

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250288

川渝 2022 年持续极端干旱日尺度时空过程分析

卢晓宁^{1,2}, 沈文宇¹, 徐丹丹¹, 徐维新¹, 杨世琦^{2,3}

(1. 成都信息工程大学资源环境学院, 四川 成都 610225; 2. 卫星遥感数字化应用创新重点实验室, 重庆 401147; 3. 重庆市气象科学研究所, 重庆 401147)

摘要: 为分析 2022 年川渝持续极端干旱日尺度时空过程, 基于 2018~2022 年 ERA5-Land 气象数据计算日尺度干旱指数, 通过三阈值游程理论对川渝地区 2022 年持续极端干旱过程进行识别, 并基于不同复杂地形区提取干旱历时、干旱烈度和干旱频次, 揭示川渝地区干旱过程异质性。结果表明, 2022 年川渝地区各像元发生干旱次数以 2 次居多, 旱情最严重发生在 8 月 22 日; 川渝地区夏季的持续极端干旱最早始于 6 月 16 日, 最晚出现在 8 月 28 日; 干旱平均历时达 67 d, 历时最长为 159 d, 最短为 17 d, 呈由西向东递增的趋势; 干旱烈度与干旱历时相关性达到 0.98, 变化趋势也一致。不同地形区中第一类干旱过程发生了春季干旱, 平均干旱次数为 3.5 次, 平均总历时 166 d, 平均烈度达到 193.63; 第二类(春季无旱)干旱次数平均为 2.2 次, 平均历时 120.6 d, 平均烈度为 136.27, 仅为第一类的 70.38%。研究结果可为区域日尺度干旱监测提供理论依据和技术支持。

关键词: 干旱; 日尺度; 标准化降水蒸散发指数; 川渝地区

中图分类号: P429

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0020-04

Analysis of Daily Scale Spatial and Temporal Processes of Sustained Extreme Drought in Sichuan and Chongqing in 2022

LU Xiao-ning^{1,2}, SHEN Wen-yu¹, XU Dan-dan¹, XU Wei-xin¹, YANG Shi-qi^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information and Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Laboratory of Remote Sensing Application and Innovation, Chongqing 401147, China; 3. Chongqing Meteorological Service, Chongqing 401147, China)

Abstract: To analyze the daily-scale spatiotemporal process of the persistent extreme drought in Sichuan and Chongqing in 2022, the daily-scale drought index was calculated based on the ERA5-Land meteorological data from 2018 to 2022. Three-threshold tour theory was used to identify persistent extreme drought events in the Sichuan-Chongqing Region in 2022. The duration, intensity, and frequency of the drought across different terrain types were extracted, and the spatial heterogeneity of drought processes was revealed. The results show that the majority of pixels in the Sichuan-Chongqing region were subjected to two drought events in 2022 and the worst of the drought occurred on 22 August. The average duration of persistent extreme drought in Sichuan-Chongqing region during the summer was 67 days, with the longest duration being 159 days and the shortest being 17 days, showing a increasing trend from west to east. The earliest drought started on 16 June and the latest on 28 August. The correlation between drought severity and drought duration reached 0.98, and their trends were consistent. In different terrain areas, the first type of drought process occurred in spring, with an average of 3.5 drought events, an average total duration of 166 days and an average severity of 193.63. The second type of drought with no drought in spring occurred on average 2.2 times, with an average duration of 120.6 days and an average severity of 136.27, which is only 70.38% of the first type. The research results can provide theoretical basis and technical support for regional daily drought monitoring.

Key words: drought; daily scale; SPEI; Sichuan and Chongqing regions

1 引言

通常使用干旱指数来描述基于实际或模拟水

文气象数据的干旱事件。干旱指数计算简单, 考虑了降水和潜在蒸散发, 且对各种气候的适应性好, 能够更好地表征干旱, 因此在干旱监测研究中

收稿日期: 2025-02-21, 修回日期: 2025-03-25, 接受日期: 2025-04-02

基金项目: 风云卫星先行计划资助项目(FY-APP-2024.0404); 国家自然科学基金面上项目(41971328)

作者简介: 卢晓宁(1980-), 女, 博士、副教授, 研究方向为资源环境遥感, E-mail: lxn@cuit.edu.cn

得到了广泛应用^[1]。目前大多数关于干旱的研究主要集中在月尺度的干旱特征揭示^[2],且对极端干旱的揭示主要侧重于干旱周期的研究^[3],缺乏基于日尺度干旱发展的时空综合度量。2022 年夏季川渝地区出现了严重干旱、持续时间长、极端性强^[4]。鉴于此,以 2022 年川渝地区持续极端干旱为研究对象,重点揭示这一复杂地形区极端干旱过程(频率、开始时间、历时、烈度)的时空异质性,以达到复杂地形区日尺度干旱量化前提下的干旱完整动态演变过程的目的,为该类地区的日尺度干旱监测提供理论依据和技术支持。

2 数据与方法

川渝地区(图 1)位于亚热带向温带的过渡带,地形呈现西高东低态势,温度随海拔高度和季节变化较大,降水时空差异明显,存在较为突出的季节性干旱问题。

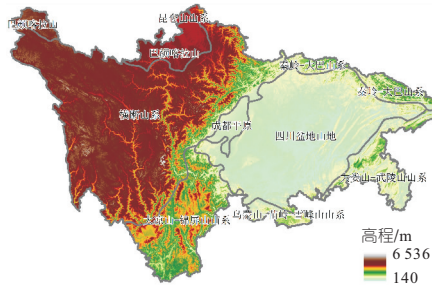


图 1 川渝地区地形地貌图
Fig. 1 Topography and geomorphology of Sichuan and Chongqing regions

2.1 数据来源

气象数据为 ERA5-Land,使用 2018~2022 年 ERA5-Land 逐小时降水、潜在蒸散发网格数据,并处理成日尺度。地形分区使用“中国数字山地图”(2015 版)中的中国山地分区数据,该数据集将山地从综合地貌制图中单独提取并系统划分,具有更高的空间分辨率和针对性。

2.2 研究方法

2.2.1 日干旱指数 I_{SPEI} 的计算

(1)计算逐日降水与潜在蒸散发值 D_i 。计算式为:

$$D_i = P_i - (E_{ET_0})_i \tag{1}$$

式中, i 为某日; P_i 为日降水量,mm; $(E_{ET_0})_i$ 为日潜在蒸散量,mm。

(2)建立水分盈亏序列 D_n^k 。表达式为:

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} [P_{n-i} - (E_{ET_0})_{n-i}] \quad n \geq k \tag{2}$$

式中, k 为时间尺度, d ; n 为某天。

(3)日干旱指数 I_{SPEI} 的计算。对数据进行正态化,所获结果即为 I_{SPEI} 值^[5],表 1 为日尺度 I_{SPEI} 干旱等级。

表 1 日尺度 I_{SPEI} 干旱等级
Tab. 1 Daily I_{SPEI} drought classification

I_{SPEI}	等级	I_{SPEI}	等级
$I_{SPEI} \leq -2$	极端干旱	$-1 < I_{SPEI} < -0.5$	轻度干旱
$-2 < I_{SPEI} \leq -1.5$	严重干旱	$I_{SPEI} \geq -0.5$	无旱
$-1.5 < I_{SPEI} \leq -1$	中度干旱		

2.2.2 三阈值游程理论

游程理论在干旱研究中应用广泛。单阈值法可能会造成一场严重干旱被分割为多场轻旱,从而低估了干旱严重程度,导致识别结果精度不高^[6]。采用三阈值法的游程理论方法来识别干旱事件并提取干旱特征变量,设置 3 个干旱发生阈值($X_0 = -0.5, X_1 = -0.3, X_2 = 15$),对干旱事件进行判定与合并,根据阈值 X_1 初步识别干旱事件,剔除历时短且强度未达 X_2 的事件,并将间隔一天且数值低于 X_1 的相邻事件合并,其历时和烈度分别累加计算。

3 结果与分析

3.1 全年干旱的发生频率及面积

由图 2 可知,川渝地区 2022 年各地发生干旱次数最高为 6 次,最低为 1 次,干旱发生次数为 2 次的像元占比最高,为 34.45%,接下来是 3、4 次,出现概率最低为 6 次。

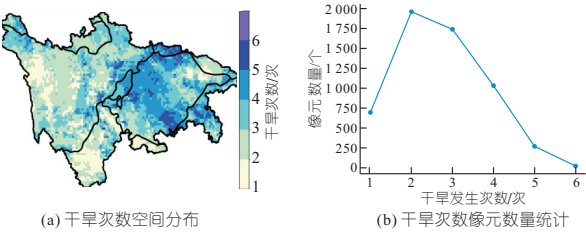


图 2 2022 年川渝地区干旱次数空间分布及统计

Fig. 2 Spatial distribution and statistics of the number of droughts in Sichuan and Chongqing regions in 2022

2022 年夏季川渝地区发生了持续极端干旱事件,由图 3 可看出,发生干旱面积的峰值出现在 8 月 22 日,占到区域总面积的 98.11%,7 月 12 日至 8 月 4 日、8 月 18 日至 9 月 1 日干旱面积达到整个区域 90%。无旱面积主要集中在上半年,占比高达 71.07%,下半年中无旱主要集中在 9 月下旬和 10 月。统计全年旱情影响面积情况,中旱占比最高(23.02%),其次为轻旱(10.29%)和重旱(7.14%),极端干旱占比最低(2.09%)。川渝地区轻旱面积呈线性上升趋势,中旱面积呈现

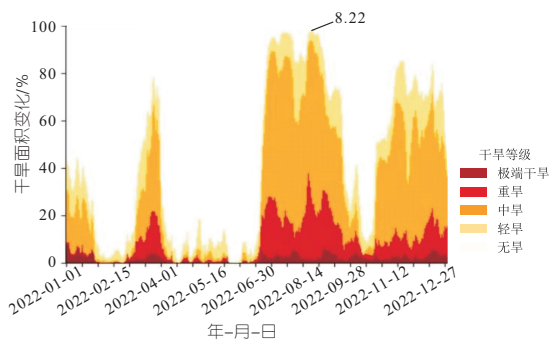


图3 2022年川渝地区不同干旱等级日尺度面积变化
Fig.3 Changes in daily scale area of different drought classes in Sichuan and Chongqing regions in 2022

四个阶段性变化,重旱面积则为中旱的 31.03%,分为三个阶段变化。

极端干旱面积发生比例较低,呈现 3 个发展阶段:①从年初至 2 月 1 日,极端干旱呈下降变化,在 1 月 1 日达到最大值 $4.47 \times 10^4 \text{ km}^2$;②在 2 月 24 日,极端干旱面积开始增加,在 3 月 23 日达到峰值 $2.44 \times 10^4 \text{ km}^2$,之后下降过程一直持续到 4 月 14 日,这一阶段时间最短、旱情不显著;③在经历了 2 个月的低值,极端干旱面积于 6 月 27 日开始增加,第一次极值在 7 月 5 日出现,面积达到 $3.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,在此之后经历反复的曲折变化,一直持续到年底,极端干旱在 10、11 月相对缓解。第三阶段的峰值虽低于第一阶段,但持续时间长达 5 个月,因此造成的负面影响也更深远。

3.2 持续极端干旱的时空特征分析

通过游程理论提取干旱特征(开始时间、历时、烈度),发现川渝地区持续干旱主要始发于 7 月初,以 7 月 3~9 日集中始发,占到区域面积的 52.59%。最早的旱情于 6 月 16 日,始发于大凉山南部和乌蒙山系南部。这可能是受到大尺度环流系统的影响,西太平洋副热带高压从 6 月开始持续增长并向北发展,受其影响地区气流下沉,降水偏少,容易发生干旱。此后,旱情向北、东和西三个方向扩展。以区域北部旱情发生最晚,于 8 月 28 日才表现出此次持续性干旱,区域上集中在秦岭—大巴山系西段及其接壤地区(图 4(a))。西部区域的旱情相对开始较晚,主要始发于 7 月 9~21 日。四川盆地山地西南与大凉山交界区域的干旱集中发生于 7 月 21 日至 8 月 2 日(图 4(b))。

从干旱历时看,该场干旱平均历时达 67 d,历时最长为 159 d,但面积只有 $0.04 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于秦岭—大巴山系东段;历时最短的也有 17 d,出现在大凉山系,面积仅 $0.02 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。以 59 d 峰值为中心的 55~62 d 干旱历时的旱情区域上集中分布在横断山系,而以 79、83 d 的双峰值为

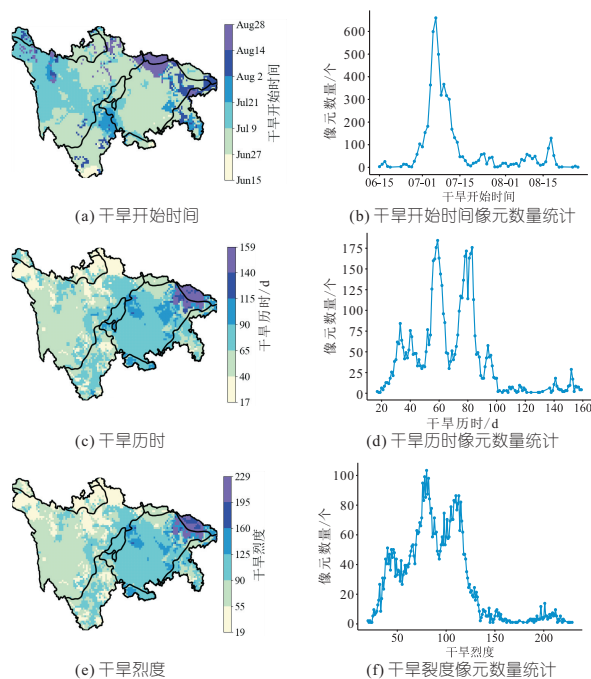


图4 2022年川渝地区持续极端干旱开始时间、历时及烈度空间分布及统计

Fig.4 Spatial distribution and statistics of the start time, duration and intensity of persistent extreme drought in Sichuan and Chongqing regions in 2022

中心的 75~84 d 的干旱历时的旱情区域上则集中在四川盆地山地。由图 4(c)可知,川渝地区 2022 年持续极端干旱历时总体呈现出由西向东递增的趋势。

由于干旱烈度与历时的高度相关性(相关系数 0.98),导致川渝地区 2022 年持续极端干旱的干旱烈度图(图 4(e))与干旱历时图(图 4(c))呈现出较高的空间一致性。干旱历时长秦岭—大巴山系东段地区,干旱烈度也高,历时短的地区烈度也低,横断山系北部、巴颜喀拉山和昆仑山系干旱烈度较低。干旱烈度最高为 228.72,最低值仅 19.82,只有最高值的 8.67%。干旱烈度同样呈现出与历时一致的由西向东递增趋势。

3.3 各地形区全年干旱过程分析

川渝地区不同地形区的干旱过程大致可分为两类,其中第一类的特征为出现春季旱情,分布在川东和重庆地区,包括成都平原、四川盆地山地、秦岭山系和大娄山山系。而第二类在春季无旱情发生,主要位于川西地区。该区域植被覆盖率高,植被的蒸腾作用在一定程度上缓解春季温度回暖造成的干旱,因此未发生春季干旱。

对第一类干旱过程进行区域对比分析,四川盆地山地 2022 年发生干旱次数最多,有 5 次,同时其干旱总历时最长,长达 197 d。该地区第三次干旱为持续极端干旱,单次历时最久且烈度最强,

从 7 月 5 日至 10 月 6 日,共 94 d,烈度为 116.20,烈峰达到 1.43;秦岭山系干旱总历时位居第二,为 167 d,但全年仅发生了 2 次干旱。持续极端干旱发生在第二次干旱,历时长达 144 d,从 7 月 5 日一直持续到 11 月 25 日,在 8 月 6~16 日旱情稍有减轻,该场干旱在所有独立干旱中历时最长,烈度达到 175.46,烈峰为 1.45。成都平原发生了 4 次干旱,总历时 153 d,第三次干旱从 7 月 7 日开始,到 9 月 25 日结束,为持续极端干旱,历时 81 d,烈度(102.79)低于四川盆地山地,但烈峰更强,达到 1.51。大娄山山系共发生了三次干旱,第二次历时 84 d,从 7 月 5 日至 9 月 26 日(持续极端干旱),烈峰出现在 7 月 28 日,为 1.73。

在第二类干旱过程中,除了昆仑山系发生了 3 次干旱过程,其余地形区全年均只发生了两次干旱事件。干旱总历时较长的地区为大凉山山系,达到 131 d,该地区持续极端干旱发生在 7 月 4 日至 9 月 19 日,历时 78 d,烈峰为 1.51。巴颜喀拉山总历时为 125 d,持续极端干旱从 7 月 8 日开始至 9 月 2 日结束,共 75 d,烈峰为 1.41,出现在 8 月 2 日,同时在 8 月 12 日和 9 月 4 日两个时间前后,干旱有所缓解。横断山系总干旱历时 123 d,第一次干旱发生在 7 月 10 日至 9 月 19 日(持续极端干旱),历时 72 d,烈度达到 76.95。昆仑山山系 I_{SPEI} 值变化剧烈,该地区夏季干旱无持续性特征,而是分成了 2 个干旱事件,分别是 7 月 10 日至 8 月 5 日和 8 月 12~31 日,持续时间较短,一共只有 47 d,但烈峰较高,达到了 2.21,发生在 8 月 2 日;乌蒙山山系是全部地形区中干旱总历时最短的地区,只有 106 d,持续极端干旱发生在 7 月 2 日至 9 月 22 日,经历了 83 d,7 月 14 日达到烈峰 1.94。

对比两种类型的干旱过程,第一类干旱过程平均干旱次数为 3.5 次,平均总历时 166 d,平均烈度达到 193.63,同时烈峰为 1.99,出现在成都平原;第二类过程平均干旱次数为 2.2 次,平均历时 120.6 d,比第一类干旱过程短 45.4 d,平均烈度为 136.27,仅为第一类的 70.38%,烈峰最强出现在昆仑山,达到 2.21,高于第一类干旱过程。2022 年川渝不同地形区干旱过程历时、烈度、烈峰及干旱次数统计见表 2。2022 年川渝不同地形区 I_{SPEI} 变化见图 5。

4 结论

a. 2022 年川渝地区各像元发生干旱次数以

表 2 2022 年川渝不同地形区干旱过程历时、烈度、烈峰及干旱次数

Tab.2 Duration, intensity, peak and number of droughts in different topographic regions of Sichuan and Chongqing regions in 2022

山系	历时/d	烈度	烈峰	干旱次数/次
四川盆地山地	197	209.83	1.43	5
秦岭山系	167	197.07	1.45	2
成都平原	153	188.66	1.99	4
大娄山山系	147	178.96	1.73	3
大凉山山系	131	139.53	1.51	2
巴颜喀拉山	125	130.42	1.49	2
横断山系	123	133.13	1.38	2
昆仑山山系	118	137.09	2.21	3
乌蒙山山系	106	141.18	1.94	2

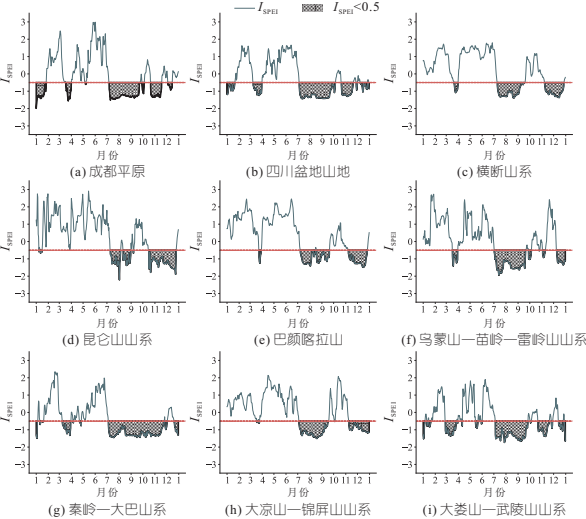


图 5 2022 年川渝不同地形区 I_{SPEI} 变化

Fig.5 Changes of I_{SPEI} in different topographic regions of Sichuan and Chongqing regions in 2022

2 次居多,8 月 22 日旱情最严重,发生干旱面积占到总面积的 98.11%。

b. 川渝地区夏季持续极端干旱平均历时达 67 d,历时最长为 159 d,最短为 17 d,干旱历时大致呈现从西向东递增的趋势;干旱最早始于大凉山南部,时间为 6 月 16 日;干旱烈度与干旱历时相关性达到 0.98。

参考文献:

[1] ZHAO H Y, GAO G, AN W, et al. Timescale differences between SC-PDSI and SPEI for drought monitoring in China[J]. Physics and chemistry of the earth, parts A/B/C, 2017, 102: 48-58.

[2] 贺晓婧, 荣艳淑. 长江流域上游干旱特征分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(1): 1-4. (HE X J, RONG Y S. Analysis of drought characteristics in the upper reaches of the Yangtze River Basin[J]. Water resources and power, 2020, 38(1): 1-4. (in Chinese))

(下转第 231 页)

运调度,人工创造水位波动,可改善水动力条件,有可能抑制水华发生。其中,方案 1 水位日均波动最大,日平均水位波动 0.73 m;方案 2、3、4 日均水位波动 0.54 m;方案 5 日均水位波动为 0.39 m。

5 结论

提出向家坝枯水期潮汐式航运调度模型,可实现枯水期发电、航运、生态的多目标共赢。一是可大大缓解枯水期向宜江段通航的压力,增加大型船舶通航时间,平均提高单船货运量 16%;二是可提高日均发电水头 0.3 m,提高水资源利用率;三是通过控制向家坝坝上水位周期性“涨一落”,可促进库水体交换,有可能抑制水华发生,但具体对向家坝库区水华的抑制作用效果,还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 李英海,董晓华,郭家力. 三峡梯级水电站汛末联合多目标蓄水调度研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 61-64. (LI Y H, DONG X H, GUO J L. Study on Three Gorges cascade power stations joint multi-objective impounding operation in flood recession period[J]. Water resources and power, 2015, 33(9): 61-64. (in Chinese))
- [2] 陈桂亚,郭生练. 水库汛期中小洪水动态调度方法与实践[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 22-27. (CHEN G Y, GUO S L. Dynamic operation of reservoir for small and median inflows in flood season [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2012, 31(4): 22-27. (in Chinese))
- [3] 邹泽华,韩媛媛,赵全. 向家坝水电站汛期航运调度浅析[J]. 中国水运, 2022, 22(10): 112-114. (ZOU Z H, HAN Y Y, ZHAO Q. Analysis on shipping dispatching of Xiangjiaba Hydropower Station in flood season [J]. China water transport, 2022, 22(10): 112-114. (in Chinese))
- [4] 牛文静,申建建,程春田,等. 耦合调峰和通航需求的梯级水电站多目标优化调度混合搜索方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2331-2341. (NIU W J, SHEN J J, CHENG C T, et al. A hybrid search method for multi-objective optimization operations of cascaded hydropower plants with peak load regulation and navigation demands [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2331-2341. (in Chinese))
- [5] 毕明亮,潘增,邢龙,等. 白鹤滩蓄水期向家坝控泄对下游航道影响分析[J]. 水运工程, 2022(4): 81-87. (BI M L, PAN Z, XING L, et al. Influence of Xiangjiaba discharge control on downstream channel during impoundment period of Baihetan [J]. Port & waterway engineering, 2022(4): 81-87. (in Chinese))
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 长江干线通航标准: JTS 180-4-2020[S]. 北京:人民交通出版社, 2020. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Navigation Standard of Changjiang River Mainstream: JTS 180-4-2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese))
- [7] 刘德富,杨正健,纪道斌,等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 443-454. (LIU D F, YANG Z J, JI D B, et al. A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of hydraulic engineering, 2016, 47(3): 443-454. (in Chinese))
- [8] 王鸿洋,杨霞,马骏,等. 三峡水库汛期中小洪水调度对支流水华的影响[J]. 水力发电学报, 2021, 40(7): 61-72. (WANG H Y, YANG X, MA J, et al. Influence of regulating small and medium floods on algal blooms in tributaries of Three Gorges Reservoir in flood season [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2021, 40(7): 61-72. (in Chinese))
- [3] 张明波,戴明龙,熊丰,等. 2022 年长江流域极端干旱分析及思考[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(7): 9-15. (ZHANG M B, DAI M L, XIONG F, et al. Analysis and reflection on extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. China flood & drought management, 2023, 33(7): 9-15. (in Chinese))
- [4] 孙昭萱,张强,孙蕊,等. 2022 年西南地区极端高温干旱特征及其主要影响[J]. 干旱气象, 2022, 40(5): 764-770. (SUN Z X, ZHANG Q, SUN R, et al. Characteristics of the extreme high temperature and drought and their main impacts in southwestern China of 2022 [J]. Journal of arid meteorology, 2022, 40(5): 764-770. (in Chinese))
- [5] 梁晶晶,张勃,马彬,等. 基于日值 SPEI 的青藏高
- 原干旱演变特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1100-1109. (LIANG J J, ZHANG B, MA B, et al. Drought evolution characteristics on the Tibetan Plateau based on daily standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of glaciology and geocryology, 2018, 40(6): 1100-1109. (in Chinese))
- [6] 姜忠峰,许桂平,张凯. 基于 SPEI 的贵州省气象干旱时空演变特征及双变量区域频率分析[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(5): 20-31. (JIANG Z F, XU G P, ZHANG K. Spatiotemporal variation and bivariate regional frequency analysis of meteorological droughts in Guizhou Province based on SPEI [J]. Journal of water resources and water engineering, 2023, 34(5): 20-31. (in Chinese))

(上接第 23 页)