

基于生态流量调控的水利枢纽运行优化策略研究

刘 涛¹ 代晓伶²

1.宜昌市黄柏河流域管理局 湖北 宜昌 443000

2.宜昌市水利工程移民服务中心 湖北 宜昌 443000

【摘 要】：本文从生态流量调控的核心需求出发，分析水利枢纽运行中生态保护与多目标功能的矛盾，构建“计算-调度-协同-保障”四维优化策略体系，提出基于 Tennant 法与生态水文模型耦合的流量计算方法、多目标智能调度系统及流域协同机制，为平衡水利枢纽功能发挥与生态保护提供实践路径，助力流域生态经济协调发展。

【关键词】：生态流量调控；水利枢纽；运行优化；多目标调度；流域协同

DOI:10.12417/2811-0528.26.03.059

1 引言

水利枢纽作为水资源开发利用的核心工程，在保障区域防洪安全、能源供应和工农业用水等方面具有不可替代的作用。然而，传统运行模式多以经济效益最大化为导向，忽视河流生态系统的基础需水，导致超过 60% 的受调控河流出现不同程度的生态退化，随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入，生态流量调控成为水利枢纽运行的刚性约束。但实践中面临诸多挑战：生态流量计算方法与流域实际脱节，导致“算不准”；发电、供水与生态泄流的调度冲突突出，出现“调不动”；跨区域、跨部门协同机制缺失，造成“管不了”。因此，研究基于生态流量调控的水利枢纽运行优化策略，对破解“工程效益与生态保护”的矛盾具有重要现实意义。

2 水利枢纽运行中的生态流量调控矛盾与挑战

水利枢纽运行中，生态流量调控与传统功能目标的冲突贯穿全流程，形成多维度挑战。在目标平衡层面，生态流量的“刚性需求”与发电、供水的“弹性调度”存在天然矛盾：枯水期流域来水减少时，若严格按照生态流量下泄，可能导致水电站发电量下降 15%-20%，某梯级枢纽曾因优先保障生态流量，使月度发电收益减少 300 万元；而灌溉高峰期，农业用水需求骤增，生态流量常被挤占，某灌区配套枢纽在灌溉季生态下泄达标率仅为 58%，引发下游湿地萎缩。

在技术实施层面，生态流量计算与动态调度存在双重困境。现有计算方法适用性有限：Tennant 法等水文学方法虽简便，但未考虑流域生态系统特异性，如北方寒冷地区鱼类越冬期对流量稳定性的要求远高于单纯的流量数值；生态水力学模型虽精准，但需大量水文、生物数据支撑，80% 的中小型枢纽因数据匮乏难以应用。调度层面，多数枢纽仍采用“固定泄流”模式，无法响应河流生态的动态需求——如鱼类繁殖期需要的“脉冲式泄流”与传统的“均匀下泄”模式冲突，导致产卵成

功率降低 25% 以上。

在管理协同层面，跨区域、跨部门的权责分割加剧调控难度。流域内往往存在多个水利枢纽，上下游调度缺乏联动，上游枢纽集中泄流可能导致下游生态流量短期超标，引发河岸冲刷；而下游过度截流又使上游生态下泄失去意义。部门间目标差异明显：水利部门侧重防洪、供水，环保部门关注生态达标，电力企业追求发电效益，某流域因三部门调度指令冲突，导致生态流量达标率波动幅度达 40%。此外，生态流量监测体系不完善，60% 的枢纽缺乏实时在线监测设备，难以验证调控效果，“泄流数据造假”“达标率虚高”等现象时有发生。

3 基于生态流量调控的水利枢纽运行优化策略

基于生态流量调控的水利枢纽运行优化需构建“精准计算—智能调度—协同管理—多元保障”的全链条策略体系，实现生态保护与综合效益的动态平衡。精准计算是前提，应根据流域特征选择适配方法：对数据充足的大型流域，采用“Tennant 法+生态水力学模型”耦合计算，以 Tennant 法确定逐月基础生态流量，再通过模型模拟不同流量下鱼类栖息地面积、河道自净能力等指标修正基础值；对中小型流域，开发“简化生态指标法”，以河道最小生态需水和关键物种生存需水为核心，减少数据依赖。同时建立流量动态阈值机制，根据实时水文数据和生态监测结果，每月微调生态流量上下限，避免“一刀切”。智能调度是核心，依托数字孪生技术搭建智能平台，整合气象、来水、生态需求等数据，通过遗传算法优化调度方案，在保障生态流量的前提下，错峰安排发电与供水时段，关键生态期实施“脉冲式泄流”，模拟自然水文节律。协同管理是关键，由流域管理机构牵头制定调度大纲，将生态流量指标分解至各梯级枢纽，建立“上游泄流+下游核验”联动机制，同时通过部门联席会议协调水利、环保、电力等多方目标，明确汛期防洪优先、非汛期生态优先的排序规则。多元保障是支撑，将生态

流量纳入法规约束，对达标枢纽给予财政补贴或水权交易激励，完善智能监测网络并公开数据接受社会监督，形成“计算—调度—监测—反馈”的闭环。

为了让策略更贴合实际并有效落地，需从多维度深化细节优化。精准计算方面，要充分考虑流域生态系统的特殊性，针对不同区域、不同时段生态需求细化标准。例如，北方流域冬季需重点保障冰期流量的稳定性，通过模拟计算确定最小流量波动幅度，避免因流量骤增骤减导致冰层破裂，影响鱼类等水生生物的越冬环境；而在春季融冰期，需计算融雪径流与生态流量的叠加效应，防止融冰期水量过大引发下游洪水，同时确保基础生态流量不被挤占。南方湿润地区则关注汛期脉冲流量对河岸植被的影响，通过分析历史数据确定安全冲刷阈值，将流量波动幅度严格控制在植被可恢复范围内，避免过度冲刷导致河岸裸露。对于跨省跨区域流域，还要建立“分区计算、协同修正”机制，由各分区先根据本地生态特征计算初步值，再由流域管理机构统筹平衡，确保上下游生态流量衔接合理，如上游山区需保障的基流与下游平原区的灌溉生态流量形成互补。智能调度环节，需兼顾技术先进性与实践可行性。针对中小型枢纽技术力量薄弱的现状，开发“轻量化”智能调度模块，简化操作界面，将复杂算法封装为一键式功能，管理人员只需输入基础数据，系统即可自动生成调度方案，大幅降低技术门槛。同时，保留灵活的人工干预接口，在极端天气或生态紧急情况时，允许管理人员手动调整泄流计划，确保在智能系统之外有应急保障手段。为提升调度方案的适应性，系统应内置“情景模拟”功能，可预演不同来水条件下的调度效果，如模拟枯水期来水减少30%时，如何在保障生态流量的同时最小化发电损失，帮助决策者提前制定应对预案。此外，建立“调度方案库”，收集不同流域、不同类型枢纽的成功案例，供同类枢纽参考借鉴，如某中小型灌溉枢纽的“错峰供水+生态泄流”方案，可直接为类似工程提供模板，缩短策略落地周期。协同管理层面，需破解利益分配难题，构建共赢机制。设立“生态流量补偿基金”，按照“谁受益、谁付费”原则，由流域内的用水企业、发电公司、沿岸工业园区等受益主体按用水量或发电量比例出资，基金规模根据年度生态流量保障成本动态调整。基金由独立第三方机构管理，重点补偿因优先保障生态流量导致收益受损的水利枢纽，如某枢纽在灌溉期为保障下游生态流量，减少农业供水导致的收益损失，可申请基金补偿。补偿标准需细化量化，结合枢纽的生态贡献度和经济损失额度综合确定，避免“平均主义”。同时，建立“上下游协商机制”，定期召开流域协调会，上游枢纽在调整泄流计划前72小时通知下游，下游则需反馈泄流对本地生态和用水的影响，通过协商达成一致，如上游计划开展冲沙泄流时，下游可提前做好沿岸居民疏散和农田防护准备，避免因信息不对称引发矛盾。对

跨部门协同，推行“生态流量目标责任制”，将生态流量达标率纳入水利、环保、电力等部门的绩效考核，考核结果与部门预算、评优评先直接挂钩，倒逼各部门主动配合调度工作。监测与反馈体系要实现全链条闭环管理。构建覆盖流域关键节点的监测网络，在鱼类产卵场、湿地核心区、饮用水源地等生态敏感区域加密监测设备，实时采集流速、水温、溶解氧、pH值等关键指标，数据通过5G网络传输至云端平台，确保监测的时效性与准确性。平台搭载AI智能分析模块，可自动识别生态异常信号，如发现某段河道溶解氧浓度连续3小时低于5mg/L，立即触发预警，自动推送信息至流域管理机构和相关枢纽，指令上游枢纽增加下泄流量以提升水体流动性，改善溶解氧水平。为保障数据真实性，监测设备需具备防篡改功能，采用区块链技术记录监测数据，确保每一组数据都可追溯、不可伪造，杜绝“数据造假”“达标率虚高”等问题。定期开展“生态成效评估”，每半年组织生态学家、水利专家对流域生态状况进行实地调研，重点评估鱼类种群数量、水生植被覆盖率、河道自净能力等指标的变化，将评估结果与生态流量调控策略挂钩，如发现某调度方案导致局部河道淤积，立即组织优化泄流时段和流量，确保策略始终与生态需求同步调整。

通过这些细化措施，精准计算能更贴合流域生态实际，智能调度可平衡技术与实操性，协同管理能化解利益冲突，监测反馈能及时纠偏，最终形成一套“科学、高效、可持续”的水利枢纽运行优化体系，既守护河流生态健康，又保障防洪、发电、供水等综合效益，实现人水和谐共生的目标。

4 案例分析

某流域梯级水利枢纽群曾长期面临生态流量调控难题：年均达标率仅62%，下游10公里河道因流量不足呈现季节性断流，水生生物多样性持续下降，同时上下游调度冲突频发，灌溉期常因争水导致矛盾激化。为破解困境，该流域系统应用生态流量调控优化策略，通过三年实践实现生态与效益双赢。

在精准计算环节，团队根据流域特征分层施策：大型枢纽采用“Tennant法+生态水力学模型”耦合计算，结合鱼类产卵期对水流脉冲的需求，将枯水期基础生态流量从原12m³/s提升至15m³/s，同时设定4-6月每日9-11时为“脉冲泄流窗口”，流量波动幅度控制在20%以内；中小型枢纽则采用“简化生态指标法”，重点保障河道基流，并针对灌溉期特点，将生态泄流时段调整至夜间，避开白天灌溉用水高峰。为验证计算精度，团队在下游设置5个监测点，连续追踪发现，调整后鱼类产卵场面积扩大40%，底栖生物密度较此前增长28%。

智能调度平台的应用成为效率提升的关键。平台整合流域15个水文站、8个生态监测点的实时数据，通过遗传算法自动生成调度方案：丰水期利用弃水发电，将生态泄流与发电时段

重叠,实现“一水两用”;枯水期则优先保障生态流量,将3座大型枢纽的发电时段集中在用电高峰,通过电价差弥补发电量减少的损失。针对中小型枢纽技术能力薄弱的问题,平台开发“一键调度”功能,管理人员输入来水量即可生成泄流计划,操作时间从原2小时缩短至10分钟。某中小型灌溉枢纽应用该功能后,灌溉用水保障率保持95%的同时,生态流量达标率从55%跃升至90%。

协同管理机制有效化解了跨主体矛盾。流域管理局牵头签订《生态流量保障责任书》,明确3座大型枢纽承担70%的生态泄流责任,5座中小型枢纽分担剩余30%,并规定上游枢纽泄流前48小时需通知下游,下游则需反馈泄流对本地的影响。为平衡利益,设立的生态流量补偿基金首年规模达2000万元,某大型枢纽因在枯水期多泄流1200万立方米生态水,获得300万元补偿,基本覆盖发电损失。监测体系实现全流域覆盖,在鱼类产卵场、湿地入口等敏感区布设20套智能监测设备,数据实时上传至监管平台,一旦发现溶解氧低于5mg/L或流速异常,立即自动指令上游枢纽调整泄流。

参考文献:

- [1] 董哲仁.河流生态流量理论与实践[J].水利学报,2022.
- [2] 李锦秀.水利枢纽生态调度研究进展与展望[J].水科学进展,2023.
- [3] 王浩.流域水资源综合管理理论与实践[M].北京:科学出版社,2022.

经过三年优化,该流域生态流量年均达标率提升至91%,下游断流现象彻底消失,河道植被覆盖率从35%增至62%,监测到2种消失多年的鱼类重现。经济效益方面,通过智能调度,发电效益仅下降3%,农业灌溉保障率稳定在98%,沿岸工业园区用水成本降低5%。这一实践证明,生态流量调控并非单纯的“效益牺牲”,而是通过科学策略实现生态保护与综合效益的协同提升,为同类流域提供了可复制的“精准计算-智能协同-利益平衡”实施范式。

5 结论

基于生态流量调控的水利枢纽运行优化,核心是在生态保护与多功能发挥之间找到动态平衡。通过精准化计算、智能化调度、系统化协同三大策略,既能满足河流生态系统的基本需求,又能最大限度降低对防洪、发电、供水的影响。未来,需进一步完善生态流量监测技术、强化跨部门数据共享、细化生态补偿标准,推动水利枢纽运行从“工程效益优先”向“生态效益与综合效益协同”转型。这不仅是践行绿色发展理念的必然要求,更是保障流域可持续发展、实现人水和谐的关键路径。