

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 Huichao, MAO Jingqiao, JIANG Dingguo. Research progress of water-sediment and ecological environment control of large hydropower projects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(5): 118-125.

# 大型水利水电工程水沙生态环境调控研究进展

戴会超<sup>1</sup>, 毛劲乔<sup>2</sup>, 蒋定国<sup>1</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**【目的】我国已建成三峡、溪洛渡、向家坝等大型水利水电工程, 具有防洪、发电、航运、水资源配置等巨大综合效益, 但同时也会使上下游水沙情势发生改变, 造成水库富营养化及水华、通江湖泊与河口生态环境变化、鱼类洄游通道阻隔及鱼类生境胁迫等问题。为了明晰大型水利水电工程水沙生态环境调控的研究进展与发展趋势, 【方法】系统阐述了水利水电工程影响下河流上下游典型水沙、水环境与水生态等问题的内在机理, 重点分析了水利水电工程水沙生态环境调控的主要理论与关键技术。【结果】结果表明, 水利水电工程水沙生态环境调控是保障流域水生态环境安全的重大需求, 但以往较缺乏系统性的理论方法与核心技术支撑。【结论】需要通过多学科交叉和多技术手段, 研究关键科学问题, 突破卡脖子技术, 为水利水电工程影响下的流域生态环境安全提供保障。

**关键词:** 水利水电工程; 生态环境; 水沙; 鱼类; 调控

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.05.011

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV145

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2023)05-0118-08



## Research progress of water-sediment and ecological environment control of large hydropower projects

DAI Huichao<sup>1</sup>, MAO Jingqiao<sup>2</sup>, JIANG Dingguo<sup>1</sup>

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, Hubei, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

**Abstract:** [Objective] China has built many large hydropower projects such as Three Gorges, Xiluodu and Xiangjiaba projects, with comprehensive benefits of flood control, power generation, shipping, water resources allocation, etc. However, they also change the flow and sediment situation upstream and downstream of dams, resulting in eutrophication and algal blooms of reservoirs, eco-environmental change of river-connected lakes and estuaries, obstruction of fish migration and fish habitat stress. To clarify the research progress and trend of water-sediment and ecological environment regulation of large hydropower projects, [Methods] the paper systematically expounds the mechanism of typical problems of water-sediment, water environment and water ecology in upper and lower reaches under the influence of hydropower projects, and analyzes the main theories and key technologies of water-sediment and eco-environmental regulation. [Results] It is shown that the regulation of hydropower projects is an important demand to ensure the safety of water ecology and environment in basins, and there was a lack of systematic theoretical methods and key technical support in the past. [Conclusion] It is necessary to study key scientific problems and technologies

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2022-08-21; 录用日期: 2022-09-13; 网络出版日期: 2022-11-19

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目资助(202003251)

作者简介: 戴会超(1965—), 男, 正高级工程师, 首席专业师, 博士, 主要从事水利水电工程生态环境调控研究。E-mail: dai\_huichao@ctg.com.cn

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

through interdisciplinary and multi-technical means, so as to provide guarantee for the safety of water ecology and environment in basins under the influence of hydropower projects.

**Keywords:** hydraulic and hydropower projects; ecological environment; runoff and sediment; fish; regulation

## 0 引言

大型水利水电工程具有防洪抗旱、能源保障、航运、水资源调配等综合效益,是我国经济社会可持续发展的基础保障。作为洪涝灾害频繁、水资源与能源资源短缺的国家,加快具有防洪、发电、供水、航运等综合效益的大型水利水电工程建设的步伐,是我国经济社会可持续发展的必然需求<sup>[1]</sup>。我国已建成各类水库 98 795 座,成为世界上筑坝数量最多的国家。长江流域水电资源居世界大河之首,可开发水电资源达 1.97 亿 kW,约占全国的 53.4%。长江上游水电资源丰富,可开发水电资源占全流域的 87%,形成了三峡梯级、金沙江梯级、雅砻江梯级、大渡河梯级、嘉陵江梯级、乌江梯级等世界级的大型水利水电工程群。

生态系统是一个有机整体,流域内水、沙、生态各要素联系紧密,水量与水质、泥沙与生源物质、河床演变和生物栖息地等密不可分<sup>[2]</sup>。水利水电工程在发挥防洪、发电、航运、水资源配置等巨大综合效益的同时,也显著改变了自然河流的水文节律、水动力条件与水沙情势,继而对河流生态环境健康、生态系统的结构和功能产生重大影响。长江是我国的经济支撑、战略枢纽、生态屏障、物种宝库、清洁能源基地和战略水源地,但长江生态环境正面临严峻挑战<sup>[3]</sup>。随着长江上游干支流的大型水利水电工程陆续建成运行,水库泥沙淤积发生新变化,不仅直接影响水库防洪、发电、航运、供水等效益的发挥,而且大坝下泄水流变清,引起坝下游河床变形,影响河势稳定和防洪、航运安全;此外还会使得库区水动力条件变化,引起库湾支流富营养化与水华等问题;导致江湖关系变化,引起通江湖泊与河口生态环境变化;河流刺激条件减弱,引起鱼类繁殖规模下降等一系列问题<sup>[4-6]</sup>。

水生态环境安全是我国生态文明建设的基本保障,国家要求“把修复长江生态环境摆在压倒性位置,共抓大保护,不搞大开发”。水利水电工程既有环境生态效应,也有环境生态调控功能。进行有利于水沙与水生态环境改善的大规模库群科学统一调度,充分发挥水库防洪、发电、航运、供水、生态环境等综合效益,是提升流域水安全保障能力的新需求。当前,大

力发展清洁可再生能源,推动能源结构转型,已成为社会的广泛共识。水电作为技术最成熟、供应最稳定的可再生清洁能源,在改善电力结构,减少温室气体排放,应对气候变化等方面起到举足轻重的作用。我国水能资源位居世界第一,优先和充分发展水电成为清洁能源转型的重要基础。面对水利工程大规模建设的新局面,在“生态优先、绿色发展”“长江大保护”和“碳达峰、碳中和”背景下,实施面向水利水电工程水沙生态环境需求的调控措施,成为保障流域水沙情势与河湖健康的重大需求。

本文面向上述国家需求,主要阐述大型水利水电工程影响下河流上下游水沙、水环境与水生态等典型问题,重点分析水利水电工程水沙生态环境调控的主要理论与关键技术,展望该领域的研究方向,为提出流域水沙情势与生态环境的改善措施提供支持。

## 1 水利水电工程水沙问题与调控

### 1.1 水利水电工程水沙问题

水利水电工程建设与运行使得上下游泥沙及河道演变规律发生较大变化。在河流上修建水库,坝前水位升高,断面过水面积加大,水流流速减缓,从而使挟沙能力降低,发生泥沙淤积。泥沙问题直接关系到水库运行寿命、库区淹没、变动回水区航道和港区的演变,还涉及坝区船闸、升船机、电站的正常运行,枢纽下游河道演变、防洪、航运等一系列问题。水库淤积防控措施历来受到重视,但水库泥沙淤积问题是世界性难题,据统计,全球由于水库淤积导致的水库库容年损失量占全部水库库容的 0.5%~1.0%,预计到 2050 年全球水库库容损失将超过 50%。

泥沙问题是贯穿三峡工程论证、设计、施工、运行中的关键技术问题之一,关系到三峡工程设计成败和高效运行<sup>[7]</sup>。上世纪 90 年代以来,长江上游陆续建成了包括三峡水库在内的多座水库。受水库群拦沙、水土保持减沙等多种因素影响,长江上游水沙情势发生了显著改变,三峡水库入库径流量出现一定幅度的减少,入库沙量出现了大幅度减少<sup>[8]</sup>。近年来,长江上游多年平均来沙量减幅达 50% 以上。2003—2019 年,三峡入库(寸滩+武隆)年均水沙量分别为 3 757 亿 m<sup>3</sup> 和 1.43 亿 t,较论证值减少了 6% 和 71%;而 9—10 月份入库径流量减少,不利于水库汛

末蓄水,与下游供水的矛盾也将更加突出<sup>[6-7]</sup>。另一方面,水沙均为生源物质载体,来水来沙的改变会对水质参数、营养物质、重金属和有毒有机污染物等污染物质的赋存状态和分布特征产生影响,造成浮游植物、底栖动物、微生物等重点生物群落的现存量、群落结构与分布特征发生改变,特别是对食物链造成影响<sup>[5]</sup>。由此可见,随着三峡水库的蓄水运行,以及上游干支流水库群的建设,入库水沙条件发生了显著变化,改变了库区泥沙淤积条件,水库调度和坝下游河道冲刷演变等面临新的问题。

## 1.2 水利水电工程泥沙调度

对来水来沙进行统一调度是解决水库淤积问题的有效手段,泥沙调度应根据监测资料进行泥沙冲淤规律、河道演变规律的研究,完善泥沙预报方案,不断提高泥沙预报水平,满足调度需求。具体而言,常见水库泥沙问题研究包括:(1)水库来沙变化特性,涉及上游流域产沙输移、水土流失与水土保持、上游建库影响等;(2)水库淤积问题,涉及水库淤积关键参数(数量、速度、淤积分布、淤积物粒径、排沙特性)、调度方式对长期保留库容的作用等、水库淤积对上游城市洪水位抬高的影响、上游建库对区间洪水位抬高的影响、库区移民范围等;(3)水库变动回水区问题,涉及建库过程中及建库后变动回水区航道、港区变化及改善措施等;(4)坝区泥沙问题,涉及施工区泥沙冲淤变化及围堰附近水域的冲淤变化对通航的影响、船闸引航道淤积与清淤对通航的影响、不同坝前水位坝区河势变化,泥沙淤积对水轮机运行及大坝安全的影响等;(5)下游河道冲刷问题,涉及下游河床冲刷及水位变化、河床演变及江湖关系变化、崩岸变化、浅滩及航道变化等;(6)泥沙防控技术,涉及泥沙来源调控、水库调度水沙调控、库区机械清淤等<sup>[5-8]</sup>。

三峡工程是治理和开发长江的关键性骨干工程,在设计阶段提出采用“蓄清排浑”的运行方式,这是我国从工程实践中总结出来的、行之有效的水库运用方式。“蓄清排浑”是保障长江上游大型梯级水库长期使用的泥沙调度原则,但在上游来水来沙情势出现显著变化的背景下,如果不考虑水库平衡时间大幅延长的实际情况,则会失去充分发挥梯级水库综合效益的有利时机,造成资源的巨大浪费。尽可能多的排沙出库有助于减轻库区淤积带来的不利影响,在入库泥沙大幅减少背景下,需要在水库实时调度中,在“蓄清排浑”调度原则的执行中,结合水库调度方式优化,研究提出水库优化调度背景下适用于实时调度

的三峡及长江上游大型梯级水库泥沙调度方式。

长江上游干支流水库群的联合调度和三峡水库入库沙量明显减少,为进一步优化三峡水库调度运行方式提供了条件。长江流域经济社会的快速发展,以及长江经济带发展国家战略的实施,在防洪、发电、航运、供水和生态环境保护等方面对三峡工程综合利用提出了新的需求和更高的要求。近年来,三峡水库在中小洪水调度、提高汛期运行水位、汛后提前蓄水等方面进行了有益探索,但也会导致水库排沙比减小、库区泥沙淤积重心上移,有效库容内淤积量增加等问题<sup>[7]</sup>。妥善解决这些泥沙淤积问题,对于水库调度优化的实施具有重大意义。因此,需要突破常规的泥沙调度方式,探索新水沙和水库群联合调度条件下的泥沙调度新技术,为三峡水库优化调度和工程综合效益拓展提供支撑。

## 2 水库富营养化及水华问题与调控

### 2.1 水库富营养化及水华问题

水体富营养化与水华灾害是当今世界面临的重大环境问题。水库蓄水后水动力特性被人为改变,自净能力相对较弱,容易富集过量的氮、磷等营养盐,形成水体富营养化;在适宜的气象及水动力条件下,过量营养盐会刺激藻类的急剧过量繁殖,暴发水华。水华会造成全方位的负面环境影响,如污染水源、释放毒素、鱼类死亡、生物多样性下降等。国内外开展了大量的湖泊水体富营养化和水华问题研究,如太湖、巢湖、滇池、华盛顿湖等,但针对人为影响强烈、水位变幅大、水动力特征多变的河流及水库的相关机理研究较为有限,北美的圣劳伦斯河与澳大利亚达宁河是其中比较典型的研究案例。

以往河道型水库富营养化及水华治理主要借鉴了湖泊治理经验,如污染源控制、化学方法、生物控藻等技术,但水利工程影响下水库水域的水文、水动力过程有其自身的规律,上述处置方法在实际应用时,可能会出现适用性不强、处理效果不佳、运营成本过高等实际问题<sup>[9]</sup>。河道型水库水华暴发与分布受到水利水电工程的强烈影响:一方面,水库水动力条件的周期性变化对藻类浓度施加对流作用,水流形态则通过影响营养盐浓度分布对藻类生长产生间接作用;另一方面,在频繁变化的水位涨落和水温垂向分布的背景作用下,水体垂向紊动等水动力条件也影响到藻类生长与沉降过程。全面掌握流域水文水质的动态变化,是开展库区水华暴发驱动机制研究的基础,在构建河道型水库水环境监测与评估方法时,需考虑水利

工程影响下的多时空尺度和多技术手段融合<sup>[9]</sup>。

## 2.2 水库富营养化与水华模拟及调控

重大水利工程建设运行对流域系统水生态环境的影响及调控机制,是当前水文学、水环境和水资源管理领域的研究热点。我国湖库富营养化问题较为严重,针对河道型水库水华问题实施生态调控,需明确水库调度运行对库区富营养化演变及水华暴发的作用机制,量化调控目标要素对工程调控的响应关系,建立风险预报模式,寻求预防处置和调控水库水华的有效方法。

建立水动力和水生态数学模型,是水利水电工程生态环境效应分析及调控效果评估的重要途径。河道型水库的富营养化及水华模型的发展趋势是构建非稳态、多因子、多维的水生态动力学模型,其原理是在水动力学基础上,界定复杂水动力环境下水华生长、发展和消亡过程中的系统内外交互作用,通过数学方法描述变化环境作用下的营养盐、浮游动植物、有机物等介质间的响应关系。上述模型往往含有较多的待定参数,普通的单一敏感性分析方法无法同时兼顾准确性和高效性的要求,因此对观测资料要求较高。同时,建模过程中常对系统动力学关系进行抽象简化,过程误差会不断积累,需要借助敏感性分析技术、数据同化或人工智能算法等方法来克服上述不足。结合上述模拟技术与水库生态调度模型开展多情景仿真研究,可模拟预测水库不同流量条件下关键水质指标的时空变化,定量评估工程对水华的影响程度,但是这一类方法目前距离实时预警水华还有较大距离。

通过水库生态调控改善河道型水库库区内富营养化并进而抑制水华,是当前水库水环境管理所面临的重要课题。一些发达国家在水利水电开发的过程中对生态环境问题关注较早,但多局限于水电工程下游生物栖息环境、水源地水质保护、生态流量等方面,对我国实施针对库区富营养化及水华调控管理的可借鉴性不足。近年来研究表明,水库调蓄会显著影响库区水动力要素的时空分布,使其污染物迁移转化、水体温度结构、藻类细胞生长消亡过程有别于典型湖泊或天然径流。因此当前有一些学者认为,抑制水华暴发的水利水电工程优化调度研究的主要目标是,通过合理控制库区水位变化幅度与频率,使其在水华高风险区域形成不利于水华形成的环境。

## 3 通江湖泊生态环境问题与调控

### 3.1 通江湖泊江湖关系与生态环境问题

长江中下游湖泊群曾是我国湖泊分布最集中的两

大湖群之一,大中型湖泊在沿江各省均有分布,这些湖泊都曾与长江连通,江湖水沙自由交换,被称为通江湖泊。然而自20世纪60年代以来,由于气候变化、不合理的开发以及大范围高强度人为作用等多重因素影响,通江湖泊数量锐减,目前与长江直接连通的湖泊仅剩鄱阳湖和洞庭湖。这两个湖泊也是我国第一大和第二大淡水湖,通过吞吐调蓄,可以削减长江干流洪峰,滞后下游洪峰时间,从而大为缓解洪水过大与长江中下游河槽泄洪能力不足之间的矛盾。近年来,受气候变化、区域经济发展及三峡水库蓄水等因素影响,两湖在蓄水期及枯水期已经出现多次供水危机,对生活用水、工农业生产、通航、生态都造成巨大影响。在洪水威胁没有解除的前提下,洞庭湖荆南三河断流时间提前、断流期延长,两湖9—10月份消落加快,提前约一个月进入枯水期。鄱阳湖也出现枯水期提前开始且持续时间延长,洲滩湿地提前出露且出露时间增加等问题<sup>[4]</sup>。

鄱阳湖和洞庭湖被列入国际湿地名录,具有得天独厚的生态优势,被称为全球不可多得的巨大物种基因宝库。长江中下游湖泊分布有200多种鱼类、350多种鸟类和600多种水生及湿生植物,是白鲟、白鳍豚、麋鹿等珍稀保护生物的栖息地,是四大家鱼等重要经济鱼类的肥育场所,是珍稀迁徙性候鸟白鹤、天鹅、小白额雁等的重要驿站<sup>[10]</sup>。近年来,两湖水文节律和水动力特性正发生重大变化,引发水环境承载力下降、湿地植物退化、底栖动物减少、鱼类锐减、候鸟栖息地衰退等一系列问题。长江中游江湖关系变化引起的通江湖泊水生态环境问题,一直都是国内外学者的研究热点,涵盖了湖区、交汇区、干支流等不同水域<sup>[10-11]</sup>。江湖水文连通性下降影响了河流与湖泊之间的物质循环与能量流动,生物多样性下降,生态完整性受损,导致了传统江湖复合生态系统结构与功能的丧失。例如,鄱阳湖年内周期性干湿交替过程形成洲滩湿地,植被群落带沿水位梯度呈环状、弧状或斑块状分布的植被群落带,但近年来鄱阳湖湿地植被面积呈下降趋势,湿地植被带普遍下移,物种组成和优势种正发生变化<sup>[12]</sup>。

### 3.2 通江湖泊生态环境调控

三峡水库自2003年蓄水以来,由于清水下泄,长江中下游开始出现长距离的冲刷,长江中游通江湖泊江湖关系发生变化。国内外对于江湖关系研究多侧重于江湖水沙交换,主要解决的是干流河道的防洪问题。由于水库群蓄水期长江干流流量明显减少,对于两湖水资源格局产生影响。如何处理好长江水资源利

用与两湖湿地生态环境保护之间的关系,面临巨大挑战。在遵循整个流域水循环规律的前提下,开展面向通江湖泊生态环境的水库群一体化联合优化调控,通过优化水库群蓄泄水方案,避免湖泊提前出现过低水位,进而保障下游通江湖泊供水安全,是减轻或消除水利工程建设和运行的不利影响、维持通江湖泊生态环境健康的重要手段<sup>[11]</sup>。

生态调度是将生态因素纳入常规水库调度中,通过优化调度减轻水利工程的影响。通江湖泊面临的生态问题多种多样,进行生态调度时需要针对不同生态需求,以江湖河为系统整体进行水库群联合优化调度,因地制宜地制定调度方案和策略,这也是充分发挥控制性水库群综合效益,维护通江湖泊生态环境健康的现实需求。但目前在实践操作层面,还多以生态流量为调度目标。围绕着长江三峡工程等重大水利工程,相关数学模型研究论证了可通过水库提前蓄水等优化调度手段改善下游水文情势,从而改善生态水文因子及其生态环境<sup>[13]</sup>。但仍有一些问题需要进一步深入研究,一是通江湖泊生态环境指示性调控目标的量化问题,需要通过界定关键水情因子及其生态阈值的时空分布,为开展不同物种、不同区域的生态调控提供科学调度目标;二是针对系统大尺度、多维度、非线性等复杂特点,需要基于智能算法等方法开展水库群多目标联合优化调度模型研究,分析提出改善通江湖泊生态环境的水库群优化调控方案。

## 4 河口生态环境问题与调控

### 4.1 河口生态环境问题

河口处于流域和海洋的交汇处,河口生态系统环境因子变化剧烈,各种物理、化学、生物和地质过程耦合多变,生态环境错综复杂。我国在河口生态系统功能状况、变化趋势、人类活动影响等方面开展了大量研究<sup>[14-15]</sup>,相关案例主要集中在长江口、黄河口及珠江口等,但在基础资料时间跨度上仍偏短,有针对性的系列观测数据不足,对河口生态系统综合性分析结果存在一些局限性。在空间尺度上,对于同一河口生态系统,受基础研究数据空间分布密度的限制,难以系统认知整个河口生态系统的空间规律性。在生态系统分析要素方面,主要利用生态系统的单一要素或某几个要素进行状态及趋势分析,在反映河口生态系统生态完整性和相互作用复杂机理方面仍有欠缺。

水利水电工程对河口生态环境产生巨大影响,例如阿斯旺大坝建成后,尼罗河河口供沙不足,三角洲海岸严重侵蚀后退,盐水显著上溯,水库蓄水削峰和

入海泥沙减少还使地中海的沙丁鱼捕获量锐减。又如,美国哥伦比亚河下游及河口地区不同湿地生境之间通道受到阻断,食物网破坏、大型碎屑物流减少,三文鱼栖息地受到破坏。河口生态系统的演变是一个长期的、动态变化的过程,需要中长期时间尺度、空间完整、有效整合和集成数据作为研究基础。受历史研究手段的限制,在加强系统性生态环境监测的同时,卫星遥感观测具有稳定、连续、大尺度观测等优点,越来越广泛地被应用在河口生态系统研究中。

### 4.2 河口生态环境调控

水利水电工程引起水量、输沙量、营养物质浓度、水质、水体的自净能力等变化,对河口区的水文结构和河槽演变产生影响。20世纪50年代以来,长江流域已兴建许多水库,改变了河流径流量和其原有季节分配。三峡工程调蓄进程改变了下游的来水状况,径流量的改变对长江口盐水入侵范围带来不可忽视的影响,直接关系到沿江地区的工农业用水。例如,三峡水库建成以后,每年下泄的年水量变化不大,但径流的季节分配发生很大变化。长江下游抽引水能力也不断加大,进一步加剧了河口水量不平衡。

分析三峡水库现有调度对长江口盐水入侵的影响,明确流量峰值、变化形态、时间尺度等对改善盐水入侵的效果,是提出改善盐水入侵的优化调度策略的基础。三峡水库汛末蓄水,在咸潮高发的枯季向下游补水,增加下泄流量,对抵御咸潮入侵具有一定作用<sup>[15]</sup>。但三峡离长江口距离较远,而长江口来水更多受长江中下游取用水影响,尤其是南水北调东线、引江济淮、引江济太等大型引调水工程的影响,直接通过三峡工程下泄流量补水压咸,补水作用需要深入研究。当长江遭遇特枯来水条件时,长江口咸水倒灌是必然的,要减轻其不利影响,不仅需要严格控制长江中下游干流取用水,还需采取多水源避咸方案,开展联合调度来解决。

## 5 流域重要珍稀鱼类生境胁迫问题与调控

### 5.1 水生生物栖息繁殖问题

水利水电工程会阻隔鱼类洄游通道,改变上下游水文情势,对重要水生生物的生存和繁殖造成直接影响。我国多个流域都出现了重要水生生物资源更替、衰退甚至绝迹的现象。长江是世界上生物多样性最丰富的河流之一,但近些年,在气候变化、环境污染、过度捕捞、水利建设等多重因素的影响下,长江流域生物完整性指数几乎到了最差的“无鱼”等级。其中,又以四大家鱼等产漂流性卵鱼类和以中华鲟为代

表的长江珍稀鱼类最有代表性。

长江是产漂流性卵鱼类的主要栖息和繁殖场所,长江水系野生四大家鱼(青、草、鲢、鳙)的种质性状明显优于其他水系,被认为是宝贵的天然物种种质资源库。近些年,四大家鱼产卵规模呈现衰退趋势,监利的四大家鱼苗径流量从1981年5—6月的67亿尾,下降到1997年同期的35.87亿尾,直至2009年同期的0.42亿尾。水利水电工程会阻隔鱼类洄游通道,对鱼类生存和繁殖造成深远影响。中华鲟是我国特有的大型海河洄游性鱼类,国家一级保护动物,被世界自然保护联盟(IUCN)列为极危物种。国家一级保护动物中华鲟是我国特有的溯河洄游性底栖鱼类,其传统产卵场主要分布在金沙江下游新市至涪陵江段内的10多个区域。由于上世纪80年代葛洲坝工程的修建,阻断了中华鲟洄游线路,使之种群数量锐减,目前仅在葛洲坝下游坝下至古老背长约30 km的江段有观测到一处产卵场。中华鲟种群规模葛洲坝建坝后大为缩小,三峡工程进一步改变了坝下河段径流量与流场时空分布特征,是否已对中华鲟自然繁殖产生了新的影响,目前还存有争议<sup>[4]</sup>。三峡工程蓄水以后,监测发现繁殖规模急剧下降,2013年、2015年、2017年和2018年葛洲坝下未监测到繁殖。

## 5.2 重要水生生物调控

减缓水利水电工程对鱼类影响的生态调控措施主要有过鱼设施、增殖放流、生态调度、生境修复等<sup>[16-17]</sup>。

(1)过鱼设施:重建鱼类洄游的生命通道,进而塑造鱼类自然繁殖适宜环境,是缓解工程不利影响的必要手段。该类技术主要在水利水电工程中增设鱼道、鱼梯、升鱼机、鱼闸等过鱼设施,辅助溯河洄游或降河洄游的鱼类通过闸坝抵达产卵或培育场所。目前,一般要求具备条件的水利水电工程,在新建与修复重建过程中应增设鱼道工程措施。实践表明,过鱼设施技术对恢复水生生物交流通道能起到积极作用,但其过鱼效果受到工程条件的一定限制,多适用于中低水头水利枢纽鱼类过坝。

(2)增殖放流:通过人工繁殖,采用放流、底播、移植等人工方式向天然水域中投放亲体、苗种等活体水生生物,是当前常见的水生生物物种保护方法。葛洲坝水利枢纽修建后,针对中华鲟的全人工繁殖已经较为成熟,2009年后已经可以人工培养出子二代中华鲟,人工增殖放流已成为鲟鱼生物资源的有力补充。为扩大珍稀特有鱼类种质资源库规模,已经连续举办了多次中华鲟放流活动,累计放流中华鲟近

530万尾,形成了比较稳定持续的人工种群培育及放流能力。

(3)生态调度:不同鱼类的栖息繁育有其自身喜好的生态水文条件,四大家鱼等产漂流性卵鱼类繁殖需要适宜的温度、水流速度和涨水过程,而产黏性和沉性卵鱼类多为定居性鱼类,鱼卵黏附于栖息地水草、砂砾或岩石上发育。我国近年来结合三峡等重大工程开展水生生物资源生态调度试验,例如在四大家鱼产卵期间,水库持续增加放水量,创造适宜的水文水动力条件,可以促进四大家鱼等产漂流性卵鱼类产卵繁殖。近年来,也开始尝试实施对产黏沉性卵鱼类繁殖的生态调度试验,以最大限度发挥长江水库群生态功能。

(4)生境修复:对生态系统停止或减轻人为干扰,有可能依靠生态系统的自我调节能力进行生境自我恢复,但一般需要较长周期。从2021年1月1日零时起,长江流域重点水域开始实施暂定10a的常年禁捕,这是由于长江主要经济鱼类性成熟的时间是3~4 a,实施10 a禁渔将为多数鱼类争取2至3个世代繁衍,有利于长江鱼类种群的自我恢复。除了严格的禁渔外,对栖息地进行生态修复也是必要的手段。

随着生态调度、十年禁渔、增殖放流等多种措施的实施,目前长江流域鱼类资源状况逐步好转,例如长江中游监利江段四大家鱼苗资源量已由2015年的5.1亿尾增加至21.9亿尾。长江上游一级支流赤水河鱼类种类从禁捕前的108种恢复至169种,特有鱼类种类数由禁捕前的32种上升至37种,资源量达到禁捕前的1.95倍。然而,鱼类生境调控是系统性工程,涉及到气象水文预报、水库调度、水文要素监测等多个领域,相关生态调控技术尚处在探索试验阶段,还需结合工程实践持续深入研究,需要充分认知重大水利水电工程对河流重要水生生物的影响,及时、准确、全面地掌握产卵栖息地状况,重点突破复杂条件下生境演变、生物繁殖需求、多目标调控等议题,继而形成科学可行的生态调控方法和技术,在发挥水电工程效益的同时减轻其生态环境影响。

## 6 水利水电工程水沙生态环境综合调控

水是生态系统的控制要素,河湖是生态空间的重要组成部分,水利是生态文明建设的核心内容。水利水电工程自身具有生态调控功能,生态调控是今后很长一段时期水利水电工程发展的热点问题。在水利水电工程规划、设计、施工以及运行过程中,需要对生态环境影响问题进行充分论证并制定相应对策措施。如为

表 1 流域水沙生态环境调控相关问题及其调控关键技术

Table 1 Characteristics of problems related to the regulation of watershed water-sediment and ecological environment and its key regulation technologies

研究方向	生态环境问题	主要研究问题	调控关键技术
水利水电工程泥沙调控	水库泥沙淤积	泥沙实时监测、水沙模型预测预报	沙峰调度、库尾减淤调度
水利水电工程江湖湖泊生态环境调控	水库富营养化及水华	水库水环境监测、营养状态模拟与评估、水华风险预警	基于库区水位变幅与频率的优化调控
	通江湖泊生态环境	江湖关系分析、生态适宜流量与适宜水位阈值界定	以江湖河为系统的水库群联合生态调度
	河口生态环境	河口生态环境系统监测与状况评估、河口数学模型	抑制咸潮的水库生态补水、多水源避咸联合调控
水利水电工程水生生物繁殖调控	重要珍稀鱼类生境胁迫	产卵场同步监测、鱼类栖息生境生态水文条件、水温分层、气体过饱和等要素预警、过鱼设施、增殖放流	产漂流性卵鱼类、产黏沉性卵鱼类繁殖调控、以中华鲟为代表的珍稀鱼类繁殖调控

防止水库泥沙淤积, 需要设计排沙孔等; 为保护鱼类的生物多样性, 可建造鱼类洄游通道; 针对无法回避的、由于工程运行造成的生态环境损害问题, 可以建立起生态补偿机制。

但要在短期内减轻大坝对生态的影响, 应重视优化水库调度方式, 充分认知上游水库群对流域生态环境的多重影响, 形成科学可行的多目标生态调控技术, 既兼顾工程综合效益发挥, 又满足多类敏感水域、多时空尺度、多种生态环境效应的监测与优化调控需求。在水利水电工程调度运行中融入生态因素, 通过优化水库调度最大限度地维护河流水文特征, 有助于减轻水利水电工程对水沙生态环境的不利影响。如上述分析可知, 目前关注的焦点主要有水库泥沙、水库富营养化与水华、江湖关系变化与通江湖泊生态环境、河口生态环境保护、鱼类栖息繁殖等问题(见表 1)。

水库生态调度通过合理的水库调度规程方法, 弥补或减缓其对生态环境的影响, 通过蓄泄合适的流量维持一定的流态和水位过程以实现重要生态功能。从维护河流生态系统稳定的角度分析, 生态调度是对筑坝河流的一种生态补偿, 调度是手段, 维护生态环境是目的, 其实质是考虑河流不同生态环境需求的水库调度方式。只要是出于维护河流生态环境目标的调度, 都可以纳入生态调度的范畴, 如改善泥沙淤积、促进鱼类繁殖、抑制库区支流水华、保障枯水期生态流量、抑制咸潮入侵等。而且水库生态调度应与防洪、发电、航运等调度相协调, 尽量减小对水库的正常运行调度的影响, 在充分考虑人类活动自律性和生态自适应性基础上, 在双赢的基础上实施面向水沙生态环境的综合调度, 实现多目标综合效益最优。

## 7 展望

我国已建成三峡、溪洛渡、向家坝等世界级大型

水利水电工程, 发挥了防洪、发电、航运、水资源配置等巨大的综合效益, 但也显著改变了自然河流的水文节律、水动力条件与水沙情势, 易造成库区泥沙淤积、水库富营养化及水华、通江湖泊与河口生态环境变化、鱼类洄游通道阻隔及鱼类生境胁迫等问题。因此, 在“生态优先、绿色发展”“长江大保护”背景下, 实施面向水利水电工程水沙生态环境需求的调控措施, 是保护流域生态环境和促进经济社会发展全面绿色转型的必要手段。

我国水能资源理论蕴藏量、技术可开发量和经济可开发量均居世界第一。目前我国水电开发水平仅为 39%, 水电仍有较大开发潜力。我国大型水利水电工程群特有的分布格局, 对流域生境演变产生了最直接的深远影响。但长期以来, 我国水利水电工程建设以防洪、发电、航运等功能为主, 对水沙生态环境效应及多维调控考虑还较少, 缺乏相关的理论方法与核心技术的支撑, 这已成为制约水利水电工程可持续发展的关键技术瓶颈和世界性难题。面对这些问题, 亟需面向国家需求和制约水电可持续发展的关键科学问题, 通过多学科交叉和多技术手段, 自主研发大型水利水电工程水沙生态环境调控关键技术, 突破卡脖子关键技术, 为水利水电工程影响下的流域生态环境安全保障提供科技支撑和系统解决方案。

## 参考文献 (References):

- [1] 王浩, 王旭, 雷晓辉, 等. 梯级水库群联合调度关键技术发展历程与展望[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 25-37.  
WANG Hao, WANG Xu, LEI Xiaohui, et al. Development history and outlook of key technologies for joint scheduling of stepped reservoir groups[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 25-37.
- [2] 夏军, 左其亭, 王根绪. 生态水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

- XIA Jun, ZUO Qiting, WANG Genxu. Ecological hydrology [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [3] 卢纯. “共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 283-295.
- LU Chun. Reflections on some major key issues of “grasping the Yangtze River together” [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 283-295.
- [4] 戴会超, 毛劲乔, 蒋定国. 水利水电工程生态环境效应与多维调控技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- DAI Huichao, MAO Jinqiao, JIANG Dingguo. Ecological and environmental effects of hydraulic and hydropower projects and multi-dimensional control techniques and applications [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [5] 杨文俊, 汤显强, 王振华. 基于环境泥沙的营养物质输移机理与生态防治[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- YANG Wenjun, TANG Xianqiang, WANG Zhenhua. Nutrient transport mechanism and ecological control based on environmental sediment [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [6] 许全喜, 童辉. 近 50 年来长江水沙变化规律研究[J]. 水文, 2012, 32(5): 38-47.
- XU Quanxi, TONG Hui. Study on the water-sand variation pattern of Yangtze River in the past 50 years [J]. Hydrology, 2012, 32(5): 38-47.
- [7] 三峡工程泥沙专家组. 三峡工程运行后泥沙冲淤与调控[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- Three Gorges Project Sedimentation Expert Group. Sediment flushing and control after the operation of Three Gorges Project [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2020.
- [8] 黄仁勇. 长江上游梯级水库泥沙输移与泥沙调度研究[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- HUANG Renyong. Study on sediment transport and sediment scheduling in the upper Yangtze River terrace reservoirs [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [9] 戴会超, 毛劲乔, 张培培, 等. 河道型水库富营养化及水华调控方法和关键技术[J]. 水利水电技术, 2015, 46(6): 54-58.
- DAI Huichao, MAO Jinqiao, ZHANG Peipei, et al. Eutrophication in riverine reservoirs and key technologies for regulating water blooms [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(6): 54-58.
- [10] 姜加虎, 黄群, 孙占东. 长江流域湖泊湿地生态环境状况分析[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 424-429.
- JIANG Jiahu, HUANG Qun, SUN Zandong. Ecological and environmental analysis of lakes and wetlands in the Yangtze River Basin [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(2): 424-429.
- [11] 戴凌全, 毛劲乔, 戴会超, 等. 面向洞庭湖生态需水的三峡水库蓄水期优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(9): 18-27.
- DAI Lingquan, MAO Jinqiao, DAI Huichao, et al. Optimal scheduling of Three Gorges Reservoir during storage period for ecological water demand of Dongting Lake [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(9): 18-27.
- [12] 王晓龙, 徐力刚, 徐金英. 鄱阳湖洲滩湿地[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- WANG Xiaolong, XU Ligang, XU Jinying. The wetlands of Poyang Lake [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [13] ZHANG P P, MAO J Q, GU K Y, et al. Integrated scheduling-assessing system for drought mitigation in the river-connected lake [J]. Journal of Environmental Management. 2022, 313: 114999.
- [14] CHEN Jiyu, XU Haigen. Impact of the Three Gorges Project on the Yangtze River Estuary [J]. Yangtze River Basin Resources and Environment, 1995, 4(3): 242-246.
- [15] WANG C, SUN QY, WANG P F, et al. An optimization approach to runoff regulation for potential estuarine eutrophication control: Model development and a case study of Yangtze Estuary, China [J]. Ecological Modelling, 2013, 251: 199-210.
- [16] 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. 河海大学学报(自然科学版) [J]. 2016, 44(3): 240-245.
- MAO Jinqiao, DAI Huichao. Impact and regulation of major water conservancy and hydropower projects on important aquatic organisms [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(3): 240-245.
- [17] 李朝达, 林俊强, 夏继红, 等. 三峡水库运行以来四大家鱼产卵的生态水文响应变化[J]. 水利水电技术, 2021, 52(5): 158-166.
- LI Zhaoda, LIN Junqiang, XIA Jihong, et al. Changes in the eco-hydrological response of tetrahymena spawning since the operation of Three Gorges Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(5): 158-166.

(责任编辑 康健)