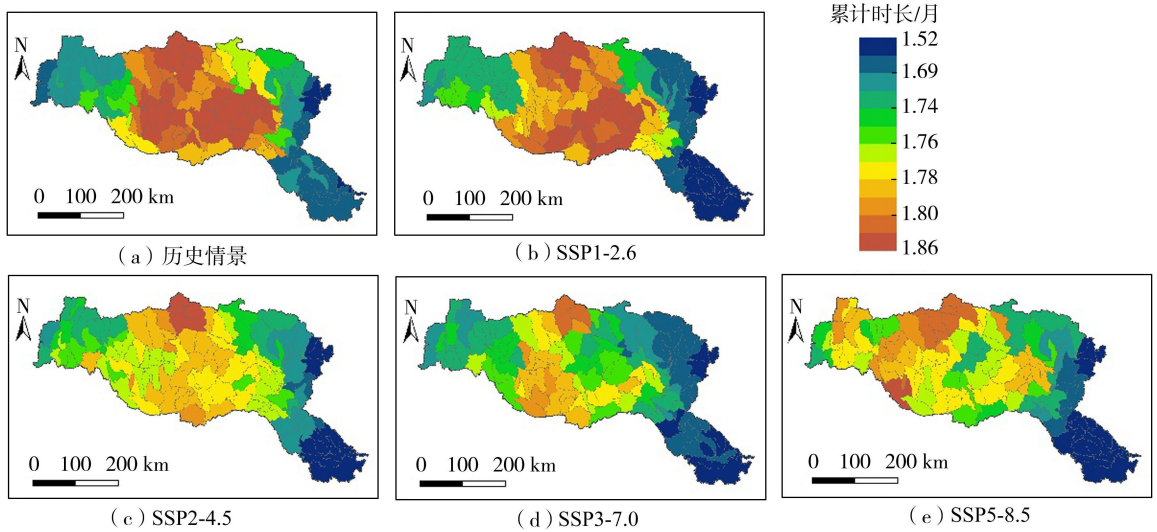


图3 不同情景下汉江流域每年发生中等及以上干旱累计时长的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of cumulative duration of moderate and above droughts in the Hanjiang River Basin in different scenarios

干旱累计时长的空间分布存在一定差异。历史情景下干旱累计时长在汉江流域呈现明显的空间异质性,整体呈现东西短、中部长分布特征,与汪琳等^[10]研究得出的汉江流域从上游至下游整体呈现湿润-干旱-湿润的变化趋势相符。历史情景下流域西北部和东部区域干旱累计时长相对较短,每年发生中等及以上干旱的累计时长为1.52~1.69月;流域中部中等及以上干旱累计时长较长,为1.81~1.86月,与陈燕飞等^[26]利用SPI计算得到汉江流域中等及以上干旱发生概率约为16%相符,反映了汉江流域内部降水分布不均以及不同地区蒸散量的差异。SSP1-2.6情景下年发生中等及以上干旱的累计时长与历史情景最为相似,该情景下丹江口以上流域西部以及汉江下游地区年干旱累计时长有所减少,为1.52~1.65月。SSP2-4.5、SSP3-7.0和SSP5-8.5情景下年发生中等及以上干旱的累计时长空间分布上均呈现出在流域中部和东部整体减小的趋势和在流域西北部轻微增加的趋势,尤其是SSP3-7.0情景下年干旱累计时长在流域中部减小最多,而SSP5-8.5情景下年干旱累计时长在流域北部增加

最多。与历史情景相比,3种未来情景下汉江流域中部年干旱累计时长从约1.85月降至约1.75月,降幅约5.4%;汉江流域西北部年干旱累计时长从约1.65月上升至约1.75月,增幅约6.1%。

图4给出了各情景下不同等级干旱逐月发生次数占比。图4(a)表明,2月历史情景下未发生中等干旱,但未来情景下发生了中等干旱,且SSP5-8.5情景下2月中等干旱占比较高,达到了42.9%;在3—11月,除9月外,各情景下中等干旱占比差别不显著,基本在17%~24%范围内波动,表明各情景下中等干旱发生频率未出现显著差别。图4(b)表明,2月SSP3-7.0情景下严重干旱占比较低,仅为4%;10月SSP3-7.0情景下未检测到严重干旱发生;11月各情景下均未检测到严重干旱发生。对于极端干旱(图4(c)),2—3月各情景下均未发生极端干旱;4月历史情景下有极少量极端干旱发生,每10年约为0.004次;5月未来情景下极端干旱占比明显高于历史情景;11月历史情景下极端干旱占比远高于未来情景。

图5对比了历史情景与未来情景下不同等级干

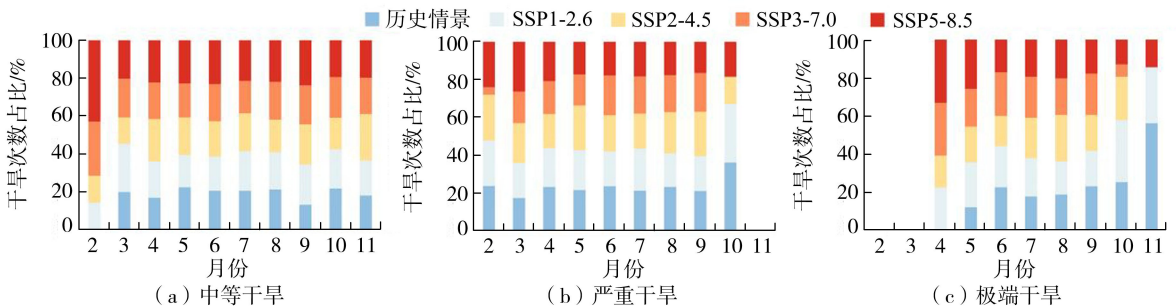


图4 各情景下不同等级干旱逐月发生次数占比

Fig. 4 Proportion of monthly occurrence times of drought events of different levels in each scenario

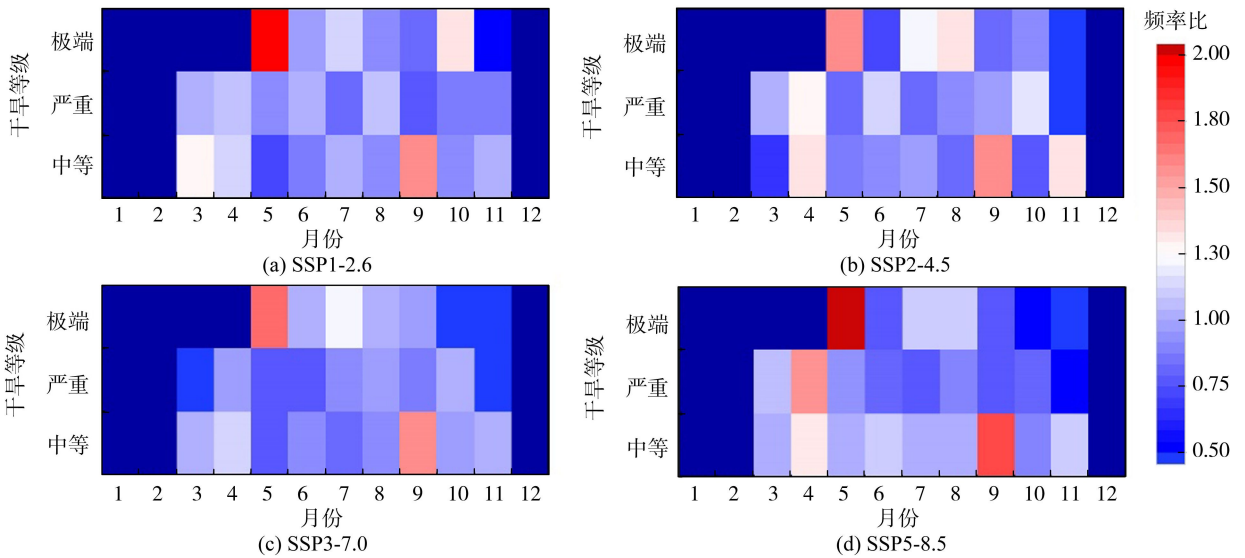


图5 未来情景与历史情景下不同等级干旱发生的频率比

Fig. 5 Ratio of frequency of drought events of different levels in future scenarios to historical scenario

旱逐月频率变化。与历史情景相比,5月 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP3-7.0 情景下中等干旱发生频率均有所下降,降幅为 13%~25%,SSP5-8.5 情景下则基本保持不变;4 种未来情景下 9 月中等干旱发生频率出现明显上升,增幅为 50%~70%。与历史情景相比,4 月 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下严重干旱发生的频率相对有所提升,增幅分别为 25%和 56%,而 SSP1-2.6、SSP2-4.5 情景下则基本保持不变;5—11 月 4 种未来情景下严重干旱发生的频率没有发生显著改变,变化幅度为-8%~9%。与历史情景相比,4 种未来情景下 5 月极端干旱发生的频率增加较为明显,增幅均值为 85%;10 月和 11 月则是未来情景下极端干旱发生频率下降较为明显的时期,发生极端干旱的频率分别下降了约 16%和 15%,上述结果表明,未来极端干旱在年内发生的时间将有所提前。

3.2 气候变化下汉江流域气象干旱烈度分析

通过游程理论,提取了历史与未来情景下持续 2 月以上中等及以上干旱的烈度,并利用核密度估计分析干旱烈度的概率分布,结果如图 6 所示。当干旱烈度为-3.2 时,历史情景下干旱发生概率达到峰值,为 0.39;4 种未来情景下干旱发生概率略有区别,SSP1-2.6 情景下的峰值概率最低,为 0.36,而 SSP5-8.5 情景下的峰值概率最高,为 0.43,概率峰值对应的干旱烈度为-3.4~-3.1。当干旱烈度为-5~-4 时,历史情景与 4 种未来情景下干旱发生概率基本保持相同变化趋势;当干旱烈度为-7~-5 时,SSP1-2.6 和 SSP5-8.5 情景下干旱发生概率出现明显下降,且 SSP1-2.6 情景下下降最为明显,概率降低了约 0.1;当干旱烈度小于-7.5 时,历史情景

下干旱发生概率开始低于未来情景下的发生概率,表明未来情景下,发生极端干旱的概率明显大于历史情景下的概率。

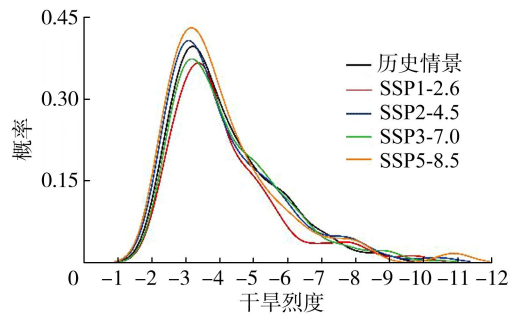


图6 不同情景下干旱烈度概率分布

Fig. 6 Probability distribution of drought severity in different scenarios

表 2 为不同重现期下干旱的烈度。不同情景下 2 年一遇、4 年一遇和 10 年一遇干旱烈度差别不明显,分别围绕-3.73、-4.93 和-6.33 波动,波动幅度不超过 3.5%。对于 100 年一遇的干旱,未来情景下干旱烈度显著上升,SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP3-7.0 和 SSP5-8.5 情景下的干旱烈度分别为-9.49、-9.67、-9.18 和-10.77,较历史情景下的干旱烈度分别增加了 10.7%、12.8%、7.1%和 25.6%,这与图 6 中分析结果相契合。由此可知,与历史情景相比,未

表 2 不同重现期下干旱烈度

Table 2 Drought severity under different return periods					
重现期/a	历史情景	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
2	-3.77	-3.72	-3.69	-3.84	-3.64
4	-4.98	-4.81	-5.02	-5.09	-4.79
10	-6.25	-6.20	-6.48	-6.39	-6.35
100	-8.57	-9.49	-9.67	-9.18	-10.77

来较低重现期干旱的烈度并未发生显著变化,但是对于极端干旱,汉江流域干旱烈度将显著上升,意味着未来极端干旱发生时造成的破坏性可能更强。

3.3 讨论

在研究汉江流域未来干旱特征时,张奇谋等^[12]基于 CMIP5 多模式预估发现,尽管轻度和中度干旱发生频率有所降低,但严重干旱发生频率却有所提高;邓翠玲等^[13]在 CMIP5 多模式基础上,对长江下游干旱特征分析结果表明,汉江流域未来 SPI 增加幅度较大,该区域干旱趋势整体上有所缓解。然而,在 RCP-6.0 和 RCP-8.5 情景下,SPEI 却显著减小,进一步反映出极端干旱增加的可能性。本文结果与前述研究一致,主要归因于 CMIP5 和 CMIP6 气候模式中气候要素的相似变化趋势^[14]。未来气候要素变化趋势还不确定,经过校正后的气温及降雨数据存在一定偏差,对于汉江流域极端干旱的研究结果可能造成影响。因此,有必要采用不同气候模式集合结果研究气候变化下汉江流域干旱特征的变化趋势,降低研究结果的不确定性,提升可靠性。

汉江流域不仅是南水北调中线工程的重要水源地,也是鄂北水资源配置工程的关键区域。现有研究表明汉江流域 7—9 月出现极端干旱概率较大^[27],本文研究得出汉江流域干旱将会有所提前,特别是极端干旱时间将提前至 4—5 月,而春季是许多作物生长的关键时期,干旱的提前可能导致农作物在播种期和生长期水分不足,对汉江流域农业生产、生态系统等带来显著影响。当极端干旱发生在 4—5 月时,如何保证南水北调中线工程引调水量不产生大幅波动,是需要深入研究的问题。张璐等^[28]对南水北调中线水源区和受水区干旱遭遇风险进行评估,认为水源区和受水区发生较严重干旱的风险可能增大。因此,采取适应性管理措施至关重要,如开展南水北调中线工程优化调度,建立更灵活的水资源管理策略,提高水利设施适应能力,提高灌溉效率,开发抗旱作物品种,做好应对极端干旱的预警预案,以减轻未来干旱造成的不利影响。

4 结论

a. 与历史情景相比,未来汉江流域年降水量与 PET 最大差值均呈现逐渐增大的变化趋势,4 种未来情景下年降水量与 PET 差值的增加速率为 0.92~2.40 mm/a;最小差值的变化趋势不同,SSP1-2.6 和 SSP3-7.0 情景下相对缩小,而 SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下持续增大。

b. 历史情景下汉江流域干旱累计时长空间分布表现为东西短、中部长特点,未来情景下汉江流域中游及下游干旱累计时长相对减小,而上游地区

呈现微增的变化趋势。未来情景下 9 月中等干旱发生频率较历史情景下明显上升;4 月极端干旱发生频率上升,10 月和 11 月下降,总体表现为中等及以上干旱在年内发生时间相对提前。

c. 与历史情景相比,未来汉江流域较低重现期干旱烈度未发生显著变化,但极端干旱烈度将显著上升,100 年一遇干旱烈度增长幅度为 7.1%~25.6%。

参考文献:

- [1] WEI Jia, WANG Weiguang, HUANG Yin, et al. Drought variability and its connection with large-scale atmospheric circulations in Haihe River Basin[J]. Water Science and Engineering, 2021, 14(1): 1-16.
- [2] 范倩倩,赵安周,张安兵,等. 1965—2015 年海河流域干旱时空变化特征分析[J]. 农业现代化研究, 2019, 40(3): 507-517. (FAN Qianqian, ZHAO Anzhou, ZHANG Anbing, et al. Characteristics of spatiotemporal variation of drought in the Haihe River Basin from 1965 to 2015[J]. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(3): 507-517. (in Chinese))
- [3] 郝增超,张璇,郝芳华,等. 2022 年夏季长江流域复合高温干旱事件的影响及应对[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 46-52. (HAO Zengchao, ZHANG Xuan, HAO Fanghua, et al. Impacts and coping strategies of compound hot extremes and droughts during summer of 2022 in the Yangtze River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 46-52. (in Chinese))
- [4] 秦大河,翟盘茂. 中国气候与生态环境演变: 2021(第一卷:科学基础)[M]. 北京:科学出版社, 2021.
- [5] 朱烨,李杰,潘红忠. 南水北调中线调水对汉江中下游水文情势的影响[J]. 人民长江, 2019, 50(1): 79-83. (ZHU Ye, LI Jie, PAN Hongzhong. Influence of middle route project of South-to-North Water Diversion on hydrological regime in middle and lower reaches of Hanjiang River[J]. Yangtze River, 2019, 50(1): 79-83. (in Chinese))
- [6] WANG Youxin, PENG Tao, HE Yanhu, et al. Attribution analysis of non-stationary hydrological drought using the GAMLSS framework and an improved SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2023, 627: 130420.
- [7] MA Feng, YE Aizhong, DUAN Qingyun. Seasonal drought ensemble predictions based on multiple climate models in the upper Han River Basin, China[J]. Climate Dynamics, 2019, 53(12): 7447-7460.
- [8] 韩昊宇,丁文峰,许文涛,等. 基于 GRACE 卫星数据的汉江流域旱情反演及影响因素定量分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(11): 44-51. (HAN Haoyu, DING Wenfeng, XU Wentao, et al. Inversion of drought events and quantitative analysis of influencing factors in Hanjiang River Basin based on GRACE satellite data[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38

- (11): 44-51. (in Chinese))
- [9] 冉鹏羽,赵强,熊丹,等. 1960—2017年汉江流域气象干旱时空特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(3): 712-720. (RAN Pengyu, ZHAO Qiang, XIONG Dan, et al. Spatial and temporal characteristics of meteorological drought in the Hanjiang River Basin from 1960 to 2017 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(3): 712-720. (in Chinese))
- [10] 汪琳,舒章康,王国庆,等. 汉江流域 1961—2018 年多尺度气象干旱时空演变特征[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1649-1658. (WANG Lin, SHU Zhangkang, WANG Guoqing, et al. Spatial and temporal evolution of multi-scale meteorological drought in Hanjiang River Basin from 1961 to 2018 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(7): 1649-1658. (in Chinese))
- [11] 谢南茜,熊立华,李家誉,等. 基于 SPEI 的长江流域气象干旱时空特征分析[J]. 水电与新能源, 2023, 37(6): 30-35. (XIE Nanxi, XIONG Lihua, LI Jiayu, et al. On the spatio-temporal characteristics of meteorological drought in Yangtze River Basin based on SPEI [J]. Hydropower and New Energy, 2023, 37(6): 30-35. (in Chinese))
- [12] 张奇谋,陈思,陈松生,等. 不同 RCP 情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1470-1480. (ZHANG Qimou, CHEN Si, CHEN Songsheng, et al. Research on projections of meteorological drought in the Hanjiang River Basin under different RCPs scenarios [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(6): 1470-1480. (in Chinese))
- [13] 邓翠玲,余敦先,邓瑶,等. 基于多模式情景的长江中下游未来气象干旱时空演变特征分析[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(6): 9-17. (DENG Cuiling, SHE Dunxian, DENG Yao, et al. Multi-model projection of meteorological drought characteristics under different scenarios in the middle and lower reaches of Yangtze River Basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(6): 9-17. (in Chinese))
- [14] 周天军,邹立维,陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 445-456. (ZHOU Tianjun, ZOU Liwei, CHEN Xiaolong. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) [J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 445-456. (in Chinese))
- [15] ZHAO Ying, WENG Zhaohui, CHEN Hua, et al. Analysis of the evolution of drought, flood, and drought-flood abrupt alternation events under climate change using the daily SWAP index [J]. Water, 2020, 12(7): 1969.
- [16] 王晨鹏,黄萌田,翟盘茂. IPCC AR6 报告关于不同类型干旱变化研究的新进展与启示[J]. 气象学报, 2022, 80(1): 168-175. (WANG Chenpeng, HUANG Mengtian, ZHAI Panmao. New progress and enlightenment on different types of drought changes from IPCC sixth assessment report [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2022, 80(1): 168-175. (in Chinese))
- [17] HAMED M M, NASHWAN M S, SHAHID S, et al. Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: a comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia [J]. Atmospheric Research, 2022, 265: 105927.
- [18] 安彬,肖薇薇. 汉江上游流域潜在蒸散量敏感性分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 59-65. (AN Bin, XIAO Weiwei. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration in upper Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 59-65. (in Chinese))
- [19] LIU Hai, WU Jing, XU Yanqing. Investigating the effects of precipitation on drought in the Hanjiang River Basin using SPI [J]. Journal of Water and Climate Change, 2019, 10(4): 977-992.
- [20] JIANG Weixia, WANG Lunche, ZHANG Ming, et al. Analysis of drought events and their impacts on vegetation productivity based on the integrated surface drought index in the Hanjiang River Basin, China [J]. Atmospheric Research, 2021, 254: 105536.
- [21] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 14-19. (ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 14-19. (in Chinese))
- [22] 杨少康,刘冀,张特,等. 汉江上游气象-水文干旱特征变量响应概率研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 143-151. (YANG Shaokang, LIU Ji, ZHANG Te, et al. Study on meteorological-hydrological drought characteristic variable response probability in upper reaches of the Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 143-151. (in Chinese))
- [23] 吴健,夏军,曾思栋,等. CMIP6 全球气候模式对长江流域气候变化的模拟评估与未来预估[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(1): 137-150. (WU Jian, XIA Jun, ZENG Sidong, et al. Evaluation of the performance of CMIP6 models and future changes over the Yangtze River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(1): 137-150. (in Chinese))

- [J]. 水力发电, 2022, 48(7): 13-15. (LYU Xiaoshuai, SHEN Xiaoqin. Analysis for flood-tide encounter law in Jiao (Ling) Jiang River Basin[J]. Water Power, 2022, 48(7): 13-15. (in Chinese))
- [13] 杨莉玲, 杨芳, 余顺超, 等. 感潮河网区风暴潮洪水风险模拟研究: 以中顺大围为例[J]. 人民珠江, 2018, 39(8): 4-8. (YANG Liling, YANG Fang, YU Shunchao, et al. Study on simulation of storm surge flood risk in tidal river network area: take the Zhongshun protection zone as an example [J]. Pearl River, 2018, 39(8): 4-8. (in Chinese))
- [14] ZAHURA F T, GOODALL J L, SADLER J M, et al. Training machine learning surrogate models from a high-fidelity physics-based model: application for real-time street-scale flood prediction in an urban coastal community [J]. Water Resources Research, 2020, 56(10): e2019WR027038. .
- [15] BOMERS A, VAN DER MEULEN B, SCHIELEN R M J, et al. Historic flood reconstruction with the use of an artificial neural network [J]. Water Resources Research, 2019, 55(11): 9673-9688.
- [16] ZHOU Yanlai, CUI Zhen, LIN Kangling, et al. Short-term flood probability density forecasting using a conceptual hydrological model with machine learning techniques [J]. Journal of Hydrology, 2022, 604: 127255.
- [17] AMINI A, DOLATSHAHI M, KERACHIAN R. Adaptive precipitation nowcasting using deep learning and ensemble modeling [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128197.
- [18] LI Fangfang, WANG Zhiyu, QIU Jun. Long-term streamflow forecasting using artificial neural network based on preprocessing technique [J]. Journal of Forecasting, 2019, 38(3): 192-206.
- [19] 徐振山, 王苏东, 丁宏伟, 等. 基于数值模拟的澄通感潮河段水源地预警站设置研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 61-69. (XU Zhenshan, WANG Sudong, DING Hongwei, et al. Study on setup of early warning station in Chengtong tidal reach based on numerical simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(4): 61-69. (in Chinese))
- [20] 沈红丽, 高成. 基于 MIKE11 和 AHP 法的感潮河段防洪潮方案研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 36-41. (SHEN Hongli, GAO Cheng. Research on flood tide control planning of tidal river based on MIKE11 model and AHP [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(1): 36-41. (in Chinese))
- [21] 陈珺, 黄燕华, 洪朋, 等. 基于机器学习模型的河道水位预测 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 9-14. (CHEN Jun, HUANG Yanhua, HONG Peng, et al. Prediction of river water level based on machine learning model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 9-14. (in Chinese))
- [22] 伍宁. 一维圣维南方程组在非恒定流计算中的应用 [J]. 人民长江, 2001, 32(11): 16-18. (WU Ning. Application of one dimensional Saint-Venant equations in non-constant flow [J]. Yangtze River, 2001, 32(11): 16-18. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-12-12 编辑: 施业)

(上接第 45 页)

- [24] 周金龙, 董新光, 陈文娟, 等. 应用彭曼-蒙特斯公式计算天山北坡平原区水面蒸发量 [J]. 新疆农业大学学报, 2002, 25(4): 35-38. (ZHOU Jinlong, DONG Xinguang, CHEN Wenjuan, et al. Calculation of water surface evaporation in the plain area of the northern slope Tianshan Mountains by Penman-Monteith formula [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2002, 25(4): 35-38. (in Chinese))
- [25] 曹永强, 李可欣, 任博, 等. 基于 SPEI 的辽宁省气象干旱特征及驱动因素分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 28-36. (CAO Yongqiang, LI Kexin, REN Bo, et al. Characteristics and driving factors analysis of meteorological drought in Liaoning Province based on SPEI [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 28-36. (in Chinese))
- [26] 陈燕飞, 熊刚, 刘伟. 基于标准化降水指数的汉江流域干旱时空分布特征 [J]. 中国农村水利水电, 2016(4): 82-88. (CHEN Yanfei, XIONG Gang, LIU Wei. Drought temporal and spatial distribution of Hanjiang River Basin based on the standardized precipitation index [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(4): 82-88. (in Chinese))
- [27] 杨金虎, 张强, 王劲松, 等. 近 60 年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识 [J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1333-1340. (YANG Jinhua, ZHANG Qiang, WANG Jinsong, et al. Extreme and persistent feature of drought and flood of southwest China in past 60 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(10): 1333-1340. (in Chinese))
- [28] 张璐, 卢一杰, 张增信, 等. 南水北调中线水源区和受水区干旱遭遇风险评估 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1148-1157. (ZHANG Lu, LU Yijie, ZHANG Zengxin, et al. Risk assessment of drought in the source and receiving areas of the middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1148-1157. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-01-25 编辑: 施业)