

嘉陵江流域气象干旱向水文干旱传播特征研究

杜 鸿¹, 曾思栋², 韦晓福¹, 刘豪杰¹, 夏 军³

(1. 中南民族大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430074; 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: 基于标准化降水指数和标准化径流指数, 利用游程理论、皮尔逊相关分析、Copula 函数等方法, 探究了嘉陵江流域季节尺度和年尺度的气象干旱、水文干旱的演变以及气象干旱向水文干旱传播的特征。结果表明: 与气象干旱相比, 1960—2018 年嘉陵江流域水文干旱加剧趋势更加显著, 流域内气象干旱发生的频率高于水文干旱, 但水文干旱平均干旱历时和干旱烈度高于气象干旱; 气象干旱向水文干旱传播存在滞后性, 夏季、秋季比春季、冬季的干旱传播时间短, 多年平均降水量大的地区比多年平均降水量小的地区干旱传播时间短; 植被季节性耗水使夏季和秋季气象干旱向水文干旱传播概率更大, 由于农业灌溉和水库调蓄的影响, 嘉陵江流域灌区的气象干旱更容易引发水文干旱。

关键词: 气象干旱; 水文干旱; 干旱传播; Copula 函数; 嘉陵江流域

中图分类号: P429 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2025)03-0134-10

Study on propagation characteristics from meteorological drought to hydrological drought in the Jialing River Basin// DU Hong¹, ZENG Sidong², WEI Xiaofu¹, LIU Haojie¹, XIA Jun³ (1. College of Resources and Environment, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, 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: Based on standardized precipitation index (SPI) and standardized runoff index (SRI), the variations of meteorological and hydrological droughts as well as the propagation characteristics from meteorological drought to hydrological drought at different time scales in the Jialing River Basin were studied using run theory, Pearson correlation analysis, Copula function and other methods. The results indicated that compared with meteorological drought, the intensifying trend of hydrological drought in the Jialing River Basin from 1960 to 2018 was more significant. The frequency of meteorological drought was higher than that of hydrological drought, while the average drought duration and drought intensity of hydrological drought were longer and more severe than those of meteorological drought. There was a lag in the propagation from meteorological drought to hydrological drought. The drought propagation time in summer and autumn was shorter than that in spring and winter. Meanwhile, it was shorter in areas with higher average multi-year precipitation than that in areas with lower average multi-year precipitation. Seasonal water consumption of vegetation led to the greater propagation probability from meteorological drought to hydrological drought in summer and autumn. Due to the influence of agricultural irrigation and reservoir regulation, meteorological drought in the irrigation area of the Jialing River Basin was more likely to cause hydrological drought.

Key words: meteorological drought; hydrological drought; drought propagation; Copula function; the Jialing River Basin

在全球气候变化和人类活动影响加剧的大背景下, 干旱事件发生的频率与强度均呈现增加趋势, 给自然生态系统和人类社会带来了严重影响。干旱一般可分为气象干旱、水文干旱、农业干旱以及社会经

济干旱, 并且不同类型的干旱之间存在复杂的联系, 其中水分缺失信号在不同类型干旱间的传递称为干旱传播^[1]。研究普遍认为气象干旱是其他类型干旱的源头, 在干旱灾害传播链中起关键作用^[2]。当

基金项目: 湖北省自然科学基金项目 (2023AFB782); 中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金项目 (CZQ24028); 中国科学院青年创新促进会项目 (2021385); 中南民族大学创新创业训练计划项目 (S202410524095)
作者简介: 杜鸿 (1988—), 女, 讲师, 博士, 主要从事气候变化与水旱灾害研究。E-mail: duhong@scuec.edu.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

气象干旱持续一段时间并扩展到一定范围后,区域河川径流减少,河流与湖泊的水位下降,形成水文干旱,威胁社会供水安全,影响社会经济发展^[3-4]。因此,研究气象干旱向水文干旱传播的特征对于深入理解干旱的发生发展机制、开展水文干旱的预警、减少水文干旱造成的社会经济损失具有重要的意义。

目前,国内外学者对气象干旱、水文干旱的变化特征与传播规律等方面进行了相关研究。气象干旱多采用标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)、标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI) 等表征。水文干旱多采用标准化径流指数 (standardized runoff index, SRI) 来表征。郑丽虹等^[5] 比较了黄河流域气象干旱和水文干旱的时空特征,选取典型干旱事件分析了气象干旱向水文干旱的传递关系。石朋等^[6] 利用皮尔逊相关分析确定干旱响应时间,采用游程理论和数学函数建立干旱传播模型,量化了西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征。杨少康等^[7] 构建了基于 Copula 函数耦合贝叶斯网络概率模型的气象干旱向水文干旱传播特征变量响应概率模型,研究了汉江上游气象干旱向水文干旱传播特征。Dehghannik 等^[8] 基于游程理论和回归分析方法研究 Karoon 和 Maroon 流域的气象干旱向水文干旱传播特征,发现水文干旱对气象干旱的响应时间约为 7 月。Huang 等^[9-10] 的研究表明由于不同季节的降水量与蒸发量不同,气象干旱向水文干旱的传播时间具有季节性。刘永佳等^[11] 计算了不同季节气象干旱向水文干旱的传播时间,发现无定河流域春秋季节传播时间变化不明显,夏冬季显著加快。同时,由于不同流域或区域的水文气象特征和调蓄能力的区别,气象干旱到水文干旱的传播存在较大差异。气象干旱向水文干旱传播的过程和机理尚未完全探明,因此需要进一步深入研究不同季节、不同流域条件下气象干旱向水文干旱传播的特征和规律。

嘉陵江是长江流域面积最大的支流,近年来该流域整体偏旱,旱灾发生频率增加,2001、2006、2011、2022 年均发生严重干旱^[12]。尤其是 2022 年嘉陵江流域持续高温加之连续无雨,径流量减少,水位下降,气象干旱引发严重的水文干旱,受灾严重,造成巨大的经济损失^[13]。以往对嘉陵江流域干旱的研究主要集中在气象、水文干旱以及旱涝灾害的变化特征^[14-16],在干旱传播规律(如传播时间、传播概率等)方面较少。鉴于此,本文利用嘉陵江流域不同时间尺度的 SPI 和 SRI 分别表征气象干旱和水文干旱,探究气象干旱向水文干旱的传播时间和传

播概率特征,以期为嘉陵江流域干旱预警及干旱防治提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

嘉陵江发源于陕西省凤县秦岭南麓,位于 $29^{\circ}20'N \sim 34^{\circ}30'N$ 、 $102^{\circ}45'E \sim 108^{\circ}55'E$,流域总面积约 16 万 km^2 ,是长江流域面积最大的子流域^[16]。流域气候类型以亚热带湿润季风气候为主,四季分明,多年平均气温约为 10°C ,年最高气温为 19.4°C ,年最低气温为 4.3°C 。流域多年平均降水量为 921.4 mm,时空分配不均匀,整体上由西北向东南递增^[17]。嘉陵江流域概况及主要气象、水文站点如图 1 所示。

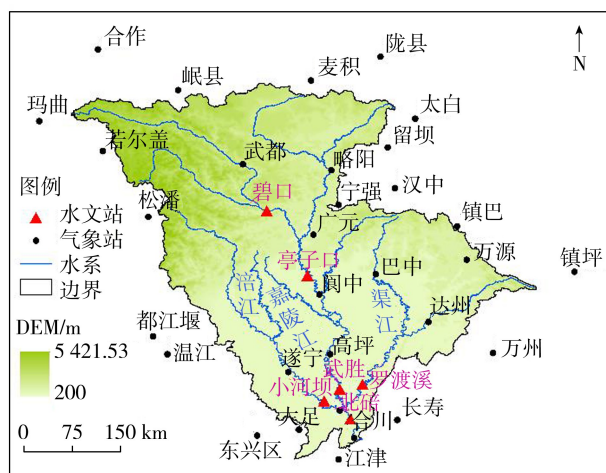


图 1 嘉陵江流域概况及主要气象站、水文站

Fig. 1 Overview and main meteorological and hydrological stations of the Jialing River Basin

1.2 数据来源

本文采用嘉陵江流域 31 个气象站 1960—2018 年的逐月降水资料,来源于中国气象数据网 (<https://data.cma.cn/>),各气象站的降水数据均通过一致性检验。采用嘉陵江流域 6 个水文站(图 1) 1960—2018 年的逐月径流资料,可分别反映嘉陵江干流上、中、下游及支流涪江、渠江的水文特征。采用泰森多边形法计算各水文站控制面积的逐月面平均降水量。

2 研究方法

2.1 干旱事件识别

本文选择 3 月、12 月时间尺度的干旱指数分别表征季节尺度和年尺度的干旱情况。SPI 仅以月降水量数据作为输入,不需要其他数据,且计算原理简单,不同时间尺度的 SPI 能够表征不同时期的干旱

情况^[18],广泛应用于气象干旱的评价,详细计算原理及过程参见文献[4]。SRI 计算方法与 SPI 类似,用月径流数据代替月降水数据进行相应计算,用来评价水文干旱。根据气象上的规定划分季节:春季为3—5月、夏季为6—8月、秋季为9—11月、冬季为12月至次年2月。根据 GB/T 20481—2017《气象干旱等级》的规定,基于 SPI、SRI 两种干旱指数值划分干旱等级:无旱(>-0.5)、轻旱($>-1.0 \sim -0.5$)、中旱($>-1.5 \sim -1.0$)、重旱($>-2.0 \sim -1.5$)、特旱(≤ -2.0)。

采用游程理论方法^[19]识别干旱事件并提取干旱特征,包括干旱历时和干旱烈度。干旱事件是干旱指数小于干旱阈值的过程,本文识别干旱事件的阈值为 -0.5 。图2为游程理论识别干旱事件的示意图,图中 E_1 、 E_2 、 E_3 为3次干旱事件。干旱历时 D 为一次干旱事件的持续时间;干旱烈度 S 为一次干旱事件的干旱指数与干旱阈值之差的累积和。

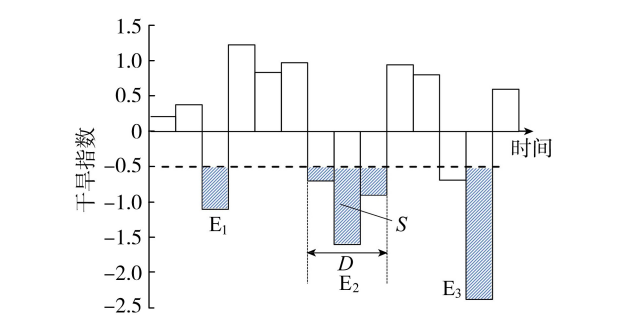


图2 游程理论识别干旱事件的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of identifying drought events using run theory

2.2 干旱演变特征诊断

采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检验、Pettitt 突变检验、Morlet 小波分析方法对嘉陵江流域季节尺度、年尺度的气象干旱和水文干旱进行趋势、突变及周期特征诊断分析,研究流域气象干旱和水文干旱的时间变化特征。M-K 检验作为一种非参数统计方法,由于其不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,广泛应用于分析水文气象时间序列变化趋势分析^[20],本文选用 0.05 的显著性水平检验趋势的显著性。Pettitt 突变检验是一种检验时间序列数据中是否存在突变点的非参数统计方法,其原理是将随机变量序列任意划分为两个均值相等的子序列,若子序列随机变量的分布函数不相同,则认为在划分处发生了突变^[21],本文采用的突变检验的显著性水平为 0.05。Morlet 小波分析是在傅里叶分析的基础上发展起来的一种多分辨率的时频局部化分析方法,能够较准确地揭示信号序列中频率结构

随时间尺度的变化规律,可应用于气象和水文序列的周期性规律研究^[22]。

2.3 皮尔逊相关分析

利用皮尔逊相关分析法分析季节尺度和年尺度的气象干旱到水文干旱的传播时间,即计算不同时间尺度 SPI (记作 $SPI-n$, 其中 n 表示时间尺度, $n = 1, 2, \dots, 12$ 月) 与 1 月时间尺度的 SRI-1 的皮尔逊相关系数,最大的相关系数对应的 SPI 时间尺度即为从气象干旱到水文干旱最可能的传播时间^[6]。某季节的干旱传播时间取该季节对应的 3 个月份的干旱传播时间的均值,某年的干旱传播时间取 12 个月份干旱传播时间的均值^[18]。皮尔逊相关系数取值范围为 $-1 \sim 1$,绝对值越高,表明关联性越强^[23]。

2.4 Copula 函数

Copula 函数是定义在 $[0, 1]$ 上均匀分布的联合分布函数^[1],基于 Copula 函数构造 SPI 和 SRI 的联合分布函数,表达式为

$$F(U, V) = P(U < u, V < v) = C[f_U(u), f_V(v)] \quad (1)$$

式中: $F(\cdot)$ 为联合分布函数; U 、 V 分别为 SPI、SRI 变量; u 、 v 分别为 SPI、SRI 变量的阈值; $C(\cdot)$ 为 Copula 函数; $f_U(U)$ 、 $f_V(V)$ 分别为 SPI、SRI 变量序列的边际分布。

在建立联合分布前需要确定 SPI 和 SRI 变量序列的边际分布,目前常用的边际分布有伽马分布、正态分布、指数分布、广义帕累托分布和广义极值分布,其中正态分布和广义极值分布的变量可正可负,其余 3 种均要求正随机变量,因此本文选用正态分布和广义极值分布拟合 SPI 和 SRI 变量序列^[23]。进一步采用阿基米德 Copula 函数簇中的 Clayton-Copula、Gumbel-Copula 及 Frank-Copula 3 种联合分布函数构建气象干旱向水文干旱传播模型,使用赤池信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 和普通最小二乘 (ordinary least squares, OLS) 准则来选择拟合最优的 Copula 函数^[24]。

基于优选的 Copula 函数建立气象干旱向水文干旱传播模型,计算不同气象干旱条件下引发不同等级水文干旱的条件概率。在气象干旱轻旱、中旱或重旱条件下,引发水文干旱轻旱、中旱或重旱的条件概率见式(2);在气象干旱轻旱、中旱或重旱条件下,引发水文干旱特旱的条件概率见式(3);在气象干旱特旱条件下,引发水文干旱轻旱、中旱或重旱的条件概率见式(4);在气象干旱特旱条件下,引发水文干旱特旱的条件概率见式(5)。

$$P(v_i < V \leq v_{i+1} | u_j < U \leq u_{j+1}) = \frac{C[f_U(u_{j+1}), f_V(v_{i+1})] + C[f_U(u_j), f_V(v_i)]}{f_U(u_{j+1}) - f_U(u_j)} - \frac{C[f_U(u_{j+1}), f_V(v_i)] + C[f_U(u_j), f_V(v_{i+1})]}{f_U(u_{j+1}) - f_U(u_j)} \quad (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3) \tag{2}$$

$$P(V \leq -2 | u_j < U \leq u_{j+1}) = \frac{C[f_U(u_{j+1}), f_V(-2)] + C[f_U(u_j), f_V(-2)]}{f_U(u_{j+1}) - f_U(u_j)} \tag{3}$$

$$P(v_i < V \leq v_{i+1} | U \leq -2) = \frac{C[f_U(-2), f_V(v_{i+1})] + C[f_U(-2), f_V(v_i)]}{f_U(-2)} \tag{4}$$

$$P(V \leq -2 | U \leq -2) = \frac{P(U \leq -2, V \leq -2)}{P(U \leq -2)} = \frac{C[f_U(-2), f_V(-2)]}{f_U(-2)} \tag{5}$$

式中 v_i, v_{i+1} 和 u_j, u_{j+1} 分别为水文干旱和气象干旱等级阈值, 其中 v_1, v_2, v_3, v_4 分别取 $-2.0, -1.5, -1.0, -0.5, u_1, u_2, u_3, u_4$ 同理。

3 结果与分析

3.1 干旱事件特征

利用游程理论基于 3 月、12 月时间尺度的干旱指数序列识别嘉陵江流域季节尺度和年尺度的干旱事件, 提取干旱历时和干旱烈度, 并统计干旱发生频次、平均干旱历时和烈度, 结果如表 1 所示。由表 1 可见, 不同时间尺度下, 气象干旱发生次数均多于水文干旱, 说明气象干旱比水文干旱更频发。无论是气象干旱还是水文干旱, 年尺度干旱频次均少于季节尺度, 但是年尺度的平均干旱历时和干旱烈度均高于季节尺度。季节尺度和年尺度水文干旱的平均干旱历时和平均干旱烈度均高于气象干旱, 表明气象干旱传播、发展成水文干旱后, 干旱会更加严重, 可能带来更为严重的影响和损失。季节尺度上, 支流渠江的气象干旱和水文干旱发生频次最高、平均干旱历时最短, 水文干旱平均干旱烈度最小。嘉陵江从上游到下游, 气象干旱频次呈现先减少后增加的趋势, 气象干旱平均干旱历时和烈度呈现先增大后减小的趋势, 水文干旱频次呈现增加—减少—增

加趋势, 水文干旱平均干旱历时和烈度呈现减少、增加、减少趋势。年尺度上, 嘉陵江中游亭子口站气象干旱发生频次最高、平均干旱烈度最小; 支流涪江气象干旱平均历时最短, 水文干旱频次最高; 流域出口北碚站气象干旱平均历时最长、平均干旱烈度最大。气象干旱历时从上游到下游逐渐变长, 平均干旱烈度呈现先减小后增大趋势, 水文干旱历时呈现先变长后变短的趋势, 平均干旱烈度呈现减小、增大、减小趋势, 从上游到下游水文干旱历时和平均干旱烈度整体均呈现减小趋势。

图 3 为不同时间尺度下气象干旱和水文干旱开始和结束时间占比, 图中每个站点的第一条柱子代表干旱开始时间, 第二条柱子代表干旱结束时间。由图 3 可见, 基于 SPI-3 和 SRI-3 序列的季节尺度气象干旱和水文干旱开始和结束时间在 4 个季节分布相对比较均匀, 以冬季和春季居多。而基于 SPI-12 序列的年尺度气象干旱开始时间和结束时间主要集中在夏季, 基于 SRI-12 序列的年尺度水文干旱的开始时间主要集中在夏季和秋季, 结束时间集中在夏季。

表 1 嘉陵江流域干旱事件特征

Table 1 Characteristics of drought events in the Jialing River Basin

站点	时间尺度	气象干旱			水文干旱		
		干旱频次	平均干旱历时/月	平均干旱烈度	干旱频次	平均干旱历时/月	平均干旱烈度
碧口	季节	88	2.31	1.62	48	4.42	2.98
	年	32	7.03	4.20	14	15.86	9.66
亭子口	季节	79	2.72	1.72	51	4.24	2.74
	年	35	7.20	3.60	16	13.69	8.49
武胜	季节	87	2.45	1.57	45	4.87	3.06
	年	29	8.10	4.66	20	10.65	6.73
小河坝	季节	90	2.37	1.55	55	3.98	2.42
	年	30	6.70	4.84	22	9.45	6.18
罗渡溪	季节	97	2.25	2.02	65	3.43	1.71
	年	31	7.90	4.47	21	10.76	6.75
北碚	季节	90	2.46	1.52	60	3.53	2.29
	年	28	8.32	5.47	19	11.89	7.66

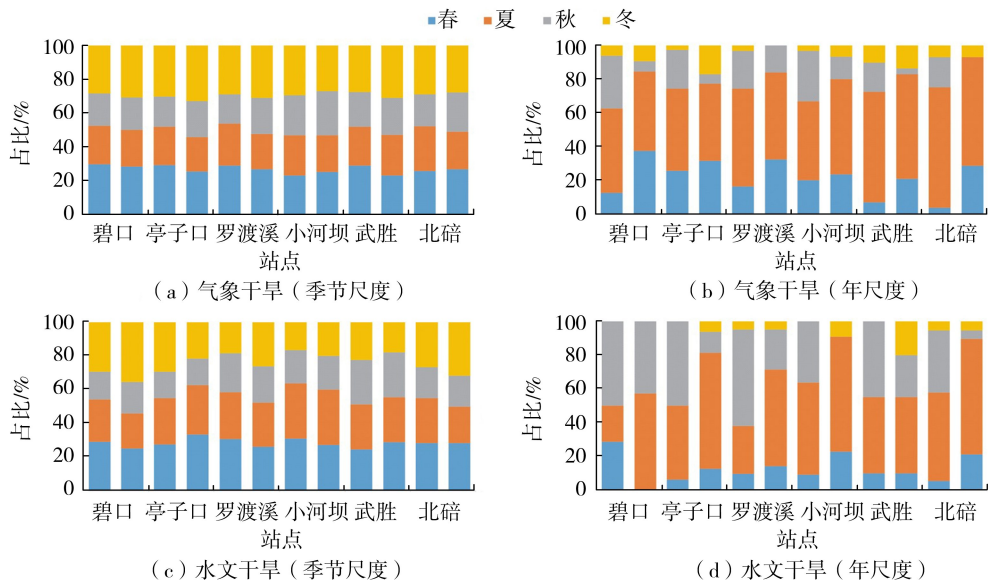


图3 不同时间尺度下嘉陵江流域气象干旱和水文干旱开始和结束时间占比

Fig.3 Proportion of start and end time of meteorological drought and hydrological drought in the Jialing River Basin at different time scales

3.2 干旱演变特征

3.2.1 干旱演变的趋势和突变特征

对嘉陵江流域春、夏、秋、冬和年的干旱指数序列进行 M-K 趋势检验和 Pettitt 突变检验,结果如表 2 所示。在 0.05 的显著性水平下,M-K 趋势检验值 $Z<0$ 表明序列有减小趋势, $Z>0$ 表明序列有增加趋势, $|Z|>1.96$ 表明趋势显著;Pettitt 突变检验的显著性水平 $P\leq 0.05$ 表明检测出的突变点显著。由表 2 可见,对于气象干旱,碧口、亭子口站夏秋季节 SPI 呈减小趋势,其余站秋季 SPI 呈减小趋势,年尺度武胜、小河坝、北碚站 SPI 呈减小趋势,但趋势均不显著。对于水文干旱,碧口站春季,武胜、小河坝、北碚站秋季,碧口、亭子口站冬季的 SRI 呈显著减小趋势,表明嘉陵江流域上中游冬季显著变干,中下游和支流秋季显著变干。年尺度上水文干旱 SRI

在全流域均呈减小趋势,其中武胜和北碚站减小趋势显著。嘉陵江流域从 1989 年开始大规模开展水土保持治理工作,植被覆盖显著增加,对降水的截留增强,产流量减少。流域内水利工程的大量建设,增加了水面蒸发面积,蒸发量增加,大规模的城市化带来人口的增加,水资源利用量增大,进一步引起径流量的减少,因此水文干旱呈现加剧趋势。小河坝站秋季 SPI 在 1983 年发生突变。碧口站冬春季节 SRI 在 1995 年发生突变,亭子口站冬季 SRI 在 2007 年发生突变,武胜、小河坝和北碚站秋季 SRI 在 1985 年发生突变。基于径流量计算的 SRI 序列的突变点与 Zhou 等^[25-26]的研究结果一致,武胜和北碚站的 SRI 突变点可能与 1984 年嘉陵江流域干流大型水库升钟水库蓄水有关。武胜站年尺度 SRI 在 1990 年发生突变,北碚站冬季 SRI 在 2002 年发生

表 2 不同时间尺度下嘉陵江流域干旱指数的趋势和突变检验结果

站点		Z 值					P 值				
		春季	夏季	秋季	冬季	年	春季	夏季	秋季	冬季	年
碧口	SPI	1.44	-0.70	-0.86	1.51	0.30	0.03 (1995 年)			0.00(1995 年)	
	SRI	-2.52	-0.03	-1.41	-5.14	-1.45					
亭子口	SPI	1.13	-0.24	-0.75	1.34	0.03				0.00(2007 年)	
	SRI	0.12	-0.63	-1.77	-2.84	-1.38					
武胜	SPI	0.97	0.27	-1.04	0.64	-0.39			0.01(1985 年)		0.04(1990 年)
	SRI	-0.12	-0.85	-2.56	0.70	-1.99					
小河坝	SPI	0.25	0.82	-1.46	0.20	-0.28			0.04(1983 年)		
	SRI	-0.08	-1.14	-2.58	-1.27	-1.60					
罗渡溪	SPI	0.51	1.45	-1.56	0.52	0.00					
	SRI	-0.76	0.98	-1.80	1.16	-1.02					
北碚	SPI	0.80	0.99	-1.27	0.71	-0.21					
	SRI	-0.93	-0.66	-2.72	2.02	-2.12					

突变。

3.2.2 干旱变化的周期特征

以嘉陵江流域出口站北碚站为例进行小波分析,图 4、5 分别为季节尺度和年尺度的 SPI 序列、SRI 序列的小波分析图。由图 4 可见,从气象干旱角度,春季在 13 a 尺度的周期波动最明显,其次是 8 a 尺度;夏季在 14 a 尺度的周期波动最明显;秋季 8 a 尺度的周期波动最明显,其次是 15 a;冬季在 20 a 周期波动最明显,其次是 8 a。从水文干旱角度,春季在 6 a 尺度周期波动最明显,其次是 14 a;夏季在 25 a 尺度周期波动最明显,其次是 10~14 a;秋季

15 a 尺度周期波动最明显,其次是 8 a;冬季在 8~10 a 尺度周期波动最明显。由图 5 可见,年尺度气象干旱在 13 a 尺度周期波动最明显,其次是 8 a。与气象干旱一致,年尺度水文干旱的主周期同样是 13 a。

3.3 气象干旱向水文干旱传播特征

3.3.1 干旱传播时间

计算 SPI-*n* 与 SRI-1 的皮尔逊相关系数分析嘉陵江流域的干旱传播时间,结果如图 6 所示,横轴表示 1~12 月时间尺度的 SPI-*n* 值,纵轴表示不同月份的 SRI-1 值,每个月份气象干旱传播到水文干旱对应的最可能的传播时间用 * 标记。由图 6 可见,气

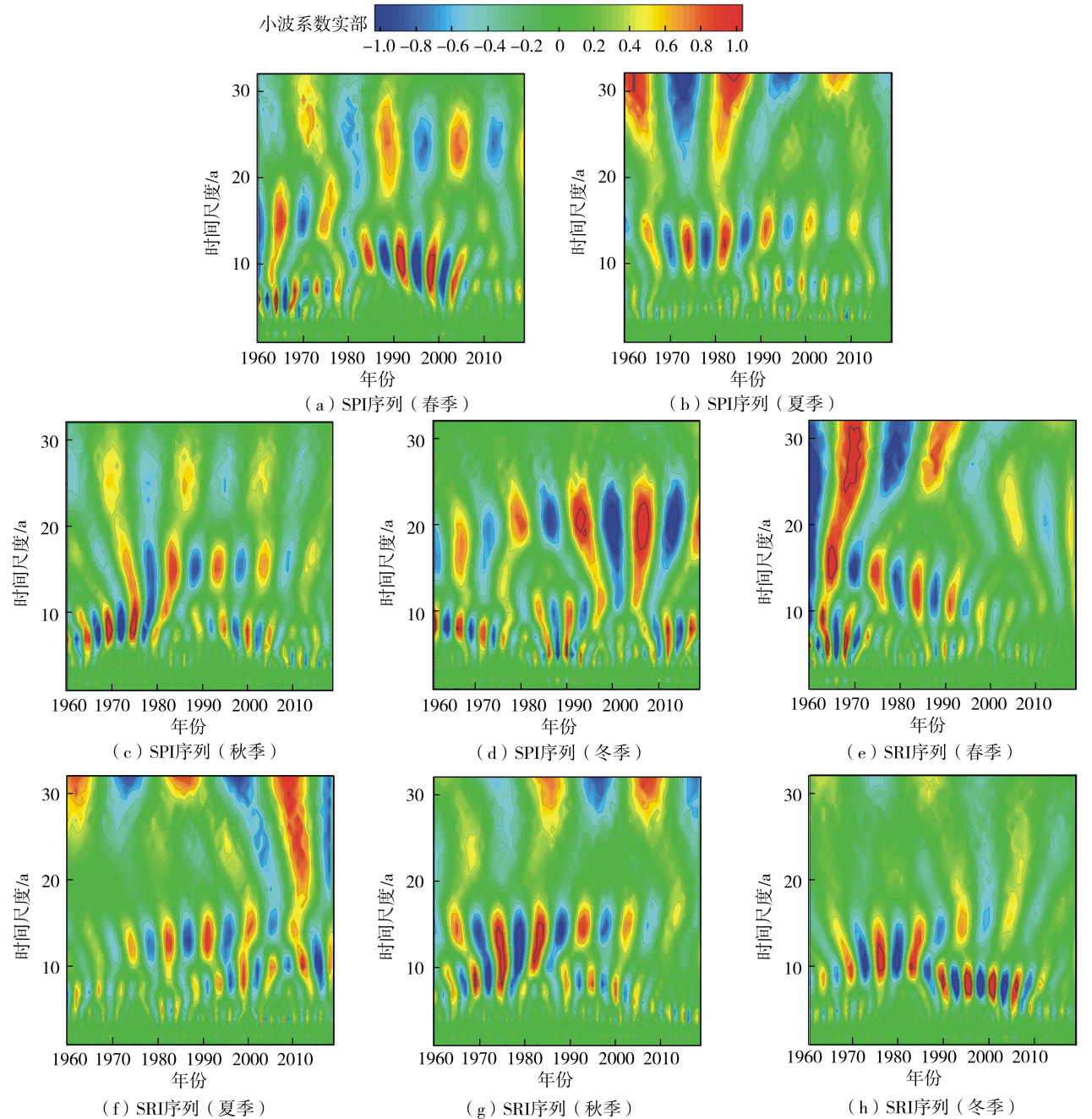


图 4 北碚站不同季节的 SPI 和 SRI 序列小波分析
Fig. 4 Wavelet analysis of SPI and SRI sequences at Beibei Station in different seasons

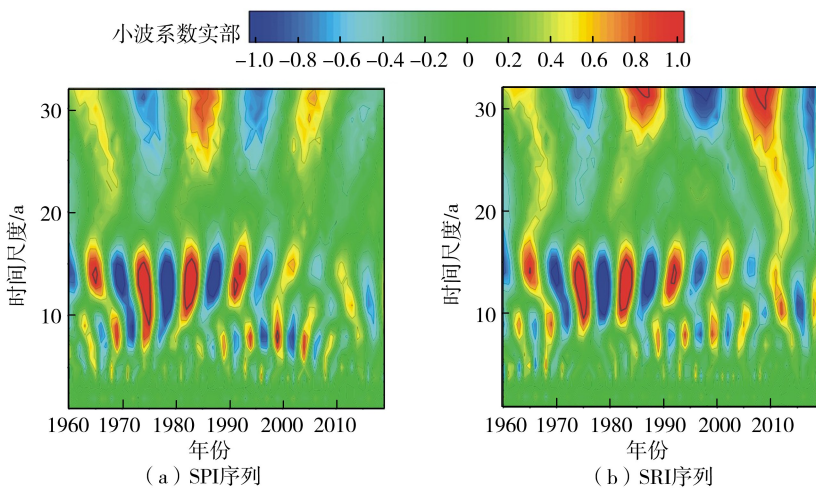


图5 北碚站年尺度的SPI和SRI序列小波分析

Fig.5 Wavelet analysis of SPI and SRI sequences at annual scale of Beibei Station

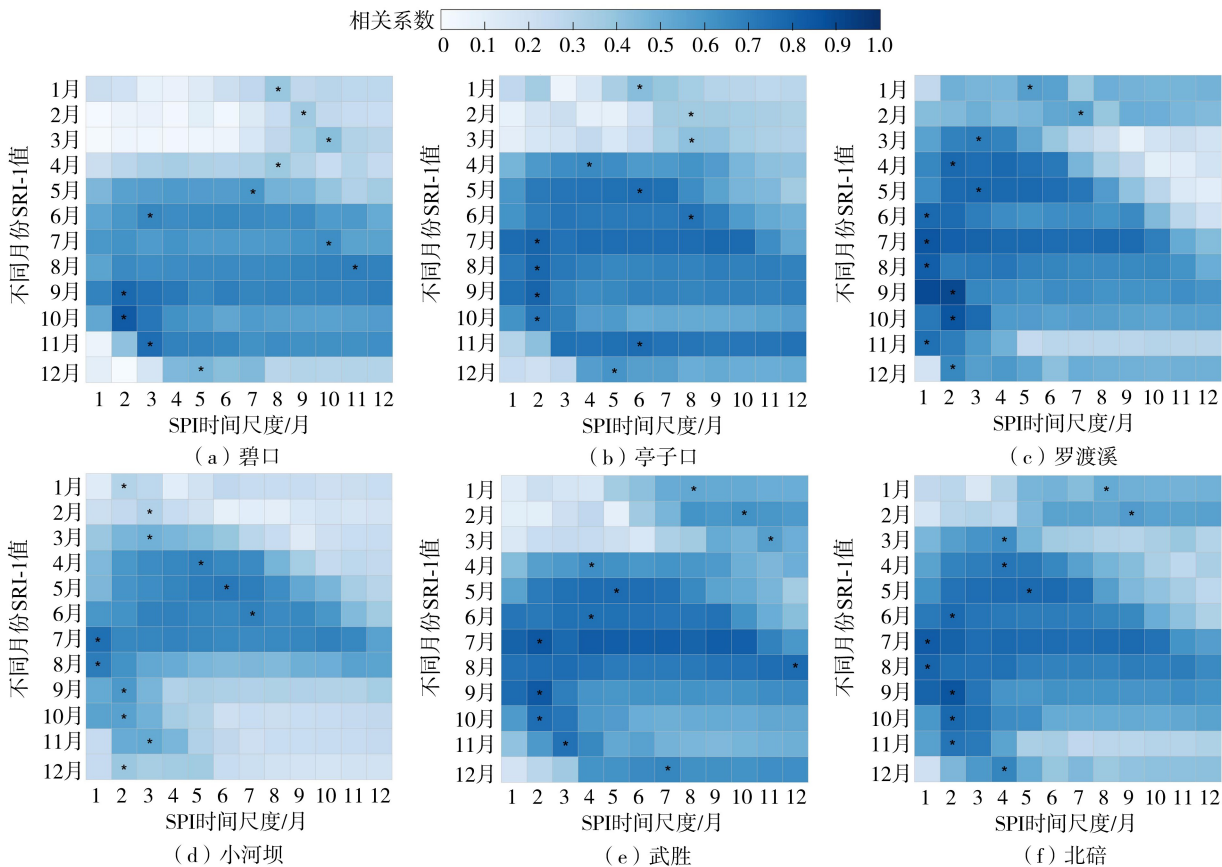


图6 嘉陵江流域SPI-*n*与SRI-1的皮尔逊相关系数

Fig.6 Pearson correlation coefficients of SPI-*n* and SRI-1 in the Jialing River Basin

象干旱指数和水文干旱指数的高相关系数(大于0.7)主要集中在夏季和秋季,传播时间为1~12月不等,以1~2月居多。

表3为嘉陵江流域不同季节和年尺度干旱传播时间。除碧口站外,嘉陵江流域其他站夏季和秋季的干旱传播时间比冬季和春季要短,这与刘永佳等^[11]的研究结果一致。可能的原因是嘉陵江流域年降水量大部分集中在7—9月,夏秋季节径流对降

水响应速度比其他季节快,响应时间更短;同时夏秋季节温度相对较高,会使水文循环速度加快,使干旱传播时间更短。除秋季外,干旱传播时间从上游到中下游呈现减小—增大—减小的趋势,上游碧口站呈现出较长的干旱传播时滞,尤其是在春夏季,流域出口北碚站的干旱传播时间最短;涪江的干旱传播时间长于渠江。结合嘉陵江流域的降水量空间分布,多年平均降水量大的地区干旱传播时间较短,多

年平均降水量小的地区干旱传播时间较长。分析其原因,多年平均降水量大的地区一般降水-径流的响应速度更快,径流与短期降水量的相关性更强。而多年平均降水量小的地区土壤湿度相对较小,水文循环速度相对较慢,径流与长期降水量的相关性更高,传播时间较长。此外,水库调蓄也会影响干旱传播时长,亭子口水库是嘉陵江干流具有调蓄能力的大型水库,常进行季节性补水,使其下游的武胜站的干旱传播时间变长。

表 3 嘉陵江流域季节和年尺度的干旱传播时间

站点	干旱传播时间/月				
	春季	夏季	秋季	冬季	年尺度
碧口	8.3	8.0	2.3	7.3	6.5
亭子口	6.0	4.0	3.3	6.3	4.9
罗渡溪	2.7	1.0	1.7	4.7	2.5
小河坝	4.7	3.0	2.3	2.3	3.1
武胜	6.7	6.0	2.3	8.3	5.8
北碚	4.3	1.3	2.0	7.0	3.7

3.3.2 干旱传播概率

分别以正态分布和广义极值分布拟合不同时间尺度的 SPI 序列和 SRI 序列,并根据 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验结果选择最优拟合边际分布。分别构建 Clayton Copula、Gumbel Copula 及 Frank Copula 函数,利用 AIC 准则和 OLS 准则进行 Copula 函数的拟合优度检验,选取 OLS 值及 AIC 值最小的 Copula 函数作为最优 Copula 函数。夏季罗渡溪站和北碚站、秋季碧口站和罗渡溪站、冬季亭子口站、年尺度碧口站的最优 Copula 函数均为 Frank Copula;冬季碧口站和小河坝站、年尺度亭子口站、罗渡溪站、武胜站和北碚站的最优 Copula 函数均为 Clayton Copula;其余情况的最优 Copula 函数均为 Gumbel Copula。

基于季节尺度和年尺度的气象干旱与水文干旱最优联合分布,以-0.5、-1.0、-1.5、-2.0 作为轻旱、重旱、重旱、特旱的干旱指数阈值,计算各等级气象干旱向各等级水文干旱传播的概率,结果如图 7 所示。由图 7 可见,随着气象干旱的加剧,同一等级水文干旱发生的概率逐渐增大。无论在季节尺度还是年尺度下,同一等级气象干旱引发轻、中、重、极度水文干旱的概率逐渐减小。气象干旱轻旱传播到水文干旱特旱的概率均小于 10%,即很难发生气象干旱轻旱演变成水文干旱特旱的情况。除小河坝站外,其他站夏季、秋季、年尺度气象干旱引发水文干旱的概率显著高于春季和冬季。嘉陵江流域植被覆盖率较高,大约为 70%~80%,其对干旱传播可能有

较大的影响。夏季和秋季气温相对于春冬两季高,是植被生长旺盛的时期,植物对水的需求较高,植物的蒸腾作用强烈,当夏秋季节气象干旱发生时,植被吸收水分会进一步降低地表和地下水的储量,更容易引发水文干旱。整体来讲,与季节尺度相比,年尺度上的气象干旱更易传播为水文干旱,气象干旱轻旱引发水文干旱轻旱、中旱概率分别达到 60%、35%,气象干旱中旱引发水文干旱轻旱、中旱概率达到 69%、45%。除碧口站春季、武胜和北碚站冬季外,其余站任何季节一旦发生重旱及以上的气象干旱,引发水文干旱的概率均超过了 60%。空间上来看,与上游碧口站、涪江小河坝站相比,中游亭子口、武胜和渠江罗渡溪站整体呈现出气象干旱更容易引发水文干旱。分析其可能原因主要有两方面:一是农业灌溉的影响,亭子口、武胜和罗渡溪控制流域为嘉陵江流域主要农业灌区亭子口灌区、升钟水库灌区、罐子坝水库灌区,这些农业用水量大的地区一旦气象干旱发生,水文干旱加剧的可能性会更大,尤其是在灌溉依赖的区域,干旱时水资源的消耗速度较快;二是水库调度和水资源配置的影响,例如亭子口水库是嘉陵江干流具有调蓄能力的大型骨干工程,调度频繁,涉及防洪、灌溉、供水、保证下游流量等。与上游碧口站相比,亭子口站春夏秋季的气象干旱向水文干旱传播概率都更大,而冬季的传播概率更小。因为水库在春夏秋季节灌溉供水消耗大,气象干旱更容易引发水文干旱,冬季常会往下游补水,保证生态流量,气象干旱反而不容易传播到水文干旱。

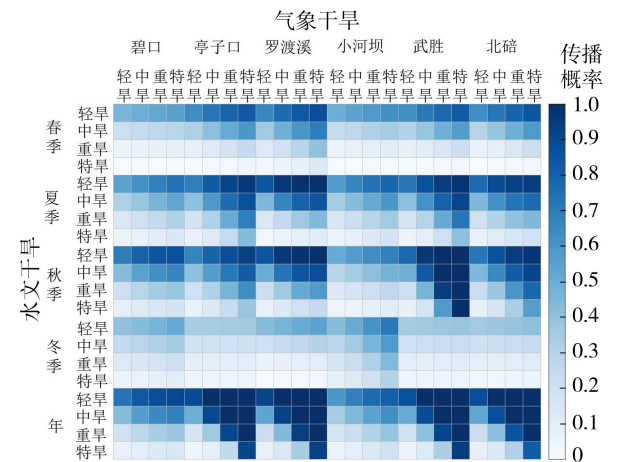


图 7 嘉陵江流域气象干旱向水文干旱传播的概率

Fig. 7 Propagation probability from meteorological drought to hydrological drought in the Jialing River Basin

4 结 论

a. 嘉陵江流域气象干旱发生的频率高于水文干旱,但水文干旱平均干旱历时和干旱烈度均高于

气象干旱。与季节尺度相比较,年尺度的干旱事件发生频次少,但平均干旱历时和干旱烈度高。年尺度的气象干旱起止时间主要集中在夏季,而水文干旱的开始时间主要集中在夏季和秋季,结束时间集中在夏季。

b. 1960—2018 年嘉陵江流域夏季、秋季和年的干旱整体呈现加剧趋势,其中气象干旱趋势不显著,水文干旱在流域上中游冬季、中下游和支流秋季加剧趋势显著。除小河坝站外,气象干旱均未检测出明显突变点,上游碧口站水文干旱在 1995 年发生突变,中下游水文干旱的突变点多在 20 世纪 80 年代。气象干旱春季、夏季、秋季、冬季主周期分别为 13、14、8、20 a;水文干旱春季、夏季、秋季、冬季主周期分别为 6、25、15、8~10 a。在年尺度上,气象干旱和水文干旱的主周期均为 13 a。

c. 气象干旱向水文干旱传播存在滞后性,嘉陵江流域气象干旱向水文干旱的传播时间在不同的月份不同的区域表现出差异性。夏季和秋季的干旱传播时间比冬季和春季要短,多年平均降水量小的地区比多年平均降水量大的地区干旱传播时间要长。径流对降水的响应速度和水库的调蓄是造成这种差异的主要原因。

d. 随着气象干旱的加剧,同一等级水文干旱发生的概率逐渐增大,同一等级气象干旱引发水文干旱轻旱、中旱、重旱、特旱的概率逐渐减小。夏季、秋季气象干旱引发水文干旱的概率显著高于春季和冬季,可能与植被需水季节性差异有关。流域内主要农业灌区和承担水库调蓄、供水的区域,气象干旱更容易引发水文干旱。

参考文献:

[1] 刘永强,黄生志,郭恽,等. 气象干旱到不同等级水文干旱的传播阈值:以沁河流域为例[J]. 水力发电学报, 2022,41(2):9-19. (LIU Yongqiang, HUANG Shengzhi, GUO Yi, et al. Propagation threshold of meteorological drought to different levels of hydrological drought: a case study of Qinhe River basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022,41(2):9-19. (in Chinese))

[2] 武慧敏,吕爱锋,张文翔. 巴音河流域水文干旱对气象干旱的响应[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(3):459-467. (WU Huimin, LYU Aifeng, ZHANG Wenxiang. Response of hydrologic drought to meteorological drought in the Bayin River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022,20(3):459-467. (in Chinese))

[3] 张璇,许杨,郝芳华,等. 滦河流域气象干旱向水文干旱传播特征及风险分析[J]. 水利学报, 2022,53(2):165-

175. (ZHANG Xuan, XU Yang, HAO Fanghua, et al. Characteristics and risk analysis of drought propagation from meteorological drought to hydrological drought in Luanhe River Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(2):165-175. (in Chinese))

[4] 高放,刘冀,陈威,等. 淮河流域上游分区气象-水文干旱传播特征及响应概率研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5):257-265. (GAO Fang, LIU Ji, CHEN Wei, et al. Study on propagation characteristics and response probabilities of meteorological and hydrological drought zones in the upper reaches of Huai River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5):257-265. (in Chinese))

[5] 郑丽虹,刘懿,任立良,等. 黄河流域气象干旱与水文干旱时空特征及其传递关系[J]. 水资源保护, 2022, 38(3):87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Spatio-temporal characteristics and propagation relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022,38(3):87-95. (in Chinese))

[6] 石朋,唐汉,瞿思敏,等. 西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征[J]. 水资源保护, 2023,39(1):49-56. (SHI Peng, TANG Han, QU Simin, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China [J]. Water Resources Protection, 2023,39(1):49-56. (in Chinese))

[7] 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))

[8] DEGHANNIK M, KAVIANPOUR M R, MOAZAMI S. Spatial analysis of meteorological and hydrological drought characteristics using Copula model [J]. Environmental Earth Sciences, 2021,80(24):802.

[9] HUANG Shengzhi, LI Pei, HUANG Qiang, et al. The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors [J]. Journal of Hydrology, 2017,547:184-195.

[10] LI Qiongfang, HE Pengfei, HE Yongchang, et al. Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying River Basin using wavelet analysis[J]. Atmospheric Research, 2020, 234:104743.

[11] 刘永佳,黄生志,方伟,等. 不同季节气象干旱向水文干旱的传播及其动态变化[J]. 水利学报, 2021,52(1):93-102. (LIU Yongjia, HUANG Shengzhi, FANG Wei, et al. Propagation and dynamic change of meteorological

- drought to hydrological drought in different seasons [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (1): 93-102. (in Chinese))
- [12] 姜雨彤,侯爱中,郝增超,等.长江流域2022年高温干旱事件演变及历史对比[J].水力发电学报,2023,42(8): 1-9. (JIANG Yutong, HOU Aizhong, HAO Zengchao, et al. Evolution and historical comparison of hot droughts in Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42 (8): 1-9. (in Chinese))
- [13] 谢灵枫,杨肖丽,吴凡,等.黄河流域未来气象水文干旱传播的气候变化响应[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(1):10-17. (XIE Lingfeng, YANG Xiaoli, WU Fan, et al. Response of future meteorological and hydrological drought propagation to climate change in the Yellow River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1):10-17. (in Chinese))
- [14] 李文晖,曹辉,任玉峰,等.嘉陵江流域旱涝急转演变规律及其对径流影响研究[J].人民长江,2024,55(9):128-140. (LI Wenhui, CAO Hui, REN Yufeng, et al. Study on evolution law of drought-flood abrupt alternation and its influence on runoff in Jialing River Basin [J]. Yangtze River, 2024, 55(9):128-140. (in Chinese))
- [15] 黄祎,黎云云,李艳春,等.南北典型流域旱涝演变特征及其对比研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(1):63-77. (HUANG Yi, LI Yunyun, LI Yanchun, et al. Evolution characteristics of drought and flood in typical river basins of north and south and its contrastive study [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46(1):63-77. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 赵宾华,马方铭,李占斌,等.嘉陵江流域潜在蒸散发时空演变特征及其影响因素[J].水资源与水工程学报,2023,34(5):43-51. (ZHAO Binhua, MA Fangming, LI Zhanbin, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of potential evapotranspiration and its influencing factors in Jialing River Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34 (5): 43-51. (in Chinese))
- [18] 薛联青,白青月,刘远洪.人类活动影响下塔里木河流域气象干旱向水文干旱传播的规律[J].水资源保护,2023,39(1):57-62. (XUE Lianqing, BAI Qingyue, LIU Yuanhong. Propagation law from meteorological drought to hydrological drought in the Tarim River Basin under the impact of human activities [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):57-62. (in Chinese))
- [19] 李峥嵘.长江流域气象与水文干旱时空变化特征及干旱风险研究[D].宜昌:三峡大学,2021.
- [20] 许怡然,鲁帆,谢子波,等.潮白河流域气象水文干旱特征及其响应关系[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):220-228. (XU Yiran, LU Fan, XIE Zibo, et al. Characteristics and responses of hydrological and meteorological drought in Chaobai River Basin [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37 (2): 220-228. (in Chinese))
- [21] 李闰洁,李升峰,吴森垚.城市化条件下的秦淮河流域径流多时间尺度变化特征及影响因素[J].水土保持通报,2020,40(4):100-107. (LI Runjie, LI Shengfeng, WU Senyao. Multi-scale and impacting factors of runoff variation in urbanized Qinhuai River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40 (4): 100-107. (in Chinese))
- [22] 陈文华,徐娟,李双成.怒江流域下游地区气象与水文干旱特征研究[J].北京大学学报(自然科学版),2019,55(4):764-772. (CHEN Wenhua, XU Juan, LI Shuangcheng. A study on the characteristics of hydrological and meteorological droughts in the lower Nu River [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(4):764-772. (in Chinese))
- [23] WANG Zhenwei, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Temporal and spatial propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought and influencing factors [J]. Atmospheric Research, 2024, 299: 107212.
- [24] ZHAO Weiru, WU Jiefeng, DU Erhu, et al. Deciphering the influence of climate change and human activities on the drought propagation [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51:101654.
- [25] ZHOU Yinjun, LI Dongfeng, LU Jinyou, et al. Distinguishing the multiple controls on the decreased sediment flux in the Jialing River basin of the Yangtze River, Southwestern China [J]. Catena, 2020, 193: 104593.
- [26] 胡淼,王润瑄,姬广兴.基于Budyko互补关系法的嘉陵江径流变化归因研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(6):49-57. (HU Miao, WANG Runxuan, JI Guangxing. Attribution of the runoff changes in Jialing river based on Budyko complementary relationship method [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023, 44(6):49-57. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-14 编辑:王芳)