

# 生态基流保障与动态调度策略实践研究

宋蕊

塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心

DOI:10.32629/hwr.v9i11.6668

**[摘要]** 流域水资源高强度开发引发的生态基流断流、水文情势异化已成为全球性生态危机。基于此，本文主要聚焦于生态基流保障的核心实践难题，深入探索了动态调度策略在协调水资源利用与生态保护中的应用效能。文章系统构建了融合多目标优化、水文-生态响应机制识别及适应性决策的动态调度理论框架与方法体系，在实践层面详细剖析了数据驱动模型构建、调度算法开发、多目标协同优化、精细化实施流程设计以及综合效益评估等关键环节，以期为破解高强度开发流域的生态保护困境提供重要的技术支持。

**[关键词]** 生态基流；动态调度；优化策略

**中图分类号：**F062.2 **文献标识码：**A

## Practical Research on Ecological Base Flow Guarantee and Dynamic Scheduling Strategy

Rui Song

Kaitu Kongque River Water Management Center in the Tarim River Basin

**[Abstract]** The high-intensity development of water resources in river basins has led to the cessation of ecological base flow and the alienation of hydrological conditions, posing a global ecological crisis. Based on this, this paper primarily focuses on the core practical challenges of ensuring ecological base flow, and deeply explores the application effectiveness of dynamic scheduling strategies in coordinating water resource utilization and ecological protection. The article systematically constructs a theoretical framework and methodological system for dynamic scheduling that integrates multi-objective optimization, identification of hydrological-ecological response mechanisms, and adaptive decision-making. At the practical level, it provides a detailed analysis of key aspects such as data-driven model construction, scheduling algorithm development, multi-objective collaborative optimization, refined implementation process design, and comprehensive benefit evaluation. The aim is to provide important technical support for addressing the ecological protection dilemma in highly developed river basins.

**[Key words]** ecological base flow; dynamic scheduling; optimization strategy

### 引言

随着全球变暖、气候变化剧烈及社会经济用水量不断增加，河流生态基流保障形势愈发严峻。生态基流是指维持河流基本生态健康功能所需要的最低水流及其过程特征，而其保障程度是影响水生生物生存和繁殖、水体自净能力及两岸生态系统是否完整的决定性因素。静态、固化标准下的基流保障往往不能适应天然河流来水的随机性以及不同类型水期生物需水的季节性差异，在现实情况中暴露出保障不足或浪费等缺点，如何探索或实施能够及时响应河流天然径流变化、紧密匹配生态系统实际需水变化的动态调度方法，便成为水资源合理开发利用的关键<sup>[1]</sup>。

### 1 生态基流保障的实践需求与基础理论支撑

#### 1.1 生态基流的概念内涵、保障挑战与现状影响评估

生态流量绝不是一个固定的流量过程，而是一个涵盖实现某一河段内指示性物种发育与繁衍、维持河段水文河槽基本形态稳定、保持水质自净与稀释功能等综合水生态服务功能目标所需的生态功能流量过程。在时间尺度上，它包括一定的枯水过程量级、持续枯水历时、枯水过程速率和枯水过程脉动峰等特征，生态流量是一个既强调量也关注量率的系统过程；当前水资源过度开发地区出现问题的深层次原因，主要是在枯水时段内生态流量基本保证率总体偏低，枯水季节河段断流或接近断流的不利状况层出不穷，导致原生态生境水生生物类型丰富度急剧下降、生境面积大量缩减破碎化、河流纵向和横向完整性严重受阻、水生维管束植物衰退、底泥淤积化与河床形态恶化、水

体污染降解功能突然崩溃等连锁反应式生境破坏效应。针对此类地区,进行系统的生态流量保障状况分析与评价,首先应依托长序列的水文站网监测资料,确定关键控制断面生态流量保障率水平,结合鱼类种群资源调查、大型底栖动物生物指数(BI)、岸坡带遥感图像植被覆盖度分析等技术方法,识别出最为脆弱的重点区域、生态功能损失最显著的关键时段及其主要限制性因子,这是制定针对性生态流量调度方案的必要条件和基础<sup>[2]</sup>。

### 1.2 生态基流动态保障核心需求分析

当前,要有效实现生态基流保障,受到多方面复杂约束因素的限制,同时也对协调组合总体目标多且性质相反的决策内容提出了较大挑战。主要体现为,当前水利工程群的运行调度规则大多以满足防御洪水、农业灌溉、发电、城市供水等需求为目标,而下泄流量控制组合规则与下泄流量过程对下游河段内多重生态需水的匹配度还有待提升,在水资源短缺的枯水年份,经济社会用水需求与生态环境用水之间的冲突态势将会形成几何级数的膨胀态势。在尊重天然来水随机性分布规律的前提下,基于降雨产流预报信息、实时自动监控的水道内流量分布情势、所辨识出的特定关键时期的生态需水以及突发水生态胁迫状况的异常触发信号,实时调整和完善流域梯级水工程的下泄流量过程组合、跨流域水道调配工程的来水分配比例设置、重要控制断面闸坝的开关时机、应急开采地下水量的控制等指标体系的配套运行,从而在不突破强制性供水量约束要求的情况下达到最佳水平的水资源生态利用时空契合效能。

### 1.3 动态调度体系构建所依赖的核心技术支撑体系

构建高效运行能力的生态基流动态调度系统,还需要具备强大的集约化管理集成信息保障平台做支撑:一是构建贯通流域上下游干支流关键控制断面的水文水质、生态因子空间分辨力高、时效性强、布局完整的自动监测站点群,通过安全高效率的通道实时采集传输与标准化接入集成,消除信息孤岛,集成形成统一、权威的水文生态基础数据资源池。关键核心技术研发包括以物理机制为基础的高分辨率水文计算模型,其主要任务是模拟大时空尺度下复杂地形与天气系统交互作用条件下的天然径流量时空分布规律,支撑多情境下的中长期水量预测工作;耦合以生物栖息地适宜度、种群动态模拟和物质通量迁移机理为基础的生态响应模型,用于系统阐明不同流量情势设定下的水生生物的生存适宜性变动、重要养分循环通量响应变化规律和生境结构稳态临界阈值区间;基于强大的云计算资源承载调度决策支持智能平台的构建,可高效支撑百万以上大规模复杂约束组合方案的实时计算寻优,支持基于多目标的可视化权衡分析与交互式情景仿真推演,提供及时可见的辅助决策信息帮助决策人员增强对系统全局状态认知的能力<sup>[3]</sup>。

## 2 生态基流动态调度策略的实施与优化

### 2.1 动态调度模型的系统化构建与方法选择

调度决策是动态调度数学模型搭建部分的核心框架和骨干体系,同时兼顾水库动态蓄水量约束、电站最小可调出力约束、

各受水口最小保证水量约束、防汛控制库容强制约束、通航最低水深强制约束和重点污染物总量控制等非常复杂多样的多目标非线性规划数学问题。在解决如此高维且约束强烈的优化问题的过程中,基于特定的流域水利工程系统本身特有的拓扑结构特点、数据可靠程度及模型求解时效性的需求,灵活选择或配合适当的混合整数线性规划的调度操作决策变量进行离散的最优描述,或采用具备极强全局搜索能力的元启发式算法进行调度方案的搜索,并跳出局部最优解的怪圈,在大量搜索可行解的空间中较为快速逼近帕累托最优前沿解集。最近具有创新意义的研究是将强化学习智能体深度嵌入调度决策环路的结构和内容体系中<sup>[4]</sup>,建立马尔可夫决策过程模型,描述调度系统本身的状态迁移过程和调度操作行为对系统带来的奖励回馈机制之间的关联,并借助深度学习模拟技术构建高阶映射价值函数的评估模型,逐步迭代,使调度智能体在海量的历史调度样本和仿真模拟数据经验中逐步获取最优的调度方案和规则,最终构建具有自行持续进化能力的智能化调度决策策略。

### 2.2 实时与预见期融合驱动的调度算法开发

考虑到现实调度过程中可能出现的调度状态与当前及未来实时监测的信号特征及时响应的关系,算法开发设计上需要引入预见性调度与滚动优化实时执行的新型算法组合方案。其中,预见期调度需要依据精细化格点数值降雨预报的降雨量空间分布预报值,驱动网格精细化分布式水文模型对未来1~7天内控制断面的流量变化过程进行多概率集合预报计算;基于预报结果的水文系统变化波动特征,前瞻性设计出最佳的控制水库的水库放流量总指标数、最佳的水库放水时机控制策略以及最佳的水库流量过程线的控制形态方案,并且将最优方案细化分解为电站或闸坝的精细化调度运行操作指令束。运行处于实时滚动执行期间,需要实时对比分析预先设计的预见期调度方案与出现的流域水文预报监测数据流的系统性误差水平,一旦发现此系统性误差值超出预先容错的误差阈值容许界限,则立刻触发调度模型自动滚动修正优化功能,加载最新实时的实测数据流作为新的初始条件重置模型边界约束条件,重新滚动优化修正后续调度执行期间的精细化调度操作指令集。如此“预报-决策-执行-反馈-再决策”自适应校正环路闭环结构模式的调度系统,增强了调度指令应对水文动态不确定性及突然不确定性扰动事件的快速响应性和自适应性,调度系统更加具有真实性鲁棒性的稳定可靠性<sup>[5]</sup>。

### 2.3 多目标协同约束下的优化方案精细生成

川渝三峡库区动态调度需要在生态需水满足率这一首要目标指导下还要在满足经济需水、电力发电效益损耗率、特殊调度运行等其他重要目标空间维之间的客观竞争和冲突及权衡方面进行合理处理,这是应用动态调度策略落地的实质。就技术环节而言,首先采用严格定义表达的非劣解选择方法明确帕累托前沿面特性,在遵循流域具体所持有的特殊决策价值观的基础上选择合适的应用多属性效用函数类型来进行各调度方案的多目标综合效益集成排序,在此之后将生态需水保障目标作为立

法优先级约束处理, 强制要求干流各水库在枯期某些关键性生态敏感时段, 无条件保证控制断面强制基流量要求以立法化保障其生态需水优先性不可被侵犯和突破。在可能发生极端低枯水年内所有目标不可行冲突情境下, 必然需要引入基于风险决策的分级预案方法设计, 根据来水实况恶化情况开启不同层级的风险处理预案链, 确保极端低枯水年内维持生态功能最糟糕情况下避免出现不可逆转的崩溃损害。

#### 2.4 动态调度策略的实施流程设计与风险控制体系

一是高效有序落实复杂动态调度策略必须有规范、精简、职责分明的调度流程制度体系, 核心在于组建以水利工程管理机构牵头、环境保护部门深度参与、渔业和林业部门、主要取水户代表列席配合的跨部门联合调度决策协调机构, 拆掉陈旧管理条块分割引起的人为决策障碍; 二是构建覆盖调度全流程制度保障体系, 主要包括年度动态生态调度方案滚动编制规程、调度方案旬或月动态编制技术审查细则、调度方案水库电站闸控机组实时生成签发执行反馈监督规程、涉水突发事件应急调度联动应急预案规程, 以及调度效果后评估制度化的实施流程等。三是运用调度自动化远程监控系统与调度决策支持系统平台, 为调度方案编制、调度指令生成审批签发自动转发闸控机组与执行过程跟踪反馈全流程提供智能化业务流程链; 四是重视极端事件情景下调度应急响应能力研究, 系统性制定调度规则、响应阈值确定和调度措施策划, 重点对预报特大洪水水库防洪错峰调度应急预案、极端连续干旱枯水期和应急取水水源优化利用优先排序表等具体处置技术导则规程制订, 从而适应系统面临多重极端复合风险冲击应对提升调度系统韧性。

#### 2.5 动态调度策略综合效益多维度评估体系构建

量化分析生态基流综合利用调度措施对复合生态系统的调控有效性, 需要从水生态系统的角度综合考虑水生态改善程度、生态恢复响应效率、经济社会影响等指标。水中生态指标主要考虑调度过程中的重要控制节点实测流量过程与调度所确定的重要生态流量要求曲线的相关性指标、特定生态敏感期过程流量达标日数、河流断流天数实际数量等主要反映表征指标。生态系统恢复响应效率主要结合实际开展鱼类早期资源调查分析调查期的主要受保护生物种类的数量恢复比变动值、对某一重要生境——底栖动物开展多样性指数分析生境条件的变化规

律、利用较高分辨率的遥感卫星解译结果对两岸植被恢复覆盖率指标反映、通过对河流底质微生物状况调查, 反映河床底质稳定恢复状况等技术手段; 社会经济指标主要考虑对实施调度措施直接造成的农田灌溉等基本口粮用水保证程度提高百分数、服务范围主要城市的供水基本工程缺水安全系数下降幅度、梯级电站年电力电量损失率或损失量准确指标测算结果以及对非常规水源的节约成本总量指标等。

### 3 结语

本文基于建立水文-生态耦合模型体系、智能优化算法以及协同决策等为一体化的生态基流动态调度策略总体构架, 克服了常规静态阈值保障模型本身存在的硬性僵化问题, 综合了水文站监测实时值、高分辨率预见期预报值以及生态敏感时段智能确定成果等多重驱动因子, 通过多目标约束求解机制动态制定适应于生态保护刚性需求与经济用水可持续的水库闸坝群协同优化调度决策指令序列。下一步将基于生态保护需水驱动模型多尺度耦合建模理论创新性、不确定性干扰下的鲁棒调度决策新算法的创新、流域治理主体协同机制体制创新改革成效创新性研究, 进一步提升生态基流保障策略智能化、自适应以及制度化创新实践境界。

#### [参考文献]

- [1]黎世苻,王先锋,赵林春,等.河道生态基流保障调度探讨[J].水利技术监督,2023(5):46-48.
- [2]王子尧,左其亭,巴音吉,等.基于SWAT和STIRPAT模型的沁河流域生态基流保障及人为影响因素[J].南水北调与水利科技(中英文),2024,22(6):1119-1128.
- [3]朱博.水利工程生态基流保障技术与调度优化策略[J].陕西水利,2025(08):59-61.
- [4]李严慈.基于GWAS模型面向洛河流域生态基流的水资源合理配置研究[D].石家庄铁道大学,2023.
- [5]王小雨.水利工程生态基流保障机制与生态调度优化模型研究[J].新城建科技,2025(12):119-121.

#### 作者简介:

宋蕊(1987—),女,汉族,陕西周至人,本科,中级职称,研究方向:水量调度与生态输水。