

基于 SRI 指数的嘉陵江流域 1982—2020 年旱涝急转特征分析研究

徐靖雯^{1,2}, 姬广兴¹, 张亚丽¹

(1.河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450002; 2.中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:以嘉陵江流域为研究对象, 基于北碚水文站 1982—2020 年月尺度径流数据, 计算不同时间尺度的标准化径流指数(SRI), 采用游程理论分析嘉陵江流域的旱涝急转事件特征, 并结合 Mann-Kendall 趋势检验法分析标准化径流指数变化趋势. 研究结果表明: 嘉陵江流域 1982—2009 年洪涝化趋势先减弱后增强, 2010—2020 年呈现短期增强趋势后又减弱. 嘉陵江流域 1982—2020 年的 1、5、6、8、11 和 12 月份呈现不明显的干旱化减弱趋势; 7、9 和 10 月份干旱化趋势增强, 2、3 和 4 月份干旱化趋势显著减弱. 北碚水文站旱涝急转事件共发生 39 次, 旱转涝事件急转点集中在 4 月份, 对应旱涝事件的强度也较高. 旱涝急转事件近 40 年发生频率逐步升高, 并呈现逐步加重的趋势, 应引起足够的重视.

关键词:标准化径流指数; 嘉陵江流域; 旱涝急转; Mann-Kendall 检验法

中图分类号: P333; TV121

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2025)03-0042-08

近年来, 由于全球气候变化和人类活动的影响, 极端天气增多, 干旱与洪涝等重大灾害频发, 造成了极其严重的损失^[1-2]. 数据显示, 1950—2000 年的 5 项气候灾害(干旱、洪涝、台风、冻害、干热风)中, 干旱灾害发生频次为各项灾害之首, 洪涝灾害仅居其次^[3]. 我国每年干旱和洪涝造成农作物受灾面积约占农作物总受灾面积的 77%, 平均 2~3 年我国就会遭遇一次严重的干旱灾害^[4]. 研究表明, 旱涝急转(drought-flood abrupt alternation, DFAD)事件^[5]对自然环境及人类社会造成的影响远大于单一的干旱或者洪水事件^[6-7].

从 20 世纪 90 年代开始, 旱涝异常的研究开始成为国内外广泛关注的热点问题, 而旱涝急转现象是旱涝异常的典型代表^[8]. 在中国华南、长江流域及西南等地区时常发生^[9-10]. 杨家伟等^[6]采用标准化加权平均降雨(standardized weighted average precipitation, SWAP)指数对长江流域旱涝急转时空规律进行研究, 结果表明长江流域旱涝急转事件发生频率呈不同程度的上升趋势; 闪丽洁等^[11]通过长期径流旱涝急转指数(long term runoff drought-flood abrupt alternation index, LRDFAI)和短期径流旱涝急转指数(short term runoff drought-flood abrupt alternation index, SRDFI)分析长江中下游旱涝急转时空演变特征, 发现长江中下游旱涝急转主要表现为以涝转旱事件为主; 文献[12—14]分别对汉江流域、洞庭湖流域和鄱阳湖流域开

收稿日期: 2023-11-27; **修回日期:** 2024-01-08.

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1700900); 河南省科技攻关项目(222102320041); 河南省高等学校智库研究项目(2022ZKYJ07); 河南农业大学拔尖人才项目(30501031).

作者简介:徐靖雯(2001—), 女, 河南新乡人, 中国科学院硕士研究生, 研究方向为变化环境下生态水文响应, E-mail: 2530429252@qq.com.

通信作者:姬广兴(1990—), 男, 河南商丘人, 河南农业大学讲师, 博士, 研究方向为变化环境下生态水文响应, E-mail: guangxingji@henau.edu.cn.

引用本文:徐靖雯, 姬广兴, 张亚丽. 基于 SRI 指数的嘉陵江流域 1982—2020 年旱涝急转特征分析研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 42-49. (Xu Jingwen, Ji Guangxing, Zhang Yali. Analysis on the characteristics of drought-flood abrupt alternation in the Jialing River Basin from 1982 to 2020 based on SRI[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(3): 42-49. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.11.27.0001.)

展了旱涝急转现象的趋势变化特征研究.然而,对于长江流域旱涝演变研究还主要集中在长江中下游地区,关于长江上游流域旱涝演变特征的研究较少.嘉陵江是长江水系中流域面积最大的支流,流域内水资源与气象要素的时空变化对下游三峡库区水资源配置和持续利用具有重要的作用.此外,嘉陵江水量表现出夏季水量大冬季水量少的特点,由于降水集中,经常发生洪涝和干旱灾害,历史上嘉陵江流域曾发生过多次洪水和断流事件^[15].旱涝事件的发生不仅会使得嘉陵江农业供水紧张,甚至工业及城市用水都会受到重大影响^[16].因此,开展嘉陵江流域旱涝演变特征研究具有非常重要的意义.

水文干旱指数是研究旱涝变化特征的基础,也是科学评估风险的重要依据^[17].标准化径流指数(standardized runoff index, SRI)^[9]适用于多时间尺度分析(1、3、6、12 月等),以及资料缺乏、地形复杂的区域,能够综合反映水文和气象过程.目前在国内外水文旱涝识别研究中应用较多^[18-20],而从 SRI 的角度来识别长江流域旱涝急转特征的研究相对比较缺乏.鉴于此,本文选取嘉陵江为研究对象,基于 SRI 深入分析嘉陵江流域旱涝急转时空演变规律,从而有效地为流域水资源管理和防洪抗旱提供参考依据.

1 研究区概况

嘉陵江是长江水系中流域面积最大的支流,达 16 万 km²,于重庆渝中区朝天门汇入长江主河道,被誉为重庆的“母亲河”.嘉陵江的径流变化对流域内的自然生态环境以及沿江地区的经济发展有着深刻的影响.嘉陵江流域四季分明,夏季温度在 33 ℃左右,降水较为充沛,全年平均降雨量 400 mm 左右,嘉陵江流域受季风气候影响较为显著,降水集中.此外,嘉陵江流经四川,是川渝经济的重要组成部分,该流域内主要以农业生产为主.

2 数据来源

本文研究资料采用嘉陵江流域北碚水文站(29°50'N,106°26'E)1982—2020 年月尺度径流数据,数据来源于长江水文网(http://www.cjh.com.cn/hlns_zyyjcg.html)的长江水文公报.

3 研究方法

3.1 标准化径流指数

本文通过计算标准化径流指数值进行嘉陵江流域旱涝识别,MCKEE 等^[21]提出了标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)的定义,即利用伽马概率密度函数求一定时间内降水量累计概率,SHUKLA 等^[22]于 2008 年参照这一概念提出了标准化径流指数 SRI,两个指标的计算方法类似,反映径流量的变化.

SRI 计算方法如下:假设某一确定时间段河流的径流量 x ,则满足伽马分布概率密度函数为:

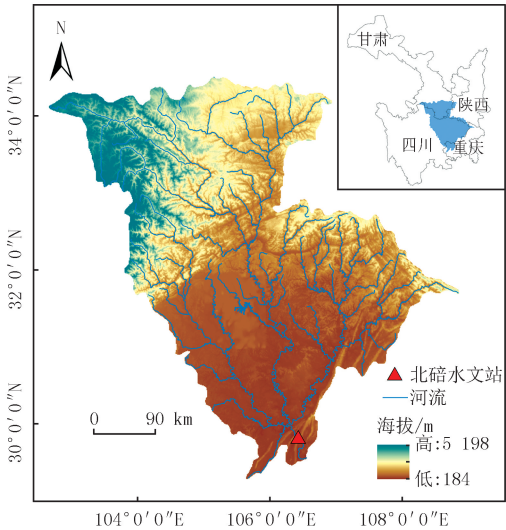
$$f(x)=\int_0^x\frac{x^{a-1}}{\beta^a\Gamma(a)}e^{-\frac{x}{\beta}}dx,$$

式中, α 、 β 为参数, $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$,用极大似然法对 α 、 β 进行估算.

一定时间尺度的径流量 x 的累计率为:

$$F(x)=\int_0^xf(x)dx.$$

对各项的累计概率进行正标准化得相应的 SRI:



注:底图审图号为GS(2020)4619,底图无修改.

图1 嘉陵江流域图

Fig.1 The Jialing River Basin map

当 $0 < F(x) \leq 0.5$ 时,令 $k = \sqrt{\ln[\frac{1}{F(x)^2}]}$,则 $SRI = -(k - \frac{c_0 - c_1k + c_2k^2}{1 + d_1k + d_2k^2 + d_3k^3})$;

当 $0.5 < F(x) \leq 1$ 时,令 $k = \sqrt{\ln \frac{1}{[1 - F(x)]^2}}$,则 $SRI = k - \frac{c_0 + c_1k + c_2k^2}{1 + d_1k + d_2k^2 + d_3k^3}$,其中, $c_0 = 2.515\ 517$; $c_1 = 0.802\ 853$; $c_2 = 0.010\ 328$; $d_1 = 1.432\ 788$; $d_2 = 0.189\ 269$; $d_3 = 0.001\ 308$.

计算 SRI 分析嘉陵江流域的旱涝演变特征,1 月尺度的 SRI 反映流域短时间的旱涝状况,12 月尺度的 SRI 反映流域内长时间旱涝的演变特征.此外,本文的旱涝等级确定参考国家标准《气象干旱等级》(GB/T 20481—2006)^[23],见表 1.

表 1 标准化径流指数旱涝等级

Tab. 1 The drought and flood classification standard based on SRI

干旱类型	特涝	重涝	中涝	轻涝	正常	轻旱	中旱	重旱	特旱
SRI 值	$[2.0, +\infty)$	$[1.5, 2.0)$	$[1.0, 1.5)$	$[0.5, 1.0)$	$(-0.5, 0.5)$	$(-1.0, -0.5]$	$(-1.5, -1.0]$	$(-2.0, -1.5]$	$(-\infty, -2.0]$

3.2 游程理论

游程理论^[24]是一种分析时间序列的方法,是量化旱涝变量变化的理论规律的基础,根据游程理论三阈值方法^[25]识别描述嘉陵江流域干旱和洪涝事件.

在进行旱涝分析时,基于我国气象干旱等级划分标准,并参考 WU 等^[26]有关研究,确定旱涝事件的划分阈值.本研究取干旱事件的截取水平 R_0 为 -0.5 (轻旱),当 SRI 在某月开始小于 -0.5 ,定义为一次干旱事件发生,到 SRI 值大于 0.5 ,定义为此次干旱事件结束.从干旱开始到干旱结束的这段时间间隔定义为干旱事件的持续时间.干旱持续时间内如果两次干旱事件之间有 1 月的 SRI 值大于 -0.5 而小于 0 ,则这两次干旱可合并为一次干旱.

干旱烈度 S' 定义为一次干旱事件中各指标值与游程理论确定后的干旱阈值(R_0)差的累计和,由于其为负数,故一般取其绝对值.公式如下:

$$S' = \sum_{t=1}^T |SRI_t| \ (SRI_t \leq -0.5),$$

式中, t 为某次干旱(即 $SRI \leq -0.5$) 开始的时刻, $t = 1$; T 为本次干旱结束的時刻.

干旱强度指的是一次干旱事件中的平均缺水量,计算方式为某次干旱事件中干旱烈度与干旱历时的比值.类似地,取洪涝事件的截取水平 R_0 为 0.5 ,洪涝过程识别与干旱过程识别同理.

当先后存在 1 个干旱和洪涝事件,且两者之间的时间间隔小于或等于 1 月,定义为一次水文旱涝急转事件,其中,一次旱涝急转事件的起始时间是这次干旱事件的发生时间,结束时间是洪涝事件的结束时间,时段 T 内发生旱涝急转事件强度记为 K ,表 2 为旱涝急转强度等级划分标准^[12].

表 2 旱涝急转强度等级划分

Tab. 2 Classification of drought-flood abrupt alternation intensity

旱涝急转强度	重度	中度	轻度
K	$[3.0, +\infty)$	$[2.0, 3.0)$	$[1.0, 2.0)$

3.3 Mann-Kendall 趋势检验法

Mann-Kendall 趋势检验法^[27],目前得到广泛应用的趋势性非参数统计检验方法.具体计算过程如下:假定 x 为时间序列变量, n 为时间序列长度.

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(x_i - x_j),$$

式中, S 为符号函数,当 x_i 小于、等于或大于 x_j 时,符号 S 等于 $-1, 0$ 和 1 .

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18},$$

式中, n 为数据点个数,统计检验值 Z 计算式为: $Z = \frac{(S-1)}{\sqrt{\text{var}(S)}}$, $S > 0$; $Z = 0$, $S = 0$; $Z = \frac{(S+1)}{\sqrt{\text{var}(S)}}$, $S < 0$,若计算的绝对 Z 统计量大于正态分布表中 Z 统计量(1.65、1.96)的临界值,则表示趋势通过了 90%和 95%的显著和强显著水平.

衡量趋势大小的指标为 $\beta = M(\frac{x_i - x_j}{i - j})$, 式中, $1 < j < i < n$ (数据点个数), M 代表求序列的中位数. 正的 β 值表示“上升趋势”, 负的 β 值表示“下降趋势”.

4 结果分析

4.1 流域旱涝年际变化趋势特征分析

为更好地分析水文干旱趋势和突变特征, 选取 1982—2020 年嘉陵江流域北碚水文站的径流深数据, 时间尺度分别设定为月尺度(1 月)、年尺度(12 月)两种时间尺度, 可以较好地识别流域内短期和长期的旱涝状况. 如图 2(a), 2(b)别为月尺度和年尺度的 SRI 序列变化趋势图.

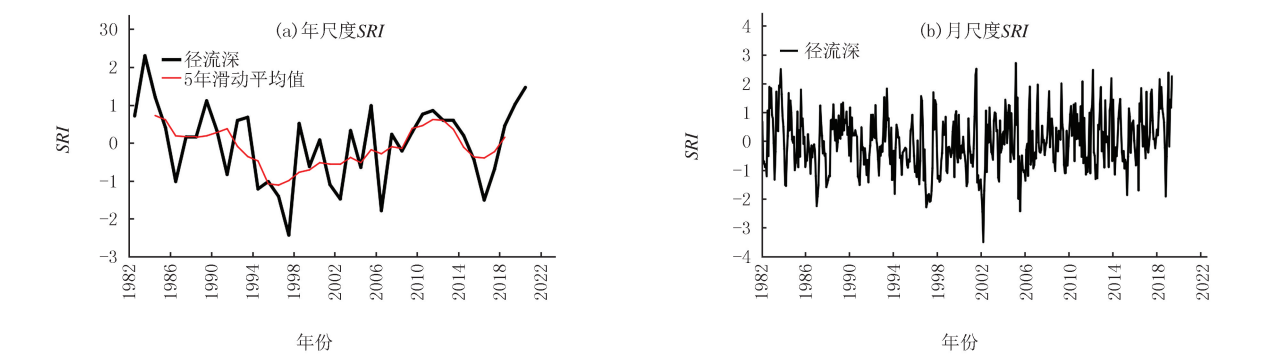


图2 嘉陵江流域1982—2020年不同时间尺度SRI序列变化趋势
Fig.2 SRI sequence change trend at different time scales in the Jialing River Basin from 1982 to 2020

不同时间尺度下的 SRI 波动幅度不同, 但干旱趋势大致相同. 月尺度的 SRI 波动较强, 表现出对水文干旱的强烈反应. 在月尺度的 SRI 序列中, 达到特旱水平的是 1987 年 3 月、1997 年 8 至 9 月、1998 年 1 月、2002 年 10 月、2003 年 1 月、2006 年 7 月. 分析年尺度 SRI 可得: 嘉陵江流域在 1982—2020 年呈现旱涝交替现象, 但干旱年份居多; 1982—2009 年洪涝化趋势先减弱后增强, 2010 年后洪涝化趋势呈短期增强趋势后又减弱; 此外, 1992—2008 年、2014—2017 年嘉陵江流域干旱化趋势明显, 旱灾较为严重; 2009—2013 年、2018—2020 年 SRI 为正值, 涝灾严重.

通过 Mann-Kendall 趋势检验对 1982—2020 年嘉陵江流域北碚水文站月尺度和年尺度的 SRI 序列进行趋势检验. 结果如表 3 所示.

表 3 嘉陵江流域 SRI 变化趋势的 Mann-Kendall 检验
Tab. 3 Mann-Kendall test of SRI change trend in the Jialing River Basin

时间	β	Z	趋势	显著性	时间	β	Z	趋势	显著性
全年	-0.003 0	-0.169 4	下降	不显著	7 月份	-0.026 8	-1.669 4	下降	显著
1 月份	0.008 4	0.411 3	上升	不显著	8 月份	0.006 9	0.532 3	上升	不显著
2 月份	0.050 2	3.701 6	上升	显著	9 月份	-0.036 4	-2.612 9	下降	显著
3 月份	0.048 7	3.387 1	上升	显著	10 月份	-0.029 9	-1.790 3	下降	显著
4 月份	0.034 3	2.225 8	上升	显著	11 月份	-0.013 0	-0.616 9	下降	不显著
5 月份	0.005 2	0.314 5	上升	不显著	12 月份	0.024 7	1.475 8	上升	不显著
6 月份	0.012 3	0.798 4	上升	不显著					

从年尺度的 SRI 序列来看, 统计量 β 值小于 0, 且 Z 值绝对值 0.169 4 小于 1.65, 表明干旱化呈不显著增强的趋势; 2、3 和 4 月份北碚水文站 Mann-Kendall 统计值通过了显著性检验, 发生的显著变化趋势是上升趋势, 表明干旱化趋势均减弱; 7、9 和 10 月份呈现显著下降趋势, 表明洪涝化趋势减弱, 干旱化趋势增强; 1、5、6、8、11 和 12 月份呈现不明显的干旱化减弱趋势.

4.2 流域不同年代旱涝年际变化特征分析

根据上文计算得出的 SRI ,进一步识别嘉陵江北碚水文站的旱涝事件,将 1982—2020 年按年代划分并分别统计北碚水文站发生旱涝事件的次数、历时和烈度以及发生旱涝事件最大历时和最大烈度,见表 4.

表 4 1982—2020 年嘉陵江流域北碚水文站旱涝事件统计

Tab. 4 Statistics of drought and flood events at Beibei hydrological station in the Jialing River Basin from 1982 to 2020

时间	事件	发生次数	平均历时/月	平均烈度	最长历时/月	最大烈度
20 世纪 80 年代	干旱	11	2.5	2.7	5	6.8
	洪涝	12	3.2	3.3	7	9.4
20 世纪 90 年代	干旱	14	3.6	4.0	11	18.0
	洪涝	12	2.1	2.0	6	5.4
21 世纪 00 年代	干旱	16	2.9	3.2	10	17.4
	洪涝	19	1.7	2.0	4	5.7
21 世纪 10 年代	干旱	16	2.1	1.8	7	5.8
	洪涝	23	2.4	2.9	7	24.9

由表 4 可知,20 世纪 80 年代涝灾发生程度和历时总体比旱灾高,整体偏涝;20 世纪 90 年代,北碚水文站发生干旱事件的次数增加,平均历时、平均烈度、最长历时、最大烈度增大;21 世纪 00 年代干旱事件发生频次进一步增多,但平均历时、平均烈度、最长历时和最大烈度均减少;21 世纪 10 年代干旱平均历时、平均烈度、最长历时和最大烈度减小.

20 世纪 90 年代和 20 世纪 80 年代相比,北碚水文站洪涝事件发生次数不变,洪涝程度减轻,总体上洪涝化趋势减弱;21 世纪 00 年代到 21 世纪 10 年代洪涝事件的发生次数和平均历时、平均烈度、最长洪涝历时和最大烈度增加,表明洪涝事件频繁,且洪涝事件程度加重.20 世纪 80 年代和 21 世纪 10 年代洪涝事件发生的频率和程度高于干旱事件,而 20 世纪 90 年代到 21 世纪 00 年代干旱事件的平均历时、平均烈度和最长历时都高于洪涝事件.

4.3 流域旱涝急转事件演变特征分析

表 5 统计了嘉陵江流域北碚水文站旱涝急转事件特征,包括急转事件的起始和终止时间,强度和急转点月份.北碚水文站旱涝急转事件共发生 39 次.旱涝急转次数最多的是 21 世纪 10 年代,旱涝急转事件发生 14 次,20 世纪 90 年代旱涝急转事件发生次数最少,为 6 次.21 世纪以来,旱涝急转事件发生次数明显增多.

图 3 给出了嘉陵江流域各月旱涝急转频次和强度的变化,由图 3 可知,嘉陵江流域旱涝急转多发生在 5 月份,这是因为嘉陵江流域春季较为干旱,夏季突发降水容易造成旱涝急转.旱涝急转强度最大值出现在 4 月份,该时段对应的旱涝急转频次也较多,因此发生洪涝灾害的风险比较大.嘉陵江流域的旱涝急转事件主要发生在 5、6、8 和 9 月份,且时段内旱涝急转事件的强度也较高.同时,旱转涝近 40 年发生频率依次升高,并且旱涝急转事件的强度也呈升高的趋势,应予以足够重视.

5 结论与讨论

本文采用嘉陵江流域北碚水文站 1982—2020 年的径流深数据,计算不同尺度的标准化径流指数,采用游程理论定义旱涝事件,并根据旱涝急转条件筛选出旱涝急转事件,计算发生频次和烈度,得出主要结论如下:

(1)嘉陵江流域 1982—2009 年洪涝化趋势先减弱后增强,2010—2020 年洪涝化趋势呈短期的增强趋势后又减弱.近 20 年来流域内洪涝事件发生愈加频繁,且场次洪涝程度依次加重,并且呈现出洪涝极端化趋势.

(2)嘉陵江流域 1982—2020 年的 1、5、6、8、11 和 12 月份呈现不明显的干旱化减弱趋势;7、9 和 10 月份干旱化趋势增强,2、3 和 4 月份干旱化趋势显著减弱.

(3)嘉陵江北碚水文站旱涝急转事件共发生 39 次,旱转涝事件急转点均集中在 4 月份,对应旱涝事件的强度也较高.旱涝急转事件近 40 年发生频率依次升高,并伴有逐步加重的趋势,应予以足够重视.

表 5 北碚水文站旱涝急转事件

Tab. 5 Abrupt change of drought and flood in Beibei hydrological station

年代	起始时间	终止时间	强度	急转点月份	年代	起始时间	终止时间	强度	急转点月份
20 世纪 80 年代	1982-02	1982-07	1.08	6	21 世纪 00 年代	2004-06	2004-08	1.12	7
	1982-08	1983-01	1.19	8		2005-08	2005-09	0.84	8
	1983-03	1983-05	1.14	4		2005-12	2006-04	1.23	4
	1985-02	1985-05	0.79	4		2007-04	2007-06	1.40	6
	1985-08	1985-12	0.73	8		2007-10	2008-03	0.94	1
	1987-02	1987-08	1.27	6	21 世纪 10 年代	2011-09	2011-10	1.00	9
	1988-02	1988-11	1.13	6		2012-05	2012-06	1.31	5
20 世纪 90 年代	1990-06	1990-07	0.76	6		2012-07	2012-08	0.79	7
	1994-05	1994-10	0.85	9		2012-09	2013-02	0.71	1
	1995-10	1996-04	0.69	1		2013-09	2014-03	0.56	11
	1996-11	1997-04	1.14	1		2014-07	2014-08	1.16	7
	1997-05	1998-07	1.75	4		2014-12	2015-03	1.36	12
	1998-09	1999-03	1.00	2		2015-04	2015-05	1.06	4
21 世纪 00 年代	2000-04	2000-06	1.06	4		2015-07	2016-01	0.76	9
	2000-07	2000-09	0.72	8		2016-04	2016-12	0.86	10
	2001-04	2001-08	1.03	1		2017-07	2017-09	0.71	8
	2001-11	2002-05	1.14	2		2017-10	2018-02	1.23	11
	2002-06	2003-04	1.68	3		2018-06	2018-07	1.15	6
	2003-05	2003-06	0.82	5		2020-05	2020-08	1.44	6
	2003-12	2004-03	0.98	12					

虽然本研究采用 SRI 指数和游程理论识别了嘉陵江流域 1982—2020 年旱涝事件特征以及旱涝急转事件演变规律,但仍有所不足,有待继续研究和完善。

(1)本文计算了嘉陵江流域北碚水文站 1982—2020 年不同尺度的标准化径流指数值,分析嘉陵江流域旱涝事件演变特征以及变化规律,但仅选用标准化径流指数指标对研究区旱涝状况进行讨论,不能

对流域存在多种旱涝类型的情况进行分析,因此,未来的研究工作可以利用更多指标参数如标准化降水指数(SPI)、标准化加权平均降雨(SWAP)指数等分别对气象旱涝和水文旱涝进行研究。

(2)本研究仅采用位于嘉陵江下游北碚水文站 1982—2020 年的径流数据计算多时间尺度 SRI 值,分析其水文旱涝状况,但随着气候变化加剧,洪涝、干旱等自然灾害频发,嘉陵江流域发生旱涝急转事件的无常性大大增加,同一条河流的不同站点旱涝急转事件特征会有很大的差异,因此未来的研究工作可以着重分析嘉陵江多个水文站点如亭子口和武胜站的旱涝急转事件的空间演变规律。

(3)气象旱涝和水文旱涝往往有密切的联系:降水的亏缺和盈余会导致气象旱涝,而地表水与地下水的亏缺和盈余会引起水文旱涝,气象旱涝往往会造成水文旱涝,后续研究中,可以尝试准确描述嘉陵江流域气象旱涝和水文旱涝的关系,以便在气象旱涝事件发生初期,及时采取应对措施,减轻水文旱涝造成的灾害等级。

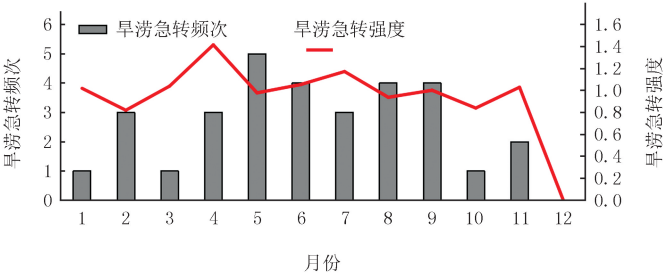


图3 嘉陵江流域1至12月份旱涝急转强度

Fig.3 Intensity of abrupt change of drought and flood in the Jialing River Basin from January to December

参 考 文 献

[1] 巢清尘.气候变化背景下我国水旱灾害演变趋势及其应对思考[J].中国减灾,2024(15):8-11.
CHAO Q C.Evolution trend of flood and drought disasters in China under the background of climate change and its countermeasures[J].Disaster Reduction in China,2024(15):8-11.

[2] 李娜.干旱气象灾害研究现状和进展[J].农业科学,2021,11(5):413-416.
LI N.Research Status and Progress of Drought Meteorological Disasters[J].Hans Journal of Agricultural Sciences,2021,11(5):413-416.

[3] 宋艳玲.全球干旱指数研究进展[J].应用气象学报,2022,33(5):513-526.
SONG Y L.Global research progress of drought indices[J].Journal of Applied Meteorological Science,2022,33(5):513-526.

[4] 宋琳琳,张强,任余龙,等.PDSI 及 sc_PDSI 干旱指数在中国西南地区适用性分析[J].中国沙漠,2021,41(2):242-251.
SONG L L,ZHANG Q,REN Y L,et al.The applicable analysis of PDSI and self_calibrating PDSI drought indices in Southwest China[J].Journal of Desert Research,2021,41(2):242-251.

[5] ZSCHEISCHLER J,MARTIUS O,WESTRA S,et al.A typology of compound weather and climate events[J].Nature Reviews Earth & Environment,2020,1:333-347.

[6] 杨家伟,陈华,侯雨坤,等.基于气象旱涝指数的旱涝急转事件识别方法[J].地理学报,2019,74(11):2358-2370.
YANG J W,CHEN H,HOU Y K,et al.A method to identify the drought-flood transition based on the meteorological drought index[J].Acta Geographica Sinica,2019,74(11):2358-2370.

[7] 赵东升,张家诚,邓思琪,等.1960—2018 年中国西南地区旱涝急转的时空变化特征[J].地理科学,2021,41(12):2222-2231.
ZHAO D S,ZHANG J C,DENG S Q,et al.Spatio-temporal characteristics of drought-flood abrupt alternation in the Southwest China from 1960 to 2018[J].Scientia Geographica Sinica,2021,41(12):2222-2231.

[8] 吴志伟,李建平,何金海,等.大尺度大气环流异常与长江中下游夏季长周期旱涝急转[J].科学通报,2006,51(14):1717-1724.
WU Z W,LI J P,HE J H,et al.Large-scale atmospheric circulation anomaly and long-term drought and flood sharp turn in summer in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J].Chinese Science Bulletin,2006,51(14):1717-1724.

[9] 张云帆,翟丽妮,林沛榕,等.长江中下游典型流域旱涝与旱涝/涝旱急转变规律及其驱动因子研究[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(10):887-897.
ZHANG Y F,ZHAI L N,LIN P R,et al.Variation characteristics and driving factors of drought and flood and their abrupt alternations in a typical basin in the middle reaches of Yangtze River[J].Engineering Journal of Wuhan University,2021,54(10):887-897.

[10] 张玉琴,李栋梁.华南汛期旱涝急转及其大气环流特征[J].气候与环境研究,2019,24(4):430-444.
ZHANG Y Q,LI D L.Drought-flood abrupt alternation and its atmospheric circulation characteristics during flood season in Southern China[J].Climatic and Environmental Research,2019,24(4):430-444.

[11] 闪丽洁,张利平,陈心池,等.长江中下游流域旱涝急转时空演变特征分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(12):2100-2107.
SHAN L J,ZHANG L P,CHEN X C,et al.Spatio-temporal evolution characteristics of droughtflood abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015,24(12):2100-2107.

[12] 赵英,陈华,杨家伟,等.基于 SWAP 和 SRI 的汉江流域旱涝急转时空特征分析[J].人民长江,2020,51(4):94-99.
ZHAO Y,CHEN H,YANG J W,et al.Spatio-temporal variations of drought-flood abrupt alternation events in Hanjiang River Basin based on SWAP and SRI[J].Yangtze River,2020,51(4):94-99.

[13] 胡毅鸿,李景保.1951—2015 年洞庭湖区旱涝演变及典型年份旱涝急转特征分析[J].农业工程学报,2017,33(7):107-115.
HU Y H,LI J B.Analysis on evolution of drought-flood and its abrupt alternation in typical year from 1951 to 2015 in Dongting Lake area [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(7):107-115.

[14] 王容,李相虎,薛晨阳,等.1960—2012 年鄱阳湖流域旱涝急转事件时空演变特征[J].湖泊科学,2020,32(1):207-222.
WANG R,LI X H,XUE C Y,et al.Spatio-temporal variations of the drought-flood abrupt alternation events in the Lake Poyang Basin from 1960 to 2012[J].Journal of Lake Sciences,2020,32(1):207-222.

[15] 叶磊,周建中,曾小凡,等.气候变化下 SPEI 指数在嘉陵江流域的干旱评估应用[J].长江流域资源与环境,2015,24(6):943-948.
YE L,ZHOU J Z,ZENG X F,et al.Application of spei for the changes of drought in Jialing river basin under climate change[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015,24(6):943-948.

[16] 邓慧平,李爱贞,刘厚风,等.气候波动对莱州湾地区水资源及极端旱涝事件的影响[J].地理科学,2000,20(1):56-60.
DENG H P,LI A Z,LIU H F,et al.Impacts of climate fluctuations on water resources and extremes in the Laizhou Bay area[J].Scientia Geographica Sinica,2000,20(1):56-60.

[17] 孙浚凯.基于 SRI 的浑河流域水文干旱特征分析[J].人民珠江,2021,42(2):25-30.
SUN J K.Analysis on drought characteristics in the Hunhe River Basin based on SRI[J].Pearl River,2021,42(2):25-30.

[18] 赵子萌,邵薇薇,曹永强,等.辽宁省旱涝急转特征与趋势研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(6):32-43.
ZHAO Z M,SHAO W W,CAO Y Q,et al.Study on the characteristics and trend of drought-flood abrupt alternation in Liaoning Province

[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(6):32-43.

[19] 刘玉冰,刘波,王文鹏,等.基于日尺度旱涝急转指数的重庆市旱涝急转事件演变特征分析[J].水资源与水工程学报,2024,35(4):20-28.
LIU Y B,LIU B,WANG W P,et al.Evolution of drought-flood abrupt alternation events in Chongqing based on the daily dry-wet abrupt alternation index[J].Journal of Water Resources and Water Engineering,2024,35(4):20-28.

[20] ZHANG B W,CHEN Y,CHEN X W,et al.Spatial-temporal variations of drought-flood abrupt alternation events in Southeast China[J].Water,2024,16(3):498.

[21] MCKEE T B,J DOESKEN N,J KLEIST.The relationship of drought frequency and duration to time scales[J].Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology,1993:179-183.

[22] SHUKLA S,WOOD A W.Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J].Geophysical Research Letters,2008,35(2):L02405.

[23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.机械制图、图样画法、图线[M].北京:中国标准出版社,2004.

[24] ENDT P M,M PATTERN D,M BUECHNER W,et al.An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts vujica yevjevich; fort collins, Colorado state university, 1967, 19 p. (hydrology paper no.23) [J].Journal of Hydrology, 1969, 7(3):353.

[25] CHANG J X,LI Y Y,WANG Y M,et al.Copula-based drought risk assessment combined with an integrated index in the Wei River Basin,China[J].Journal of Hydrology,2016,540:824-834.

[26] WU J F,CHEN X W,YAO H X,et al.Non-linear relationship of hydrological drought responding to meteorological drought and impact of a large reservoir[J].Journal of Hydrology,2017,551:495-507.

[27] 姜瑶,徐宗学,王静.基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J].水利学报,2020,51(7):845-857.
JIANG Y,XU Z X,WANG J.Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series[J].Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(7):845-857.

Analysis on the characteristics of drought-flood abrupt alternation in the Jialing River Basin from 1982 to 2020 based on SRI

Xu Jingwen^{1,2}, Ji Guangxing¹, Zhang Yali¹

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;
2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Basing on the monthly runoff data of Beibei hydrological station in the Jialing River Basin from 1982 to 2020, we calculate the different time scales of standardized runoff index(SRI). Using the run-time theory to analyze the drought-flood abrupt alternation characteristic and utilizing Mann-Kendall test to analyze the trend of SRI change in the Jialing River Basin. The results show that:During 1982 to 2009, the trend of flooding in the basin weakened first and then increased, from 2010 to 2020, the trend of flooding increased for a short period and then decreased again. From 1982 to 2020, there was an insignificant weakening trend of drought in January, May, June, August, November and December. The trend of drying increased in July, September and October, and decreased significantly in February, March and April. A total of 39 times of drought-flood abrupt alternation events were identified at the Beibei hydrological station of the Jialing River Basin. The abrupt alternation points of drought-flood abrupt alternation events were concentrated in April and the intensity of drought-flood events was also high. The frequency of drought-flood abrupt alternation events in near 40 years has gradually increased, and shows a trend of gradual aggravation, which should be given sufficient attention.

Keywords: standardized runoff index; Jialing River Basin; drought-flood abrupt alternation; Mann-Kendall test

[责任编辑 赵晓华 刘洋]