

陈文华, 李汶金, 张宁, 等. 纵向岭谷区气象水文干旱变化及其传播特性[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 45-54. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.004

CHEN Wenhua, LI Wenjin, ZHANG Ning, et al. Variation and propagation characteristics of meteorological and hydrological droughts in Longitudinal Range-Gorge Region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 45-54. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.004

# 纵向岭谷区气象水文干旱变化及其传播特性

陈文华<sup>1</sup>, 李汶金<sup>1</sup>, 张宁<sup>2</sup>, 冯春红<sup>2</sup>, 李国永<sup>2</sup>, 陈凯<sup>1</sup>

(1. 保山学院 资源环境学院, 云南 保山 678000; 2. 云南省水文水资源局 保山分局, 云南 保山 678000)

**摘要:**【目的】全球气候变化和人类活动深刻改变了干旱动态, 特别是在生态敏感区域。分析纵向岭谷区高黎贡山南段两侧气象干旱(MD)和水文干旱(HD)的传播特征与机制, 为制定有效的水资源管理和灾害预防提供科学依据。【方法】以高黎贡山南段两侧显著的水文气象分异特性, 基于1981—2020年代表流域的月降水和径流数据, 采用标准化降水指数(SPI)和标准化径流指数(SRI)评估MD和HD的强度与频率, 利用Mann-Kendall趋势检验分析干旱指数变化趋势, 通过游程理论评估MD向HD的传播滞后时间, 并结合贝叶斯序数概率回归模型量化累积降水亏缺(SPI<sub>m</sub>)与HD严重度之间的关系。【结果】显示: 过去40年纵向岭谷区气象干旱的强度显著增加, 相较于水文干旱事件, 气象干旱事件的发生频率更高(MD约为2.2~2.5次/年; HD约为1.1~1.5次/年); 水文干旱则持续时间更长(2.18~3.04个月)且更严重(1.18~1.76)。MD向HD的传播相对迅速, 平均滞后期在0.5~0.7个月, 但恢复过程的滞后较长(1.2~2.2个月)。贝叶斯序数概率回归分析进一步揭示SPI<sub>m</sub>与HD严重度呈负相关, 且在极端MD条件下, 这种关系的不确定性增加。【结论】高强度HD可能会对该地区的农业和其他社会经济活动造成限制, 气象干旱的快速响应与水文干旱的缓慢恢复表明该区域水资源可持续利用面临挑战。这些发现有助于深化对山地生态系统中干旱传播的理解, 并为应对气候变化的水资源管理策略调整提供科学依据。

**关键词:** 气候变化; 气象干旱; 水文干旱; 干旱传播; 纵向岭谷区; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.004

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P426.616; P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0045-10



## Variation and propagation characteristics of meteorological and hydrological droughts in Longitudinal Range-Gorge Region

CHEN Wenhua<sup>1</sup>, LI Wenjin<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>2</sup>, FENG Chunhong<sup>2</sup>, LI Guoyong<sup>2</sup>, CHEN Kai<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Science, Baoshan University, Baoshan 678000, Yunnan, China; 2. Baoshan Branch of Yunnan Province Hydrology and Water Resources Bureau, Baoshan 678000, Yunnan, China)

收稿日期: 2025-01-22; 修回日期: 2025-03-31; 录用日期: 2025-04-01; 网络出版日期: 2025-04-14

基金项目: 怒江下游山地农业生态系统云南省野外科学观测研究站项目(202305AM340031); 国家自然科学基金项目(32160078); 国家重点研发计划项目(2022YFF13024)

作者简介: 陈文华(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事3S技术应用及气候变化生物学方面的研究。E-mail: ynchwh@qq.com

通信作者: 张宁(1980—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文水资源分析评价。E-mail: 41344153@qq.com

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

**Abstract:** [Objective] Global climate change and human activities have profoundly altered drought dynamics, particularly in ecologically sensitive regions. This study analyzes the propagation characteristics and mechanisms of meteorological drought (MD) and hydrological drought (HD) on both sides of the southern Gaoligong Mountains within the Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR), aiming to provide scientific foundation for effective water resource management and disaster prevention. [Methods] Based on the significant hydrometeorological differentiation between both sides of the southern Gaoligong Mountains, and using monthly precipitation and runoff data between 1981 and 2020 from representative river basins, the intensity and frequency of MD and HD were evaluated using the standardized precipitation index (*SPI*) and standardized runoff index (*SRI*). Variation trends of drought indices were analyzed through Mann-Kendall trend tests. Run theory was employed to evaluate the propagation time lag from MD to HD, followed by a Bayesian ordinal probit regression model to quantify the relationship between cumulative precipitation deficits (*SPI<sub>m</sub>*) and HD severity. [Results] The result showed that over the past four decades, MD intensity in the LRGR had increased significantly. The frequency of MD events (approximately 2.2 to 2.5 events/year) was notably higher than that of HD events (approximately 1.1 to 1.5 events/year). HD events demonstrated longer duration (2.18 to 3.04 months) and greater severity (1.18 to 1.76). The propagation from MD to HD was relatively rapid, with an average time lag of 0.5 to 0.7 months, while the recovery process showed longer lags (1.2 to 2.2 months). The Bayesian analysis revealed a negative correlation between *SPI<sub>m</sub>* and HD severity, with increased uncertainty in this relationship under extreme MD conditions. [Conclusion] High-intensity HD may constrain agricultural and socio-economic activities in the region. The rapid response to MD and the prolonged HD recovery highlight emerging challenges for sustainable water resource utilization in this area. These findings enhance the understanding of drought propagation processes in mountainous ecosystems and provide scientific support for adapting water resource management strategies to climate change.

**Keywords:** climatic change; meteorological drought; hydrological drought; drought propagation; Longitudinal Range-Gorge Region; influencing factors

## 0 引言

在未来升温的影响下, 全球干旱区干旱强度和频率预计将会增加, 这对农业、生态系统和水资源管理产生深远影响<sup>[1]</sup>。尤其在复杂的山地流域, 理解这些气象干旱事件在不同地理区域、不同类型干旱的传播特征与机制对于制定有效的水资源管理和灾害预防措施至关重要<sup>[2-4]</sup>。近年来中国积极推进“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路, 通过发展水利新质生产力全面提升水旱灾害防御能力与水资源优化配置能力, 为应对干旱传播的复合风险提供了系统性解决方案<sup>[5-6]</sup>。

从气象干旱向其他干旱类型的转变被称为干旱传播<sup>[7-8]</sup>。例如, 气象干旱 (Meteorological Drought, MD) 向水文干旱 (Hydrological Drought, HD) 的传播<sup>[9]</sup>。传播过程可通过水文干旱的滞后效应来描述: 降水减少首先影响土壤水分, 随后逐步传导至河流径流和地下水<sup>[10]</sup>。这一多阶段传导机制要求建立涵盖“水源-土壤-河道-地下水”的系统治理体系, 同时需结合水体污染控制与治理的技术创新<sup>[11]</sup>, 通过跨部门协同和智慧水利建设阻断干旱传播链。当前研究的重点主要在 HD 与 MD 之间的传播时间 (干旱起始滞后时间) 以及传播过程中的特征变化<sup>[12]</sup>。值得注意

的是, 除 MD 和 HD 之间的开始滞后外, 两者间的结束滞后也是研究生态系统对降水不足的恢复力的重要变量。目前只有少数学者考虑了 HD 对 MD 恢复的滞后响应问题<sup>[13-14]</sup>。

干旱传播时间通常表示为 HD 发生之前某一累积降水亏缺的时间长度。常用估算方法是基于干旱指数序列的相关或滞后分析<sup>[15]</sup>, 利用特定时间尺度的水文干旱 (如 *SRI1*, 表示 1 个月时间尺度的水文干旱) 与不同时间尺度的气象干旱指数 (如 *SPI<sub>m</sub>*, 其中 *m* 为降水累积期, 如 1、2、3 等) 进行相关分析, 选取相关系数最高的 *SPI* 时间尺度来代表干旱传播时间<sup>[3,16-18]</sup>。这种方法简单, 但容易忽略不同于干旱事件传播时间的变异性。若使用完整时间序列分析, 结果将受到序列中的非干旱正值、极端负值以及不同时间尺度重叠信息影响, 而降低传播时间估算的准确性<sup>[19-20]</sup>。

干旱特征分析是对干旱发生的准确预测。大多数学者利用线性回归模型或概率方法建立水文干旱与气象干旱特征的关系<sup>[21-22]</sup>。近年来, Copula 函数结合贝叶斯模型常被应用于 MD 和 HD 依赖关系分析<sup>[23-26]</sup>。与线性、指数或幂函数相比, 概率方法在描述不同类型干旱的非线性关系方面具有更优秀的表现<sup>[27-28]</sup>。

高黎贡山地处中国西南纵向岭谷区 (Longitudinal Range-Gorge Region, LRGR), 是国际生物多样性热点区, 独特的地形和气候条件被视为分析气象水文规律的理想地点<sup>[29]</sup>。对该区域干旱传播规律的分析有助于补充和完善干旱传播理论, 促进对高原山地复杂环境中气候和水文变化规律的认识。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区及数据

以高黎贡山南段东坡的勐波罗河流域和西坡的龙江流域为研究区。两个流域分别是国际河流怒江与伊洛瓦底江的重要组成部分, 属于中国西南的纵向岭谷区 (LRGR), 勐波罗河位于高黎贡山东坡怒江以东, 为怒江左岸一级支流, 海拔范围为 580~3 504 m, 地形以中低山为主, 年均降水约 1 160 mm, 植被覆盖度较高, 主要为常绿阔叶林和针阔混交林。龙江位于高黎贡山西坡, 是伊洛瓦底江左岸支流瑞丽江的上、中游区, 海拔范围为 1 000~3 263 m, 地形更为复杂, 切割强烈, 沟谷发育。年均降水约 1 786 mm, 植被类型多样, 主要为亚热带常绿阔叶林和落叶阔叶林。该区主要受西南季风影响, 其纵向平行排列的岭谷地形形成“通道”“阻隔”效应, 而具有显著的水文气象分异<sup>[30]</sup>。运用云南省水文水资源局保山分局的观测成果 (1981—2020 年), 主要是龙江流域 7 个雨量站, 勐波罗河流域 4 个雨量站以及两个流域代表上、下游的各 2 个径流站 (见图 1) 的月尺度降水和径流数据。为与径流数据相对应, 使用泰森多边形法计算相应断面以上流域的面雨量。

### 1.2 干旱指数及趋势

干旱指数是监测干旱和量化其特征的有效工具, 运用 *SPI* 和 *SRI* 来量化气象干旱和水文干旱。两项指数因简便、多时间尺度、适用性强等特点, 在干旱频率分析和干旱风险管理中广泛应用<sup>[17,32]</sup>。*SPI* 是基于移动平均的指数, 通过量化特定间隔内的累积降水 (例如, 1、3、6、12 个月等) 并将其与类似时期的平均降

水量相联系, 以洞察相对于常态的偏差。*SPI* 量化了高于或低于平均记录的标准偏差, 反映降水异常的幅度。*SRI* 的计算亦同理。

为了确定干旱事件的严重程度, 按世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 的建议<sup>[33]</sup>, 采用下列阈值来划分等级 (见表 1)。

表 1 干旱等级标准

Table 1 Drought classification criteria

Level	Category	Value of <i>SPI/SRI</i>
1	无旱	>-0.5
2	轻旱	-1.0 -0.5
3	中旱	-1.5 -1.0
4	重旱	-2.0 -1.5
5	极旱	≤-2.0

使用 Mann-Kendall (M-K) 趋势法<sup>[34]</sup> 分析气象干旱和水文干旱的长期变化规律, 检测时间序列的单调趋势, 尤其适用于降水量、径流量等气象和水文变量。M-K 趋势法的优势是不受数据分布的影响, 适合于非线性时间序列数据的趋势分析<sup>[35]</sup>。其中, *Z* 统计量的符号 (+/-) 表示增加/减少趋势, 当

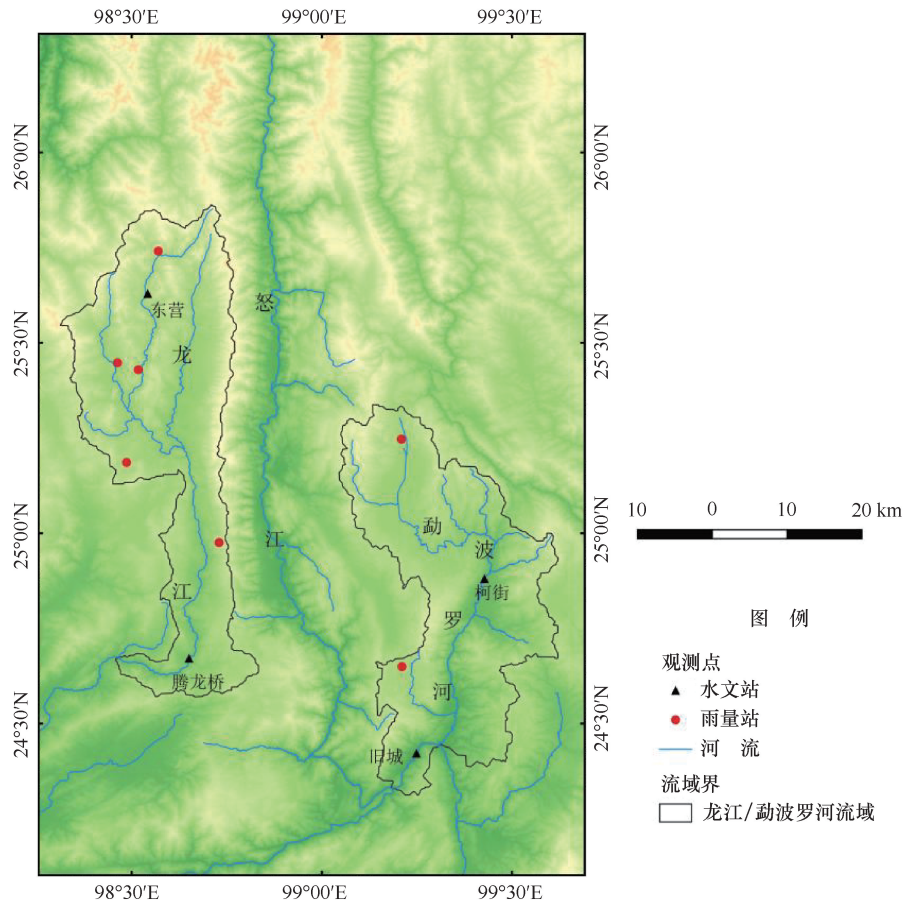


图 1 研究区示意

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

$|Z| > 1.96$  时表示该趋势在  $\alpha = 0.05$  水平上显著。

### 1.3 干旱传播特征

#### 1.3.1 干旱传播率

一般情况下因流域调蓄作用, 并非每一次 MD 都会触发水文干旱, HD 的发生也并非都由 MD 引起, 因此需要干旱匹配。采用游程理论 (Run Theory)<sup>[36]</sup> 精确匹配干旱事件, 通过时间序列中的连续低值区段标识单个干旱事件, 表征给定阈值干旱事件的游程分析 (见图 2)。将两个干旱指数序列并列放置, 使用一组给定的阈值来识别干旱事件。“游程”被解释为干旱时间序列  $X_t$  的一部分, 当该段时间内所有值都低于或高于所选定阈值  $X_b$  时, 分别称为“负游程”或“正游程”<sup>[37-38]</sup>。即干旱事件的发生是序列  $X_t < X_b$  的时刻 (对应时间记为  $T_b$ ), 持续一段时间到  $X_t > X_b$  时干旱结束 (对应时间记为  $T_e$ )。

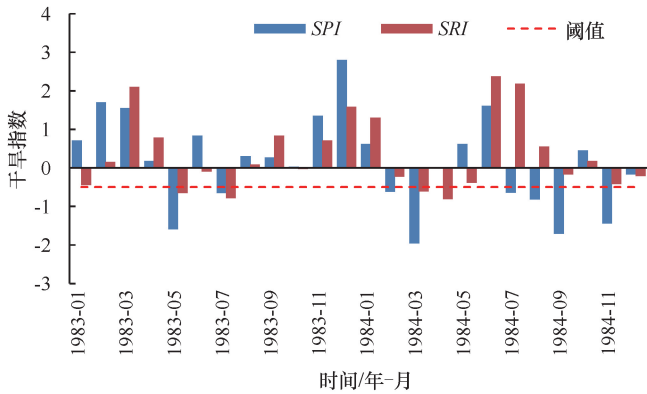


图 2 基于游程理论的干旱分析

Fig. 2 Drought analysis based on run theory

SATTAR 等<sup>[23]</sup>为考察气象干旱对水文干旱传播的敏感性, 提出了传播率, 即记录期内与 MD 匹配的 HD 事件数与总 MD 事件数之比为

$$r_1 = n_{(H-M)} / n_M \quad (1)$$

$$r_2 = n_{(H-M)} / n_H \quad (2)$$

式中,  $r_1$  为干旱传播率, 表示气象干旱导致的水文干旱占总气象干旱的比例;  $r_2$  为衡量 HD 对 MD 的依赖程度;  $n_{(H-M)}$  表示与 MD 匹配的 HD 事件数;  $n_M$ 、 $n_H$  分别表示发生 MD、HD 的总次数。

为测试干旱传播率对不同起始阈值的敏感性, MD 使用两个不同起始阈值 (-0.5、-0.3), 对于干旱结束则采用 -0.5; HD 起始与结束阈值均取 -0.5。

#### 1.3.2 干旱历时与严重程度

根据游程分析结果计算干旱事件历时 ( $T_e - T_b$ ) 以及干旱严重度。干旱严重度是对干旱期间的水量累积亏缺的度量, 即低于阈值  $X_b$  的干旱指数总和

的绝对值<sup>[39]</sup>。

#### 1.3.3 干旱传播及恢复的滞后时间

根据识别的干旱事件计算 MD 向 HD 传播的滞后时间以及恢复滞后时间。干旱传播滞后时间即传播时间, 是两类干旱事件起始时间的时差<sup>[16]</sup>, 具体为

$$\Delta T_b = T_{b_H} - T_{b_M} \quad (3)$$

式中,  $\Delta T_b$  为干旱传播时间;  $T_{b_H}$  为水文干旱开始时间;  $T_{b_M}$  为气象干旱起始时间。

同理, 计算 MD、HD 事件结束的时间差 ( $\Delta T_e$ ) 作为恢复滞后时间<sup>[16-40]</sup>, 具体为

$$\Delta T_e = T_{e_H} - T_{e_M} \quad (4)$$

式中,  $\Delta T_e$  为干旱恢复滞后时间;  $T_{e_H}$  为水文干旱结束时间;  $T_{e_M}$  为气象干旱结束时间。

根据选定的干旱阈值遍历干旱指数序列, 提取干旱事件。在 HD 序列上查找发生在 MD 事件后且位于最长滞后时间范围内的最近一个 HD 事件, 最长滞后时间限制为 12 个月<sup>[41]</sup>。另外使用 MPCC 估计传播时间, 与游程理论的传播时间相比较。

### 1.4 HD 的预测模型

为深入探讨气象干旱对水文干旱的影响, 用 MPCC 方法获得的  $SPI_m$  来对  $SRI_1$  的等级进行预测。考虑到气象和水文干旱关系的不确定性, 采用序数概率回归 (Ordinal Probit Regression), 它是一个将线性回归基本思想与序数结果概率的阈值累积正态模型相结合的模型<sup>[42]</sup>, 为未来 HD 事件早期预警提供量化参考。对  $SPI_m$  与  $SRI_1$  分布进行测试, 选择合适的先验分布, 再根据表 1 标准将  $SRI_1$  转换为干旱等级。

上述分析使用 R 软件 (版本 4.3.0, <https://cran.r-project.org/>) 进行。其中  $SPI$ 、 $SRI$  指数采用 “ClimInd” 包计算, 计算月时间尺度的  $SPI_m$  ( $m = 1, 2, 3, \dots, 9, \dots$ ) 和  $SRI_1$ 。序列的 M-K 趋势采用 “trendchange” 包进行计算。序数概率回归使用 “rstan” “brms” 包。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱指数的趋势特征

对劂波罗河、龙江  $SPI_1$  与  $SRI_1$  时间序列 (1981—2020 年) 进行 M-K 检验 (见表 2)。 $SPI_1$  指标在两个流域均呈波动下降趋势 ( $Sen$  斜率为  $-0.008/a$ ), 表明气象干旱总体呈增强趋势。 $SRI_1$  在劂波罗河上游、劂波罗河下游以及龙江上游表现显著的总体下降趋势, 其斜率分别为  $-0.016/a$ 、 $-0.013/a$ 、 $-0.018/a$ , 而龙江下游表现不显著的上升趋势 ( $Sen$  斜率为  $0.002/a$ )。

表2 干旱指数趋势检验 (M-K 检验)

Table 2 Trend analysis of drought indices (M-K test)

河 段	SPI1		SRI1	
	Z	Sen 斜率/a <sup>-1</sup>	Z	Sen 斜率/a <sup>-1</sup>
勐波罗河上游	-2.16	-0.008 3	-3.88	-0.015 6
勐波罗河下游	-2.22	-0.008 3	-3.35	-0.013 2
龙江上游	-2.21	-0.008 0	-4.63	-0.018 0
龙江下游	-2.33	-0.007 9	0.48	0.001 8

## 2.2 干旱事件特征

### 2.2.1 干旱传播率

使用游程理论对 SPI1 与 SRI1 序列进行干旱事件的识别和匹配。对于 MD 分别取  $X_b$  等于 -0.5、-0.3 作为干旱开始的阈值, 以  $X_e$  等于 -0.5 为干旱结束阈值; 对于 HD 开始与结束阈值均取 -0.5。根据 MD、HD 事件识别结果评估两个流域的干旱发生频率。结果表明: MD 事件发生的频率大于 HD 事件发生频率。其中, MD 在勐波罗河上游发生频率最高, 为 2.5 次/a, 龙江下游发生频率最低, 为 2.2 次/a。而 HD 在龙江上游发生频率最高, 为 1.5 次/a, 在勐波罗河上游最低, 为 1.1 次/a。两个不同 MD 起始阈值计算的干旱传播率  $r_1$  及  $r_2$  (见表 3、表 4) 所示。

表3 气象干旱起始阈值为-0.5时的干旱传播率

Table 3 Drought propagation rate under MD threshold of -0.5

河 段	$n_M$	$n_H$	$n_{(H-M)}$	$r_1$	$r_2$
勐波罗河上游	101	52	43	0.43	0.83
勐波罗河下游	97	60	54	0.56	0.90
龙江上游	97	72	58	0.60	0.81
龙江下游	87	66	48	0.55	0.73

从分析看龙江上游 MD 向 HD 的传播率较高, 在 MD 起始阈值等于 -0.5、-0.3 时分别为 60% 和 54%; 而勐波罗河上游的 MD 传播率较低, 仅为 43%、42%。与传播率  $r_1$  相比,  $r_2$  则普遍较高, 表明虽然 MD 并不一定完全能够传播到 HD, 但大部分 HD 的发生与 MD 关系密切。在勐波罗河下游约 90% 的 HD

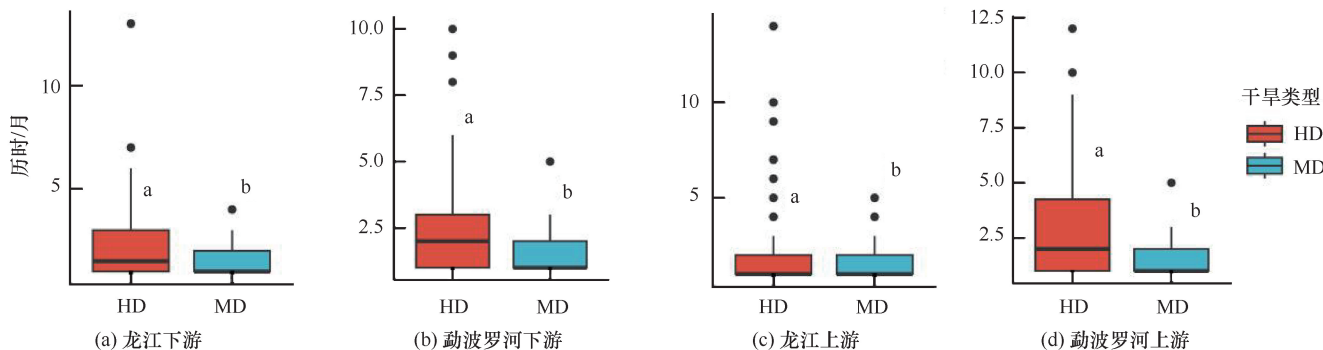


图3 干旱历时对比

Fig. 3 Comparison of drought duration

表4 气象干旱起始阈值为-0.3时的干旱传播率

Table 4 Drought propagation rate under MD threshold of -0.3

河 段	$n_M$	$n_H$	$n_{(H-M)}$	$r_1$	$r_2$
勐波罗河上游	108	52	45	0.42	0.87
勐波罗河下游	107	60	54	0.50	0.90
龙江上游	110	72	59	0.54	0.82
龙江下游	106	66	56	0.53	0.85

事件与 MD 相关; 在龙江下游也有 73% 的 HD 事件与 MD 相关联。若用更高的 MD 起始阈值(如 -0.3)来界定 MD 时, 与 MD 能匹配上的 HD 事件在总的 HD 中占比更高, 说明部分弱的 MD 也可能通过长期的积累传播引起 HD。

### 2.2.2 干旱历时与严重度

总体上, MD 比 HD 事件的历时短, MD 平均历时 1.37~1.46 个月, 而 HD 平均历时 2.18~3.04 个月(见图 3), HD 的历时变差较大。勐波罗河上游、下游及龙江上游、下游最长一次 MD 历时分别为 5、5、5、4 个月。其中勐波罗河上游和下游为 2009 年 10 月—2010 年 2 月; 龙江上游、下游分别为 1998 年 12 月—1999 年 4 月, 1998 年 12 月—1999 年 3 月。勐波罗河上游和下游以及龙江上游、下游最长的一次 HD 历时分别为 12、10、14、13 个月, 对应的时间分别是: 2005 年 5 月—2006 年 4 月, 2005 年 7 月—2006 年 4 月, 2009 年 2 月—2010 年 3 月, 1994 年 4 月—1995 年 4 月。

MD 与 HD 的严重度差异不显著, MD 平均严重度在 0.72~0.80, 而 HD 平均在 1.18~1.76, HD 严重度的变差较大(见图 4)。勐波罗河上游和下游以及龙江上游、下游最强的一次 MD 的严重度分别为 3.8、2.8、3.5、2.3, 而最强的一次 HD 严重度分别为 8.9、9.1、6.7、12.1。

### 2.2.3 干旱传播与恢复时滞

MD 到 HD 的传播时滞短于恢复时滞, 平均传播时滞为 0.5~0.7 个月, 而恢复时滞平均为 1.2~2.2 个

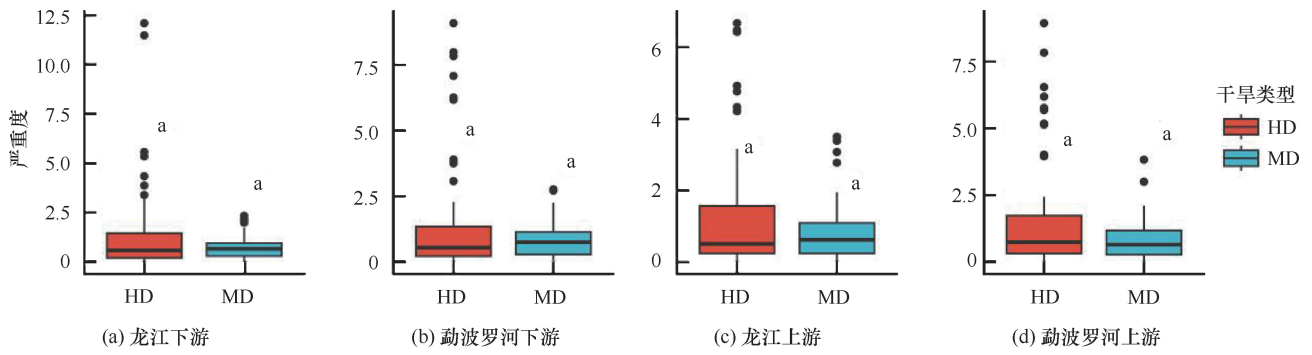


图4 干旱严重度对比

Fig. 4 Comparison of drought severity

月(见表5)。显示传播时滞最长的一次为7个月(勐波罗河下游 MD 始于2009年10月, HD 始于2009年7月);恢复时滞最长的一次为12个月,发生在龙江上游。该次干旱传播和恢复过程比较典型,虽然 HD 事件历时长达14个月(2009年2月—2010年3月),但 MD 出现多次短期盈亏震荡:降水亏缺始于2008年11月,到2009年1月突破-0.5的阈值,历时3个月,之后在2009年4月, *SPI* 恢复到-0.5以上,2个月后 *SPI* 再次下降至-0.5以下,随后是两次相似的降水盈亏震荡至2010年2月。频繁的降水盈亏动态,使得 *SRI* 无法在短期内响应 *SPI* 恢复。基于 *SPI<sub>m</sub>* ( $m=1$  至 9) 与 *SRI1* 的最大皮尔森相关分析显示:勐波罗河大约在 *SPI7* 时达到最大(0.73),龙江大约在 *SPI3* 时达到最大(0.70),显示在更长的时间尺度上干旱传播时滞更长。

表5 干旱事件的传播及恢复时滞

Table 5 Propagation and recovery time lag of drought events

河 段	起始滞后	结束滞后
勐波罗河上游	0.56	2.19
勐波罗河下游	0.72	1.85
龙江上游	0.52	1.16
龙江下游	0.63	1.65

### 2.2.4 HD 干旱等级预测

利用贝叶斯序数概率回归模型对两个流域中4个河段在不同累积降水亏缺水平(勐波罗河采用 *SPI7*, 龙江采用 *SPI3*)下 HD 等级进行后验概率预测。在4个河段一致显示出累积降水亏缺与 HD 等级的正相关关系[见图5(a)、图5(c)、图5(e)、图5(g)]。即 *SPI<sub>m</sub>* 值越低,发生较高等级 HD 的概率越大。另外在条形图中[见图5(b)、图5(d)、图5(f)、图5(h)]对不同 *SPI<sub>m</sub>* 阈值下的 HD 等级后验预测的分布进行了展示。

以勐波罗河上游为例[见图5(b)],当 *SPI<sub>m</sub>* 为-2.0时,HD 为4级以上的后验概率达到49%,显示气象干旱达极旱时发生重度 HD 的较大风险。随着 *SPI<sub>m</sub>* 值增至-1.0,发生4级和3级 HD 的概率分别为11%和27%,而2级 HD 的概率上升到30%,表明中度 HD 在该 *SPI<sub>m</sub>* 值下具有更高的发生可能性。

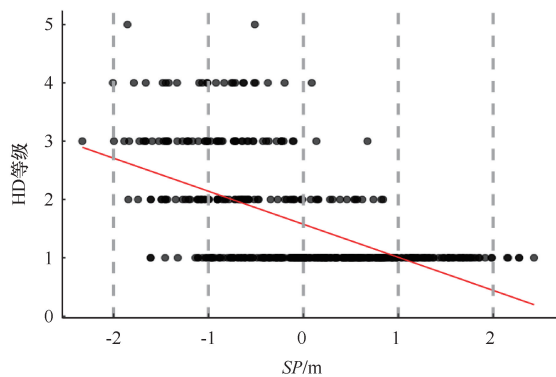
其余站点与勐波罗河上游大致相似,即当 *SPI<sub>m</sub>* 值极低时,发生重度 HD(等级4和5)的概率较高,且随着 *SPI<sub>m</sub>* 值的增加,中度 HD(等级2和3)概率上升。

从预测的不确定性看,在气象干旱为极旱时,预测的置信区间较宽,尤其在极端 HD 的预测中,显示较大的不确定性;当 *SPI<sub>m</sub>* 值增加,模型预测的置信区间较窄,预测的确定性更高。如龙江上游, *SPI<sub>m</sub>* 为-1.0时中度 HD(等级3)发生概率为29%,且置信区间较窄,预测可靠性较高。在龙江下游,当 *SPI<sub>m</sub>* 为-1.0时,中度干旱(HD 等级2)的后验概率为32%,置信区间也较窄。相反在 *SPI<sub>m</sub>* 为-1.0时勐波罗河上游,等级3、2甚至是1的 HD 的概率差异不大。

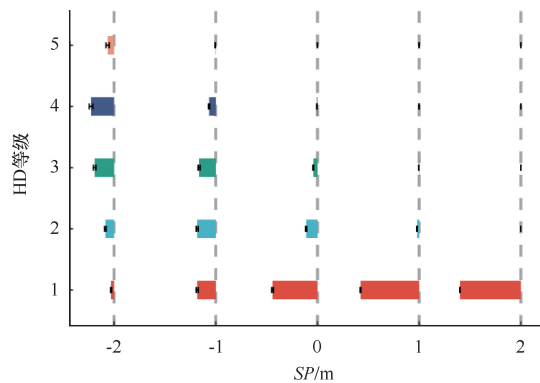
总之,序数概率回归模型在不同流域的预测结果显示了相似的趋势,但在不同流域间,预测的精确度和不确定性存在差异,尤其是在重度以上 HD 预测方面,当 *SPI* 从-1下降到-2时,转化为重度以上 HD 的概率增加28%~39%。勐波罗河上游在极端 MD 条件下,HD 主要表现为中到重度干旱;而勐波罗河下游在类似情况下则有更高概率发生极重度 HD。龙江下游对极端 MD 的响应更为强烈,发生极重度 HD 的风险增加,而龙江下游在相似的极端 MD 条件下出现极重度 HD 风险略低,更倾向于发生中度至重度 HD。

## 3 讨论

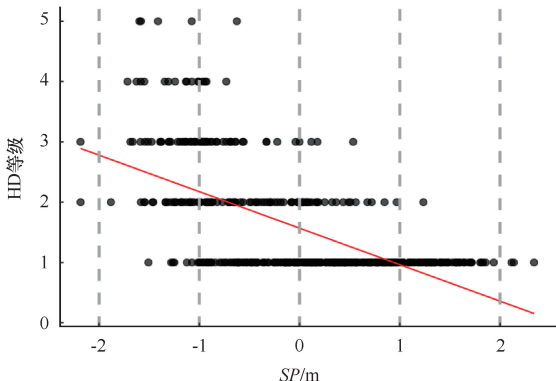
在气候变化和人类活动的综合影响下,全球干旱



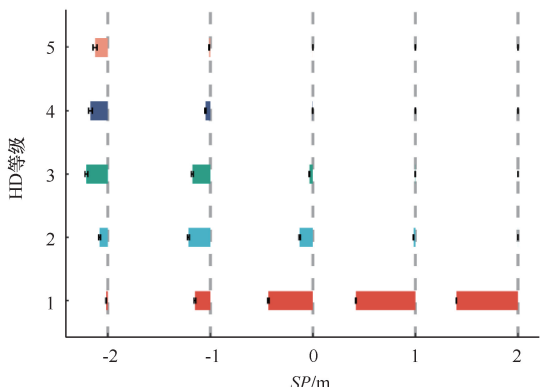
(a) 勐波罗河上游贝叶斯GLM模型



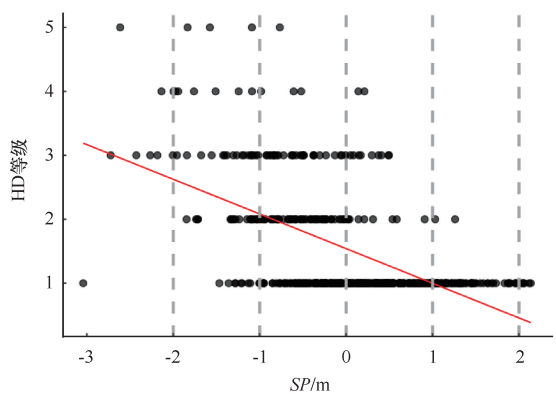
(b) 勐波罗河上游水文干旱后验预测



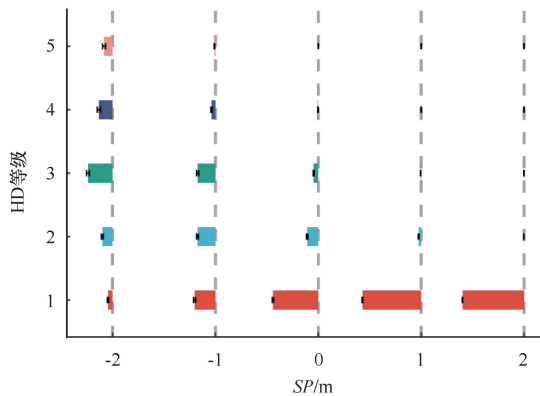
(c) 勐波罗河下游贝叶斯GLM模型



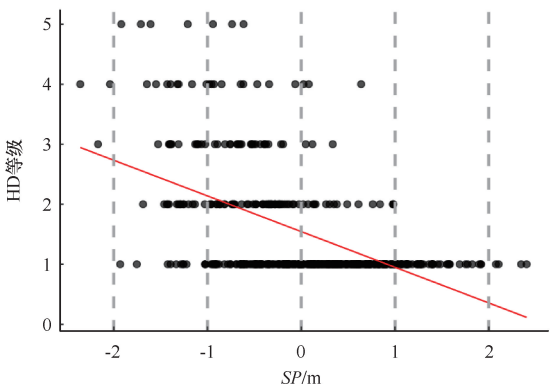
(d) 勐波罗河下游水文干旱后验预测



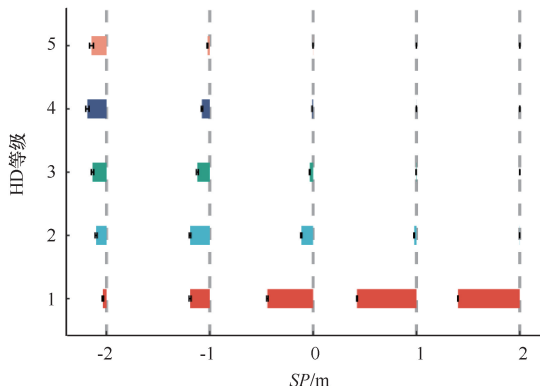
(e) 龙江上游贝叶斯GLM模型



(f) 龙江上游水文干旱后验预测



(g) 龙江下游贝叶斯GLM模型



(h) 龙江下游水文干旱后验预测

图5 河段干旱的贝叶斯GLM建模与预测可视化

Fig. 5 Bayesian GLM modeling and prediction visualization of hydrological drought in river reaches

事件发生较大变化<sup>[43-45]</sup>。高黎贡山是全球生物多样性热点地区之一,也是中国西南生态屏障的前沿,全球气候变化背景下该区气象干旱向水文传播的问题值得关注。高强度的 HD 可能会对地区的农业和其他社会经济活动造成限制。LI 等<sup>[46]</sup>强调了了解极端事件的频率和强度变化的重要性,因为此类事件往往对社会和生态系统造成更多不利影响。

此前在怒江下游通过分析 1966—2013 年标准化降水指数 *SPI* 以及标准化降水蒸散指数 *SPEI*, 提出怒江流域下游降雨总量可能减少,在干湿季(6 个月)、四季(3 个月)尺度上表现出干旱增加的趋势<sup>[47]</sup>。本次分析进一步表明该区域 MD 增加的趋势可能进一步延续。从 HD、MD 特征和关系看,HD 事件频率较 MD 低,MD 到 HD 的传播率在 43%~60%,然而一旦发生传播,HD 往往也具有较长的历时和较高的严重度。

以往的研究显示了干旱传播滞后时间的较大变异性,如中国北方地区 MD 到 HD 的传播时间从 1 个月到 12 个月不等,具有季节变化<sup>[14]</sup>。通过游程理论观察到高黎贡山南段气象干旱-水文干旱平均传播时间为 0.5~0.7 个月,极差为 0~7 个月。相关文献中常用的最大皮尔森法对传播滞后时间进行分析,对传播滞后时间的估计可能有所夸大,并凸显了流域间的差异。游程理论基于干旱事件的起始和结束,直接测量干旱事件的“起始时间差”,且倾向于捕捉较短的传播过程,尤其适用于干旱事件快速变化的地区。而最大皮尔森相关基于不同时间尺度 *SPI* 与 *SRI* 之间的相关性,计算二者之间的最大相关系数,从中导出传播时间。由于该方法依赖统计相关性,容易同时捕捉到长期趋势和季节性周期变化<sup>[48]</sup>,从而使传播时间被高估,尤其是在干旱传播跨越不同季节时。

基于游程理论的恢复滞后时间平均为 1.2~2.2 个月,极差为 0~12 个月,恢复滞后时间显示 HD 对 MD 似乎有较快的起始响应和较慢的结束响应特点。一个长期弱的脉冲式的降水亏缺信号(具体表现为波动式的降水亏缺-恢复循环),可能诱导一个长期较大的径流亏缺。由于较长的恢复滞后,径流对这种波动式的短期降水恢复还来不及做出响应。相反,降水盈余的信号将很快反映到径流上。

以上分析显示高黎贡山南段 MD 向 HD 传播特性:气象干旱事件的频率高于水文干旱事件,且 MD 向 HD 的传播率在东西坡存在显著差异;其次,两者之间的传播时间较短,但 HD 对 MD 的响应在起始阶段较快,在结束阶段较慢。这些传播特点与区域的地

形和人类活动密切相关。如,龙江上游东营水文站控制面积较小且无水电站,该区域的水文过程对气象干旱的响应较为直接。相比之下龙江下游腾龙桥水文站以上有梯级坝式电站,对径流的调节作用显著,可能导致水文干旱的传播时间延长。此外,勐波罗河上游柯街水文站控制面积大但有 2 座小型电站,而下游旧城水文站以上有多个引水式电站,且其左岸有一条来水量较大的支流,建有坝式电站。这些人类活动和地形特征的差异可能是导致气象干旱向水文干旱传播特点不同的原因。

了解纵向岭谷区 MD 向 HD 传播特性,提出相关措施缓解干旱传播带来的不利影响。一是优化气象水文监测站网建设,提高干旱预测精准度。二是强化水利工程运行管理,及时调节调度。三是加强水资源的节约和循环利用,应对纵向岭谷区的水资源短缺,有效缓解气象干旱向水文干旱传播带来的不利影响,保障区域的生态安全和社会经济的可持续发展。

## 4 结 论

采用 *SPI*、*SRI* 指标结合 Mann-Kendall 趋势检验、游程理论及贝叶斯序数概率回归等模型,探究了纵向岭谷区高黎贡山南段 MD 与 HD 的变化趋势及其传播特征,其结果如下。

(1)气象干旱显著增加,过去 40 年 MD 强度呈显著上升趋势,表明降水不足的情况可能增加;

(2)气象干旱事件的频率(2.2~2.5 次/a)高于水文干旱事件(1.1~1.5 次/a)。MD 向 HD 的传播率为中等水平(约 42%~60%),HD 的平均历时和严重度均大于 MD 的历时与严重度;

(3)气象干旱和水文干旱之间的传播时间较短。HD 对 MD 的响应在起始阶段较快,在结束阶段较慢。*SPI* 与 HD 等级呈负相关,当 *SPI* 从 -1 下降到 -2 时,转化为重度以上 HD 的概率增加 28%~39%,即降水亏缺越大,发生重度以上 HD 的概率越高,且在降水恢复后,土壤水分和地下水补给的恢复速度较慢,可能导致持续性的水文干旱风险。

## 参考文献(References):

- [1] ZHOU S, ZHANG Y, PARK WILLIAMS A, et al. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events[J]. *Science Advances*, 2019, 5: eaau5740.
- [2] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of*

- Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [3] BARKER L J, HANNAFORD J, CHIVERTON A, et al. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(6): 2483-2505.
- [4] HO S, TIAN L, DISSE M, et al. A new approach to quantify propagation time from meteorological to hydrological drought [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 127056.
- [5] 马睿, 李云玲, 邢西刚, 等. 水资源刚性约束指标体系构建及应用[J]. 人民黄河, 2023, 45(4): 76-80.
- MA R, LI Y L, XING X G, et al. Building and application of indicator system of water resources rigid constraint [J]. Yellow River, 2023, 45(4): 76-80.
- [6] 孙志英, 郑悠, 杨戈. 中国水资源国家所有权实践路径优化研究: 明晰水资源管理权与所有权的边界[J]. 绿色科技, 2021, 23(2): 223-226.
- SUN Z Y, ZHENG Y, YANG G. Research on the optimization of the practice path of China's water resources state ownership: Clarifying the boundary between water resources management authority and ownership [J]. Green Technology, 2021, 23(2): 223-226.
- [7] ELTAHIR E A B, YEH P J F. On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois [J]. Water Resources Research, 1999, 35(4): 1199-1217.
- [8] XU Y, ZHANG X, HAO Z C, et al. Characterization of agricultural drought propagation over China based on bivariate probabilistic quantification[J]. Journal of Hydrology, 2021, 598: 126194.
- [9] SVOBODA M, LECOMTE D, HAYES M, et al. The drought monitor [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1181-1190.
- [10] VAN LOON A F. Hydrological drought explained[J]. WIREs Water, 2015, 2(4): 359-392.
- [11] 杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼, 等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 18-27.
- YANG L Y, YANG X Y, REN L M, et al. Mechanisms and control strategies of cyanobacterial blooms (blue-green algae) in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 18-27.
- [12] GUO Y, HUANG S Z, HUANG Q, et al. Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels[J]. Science of the Total Environment, 2020, 712: 136502.
- [13] GU L, CHEN J, YIN J B, et al. Drought hazard transferability from meteorological to hydrological propagation[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124761.
- [14] XU Y, ZHANG X, WANG X, et al. Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: A case study in northern China [J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124147.
- [15] WU J F, CHEN X H, YAO H X, et al. Multi-timescale assessment of propagation thresholds from meteorological to hydrological drought [J]. Science of the Total Environment, 2021, 765: 144232.
- [16] BEVACQUA A G, CHAFFE P L B, CHAGAS V B P, et al. Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological droughts in Brazil[J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126902.
- [17] LUO X, LUO X, JI X, et al. Meteorological and hydrological droughts in the Lancang-Mekong River Basin: Spatiotemporal patterns and propagation[J]. Atmospheric Research, 2023, 293: 106913.
- [18] ZHANG Q, LI Y P, HUANG G H, et al. Bayesian analysis of variance for quantifying multi-factor effects on drought propagation [J]. Journal of Hydrology, 2024, 632: 130911.
- [19] HASLINGER K, KOFFLER D, SCHÖNER W, et al. Exploring the link between meteorological drought and streamflow: Effects of climate-catchment interaction[J]. Water Resources Research, 2014, 50(3): 2468-2487.
- [20] PEÑA-GALLARDO M, VICENTE-SERRANO S M, HANNAFORD J, et al. Complex influences of meteorological drought time-scales on hydrological droughts in natural basins of the contiguous United States [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 611-625.
- [21] LI J Z, GUO Y G, WANG Y X, et al. Drought propagation patterns under naturalized condition using daily hydrometeorological data[J]. Advances in Meteorology, 2018, 2018(1): 2469156.
- [22] YU M X, LIU X L, LI Q F. Responses of meteorological drought-hydrological drought propagation to watershed scales in the upper Huaihe River basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(15): 17561-17570.
- [23] SATTAR M N, LEE J Y, SHIN J Y, et al. Probabilistic characteristics of drought propagation from meteorological to hydrological drought in South Korea [J]. Water Resources Management, 2019, 33(7): 2439-2452.
- [24] DEHGANNIK 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.
- [25] LIU Q, YANG Y T, LIANG L Q, et al. Thresholds for triggering the propagation of meteorological drought to hydrological drought in water-limited regions of China [J]. Science of the Total Environment, 2023, 876: 162771.
- [26] AHMAD I, AHMAD T, REHMAN S U, et al. A detailed study on quantification and modeling of drought characteristics using different copula families[J]. Heliyon, 2024, 10(3): e25422.
- [27] XU Z G, WU Z Y, SHAO Q X, et al. From meteorological to agricultural drought: Propagation time and probabilistic linkages[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 46: 101329.
- [28] ZHU Y, LIU Y, WANG W, et al. Three dimensional characterization of meteorological and hydrological droughts and their probabilistic links[J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124016.
- [29] ZHU G F, YANG L, QIN D H, et al. Spatial and temporal variation of drought index in a typical steep alpine terrain in Hengduan Mountains[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(7): 1186-1199.
- [30] 何大明, 吴绍洪, 彭华, 等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 338-344.
- HE D M, WU S H, PENG H, et al. A study of ecosystem changes in longitudinal range-gorge region and transboundary eco-security in Southwest China[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3):

- 338-344.
- [31] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2): 2007GL032487.
- [32] WU H, HAYES M J, WEISS A, et al. An evaluation of the standardized precipitation index, the China-Z index and the statistical Z-score[J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(6): 745-758.
- [33] ZHONG F L, CHENG Q P, WANG P. Meteorological drought, hydrological drought, and NDVI in the Heihe River Basin, Northwest China: Evolution and propagation[J]. *Advances in Meteorology*, 2020, 2020(1): 2409068.
- [34] MARDEN J I, KENDALL M, GIBBONS J D. Rank correlation methods (5th Ed.) [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1992, 87(417): 249.
- [35] YUE S, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1/2/3/4): 254-271.
- [36] 葛彩莲. 应用游程理论分析无定河流域气象干旱[J]. *水利科技与经济*, 2012, 18(9): 58-59.
- GE C L. Analysis of meteorological drought in the Wuding River Basin using run-length theory [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2012, 18(9): 58-59.
- [37] MISHRA A K, SINGH V P, DESAI V R. Drought characterization: A probabilistic approach[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2009, 23(1): 41-55.
- [38] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1/2): 202-216.
- [39] YILDIRIM G, RAHMAN A, SINGH V P. Meteorological and hydrological drought hazard, frequency and propagation analysis: A case study in southeast Australia[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 44: 101229.
- [40] DAS S, DAS J, UMAMAHESH N V. Investigating the propagation of droughts under the influence of large-scale climate indices in India [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127900.
- [41] DING Y B, XU J, WANG X W, et al. Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 283: 111980.
- [42] KRUSCHKE J K. *Doing Bayesian Data Analysis: A Tutorial with R, JAGS, and Stan* [M]. 2nd ed. London: Academic Press, 2015.
- [43] MARAK J D K, SARMA A K, BHATTACHARJYA R K. Innovative trend analysis of spatial and temporal rainfall variations in Umiam and Umtru watersheds in Meghalaya, India [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 142(3): 1397-1412.
- [44] SWAIN S, MISHRA S K, PANDEY A, et al. Spatiotemporal assessment of precipitation variability, seasonality, and extreme characteristics over a Himalayan catchment [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 147(1): 817-833.
- [45] THIELEN D, SCHUCHMANN K L, RAMONI-PERAZZI P, et al. Quo vadis Pantanal? Expected precipitation extremes and drought dynamics from changing sea surface temperature [J]. *PLoS One*, 2020, 15(1): e0227437.
- [46] LI C, ZWIERS F, ZHANG X B, et al. Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models [J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(9): 3441-3460.
- [47] 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 W H, XU J, LI S C. 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.
- [48] ZARGAR A, SADIQ R, NASER B, et al. A review of drought indices [J]. *Environmental Reviews*, 2011, 19: 333-349.

(责任编辑 王海锋)