

优化中华鲟产卵场水动力环境的梯级 水库联合调度研究

王煜, 李金峰, 翟振男

(三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002)

摘要: 为保护中华鲟资源, 修复其产卵场水动力环境, 通过资料调查、数值模拟等方法, 明确三峡-葛洲坝梯级水库联合运行前后葛洲坝下中华鲟产卵场水动力环境演变趋势, 构建优化中华鲟产卵场水动力环境的梯级水库联合调度模型。对比分析2010年中华鲟产卵期(10—12月)梯级水库实际调度过程与优化调度, 得出结论: 三峡-葛洲坝联合优化调度方案在满足梯级水库常规调度目标的同时, 可有效提高中华鲟产卵场产卵适合度, 优化产卵场水动力环境, 增加中华鲟自然繁殖的概率, 有效保护中华鲟资源。

关键词: 梯级水库; 中华鲟; 数值模拟; 优化调度; 产卵适合度

中图分类号: TV697

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2020)01-0056-08

Research on joint operation of cascade reservoirs to optimize hydrodynamic environment for Chinese sturgeon spawning ground// WANG Yu, LI Jinfeng, ZHAI Zhennan (*College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*)

Abstract: A cascade reservoir joint operation model for optimizing the hydrodynamic environment of the Chinese sturgeon spawning ground was constructed to protect the Chinese sturgeon resources and restore the hydrodynamic environment of the spawning ground. The evolution trend of the hydrodynamic environment in the spawning ground downstream of the Gezhouba dam before and after the joint operation of the Three Gorges-Gezhouba cascade reservoirs was clarified by means of data investigation and numerical simulation. Through comparative analysis of the actual operation and optimal operation of the cascade reservoirs during the Chinese sturgeon spawning period in 2010 (Oct. to Dec.), it is concluded that the Three Gorges-Gezhouba joint optimal operation can effectively improve the Chinese sturgeon spawning fitness and can optimize the hydrodynamic environment of the spawning ground while meeting the conventional operation targets of the cascade reservoirs. The joint optimal operation can increase the natural breeding probability of the Chinese sturgeon and can effectively protect the Chinese sturgeon resources.

Key words: cascade reservoirs; Chinese sturgeon; numerical simulation; optimal operation; spawning fitness

中华鲟生理结构上既有古老软脊鱼的特征, 又有现代诸多硬骨鱼的特征, 被称为水生物中的活化石, 具有很高的科研价值^[1-3], 是我国一级保护动物。中华鲟是典型江海洄游性鱼类, 其性成熟后, 每年6—7月开始由海入江作生殖洄游, 繁殖期通常在每年的10月上旬到11月中旬。中华鲟历史产卵场分布在牛栏江以下的金沙江下游至涪陵以上的长江上游, 共约16处产卵场^[4]。葛洲坝水利工程建设, 阻隔了中华鲟的洄游通道, 中华鲟被迫在葛洲坝下游距大坝约4 km区域内形成新的产卵场^[5-6]。经过生物学习性的强制适应, 至今中华鲟在葛洲坝下产

卵场仍维持一定规模的自然繁殖活动。三峡-葛洲坝梯级水库的联合调度运行, 改变了葛洲坝下游河道的天然径流过程, 使葛洲坝下中华鲟产卵场水动力环境逐年变化, 加之新产卵场水域面积有限、人类活动频繁干扰等因素, 近些年中华鲟自然繁殖规模已经大幅度锐减, 甚至出现2013—2015年连续3年未检测到中华鲟自然繁殖活动现象。为此, 在满足三峡-葛洲坝梯级水库常规调度目标的同时, 如何有效保护和修复中华鲟产卵场水动力环境, 从而有效保护中华鲟资源, 是需要研究的课题。

生态调度是水库在实现防洪、发电、供水、灌溉、

基金项目: 国家自然科学基金(51409151); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金(KF2016-08)

作者简介: 王煜(1976—), 女, 教授, 博士, 主要从事大型水利水电工程对重要水生物资源的胁迫与修复方法以及水电站水力过渡过程研究。E-mail: wangyuhoney@163.com

航运等社会经济多种目标的前提下,兼顾河流生态系统需求的调度方式^[7-11]。水库生态调度通过优化调度方式来修复自然水文情势,以缓解其对自然水文情势的改变造成大坝上下游河流的生态环境问题。水库生态调度是近些年修复水生生物产卵栖息地水环境的有效措施之一。根据2005年大自然保护协会收集的国际上已进行和将要进行的53个国家855条河流上的水库生态调度信息,有一半以上的水库生态调度项目是为了改善水生生物特别是鱼类的栖息地水环境。这类水库生态调度一般是通过在鱼类的洄游期释放适合鱼类洄游的流量,并结合一定的过鱼设施帮助鱼类到达产卵地。也有一些专门针对鱼类繁殖的生态调度措施,有的是通过调整水库的泄流过程满足下游鱼类产卵期的生态需水量;有的是在鱼类的繁殖期,释放一场模拟自然水文情势的洪水过程,协助某些鱼类完成产卵活动。如美国大古力水坝(GCD)和哥伦比亚流域水库以充分满足溯河产卵鱼类种群的寻址需求为目标的调度,乌克兰德涅斯特罗夫水库进行自然保护而进行的调度,南非针对整个流域生态需水量而进行的生态调度等等。我国三峡水库也通过“人造洪峰”刺激长江“四大家鱼”繁殖产卵,取得了较好的调度效果^[12]。由此可见,优化水库调度方式可有效修复和改善下游鱼类产卵栖息地水环境,保护鱼类资源的可持续发展。然而,不同鱼类种群对其产卵栖息地水环境的需求不同,有效的水库生态调度必须在明确目标鱼种对产卵栖息地水环境需求的基础上,结合水库常规调度目标有针对性地进行优化调度。特别对受梯级水库联合调度影响的下游鱼类产卵栖息地,应充分研究各水库对目标鱼种产卵栖息地水环境的调度叠加效应。

葛洲坝下中华鲟产卵场水动力环境在三峡水库蓄水前后发生了相应变化,对中华鲟繁殖活动产生影响^[13]。为充分发挥三峡-葛洲坝梯级水库防洪、发电等巨大效益的同时修复中华鲟产卵栖息地水动力环境,有效保护中华鲟资源,本文以葛洲坝坝下4 km江段中华鲟现有产卵场所在水域为研究河段,对比三峡-葛洲坝梯级水库联合运行后葛洲坝下游中华鲟产卵场水动力环境逐年演变过程,分析水库联合调度对中华鲟产卵场水动力环境影响,提出优化中华鲟产卵场水动力环境的三峡-葛洲坝联合调度方案。

1 梯级水库联合调度下中华鲟产卵场水动力环境演变

1.1 产卵场水动力环境产卵适合度评价方法

根据中华鲟自然繁殖对产卵场流速、水深的水动力需求,利用河流内流量增量法(IFIM)构造中华

鲟产卵场产卵适合度评价模型^[14]。模型以产卵场产卵加权可利用面积 W_{UA} (以下用 W_{UA} 表示)评价研究河段水动力环境对于中华鲟自然繁殖的适合程度。 W_{UA} 越高,说明研究河段适合中华鲟自然繁殖的水域面积越大,中华鲟自然繁殖的概率越高。评价中华鲟产卵场水动力环境对其产卵适合度的 W_{UA} 值是将研究河段各计算单元影响因子组合适宜值 CSF (以下用 C_{SF} 表示)与单元面积的乘积进行累加得到。影响因子适宜值表示影响因子对中华鲟自然繁殖的适合程度,为0~1之间的数值,最适宜中华鲟产卵的因子为1,最不适宜的为0。因此单元影响因子组合值为0~1之间的数值,其值越大表明研究区域各研究因子越适宜中华鲟产卵。本文采用计算单元平均流速和水深作为影响中华鲟自然繁殖的水动力因子,各计算单元的适宜值根据中华鲟产卵流速、水深适宜度曲线^[15]得到;以 C_{SF} 值大于0.6作为判别计算单元水动力微生境条件满足中华鲟自然繁殖的条件。

$$W_{UA} = \sum_{i=1}^n C_{SF}(v_i, D_i) F_i \quad (1)$$

$$C_{SF}(v_i, D_i) = v_i D_i \quad (2)$$

式中: v_i 为 i 单元流速适宜值; D_i 为 i 单元水深适宜值; F_i 为 i 单元在水平面上的投影面积。

1.2 产卵场水动力环境演变

三峡-葛洲坝梯级水库的联合调度改变了下游河道的天然径流过程,造成位于葛洲坝坝下的中华鲟产卵场江段相应的水深、水温、流速、含沙量等水质及水动力因子较天然河道发生了一定的变化,对中华鲟自然繁殖造成影响,使其产卵时间推迟、产卵次数减少^[16]。中华鲟研究所对中华鲟的声纳跟踪监测表明,1998年中华鲟亲鲟数量比1997年减少了47.2%,2000年比1999年减少了39.9%,2001—2008年亲鲟数量变动较小,但产卵量有较大降低,2013—2015年连续3年在葛洲坝下中华鲟产卵江段没有监测到自然产卵行为的发生。

为深入分析三峡-葛洲坝梯级水库联合运行对葛洲坝下中华鲟产卵江段水动力环境的影响机理,本文采用三维浅水方程构建葛洲坝下4 km江段中华鲟产卵场三维水动力数值模型^[17]。研究区域见图1。

上游边界取据葛洲坝坝轴线下游约270 m处,下游边界取宜昌水文站所在位置江段。为研究大坝不同运行工况下适合中华鲟产卵的水域面积及具体位置,将计算域沿纵向(沿水流方向)均分为8个区,以I~VIII表示,沿横向(垂直水流方向)分为4个区,以A、B、C、D表示。选用2006—2010年三

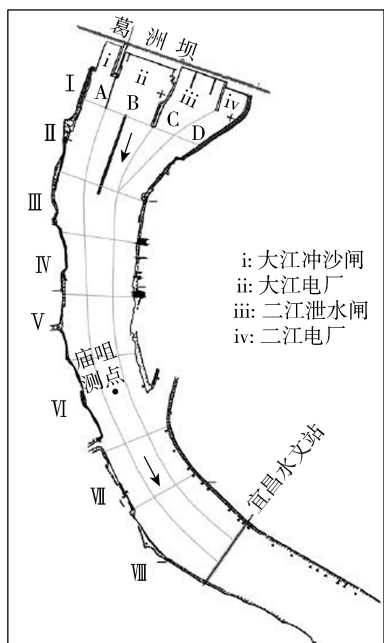


图1 葛洲坝下中华鲟产卵场研究区域

峡水库坝前蓄水位逐年从156 m提升至水库正常蓄水位175 m的5年作为梯级水库联合运行下中华鲟能够自然繁殖的典型年,并根据中华鲟研究所每年监测到的中华鲟实际产卵日进行产卵场水动力数值反演计算。由于2013—2015年连续3年葛洲坝下产卵场未监测到中华鲟产卵,且该3年三峡-葛洲坝同期调度及葛洲坝下产卵场水文过程相似,故选用2014年为梯级水库联合运行下未监测到中华鲟自然繁殖的典型年,并对该年中华鲟产卵期(10—12月)产卵场满足中华鲟产卵水温(16.0~20.6℃)^[18]的时段(11-10—12-30),以10 d为计算时段间隔,进行可能产卵日中华鲟产卵场水动力数值反演计算(图2)。

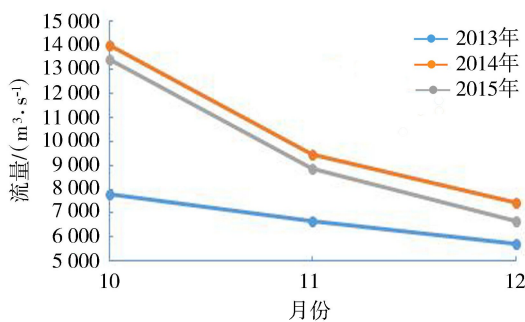


图2 产卵期未监测到中华鲟自然繁殖年份葛洲坝出库流量对比

结果得出:①2006—2010年虽然中华鲟产卵规模、产卵时间和产卵时葛洲坝下泄流量不同,但其实际产卵日产卵江段流速和水深分布极为相似,仅2008年由于下泄流量较大,产卵江段流速值整体偏高。②2014年中华鲟可能产卵日流速分布与2006—2010年中华鲟实际产卵日流速分布虽整体近似,但2014年研究区域流速值普遍偏高,特别是在下产卵场

区域(纵向Ⅲ~Ⅳ,横向B区)。③2014年中华鲟可能产卵日产卵场水深分布与2006—2010年中华鲟实际产卵日水深分布无明显差异。④2006—2010年中华鲟实际产卵日产卵场水动力适宜值 C_{SF} 大于0.6的区域主要位于产卵场Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ、Ⅴ区,而2014年中华鲟可能产卵日(11月10日至12月30日)主要集中在Ⅳ、Ⅴ区,其分布状态与2006~2010年有较大的不同,在Ⅰ区没有出现水动力适宜值大于0.6的区域(图3)。

根据中华鲟研究所中华鲟产卵监测报告,2006—2010年在产卵场Ⅰ区都能监测到中华鲟有产卵行为发生,然而产卵场Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ区只有在2006—2008年监测到产卵行为,说明中华鲟更青睐在上产卵区(Ⅰ区)进行产卵,然而2014年在该区域并没有出现适宜其产卵的水动力条件,这可能是造成该年没有监测到中华鲟自然繁殖的原因之一。另外,除2008年外,2006—2010年中华鲟实际产卵日^[19]及2014年可能产卵日,中华鲟产卵场 W_{UA} 值都小于 0.7 km^2 (图4),即满足中华鲟产卵所需水动力环境的面积不足产卵场总面积的12%,产卵场产卵适合度偏低,这大大降低了中华鲟产卵概率。可见,三峡-葛洲坝梯级水库的调度运行对中华鲟的自然繁殖造成了一定影响。因此,通过优化三峡-葛洲坝梯级水库^[20]联合调度方式,优化三峡水库下泄流量及葛洲坝水库泄流方式,可改善葛洲坝下游中华鲟产卵江段水动力条件,特别是葛洲坝下游近坝区中华鲟上产卵场水动力分布^[15],提高产卵场水动力环境对中华鲟自然繁殖的适合度,从而提高中华鲟自然繁殖概率。

2 优化中华鲟产卵场水动力环境的三峡-葛洲坝联合调度

为提高产卵期葛洲坝下中华鲟产卵场水动力分布对中华鲟产卵的适合程度,构建以优化三峡水库下泄流量与葛洲坝水库泄流方式相结合的三峡-葛洲坝梯级水库联合优化调度模型,以葛洲坝下中华鲟产卵场产卵加权可利用面积作为中华鲟产卵适合度对优化调度后的水动力分布进行评价。

2.1 三峡-葛洲坝联合优化调度模型

优化中华鲟产卵场水动力环境的三峡-葛洲坝联合调度是针对中华鲟产卵期(10—12月)满足梯级水库同期常规调度目标的基础上对葛洲坝坝下中华鲟产卵场水动力环境进行优化的多目标梯级水库短期调度。由于中华鲟产卵期(10—12月)三峡-葛洲坝梯级水库常规调度主要以发电调度、航运调度、供水调度为主要目标,因此梯级水库联合优化调度

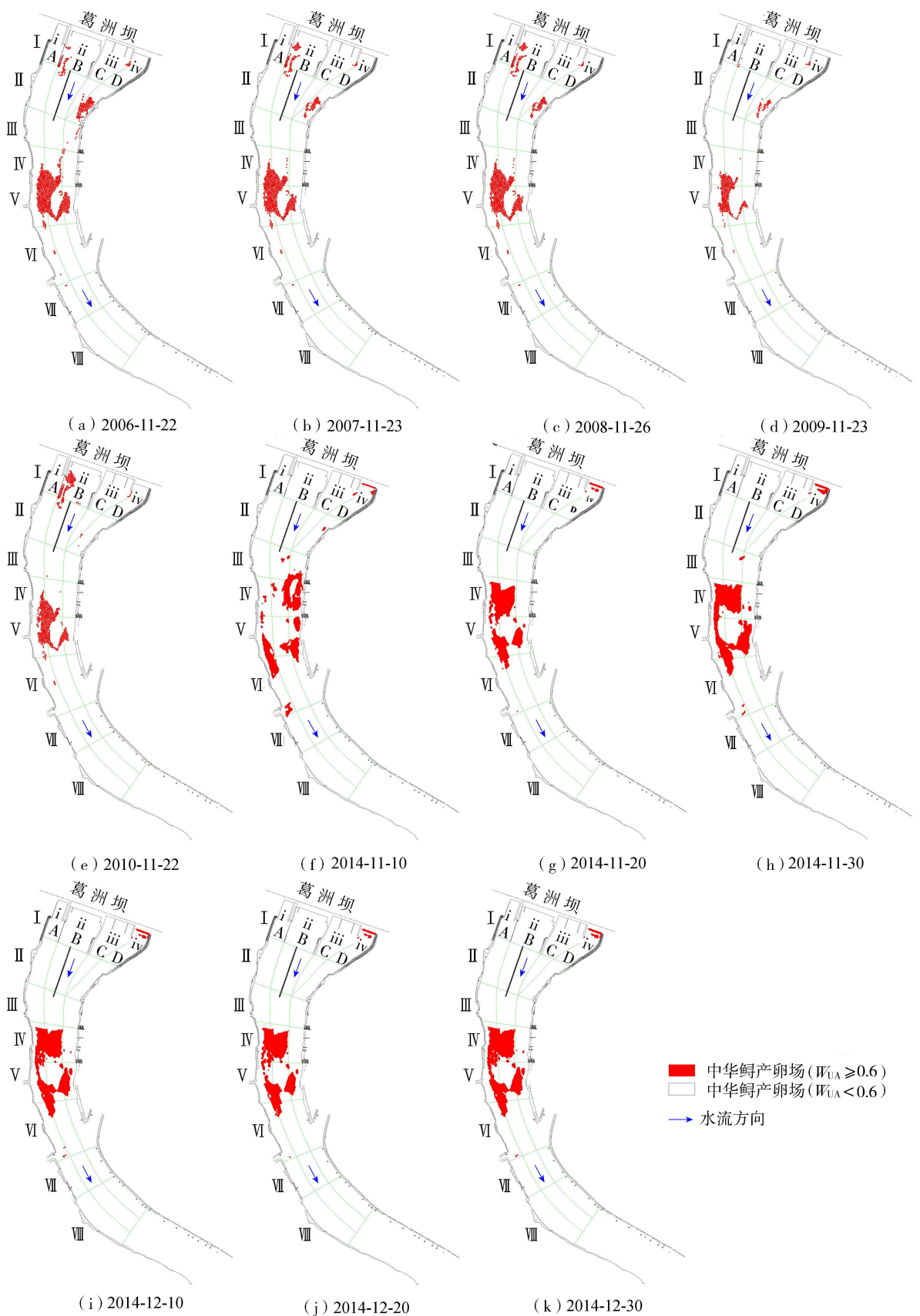


图3 2006—2014年中华鲟产卵场产卵适合度大于0.6的区域分布

模型以三峡电厂、葛洲坝电厂总发电量最大及葛洲坝下中华鲟产卵场产卵适合度最大为优化调度目标,以三峡水库下泄流量、葛洲坝泄流方式(大江电

厂、二江电厂、二江泄水闸下泄流量)为优化变量,同时以满足水库上下游河段航运及供水需求而构建的中华鲟产卵期(10—12月)梯级水库短期优化调

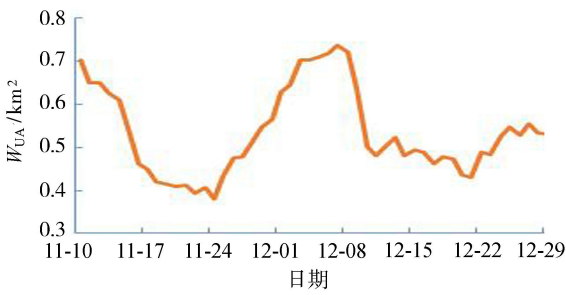


图4 2014年中华鲟可能产卵日 W_{UA} 值

度模型。

2.1.1 目标函数

中华鲟产卵期为三峡水库蓄水运行期,三峡-葛洲坝梯级水库效益主要为发电效益、航运效益和水资源利用效益,故梯级水库优化调度以三峡及葛洲坝电厂发电效益最大、中华鲟产卵场产卵适合度(即产卵加权可利用面积)最大为多重目标。

$$E_1 = \max \sum_{t=1}^T AH_t Q_t \Delta t$$

$$E_2 = \max \sum_{t=1}^T N_t \Delta t$$

$$W_{UA} = \max \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{20} W_{2(i)} f \left[\sum_{j=1}^3 (W_{1(i,j)} x_{(j)} + T_{\text{heta1}(i)}) \right] + T_{\text{heta2}} \right\} \quad (3)$$

式中: E_1 为调度时段内三峡水电站总发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; A 为三峡水轮机出力系数; Q_t 为 Δt 时段的三峡水电厂发电流量, m^3/s ; H_t 为 t 时段水轮机工作水头, m ; E_2 为调度时段内葛洲坝水电厂总发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; N_t 为 Δt 时段葛洲坝水电厂水轮机总出力; $x_{(1)}, x_{(2)}, x_{(3)}$ 分别为标准化后的葛洲坝大江电厂发电泄流量、二江电厂发电泄流量和二江泄水闸弃水泄流量,葛洲坝总下泄流量 $Q = x_{(1)} + x_{(2)} + x_{(3)}$; $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ 为BP神经网络模型基函数采用的S形函数; $W_1, W_2, T_{\text{heta1}}, T_{\text{heta2}}$ 分别为输入层到隐含层、隐含层到输出层的权值矩阵和阈值,详见文献[19]。 T 为计算时段总数, $T=92$; Δt 为时段长度, $\Delta t=24 \text{ h}$ 。

2.1.2 约束条件

优化葛洲坝下中华鲟产卵场水动力环境的三峡-葛洲坝联合优化调度模型,以中华鲟产卵期(10—12月)三峡及葛洲坝水库需发挥的水库效益及中华鲟产卵对水环境的需求作为约束条件考虑,其约束条件包括水量平衡约束、航运上游水位约束、葛洲坝水库航运上游水位变幅约束、水库下泄流量约束、水电站水轮机工作水头约束、葛洲坝下游航运最低水位约束。

a. 水量平衡约束。包括三峡水库水量平衡约

束和葛洲坝水库水量平衡约束:

$$(S_{1t} - Q_{1t}) \Delta t = V_{1(t+1)} - V_{1t} \quad (4)$$

$$(S_{2t} - Q_{2t}) \Delta t = V_{2(t+1)} - V_{2t} \quad (5)$$

式中: S_{1t} 为 t 时段三峡水库入库流量; Q_{1t} 为 t 时段三峡水库出库流量; Δt 为计算时段; $V_{1(t+1)}$ 为 $t+1$ 时段三峡水库库容; V_{1t} 为 t 时段三峡水库库容; S_{2t} 为 t 时段葛洲坝水库入库流量; Q_{2t} 为 t 时段葛洲坝水库出库流量; $V_{2(t+1)}$ 为 $t+1$ 时段葛洲坝水库库容; V_{2t} 为 t 时段葛洲坝水库库容。

b. 航运上游水位约束。包括三峡水库调度期上游水位航运约束和葛洲坝水库调度期上游水位航运约束:

$$Z_{S(1\min)} < Z_{S(1t)} < Z_{S(1\max)} \quad (6)$$

$$Z_{S(2\min)} \leq Z_{S(2t)} \leq Z_{S(2\max)} \quad (7)$$

式中: $Z_{S(1\min)}$ 为调度期三峡水库上游最小通航水位,为164 m; $Z_{S(1t)}$ 为 t 时段三峡水库上游水位; $Z_{S(1\max)}$ 为调度期三峡水库上游最高通航水位,为175 m; $Z_{S(2\min)}$ 为葛洲坝水库上游最小通航水位,为62.5 m; $Z_{S(2t)}$ 为 t 时段葛洲坝水库上游库水位; $Z_{S(2\max)}$ 为葛洲坝上游最大通航水位,66.5 m。

c. 葛洲坝水库航运上游水位变幅约束。

$$|Z_{S2(t+1)} - Z_{S2t}| < \Delta Z_{2\max} \quad (8)$$

式中: $\Delta Z_{2\max}$ 为葛洲坝水库航运允许上游水位最大变幅,为保证航运葛洲坝水库上游水位最大日变幅应小于3.0 m。

d. 水库下泄流量约束。包括调度期三峡水库下泄流量约束和调度期葛洲坝水库下泄流量约束。

调度期三峡水库下泄流量约束:优化调度以中华鲟产卵期(10—12月)为调度期,其为三峡水库蓄水期,常规调度需满足下游供水及水库蓄水至175 m蓄水要求,其中供水最小下泄流量为5000 m^3/s ,蓄水期水库最大下泄流量为17000 m^3/s 。三峡水库下泄流量为葛洲坝入库流量,由于葛洲坝水库调节能力较弱,为满足葛洲坝下中华鲟产卵场对下泄流量的需求,三峡水库下泄流量受中华鲟产卵生态流量限制。根据本文作者相关研究得出^[15],中华鲟产卵所需生态流量为9600~15000 m^3/s 。综合调度期三峡水库常规调度需求与中华鲟产卵需求得出其水库下泄流量约束为

$$Q_{s(\min)} < Q_{s(t)} < Q_{s(\max)} \quad (9)$$

式中: $Q_{s(\min)}$ 为调度期三峡水库最小下泄流量,以满足中华鲟产卵所需最小生态流量为约束,取9600 m^3/s ; $Q_{s(t)}$ 为 t 时段三峡水库下泄流量(出库流量); $Q_{s(\max)}$ 为调度期三峡水库最大下泄流量,以满足中华鲟产卵所需最大生态流量为约束,取15000 m^3/s 。

调度期葛洲坝水库下泄流量约束:调度期葛洲坝水库下泄流量需保证下游最低通航水位需求及下游供水最小下泄流量需求,最大下泄流量受葛洲坝泄水建筑物最大下泄流量限制。由于葛洲坝下泄流量基本取决于三峡水库的下泄流量,三峡水库下泄流量考虑了中华鲟产卵需求,葛洲坝水库下泄流量仅受常规调度的约束。故调度期葛洲坝下泄流量约束为

$$Q_{g(\min)} \leq Q_{g(t)} \leq Q_{g(\max)} \quad (10)$$

式中: $Q_{g(\min)}$ 为调度期葛洲坝满足下游最低通航水位的最小下泄流量,为 $5\,057\text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{g(t)}$ 为 t 时段葛洲坝水库下泄流量(出库流量); $Q_{g(\max)}$ 为葛洲坝水库最大下泄流量($101\,835\text{ m}^3/\text{s}$)。

e. 水电站水轮机工作水头约束。包括调度期三峡水电站水轮机出力约束和调度期葛洲坝水电站水轮机出力约束。

调度期三峡水电站水轮机出力约束:

$$N_{\text{saver}} \geq N_{\text{sb}} \quad (11)$$

式中: N_{saver} 为调度期的三峡水电站平均出力,kW; N_{sb} 为调度期三峡水电站保证出力,kW。根据三峡水库调度规程,三峡水电站保证出力为499万kW。

调度期葛洲坝水电站水轮机出力约束:

$$N_{N(g)} \leq N_{g(t)} \leq N_{T(g)} \quad (12)$$

式中: $N_{N(g)}$ 为葛洲坝电站水轮机技术最小出力; $N_{g(t)}$ 为 t 时段葛洲坝水电站水力发电机组总出力; $N_{T(g)}$ 为葛洲坝电站水轮机限制最大出力,与水轮机工作水头有关。

f. 葛洲坝下游航运最低水位约束。

$$Z_{L(g)} \geq Z_{L(g\min)} \quad (13)$$

式中: $Z_{L(g\min)}$ 为葛洲坝下游航运要求最低水位,本文采用葛洲坝坝下庙咀水位 39.0 m 控制; $Z_{L(g)}$ 为 t 时刻葛洲坝下游水位。

2.1.3 求解方法

调度模型选择三峡水库水位及葛洲坝水库水位为状态变量,三峡大坝日下泄流量及葛洲坝日下泄流量为决策变量,其中葛洲坝日下泄流量由各泄水建筑物(大江电厂发电泄水量、二江电厂发电泄水量、二江泄水闸弃水泄水量)泄水量总和形成。模型总调度时段为92 d(10—12月)。模型多目标函数采用理想点法转化为单目标函数进行求解,调度模型采用逐步优化算法(progressive optimization algorithm, POA)^[21]进行求解,其中理想点采用相同上游来流量条件下,三峡电厂发电量最大值 $E_{1\max}$,相同葛洲坝下泄流量条件下葛洲坝电厂发电量最大值 $E_{2\max}$,中华鲟产卵场产卵适合度最大值 $W_{\text{UA}\max}$ 。然后采用复合形优化方法进行优化求解。

$$g(W_{\text{UA}t}, E_{1t}, E_{2t}) =$$

$$\min \sqrt{\left(\frac{W_{\text{UA}t} - W_{\text{UA}\max}}{W_{\text{UA}\max}}\right)^2 + \left(\frac{E_{1t} - E_{1\max}}{E_{1\max}}\right)^2 + \left(\frac{E_{2t} - E_{2\max}}{E_{2\max}}\right)^2} \quad (14)$$

式中: $W_{\text{UA}t}$, E_{1t} , E_{2t} 分别为 t 时段葛洲坝下中华鲟产卵场产卵适合度、三峡电厂发电量和葛洲坝电厂发电量。

2.2 三峡-葛洲坝联合优化调度实例

由于2010年为三峡水库正常蓄水至175 m及采用常规调度的年份,故采用该年中华鲟产卵期(10—12月)三峡-葛洲坝梯级水库实测来流过程作为实际算例代入构建的三峡-葛洲坝联合优化调度模型进行求解,得出优化葛洲坝下中华鲟产卵场产卵水动力环境的三峡-葛洲坝联合调度方式,并将优化结果与梯级水库实际调度过程进行比较分析。结果表明:

a. 中华鲟产卵期(10—12月)采用三峡-葛洲坝联合优化调度可使三峡水库在蓄水期提前约10 d将水位蓄到175 m,且水库水位在调度期保持较长时间的稳定(图5)。

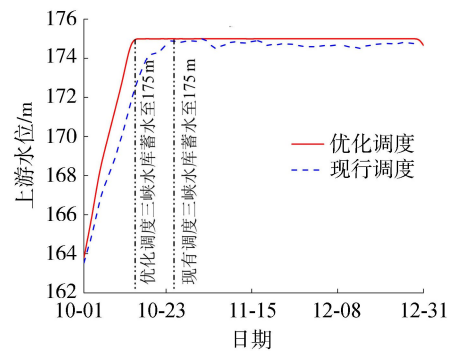


图5 2010年调度期三峡水库水位过程对比

b. 优化调度前后三峡水库出库流量相差不大(优化调度期累计多下泄 $20\,610\text{ m}^3/\text{s}$),且优化调度下泄流量在三峡电厂下泄流量范围内,故优化调度可比现有调度增加三峡电厂发电泄流量(图6);调度期葛洲坝水库优化调度后总出库流量较现有调度略为增加(累计增加下泄流量 $66\,704\text{ m}^3/\text{s}$)(图6),优化调度后葛洲坝电厂总发电量较现有调度增加 $2\,500\,889.2\text{ MW}\cdot\text{h}$ (图7),可见优化调度方式葛洲坝加大下泄流量满足中华鲟产卵需求的同时也增加了电厂的发电效益。

c. 由于中华鲟产卵期在三峡水库蓄水运行调度期内,在上游入库流量相同的情况下,采用三峡-葛洲坝联合优化调度,三峡水库蓄水过程与现有调度不同,其为前快后慢的过程,即蓄水初期三峡水库出库流量大幅度减小,使库上水位迅速蓄至最高蓄水位,在蓄水后期(11月末至12月)葛洲坝下中华鲟产卵场水温满足中华鲟产卵需求时增加下泄流

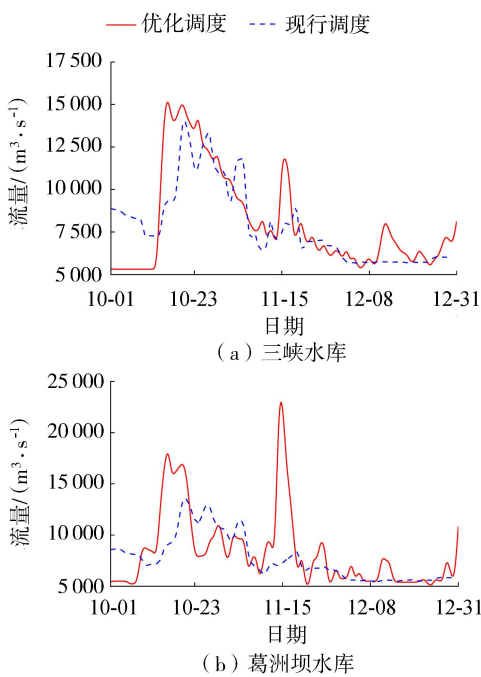


图6 2010年调度期三峡水库及葛洲坝出库流量对比

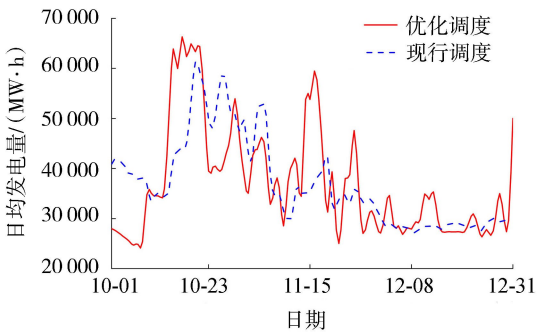


图7 2010年调度期葛洲坝日均发电量对比

量,以满足中华鲟产卵对流量的需求。根据优化调度前后葛洲坝水库出库流量过程对比图(图6)。可见,由于优化调度下三峡水库在中华鲟可能产卵期(11月末至12月)加大了下泄流量,蓄水能力弱的葛洲坝水库同期也加大了出库流量,这对葛洲坝下中华鲟产卵场满足中华鲟产卵对于流量的需求是十分有利的。

d. 调度期,优化调度下葛洲坝下泄流量在各主要泄水建筑物(大江电厂发电泄流量、二江电厂发电泄流量、二江泄水闸泄流量)的分配过程较现有调度有不同,优化调度将下泄流量主要分配在大江电厂进行发电泄流,同时局部时段增加了二江泄水闸的下泄流量,特别是在中华鲟可能产卵时段(11月末至12月)大江电厂发电泄流量明显大于现有调度,从而改变葛洲坝下中华鲟产卵场的水动力分布,增加中华鲟产卵适合度^[21]。

e. 采用三峡-葛洲坝梯级水库优化联合调度后,葛洲坝下中华鲟产卵场产卵适合度较现有调度增加了2500889.2 m²(图8),即适合中华鲟产卵的

水域面积较现有调度增加了2.16%,且主要在产卵场江段水温适合中华鲟产卵的11月底至12月,极大增加中华鲟产卵场适合度,优化了中华鲟产卵生境,可提高中华鲟在产卵场产卵的概率。

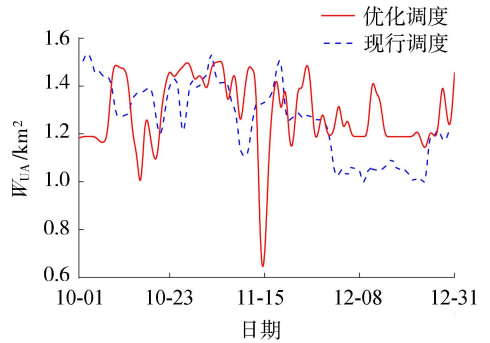


图8 2010年调度期葛洲坝下中华鲟产卵场产卵适合度对比

3 结语

在满足中华鲟产卵水温需求的可能产卵期(11月末至12月),联合优化调度方式可在满足了梯级水库同期常规调度要求的基础上有效提高产卵场产卵适合度,增大了梯级水库运行综合效益,有利于中华鲟的自然繁殖。然而,中华鲟的自然繁殖除了受产卵场的水动力环境影响以外,还可能受其他诸多因素的协同作用,如水下地形、底质、水温变化过程、水质及船舶活动等等,因此除采用优化梯级水库的联合调度方式优化产卵场水动力环境以外,还应同时采用其他多样化手段和措施补偿和重建中华鲟天然产卵场,促进中华鲟的自然繁殖。

参考文献:

- [1] YUAN Y C, YANG H J, GONG S Y, et al. Effects of feeding levels on growth performance, feed utilization, body composition and apparent digestibility coefficients of nutrients for juvenile Chinese sucker, *Myxocyprinus asiaticus* [J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41 (7): 1030-1042.
- [2] GAN F, DU H, WEI Q, et al. Evaluation of the ecosystem values of aquatic wildlife reserves: a case of Chinese Sturgeon Natural Reserve in Yichang reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, 27(2): 376-382.
- [3] ZHOU G, GUI L, LI Z Q, et al. Establishment of a Chinese sturgeon *acipenser sinensis* tail-fin cell line and its susceptibility to frog iridovirus [J]. *Journal of Fish Biology*, 2008, 73(8): 2058-2067.
- [4] YANG D, KYNARD B, WEI Q, et al. Distribution and movement of Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, on the spawning ground located below the Gezhouba Dam during spawning seasons [J]. *Journal of Applied Ichthyology*,

- [5] 余志堂,李万洲. 葛洲坝枢纽下游发现了中华鲟产卵场[J]. 水库渔业, 1983(1): 2. (YU Zhitang, LI Wanzhou, The Chinese sturgeon spawning ground were found in Gezhouba downstream[J]. Reservoir Fisheries, 1983(1): 2. (in Chinese))
- [6] 胡德高,柯福恩,张国良,等. 葛洲坝下中华鲟产卵场的第二次调查[J]. 淡水渔业, 1985(3): 22-24. (HU Degao, KE Fuen, ZHANG Guoliang, et al. The second investigation on the spawning ground of Chinese Sturgeon down Gezhouba Dam [J]. Freshwater Fisheries, 1985(3): 22-24. (in Chinese))
- [7] 毛劲乔,戴会超. 重大水利水电工程对重要水生生物的影响与调控[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(3):240-245. (MAO Jingqiao, DAI Huichao. Effects of large water conservancy and hydropower projects on major aquatic species and regulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(3): 240-245. (in Chinese))
- [8] 许兴武,沃玉报,胡阳,等. 秦淮河水质改善现场调水试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 492-496. (XU Xingwu, WO Yubao, HU Yang, et al. Field water diversion tests of water quality improvement in Qinhuai River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6):492-496. (in Chinese))
- [9] 王立明,徐宁,高金强. 基于干旱河道生态修复的岳城水库生态调度[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 32-37. (WANG Liming, XU Ning, GAO Jinqiang. Ecological operation of Yuecheng Reservoir based on ecological restoration of arid river[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6):32-37. (in Chinese))
- [10] 许益新,王文才,曾伟峰,等. 调水引流改善平原河水环境质量模拟[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 70-75. (XU Yixin, WANG Wencai, ZENG Weifeng, et al. Simulation on improvement of water environment in plain river network by water diversion [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1):70-75. (in Chinese))
- [11] 邹家祥,翟红娟. 三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 136-140. (ZOU Jiaxiang, ZHAI Hongjuan. Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5):136-140. (in Chinese))
- [12] 陈庆伟,刘兰芬,刘昌明. 筑坝对河流生态系统的影响及水库生态调度研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(5): 578-582. (CHEN Qingwei, LIU Lanfen, LIU Changming. Impacts of dam construction on ecosystem and dispatches of ecological water[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2007, 43(5):578-582. (in Chinese))
- [13] 骆辉煌. 中华鲟繁殖的关键因子及适应性研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2013.
- [14] 王煜. 中华鲟繁殖需求的生态水力学机制及其生态调度问题研究[D]. 南京:河海大学, 2012.
- [15] 王煜,戴会超. 中华鲟产卵场适合度与大坝泄流相关性分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(4): 64-70. (WANG Yu, DAI Huichao. Correlation analysis of Chinese sturgeon spawning ground suitability and dam discharge [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4):64-70. (in Chinese))
- [16] XIAO H, DUAN Z H. Hydrological and water chemical factors in the Yichang reach of the Yangtze River pre-and post-impoundment of the Three Gorges Reservoir: consequences for the Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* spawning population (a perspective) [J]. Journal of Applied Ichthyology, 2011, 27(2): 387-393.
- [17] 王煜,戴会超,戴凌全. 三峡蓄水运行后中华鲟产卵场水动力特性分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 122-126. (WANG Yu, DAI Huichao, DAI Lingquan. Hydrodynamic characteristics analysis of Chinese sturgeon spawning ground after operation of Three Gorges Project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 122-126. (in Chinese))
- [18] 杨德国,危起伟,陈细华,等. 葛洲坝下游中华鲟产卵场的水文状况及其与繁殖活动的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 862-869. (YANG Deguo, WEI Qiwei, CHEN Xihua, et al. Hydrology status on the spawning ground of *Acipenser sinensis* below the Gezhouba Dam and its relation to the spawning run [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 862-869. (in Chinese))
- [19] 王煜,戴会超,王冰伟,等. 优化中华鲟产卵生境的水库生态调度研究[J]. 水利学报, 2013, 44(3): 319-326. (WANG Yu, DAI Huichao, WANG Bingwei, et al. Study of the eco-scheduling for optimization Chinese sturgeon spawning habitats [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(3): 319-326. (in Chinese))
- [20] 许栋,张博曦,及春宁,等. 梯级水库对南渡江干流底栖动物丰枯水期沿程变化的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 60-66. (XU Dong, ZHANG Boxi, JI Chunqing, et al. Streamwise variation of zoobenthos along main stream of Nanduijiang River in wet and dry seasons under influence of cascade reservoirs [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):60-66. (in Chinese))
- [21] 黄云燕. 水库生态调度方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2008.

(收稿日期:2018-12-28 编辑:彭桃英)

