

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.007

西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征

石 朋¹, 唐 汉¹, 瞿思敏¹, 闻 童², 赵兰兰³, 李琼芳¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054;
3. 水利部水文局, 北京 100053)

摘要: 为了解西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征, 采用西南地区 1968—2017 年 101 个气象站观测资料和 8 个水文站月径流资料, 计算了标准化降雨蒸散发指数 (SPEI) 和标准化径流指数 (SRI), 基于皮尔逊相关系数 (PCC) 确定了干旱响应时间并结合游程理论识别、融合和剔除干旱事件, 构建了线性干旱传播模型并确定了西南地区部分流域气象干旱向水文干旱传播的触发阈值。结果表明: 西南地区干旱响应时间为 2~7 月; 水文干旱敏感度分布与气象干旱传播率分布较为一致; 干旱烈度传播阈值较小的流域, 水文干旱事件历时更长。

关键词: 气象干旱; 水文干旱; 干旱特征; 干旱传播; 干旱响应时间; 传播阈值; 西南地区
中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)01-0049-08

Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China // SHI Peng¹, TANG Han¹, QU Simin¹, WEN Tong², ZHAO Lanlan³, LI Qiongfang¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Development of China Drainage Irrigation Center, Beijing 100054, China; 3. Hydrology Bureau of Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China)

Abstract: To study the characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China, observation data of 101 meteorological stations and monthly runoff data of 8 hydrological stations in Southwest China from 1968 to 2017 were used to calculate standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardized runoff index (SRI). The drought response time (DRT) was determined based on the Pearson correlation coefficient (PCC), which was used to identify, pool and exclude the drought events combined with the run theory. The linear drought propagation model was constructed and the trigger thresholds of propagation from meteorological drought to hydrological drought in part of the basins of Southwest China were determined. The results indicate that the DRT in Southwest China is 2-7 months and the sensitivity distribution of hydrological drought is consistent with the drought translation rate of meteorological drought. The duration of hydrological drought event is longer in the basins with smaller propagation threshold of drought intensity.

Key words: meteorological drought; hydrological drought; drought characteristics; drought propagation; drought response time; propagation threshold; Southwest China

干旱是世界上影响范围最广、发生频率最高、持续时间最长、致灾率最高的一类自然灾害,也是众多自然灾害中造成经济损失最大的一类气象灾害^[1-2]。据统计,在各类自然灾害造成的总损失中,气象灾害造成的损失约占 85%,而干旱造成的损失又占气象灾害的 50% 左右^[3]。自中华人民共和国成立以来,我国因干旱造成的直接经济损失占干旱年 GDP 的 2.5%~3.5%,干旱已成为制约我国国民

经济发展的重要因素。

在全球气候变化的大环境下,我国干旱时空分布规律也随之发生了变化,干旱灾害逐渐从北方干旱区向南方气候湿润区发展^[4-5],其中,西南地区干旱发生频率和强度明显增加,引起了学者们的普遍关注^[6-7]。如 2009—2010 年云南、贵州等地秋冬春连旱,造成了巨大的经济损失^[8-9]。因此,全面认识西南地区干旱特征,对提高干旱灾害防御能力具有

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41730750)

作者简介: 石朋 (1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: ship@hhu.edu.cn

通信作者: 瞿思敏 (1977—), 女, 教授, 博士, 主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail: wanily@hhu.edu.cn

十分重要的意义。

根据研究目标的不同,干旱可分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱等不同类型的^[10-11]。通常情况下,气象干旱和水文干旱之间可以认为具有线性关系,可通过对干旱响应时间等关键指标的分析来研究气象干旱向水文干旱传播的特征^[12]。以往的研究多以识别得到的气象干旱和水文干旱事件之间的滞时来确定干旱响应时间^[13-15]。例如, Ding 等^[13]研究了中国不同气候区干旱事件之间的传播特征,发现大部分地区的干旱滞时不到2月。基于滞时确定干旱响应时间的评价方法可以有效地确定较长持续时间的干旱事件之间的响应时间,但对于持续时间较短的干旱过程难以确定其气象干旱和水文干旱之间是否存在传播关系,而通过干旱指数之间的相关关系确定干旱响应时间,能够考虑持续时间较短的干旱过程。

以往对西南地区干旱的研究多以气象干旱为主^[16-18],而综合气象干旱和水文干旱探究西南干旱的研究较少。本文利用标准化降雨蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)和标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)序列确定干旱响应时间,并以干旱响应时间为约束条件,基于游程理论和数学函数建立了干旱传播模型,并量化了西南地区气象干旱特征和水文干旱特征之间的关系,以期利用气象数据预测西南地区水文干旱提供参考。

1 研究区概况和研究数据

1.1 研究区概况

研究区(图1)位于我国西南的长江上游地区,包括四川、贵州、云南、重庆和广西5个省(自治区、直辖市),地处四川盆地和云贵高原,东邻长江中下游平原,以湿润半湿润的亚热带季风气候为主,多年平均降水量约为1058 mm,标准差为58 mm,年平均气温约为16.25℃,受亚热带季风和西南季风影响,夏季炎热多雨,冬季降水偏少,降水量时空分布极不均匀,整体呈东多西少的分布形态。研究区内共有8个水文站,控制流域分别为元江流域(2.15万km²)、江边街流域(3.16万km²)、三汇流域(3.32万km²)、允景洪流域(7.26万km²)、武隆流域(7.61万km²)、五通桥流域(12.09万km²)、梧州流域(32.70万km²)和万县流域(63.08万km²),8个流域均为山区流域,且径流过程受积雪融化及水利工程的调节影响较小,近似天然径流过程。研究区由降水不足的气象干旱引起的水文干旱多发,基本可视为线性关系。

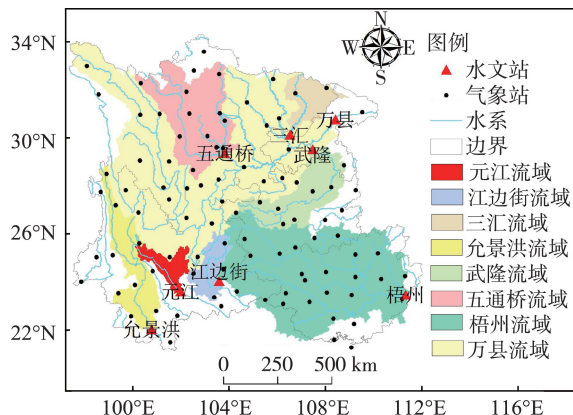


图1 研究区及气象、水文站点位置

Fig. 1 Location of study area, meteorological and hydrological stations

1.2 研究数据

1968—2017年101个气象站逐日降水数据由中国气象数据服务中心(data.cma.cn)提供,利用日照时间和平均气温两个气候变量计算潜在蒸散发量并按月汇总,在计算得到单站点的潜在蒸散发量后,选取各流域内或邻近流域的气象站点并用算术平均法计算流域面平均降水量和面平均潜在蒸散发量以计算气象干旱指数。依据水利部信息中心提供的8个水文站1968—2017年逐月自然径流数据计算水文干旱指数。

2 研究方法

2.1 干旱指数

SPEI和SRI能描述不同时间尺度的干旱特征,在水文气象领域得到了广泛应用^[19-21]。本文分别用SPEI和SRI来描述气象干旱和水文干旱。SPEI和SRI的计算过程如下:①根据需求选择合适的时间尺度(如3月的时间尺度一般用来描述季节性干旱,12月的时间尺度一般用来描述年干旱);②用概率分布函数分别拟合降水量与潜在蒸散发量的差值序列与径流序列;③进行等概率变换,将偏态序列进行正态标准化处理。详细计算过程可参见文献^[22]。

基于1968—2017年的气象资料和径流数据,计算不同时间尺度(1~12月)的SPEI(SPEI-1~SPEI-12)和1月尺度的SRI(SRI-1)。参照GB/T 20481—2017《气象干旱等级》规定的标准,SPEI和SRI的干旱等级划分如表1所示。

2.2 干旱响应时间

已有研究大多通过计算不同时间尺度的干旱指数之间的相关关系或人为设置不同滞时的干旱指数序列来计算干旱响应时间,均明确表明水文干旱对

表1 SPEI 和 SRI 的干旱等级划分

Table 1 Classification of drought grade on SPEI and SRI

等级	干旱程度	SPEI	SRI
1	无旱	> -0.5	> -0.5
2	轻旱	> -1.0 ~ -0.5	> -1.0 ~ -0.5
3	中旱	> -1.5 ~ -1.0	> -1.5 ~ -1.0
4	重旱	> -2.0 ~ -1.5	> -2.0 ~ -1.5
5	特旱	≤ -2.0	≤ -2.0

气象干旱的响应存在滞后现象^[12-15]。本文利用皮尔逊相关系数^[23] (Pearson correlation coefficient, PCC) 分析不同时间尺度的气象干旱 (SPEI-1 ~ SPEI-12) 和 1 月尺度的水文干旱 (SRI-1) 之间的相关性, 将最大皮尔逊相关系数对应的 SPEI 时间尺度作为干旱响应时间。具体计算步骤如下: ① 计算 SPEI-1 ~ SPEI-12; ② 计算 SRI-1; ③ 计算 SPEI-1 ~ SPEI-12 与 SRI-1 之间的皮尔逊相关系数, 最大皮尔逊相关系数对应的 SPEI 时间尺度就是该流域的干旱响应时间。

2.3 干旱敏感性

由于流域的调蓄作用, 并非每一次气象干旱都会触发水文干旱, 水文干旱的发生也并非都由气象干旱引起, 本文以 N_{m-h} 表示由气象干旱引起的水文干旱次数, N_h 表示水文干旱总次数。此外, 一次水文干旱过程可能由一次气象干旱或者多次气象干旱引起, 以 N_{h-m} 表示引起水文干旱的气象干旱次数, N_m 表示气象干旱总次数。Sattar 等^[24] 提出了干旱传播效率 (记录期内 N_h 与 N_m 的比值) 来衡量水文干旱对气象干旱的敏感性, 干旱传播效率越高, 说明水文干旱对气象干旱越敏感。Guo 等^[25] 修正了干旱传播效率, 用 N_{h-m} 与 N_m 的比值来表示干旱传播率。本文基于干旱响应时间和游程理论对气象干旱和水文干旱进行匹配后, 采用干旱传播率来表征气象干旱向水文干旱的传播率 (本文称为气象干旱传播率 (T_{r1})), 用 N_{m-h} 与 N_h 的比值来表示水文干旱对气象干旱的敏感度 (本文称为水文干旱敏感度 (T_{r2})), 即:

$$T_{r1} = N_{h-m} / N_m \quad (1)$$

$$T_{r2} = N_{m-h} / N_h \quad (2)$$

2.4 干旱传播模型的构建

干旱传播模型的构建包括 3 个步骤: ① 基于游程理论识别干旱事件并进行融合与剔除, 提取干旱特征^[4,17,26]; ② 根据确定的干旱响应时间匹配干旱事件; ③ 根据干旱特征 (干旱历时 D 和干旱烈度 S) 构建传播模型。本文采用 SPEI-1 和 SRI-1 来识别干旱事件, 并提取干旱特征。干旱历时是指干旱事件持续时间, 干旱烈度是干旱历时内干旱指标值与

阈值之差的累积和, 取其绝对值。

本文不仅通过游程理论对干旱事件进行识别, 同时采用了干旱事件的融合和剔除方法 (图 2) 以减少历时短烈度小的干旱事件对统计特征产生的影响。具体步骤如下^[27]: ① 当干旱指数 (R) 小于 R_1 , 初步识别为干旱事件; ② 对于间隔时间为 1 月的 2 个干旱事件, 若间隔月份的干旱指数小于 R_0 , 则将这 2 个干旱事件融合为 1 个干旱事件, 如图 2 中干旱事件 a 和 b, 将其融合为干旱事件 2, 其融合后的干旱历时为 6 月, 干旱烈度为干旱事件 a 和干旱事件 b 的烈度之和; ③ 由于西南地区多发干旱历时较长的干旱事件, 对于小干旱事件可以剔除, 即对于干旱历时仅为 1 月的干旱事件, 若该月份的干旱指数值大于 R_2 , 该干旱事件应被剔除。如图 2 中干旱事件 1, 其干旱指数值小于 R_2 , 未被剔除。图 2 中, R_0 取 0; R_1 为判断干旱事件的阈值, 取 -0.5; R_2 为判断中旱事件的阈值, 取 -1。

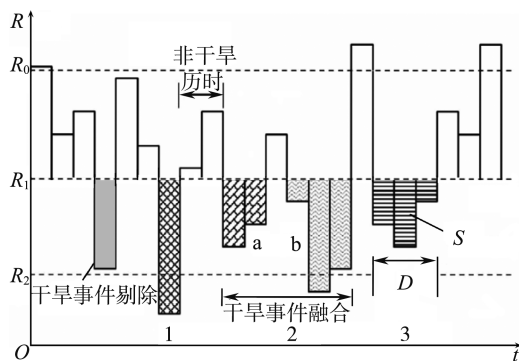


图 2 干旱事件识别、融合和剔除过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of drought events identifying, pooling and excluding process

识别干旱事件后, 根据确定的干旱响应时间对气象和水文干旱事件进行匹配。对于单个水文干旱事件, 所匹配的为该水文干旱事件发生月份前干旱响应时间至该水文干旱事件结束月份之间所发生的气象干旱事件。根据匹配得到的干旱事件的干旱特征, 建立线性干旱传播模型。

3 结果与分析

3.1 干旱事件识别

计算干旱指数后, 根据游程理论识别干旱事件。西南地区元江流域、江边街流域、三汇流域、允景洪流域、武隆流域、五通桥流域、梧州流域和万县流域分别发生气象干旱 57 次、68 次、36 次、60 次、68 次、62 次、59 次和 66 次, 发生水文干旱 31 次、30 次、18 次、28 次、43 次、31 次、43 和 38 次。各流域融合和剔除后的干旱特征如表 2 所示。

表 2 干旱事件融合、剔除后的干旱特征值

Table 2 The drought characteristic value of drought events after pooling and excluding

流域	干旱类型	融合后			剔除后		
		次数	平均历时/月	平均烈度	次数	平均历时/月	平均烈度
元江	气象	101	1.79	2.06	57	2.40	2.79
	水文	49	3.82	4.26	31	5.45	6.31
江边街	气象	108	1.83	2.01	68	2.32	2.57
	水文	42	4.74	5.14	30	6.23	6.89
三汇	气象	67	1.79	2.01	36	2.47	2.72
	水文	34	3.32	3.72	18	5.39	6.11
允景洪	气象	94	1.81	2.00	60	2.27	2.52
	水文	52	3.19	3.57	28	5.07	5.85
武隆	气象	122	1.71	1.83	68	2.28	2.49
	水文	69	2.93	3.15	43	4.09	4.51
五通桥	气象	95	1.74	1.96	62	2.13	2.47
	水文	53	3.11	3.42	31	4.61	5.16
梧州	气象	114	1.69	1.85	59	2.34	2.63
	水文	65	2.91	3.25	43	3.88	4.44
万县	气象	108	1.86	2.03	66	2.41	2.65
	水文	65	3.05	3.33	38	4.50	5.08

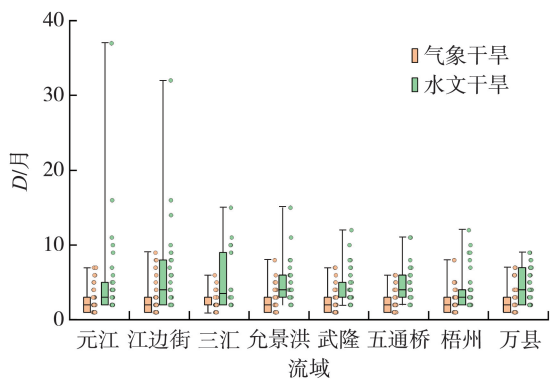
图 3 为各流域融合和剔除后的气象干旱和水文干旱的干旱特征箱形图,气象干旱历时和烈度均较小且较为集中,而水文干旱历时和烈度整体较为分散且数值较大,水文干旱严重性强于气象干旱。

象干旱到水文干旱的响应时间。表 3 为各流域最大皮尔逊相关系数及对应的 SPEI 时间尺度,整体来看,西南地区干旱响应时间为 2~7 月。图 4 为各流域皮尔逊相关系数箱形图,三汇流域皮尔逊相关系数偏小,允景洪流域皮尔逊相关系数较为集中。以梧州流域分析,梧州流域最大皮尔逊相关系数对应的 SPEI 时间尺度为 2 月,SRI-1 与 SPEI-2 相关性最好,梧州流域干旱响应时间为 2 月。

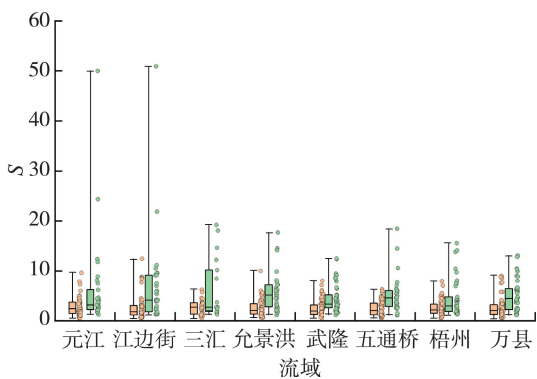
表 3 最大皮尔逊相关系数及对应的 SPEI 时间尺度

Table 3 The maximum PCC and the correspondent time scale of SPEI

流域	最大皮尔逊相关系数	SPEI 时间尺度/月
元江	0.72	7
江边街	0.70	7
三汇	0.23	6
允景洪	0.59	5
武隆	0.67	2
五通桥	0.55	4
梧州	0.73	2
万县	0.48	2



(a) 干旱历时



(b) 干旱烈度

图 3 干旱事件剔除后的干旱特征箱形图

Fig. 3 Box chart of drought characteristics of drought events after excluding

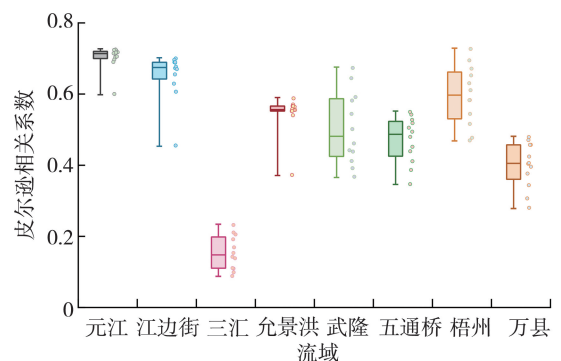


图 4 各流域皮尔逊相关系数箱形图

Fig. 4 Box chart of PCC in each basin

3.2 干旱响应时间

采用最大皮尔逊相关系数来定量确定各流域气

以降水量和潜在蒸散发量计算得到的 SPEI 和以径流量计算得到的 SRI 之间的皮尔逊相关系数反映了流域内径流对降雨的响应关系。三汇流域和万县流域中下游多为平原地形,流域下垫面调蓄作用使得其 SPEI 和 SRI 相关性较弱,而多为高原和山地地形的元江流域和梧州流域的 SPEI 和 SRI 相关性较强。此外,在干旱传播过程中,各流域干旱响应时间是多种因素综合影响的结果,对于气象因子和下垫面因子存在差异的不同流域,水文干旱对气象干旱的响应关系也存在差异,可能导致不同的干旱响应时间。

3.3 干旱事件的匹配

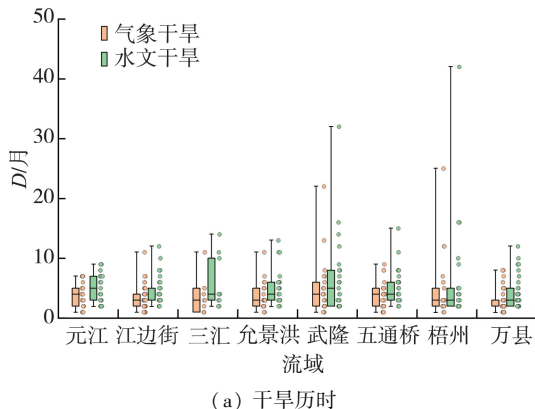
将干旱响应时间用于匹配每个流域的水文干旱和气象干旱事件,元江流域、江边街流域、三汇流域、允景洪流域、武隆流域、五通桥流域、梧州流域和万县流域分别匹配干旱过程 23 次、23 次、11 次、27 次、38 次、24 次、38 次和 23 次,其干旱特征统计见表 4。

表 4 干旱事件匹配后的干旱特征统计

Table 4 Statistics of drought characteristics of drought events after matching

流域	平均历时/月		平均烈度	
	气象干旱	水文干旱	气象干旱	水文干旱
元江	4.69	6.34	5.44	7.78
江边街	4.82	6.86	5.36	7.62
三汇	3.36	5.54	3.66	6.55
允景洪	3.74	5.14	4.08	5.97
武隆	3.28	4.13	3.67	4.58
五通桥	3.45	5.04	4.11	5.75
梧州	2.97	4.15	3.35	4.80
万县	3.69	5.21	4.17	6.16

图 5 为干旱事件匹配后的干旱历时和干旱烈度的统计特征,各流域水文干旱历时和烈度均大于气象干旱,且气象干旱历时和烈度相对集中,说明各流域气象干旱的干旱特征变化幅度均较小,水文干旱比气象干旱严重且干旱特征变化幅度较大。



(a) 干旱历时

表 5 为各流域气象干旱传播率和水文干旱敏感度。从干旱传播率的结果可以看出,武隆流域和梧州流域的气象干旱向水文干旱传播的概率较大,超过 80%;而三汇流域气象干旱传播率较低,仅为 39%。此外,五通桥流域和万县流域气象干旱传播率也低于江边街流域、允景洪流域和元江流域。水文干旱敏感度分布与气象干旱传播率分布较为一致,允景洪流域的水文干旱对气象干旱最敏感,三汇流域的水文干旱对气象干旱最不敏感。

表 5 气象干旱传播率和水文干旱敏感度

Table 5 Drought translation rate of meteorological drought and sensitivity of hydrological drought

流域	N_h /次	N_m /次	N_{h-m} /次	N_{m-h} /次	T_{r1}	T_{r2}
元江	31	57	45	23	0.79	0.74
江边街	30	68	48	23	0.70	0.77
三汇	18	36	14	11	0.39	0.61
允景洪	28	60	46	27	0.77	0.96
武隆	43	68	57	38	0.84	0.88
五通桥	31	62	43	24	0.69	0.77
梧州	43	59	48	38	0.81	0.88
万县	38	66	38	23	0.58	0.60

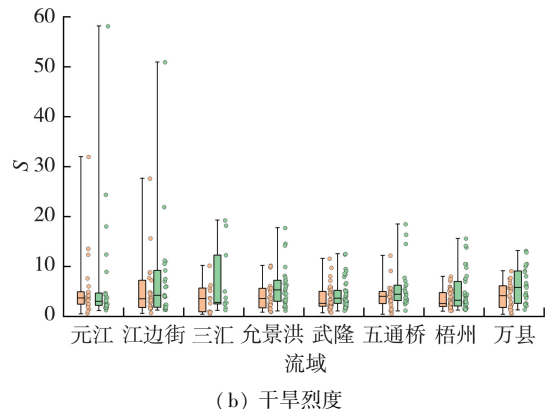
3.4 气象干旱和水文干旱特征拟合及传播阈值

为了建立气象干旱和水文干旱之间的关系,根据干旱匹配结果计算得到气象干旱和水文干旱事件的干旱历时和干旱烈度,利用线性拟合方程建立干旱传播模型描述水文干旱与气象干旱特征因子之间的关系。方程的基本形式为

$$y = ax + b \quad (3)$$

式中: y 为水文干旱历时或烈度; x 为气象干旱历时或烈度; a 、 b 为线性拟合参数。

选取各流域前 70% (取整) 干旱事件来拟合方程,得到方程及其拟合优度 (R^2),选取各流域其余的干旱事件进行验证,得到方程纳什效率系数 (NSE)。拟合结果如表 6 所示,可见拟合结果合理。



(b) 干旱烈度

图 5 干旱事件匹配后的干旱特征箱形图

Fig. 5 Box chart of drought characteristics of drought events after matching

表6 各流域干旱特征拟合方程

Table 6 The fitting equations of drought characteristics in each basin

干旱特征	流域	拟合方程	R^2	NSE
干旱历时	元江	$y = 1.6238x - 1.2771$	0.96	0.98
	江边街	$y = 1.3816x + 0.2020$	0.92	0.95
	三汇	$y = 1.1951x + 1.5257$	0.75	0.90
	允景洪	$y = 1.1325x + 0.9118$	0.69	0.75
	武隆	$y = 0.8795x + 1.2386$	0.64	0.85
	五通桥	$y = 0.9814x + 1.6476$	0.64	0.65
	梧州	$y = 1.2195x + 0.5316$	0.76	0.82
	万县	$y = 0.8875x + 1.9375$	0.58	0.80
干旱烈度	元江	$y = 1.8557x - 2.6052$	0.97	0.98
	江边街	$y = 1.7373x - 1.6888$	0.95	0.98
	三汇	$y = 1.6812x + 0.3990$	0.56	0.93
	允景洪	$y = 1.1743x + 1.1836$	0.60	0.61
	武隆	$y = 0.9719x + 1.0113$	0.67	0.94
	五通桥	$y = 1.4182x - 0.0839$	0.67	0.77
	梧州	$y = 1.7732x - 1.1394$	0.73	0.82
	万县	$y = 1.1857x + 1.2140$	0.73	0.80

在气象干旱向水文干旱传播的过程中,已有研究表明干旱历时具有延长的特征^[28-29]。本文定义当发生1月气象干旱时,由此触发的水文干旱的干旱历时为干旱历时传播阈值(D_1)。对于干旱传播的阈值,更加关注干旱烈度,因此定义当发生水文干旱时,引起此水文干旱的气象干旱的干旱烈度为干旱烈度传播阈值(S_1)。根据表6的干旱特征拟合方程,进一步分析干旱特征传播阈值,结果如表7所示。当发生1月历时的气象干旱事件时,由此触发的水文干旱历时分别为0.34月、1.58月、2.72月、2.04月、2.11月、2.62月、1.75月和2.82月。在分别发生干旱烈度为1.67、1.26、0.06、-0.58、-0.52、0.41、0.92和-0.60(负值表示只要发生气象干旱事件,水文干旱事件的干旱烈度大于0.5)的气象干旱时,会触发干旱烈度为0.5的水文干旱事件。结合表5计算结果,以梧州流域为例,如果发生持续时间为1月、干旱烈度超过0.92的气象干旱,有81%的概率会导致干旱历时为1.75月、干旱烈度为0.5的水文干旱。此外,较大的 D_1 值对应的 S_1

表7 各流域干旱历时和干旱烈度传播阈值

Table 7 Drought duration and propagation threshold of drought intensity in each basin

流域	D_1	S_1
元江	0.34	1.67
江边街	1.58	1.26
三汇	2.72	0.06
允景洪	2.04	-0.58
武隆	2.11	-0.52
五通桥	2.62	0.41
梧州	1.75	0.92
万县	2.82	-0.60

值均较小,即气象干旱烈度触发阈值较小的流域,水文干旱事件历时更长。因此,在更可能触发水文干旱的流域,水文干旱的预防将更加重要。

4 结论

a. 西南地区气象干旱事件的干旱历时和干旱烈度均较小且较为集中,而水文干旱事件的干旱历时和干旱烈度整体较为分散且数值较大,水文干旱严重性强于气象干旱。由于各流域气象因子和下垫面因子存在差异,水文干旱对气象干旱的响应时间也存在明显的差异性,西南地区干旱响应时间主要为2~7月。

b. 西南地区水文干旱敏感度分布与气象干旱传播率分布较为一致,表明西南地区气象干旱极易发展成为水文干旱,且大部分的水文干旱由气象干旱触发。元江流域、江边街流域、三汇流域、允景洪流域、武隆流域、五通桥流域、梧州流域和万县流域干旱历时传播阈值分别为0.34月、1.58月、2.72月、2.04月、2.11月、2.62月、1.75月和2.82月,干旱烈度传播阈值分别为1.67、1.26、0.06、-0.58、-0.52、0.41、0.92和-0.60。结合干旱特征传播阈值(干旱历时传播阈值和干旱烈度传播阈值)及气象干旱传播率,可定量分析西南地区水文干旱对气象干旱的响应关系,为流域水文干旱早期预警提供参考。

参考文献:

- [1] ZHOU Lihua, YANG Guojing. Ecological economic problems and development patterns of the arid inland river basin in Northwest China [J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2006, 35(6): 316-318.
- [2] 符淙斌,温刚. 中国北方干旱化的几个问题[J]. *气候与环境研究*, 2002, 7(1): 22-29. (FU Congbin, WEN Gang. Several issues on aridification in the Northern China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2002, 7(1): 22-29. (in Chinese))
- [3] OBASI G O P. WMO's role in the international decade for natural disaster reduction [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1994, 75(9): 1655-1661.
- [4] 粟晓玲,褚江东,张特,等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese))
- [5] 郝振纯,孙乐强. 我国1961—2009年气温变化规律分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6): 595-601. (HAO Zhenchun, SUN Leqiang. Analysis of temperature changes in China from 1961 to 2009 [J].

- Journal of Hohai University (Natural Sciences),2011,39 (6):595-601. (in Chinese))
- [6] 李韵婕,任福民,李忆平,等. 1960—2010 年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析[J]. 气象学报, 2014,72 (2): 266-276. (LI Yunjie, REN Fumin, LI Yiping, et al. A study of the characteristics of the southwestern China regional meteorological drought events during 1960-2010[J]. Acta Meteorologica Sinica,2014,72 (2):266-276. (in Chinese))
- [7] 吴志勇,程丹丹,何海,等. 综合干旱指数研究进展 [J]. 水资源保护,2021,37(1):36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection,2021,37(1):36-45. (in Chinese))
- [8] 荣艳淑,巩琳,卢寿德. 云南 2009—2014 年持续性气象水文干旱特征及成因分析[J]. 水资源保护,2018,34 (3):22-29. (RONG Yanshu, GONG Lin, LU Shoude. Analysis on characteristics and causes of persistent meteorological and hydrological drought in Yunnan from 2009 to 2014 [J]. Water Resources Protection,2018,34 (3):22-29. (in Chinese))
- [9] SUN Shanlei, LI Qingqing, LI Jinjian, et al. Revisiting the evolution of the 2009-2011 meteorological drought over Southwest China [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568: 385-402.
- [10] MISHRA A K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391 (1/2): 202-216.
- [11] 谷亚超,于利武,代庆. 干旱分类及常用计算方法概述 [J]. 东北水利水电,2011,29(5):37-39. (GU Yachao, YU Liwu, DAI Qing. Overview on drought classification and its normal methods [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China,2011,29(5):37-39. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] DING Yiibo, XU Jiatusun, WANG Xiaowen, et al. Propagation of meteorological to hydrological drought for different climate regions in China [J]. Journal of Environmental Management,2021,283:111980.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王东,张勃,安美玲,等. 基于 SPEI 的西南地区近 53 年干旱时空特征分析 [J]. 自然资源学报,2014,29 (6): 1003-1016. (WANG Dong, ZHANG Bo, AN Meiling, et al. Temporal and spatial distributions of drought in Southwest China over the past 53 years based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Natural Resources,2014,29 (6): 1003-1016. (in Chinese))
- [17] 袁飞,章益棋,刘懿,等. 基于标准化帕尔默干旱指数的西江流域干旱评估 [J]. 水资源保护,2021,37(1):46-52. (YUAN Fei, ZHANG Yiqi, LIU Yi, et al. Drought assessment of Xijiang River Basin based on standardized Palmer drought index [J]. Water Resources Protection, 2021,37(1):46-52. (in Chinese))
- [18] 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 Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. Water Resources Protection, 2022,38(3):80-86. (in Chinese))
- [19] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析 [J]. 水资源保护,2020,36 (3): 8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):8-13. (in Chinese))
- [20] 刘金涛,张钟鸣,陈静,等. 徐州地区 2009—2013 年旱情及其对农业的影响 [J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44 (3): 246-251. (LIU Jintao, ZHANG Zhongming, CHEN Jing, et al. Drought severity in Xuzhou City during period from 2009 to 2013 and its influence on agriculture [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(3):246-251. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] 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.
- [23] LIU Yaqing, MU Yong, CHEN Keyu, et al. Daily activity feature selection in smart homes based on pearson correlation coefficient [J]. Neural Processing Letters, 2020,51(2):1771-1787.
- [24] 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: An International Journal-

Published for the European Water Resources Association (EWRA), 2019, 33(7):2439-2452.

- [25] GUO Yi, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. Propagation thresholds of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712:136502.
- [26] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))
- [27] 李天水, 王顺, 庄文化, 等. 游程理论和 Copula 函数在二维干旱变量联合分布中的应用[J]. 干旱区资源与

环境, 2016, 30(6): 77-82. (LI Tianshui, WANG Shun, ZHUANG Wenhua, et al. Application of the theory of run and Copula function to the joint distribution of two-dimension drought variables [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(6): 77-82. (in Chinese))

- [28] ELTAHIR E A B, YE H 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.
- [29] PETERS E, TORFS P J J F, VAN LANEN H A J, et al. Propagation of drought through groundwater: a new approach using linear reservoir theory [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(15):3023-3040.

(收稿日期:2022-01-16 编辑:熊水斌)

(上接第 14 页)

- [26] 王肖鑫, 岑威钧, 晏成明, 等. 基于改进赋权的山区堤防安全云模型评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 58-63. (WANG Xiaoxin, CEN Weijun, YAN Chengming, et al. Cloud model evaluation method of levee safety in mountain area based on improved weighting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5):58-63. (in Chinese))
- [27] 左其亭, 张云, 林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4):440-447. (ZUO Qiting, ZHANG Yun, LIN Ping. Index system and quantification method for human-water harmony [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 440-447. (in Chinese))
- [28] 傅春, 付耀宗, 肖存艳, 等. 基于 MIKE FLOOD 模型的鹰潭市内涝弹性分析[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(1):33-39. (FU Chun, FU Yaozong, XIAO Cunyan, et al. Analysis of urban waterlogging resilience based on MIKE FLOOD model in Yingtan City [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(1):33-39. (in Chinese))
- [29] 刘永伟, 王文, 刘元波, 等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6):483-491. (LIU Yongwei, WANG Wen, LIU Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 483-491. (in Chinese))
- [30] 左其亭. 和谐论:理论·方法·应用[M]. 2版. 北京:科学出版社, 2016.
- [31] 高甫章, 何新林, 杨广. 克拉玛依市水资源多维临界调控研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(1):73-80. (GAO Fuzhang, HE Xinlin, YANG Guang. Study on multidimensional critical regulation of water resources in

Karamay [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(1):73-80. (in Chinese))

- [32] ZHAO Fubao, WU Yiping, YAO Yingying, et al. Predicting the climate change impacts on water-carbon coupling cycles for a loess hilly-gully watershed [J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124388.
- [33] 张惠云, 秦丽杰, 贾利. 吉林省水稻生产的碳足迹与水足迹时空变化特征[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(6): 974-983. (ZHANG Huiyun, QIN Lijie, JIA Li. Temporal and spatial characteristics of carbon footprint and water footprint in rice production in Jilin Province [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(6): 974-983. (in Chinese))
- [34] 左其亭, 韩淑颖, 韩春辉, 等. 基于遥感的新疆水资源适应性利用配置-调控模型研究框架[J]. 水利水电技术, 2019, 50(8):52-57. (ZUO Qiting, HAN Suying, HAN Chunhui, et al. Research frame of adaptive utilization allocation-regulation model of water resources in Xinjiang region based on RS [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(8): 52-57. (in Chinese))
- [35] 汤勇生, 张智通, 汪永禄. 碳中和目标下零碳水利风景区建设与发展路径[J]. 水利经济, 2022, 40(2):74-78. (TANG Yongsheng, ZHANG Zhitong, WANG Yonglu. Construction and development path of zero-carbon national water parks under carbon neutrality target [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(2):74-78. (in Chinese))
- [36] 左其亭. 人水关系学的基本原理及理论体系架构[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):1-6. (ZUO Qiting. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1):1-6. (in Chinese))

(收稿日期:2022-09-21 编辑:施业)