

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250578

来水偏枯情况下向家坝水电站潮汐式航运调度研究

陈忠贤^{1,2}, 张楠男^{1,2}, 赵明亮^{1,2}, 姚 斌^{1,2}, 周 凌^{1,2}, 高 策^{1,2}

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 宜昌 443133;

2. 高坝大库运行安全湖北省重点实验室(中国长江三峡集团有限公司), 湖北 宜昌 443133)

摘要: 乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝水电站投运后,极大改善了金沙江下游航道条件,促使该江段船舶日趋向大型化发展。在遭遇金沙江偏枯来水时,向家坝至宜宾江段航道水深较浅,大型货船通行困难,影响航运效益发挥。对此,通过分析该江段主力船型装载量与向家坝出库流量关系,得出该江段最佳适航流量;结合码头船舶实际运行情况,建立了通过向家坝水电站间歇性释放适航流量的“潮汐式航运调度”模型,并拟定多种方案模拟演算。结果表明,向家坝水电站通过潮汐式航运调度方式,可增加大型船舶通航时间,平均提高单船货运量16%,提高发电水头0.31 m,也对促进库区水体交换有着积极影响。研究结果可为区域航运调度管理提供参考。

关键词: 水利管理; 潮汐式航运调度; 水库调度; 向家坝水电站

中图分类号: TV697.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0227-05

Research on Tidal Shipping Scheduling of Xiangjiaba Hydropower Station Under Conditions of Low Inflow

CHEN Zhong-xian^{1,2}, ZHANG Nan-nan^{1,2}, ZHAO Ming-liang^{1,2},
YAO Bin^{1,2}, ZHOU Ling^{1,2}, GAO Ce^{1,2}

(1. China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China; 2. Hubei Key Laboratory of Operation Safety of High Dam and Large Reservoir(China Three Gorges Corporation), Yichang 443133, China)

Abstract: After the operation of Wudongde, Baihetan, Xiluodu and Xiangjiaba hydropower stations (XJB), the channel conditions in the lower reaches of the Jinshajiang River have been greatly improved, which prompts the ships in this section of the river to increasingly develop towards larger sizes. When encountering the dry inflow from the Jinshajiang River, the water depth of the channel from Xiangjiaba to Yibin River is shallow, and the passage of large cargo ships is difficult, which affects the shipping efficiency of the river section. By analyzing the relationship between the loading capacity of the main ship types and the discharge from XJB, the optimal seaworthy discharge of the river section is obtained. Combined with the actual operation of the ships at the wharf, a tidal shipping scheduling model was established by intermittently releasing the seaworthy flow of XJB, and a variety of schemes were proposed to simulate the calculation. The results show that the XJB can increase the navigation time of large ships, increase the average cargo volume of a single ship by 16%, and increase the power generation head by 0.31 m, and has a positive impact on promoting the exchange of water bodies in the reservoir area. The research results can provide references for regional shipping scheduling management.

Key words: water management; tidal shipping scheduling; reservoir operation; Xiangjiaba Hydropower Station

1 引言

大型水电站除发电外,通常还承担着防洪、航运、灌溉等多重任务^[1]。近些年来随着技术和经济发展,防汛、电力、航运、生态等各方面均对水电

站提出了更高的需求,实际运行调度中各方对电站调度诉求往往不同,各调度目标之间常存在矛盾,为水电调度运行带来较大挑战。水库在非汛期以电调为主,因此现有研究多集中在发电与防洪、发电与生态、发电与航运等多目标协调方面。

收稿日期: 2025-03-28,修回日期: 2025-04-25,接受日期: 2025-05-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(U24A20180);中国长江三峡集团有限公司自主科研项目(BNYG202300648)

作者简介: 陈忠贤(1972-),男,正高级工程师,研究方向为梯级水库群联合调度,E-mail: chen_zhongxian@ctg.com.cn

通讯作者: 张楠男(1993-),男,工程师,研究方向为水库调度和电站通航管理,E-mail: zhang_nannan@ctg.com.cn

目前,水库航运调度研究主要集中在调整下泄流量、控制电站调峰幅度等方面。如陈桂亚等^[2]提出汛期在不影响防洪安全的情况下,对中小洪水进行拦蓄,可增加汛期船舶通航时间;邹泽华等^[3]提出汛期昼夜差异化调度方式,为白天船舶通航创造条件;牛文静等^[4]通过控制电站调峰幅度来兼顾通航需要。现有研究主要针对汛期调度,有关枯水期航运优化调度的研究较少。向家坝水电站是贯通金沙江和长江干流航线的重要枢纽,目前向家坝断面年均通货量已达 $1\,000\times 10^4\text{ t}$,较建坝前提高近20倍。近些年,枯水期向家坝至宜宾河段(简称向宜江段)航运压力大,在2023~2024年的4~5、11月,受来水偏枯影响,向宜江段通航水深不足,近50余艘船舶在该江段积压滞留数周,对航运及社会影响较大。鉴此,本文通过分析向宜江段最佳通航流量,提出了一种“潮汐式”航运调度方式,可兼顾较枯来水情况下的航运需求。研究结果可为区域航运调度管理提供参考。

2 向宜江段枯水期最佳适航流量

2.1 航道情况

向宜江段长约33 km,为天然V级航道。向宜江段有多处滩险,绝大部分为枯水滩,航道尺度不足是其碍航的主要原因,主要滩险情况见表1。金沙江下游梯级电站投运后,在枯水期可增加天然流量 $1\,300\text{ m}^3/\text{s}$,极大改善了航道条件,也促使该河段运营的船舶向大型化方向发展,目前该江段主力货运船舶已从1 000吨级发展至4 000~6 000吨级。

表 1 金沙江向宜江段滩险概况统计表
Tab. 1 Statistics of beach risk in XJB-Yibin reach of Jinsha River

滩名	距宜宾合江门里程/km	滩险类别	备注
牛皮滩	30.2	急、险	中洪水碍航
横江河口	28.0	险滩	中洪水碍航
烧瓦沱	25.0	浅、险滩	枯水碍航
和尚崖	23.3	浅、险滩	枯水碍航
二郎滩	21.4	险滩	枯水碍航
栈桥滩	18.3	浅、险滩	枯水碍航
碎米滩	16.0	险滩	枯中水碍航
鸡翅膀	14.2	险滩	中水碍航
桐子林	11.0	急滩	中洪水碍航
铜贯滩	10.3	浅滩	中水碍航
黄葱咀	8.2	急险滩	中水碍航
大雪滩	5.1	浅、险滩	枯水碍航
小雪滩	3.6	急、险	中洪水碍航

2.2 险滩通航水深与通航流量关系推求

向宜江段规划航道等级为Ⅲ级,航道吃水在

2.4~3.0 m范围内。采用MIKE11水动力模型,通过构建向家坝至宜宾江段一维水动力模型,模拟向家坝在不同出库流量情况下该江段沿程水深,得出烧瓦沱断面为影响航道的主要浅滩断面^[5],该断面水深制约了整个航道水深尺度。

烧瓦沱断面水深主要受向家坝出库、横江以及岷江流量顶托影响,设定岷江、横江流量为固定值,模拟向家坝不同出库与烧瓦沱断面水深关系,见表2。根据《长江干线通航标准》^[6],Ⅲ级航道需要扣除0.3~0.4 m的富裕水深,考虑到向宜江段实际航行船舶已达到6 000吨级,为进一步保证航行安全,按0.7 m富裕水深考虑。

表 2 烧瓦沱断面通航水深与向家坝出库流量关系
Tab. 2 Relationship between navigation depth of Shaowatuo section and discharge from XJB

向家坝 出库流量 /($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	岷江流量 /($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	横江流量 /($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	烧瓦沱 通航计算 水深/m	扣除0.7 m 富裕水深 /m
1 700	700	100	3.05	2.35
2 000	700	100	3.20	2.50
3 000	700	100	4.18	3.47
4 000	700	100	5.16	4.46
5 000	700	100	6.09	5.39
6 000	700	100	7.00	6.30

2.3 主力船舶装载量与吃水关系推求

目前,向宜江段丰水期可通行4 000~6 000吨级大型船舶,枯水期主力船舶则需减载航行,仅能装载1 000~2 000吨左右。通过沿线码头走访调查,较为全面地收集了该江段代表性船舶信息。结合船舶船型尺度,将该河段主要船型分为1 000~2 500吨级、3 000~6 000船级范围,针对不同吨位范围船舶,分析装载量与吃水深度关系,总体呈线性相关,不同吨级船装载量与吃水关系见表3。

表 3 向宜江段主力船舶装载量与吃水深度表

Tab. 3 Table of loading capacity and draft of main ships in XJB-Yinbin river section

船舶 吨位/t	装载量 /t	吃水深 度/m	船舶 吨位/t	装载量 /t	吃水深 度/m
1 000~2 500	1 000	2.8	3 000~6 000	2 300	2.2
	1 400	3.0		2 900	2.9
	2 300	3.4		3 200	3.0
	2 500	3.8		3 700	3.5
				5 000	4.3

2.4 主力船舶装载量与向家坝出库流量关系推求

根据向家坝不同出库流量与烧瓦沱断面水深关系以及主力船型装载量与吃水深度关系,推求出主力船舶装载量与向家坝出库流量关系,见表4。本文所述枯水期最佳通航流量是指所有船型满载或接近满载通航的最小流量。由表4可知,

表 4 主力船型装载量与向家坝出库流量关系
Tab. 4 Relationship between loading capacity of
main ship type and discharge flow of XJB

出库流量 /(m ³ ·s ⁻¹)	不同吨级船舶的吨位/t			
	1 000 吨级	2 500 吨级	3 000 吨级	6 000 吨级
1 700	600	1 000	1 200	2 200
2 000	800	1 300	1 500	2 600
3 000	1 000	2 000	2 300	3 700
4 000	1 000	2 500	3 000	5 280
4 500	1 000	2 500	3 000	6 000
5 000	1 000	2 500	3 000	6 000

向家坝出库流量 4 500 m³/s 时,所有吨位船舶均可满载航行。经实地调研,受该河段险滩、转弯半径等因素影响,6 000 吨级船舶通常装载在 5 000 t 左右,即当向家坝出库流量在 4 000 m³/s 左右时,可满足目前所有吨位船舶满载或者接近满足航行需求。因此,得出目前向宜江段枯水期最佳通航流量为 4 000 m³/s。

3 潮汐式航运调度模型

3.1 方案设置

“潮汐式”调度主要目的是在偏枯来水情况下,间歇性减小或增大向家坝出库流量,为重载大型货船出航提供有利条件。以 7 d 为一个调节周期,设置 5 种调节方案。考虑到实际电力调度中,“周六、周日”负荷较小,向家坝电站出库流量相应较小,此时段设为小流量下泄“0”,船舶可利用此时段进行装卸货;“周一”和“周五”船舶需出航运输货物,故设置为大流量下泄“1”;“周二至周四”可自由设置。具体方案见表 5。

表 5 大流量通航方案

Tab. 5 Large flow navigation scheme								
大流量通航天数/d	方案	周六	周日	周一	周二	周三	周四	周五
2	1	0	0	1	0	0	0	1
	2	0	0	1	1	0	0	1
3	3	0	0	1	0	1	0	1
	4	0	0	1	0	0	1	1
4	5	0	0	1	1	0	1	1

注:“1”为大流量下泄时段;“0”为小流量下泄时段。

3.2 约束条件

(1)水量平衡约束。表达式为:

$$v_t = v_{t-1} + 3\,600(Q_t - u_t)\Delta t \tag{1}$$

其中

$$u_t = q_t + s_t$$

式中, v_t 为 t 时段末水库库容, m³; Q_t 为 t 时段水库入库流量, m³/s; u_t 为水库 t 时段的出库流量, m³/s; q_t 为 t 时段电站发电流量, m³/s; s_t 为 t 时段电站弃水流量, m³/s。

(2)发电流量约束。表达式为:

$$\underline{Q} \leq q_t \leq \bar{Q} \tag{2}$$

式中, $\bar{Q}$ 、 $\underline{Q}$ 分别为电站的发电流量最大、最小值, m³/s。

(3)库水位约束。表达式为:

$$\underline{Z} \leq z_t \leq \bar{Z} \tag{3}$$

式中, $\bar{Z}$ 、 $\underline{Z}$ 分别为水库运行的最高、最低水位; z_t 为水库在 t 时段的末水位值, m。

(4)出库流量限制。表达式为:

$$\underline{U} \leq u_t \leq \bar{U} \tag{4}$$

式中, $\bar{U}$ 、 $\underline{U}$ 分别为水库出库流量最大、最小值, m³/s。

(5)各时段流量约束。表达式为:

$$\begin{cases} q_{\max}m + q_{\min}n = q_{\text{avg}}N \\ m + n = N \\ q_{\max} \leq Q_{\text{优}} \\ q_{\min} \geq Q_{\text{下限}} \end{cases} \tag{5}$$

式中, $q_{\max}$ 、 $q_{\min}$ 分别为各方案中水库小流量下泄时段和大流量下泄时段的出库流量, m³/s; m 、 n 、 N 分别为大流量通航时间、小流量通航时间和总时间段; $Q_{\text{优}}$ 为最佳适航流量; $Q_{\text{下限}}$ 为通航流量下限; q_{avg} 为时段平均出库流量。

3.3 调度规则

各方案中小流量下泄时段“0”的出库流量推荐值为 $Q_{\text{小}}$, 大流量下泄时段“1”的出库流量推荐值为 $Q_{\text{大}}$ 。以 7 d 为一个周期,输入该时段的入库流量,式(1)~(5)条件下,计算 $Q_{\text{小}}$ 、 $Q_{\text{大}}$ 。具体计算步骤如下。

步骤 1 判断是否启动潮汐式航运调度。当 $Q_{\text{in}} \geq Q_{\text{优}}$, Q_{in} 为入库流量,当预报未来一周向家坝入库流量大于向宜江段枯水期最佳通航流量时,通航条件较好,不开展航运调度。否则开展潮汐式航运调度,转入下一步。

步骤 2 设置初始流量 $Q_{\text{大}}$,令 $Q_{\text{大}} = q_{\max} = Q_{\text{优}}$ 。

步骤 3 计算小流量下泄时段“0”的出库流量推荐值为 $Q_{\text{小}}$ 。根据式(5)计算 $q_{\min}$,并判断 $q_{\min}$ 是否满足约束。若 $q_{\min} \geq Q_{\text{下限}}$,则令 $Q_{\text{小}} = q_{\min}$ 。若 $q_{\min} < Q_{\text{下限}}$,则 $Q_{\text{小}} = Q_{\text{下限}}$,并转入下一步计算 $Q_{\text{大}}$ 。

步骤 4 计算大流量下泄时段“1”的出库流量推荐值为 $Q_{\text{大}}$ 。令 $q_{\min} = Q_{\text{下限}}$,根据式(5)计算 $q_{\max}$,令 $Q_{\text{大}} = q_{\max}$ 。

4 结果与分析

2023 年 4~6 月,金沙江来水大幅偏枯,较金

下四库投运以来(2022~2024 年)均值偏枯 2 成,大型货船积压情况时有发生。以 2023 年 4~6 月(91 d)向家坝水情为基础,分别计算 5 种方案,并统计各项指标,具体计算结果见表 6。典型出库过程见图 1;方案 3 出入库及水位过程见图 2。具体参数向家坝控制水位设置为 375 m, $Q_{\text{优}}$ 取值为 4 000 m^3/s , $Q_{\text{下限}}$ 根据交通部相关规定取值为 1 500 m^3/s 。

向宜江段货运量计算规则就是根据实际调

研,在达到主力船型通航流量时,以主力船型通航为主。当流量不满足主力船型通航条件时,各吨位级船舶等比例分配,主力船型通航流量设置为 2 500 m^3/s 。根据主力船型装载量与向家坝出库流量关系,计算各时段通航货运量。因向家坝水电站枯水期调节能力有限,短周期内通常按出入库平衡方式控制。为便于对比分析各指标变化情况,增加按出入库平衡方式控制工况。

表 6 各调度方式模拟结果

Tab. 6 Simulation results of each scheduling scheme

方案	大流量通航天数/d		单船日均载 货量/t	向宜河段总 货运量/ 10^4 t	发电量 /($10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$)	发电水 头/m	ΔZ_{up} /m	满足条件的天数 ($\Delta Z_{\text{up}}\geq 0.5\text{ m}$)/d
	3 000 m^3/s 级	4 000 m^3/s 级						
出入库平衡	3	0	1 722	250.72	49.870 3	108.02	0	0
方案 1	8	14	1 951	284.07	49.884 0	108.19	0.73	77
方案 2	18	6	1 996	290.61	49.892 3	108.24	0.58	55
方案 3	21	3	2 002	291.53	49.938 3	108.34	0.50	48
方案 4	18	6	1 996	290.61	50.023 7	108.54	0.57	50
方案 5	16	0	1 889	275.03	49.977 2	108.34	0.39	25

注:1. 300 m^3/s 级范围为 2 900~3 000 m^3/s ,4 000 m^3/s 级范围为 3 600~4 000 m^3/s ;2. ΔZ_{up} 为向家坝坝上水位日变幅。

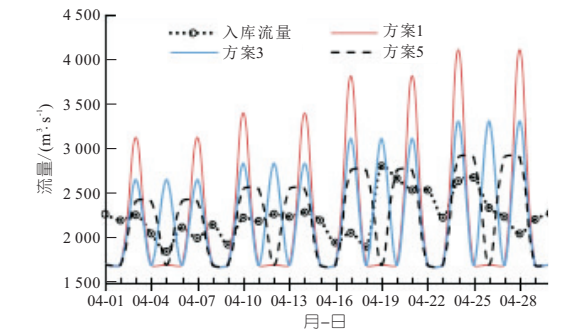


图 1 主要方案出库流量过程图

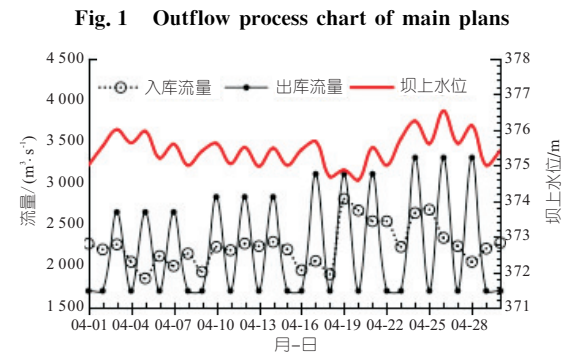


图 2 方案 3 出入库及水位变化图

Fig. 2 Plan III inflow and outflow and water level change diagram

4.1 航运效益分析

由表 6 可知,方案 1 中大流量通航天数 22 d,大流量通航率为 24.18%,与按出入库平衡控制相比,可提高向宜江段货运量 13.30%;方案 2、3、4 大流量通航天数均为 24 d,大流量通航率为 26.37%,3 种方案平均增加向宜江段总货运量 $40.19\times 10^4\text{ t}$,其中方案 3 增加最多,提高幅度为 16.28%;方案 5 仅增加 3 000 m^3/s 流量级适航

天数 16 d,总适航天数为各方案最少。

通过潮汐式航运调度,可为大型船舶通航创造适宜的流量条件,提升向宜江段通航货运量。建议实际调度过程中采用“一周三天”的大流量通航方案,即方案 2、3、4,平均提高单船货运量 16%,最大可增加大流量通航天数 24 d,日均提升货运量 $0.44\times 10^4\text{ t}$,计算周期内提升向宜江段总货运量 $40.81\times 10^4\text{ t}$ 。

4.2 发电效益分析

由表 6 可知,各方案均提高了发电水头,平均提高发电水头 0.3 m,平均提高发电量 $0.073\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。其中,方案 4 提高发电效益最大,提高了日均发电水头 0.52 m,提高了计算时段内发电量 $0.15\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$;方案 1 提高发电效益较小,提高了日均发电水头 0.17 m,提升计算时段内发电量 $0.01\times 10^8\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。由此可知,通过潮汐式调度,控制向家坝库水位周期性“涨落”,与按出入库平衡控制相比,各方案均可抬高发电水头,提高电站发电量。

4.3 可促进水体水质交换

向家坝蓄水成库后,库区支流、库湾区域流速变缓,加之向家坝水库沿岸污水直排、农业面源污染等影响,部分水域营养化水平较高,一旦遇有适宜的温度、光照等条件,发生水华的潜在风险加大,对水体生态平衡、生物多样性等存在影响。目前研究认为蓄水后水动力条件改变是库区支流水华暴发的主要诱因^[7],三峡水库通过控制水位周期性波动可以抑制水华^[8]。

鉴于此,枯水期通过对向家坝开展潮汐式航

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
- [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)