

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^{*}

李游坤¹, 林俊强^{1**}, 秦鑫², 刘毅¹, 任玉峰³, 张晓光²

(1: 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

(2: 华能澜沧江水电股份有限公司, 昆明 650214)

(3: 中国长江电力股份有限公司, 智慧长江与水电科学湖北省重点实验室, 宜昌 443133)

摘要: 全球主要河流已成为受梯级水库控制的人工调节系统。河流鱼类作为淡水生态系统的重要组成部分, 在人类对河流水能资源开发利用的进程中, 面临着种群退化、多样性丧失的巨大胁迫。水库生态调度是在鱼类关键生命期人为营造满足鱼类需求的水文水动力条件, 减缓水库不利生态影响的一种生态环保措施。然而, 在生态调度的实践过程中, 受水库不同运行方式影响, 下游水流条件在局部时段存在与鱼类需求相悖的情况, 有进一步提升空间。本文选择了当前世界上规模最大的三峡水电站和其下游的葛洲坝水电站为案例, 建立了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, 并探讨了优化调整策略。结果表明, 目前三峡、葛洲坝梯级水库生态调度的运行方式, 大多数情况下仅通过葛洲坝水库小时尺度的精细调度, 就可实现下游四大家鱼产卵繁殖所需的小时尺度连续涨水目标, 并可一定程度提升发电出力, 达到生态与经济共赢的良好成效。研究结果表明葛洲坝水库有能力在生态调度的特定时期内充分运用反调节库容调节三峡日出库流量过程, 可为梯级水库生态调度的优化实践提供积极参考。

关键词: 三峡—葛洲坝梯级水库; 生态调度; 优化策略; 四大家鱼

Join ecological operation optimal strategy of control and re-regulation reservoirs: A case study of Three Gorges–Gezhouba cascade reservoirs^{*}

Li Youkun¹, Lin Junqiang^{1**}, Qin Xin², Liu Yi¹, Ren Yufeng³ & Zhang Xiaoguang²

(1: State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R.China)

(2: Huaneng Lancang River Hydropower INC., Kunming 650214, P.R.China)

(3: China Yangtze Power Co., Ltd., Hubei Key Laboratory of Intelligent Yangtze River and Hydropower Science, Yichang 443133, P.R.China)

Abstract: The major rivers across the world have become artificial regulation systems controlled by cascade reservoirs. River fish, as an important part of freshwater ecosystems, are under threat of population degradation and biodiversity loss in the process of development and utilization of river water energy resources. The ecological operation of the reservoir is eco-environmental protection to alleviate the negative impact on ecosystems, which artificially creates hydrological and hydrodynamic conditions to meet the requirement of fish during key life periods. However, based on ecological operation practical experience, there are circumstances where downstream flow conditions are inconsistent with the fish requirement in local periods affected by different operation conditions of reservoirs. That means the ecological operation still needs improvement. This paper takes the Three Gorges Dam, the world's largest power station, and the downstream Gezhouba Dam, as a case study, builds a joint operation model of cascade reservoirs, simulates and analyzes the feasibility of the cascade reservoirs to improve the spawning conditions of fish in the downstream river reaches un-

^{*} 2021-05-17 收稿; 2021-08-06 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2018YFE0128500)、流域水循环模拟与调控国家重点实验室基金项目(SKL2020ZY10)和华能澜沧江水电股份有限公司重点科研项目(HY2020/S2)联合资助。

^{**} 通信作者; E-mail: junqiang-lin@hotmail.com.

der joint operation and discusses the optimal strategy. In most cases, the target of continuous flow rising for hourly timescale can be accomplished only by the hourly exquisite operation of Gezhouba reservoir, which is required for the four major Chinese carps spawning downstream of Gezhouba Dam. What's more, the hydropower generation output can be improved to a certain extent, thus achieving win-win progress of ecology and economics. The results of this paper show that Gezhouba reservoir can adjust the daily discharge process of the Three Gorges Reservoir by the re-regulation during a specific period of ecological operation, which may function as a useful reference for the optimization practice of ecological operation of cascade reservoirs.

Keywords: Three Gorges-Gezhouba cascade reservoirs; ecological operation; optimal strategy; four major Chinese carps

梯级水电开发是世界主要河流水能资源利用的主体形式。梯级水电开发不可避免地改变了河流的天然水文情势,直接或间接驱使河流地形、水动力、水温等生境条件发生变化,对河流生态系统带来了一定负面影响。尤其是梯级水电站群中的大型控制性工程,其形成的水库对天然径流的巨大调节能力,显著改变了天然水文情势,破坏了鱼类等水生生物的正常生命节律,进一步加剧了对下游河流生态系统的不良影响。

因此,如何改变水电站传统调度运行方式,恢复筑坝河流的关键水文过程(如鱼类繁殖所需的洪水脉冲过程),减缓对河流生态系统的不良影响,是河流管理者、水电企业和生态环境研究者广泛关注的问题。自1970s以来,欧美国家开始关注水电站引起的负面生态环境问题,并陆续开展了改进水库传统调度方式的研究和试验实践。例如,美国哥伦比亚河大古力水库(Grand Coulee Dam)与约瑟夫酋长水库(Chief Joseph Dam)联合调度重新优化分配下泄流量,减缓泄洪气体过饱和对鲑鱼带来的不利影响^[1-2];密西西比河加文斯角水库(Gavins Point Dam)通过春季释放2次高流量洪水脉冲,促进下游的密苏里铲鲟产卵^[3];科罗拉多格伦峡水库(Glen Canyon Dam)进行了3次人造洪水试验保持虹鳟鱼产卵期生境适宜性^[4-6]。澳大利亚墨累河休姆水库(Hume Dam)通过恢复春季洪水脉冲,增加洪峰和洪水持续时间,刺激虫纹鳊鲈、尖吻鲈等鱼类产卵^[7]。

进入21世纪以来,中国学者开始开展和重视水库生态调度方面的研究。Zhang等^[8]采用系统重构分析方法对影响四大家鱼产卵的生态水文指标进行了分析,认为适度的初始水位、初始流量、较大流量日增长率、较高的水位日增长率及较长时间的水位上涨与四大家鱼的产卵行为密切相关。Wang等^[9]通过采用遗传规划法识别出涨水的持续时间和日均涨水率为影响家鱼产卵和鱼苗丰度的关键环境因子。李建等^[10]将水力学模型和栖息地模型结合,通过物理栖息地模拟计算得到了四大家鱼产卵期的适宜生态流量。Yi等^[11]认为家鱼产卵期不同的起涨流量需要不同的流量日涨幅。

为了缓解中国重要流域鱼类资源的衰退趋势,有关部门和水电企业积极开展梯级水库的生态调度实践工作。其中备受关注和最具代表性的是三峡水库于2011年起每年针对四大家鱼开展促进其繁殖的生态调度试验,至今已实行了10余场次的人造洪水调度,改善了四大家鱼繁殖期涨水条件减弱的问题,有效刺激了葛洲坝下游河段四大家鱼的产卵繁殖。然而,在三峡生态调度的实践过程中,也发现了一些新问题。例如,三峡水库开展的10余次生态调度试验中,有的场次刺激鱼类产卵的效果好,有的场次则未出现卵苗高峰^[12-14]。制约家鱼产卵的主要因素,一是适宜的河道水温,二是有效的涨水过程。前者主要受生态调度启动时机的影响,后者则与水库调度的策略相关。生态调度虽营造了日间逐步涨水的人造洪水过程,但这个过程与天然涨水过程有所不同。三峡水库的人造洪水过程呈台阶式上涨,且受电网负荷调峰的影响,日间涨水,夜间跌水,这有悖于四大家鱼喜好凌晨产卵^[15]和涨水刺激的习性,未能实现调度期小时尺度的连续涨水过程。因此,能否利用上下游梯级水库的协调作用,改善和营造适宜下游河流重要鱼类繁殖所需的近自然水文条件,是实践中提出来的新科学问题。本文针对这一问题,以三峡和葛洲坝梯级水库为案例,建立相应的梯级水库调度模型,探讨了梯级水库协调运行改善下游河道鱼类繁殖条件的可行性与策略,希望为国内外梯级水库运用灵活多样的方式开展和优化生态调度提供思路和参考借鉴。

1 研究区域概况

长江是亚洲和中国第一大河,世界第三大河。长江流域发源于青藏高原的唐古拉山脉,蜿蜒贯穿中国大地地势的三级阶梯,地形地貌复杂、河网水系发达、沿程气候多样,孕育了极为丰富的鱼类资源。

在当前长江干流的梯级水库开发格局下,三峡水库是长江中游的控制性水库,葛洲坝水库是三峡水库

的反调节水库,也是长江上中游梯级水库群的末级水库,葛洲坝下游至长江入海口为自然连通河道. 葛洲坝下游分布有许多鱼类的产卵场,例如,葛洲坝下十里红至胭脂坝、仙人桥至虎牙滩等江段是当前四大家鱼在长江干流规模最大、且较为稳定的产卵场^[16].

因此,本文选择长江上中游梯级水库群中较为代表性的三峡—葛洲坝梯级水库为案例水库,以受三峡生态调度影响最直接、最强烈的葛洲坝下游数十千米河段为研究区域,研究和探讨梯级水库不同调度运行方式下改善下游河道鱼类繁殖条件的可行性与策略.

2 代表性鱼类的生态水文需求

受大型水电工程建设运行,加之过度捕捞、航道整治、水环境污染等人类活动影响,长江鱼类资源严重衰退. 其中,中国最重要的经济鱼类四大家鱼,自 1990s 以后鱼类资源开始衰退,三峡水库建成运行初期,四大家鱼产卵繁殖所需的水文刺激减弱,四大家鱼资源量持续下降,2009 年监利断面卵苗径流量达到谷值,仅为 0.42 亿尾,相比 1960s 监利卵苗量的 403 亿尾,产卵规模萎缩严重^[17-18].

四大家鱼是长江流域的经济物种,也是长江梯级水库生态调度最为关注的目标鱼类. 另一方面,按鱼类产卵特性划分,四大家鱼是产漂流性卵鱼类. 因此,本文选择四大家鱼为代表性鱼类,研究改善它们繁殖条件的梯级水库生态调度优化策略.

长江四大家鱼的繁殖主要集中在每年的 4 月底至 7 月初,当水温上涨至 18℃ 以上,在江水涨落的洪峰过程刺激下,可触发家鱼的产卵行为. 据鱼卵漂流调查发现,长江干流各江段鱼卵漂流存在昼夜差异,尤其是本文研究区域中的宜都江段,从鱼卵漂流密度与发育期推算,四大家鱼繁殖时间主要集中在夜间,高峰期在凌晨^[15]. 家鱼产卵与江水的流量和水位是密切相关的,产卵行为绝大多数发生在涨水期. 产卵规模取决于涨水持续时间和水位相对增长幅度,而与起点水位无关^[19]. 涨水持续时间越长,水位相对增长幅度越大,产卵规模越大^[9, 20]. 家鱼产卵时的流速范围较大,一般认为在 0.33~1.50 m/s 之间^[16],江水流速越大,刺激家鱼产卵所需要的时间越短. 四大家鱼产卵条件略有所不同,草鱼和鲢通常在涨水时产卵,鳊要在涨水至较高水位时才产卵,而青鱼可以在平水、退水时产卵^[8]. 郭文献等^[21]分析三峡水库蓄水前四大家鱼繁殖期的生态水文指标,提出产卵的水文需求为每年 5 月涨水次数 2~3 次,涨水持续时间 3~8 d,日流量上涨率为 910~2208 m³/s,水位上涨率为 0.41~0.85 m/d;6 月份涨水次数 2~4 次,涨水持续时间 3~8 d,日流量上涨率为 1355~2931 m³/(s·d),水位上涨率为 0.41~0.74 m/d.

3 梯级水库运行的生态水文影响

葛洲坝水电站为径流式电站,1981 年 1 月大江截流,同年 5 月下闸蓄水,12 月一期机组运行发电. 葛洲坝水库库容小,单独运行对来水调蓄作用很小,具有枯季是水库,汛期是河道的特征. 三峡水电站为目前世界上规模最大的巨型电站,2003 年 6 月三峡进入围堰发电运行期,与葛洲坝水电站开始联合运行. 三峡水电站运行后,上游形成多年调节型水库,总库容为 393.0 亿 m³,调节库容为 221.5 亿 m³,而下游的葛洲坝水库则变为两坝间水库,库容由原来的 15.8 亿 m³变为 7.1 亿 m³,仅相当于原库容的 45%.

笔者研究团队及国内外诸多学者基于 50 年以上长序列的日水文数据,应用 IHA 生态水文指标法、RVA 变动范围法等分析了天然情况下、葛洲坝单独运行和三峡—葛洲坝联合运行条件下的水文变化^[22-24]. 研究表明,葛洲坝单独运行时,对下游水文情势的影响整体不大,与天然情况相比变化较明显的指标有 3 月平均流量增加,9、11 月平均流量减小,年最小连续 90 日平均流量增加,年高流量脉冲事件平均历时增加,涨落水逆转次数增加,除上述指标表现为中高度改变外,其余指标均为低度改变. 三峡—葛洲坝联合运行后,对下游水文情势产生了中度改变,主要表现为大多数月份月流量指标中高度改变、年最小流量增加、年最大流量减小、年最小流量出现时间提前、低脉冲发生频率消失、高脉冲发生次数和历时下降、流量上涨率减小、涨落水变化更为频繁等^[25-27]. 对于四大家鱼而言,三峡—葛洲坝联合运行后对其产生的不利生态影响主要表现为自然洪峰过程的减弱和涨落水逆转次数频繁带来的涨水持续时间缩短.

梯级水库实际运行中,除了产生上述日尺度的生态水文影响外,为了满足发电、航运等综合功能,日内对天然来流还会进行小时尺度的调度,继而进一步改变天然径流过程. 1982 年葛洲坝水电站运行初期,仅 1

号2号机组发电(全部机组21台),在四大家鱼繁殖高峰期5—6月份,葛洲坝水库日尺度和小时尺度的出入库流量过程如图1所示。从图中可以看出,葛洲坝运行初期的日内调度对天然来流几乎没有影响,涨落水过程在小时尺度内平滑连续变化。三峡-葛洲坝联合运行后,三峡水电站在日内调度时需承担电力系统的负荷调峰任务,葛洲坝水电站则配合三峡水电站进行反调节运用,以缓解三峡水电站负荷日调节产生的非恒定流对坝下航运的影响。然而,在常规运行调度下,葛洲坝水库水位在63.0~66.5 m间变动,最大调节库容为0.86亿 m^3 左右,仅为三峡水库调节库容的0.39%,因此一般认为葛洲坝水库不具备多日调节三峡出库流量的能力。图2为2017年葛洲坝水库5—6月日尺度和小时尺度的出入库流量过程,从图中可以看出,受三峡水电站调峰影响,葛洲坝出入库流量过程在日内呈明显的锯齿状波动,可能对葛洲坝下游鱼类产卵繁殖产生额外的不利生态效应。

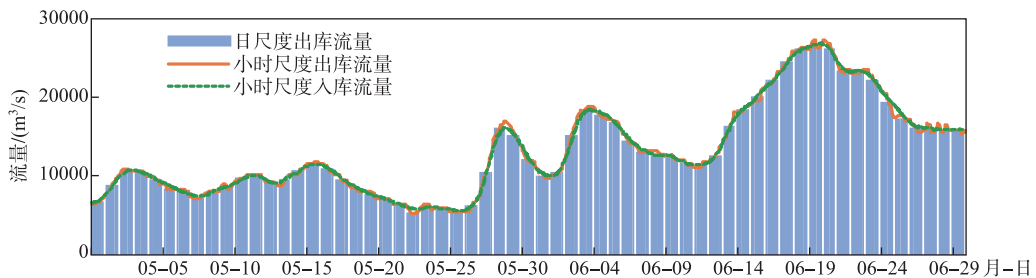


图1 1982年5—6月葛洲坝水库日尺度和小时尺度的出入库流量过程

Fig.1 The daily and hourly scale discharge process of Gezhouba Reservoir in May and June, 1982

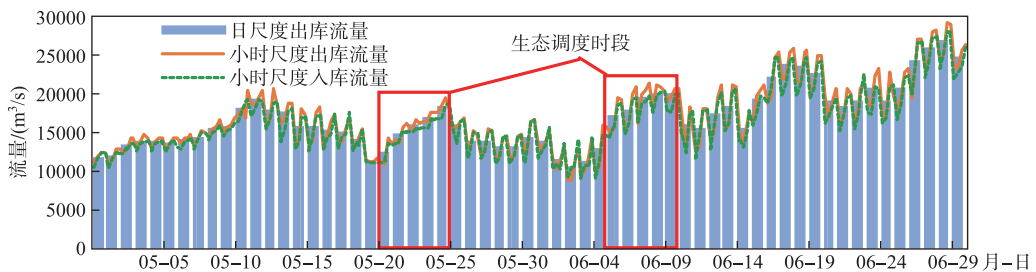


图2 2017年5—6月葛洲坝水库日尺度和小时尺度的出入库流量过程

Fig.2 The daily and hourly scale discharge process of Gezhouba Reservoir in May and June, 2017

4 梯级水库协同生态调度的优化模拟分析

为了减缓水库运行对鱼类繁殖的不利生态影响,三峡水库自2011年至今连续开展了10余场次的生态调度试验。当前三峡水库生态调度方案是在确保梯级枢纽安全的前提下,根据汛前腾空库容的需要,结合上游来水过程,以四大家鱼繁殖的生态水文需求为目标,通过持续加大泄流流量形成人造洪峰,刺激下游四大家鱼产卵繁殖。根据2011—2018年实际生态调度的统计水文指标,生态调度试验在每年5—6月河道水温稳定在 18°C 以上时择机开展,起涨流量 $6800\sim 15300\text{ m}^3/\text{s}$,平均日流量上涨率 $1170\sim 3140\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$,持续涨水时间为3~8 d。实际生态调度过程中,虽然营造了日尺度的连续涨水过程,但是受三峡水电站电力调峰影响,在夜间负荷低谷时段(一般为23:00至次日7:00),三峡水库减小出库流量,葛洲坝水库也跟随减小出库流量,由此营造的人造涨水过程从小时尺度看来是呈锯齿状上升的(图2红色方框内所示),与天然情况下平滑的连续涨水过程差异较大。对于四大家鱼而言,在其繁殖高峰的凌晨时段跌水,可能会减弱对四大家鱼产卵的刺激,影响生态调度效果。

为了优化当前生态调度方案,探讨大型控制性水库与下游反调节水库这种库容悬殊差距较大的梯级水库组合模式下,如何通过梯级水库的协同调度以营造既满足日尺度鱼类生态水文需求、又满足近自然的小

时尺度连续涨水过程,本文结合三峡水库促进四大家鱼繁殖的实际生态调度工况,应用美国陆军工程兵团的软件 Hec-ResSim3.1,构建了三峡—葛洲坝梯级水库联合调度模型,设计了若干生态调度方案的优化策略并模拟分析了其可行性.

4.1 联合调度模型

4.1.1 优化目标与策略 生态调度的实施主要为控制水库每日的出库流量水平. 本研究以实现葛洲坝下游河道生态调度期全过程小时尺度的连续涨水为目标.

$$F = \max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \Delta O_{i,t} \cdot \Delta t \tag{1}$$

$$\Delta O_{i,t} = \text{sgn}(Q_{i+1}^{\text{CZB}} - Q_i^{\text{CZB}}) \tag{2}$$

式中, F 代表生态调度期持续涨水时间; N 代表生态调度的持续时间; T 代表日内的计算时段数; $\Delta O_{i,t}$ 代表第 i 天的 $t+1$ 时刻较之 t 时刻出库流量的涨落情况; Q_{i+1}^{CZB} 、 Q_i^{CZB} 分别代表葛洲坝水库在 $t+1$ 和 t 时段的出库流量; $\text{sgn}()$ 为阶跃函数, $Q_{i+1}^{\text{CZB}} - Q_i^{\text{CZB}} > 0, \text{sgn}(Q_{i+1}^{\text{CZB}} - Q_i^{\text{CZB}}) = 1, Q_{i+1}^{\text{CZB}} - Q_i^{\text{CZB}} = 0, \text{sgn}(Q_{i+1}^{\text{CZB}} - Q_i^{\text{CZB}}) = 0, Q_{i+1}^{\text{CZB}} - Q_i^{\text{CZB}} < 0, \text{sgn}(Q_{i+1}^{\text{CZB}} - Q_i^{\text{CZB}}) = -1$; Δt 代表葛洲坝水库出入库流量过程计算时段步长.

本研究设计了 3 个生态调度方案的优化调整策略,调度方案优先采用策略 1,若策略 1 不满足约束条件,则采用策略 2. 若策略 1、2 均无法实现,则采用策略 3. 具体策略描述和策略约束条件如表 1 所示.

表 1 生态调度的优化调整策略设计
Tab.1 Optimization and adjustment strategies design of ecological operation

策略编号	策略描述	策略约束
策略 1	三峡出库流量不变,葛洲坝采用削峰填谷的方式,营造出库流量在生态调度期内形成一个连续的涨水过程	三峡出库流量不变 $Q_{i+1} > Q_i$
策略 2	三峡出库流量不变,葛洲坝日间出库流量持续增加,20:00—24:00 维持出库流量不变,使得葛洲坝出库流量形成几段连续的涨水过程	三峡出库流量不变 $Q_{i+1} > Q_i, 0:00 < t < 20:00$; $Q_{i+1} = Q_i, 20:00 \leq t \leq 24:00$
策略 3	适当调整三峡的出库流量,配合葛洲坝库容反调节三峡出库流量	适当调整三峡的出库流量 $Q_{i+1} > Q_i$

4.1.2 常规运行约束 水库常规调度运行的约束条件包括了水量平衡约束、水库水位约束、水库蓄水量约束、水电站出力约束、水库下泄流量约束等. 依据《三峡(正常运行期)—葛洲坝水利枢纽梯级调度规程》,正常运行的约束条件为:

①水量平衡约束:

$$V_{i+1} = V_i + (I_i - Q_i) \cdot \Delta t \tag{3}$$

式中, V_i 、 V_{i+1} 分别为 t 、 $t+1$ 时刻水库的蓄水量, I_i 为 t 时刻水库的入库流量, Q_i 为 t 时刻水库的出库流量,在水量平衡约束中忽略水库蒸发损耗. 三峡的出库流量与葛洲坝的入库流量基本相等.

②水库库容约束:

$$V^{\min} \leq V_i \leq V^{\max} \tag{4}$$

式中, V^{\min} 、 V^{\max} 分别为水库最小和最大的库容量.

③水库下泄流量约束:

$$Q^{\min} \leq Q_i \leq Q^{\max} \tag{5}$$

式中, Q^{\min} 、 Q^{\max} 分别为水库的最小和最大下泄能力.

④水电站出力约束:

$$N^{\min} \leq N_i \leq N^{\max} \tag{6}$$

式中, N^{\min} 、 N^{\max} 分别为电站机组的最小和最大出力.

⑤水库水位约束:

库水位约束:

$$Z^{\min} \leq Z_i \leq Z^{\max} \quad (7)$$

三峡水库库水位日降幅:

$$\Delta Z_d^{\text{TCD}} \leq 0.6 \text{ m} \quad (8)$$

葛洲坝水库库水位日变幅、小时变幅:

$$\Delta Z_d^{\text{CZD}} \leq 3 \text{ m}, \Delta Z_h^{\text{CZD}} \leq 1 \text{ m} \quad (9)$$

式中, Z^{\min} 、 Z^{\max} 为水库的最低、最高库水位. Z_d^{TCD} 为三峡水库库水位日降幅. 为保障航运安全和畅通, 葛洲坝水利枢纽上游最高通航水位为 66.5 m, 最低通航水位为 63.0 m. ΔZ_d^{CZD} 、 ΔZ_h^{CZD} 分别为葛洲坝水库库水位日变幅、小时变幅. 葛洲坝配合三峡进行反调节运行时库水位可在 63.0~66.5 m 之间变动, 葛洲坝库水位日变幅最大为 3 m, 小时变幅小于 1 m.

4.1.3 模型求解方法 生态调度的实施主要为控制水库每日的出库流量水平, 生态调度期全过程小时尺度的连续涨水可作为定值目标, 因此可将优化目标转换为葛洲坝水库生态调度期运行的约束条件, 采用常规调度模型进行模拟. 模型求解采用离散微分动态规划(DDDP)法, 其结构简单, 每次寻优只是在某个状态序列赋予增量形成的廊道范围内进行, 逐次向预定目标迭代逼近^[28]. 该方法能解决因状态离散点较多而求解费时的问题, 有效地解决计算“维数灾”^[29].

4.2 模拟结果

根据 2011—2018 年三峡水库开展的 12 次生态调度试验的实测水文数据, 以葛洲坝水库生态调度期的实际入库流量作为入流边界条件, 初始库水位作为调度初始条件, 以 4.1.1 中设计的调度策略, 模拟计算不同年份不同入库流量水平下优化后的葛洲坝出库流量过程, 并与优化前的出库流量过程进行对比, 同时计算了优化后的葛洲坝电站出力变化情况. 图 3 罗列了采用策略 1 对生态调度过程进行小时尺度优化调整后的计算结果, 除 2014 年、2015 年第 1 次与第 2 次、2018 年第 2 次生态调度之外, 其余年份采用策略 1 均能在常规约束条件下实现生态调度期全过程小时尺度的连续涨水, 表明模拟的调度过程可行. 图 4 罗列了采用策略 1 未能实现生态调度期全过程小时尺度的连续涨水, 而采用策略 2 对生态调度过程进行优化调整后可行的调度过程. 图 5 罗列了采用策略 1 和策略 2 无法实现优化目标, 而采用策略 3 对生态调度过程进行优化调整的可行调度过程. 不同调度策略下的水文和出力指标如表 2、表 3 和表 4 所示. 计算结果表明调整后的葛洲坝水库日均出库流量变化范围为-3.42%~2.47%, 变幅较原日均出库流量变化大多在 3% 以内; 调整后生态调度期的流量累积涨幅与原涨水过程相当, 日流量上涨率较原日流量上涨率变化范围为-10.97%~13.39%, 变化大多在 4% 以内; 调整后下游水位上涨率变化范围为-37.74%~25.58%, 变化大多在 7% 以内. 策略 1 和策略 2 在不改变三峡出库流量的情况下, 调整后的葛洲坝电站总出力多数年份有所增长, 出力变化范围为-0.38%~5.91%. 策略 3 改变三峡的出库流量后, 三峡电站生态调度期总出力变化较小, 变化范围为-0.52%~0.08%; 葛洲坝电站总出力有所减少, 变化范围为-4.59%~-2.84%. 实际调度运行时, 可根据实时工况和运行条件, 适当调增或调减梯级的出力计划, 尤其是葛洲坝的出力计划.

5 讨论

5.1 三峡-葛洲坝梯级生态调度优化策略

研究表明, 涨水持续时间是四大家鱼自然繁殖的关键环境因子^[30-32]. 四大家鱼产卵多数在涨水期间^[33], 涨水后一定的高流量维持时间才能诱导产卵行为的发生^[34]. 总涨水日数决定了家鱼苗产卵量的多寡^[35], 有效涨水次数较多时, 家鱼卵苗规模相对较大^[36], 苗汛峰值与涨水持续时间呈显著正相关^[34]. 四大家鱼属产漂流性卵鱼类, 鱼卵顺水漂流孵化^[37], 涨水历时的延长使鱼卵更不容易沉底, 可提升孵化率^[38]. 因此, 如何增加有效涨水持续时间对于优化完善现有生态调度方案具有重要意义. 然而, 生态调度增加涨水持续时间的同时也势必增加了落水的时间^[39], 对于处于繁殖季节的家鱼产卵将受到后续的影响, 加之三峡水库防洪调度的约束, 增加持续涨水时间将不利于汛期防洪安全. 本文在不改变三峡水库现有生态调度方案涨水时间的情况下, 充分挖掘了葛洲坝水库的反调节能力, 维持原有的生态调度洪峰流量和流量累积涨幅一定, 并尽可能模拟出自然情况下平滑的连续涨水过程, 以此延长下游河道的涨水持续时间, 为四大家鱼营造更为适宜的水文水力学条件. 从模拟结果可以看出, 通过葛洲坝水库小时尺度的精细调度, 可用仅有的微

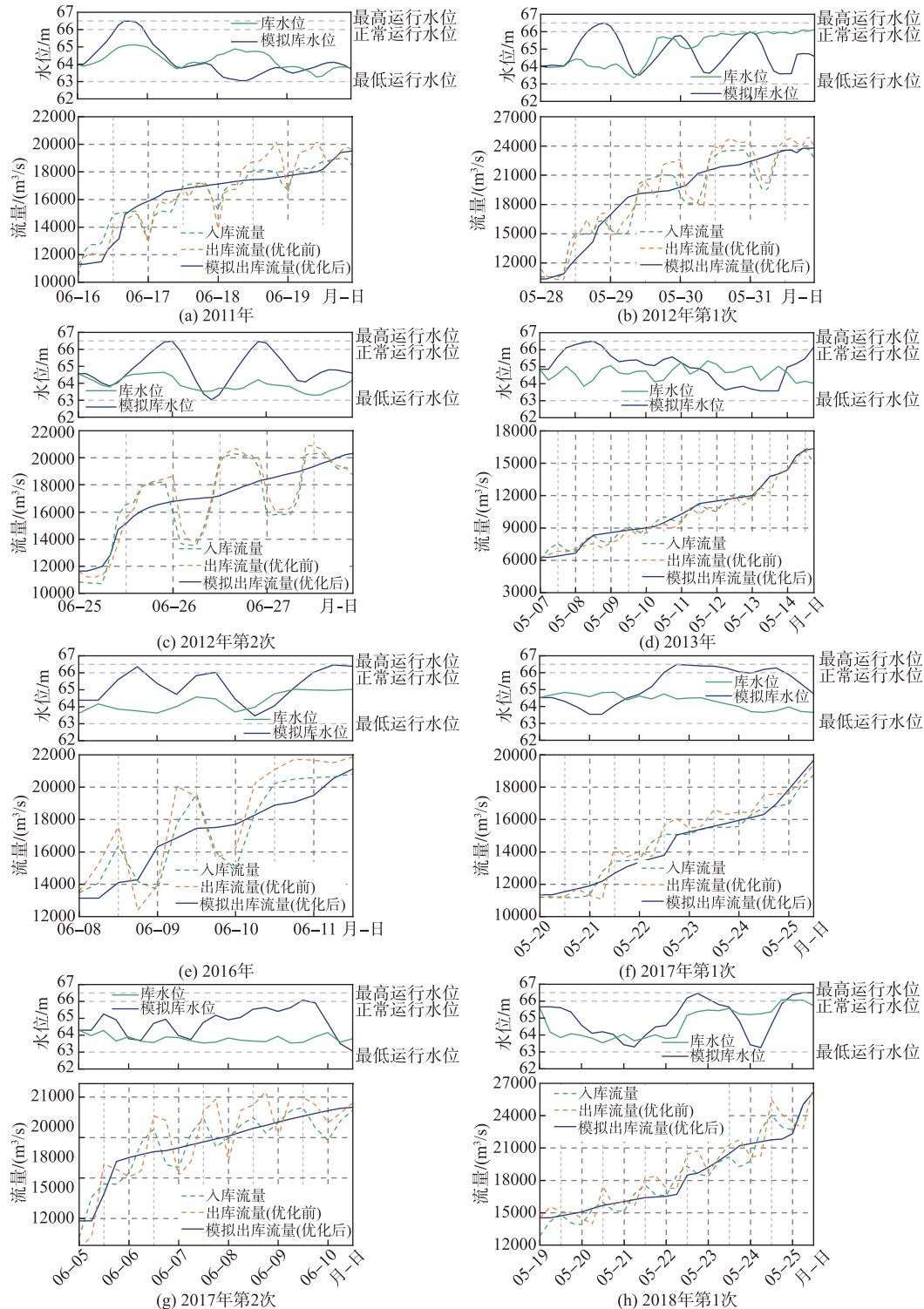


图3 策略1模拟的可行调度过程

Fig.3 Viable operation process under the simulation of strategy 1

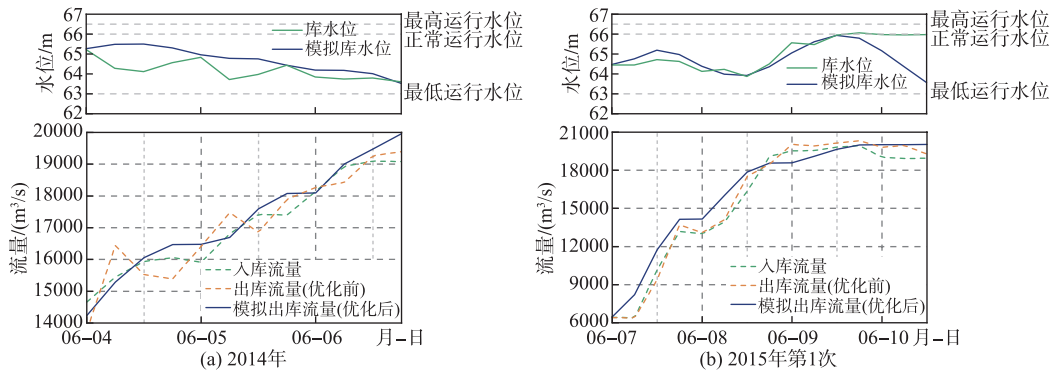


图4 策略2模拟的可行调度过程

Fig.4 Viable operation process under the simulation of strategy 2

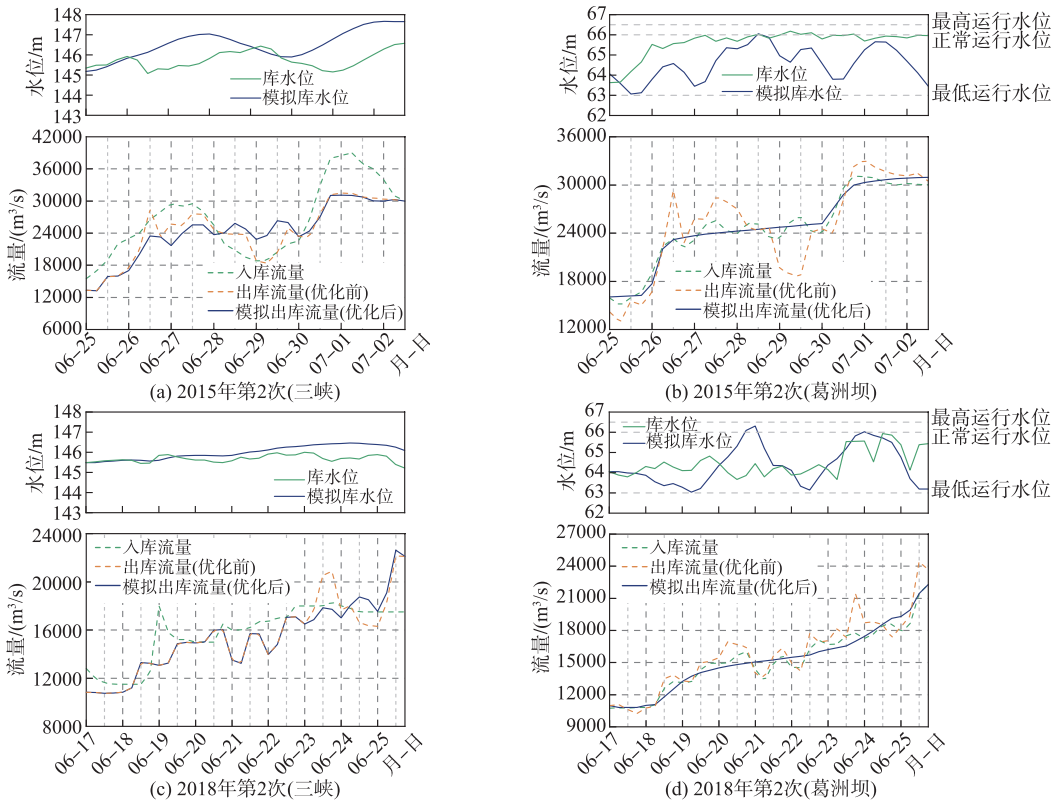


图5 策略3模拟的可行调度过程

Fig.5 Viable operation process under the simulation of strategy 3

小库容实现出乎意料的效果. 在已执行的大多数场次生态调度中,可不改变三峡原有生态调度的出库流量方式,仅通过葛洲坝水库小时尺度的削峰填谷(策略1,图3)或日间削峰填谷、夜间维持出库流量不变(策略2,图4)的方式,就可实现多日小时尺度的连续出库流量上涨,使得下泄流量过程更符合天然河流特征,从而刺激四大家鱼对涨水过程的产卵响应. 经过优化调整后,四大家鱼在5月和6月的产卵生态水文需求指标的改变幅度大多数不超过15%,并朝着有利的方向变化,同时大多数场次还可实现发电出力的增加,在葛洲

表 2 策略 1 可行调度过程的水文指标和出力变化

Tab.2 Hydrological indicators generation of the viable operation process under strategy 1

调度日期	涨水 持续 时间/d	日均 入库 流量/ (m^3/s)	日均出库流量/ (m^3/s)			日流量上涨率/ ($\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$)			下游水位上涨率/ (m/d)			葛洲坝 出力变化	
			实际	策略 1	调整 变幅	实际	策略 1	调整 变幅	实际	策略 1	调整 变幅	策略 1	
2011-06-16-06-19	4	16342	16560	16381	-1.08%	1831	1844	0.71%	0.67	0.68	1.49%	0.93%	
2012-05-25-05-31	4	18923	19405	18953	-2.33%	2865	2824	-1.43%	1.26	1.18	-6.35%	-0.38%	
2012-06-20-06-27	4	16829	17016	17006	-0.06%	2039	2312	13.39%	0.98	1.12	14.29%	5.08%	
2013-05-07-05-14	8	10123	10164	10025	-1.37%	1284	1327	3.35%	0.42	0.45	7.14%	1.72%	
2016-06-08-06-11	4	17625	17831	17396	-2.44%	2270	2240	-1.32%	0.57	0.55	-3.51%	2.50%	
2017-05-20-05-25	6	14701	15037	14751	-1.90%	1405	1454	3.49%	0.43	0.54	25.58%	3.12%	
2017-06-05-06-10	6	17522	18028	17655	-2.07%	1404	1361	-3.06%	0.55	0.54	-1.82%	5.91%	
2018-05-19-05-25	7	18612	19218	18632	-3.05%	1666	1643	-1.38%	0.64	0.61	-4.69%	1.07%	

表 3 策略 2 可行调度过程的水文指标和出力变化

Tab.3 Hydrological indicators generation of the viable operation process under strategy 2

调度日期	涨水 持续 时间/ d	日均 入库 流量/ (m^3/s)	日均出库流量/ (m^3/s)			日流量上涨率/ ($\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$)			下游水位上涨率/ (m/d)			葛洲坝 出力变化	
			实际	策略 2	调整 变幅	实际	策略 2	调整 变幅	实际	策略 2	调整 变幅	策略 2	
2014-06-04-06-06	3	17075	17091	17285	1.14%	1780	1812	1.80%	0.53	0.63	18.87%	2.33%	
2015-06-07-06-10	4	16364	16139	16538	2.47%	3565	3295	-7.57%	1.35	1.35	0.00%	-0.01%	

表 4 策略 3 可行调度过程的水文指标和出力变化

Tab.4 Hydrological indicators generation of the viable operation process under strategy 3

调度日期	涨水 持续 时间/d	日均 入库 流量/ (m^3/s)	日均出库流量/ (m^3/s)			日流量上涨率/ ($\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$)			下游水位上涨率/ (m/d)			三峡出 力变化	葛洲坝出 力变化
			实际	策略 3	调整 变幅	实际	策略 3	调整 变幅	实际	策略 3	调整 变幅	策略 3	策略 3
2015-06-25-07-02	8	24493	24970	25028	0.23%	2343	2106	-10.12%	1.06	0.66	-37.74%	-0.52%	-4.59%
2018-06-17-06-25	9	15388	15850	15308	-3.42%	1340	1193	-10.97%	0.55	0.46	-16.36%	0.08%	-2.84%

坝日均入库流量达到 $18000 \text{ m}^3/\text{s}$ 的弃水边界条件年份,如 2012 年第 1 次生态调度试验(图 3b)和 2018 年第 1 次生态调度试验(图 3h),优化后葛洲坝出库流量在高峰时段减少,库水位在满足最大日变幅的前提下控制在较低水平,有效地减少了弃水风险. 仅少数场次(持续时间超过 8 天)的生态调度,受三峡水库夜间多日电网低谷负荷调度影响,难以仅凭葛洲坝水库实现多日小时尺度的连续出流上涨,需在满足三峡水库日水位消落小于 0.6 m 和调峰量不超 300 万 kW 的约束条件下,采取小幅度改变当前三峡水库生态调度出库流量、联合葛洲坝水库进行精细调度的方式(策略 3,图 5),才能保证持续时间超过 8 d 的小时尺度连续出库流量上涨. 这种方式,可能牺牲一部分三峡和葛洲坝梯级水库的发电出力. 如在 2015 年第二次生态调度试验(图 5a、图 5b)中,调整后的三峡日均出库流量超过了 $21000 \text{ m}^3/\text{s}$ 导致葛洲坝电站开始弃水,但为了满足持续涨水的优化目标葛洲坝水库仍需持续的蓄泄流量,导致水库运行水位偏低,葛洲坝电站出力随着出库流量的增加而持续降低;而在 2018 年第 2 次生态调度试验(图 5c、d)中,生态调度后期三峡的日均出库流量超过了 $18000 \text{ m}^3/\text{s}$,最大日流量变幅超过了 $3000 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{d})$,为了匹配葛洲坝的反调节能力,调整削减了三峡出库流量日内变幅,使得生态调度全过程日均出库流量有一定的减少,造成葛洲坝电站的出力随水头降低而减少. 可见当三峡的出库流量水平处于 $18000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上时,葛洲坝存在较大弃水风险,需要牺牲梯级较少

的发电量来维持生态效益。

影响四大家鱼产卵繁殖的因素除了涨水条件,还与水温、清水下泄带来的产卵场地形改变,以及产卵场局部水动力条件等息息相关,本文侧重从水文角度,针对其中的涨水持续时间这一关键水文因子进行调度策略的优化研究,尝试营造近自然的小时尺度连续涨水过程,调度对刺激家鱼自然繁殖可能具有一定的局限性,实际效果有待实践检验。未来研究中,除了考虑水文因素外,还需要开展相关机理研究,探索四大家鱼自然繁殖与水温、水文、水动力因素的响应机制,建立综合考虑多重因素的优化调度策略。

5.2 生态调度优化策略的应用前景

对于鱼类而言,理想的水库生态调度是人工营造满足它们千百年进化形成的关键生命期的自然生态条件。例如,产漂流性卵鱼类产卵繁殖期需要持续多日的连续涨水刺激、产粘性卵鱼类产卵繁殖期需要河流水位相对稳定。以满足鱼类产卵的适宜水文过程为目标的生态调度,对于水库自身的调蓄能力有较高的要求,因此生态调度通常都以大型控制性水库为主导调控出流。目前的水库生态调度,受到水库运用方式影响,如水电站配合电网进行的负荷调峰调度,以及水库本身调节库容、运行水位、泄流能力等多种硬性约束条件制约,使得水库生态调度在具体执行时会出现某些时段悖于鱼类生态需求的出流方式,仅依靠单座控制性水库的调度难以在调度期全时段满足鱼类生态水文要求。

梯级水库开发中为了提高水利枢纽的综合效益,在控制性水库下游往往建有小型反调节水库。反调节水库一般为径流式电站,库容小,不承担电网调峰任务,主要通过下游水库水位流量的调控反馈作用上游大型控制性水库,对上游水库调峰发电的不稳定流进行再调节,以改善下游河道的水流条件。典型的“一库两级”梯级电站以三峡—葛洲坝为代表,还包括二滩—桐子林、丰满—永庆、天生桥一级—天生桥二级、景洪—橄榄坝等。充分发挥下游反调节水库的库容,通过精细化反调节调度,配合上游控制性水库的协同联合调度,为改善现有生态调度创造了可能,本文也论证了其可行性。利用不同策略的梯级协同生态调度可以针对不同鱼类产卵繁殖期的生态需求提供相应的水文水动力条件,例如营造下游河道小时尺度的连续涨水过程,减缓河道水位日内的陡涨陡落,优化分配机组出力运行方式改善产卵场水动力条件。同时梯级协同调度也在一定程度上统筹了水库综合效益,有效协调了生态目标与非生态目标的矛盾关系,减少了出力高峰期反调节水库的弃水风险,保证了反调节水库生态调度期的发电效益。可见,梯级水库中控制性水库与下游反调节水库这种上下游调节库容相差悬殊的“一库两级”组合,二者紧密的水力联系使得大多数情况下仅利用反调节水库的微小库容对现有生态调度进行小时尺度的精细调整即可大为改善下游鱼类生态水文条件,这突破了常规认识,可在其他“一库两级”式梯级水库生态调度实践中推广应用。

5.3 生态调度优化策略的适应性管理

由于水库来水流量、生物响应、电网出力需求的不确定性,梯级协同调度在具体操作层面上如何平衡生态效益与其他兴利效益需要通过适应性管理进行不断的改进再优化。未来适应性管理可关注以下几个方面问题:(1)当前四大家鱼自然繁殖的水流刺激机理与响应阈值尚未明晰,通过生态调度修复水库对鱼类的不利生态影响是个典型的不确定性难题,实践过程中应通过鱼类繁殖、水文、产卵场水动力条件等要素的跟踪监测,探索总结有效刺激鱼类繁殖的调度策略。(2)考虑到梯级水库间的水力联系,反调节调度计划要将反调节水库库尾的回水顶托影响纳入约束条件,避免梯级电站的总发电效益受损。(3)对于需要较长持续时间的生态调度,则需要协调上游控制性水库进行梯级间的联合调度,否则生态调度目标难以持续。(4)本文提出的生态调度优化策略频繁动用到反调节水库的库容,将使其库水位波动频率和幅度加剧。因此,倘若反调节水库的库区具有航运功能时,在生态调度期需要协调电网适当减少上游大型控制性水库的调峰容量,避免电网调峰与生态调度优化调整产生的不利非恒定流影响叠加,影响航运安全。

6 结论

生态调度是减缓水库不利生态影响的重要手段。以葛洲坝—三峡梯级水库生态调度试验为代表的中国水库生态调度实践已执行了10年10余场次。受水库不同运行方式影响,目前生态调度营造的水流条件会在局部时段出现与鱼类生态需求相悖的情况,有待优化改进。本文通过构建三峡—葛洲坝梯级水库联合调度模型,研究分析了梯级水库通过不同方式协调运行改善下游鱼类繁殖条件的可行性,并提出了如下生态

调度的优化调整策略:在当前大多数三峡水库生态调度出库流量控制方式下,可利用葛洲坝自身微小的反调节库容,采用策略1:削峰填谷,或采用策略2:在夜间20:00—24:00三峡水库调节电网谷时负荷减少出库流量的时段,维持一定的流量水平不变,而后再增加出库流量,可实现下游河道全生态调度期较为平滑的小时尺度连续涨水过程,同时可改善日流量上涨率、下游水位上涨率等四大家鱼产卵的生态水文指标,使涨水过程更为贴近四大家鱼产卵水文需求。此外,该调度策略还可一定程度增加发电出力,获得生态与经济共赢的良好成效。建议未来葛洲坝水库可积极采取这种调度策略优化当前生态调度方案。对于三峡出库流量偏大或者日内出库流量变幅剧烈的情况,由于葛洲坝调节库容有限,通过葛洲坝水库的反调节作用营造适合于四大家鱼产卵需求的连续涨水过程相对困难,需要三峡水库配合调节出库流量过程,可采取策略3:小幅度改变当前三峡水库生态调度出库流量、先形成三峡水库日尺度的持续涨水过程,再联合葛洲坝的反调节形成小时尺度的涨水过程。本文提出的对当前生态调度方式的优化策略,对于其他控制性水库与反调节水库这种上下游调节库容相差悬殊的“一库两级”式梯级水库,具有较好的推广应用前景,未来可在实践中检验其效果,并通过适应性管理进一步再优化。

7 参考文献

- [1] Frizell KH, Cohen E. Structural alternatives for TDG Abatement at Grand Coulee Dam feasibility design report. Denver: U. S., Bureau of Reclamation, 2000.
- [2] Witt A, Magee T, Stewart K *et al.* Development and implementation of an optimization model for hydropower and total dissolved gas in the mid-Columbia river system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, **143**(10): 04017063. DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000827.
- [3] Jacobson RB, Galat DL. Design of a naturalized flow regime—an example from the Lower Missouri River, USA. *Ecohydrology*, 2008, **1**(2): 81-104. DOI: 10.1002/eco.9.
- [4] Melis TS. Effects of three high-flow experiments on the Colorado River ecosystem downstream from Glen Canyon Dam, Arizona. US Geological Survey, Reston, VA, 2011.
- [5] Melis TS, Walters CJ, Korman J. Surprise and opportunity for learning in grand canyon: The glen canyon dam adaptive management program. *Ecology and Society*, 2015, **20**(3): art22. DOI: 10.5751/es-07621-200322.
- [6] Yao WW, Rutschmann P, Sudeep. Three high flow experiment releases from Glen Canyon Dam on rainbow trout and flannelmouth sucker habitat in Colorado River. *Ecological Engineering*, 2015, **75**: 278-290. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.11.024.
- [7] King AJ, Ward KA, Connor PO' *et al.* Adaptive management of an environmental watering event to enhance native fish spawning and recruitment. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(1): 17-31. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02178.x.
- [8] Zhang GH, Chang J, Shu GF. Applications of factor-criteria system reconstruction analysis in the reproduction research on grass carp, black carp, silver carp and bighead in the Yangtze River. *International Journal of General Systems*, 2000, **29**(3): 419-428. DOI: 10.1080/03081070008960949.
- [9] Wang JN, Li C, Duan XB *et al.* Variation in the significant environmental factors affecting larval abundance of four major Chinese carp species: Fish spawning response to the Three Gorges Dam. *Freshwater Biology*, 2014, **59**(7): 1343-1360. DOI: 10.1111/fwb.12348.
- [10] Li J, Xia ZQ. Study on instream ecological flow of the middle Yangtze River based on physical habitat simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(6): 678-684. [李建,夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究. 水利学报. 2011, **42**(6): 678-684.]
- [11] Yi YJ, Wang ZY, Yang ZF. Impact of the Gezhouba and Three Gorges Dams on habitat suitability of carps in the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 2010, **387**(3/4): 283-291. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.018.
- [12] Chen M. Effectiveness and suggestions of reservoir ecological regulation in the Yangtze River basin. *Technology and Economy of Changjiang*, 2018, **2**(2): 36-40. [陈敏. 长江流域水库生态调度成效与建议. 长江技术经济, 2018, **2**(2): 36-40.]
- [13] Zhou X, Wang K, Chen DQ *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 Full text replacement. *Journal of Fisheries of China*, 2019, **43**(8): 1781-1789. [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. 水产学

- 报, 2019, **43**(8): 1781-1789.]
- [14] Xu W, Yang Z, Chen XJ *et al.* Three gorges reservoir ecological operation effect on the spawning of the four major Chinese carps. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(5): 1129-1139.[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. 环境科学研究, 2020, **33**(5): 1129-1139.]
- [15] Li MZ, Duan ZH, Jiang W *et al.* Preliminary analysis on the diel drifting behavior of fish eggs and larvae in different sections of main stream of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(8): 957-962.[黎明政, 段中华, 姜伟等. 长江干流不同江段鱼卵及仔鱼漂流特征昼夜变化的初步分析. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(8): 957-962.]
- [16] Bai HX, Peng QD, 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. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, **12**(3): 249-257.[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动力条件研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, **12**(3): 249-257.]
- [17] Yu ZT, Zhou CS, Deng ZL *et al.* eds. The spawning grounds of the "four famous chinese carps" in the Changjiang River after dammed by the key water control project at Gezhouba. Beijing: Science Press, 1985: 2-5.[余志堂, 周春生, 邓中彝等. 葛洲坝水利枢纽工程截流后的长江四大家鱼产卵场. 北京: 科学出版社, 1985: 2-5.]
- [18] Yangtze River Fishery Resources Management Committee Office ed. Technical report of key station of fishery resources and environment monitoring system of the Three Gorges Project on the Yangtze River (2007-2009), 2009.[长江渔业资源管理委员会办公室. 长江三峡工程生态与环境监测系统渔业资源与环境监测重点站技术报告(2007-2009), 2009.]
- [19] Chen YB, Liao WG, Peng QD *et al.* A summary of hydrology and hydrodynamics conditions of four Chinese carps' spawning. *Journal of Hydroecology*, 2009, **30**(2): 130-133.[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. 水生态学杂志, 2009, **30**(2): 130-133.]
- [20] Peng QD. Impacts of four major Chinese Carps' natural reproduction in the middle reaches of Changjiang River by Three Gorges Project[Dissertation]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011.[彭期冬. 三峡工程对四大家鱼自然繁殖条件影响研究[学位论文]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011.]
- [21] Guo WX, Xia ZQ, Wang YK *et al.* Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(4): 554-559.[郭文献, 夏自强, 王远坤等. 三峡水库生态调度目标研究. 水科学进展, 2009, **20**(4): 554-559.]
- [22] Xu TB, Peng J, Li C. Influence of Gezhouba Dam on the eco-hydrological characteristics in the middle reach of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, **16**(1): 72-75.[徐天宝, 彭静, 李翀. 葛洲坝水利工程对长江中游生态水文特征的影响. 长江流域资源与环境, 2007, **16**(1): 72-75.]
- [23] Yan DD, Fan B, Chen DH *et al.* Study on influence of Gezhouba Project on downstream hydrological regime. *Pearl River*, 2018, **39**(1): 6-9.[闫东东, 樊博, 陈冬红等. 葛洲坝工程对下游河道水文情势影响研究. 人民珠江, 2018, **39**(1): 6-9.]
- [24] Yu MX, Li QF, Lu GB *et al.* Investigation into the Impacts of the Gezhouba and the Three Gorges Reservoirs on the flow regime of the Yangtze River. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, **18**(9): 1098-1106. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000545.
- [25] China Institute of Water Resources and Hydropower Research ed. Study on the environmental impact post-evaluation of Gezhouba Hydropower Project—Study on the impact post-evaluation of ecological hydrological elements. Beijing, 2020.[中国水利水电科学研究院. 葛洲坝水利枢纽工程环境影响后评价研究——生态水文学要素影响后评价研究. 北京, 2020.]
- [26] Wang HX, Chen DX, Li Y *et al.* Impact of Three Gorges reservoir on the downstream hydrology of Yangtze River. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(5): 1-6. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2018.05.001.[王鸿翔, 陈鼎新, 李越等. 三峡水库对坝下河流水文情势影响研究. 水生态学杂志, 2018, **39**(5): 1-6.]
- [27] Guo WX, Li Y, Zhuo ZY *et al.* Impact assessment of Three Gorges reservoir on hydrological regimes in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Water Power*, 2019, **45**(5): 22-27.[郭文献, 李越, 卓志宇等. 三峡水库对长江中下游河流水文情势影响评估. 水力发电, 2019, **45**(5): 22-27.]
- [28] Lu ZH, Ruan XZ, Lu BJ *et al.* Daily dispatching optimization model of Three Gorges cascade hydropower station and its

- application. *Dam Observation and Geotechnical Tests*, 2003, (4): 58-60.[路志宏, 阮喜珍, 卢本捷等. 三峡梯级水库日优化调度模型及应用. 水电自动化与大坝监测, 2003, (4): 58-60.]
- [29] Xu J, Hu CH, Wu ZN. Application study of discrete differential dynamic programming on the reservoir optimal operation. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2011, 34(4): 79-83.[徐嘉, 胡彩虹, 吴泽宁. 离散微分动态规划在水库优化调度中的应用研究. 气象与环境科学, 2011, 34(4): 79-83.]
- [30] Ban X, Diplas P, Shih W *et al.* Impact of Three Gorges Dam operation on the spawning success of four major Chinese carps. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 268-275. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.12.004.
- [31] Zhao Y, Zhou JZ, Xu K *et al.* Ecological operation of Three Gorges reservoir for protection of four major Chinese carps spawning. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2012, 44(4): 45-50. DOI: 10.15961/j.jsuese.2012.04.003.[赵越, 周建中, 许可等. 保护四大家鱼产卵的三峡水库生态调度研究. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(4): 45-50.]
- [32] Wang JN, Li C, Duan XB *et al.* Identification of significant environmental factors affecting fish abundance by genetic programming. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(7): 860-868.[王俊娜, 李翀, 段辛斌等. 基于遗传规划法识别影响鱼类丰度的关键环境因子. 水利学报, 2012, 43(7): 860-868.]
- [33] Wang SY, Liao WG, Chen DQ *et al.* Analysis of eco-hydrological characteristics of the four Chinese farmed carps' spawning grounds in the middle reach of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(6): 892-897.[王尚玉, 廖文根, 陈大庆等. 长江中游四大家鱼产卵场的生态水文特性分析. 长江流域资源与环境, 2008, 17(6): 892-897.]
- [34] Wang Y, Gao QH. Correlation analysis on hydrological processes and spawning behavior of Four Major Chinese Carps. *Yangtze River*, 2017, 48(6): 24-27.[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. 人民长江, 2017, 48(6): 24-27.]
- [35] Li C, Peng J, Liao WG. Study on the eco-hydrological factors and flow regime requirement on spawning of four major Chinese carps in the middle reaches of Yangtze River. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2006, 4(3): 170-176.[李翀, 彭静, 廖文根. 长江中游四大家鱼发江生态水文因子分析及生态水文目标确定. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(3): 170-176.]
- [36] Wang K, Zhou X, Chen DQ *et al.* Response relationship analysis on hydrological processes and spawning behavior of four major Chinese carps. *Freshwater Fisheries*, 2019, 49(1): 66-70.[王珂, 周雪, 陈大庆等. 四大家鱼自然繁殖对水文过程的响应关系研究. 淡水渔业, 2019, 49(1): 66-70.]
- [37] Peng QD, Liao WG, 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. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2012, 44(S2): 228-232. DOI: 10.15961/j.jsuese.2012.s2.041.[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. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(S2): 228-232.]
- [38] Duan XB, Chen DQ, Li ZH *et al.* Current status of spawning grounds of fishes with pelagic eggs in the middle reaches of the Yangtze River after impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, (4): 523-532.[段辛斌, 陈大庆, 李志华等. 三峡水库蓄水后长江中游产漂流性卵鱼类产卵场现状. 中国水产科学, 2008, (4): 523-532.]
- [39] Liang PT, Li JQ. A study of Three Gorges Reservoir ecological operation based on flood pulse duration. *China Rural Water and Hydropower*, 2017, (5): 150-154.[梁鹏腾, 李继清. 基于洪水脉冲历时的三峡水库生态调度研究. 中国农村水利水电, 2017, (5): 150-154.]