

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20231089

# 赣江源气象干旱向水文干旱的传播及降水短缺阈值分析

孙军红, 韩会明

(江西省水利科学院, 江西 南昌 330029)

**摘要:** 鉴于气象干旱向水文干旱的传播对基于气象信息的气象干旱管理和水文干旱预警系统至关重要, 利用赣江源流域近 60 年逐月气象水文数据, 研究气象干旱向水文干旱传播的规律, 并探讨了子流域之间干旱传播的差异。结果表明, 气象干旱向水文干旱传播方式多样, 以一一对应的传播方式为主; 干旱事件从气象传播到水文后其危害性增大; Logistic 模型可较好地反映水文干旱特征对降水短缺条件的响应关系; 大型水库对流域的抗旱能力具有明显的提升效果。

**关键词:** 干旱传播; 气象干旱; 水文干旱; 响应关系

**中图分类号:** P468; [TV11]

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)12-0005-05

## 1 引言

气象干旱是由降水量和蒸发量的长期水分收支失衡引发, 它可能通过水循环过程进一步导致径流、湖泊和水库的水量不足, 从而可能诱发水文干旱。由于直接影响着供水系统, 水文干旱的发生可能导致工农业生产力下降, 对粮食安全和粮食安全构成威胁<sup>[1]</sup>。因此, 水资源管理者需阈值指标来提前做出预警, 以降低干旱灾害损失。干旱是降水负异常信号的长期累积结果, 该信号在水循环传播导致干旱的现象称为干旱传播。一般水文干旱往往是气象干旱累积造成的, 两者存在着密切联系<sup>[2]</sup>。因此, 聚焦于研究气象干旱向水文干旱的传播关系, 包括传播过程、传播时间、传播阈值和影响等至关重要。其中, 传播阈值因对干旱预警和缓解具有重要意义而广受关注。以往有关干旱传播阈值的研究主要是基于构建气象干旱和水文干旱之间的确定性模型, 如吴杰峰等<sup>[3]</sup>研究了气象和水文干旱之间历时、烈度之间的响应关系; 刘永强等<sup>[4]</sup>建立了气象干旱与水文干旱的 Copula 函数模型, 确定了触发水文干旱的气象干旱历时和烈度阈值。然而, 以往研究大多以干旱特征(如干旱历时和烈度)作为预警指标, 其指标结果较绝对且不方便监测。另一方面, 干旱传播受到流域调节、人类活动、气候变量等众多因素的

影响, 使气象干旱向水文干旱传播的方式复杂, 并非是一一对应的, 而传递方式的差异将影响降水短缺条件的确定, 进而对干旱阈值产生影响。所以, 进一步研究气象干旱向水文干旱的传播方式将有助于提高干旱传播阈值的精度。鉴于此, 本文探讨赣江源流域气象干旱向水文干旱的传播方式, 并设置了合理的预警指标, 以期对干旱早期预警提供帮助。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况与数据来源

赣江是鄱阳湖流域五条支流中最大的一条, 入湖水量占整个流域的 60% 以上。赣江发源于赣州, 上游主要由平江、贡水、桃江三条一级支流汇聚, 流域总面积  $2.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 属于亚热带季风气候, 年内降水不均匀, 贡水、桃江、平江流域年平均降水分别为 1 647、1 569、1 536 mm, 降雨主要集中在 4~6 月的汛期, 季节性干旱事件频发。研究区是主要的农业区, 植被丰富。另外, 在三个子流域中, 平江建有长冈大型水库, 库容为  $3.716 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 贡水建有团结大型水库, 库容为  $1.457 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 桃江无大型水库。赣江流域概况见图 1。本文使用了赣江源流域 1960~2019 年逐月气象数据(该数据来源于江西省气象信息中心)及贡水、桃江、平江三个子流域的控制性水文站 1960~

**收稿日期:** 2023-07-03, **修回日期:** 2023-08-01

**基金项目:** 江西省水利厅科技项目(202223YBKT05, 202223YBKT16, 202224ZDKT06); 江西省自然科学基金资助项目(20232BAB213076)

**作者简介:** 孙军红(1982-), 女, 高级工程师, 研究方向为水资源规划, E-mail: 45535964@qq.com

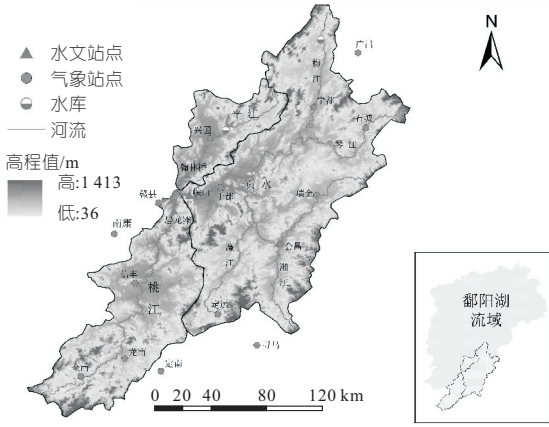


图 1 赣江流域概况

Fig. 1 Survey map of Ganjiang River Basin

2019 年逐月径流数据(该数据来源于江西省水文监测中心)。

### 2.2 气象和水文干旱指数

SPEI 指数为基于降水量和潜在蒸散量之间的简化水平衡的指数,具有标准化降水指数(SPI)的多时间尺度和帕默尔干旱指数(PDSI)考虑了干旱程度与蒸散量之间关系的双重优点,使用三参数的 Log-Logistic 概率密度函数拟合降水量和蒸发量之间的差值,然后将累积概率转换为标准正态分布,以获得 SPEI 值。此外,SHUKLA S 等<sup>[5]</sup>提出从水文角度反映干旱,使用伽马分布对径流拟合,然后将累积概率转换为标准正态分布,以获得标准化径流指数(SRI)值。基于 SPEI 和 SRI 的干旱分类见表 1。

表 1 SPEI 和 SRI 定义干旱划分标准

Tab. 1 Drought and flood classification standard

SPEI	旱涝类型	SRI	旱涝类型
$-0.5 < \text{SPEI}$	无旱涝	$-0.5 < \text{SRI}$	无旱涝
$-1 < \text{SPEI} \leq -0.5$	轻旱	$-1 < \text{SRI} \leq -0.5$	轻旱
$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1$	中旱	$-1.5 < \text{SRI} \leq -1$	中旱
$-2 < \text{SPEI} \leq -1.5$	重旱	$-2 < \text{SRI} \leq -1.5$	重旱
$\text{SPEI} \leq -2$	特旱	$\text{SRI} \leq -2$	特旱

### 2.3 干旱传播特征

#### 2.3.1 游程理论

使用三阈值游程理论方法(图 2)识别气象、水文干旱事件,识别过程主要包括初步判断、剔除和融合。初步判别,当 SPEI 小于  $R_1$  待定为干

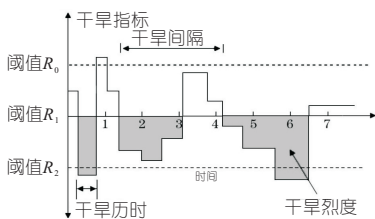


图 2 游程理论示意图

Fig. 2 Concept map of run of theory

旱;剔除非干旱事件,若干旱历时仅为 1 个月且其 SPEI 大于  $R_2$ ,则判定为非干旱事件将其剔除;干旱事件合并,当两次干旱事件间隔为 1 个月,若间隔期所对应的 SPEI 小于  $R_0$ ,则将两次干旱事件合并为一次,反之则为两次独立的干旱事件。利用游程理论识别干旱事件,并分别提取干旱事件的历时和烈度特征,取阈值  $R_0 = 0, R_1 = -0.5, R_2 = -1$ <sup>[6]</sup>。

#### 2.3.2 干旱传播时间和效率

为了探究气象干旱向水文干旱传播关系和阈值,首先需确定干旱传播时间。不同时间尺度干旱指数可反映流域的短期和长期缺水状况,随着干旱发展,也将对径流产生影响,由于流域气象干旱至水文干旱的传播时间较短,因此分别计算 1~12 个月尺度的 SPEI 与 SRI-1 之间的 Pearson 相关系数,将 SPEI- $i$  与 SRI-1 之间相关性最强时刻对应的时间尺度  $i$  作为干旱传播时间( $t_p$ )。

SATTAR M N 等<sup>[7]</sup>提出用水文干旱数量与气象干旱数量比值来表示干旱传播效率,GUO Y 等<sup>[8]</sup>对此进行修正,以触发水文干旱的气象干旱数量和总气象干旱数量比值表示。本文基于游程理论和传播时间匹配气象水文干旱事件,采用该方法描述水文干旱对气象干旱的敏感性  $T_r$ ,比值越高,说明越敏感,即:

$$T_r = (m_p / m_t) \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $m_p$  为引发水文干旱的气象干旱数量;  $m_t$  为总气象干旱数量。

#### 2.3.3 干旱传播关系

由于流域调蓄作用和人类活动影响,干旱在传播过程中会发生滞后、减缓、扩大、减弱等现象,使气象干旱与水文干旱事件并非一一对应,为更全面地反映气象干旱向水文干旱传播的特征,减少干旱传播识别结果的不确定性,对气象干旱事件与水文干旱事件逐一进行识别和匹配(图 3)。气象干旱发生( $M_s$ )、发展、衰退、直至结束( $M_e$ ),其水文响应时间内( $M_s, M_e + t_p$ )发生水文干旱,则认为该气象干旱传播形成水文干旱,即发生干旱传播事件。因此,对于一一匹配的干旱事件,气象触发条件时长为气象干旱时长( $M_{s_i} - M_{e_i}$ )。

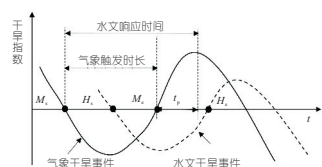


图 3 干旱传播示意图

Fig. 3 Schematic diagram of drought propagation

对于一次气象干旱引发两场相邻的水文干旱事件,第一场水文干旱的气象触发条件时长为气象干旱开始至第一场水文干旱结束( $M_{s_i}, H_{e_i}$ ),第二次水文干旱事件的气象触发条件时长为气象干旱开始至第二次水文干旱事件开始( $M_{s_i}, H_{s_{i+1}}$ )。对于多个气象干旱事件引发水文干旱事件,则气象触发条件时长为第一次气象干旱开始到最后一次气象干旱结束( $M_{s_i}, M_{e_n}$ )。

### 2.3.4 降水短缺条件

为了获得更方便的干旱阈值指标,通过匹配气象干旱和水文干旱,确定降水短缺条件。以气象触发时长内的降雨累积不足作为阈值指标,每个水文干旱事件对应的降水短缺条件均是根据气象水文干旱事件一一匹配得到,计算公式为:

$$P_{PD_i} = P_i - P_{PET_i} \quad (2)$$

$$C_{CPD_n} = \sum_{i=1}^n P_{PD_i} \quad (3)$$

式中, $P_{PD_i}$  为水分盈亏状态; $P$ 、 $P_{PET}$  分别为降水量、潜在蒸散发量, $P_{PET}$  根据 Penman-Monteith 公式计算; $C_{CPD_n}$  为水文干旱匹配的气象干旱气象触发时间时长  $n$  个月内降水累积短缺; $i$  为匹配的干旱事件。

确定干旱事件降水短缺条件、水文干旱历时和烈度特征要素,采用线性回归和非线性回归模型拟合降水短缺条件与干旱特征之间的关系,拟合的决定系数  $R^2$  越高,则拟合效果越好。

## 3 结果与分析

### 3.1 传播时间

通常水文干旱发生时间晚于气象干旱,即水文干旱对气象干旱的响应存在滞后效应。通过计算不同时间尺度气象干旱序列 SPEI- $n$  和 1 个月时间尺度水文干旱序列 SRI-1 之间的最佳相关系数来确定干旱传播时间,图 4 为相关系数图。由图 4 可知,三个子流域 SPEI- $n$  和 SRI-1 之间的相关系数均呈先增后减的变化过程,且贡水和桃江流域 SRI-1 与 6 个月时间尺度的 SPEI 相关性最强,平江流域为 7 个月时间尺度,表明赣江源流域水文干旱传播时间分别为 6、6、7 个月。

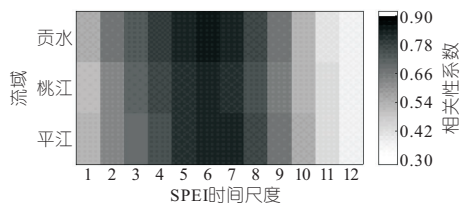


图 4 干旱传播时间

Fig. 4 Drought propagation time

### 3.2 传播关系

根据流域气象水文干旱传递方式总结了 4 种常见的干旱传播形式(以桃江流域水文干旱为例,见图 5):①第 1 类。无明显传递。分为两种情况,一种是由于人类活动和流域调节等综合作用,气象干旱事件得到缓解,并未引发水文干旱事件(图 5(a));另一种则是由于人类活动的影响,导致流域发生人为水文干旱事件,这种事件通常是由于水量平衡非常脆弱,外界影响很易打破平衡,导致干旱事件发生(5(b))。②第 2 类。一场气象干旱引发一场水文干旱事件(图 5(c)),水文干旱

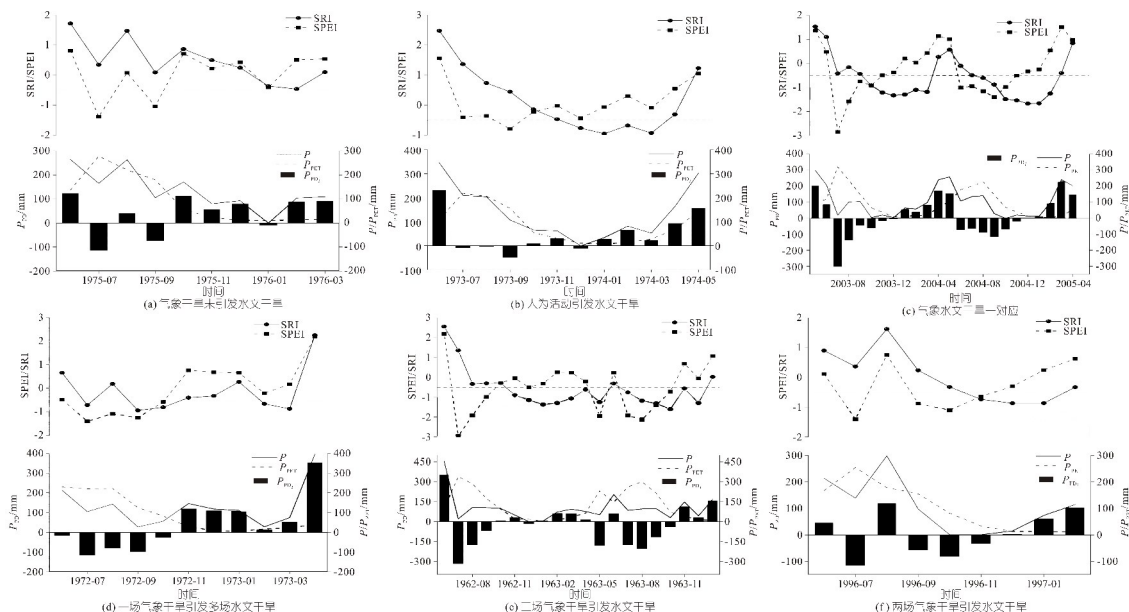


图 5 干旱传播类型关系

Fig. 5 Relationship between drought propagation types

由一次持续多个月的气象干旱引发,在之后被降水事件终结,这类干旱传递方式是流域最主要的方式;③第3类。一场气象干旱引发多场水文干旱事件(图5(d)),1972年7~10月的气象干旱事件先是引发第一场水文干旱事件,但随后降水增加使流域处于干旱恢复期,流域脆弱的水平衡被 $P_{PD}$ 偏小打破,引发第二次水文干旱事件;④第4类。多场气象干旱事件引发水文干旱事件(图5(e)、(f)),主要由于降水事件强度较弱或是高强度降水事件历时短,使流域长期缺水状态并未得到改善。其中,图5(e)中,流域1962年11月~1963年12月发生了历时最严重的水文干旱事件,持续时间长达14个月,该次水文干旱事件是由3次气象干旱共同引发。图5(f)中,第一次气象干旱被短期强降水事件打断,之后连续3个月降水不足,引发水文干旱事件发生。

### 3.3 干旱特征

干旱事件匹配前后特征见表2。由表2可知,检测到气象干旱事件183次,水文干旱事件152次,贡水流域发生气象干旱最多,但水文干旱最少;干旱传播率表明,平江流域干旱传播率低于其他子流域。图6为气象水文干旱事件匹配前后特征。由图6可知,三个子流域气象干旱历时和烈度箱型图整体位于水文干旱下方,气象干旱平均历时和烈度均小于水文干旱,表明干旱事件从气象传播到水文后其危害性增大。同时,气象干旱历时和烈度相对集中,水文干旱历时和烈度变幅明显大于气象干旱。三个子流域中,平江流域在干旱从气象传播到水文后,其干旱历时和烈度增幅明显小于其他流域,贡水流域水文干旱历时和烈度最大,说明贡水流域水文干旱风险更高。

表 2 气象水文干旱特征

Tab. 2 Meteorological and hydrological drought characteristics

流域	气象干旱事件( $M_i$ )	水文干旱事件( $H_i$ )	匹配后气象干旱事件( $M_p$ )	匹配后水文干旱事件( $H_p$ )	干旱传播率( $T_i$ )
贡水	63	49	55	49	0.87
桃江	62	53	56	50	0.90
平江	58	50	49	47	0.84

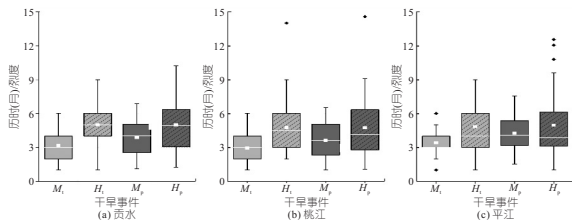


图 6 干旱事件特征

Fig. 6 Characteristics of drought events

### 3.4 传播响应

确定降水短缺条件和水文干旱特征序列,以

水文干旱特征为目标,以降水累积短缺为条件,利用线性拟合、多项式拟合和非线性拟合分别构建降水短缺条件和水文干旱特征之间的响应关系模型并进行对比,结果见表3。由表3可知,三条子流域中,平江流域响应关系拟合度较低,但不同响应关系模型的 $R^2$ 均在0.4以上,结果通过了95%显著性水平检验,表明赣江源水文干旱特征与降水短缺条件有明显的响应关系,其中 Logistic 模型拟合效果最佳。由线性拟合模型图(图7)可知,各流域触发水文干旱的降水短缺条件随干旱程度增加而增大,其中平江流域不同程度的水文干旱历时和烈度均对应着最大的降水短缺条件阈值,对于特定的水文干旱,引发该水文干旱的降水短缺条件越大,表明该流域的抗旱能力越强<sup>[4]</sup>,说明平江流域具有更强的抗旱能力。相比之下,贡水流域水文干旱的降水短缺条件较小,且干旱传播率高,干旱风险高。

表 3 水文干旱特征与降水短缺条件响应模型

Tab. 3 Hydrological drought characteristics and response model of precipitation shortage conditions

流域	干旱特征	响应模型	$R^2$
贡水	历时	$y=36.29x+157.88$	0.44
		$y=-2.01x^2+57.23x+115.66$	0.45
		$y=499.63-320.99/[1+(x/4.54)^{2.8}]$	0.46
	烈度	$y=35.48x+166.96$	0.57
		$y=-2.95x^2+67.8x+103.68$	0.59
		$y=956.75-981.12/[1+(x/8.73)^{0.7}]$	0.60
桃江	历时	$y=41.69x-27.08$	0.51
		$y=1.44x^2+24.02x+17.33$	0.52
		$y=530.46-440.51/[1+(x/7.14)^{5.12}]$	0.57
	烈度	$y=36.52x-0.65$	0.53
		$y=1.33x^2+20.03x+38.42$	0.54
		$y=565.4-469.8/[1+(x/7.99)^{4.57}]$	0.59
平江	历时	$y=46.52x+239.18$	0.40
		$y=4.84x^2-2.29x+340.32$	0.43
		$y=1370.46-1022.44/[1+(x/11.3)^{2.72}]$	0.43
	烈度	$y=40.03x+263.1$	0.50
		$y=-x^2+52.65x+232.62$	0.51
		$y=706.81-341.54/[1+(x/6.25)^{6.15}]$	0.57

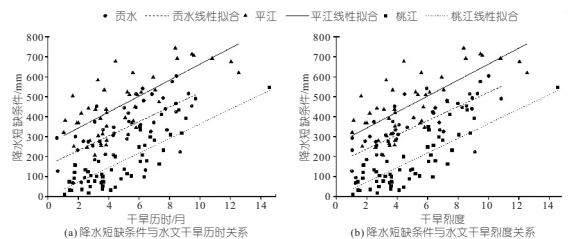


图 7 降水短缺条件与水文干旱特征线性拟合模型

Fig. 7 Linear fitting model of precipitation shortage condition and hydrological drought characteristics

## 4 讨论

干旱传播方式的差异主要受气象因素和人类活动的影响。气象干旱向水文干旱传播过程中,

降水事件可能会影响传递的连续性,影响程度与降水强弱和历时相关,如图 5(e)中,长时间的弱降水事件对水文干旱的缓解能力有限。降水和蒸散发量之间的失衡导致气象干旱,如图 5(e),虽然月平均降水量达 94 mm,但蒸散发能力是降水的 2~3 倍,因此干早期考虑蒸发量的影响是必要的。平江流域干旱传播率、水文干旱平均历时和烈度均小于其他两个流域,并具有更高的水文干旱降水短缺阈值,说明平江流域有更强的干旱抵抗能力,这可能受平江上游的长岗大型水库调度影响。虽然贡水流域也有一个大型水库,但流域水文干旱平均强度和历时均是各子流域中最高的,这可能与水库的调节能力有直接关系,长冈水库的调蓄能力为 0.16,而团结水库调蓄能力仅为 0.01。另一方面,水库运行规律不同可能导致不同的干旱特征。如 WU J 等<sup>[9]</sup>评估了珠江上游东江水库对水文干旱的影响,发现水库运行减轻了流域干旱程度,这与长岗水库对水文干旱的影响结论一致。而 XING Z 等<sup>[10]</sup>发现大凌河流域上游水库的运行导致下游水文干旱加剧。可见,气象条件和人类活动等众多因素对流域降雨径流过程产生影响,从而表现为干旱传播关系和降水短缺阈值的差异。

## 5 结论

a. 赣江源流域贡水和桃江水文干旱传播时间为 6 个月,平江流域干旱传播时间为 7 个月。

b. 干旱传播方式主要为一一传播,贡水、桃江干旱传播率分别为 0.87、0.90,平江流域干旱传播率最小为 0.84,气象干旱传播为水文干旱后事件减少,但历时和烈度增加。

c. 赣江源各子流域中,平江流域降水短缺阈值最大,干旱传播率低,该流域具有更强的抗旱能力,贡水流域水文干旱的风险更高。

d. 干旱传播方式的差异主要受气象因素和人类活动的影响,大型水库影响着流域干旱传播和干旱风险。

## 参考文献:

- [1] 刘业伟,许小华,张秀平,等. 基于 SPEI 的江西省干旱特征及其对作物受灾面积的影响[J]. 水电能源科学,2023,41(4):17-21.
- [2] 韩会明,孙军红. 赣江流域气象水文干旱传播特征分析[J]. 中国农村水利水电,2022(12):101-106.
- [3] 吴杰峰,陈兴伟,高路. 水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J]. 灾害学,2017,32(1):199-204.
- [4] 刘永强,黄生志,郭怿,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.
- [5] SHUKLA S, WOOD A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. Geophysical research letters, 2008, 35 (2): L02405.
- [6] 韩会明,刘喆玥,刘成林,等. 基于 Copula 函数的赣江流域气象干旱特征分析[J]. 水电能源科学,2020,38(8):9-13.
- [7] 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.
- [8] GUO Y, HUANG S, 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.
- [9] WU J, YUAN X, YAO H, et al. Reservoirs regulate the relationship between hydrological drought recovery water and drought characteristics [J]. Journal of hydrology, 2021, 603: 127127.
- [10] XING Z, MA M, ZHANG X, et al. Altered drought propagation under the influence of reservoir regulation [J]. Journal of hydrology, 2021, 603: 127049.

## Analysis of Meteorological and Hydrological Drought Propagation Characteristics in Ganjiang River Basin

SUN Jun-hong, HAN Hui-ming

(Jiangxi Academy of Water Sciences and Engineering, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** Studying the propagation of meteorological drought to hydrological drought is essential for meteorological information-based drought management and hydrological drought warning systems. Taking the Ganjiang River source basin as an example, this paper uses the basin's monthly meteorological and hydrological data for the past 60 years to study the propagation pattern of meteorological drought to hydrological drought, and explores the differences in drought propagation among sub-basins. The results show that the propagation of meteorological drought to hydrological drought has various ways, with a one-to-one correspondence; The drought events increase hazards after propagation from meteorology to hydrology; The Logistic model can better reflect the response relationship of hydrological drought characteristics to precipitation shortage conditions; The large reservoirs have a significant effect on the drought resistance of the basin.

**Key words:** drought propagation; meteorological drought; hydrological drought; response relationship