

张启凡, 荆平飞, 李肖男, 等. 三峡水库促进四大家鱼繁殖生态调度与综合利用需求协调性策略研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(9): 15-29. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.002

ZHANG Qifan, JING Pingfei, LI Xiaonan, et al. Study on the coordinating strategy of the Three Gorges Reservoir for ecological operation to promote spawning of the four major Chinese carps and comprehensive utilization demand[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(9): 15-29. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.002

三峡水库促进四大家鱼繁殖生态调度与综合利用需求协调性策略研究

张启凡^{1,2,3}, 荆平飞⁴, 李肖男⁴, 戴凌全^{1,2}, 姜伟^{1,2}, 王安琪⁴

(1. 中国长江三峡集团有限公司 长江生态环境工程研究中心, 湖北 武汉 430014; 2. 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 湖北 武汉 430014; 3. 中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所, 湖北 宜昌 443100; 4. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:【目的】三峡水库促进四大家鱼自然繁殖生态调度与其他综合利用需求的协调性策略尚未明确。为厘清生态调度约束, 提出生态调度与其他综合利用需求的协调性策略, 【方法】在历年生态调度试验总结基础上, 结合调度规程和调度实践对三峡水库调度需求及约束进行归纳, 计算分析了集中消落期和汛期开展生态调度对其他综合利用需求的影响。【结果】结果显示: 集中消落期开展生态调度, 有47.3%的年份葛洲坝发生弃水、21.8%的年份三峡水库水位日降幅超过1 m限制, 但抬高6月10日消落水位或降低5月25日库水位可显著降低葛洲坝弃水和库水位日降幅超限年份占比。汛期6月中下旬在 $P=90\%$ 典型年下生态调度开展的需水量存在缺口。【结论】结果表明: 三峡水库集中消落期开展生态调度不存在水量约束, 对防洪、供水和航运基本无影响, 但存在葛洲坝弃水及库水位日降幅超1 m风险; 汛期6月中下旬开展生态调度受水量制约, 防洪风险可控。据此提出了三峡水库兼顾生态调度的控制水位优化建议: 预报来水较丰年份, 可提前消落, 降低5月25日库水位; 预报来水较枯年份, 可进一步抬升6月10日运行水位至150.0 m。

关键词: 三峡水库; 四大家鱼; 生态调度; 综合利用需求; 协调性分析; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.09.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)09-0015-15



与作者互动
扫描二维码

Study on the coordinating strategy of the Three Gorges Reservoir for ecological operation to promote spawning of the four major Chinese carps and comprehensive utilization demand

ZHANG Qifan^{1,2,3}, JING Pingfei⁴, LI Xiaonan⁴, DAI Lingquan^{1,2}, JIANG Wei^{1,2}, WANG Anqi⁴

(1. Yangtze Eco-environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, Hubei, China;
2. National Engineering Research Center of Eco-environment Protection for Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430014,

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2024-09-27; 录用日期: 2024-09-29; 网络出版日期: 2025-03-19

基金项目: 中国长江三峡集团公司项目(202303298); 国家重点研发计划项目(2022YFC3002705); 湖北省自然科学基金项目(2024AFB527); 长江勘测规划设计研究有限责任公司自主科研项目(CX2023S005)

作者简介: 张启凡(1996—), 男, 工程师, 博士, 主要从事水库生态调度研究。E-mail: zhang_qifan@ctg.com.cn

通信作者: 荆平飞(1994—), 男, 工程师, 博士, 主要从事河流数值模拟及水库优化调度研究。E-mail: pjfing@whu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Hubei, China; 3. Institute of Chinese sturgeon Research, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, Hubei, China; 4. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: [Objective] The coordination strategy between ecological operations of the Three Gorges Reservoir (TGR) to promote the natural spawning of the Four Major Chinese Carps and other comprehensive utilization demands has yet to be clearly defined. To clarify the constraints of ecological operations and propose coordination strategies between ecological operations and other comprehensive utilization demands, [Methods] past ecological operation experiments, operation regulations and operation practice of the TGR are summarized. Additionally, the impacts of conducting ecological operations during the concentrated falling stage and the flood stage on other comprehensive utilization demands have been quantitatively analyzed. [Results] The result show that, ecological operations during the per-flood falling stage will result in water abandonment at Gezhouba Dam in 47.3% of years and water level daily decrease of the TGR exceeding 1 m in 47.3% of the years. The risk of water abandonment at Gezhouba Dam and water level daily decrease of the TGR exceeding 1 meter will be significantly mitigated by raising the water level of the TGR on June 10th or lowering it on May 25th. Water demand of the ecological operations in mid-June and late June during flood stage can not be satisfied under the typical year of $P=90\%$. [Conclusion] Conclusion can be drawn as follows: if ecological operations were conducted during the pre-flood falling stage, there would be no constraints on water quantity and no impact on flood control, water supply, and navigation. However, there would be risks associated with water abandonment at Gezhouba Dam and water level daily decrease of the TGR exceeding 1 m. Conducting ecological operation during flood stage is mainly subject to water constraints, while flood control risks remain manageable. Considering ecological operations, optimal operational rules for the TGR can be formulated as follows: in years with relatively abundant inflow forecasts, the reservoir level can be preemptively lowered the water level by May 25th. Conversely, the water level on June 10th can be further raised to 150.0 m in years with deficient inflow forecasts.

Keywords: Three Gorges Reservoir; four major Chinese carps; ecological operation; comprehensive utilization demand; coordination analysis; influence factor

0 引 言

四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢和鳙)是我国特有的产漂流性卵鱼类代表,是典型的江湖洄游性鱼类^[1],也是长江中下游重要的渔业资源^[2]。根据相关学者的研究,四大家鱼的产卵与河流水文水动力关系密切,需要一定的涨水过程条件^[3]。长江中游宜昌至城陵矶江段,江面开阔,水文水动力条件得天独厚,是四大家鱼最主要的繁殖栖息地^[4]。但是随着上游干流三峡水库的建成蓄水,宜昌至城陵矶江段的水文、泥沙情势^[5-6]和水温^[7-9]等环境因子出现了一定的变化。21世纪初,受上游水库调蓄影响,长江中游江段中小洪水涨水过程坦化^[10],四大家鱼产卵所需的水文刺激减弱^[11-12],四大家鱼产卵规模萎缩^[13],导致长江渔业资源下降^[14]。

为缓解洪水过程坦化对四大家鱼产卵的影响、促进四大家鱼自然繁殖,自2011年起有关部门组织开展了三峡水库促进四大家鱼自然繁殖的生态调度试验(以下简称生态调度)。在每年的5—7月份,当中游江段水温合适时,结合来水条件及自身存蓄水量,三峡水库通过蓄泄调度创造四大家鱼产卵所需的涨水过程,以刺激四大家鱼自然繁殖^[15-16]。根据有关学者对历年生态调度实践的研究总结,三峡水库促进四大

家鱼自然繁殖的生态调度作用明显,取得了良好成效^[17-22]。

为了进一步探究适宜四大家鱼产卵繁殖的涨水条件,完善生态调度方案,近年来诸多学者结合生态调度期间四大家鱼产卵的监测数据、实验室试验数据以及水文学、水动力学、生态学方法,提出了相应的生态调度指标。王悦等^[23]采用评估河流生态水文变化的IHA方法构建了8个生态水文指标,基于2011—2012年生态调度期间四大家鱼的卵苗监测数据,分析四大家鱼产卵规模与这些指标的相关性,得到了促进四大家鱼产卵的主要生态调度指标;徐薇等^[24-25]基于2012—2018年的生态调度试验数据,采用系统重构方法分析了四大家鱼产卵的关键水文要素,提出了增加宜昌至沙市江段四大家鱼产卵量的生态调度指标;YU等^[26]利用超声遥测和三维水动力模型构建了四大家鱼的生境适宜性指数(HSI)曲线,并建立了生境适宜性评估模型,研究了鱼类生境最适宜的流速、水深、弗汝德数,并提出了一个可行的生态运行方案;毛劲乔等^[14]基于长江水温、气象长序列观测资料,分析三峡-葛洲坝两坝区间以及葛洲坝下游江段在四大家鱼产卵期的水温变化规律,量化了蓄水前后关键断面水温差值及滞冷效应等指标,为实施生态调

度提供指导;李博等^[27]基于三峡水库 2014—2020 年生态调度期间的鱼类早期资源监测数据,采用相关性分析方法建立了四大家鱼产卵效果与生态水文指标之间的关系,提出了影响四大家鱼自然繁殖的关键生态调度指标。CHEN 等^[28]通过室内和现场试验的方法,定量研究了流速与四大家鱼产卵的关系,确定了一个适宜四大家鱼产卵的流速范围。刘瀚等^[29]采用受试者工作特征曲线法,提出了一套基于生物水文响应模型的刺激四大家鱼繁殖生态调度目标量化方法,优选出了适宜四大家鱼产卵的最佳生态调度指标。目前公认的较为可行的生态调度指标^[18-30]为:水温达到 18℃ 以上,起涨流量 10 000~12 000 m³/s,流量日涨率 1 000~2 000 m³/s,持续时间 3~7 d。

事实上,三峡水库作为长江干流上的巨型水库,三峡水库的调度还需考虑防洪、发电、航运、供水、库岸稳定等其他需求的制约。也有许多学者在考虑其他综合利用需求的基础上,给出了生态调度的优化建议。马超等^[31]考虑历史径流及不同生态调度方案,在考虑防洪问题与发电效益的基础上探讨了来流不足情况下的预蓄方案的可行性。王祥等^[32]通过量化调度运行约束,考虑葛洲坝弃水风险,构建三峡水库调度模型,评估了不同时间开展生态调度的可行性。李游坤等^[33]建立梯级水库联合调度模型,模拟分析了梯级水库协同运行改善下游河道鱼类繁殖条件的可行性。LYU 等^[34]考虑将生境适宜性纳入水库运行当中,提出了一种跨生命阶段的鱼类生境水库运行模型,来平衡鱼类栖息地保护与发电之间的矛盾。

尽管诸多学者在三峡水库促进四大家鱼自然繁殖的生态调度指标及开展生态调度对其他综合利用需求的影响方面作出了重要贡献,然而关于生态调度与其余综合利用需求的协调性策略并未明确,三峡水库开展生态调度的空间尚不清晰。因此,本研究在总结三峡水库历年生态调度实践基础上,分析了生态调度与其他综合利用需求的协调性,并提出了相应的协调策略。研究成果可为三峡水库开展促进四大家鱼自然繁殖的生态调度提供技术支撑。

1 历年生态调度试验总结

2011—2023 年,三峡水库连续 13 年共实施了 20 次促进长江中游江段四大家鱼自然繁殖的生态调度试验,鱼类资源监测工作同步实施,具体研究区域如图 1 所示。本次研究统计了 2011—2023 年开展的生态调度试验相应调度参数,具体如表 1 所列。总体来看,三峡水库生态调度时间集中在 5 月下旬—6 月

下旬,生态调度期间,三峡水库起涨流量区间为 6 200~20 400 m³/s,均值为 12 300 m³/s;日均流量涨幅区间为 600~3 100 m³/s,均值为 1 600 m³/s;最大出库流量区间为 14 700~31 800 m³/s,均值为 21 600 m³/s;起涨水位区间为 145.3~160.0 m,均值为 150.0 m;库水位变幅区间为 0.6~4.7 m,均值为 1.8 m;调度持续时间一般为 3~9 d,均值为 5 d。

2 三峡水库综合利用需求与调度约束归纳

根据生态调度实践总结,促进四大家鱼自然繁殖的生态调度集中在 5 月下旬—6 月下旬,因此重点分析 5—6 月份三峡水库在防洪、发电、供水与航运、库岸稳定等方面的调度需求与调度约束条件。

2.1 防 洪

三峡水库消落期及汛期初段的防洪调度需求主要是为长江中下游地区防洪,关键在于洞庭湖地区和鄱阳湖地区的防洪^[35]。根据邹强等^[36]的研究,6 月中旬前,宜昌洪水与两湖洪水一般不会发生遭遇。因此,为协调生态调度期间三峡水库的防洪调度需求,在汛期开展生态调度可结合长江中下游控制站点的实时及预报雨水情,在确保防洪安全的前提下,合理控制运行控制水位。

2.2 发 电

《三峡(正常运行期)-葛洲坝水利枢纽梯级调度规程(2019 年修订版)》(以下简称《调度规程(2019 年修订版)》)规定一般情况下三峡水库 5 月 25 日库水位应不高于枯期的消落低水位 155.0 m,6 月 10 日库水位需降至防洪限制水位 145.0 m,在满足一定雨水情的条件下,也可消落至汛期运行水位浮动范围内。此外,三峡水库发电调度还应适当兼顾下游葛洲坝水电站发电调度需求,尽量使葛洲坝水电站少弃水或不弃水(葛洲坝水电站机组满发流量大约 18 500 m³/s)。因此,为协调生态调度期间三峡-葛洲坝梯级水库的发电调度需求,需重点关注 5 月 25 日与 6 月 10 日的运行控制水位,并适当兼顾葛洲坝弃水风险。

2.3 供水与航运

根据《调度规程(2019 年修订版)》《2023 年长江流域水工程联合调度运用计划》,三峡水库需保障宜昌、大通站流量分别不小于 5 500 m³/s、10 000 m³/s,同时保障葛洲坝下游庙嘴水位不低于 39.0 m,相应需要三峡水库下泄流量不小于 5 700 m³/s^[37]。因此,为协调生态调度期间三峡水库的供水与航运调度需求,需要保障三峡水库出库流量不低于 5 700 m³/s。

表 1 2011—2023 年三峡水库促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验调度参数

年 份	调度日期	起涨流量 /m ³ · s ⁻¹	日均涨幅 /m ³ · s ⁻¹	最大出库 /m ³ · s ⁻¹	起涨水位 /m	水位变幅 /m	涨水持续时间 /d	水温 /℃
2011	06-16 至 06-19	12 000	1650	19 000	146.5	0.6	4	22.8
2012	05-25 至 05-31	18 300	590	23 800	153.7	1.3	4	21.5
	06-20 至 06-27	12 600	750	20 300	145.5	0.9	4	23.0
2013	05-07 至 05-14	6 230	1 130	16 200	160.0	0.6	9	17.5
2014	06-04 至 06-06	14 600	1 370	19 100	147.3	1.2	3	21.1
2015	06-07 至 06-10	6 530	3 140	19 900	153.9	2.0	4	22.0
	06-25 至 07-02	14 800	1 930	31 700	145.5	1.0	3	23.3
2016	06-09 至 06-11	14 600	2 070	20 800	145.8	0.7	3	22.5
2017	05-20 至 05-25	11 300	1 350	18 900	153.8	3.0	5	20.3
	06-04 至 06-10	11 500	1 580	20 300	147.0	2.4	6	21.8
2018	05-19 至 05-25	11 500	2 450	26 200	154.2	1.0	6	21.0
	06-17 至 06-25	11 000	1 150	22 300	145.5	0.9	7	23.5
2019	05-26 至 05-31	14 600	1 020	21 400	151.1	2.0	5	20.3
2020	05-24 至 05-28	8 100	1 250	14 700	151.7	1.3	5	20.0
2021	05-29 至 06-03	10 000	1 200	18 000	150.3	2.3	5	21.3
	06-16 至 06-22	10 200	1 900	24 900	145.4	2.9	6	
2022	06-03 至 06-08	12 800	1 920	25 600	147.4	2.7	5	21.2
	06-23 至 06-28	20 400	1 940	31 800	145.3	3.5	5	
2023	05-27 至 06-03	10 000	1 390	18 000	152.6	1.5	7	20.0
	07-02 至 07-06	15 000	1 680	18 300	150.4	4.7	4	

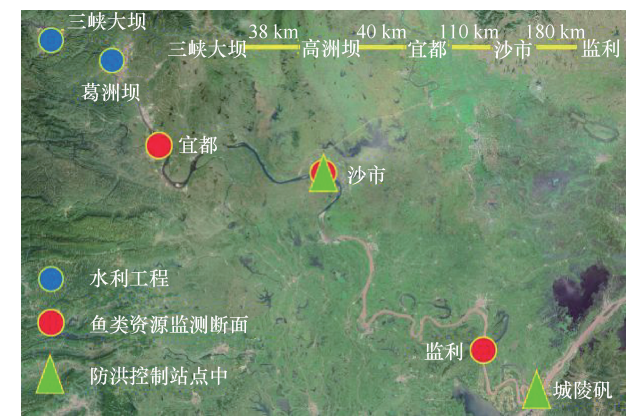


图 1 研究区域

Fig. 1 Research area map

2.4 库岸稳定

根据《调度规程(2019 年修订版)》,三峡水库库水位日下降幅度一般按 0.6 m 控制,5 月 25 日以后至库水位消落到防洪限制水位期间按不超过 1.0 m/d 控制。因此,为协调生态调度期间三峡水库的库岸稳定调度需求,需要控制库水位下降速率不超过 1.0 m/d 的限制。

2.5 三峡水库调度运行水位边界条件

2.5.1 调度规程约束

考虑《调度规程(2019 年修订版)》中关于防洪、发电、通航、下游补水等约束,以旬为尺度,总结三峡水库现行水位约束上下限,如图 2 所示。结合三峡

水库开展促进四大家鱼自然繁殖生态调度时间一般在 5—6 月,具体而言:3 月至 5 月上旬,水位控制在 155.0~175.0 m 之间;5 月中旬水位一般控制在 155.0~164.0 m 之间;5 月下旬水位一般控制在 149.0~158.0 m 之间,但 5 月 25 日必须降至 155.0 m 以下;6 月上旬水位控制在 144.9~155.0 m 之间;6 月中旬至 7 月上旬水位控制在 144.9~148.0 m 之间。

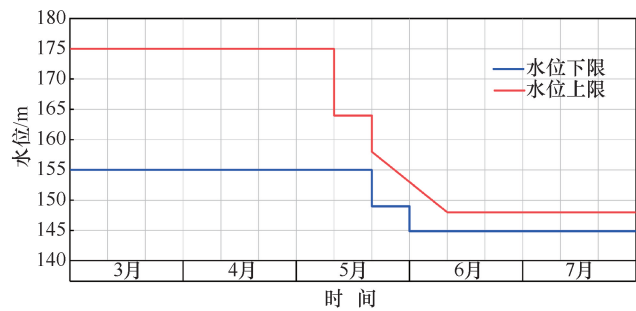


图 2 不同调度时段三峡水库现行水位约束

Fig. 2 Water level constraints of during different periods

2.5.2 调度运行实践

收集三峡水库 2010—2023 年共 14 a 的实际运行日水位进行统计分析,得到实际运行每日最高水位和每日最低水位及日均水位,如图 3 所示。实际调度中,三峡水库 2010—2023 年 5 月 25 日库水位日均值在 150.7~154.5 m 之间,多年平均值为 152.1 m;

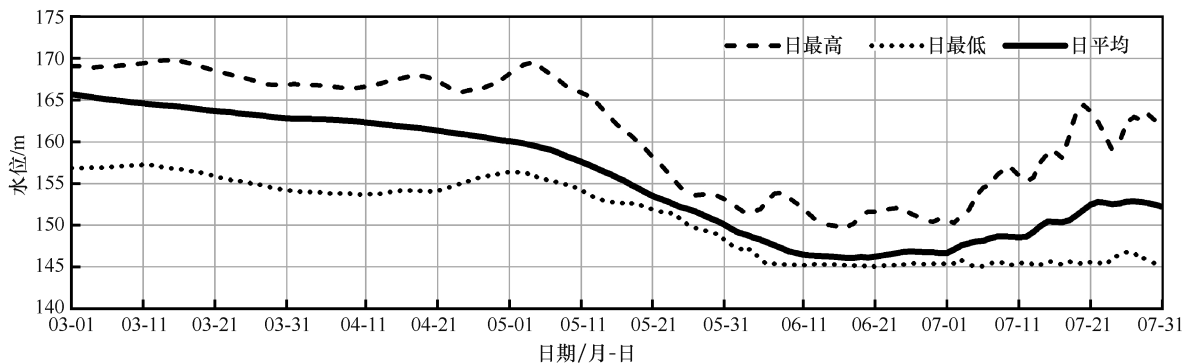


图3 三峡水库实际调度运行日水位特征值

Fig.3 Characteristic water level of the TGR during actual dispatch operation period

6月10日库水位日均值一般在145.0 m附近。

3 三峡水库生态调度与其他综合利用需求协调性分析

三峡水库促进四大家鱼自然繁殖的生态调度一般安排在集中消落期或6月中下旬开展,根据历年生态调度实践总结可知,集中消落期水温一般在18℃以上,满足四大家鱼产卵需求,因此每年生态调度的首次实施基本上均在集中消落期5月25日—6月10日。若生态调度试验安排在集中消落期开展,需重点关注生态调度与发电调度需求、消落期末水位控制、库岸稳定约束等方面的协调性;若生态调度试验安排在6月中下旬开展,三峡水库转为汛期防洪,需重点关注生态调度与防洪需求、发电调度需求等方面的协调性。为此,分别针对集中消落期或6月中下旬开展促进坝下游四大家鱼自然繁殖试验,分析三峡水库生态调度与其他综合利用需求的协调性。

3.1 集中消落期开展生态调度

3.1.1 生态调度指标

根据三峡水库促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验的调度实践总结及相关文献成果^[18-30],三峡水库开展促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验的一般调度方式为:起涨流量10 000~12 000 m³/s,日均流量涨幅为1 000~2 000 m³/s,持续涨水天数3~7 d。本研究选取中间数值作为生态调度与其他综合利用需求协调性计算的基本指标,即:起涨流量11 000 m³/s,涨幅1 500 m³/s,持续天数5 d。

3.1.2 控制节点库水位拟定

(1)6月10日库水位。根据《调度规程(2019修订版)》,三峡水库6月10日库水位可消落至144.9~146.5 m,为此设置三峡水库6月10日库水位分别消落至145.0 m、146.5 m等不同方案。

(2)5月25日库水位。根据《调度规程(2019修订版)》,三峡水库4月底库水位不低于155.0 m,5月25日库水位不高于155.0 m。实际调度中,三峡水库2010—2023年5月25日库水位日均值在150.7~154.5 m之间,多年平均值为152.1 m。因此拟定计算分析中三峡水库5月25日库水位为155.0 m、150.0 m及实际调度多年均值的152.0 m,分别展开计算分析。

3.1.3 协调性计算方案

结合前述的生态调度指标、6月10日库水位及5月25日库水位拟定结果,根据考虑上游控制性水库群调蓄后的1959年6月—2014年5月的长系列模拟入库流量过程,以5月25日库水位为方案编号的依据,最终确定三峡水库促进四大家鱼生态调度协调性分析计算方案如表2所列。

表2 三峡水库促进四大家鱼自然繁殖生态调度协调性分析计算方案

Table 2 The harmonization analysis calculation scheme for the ecological operation of the TGR

方案编号	5月25日 库水位/m	6月10日 库水位/m	生态调度指标
方案1	155.0	145.0	起涨流量11 000 m ³ /s
方案2	152.0	146.5	日均涨幅1 500 m ³ /s
方案3	150.0		持续天数5 d

3.1.4 计算分析思路

采用长江上游控制性水库群联合调度模型^[38]模拟计算了不同典型年集中消落期5月25日—6月10日来水总量。考虑5月25日库水位155.0 m、152.0 m、150.0 m情况,6月10日分别消落至145.0 m、146.5 m,计算相应的待消库容

$$V_s = V(Z_1) - V(Z_2) \tag{1}$$

式中,V(Z)为根据库水位查三峡水库水位库容曲线

得到的对应库容; Z_1 为 5 月 25 日库水位; Z_2 为 6 月 10 日库水位; V_s 为集中消落期 5 月 25 日—6 月 10 日待消落库容。

根据生态调度指标计算对应的生态调度需水量,将来水总量与待消库容总量累加并扣除生态调度需水量,即为非生态调度时段的剩余待消水量,将该部分水量平均分配到集中消落期非生态调度时段,得到相应非生态调度时段日均流量。

$$W_{rest} = W_{in} + V_s - W_{eco} \tag{2}$$

$$Q_u = W_{rest} / T_u \tag{3}$$

式中, W_{in} 为三峡水库长系列径流调节计算中当年集中消落期的来水总量; W_{eco} 为根据生态调度指标计算得到的生态调度需水量; W_{rest} 为来水总量和待消库容总量相加后扣除生态调度需水量后,非生态调度时段的剩余待消水量; T_u 为集中消落期不开展生态调度的时段; Q_u 为集中消落期不开展生态调度时段的日均流量。

若非生态调度时段日均流量大于 $18\,500\text{ m}^3/\text{s}$ (葛洲坝水电站满发流量),通常葛洲坝水电站产生弃水;若该流量与集中消落期非生态调度时段的最小入库流量之差大于 $7\,200\text{ m}^3/\text{s}$ (三峡水库 $155.0\sim145.0\text{ m}$ 间消落 1.0 m 相应库容对应的日均加泄量),极大可能出现三峡水库日均消落速率大于 1 m 的情况。即

$$\begin{cases} Q_u > 18\,500\text{ m}^3/\text{s}, \text{ 葛洲坝易弃水} \\ Q_u - Q_m > 7\,200\text{ m}^3/\text{s}, \text{ 日消落速率易大于 } 1\text{ m/d} \end{cases} \tag{4}$$

式中, Q_m 为三峡水库长系列径流调节计算中当年集中消落期非生态调度时段的日最小入库流量。

3.1.5 计算结果与协调性分析

根据长系列径流模拟结果,为分析集中消落期开展生态调度的水量满足程度,考虑最不利情况,即 5 月 25 日库水位 150.0 m , 6 月 10 日库水位 146.5 m , 此时待消水量最少,为 17.78 亿 m^3 。根据生态调度指标可计算得到生态调度需水量为 76.46 亿 m^3 、为满足非生态调度时段的最小下泄流量 $5\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 所需水量为 59.10 亿 m^3 。长系列径流模拟生态调度及最小下泄需水量满足情况如图 4 所示。从图中可以看出,除 1960 年来水偏枯,水量仅为 107.84 亿 m^3 以外,历年集中消落期来水量叠加待消落库容,均可满足生态调度及非生态调度时段的最小下泄流量需水量,由于最小下泄流量的确定已经包含了航运与供水的需求,因此集中消落期开展四大家鱼生态调度基本不会对供水与航运造成不利影响。

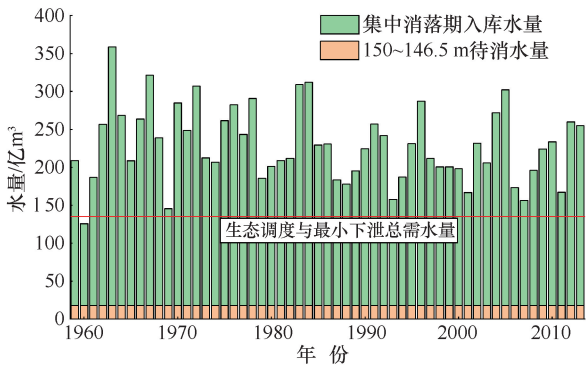


图 4 三峡水库集中消落期水量计算

Fig. 4 Water volume calculation during the per-flood falling stage of the TGR

将不同方案长系列径流模拟结果中葛洲坝存在弃水的年份及三峡水库集中消落期非生态调度时段存在消落速率超出 1.0 m/d 限制的年份进行了统计,具体结果如表 3 所列。从表中可以看出:

在方案 1 情况下,三峡水库集中消落期以 5 月 25 日 155.0 m 库水位消落,至 6 月 10 日消落至 145.0 m 或 146.5 m ,葛洲坝存在弃水年数占长系列 55 年的 47.3% 和 40% ;三峡水库集中消落期消落速率超 1.0 m/d 的年数占长系列 55 年的 21.8% 和 16.4% 。

在方案 2 情况下,三峡水库集中消落期以 5 月 25 日 152.0 m 库水位消落,至 6 月 10 日消落至 145.0 m 或 146.5 m ,葛洲坝存在弃水年数占长系列 55 年的 34.5% 和 30.9% ;三峡水库集中消落期消落速率超 1.0 m/d 的年数占长系列 55 年的 12.7% 和 7.3% 。

在方案 3 情况下,三峡水库集中消落期以 5 月 25 日 150.0 m 库水位消落,至 6 月 10 日消落至 145.0 m 或 146.5 m ,葛洲坝存在弃水年数占长系列 55 年的 25.5% 和 21.8% ;三峡水库集中消落期消落速率超 1.0 m/d 的年数占长系列 55 年的 5.5% 和 5.5% 。

由以上分析可知,总体而言,从满足生态调度需求的角度考虑,集中消落期开展促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验通常不存在水量制约因素。但由于受消落期末运行控制水位限制,在来水偏丰年份且 5 月 25 日库水位不低于 150.0 m 时,库水位消落速率可能会突破 1.0 m/d 限制,且葛洲坝水电站易产生弃水。由于此时长江中下游两湖地区已经进入主汛期,三峡水库生态调度参数中的起涨流量、流量日均涨幅、持续涨水天数等指标应结合三峡水库的入库流量和长江中下游的防洪形势酌情而定。

表 3 三峡水库促进四大家鱼自然繁殖生态调度协调性分析计算结果

Table 3 The harmonization analysis calculation results of the ecological operation of the TGR

方案编号	项 目	6 月 10 日库水位消落方案	
		145.0 m	146.5 m
方案 1 (5 月 25 日库水位 155.0 m)	葛洲坝存在弃水年数/a	26.0	22.0
	葛洲坝存在弃水年数占比/%	47.3	40.0
	三峡日消落速率超 1 m/d 年数/a	12.0	9.0
	三峡日消落速率超 1 m/d 年数占比/%	21.8	16.4
方案 2 (5 月 25 日库水位 152.0 m)	葛洲坝存在弃水年数/a	19.0	17.0
	葛洲坝存在弃水年数占比/%	34.5	30.9
	三峡日消落速率超 1 m/d 年数/a	7.0	4.0
	三峡日消落速率超 1 m/d 年数占比/%	12.7	7.3
方案 3 (5 月 25 日库水位 150.0 m)	葛洲坝存在弃水年数/a	14.0	12.0
	葛洲坝存在弃水年数占比/%	25.5	21.8
	三峡日消落速率超 1 m/d 年数/a	3.0	3.0
	三峡日消落速率超 1 m/d 年数占比/%	5.5	5.5

同样根据表 3 的结果可知，三峡水库可适当提前消落，使得 5 月 25 日库水位降低，会使得集中消落期开展生态调度对葛洲坝弃水的影响变小，同时对三峡水库库岸稳定的影响降低。而抬高 6 月 10 日库水位则会在来水不变的前提下，使得待消落库容减小，减轻集中消落期的消落任务，从而降低集中消落期开展生态调度对葛洲坝弃水的影响及对三峡水库库岸稳定的影响。

3.2 主汛期开展生态调度

根据三峡水库生态调度总结，主汛期三峡水库促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验一般在 6 月中下旬相机开展，通过蓄泄结合方式为生态调度创造条件。需要注意的是，若预报上游或下游洞庭湖区间来水较大时，应暂停生态调度，及时将库水位预泄至汛限水位 145.0 m 或规定的上浮范围内，且预泄不得影响长江中下游的防洪安全。鉴于 6 月 10 日之后三峡水库转为汛期防洪，水库通过蓄泄结合开展生态调度试验时应重点关注中下游雨水情条件，特别是库水位在上浮运用时。

在确保防洪安全的前提下，主汛期三峡水库开展生态调度主要受来水水量约束。因此将首先分析三峡水库开展生态调度试验期间，中下游沙市、城陵矶等重要站点的水位情况，然后根据天然来水选取典型年，考虑上游水库调蓄影响，假定生态调度开展前后库水位均为 145.0 m（即不考虑库存水量），分析来水较枯的年份入库流量对三峡主汛期开展促进四大家鱼自然繁殖的生态调度需水量的满足情况。

3.2.1 生态调度期间中下游重要站点水位情况分析

2011—2023 年三峡水库开展促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验期间，沙市和城陵矶站的水位情况如图 5 和图 6 所示。从图 5 中(沙市站)可以看出，生

态调度期间，由于出库流量持续增大，沙市水位存在明显升高的现象，抬升幅度一般在 2.0~4.0 m 左右；整体上生态调度开始时沙市站水位均在 37.0 m 以下，生态调度过程中沙市站最高水位均在 41.0 m 以下(沙市站设防水位 42.0 m、警戒水位 43.0 m)，均值约为 36.0 m。根据沙市站水位流量关系、坝下游河段洪水演进规律和调度运行实践可知，当三峡水库出库流量控制在 40 000 m³/s 以内时，一般可控制沙市站水位不超设防水位 42.0 m。而促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验的最大出库流量基本在 30 000 m³/s 以内，因此基本不会影响荆江河段的防洪安全。

从图 6 中(城陵矶站)可以看出，生态调度期间，城陵矶站水位一般也会随三峡水库制造的涨水过程而小幅升高，由于区间来水组成复杂、洪水沿程进一步坦化等原因，城陵矶站水位抬升幅度基本在 0~2.0 m；整体上城陵矶站水位一般在 23.0~32.0 m 之间(城陵矶站设防水位 31.0 m、警戒水位 32.5 m)，均值约为 27.6 m；其中主汛期开展生态调度期间沙市水位一般在 25.0~32.0 m 范围内，均值约为 27.9 m。根据螺山站水位流量关系、坝下游河段洪水演进规律和调度运行实践可知，当三峡水库出库流量控制在 30 000 m³/s 以内且同时段四水合成流量在 150 000 m³/s 以内时，一般可控制城陵矶站水位不超设防水位 31.0 m。因此，为确保促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验不影响城陵矶河段的防洪安全，在三峡水库最大出库流量控制在 30 000 m³/s 以内的前提下，应在洞庭湖四水合成流量小于 15 000 m³/s 且下游城陵矶站水位相对较低时开展运用，此时河道的槽蓄能力和洞庭湖的调蓄能力均较强，为防洪风险的控制提供了有效保障。

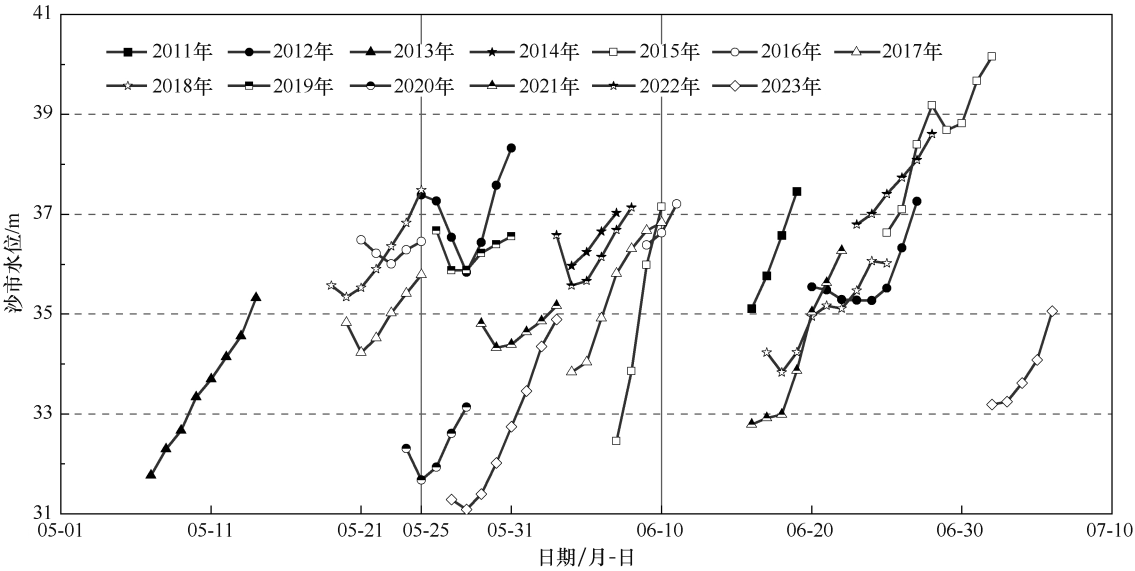


图 5 历年生态调度期间沙市站水位情况

Fig. 5 Water levels at Shashi Station during the ecological operation of the TGR

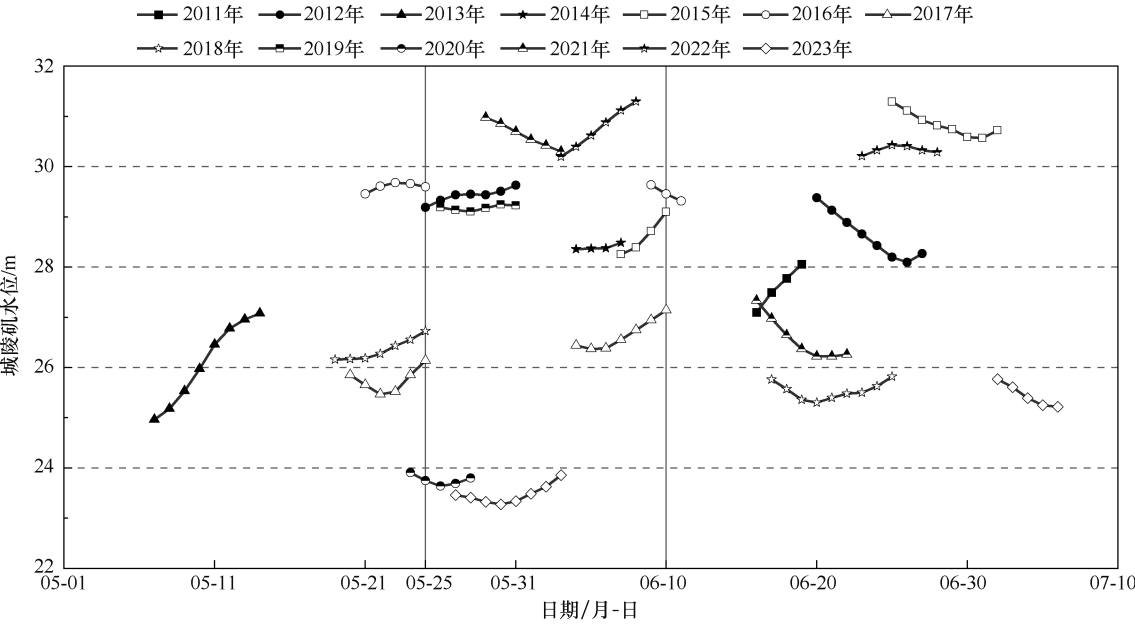


图 6 历年生态调度期间城陵矶站水位情况

Fig. 6 Water levels at Chenglingji Station during the ecological operation of the TGR

3.2.2 典型年选取

三峡水库调度可用水量是衡量三峡水库开展生态调度可行性的重要条件。三峡水库可用于调度的水量分为两部分：入库水量及库存水量。鉴于主汛期三峡水库库水位需降至汛限水位 145.0 m 左右，因此不考虑库存水量，仅考虑入库水量。由于每年三峡水库的入库水量各不相同，参考水文专业典型年的选取，基于长系列的历史水文资料，选取具有代表性干旱特征的年份作为分析年份。为避免上游水库群补水等人为因素对三峡水库入库水量带来的干扰，将三峡水库

1959—2013 年长系列径流数据还原为天然径流，再分别按照 6 月中旬、6 月下旬来水量进行排频，选取频率为 90%、75% 的年份作为典型枯水年，结果如表 4 所列。

表 4 三峡水库主汛期 6 月中旬、6 月下旬天然来水量典型年
Table 4 Typical years of the TGR based on the quantity of natural inflow in mid-June, late-June

来水频率	75%	90%
6 月中旬	1970 年	1972 年
6 月下旬	1986 年	1993 年

3.2.3 生态调度指标确定

考虑到枯水年情况下, 来水较少, 根据前文总结得到的三峡水库开展促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验的一般调度方式(出库起涨流量 10 000 ~ 12 000 m³/s, 日均流量涨幅为 1 000~2 000 m³/s, 持续涨水天数 3~7 d)。本研究选取生态调度保障程度相对较低的调度指标(起涨流量 10 000 m³/s, 涨幅 1 000 m³/s, 持续 5 d), 分析该调度指标情况下, 生态需水量的满足程度。

3.2.4 6月中旬开展生态调度水量匡算

倘若三峡水库在 6 月中旬开展生态调度, 选取的典型年为 1970 年($P=75\%$)和 1972 年($P=90\%$)。根据来水总量, 扣除三峡水库每日最小下泄流量 5 700 m³/s 的需水量, 分析枯水年情况下, 按照所选生态调度指标进行生态调度的需水量的满足情况。具体水量匡算结果如表 5 所列。

表 5 三峡水库主汛期 6 月中旬开展生态调度水量匡算结果

Table 5 Ecological operation water demand satisfaction for the TGR in mid-June

典型年	6 月中旬 来水总量 /亿 m ³	最小下泄 需水量 /亿 m ³	生态调度 需水量 /亿 m ³	剩余 水量 /亿 m ³	是否满足 生态调度
1970 年	117.3	49.2	56.2	11.9	满 足
1972 年	81.9	49.2	56.2	-23.5	不满足

由表 5 可知, 6 月中旬最小下泄需水量为 49.2 亿 m³, 而生态调度需水量为 56.2 亿 m³, 来水只有大于 105.4 亿 m³ 时才能够同时满足最小下泄流量和生态调度的需求。选取的典型年 1970 年($P=75\%$)可满足该水量要求, 而 1972 年($P=90\%$)不满足该水量要求。因此, 对于来水特枯的典型年, 三峡水库在枯水年份应尽可能避免在 6 月中旬开展促进四大家鱼自然繁殖的生态调度试验; 如确需开展, 需适当在 6 月上旬回蓄水量、抬高 6 月 10 日最低消落水位从而存蓄部分水量, 或与上游溪洛渡、向家坝水库联合开展。若在 6 月上旬抬高水位回蓄水量, 对于 1972 年($P=90\%$), 需至少回蓄 23.5 亿 m³, 相应需三峡水库库水位上浮运行至 149.7 m。

3.2.5 6月下旬开展生态调度水量匡算

倘若三峡水库在 6 月下旬开展生态调度, 根据来水总量, 扣除三峡水库每日最小下泄流量 5 700 m³/s 的需水量, 同样分析枯水年情况下, 按照所选生态调度指标进行生态调度的需水量的满足情况。选取的典型年为 1986 年($P=75\%$)和 1993 年($P=90\%$), 具体水量匡算结果如表 6 所列。

表 6 三峡水库主汛期 6 月下旬开展生态调度水量匡算结果

Table 6 Ecological operation water demand satisfaction for the TGR in late-June

典型年	6 月下旬 来水总量 /亿 m ³	最小下泄 需水量 /亿 m ³	生态调度 需水量 /亿 m ³	剩余 水量 /亿 m ³	是否满足 生态调度
1986 年	148.3	49.2	56.2	42.9	满 足
1993 年	105.3	49.2	56.2	-0.1	基本满足

由表可知, 6 月下旬最小下泄需水量为 49.2 亿 m³, 而生态调度需水量为 56.2 亿 m³, 典型年 1986 年($P=75\%$)来水总量 148.3 亿 m³, 扣除最小下泄流量需水量及生态调度需水量后还剩余 42.9 亿 m³, 满足生态调度和最小下泄流量的保障需求。但是该年度 6 月下旬并不存在涨水过程, 因此需要在进入 6 月中下旬时结合洪水预报, 适当存蓄水量以供旬内生态调度使用。典型年 1993 年($P=90\%$)6 月下旬来水总量为 105.3 亿 m³, 基本与生态调度需水量和最小下泄流量之和相当。因此当遇到特枯水年($P=90\%$)时应尽量避免在 6 月下旬开展生态调度, 如果确有需要, 可结合洪水预报, 在 6 月中旬提前存蓄水量, 以供 6 月下旬使用; 或者开展溪洛渡、向家坝、三峡水库联合生态调度, 由上游水库补充一部分水量。

3.2.6 协调性分析

根据以上计算分析结果, 从满足生态调度需求的角度考虑, 对于主汛期 6 月中下旬三峡水库开展促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验, 一方面应确保不影响长江中游河段的防洪安全, 相应可通过中小洪水调度或运行水位动态上浮运用为生态调度需求创造有利条件, 不存在明显的冲突与矛盾; 另一方面, 遇来水较枯年份, 若需开展促进四大家鱼自然繁殖生态调度试验, 需三峡水库在《调度规程(2019 年修订版)》规定的运行水位浮动上限的基础上, 进一步抬升运行水位浮动上限至 150.0 m, 可较好协调生态调度用水需求。

4 兼顾生态调度的三峡水库控制水位优化

根据三峡水库生态调度与其他综合利用需求协调性分析计算结果可知, 适当提前消落即降低 5 月 25 日库水位及抬升 6 月 10 日消落水位可以有效应对葛洲坝弃水风险和库水位消落速率超 1 m/d 限制的风险, 且能够为汛期 6 月中下旬开展生态调度存蓄一定水量。因此, 可从抬升 6 月 10 日消落水位角度出发, 以集中消落期为研究时段, 进一步优化三峡水库生态调度空间。

4.1 计算方案

结合归纳得到的生态调度指标及5月25日库水位拟定结果,采用长江上游控制性水库群联合调度模型计算分析进一步抬升6月10日库水位至148.0 m、150.0 m后对集中消落期消落速率超1 m/d的时间和葛洲坝水电站弃水的改善情况。具体分析计算方案如表7所列。

表7 三峡水库兼顾生态调度的控制水位优化计算分析方案
Table 7 Optimization calculation and analysis scheme for the control water level of the TGR considering ecological operation

方案编号	5月25日 库水位/m	6月10日 库水位/m	生态调度指标
方案1	155.0		起涨流量11 000 m ³ /s
方案2	152.0	148.0	日均涨幅1 500 m ³ /s
方案3	150.0	150.0	持续天数5 d

4.2 计算结果分析

仍沿用协调性分析中的计算思路,按照优化计算方案,统计长系列径流模拟结果中葛洲坝存在弃水的年份及三峡水库集中消落期非生态调度时段存在消落速率超出1.0 m/d限制的年份,具体结果如表8所列。

表8 三峡水库兼顾生态调度的控制水位优化计算分析结果统计

Table 8 Optimization calculation and analysis results for the control water level of the TGR considering ecological operation

方案编号	项 目	6月10日库 水位消落方案	
		148.0 m	150.0 m
方案1 (5月25日 库水位 155.0 m)	葛洲坝存在弃水年数/a	19.0	17.0
	葛洲坝存在弃水年数占比/%	34.5	30.9
	三峡消落速率超1.0 m/d年数/a	7.0	4.0
	三峡消落速率超1.0 m/d年数占比/%	12.7	7.3
方案2 (5月25日 库水位 152.0 m)	葛洲坝存在弃水年数/a	12.0	10.0
	葛洲坝存在弃水年数占比/%	21.8	18.2
	三峡消落速率超1.0 m/d年数/a	3.0	3.0
	三峡消落速率超1.0 m/d年数占比/%	5.5	5.5
方案3 (5月25日 库水位 150.0 m)	葛洲坝存在弃水年数/a	10.0	8.0
	葛洲坝存在弃水年数占比/%	18.2	14.5
	三峡消落速率超1.0 m/d年数/a	2.0	1.0
	三峡消落速率超1.0 m/d年数占比/%	3.6	1.8

在方案1情况下,三峡水库集中消落期以5月25日155.0 m库水位消落,至6月10日消落至148.0 m或150.0 m,葛洲坝存在弃水年数占长系列55年的34.5%和30.9%,相比6月10日运行水位145.0 m减少12.8和16.4%;三峡水库集中消落期消落速率超1.0 m/d的年数占长系列55年的21.8%和16.4%,相比6月10日运行水位145.0 m减少9.1

和14.5%。

在方案2情况下,三峡水库集中消落期以5月25日152.0 m库水位消落,至6月10日消落至148.0 m或150.0 m,葛洲坝存在弃水年数占长系列55年中的21.8%和18.2%,相比6月10日运行水位145.0 m减少12.7和16.3%;三峡水库集中消落期消落速率超1.0 m/d的年数占长系列55年中的均为5.5%,相比6月10日运行水位145.0 m减少7.2%。

在方案3情况下,三峡水库集中消落期以5月25日150.0 m库水位消落,至6月10日消落至148.0 m或150.0 m,葛洲坝存在弃水年数占长系列55年中的18.2%和14.5%,相比6月10日运行水位145.0 m减少7.3%和11.0%;三峡水库集中消落期消落速率超1.0 m/d的年数占长系列55年的3.6%和1.8%,相比6月10日运行水位145.0 m减少1.9%和3.7%。

由以上结果可知,对于集中消落期开展促进四大家鱼自然繁殖生态调度,通过5月25日提前消落至150.0 m以下或6月10日消落期末运行水位至148.0 m和150.0 m等方式优化调度空间后,对集中消落期消落速率超1.0 m/d的时间和葛洲坝水电站弃水的有显著改善。实时调度中,可结合来水预报和雨水情形势相机考虑,如遇预报来水较丰条件,可采取提前消落至150.0 m以下的方式;如遇预报来水较枯条件,可采取上浮6月10日运行水位至150.0 m的方式。

4.3 典型年验证

4.3.1 典型年选取

三峡水库可调度水量包括入库水量及库存水量。库存水量可用三峡水库库水位表征,在计算方案拟定时,已在5月25日库水位的拟定中分别考虑了三峡水库建库以来5月25日实际水位平均值152.0 m和下限值150.0 m、调度规程规定的5月25日水位上限155.0 m。由于每年三峡水库的入库水量各不相同,参考水文专业典型年的选取,对天然条件下三峡水库1959—2013年长系列径流数据5月下旬至6月上旬来水量之和进行排频,选取频率为25%、50%和75%的丰、平、枯典型年,具体如表9所列。

表9 三峡水库5月下旬至6月上旬天然来水总量典型年

Table 9 Typical years of the TGR based on the quantity of natural inflow in late-April, early-June

来水频率	丰水年(25%)	平水年(50%)	枯水年(75%)
典型年	2004年	1999年	1980年

4.3.2 典型年模拟结果分析

(1)丰水年(2004年)。三峡水库丰水年2004年

来流情况下, 集中消落期不同节点控制水位情况下对葛洲坝弃水和库水位变幅超 1.0 m/d 的影响如表 10 所列。从丰水年 2004 年的模拟结果来看, 当三峡水库 5 月 25 日库水位在 155.0 m 附近时, 不论 6 月 10 日的最低消落水位是何种工况, 葛洲坝均会产生弃水; 除 6 月 10 日最低消落水位为 150.0 m 的工况, 其余 6 月 10 日消落水位工况均会造成三峡库水位日变幅超出 1.0 m/d 的限制。如果三峡水库 5 月 25 日库水位在 152.0 m 附近, 除 6 月 10 日库水位消落至 150.0 m 工况外, 葛洲坝均会产生弃水; 但是只要三峡水库 6 月 10 日最低消落水位不是 145.0 m 工况, 就不会造成库水位变幅超出 1.0 m/d 的限制。若三峡水库 5 月 25 日库水位在 150.0 m 附近, 6 月 10 日库水位消落至 145.0 m、146.5 m 工况, 葛洲坝均会产生弃水, 其余工况则不会使得葛洲坝产生弃水; 不论 6 月 10 日的最低消落水位是何种工况, 均不会造成库水位变幅超出 1.0 m/d 的限制。

(2)平水年(1999 年及枯水年 1980 年)。三峡水库平水年 1999 年、枯水年 1980 年模拟计算结果如

表 11、表 12 所列。从表 11、表 12 中可以看出, 在平水年和枯水年情况下, 三峡水库集中消落期内开展生态调度不会使得葛洲坝产生弃水, 且自身库水位日变幅也不会超出 1.0 m/d 的限制。

4.4 消落期末运行控制水位上浮至 150.0 m 条件分析

虽然以上分析表明, 三峡水库消落期末运行控制水位上浮至 150.0 m 可以有效减轻生态调度带来的库岸稳定风险和葛洲坝弃水风险, 但其上浮会占用三峡水库对长江中下游特别是对城陵矶地区的防洪空间, 因此需要探究其上浮运用的具体条件, 以协调与防洪任务的矛盾。

三峡水库消落期末库水位上浮运用的原则是不影响对长江中下游的防洪作用和不增加长江中下游防洪压力。为保证不影响对长江中下游的防洪作用, 消落期末水位上浮后可通过“预报预泄”方式及时降下来, 且预泄期间, 应控制沙市站、莲花塘站水位距设防水位有充足的余地。因此可从下游控制站水位、水库入库流量、下游洞庭湖区间来水形势等方面研究

表 10 三峡水库丰水年 2004 年模拟计算结果

Table 10 Simulation results of the TGR in the high flow year 2004

5 月 25 日 库水位/m	6 月 10 日 消落至 145.0 m		6 月 10 日 消落至 146.5 m		6 月 10 日 消落至 148.0 m		6 月 10 日 消落至 150.0 m	
	葛洲坝 弃水	库水位 变幅超 1.0 m/d	葛洲坝 弃水	日水位 变幅超 1.0 m/d	葛洲坝 弃水	日水位 变幅超 1.0 m/d	葛洲坝 弃水	日水位 变幅超 1.0 m/d
155.0	是	是	是	是	是	是	是	否
152.0	是	是	是	否	是	否	否	否
150.0	是	否	是	否	否	否	否	否

表 11 三峡水库平水年 1999 年模拟计算结果

Table 11 Simulation results of the TGR in the normal flow year 1999

5 月 25 日 库水位/m	6 月 10 日 消落至 145.0 m		6 月 10 日 消落至 146.5 m		6 月 10 日 消落至 148.0 m		6 月 10 日 消落至 150.0 m	
	葛洲坝 弃水	库水位 变幅超 1.0 m/d	葛洲坝 弃水	库水位 变幅超 1.0 m/d	葛洲坝 弃水	库水位 变幅超 1.0 m/d	葛洲坝 弃水	库水位 变幅超 1.0 m/d
155.0	否	否	否	否	否	否	否	否
152.0	否	否	否	否	否	否	否	否
150.0	否	否	否	否	否	否	否	否

表 12 三峡水库枯水年 1980 年模拟计算结果

Table 12 Simulation results of the TGR in the low flow year 1980

5 月 25 日 库水位/m	6 月 10 日 消落至 145.0 m		6 月 10 日 消落至 146.5 m		6 月 10 日 消落至 148.0 m		6 月 10 日 消落至 150.0 m	
	葛洲坝 弃水	库水位 变幅超 1.0 m/d	葛洲坝 弃水	库水位 变幅超 1.0 m/d	葛洲坝 弃水	库水位 变幅超 1.0 m/d	葛洲坝 弃水	库水位 变幅超 1.0 m/d
155.0	否	否	否	否	否	否	否	否
152.0	否	否	否	否	否	否	否	否
150.0	否	否	否	否	否	否	否	否

三峡水库消落期末运行控制水位上浮至 150.0 m 运用条件。

4.4.1 下游控制站水位条件分析

三峡水库预泄期间，应确保沙市站、莲花塘站水位不超设防水位。根据近年的调度运行实践和下游控制站的洪水地区组成规律，对于沙市站，考虑下游宜枝区间来水影响，为确保不超设防水位 42.0 m，需控制三峡水库下泄流量不超 35 000 m³/s。对于莲花塘站，为确保不超设防水位 31.0 m，若洞庭湖四水合成流量小于 15 000 m³/s 时，考虑洪水的沿程坦化和河道的槽蓄作用，通常三峡水库下泄流量应控制不超 35 000 m³/s；若洞庭湖发生较大洪水、四水合成流量达到 15 000~20 000 m³/s 量级时，通常三峡水库下泄流量应控制不超 30 000 m³/s。

三峡水库消落期末运行水位上浮后，若采用预泄手段腾空库容，泄水历时考虑预报水平按 1~5 d 计算^[39]。三峡水库在 1~5 d 内库水位由上浮的最高水位 150.0 m 降至 145.0 m 增加下泄流量，如表 13 所列。由表 13 可知，当三峡水库运行水位由 150.0 m 预泄至汛限水位 145.0 m 时，如在 1 d、2 d、3 d、4 d、5 d 预见期内完成预泄，平均加泄流量分别为 29 400 m³/s、14 700 m³/s、9 800 m³/s、7 350 m³/s、5 880 m³/s。此时为确保下游控制站水位不超设防水位，在假定预泄期间洞庭湖四水合成流量不超 15 000 m³/s 的前提下，不同预泄时段内三峡水库自身来水应分别控制在 6 000 m³/s、20 000 m³/s、25 000 m³/s、28 000 m³/s、30 000 m³/s 以内。

表 13 不同预见期内三峡水库上浮水量下泄至汛限水位需增加的流量

Table 13 Required discharge increase for the TGR to descend water level to the flood limit level in different foresight periods

m³ · s ⁻¹					
工 况	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d
库水位由 150.0 m 泄至 145.0 m	29 400	14 700	9 800	7 350	5 880

根据相关研究成果^[40]，三峡水库上浮至 150.0 m 后水位预泄对泄水段及洪峰水位影响较大，按照 3 d 预泄时段考虑，沙市站和莲花塘站的水位涨幅如表 14 所列。从安全角度考虑，为确保预泄后沙市站、莲花塘站水位不超设防水位，在设防水位以下预留的预泄空间应同时考虑水库预泄和下游河道自然涨水过程共同影响，即在沙市站、莲花塘站设防水位 42.0、31.0 m 以下预留不少于 3.2 m、2.8 m，相应预泄前沙市站、莲花塘站水位应不高于 38.8 m、28.2 m。

表 14 三峡库水位上浮至 150.0m 预泄对下游控制站水位的抬高值

Table 14 Rise value of water level at control stations effected by the pre-discharge of the TGR

预泄方案	对下游水位抬升影响/m				
	沙 市			莲花塘	
水库水位	历时	泄水时期	洪峰对应水位	泄水时期	洪峰对应水位
预泄不考虑自然涨水过程	3 d	1. 7	0. 7	0. 6	0. 1
预泄考虑自然涨水过程		3. 2	0. 1	2. 8	0. 1

4.4.2 入库流量与下游洞庭湖区间来水形势分析

基于 1954—2014 年 6 月上中旬宜昌站天然径流过程，统计分析不同流量级出现的天数，具体结果如表 15 所列。由表 15 可知，6 月上中旬宜昌站天然来水量级相对较小，流量基本在 25 000 m³/s 以下；61 a 中 25 000~30 000 m³/s 流量出现的天数共 55 d，占比 4.51%；30 000~35 000 m³/s 流量出现的天数共 12 d，占比 0.98%；35 000 m³/s 以上的流量共出现 3 d，占比 0.25%。若考虑上游水库调蓄影响，三峡入库流量将进一步减少。可见，6 月上中旬因入库流量增加触发三峡水库上浮水位转入预泄调度的几率很小。可见，三峡水库消落期末运行水位由上浮转入预泄调度的主要因素为洞庭湖水系来水的增加。因此，本研究提出将“预报未来 5 d 洞庭湖四水合成流量不超过 15 000 m³/s 或处于持续退水过程”作为三峡水库消落期末运行水位上浮运用至 150.0 m 的控制条件之一，即可结合短中期预报，提前启动预泄，降低对中下游防洪的影响。

表 15 6 月上中旬宜昌站长系列径流统计

Table 15 Long series runoff statistics of the Yichang Station during early to Mid-June

流量/m³ · s ⁻¹	>35 000	30 000~35 000	25 000~30 000
出现天数/d	3	12	55

综上所述，三峡水库消落期末运行水位上浮运用至 150.0 m 的条件如下。

- (1) 三峡水库不需要为长江中下游防洪减压调度，短中期预报长江上游与洞庭湖水系无明显强降雨过程；
- (2) 长江上游雅砻江、金沙江下游、岷江、嘉陵江、乌江等水库群组消落形势平稳；
- (3) 三峡水库实时入库流量不超过 28 000 m³/s 且预报未来 5 d 入库流量不超过 30 000 m³/s，或处于持续退水过程；
- (4) 沙市站、莲花塘站水位分别在 38.8 m、

28.2 m 以下;

(5) 预报未来 5 d 洞庭湖四水合成流量不超过 15 000 m³/s 或处于持续退水过程。

当满足上述雨水工情条件时, 三峡水库消落期末的运行控制水位可按照不高于 150.0 m 控制。同时, 进入主汛期后, 若满足上述条件, 建议三峡水库运行水位亦可上浮至 150.0 m 运用, 以保持二者的自然衔接。这样可以充分协调三峡水库开展生态调度与库岸稳定、葛洲坝弃水以及后续生态调度需水量之间的矛盾。

5 结果讨论

本研究探讨了三峡水库促进四大家鱼自然繁殖的生态调度与其他综合利用需求的协调性。相比于以往研究, 本研究具有以下改进: 首先是对不同调度时段存在的除生态调度之外需要考虑的调度需求进行了归纳总结: 集中消落期开展生态调度需重点关注对三峡水库库岸稳定、葛洲坝弃水的影响; 汛期开展生态调度需重点关注对荆江河段和城陵矶河段防洪的影响以及生态调度需水量的满足情况。其次, 经计算分析给出了不同时段开展生态调度存在的风险及相应的应对措施, 即来水偏丰年份适当提前消落, 适当浮动 6 月 10 日库水位至 150.0 m; 最后, 结合三峡水库上下游雨水工情, 提出了风险应对措施的实施条件。研究成果可为三峡水库生态调度的实施提供技术支撑

本研究也存在一定的不足之处: 首先是限于资料以及篇幅, 在进行协调性分析时并未考虑三峡水库及葛洲坝水库调峰的影响; 其次是研究中考虑的生态调度方案只是根据历年生态调度实践以及相关文献总结的中间值方案, 后续可拟定多种生态调度方案进行探讨分析。

6 结 论

在三峡水库历年生态调度实践及运行实践总结基础上, 针对三峡水库促进四大家鱼自然繁殖的生态调度与其他综合利用的协调性进行了研究, 探究了三峡水库生态调度的优化空间, 提出了三峡水库兼顾生态调度的控制节点水位优化建议。具体结论如下。

(1) 集中消落期开展生态调度基本不存在水量约束, 生态调度对防洪、航运和供水基本无影响, 但会带来葛洲坝弃水风险以及库水位变幅超出 1.0 m/d 的风险。为应对风险, 三峡水库可在来水偏丰年份适当提前消落, 降低 5 月 25 日库水位至 150.0 m; 来水偏枯年份, 可在防洪风险可控前提下适当浮动 6 月

10 日库水位至 150.0 m。

(2) 汛期 6 月中下旬开展生态调度对荆江地区防洪无影响, 对城陵矶地区防洪风险可控, 但典型年水量匡算结果表明, 汛期 6 月中下旬开展生态调度在特枯水年情况下存在水量不足的风险。为应对风险, 来水偏枯年份三峡水库可通过运行水位动态上浮运用提前存蓄水量, 为生态调度需求创造有利条件。

(3) 结合下游控制站水位、水库入库流量、下游洞庭湖区间来水形势, 提出了三峡水库浮动 6 月 10 日库水位至 150.0 m 的水雨工情条件: 当三峡水库不需要为长江中下游防洪减压调度, 短中期预报长江上游与洞庭湖水系无明显强降雨过程; 长江上游雅砻江、金沙江下游、岷江、嘉陵江、乌江等水库群组消落形势平稳; 三峡水库实时入库流量不超过 28 000 m³/s 且预报未来 5 d 入库流量不超过 30 000 m³/s, 或处于持续退水过程; 沙市站、莲花塘站水位分别在 38.8 m、28.2 m 以下; 预报未来 5 d 洞庭湖四水合成流量不超过 15 000 m³/s 或处于持续退水过程。

参考文献 (References):

- [1] 陈进. 长江流域生态修复尺度、功能及方法探讨[J]. 长江技术经济, 2023, 7(5): 45-52.
CHEN J. Scale, function and methods of ecological restoration in the Yangtze River Basin[J]. Technology and Economy of Changjiang, 2023, 7(5): 45-52.
- [2] 高雷, 郭国忠, 杨浩, 等. 长江中游洪湖江段四大家鱼早期资源及生态调度影响[J]. 中国水产科学, 2023, 30(12): 1556-1565.
GAO L, GUO G Z, YANG H, et al. The early-stage fish resources of the four major Chinese carps and effects of the eco-operation at Honghu section in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(12): 1556-1565.
- [3] 陈永柏, 廖文根, 彭期冬, 等. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. 水生态学杂志, 2009, 30(2): 130-133.
CHEN Y B, LIAO W G, PENG Q D, et al. A summary of hydrology and hydrodynamics conditions of four Chinese carps' spawning[J]. Journal of Hydroecology, 2009, 30(2): 130-133.
- [4] 易伯鲁, 余志堂, 梁秩桑, 等. 长江干流草, 青, 鲢, 鳙四大家鱼产卵场的分布, 规模和自然条件[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1988.
YI B L, YU Z T, LIANG Z S, et al. The Distribution, Natural Conditions and Breeding Production of the Spawning Grounds of Four Famous Freshwater Fishes on the Main Stream on the Yangtze River [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 1988.
- [5] 熊明, 许全喜, 袁晶, 等. 三峡水库初期运用对长江中下游水文河道情势影响分析[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 120-125.
XIONG M, XU Q X, YUAN J, et al. Study of the influences of Three Gorges project's initial operation on river regime of the middle and Lower Yangtze River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,

- 2010, 29(1): 120-125.
- [6] 彭期冬, 廖文根, 李翀, 等. 三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(S2): 228-232.
- PENG Q D, LIAO W G, LI C, et al. Impacts of four major Chinese carps' natural reproduction in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges Project since the impoundment [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(S2): 228-232.
- [7] 蔡玉鹏, 杨志, 徐薇. 三峡水库蓄水后水温变化对四大家鱼自然繁殖的影响[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(1): 70-77.
- CAI Y P, YANG Z, XU W. Effect of water temperature variation after impoundment of the Three Gorges Reservoir on natural reproduction of the four major Chinese carps [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(1): 70-77.
- [8] GUO W X, JIN Y G, ZHAO R C, et al. The impact of the ecohydrologic conditions of Three Gorges Reservoir on the spawning activity of four major Chinese carps in the middle of Yangtze River, China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2021, 19(6): 4313-4330.
- [9] ZHANG P, QIAO Y, GRENOUILLET G, et al. Responses of spawning thermal suitability to climate change and hydropower operation for typical fishes below the Three Gorges Dam [J]. Ecological Indicators, 2021, 121: 107186.
- [10] TANG C H, YAN Q M, LI W D, et al. Impact of dam construction on the spawning grounds of the four major Chinese carps in the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127694.
- [11] GAO X, ZENG Y, WANG J W, et al. Immediate impacts of the second impoundment on fish communities in the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Biology of Fishes, 2010, 87(2): 163-173.
- [12] 郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 22-26.
- GUO W X, WANG H X, XU J X, et al. Effects of Three Gorges Reservoir on the downstream eco-hydrological regimes during the spawning of important fishes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3): 22-26.
- [13] 戴会超, 毛劲乔, 蒋定国. 大型水利水电工程水沙生态环境调控研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(5): 118-125.
- DAI H C, MAO J Q, JIANG D G. Research progress of water-sediment and ecological environment control of large hydropower projects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(5): 118-125.
- [14] 毛劲乔, 惠二青. 四大家鱼产卵期水库滞冷效应对下游水温影响[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(7): 691-696.
- MAO Jingqiao, HUI Erqing. Influence of cold-temperature stagnation phenomenon induced by reservoir impoundment on downstream water temperature in spawning period of four major Chinese carps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(7): 691-696.
- [15] 柏海霞, 彭期冬, 李翀, 等. 长江四大家鱼产卵场地形及其自然繁殖水力条件研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(3): 249-257.
- BAI H X, PENG Q D, LI C, et al. A summary of topographical characteristics of the four major Chinese carps' spawning grounds and hydrodynamic conditions for natural propagation in the Yangtze River [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(3): 249-257.
- [16] 张迪, 徐薇, 吴凡, 等. 面向产漂流性卵鱼类的三峡水库生态调度效果评价[J]. 水生学杂志, 2024, 45(1): 58-66.
- ZHANG D, XU W, WU F, et al. Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on fish species with drifting eggs[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(1): 58-66.
- [17] 徐薇, 金瑶, 陈桂亚, 等. 三峡水库十年生态调度(2011—2020年)期间下游沙市江段产漂流性卵鱼类自然繁殖变化[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1729-1741.
- XU W, JIN Y, CHEN G Y, et al. Changes of natural reproduction of fish producing drifting eggs in downstream Shashi section, middle reaches of Yangtze River during the ten-year (2011—2020) ecological operation of Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(5): 1729-1741.
- [18] 李春晖, 高举, 全宇, 等. 长江流域水生态健康评价指标体系构建初步研究[J]. 水利发展研究, 2025, 25(8): 71-78, 98.
- LI Chunhui, GAO Ju, QUAN Yu, et al. Preliminary study on the construction of evaluation index system for waterecological health of the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(8): 71-78, 98.
- [19] 李德旺, 杨志, 朱其广, 等. 基于三峡工程运行影响效应的长江鱼类资源保护措施研究与进展[J]. 中国水利, 2023(19): 40-46.
- LI D W, YANG Z, ZHU Q G, et al. Progress in research on protection measures for fish resources in the Yangtze River based on the impact of Three Gorges Project operation [J]. China Water Resources, 2023(19): 40-46.
- [20] 周雪, 王珂, 陈大庆, 等. 三峡水库生态调度对长江监利江段四大家鱼早期资源的影响[J]. 水产学报, 2019, 43(8): 1781-1789.
- ZHOU X, WANG K, CHEN D Q, et al. Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on larval resources of the four major Chinese carps in Jianli section of the Yangtze River[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(8): 1781-1789.
- [21] BAN X, DIPLAS P, SHIH W, et al. Impact of Three Gorges Dam operation on the spawning success of four major Chinese carps[J]. Ecological Engineering, 2019, 127: 268-275.
- [22] CHENG L, OPPERMAN J J, TICKNER D, et al. Managing the Three Gorges Dam to implement environmental flows in the Yangtze River[J]. Frontiers in Environmental Science, 2018, 6: 64.
- [23] 王悦, 高千红. 长江水文过程与四大家鱼产卵行为关联性分析[J]. 人民长江, 2017, 48(6): 24-27.
- WANG Y, GAO Q H. Correlation analysis on hydrological processes and spawning behavior of four major Chinese carps [J]. Yangtze River, 2017, 48(6): 24-27.
- [24] 徐薇, 杨志, 陈小娟, 等. 三峡水库生态调度试验对四大家鱼产

- 卵的影响分析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1129-1139.
- XU W, YANG Z, CHEN X J, et al. Three Gorges Reservoir ecological operation effect on the spawning of the four major Chinese carps[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1129-1139.
- [25] XU W, YANG Z, YI R, et al. Relationship between environmental variables and egg abundance of the four major Chinese carps, downstream of the Three Gorges Reservoir[J]. River Research and Applications, 2021, 37(8): 1191-1200.
- [26] YU L X, LIN J Q, CHEN D Q, et al. Ecological flow assessment to improve the spawning habitat for the four major species of carp of the Yangtze River: A study on habitat suitability based on ultrasonic telemetry[J]. Water, 2018, 10(5): 600.
- [27] 李博, 郜星晨, 黄涛, 等. 三峡水库生态调度对长江中游宜昌江段四大家鱼自然繁殖影响分析[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(12): 2873-2882.
- LI B, GAO X C, HUANG T, et al. Effects of ecological operation of Three Gorges Reservoir on spawning of four major Chinese carps in Yichang section of Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(12): 2873-2882.
- [28] CHEN Q W, ZHANG J Y, CHEN Y C, et al. Inducing flow velocities to manage fish reproduction in regulated rivers [J]. Engineering, 2021, 7(2): 178-186.
- [29] 刘瀚, 林俊强, 秦鑫, 等. 基于生物水文响应模型的刺激四大家鱼繁殖生态调度目标量化方法研究: 以三峡水库为例[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1741-1751.
- LIU H, LIN J Q, QIN X, et al. Methods on quantifying ecological operation target based on bio-hydrological response model for stimulating the reproduction of four major Chinese carps in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(5): 1741-1751.
- [30] 曹光荣, 杨霞, 范向军, 等. 金沙江下游-三峡梯级水库生态环保工作实践[J]. 人民长江, 2022, 53(S2): 28-33.
- CAO G R, YANG X, FAN X J, et al. Ecological and environmental protection work practice of cascade reservoirs from Lower Jinsha River to Three Gorges[J]. Yangtze River, 2022, 53(S2): 28-33.
- [31] 马超, 赵明, 孙萧仲, 等. 考虑鱼类繁衍需求的三峡水库汛期调度要求及可行性探讨[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 109-113.
- MA C, ZHAO M, SUN X Z, et al. Discussion on requirement and feasibility of the Three Gorges Reservoir regulation in flood season considering fish reproduction [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(1): 109-113.
- [32] 王祥, 鲍正风, 舒卫民, 等. 面向运行约束的三峡水库生态调度研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(1): 39-42.
- WANG X, BAO Z F, SHU W M, et al. Research on ecological dispatching of Three Gorges Reservoir oriented to operation constraints [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(1): 39-42.
- [33] 李游坤, 林俊强, 秦鑫, 等. 控制—反调节水库协同生态调度的优化策略: 以三峡—葛洲坝梯级水库为例[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 630-642.
- LI Y K, LIN J Q, QIN X, et al. Joint ecological operation optimal strategy of control and re-regulation reservoirs: A case study of Three Gorges-Gezhouba cascade reservoirs [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(2): 630-642.
- [34] LYU Z H, WANG G S, ZHANG P, et al. Optimizing flow regime for the Four Major Chinese Carps by integrating habitat suitability within reservoir operation [J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130226.
- [35] 李皖家, 陈佳川, 聂少安. 实施三峡后续工作体现的战略格局和发展理念研究[J]. 水利发展研究, 2025, 25(3): 21-25.
- LI Kuangjia, CHEN Jiachuan, NIE Shaoan. Research on the strategic pattern and development concept of the Three Gorges Follow up Work Plan [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(3): 21-25.
- [36] 邹强, 胡挺, 肖扬帆, 等. 三峡水库对城陵矶防洪补偿控制水位研究 I: 需求分析与优化条件[J]. 人民长江, 2024, 55(1): 21-27.
- ZOU Q, HU T, XIAO Y F, et al. Controlled water level of Three Gorges Reservoir carrying out compensation dispatch to Chenglingji area I: Demand analysis and optimization condition [J]. Yangtze River, 2024, 55(1): 21-27.
- [37] 丁胜祥, 张俊, 牛文静, 等. 应对 2022 年枯水的长江上游水库群联合调度方案[J]. 人民长江, 2023, 54(2): 1-6.
- DING S X, ZHANG J, NIU W J, et al. Study on joint operation scheme of reservoirs in upper reaches of Yangtze River for low water in 2022 [J]. Yangtze River, 2023, 54(2): 1-6.
- [38] 丁毅, 傅巧萍. 长江上游梯级水库群蓄水方式初步研究[J]. 人民长江, 2013, 44(10): 72-75.
- DING Y, FU Q P. Preliminary research on water storage mode of cascade reservoirs in upper Yangtze River [J]. Yangtze River, 2013, 44(10): 72-75.
- [39] 周新春, 闵要武, 冯宝飞, 等. 大型水库中小洪水实时预报调度技术在三峡水库中的应用[J]. 水文, 2011, 31(S1): 180-184.
- ZHOU X C, MIN Y W, FENG B F, et al. Application of small and medium-sized floods real time forecasting and operation technology for large reservoir in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(S1): 180-184.
- [40] 李肖男, 傅巧萍, 张松, 等. 三峡水库汛期运行水位运用方式研究[J]. 人民长江, 2022, 53(2): 21-26.
- LI X N, FU Q P, ZHANG S, et al. Study on operating water level during flood season of Three Gorges Reservoir [J]. Yangtze River, 2022, 53(2): 21-26.

(责任编辑 王 璐)