

人鱼博弈视角下基于外部性的水库群生态调控理论

王 浩¹, 高 宇²

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:针对流域水库群兴利减灾与生态保护的协同难题,引入外部性量化机制与三次博弈框架,提出了人鱼博弈视角下的水库群生态调控理论。首先,揭示了水库调度与鱼类生存并非零和博弈的本质特征,明确了人类在最大限度满足自身发展需求的同时,可通过将生态负外部性控制到最小并最大化正外部性效应,实现人与鱼类的协同共赢。在此基础上,提出了基于外部性的生态调控三次博弈框架,通过多目标基础均衡、负外部性最小化与正外部性最大化的分层递进优化,实现了复杂博弈问题的三层最优均衡解。最后,从外部性评估、精细化模拟和多目标调度等 3 个层面提出了基于三次博弈的水库群生态调控关键技术。该理论旨在为协调人类发展需求与鱼类生存需求提供理论范式与系统性实践路径,有助于实现生态优先与以人为本的协调统一。

关键词:人鱼博弈;三次博弈;水库群生态调控;外部性

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)05-0001-10

Ecological regulation theory of reservoir groups based on externalities from the perspective of Human-Fish Game//WANG Hao¹, GAO Yu²(1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To address the challenge of coordinating reservoir group operations for human benefits, disaster mitigation, and ecological protection in river basins, this study introduces an externality quantification mechanism and a three-stage game framework, proposing an ecological regulation theory for reservoir groups from the perspective of the human-fish game. First, it reveals that reservoir operation and fish survival are not inherently a zero-sum game, clarifying that while maximizing human development needs, ecological negative externalities can be minimized and positive externalities maximized to achieve a synergistic win-win outcome for both humans and fish. On this basis, a three-stage game framework for ecological regulation based on externalities is proposed. Through hierarchical optimization-multi-objective foundational equilibrium, minimization of negative externalities, and maximization of positive externalities-a three-layer optimal equilibrium solution for complex game problems is achieved. Finally, key technologies for ecological regulation of reservoir groups based on the three-stage game are presented, encompassing externality assessment, refined simulation, and multi-objective scheduling. This theory aims to provide an theoretical paradigm and systematic practical pathway for reconciling human development needs with fish survival requirements, facilitating the harmonization of ecological priorities and human-centered development.

Key words: human-fish game; three-stage game; reservoir groups ecological regulation; externality

水利工程与人类文明发展历程相伴相生,是人类利用自然、改造自然的重要实践。从大禹治水“因水以为师”的顺水而为,到都江堰“水旱从人”的因势利导,再到现代水利工程的系统控制,人类对自然水系统的调控能力和影响愈来愈强^[1]。目前,全球大型水坝(坝高超过 15 m,或坝高超过 5 m 且库容超过 300 万 m³)数量已超过 6 万座^[2],水电装机容量超过 1 400 GW^[3],水利工程灌溉面积超过 3 亿 hm²^[4],不仅支撑了全球 40% 的粮食生产^[5]和

15% 的电力供应^[6],还显著提高了人类对极端水文事件的防控能力,每年可减少 530 亿~960 亿美元潜在经济损失^[7]。然而,水利工程的规模扩张与控制强化的生态代价亦日益凸显,全球长度超 1 000 km 河流中受调控比例已超过 60%^[8],淡水生态系统生物多样性指数较 1970 年下降了 85%,远高于陆地生态系统(69%)和海洋生态系统(56%)^[9],水利工程在推动人类文明进步的同时,对生态环境特别是水生生态系统产生了深远影响。

作者简介:王浩(1953—),男,中国工程院院士,教授级高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wanghao@iwhr.com

通信作者:高宇(1986—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:18610031535@163.com

鱼类处于淡水生态系统食物链顶端,其对水环境变化敏感程度高、群落组成在不同水体间表现出显著特异性,因而其对水利工程干预的响应较为敏感且具有代表性。全球范围内,水利工程对鱼类种群造成的影响主要体现在以下方面:大坝形成的空间阻隔直接影响河流连通性,对坝上、坝下鱼类种群产生分割,阻断或延迟了鱼类洄游,且鱼类通过水轮机或泄洪道时死亡率较高,鱼类多样性、种群数量及特征等受到严重影响,全球范围内已有 383 种鱼类(44%为洄游类)因大坝导致种群数量下降^[10],过去 50 年淡水洄游鱼类减少了 76%^[11];水利工程调控改变了河流水文节律、理化性质和生物地球化学循环等特征,使得鱼类适应的天然流速、水温、理化性质、营养物环境等发生显著变化,如美国科罗拉多河格伦峡谷大坝使下游水温降至 7~12℃,远低于 Humpback Chub 繁殖所需阈值(16℃),导致其种群数量在 1989—2001 年间下降约 50%^[12],长江溪洛渡、向家坝、三峡工程等水利枢纽运行下流量及水温条件的改变对鱼类繁殖期、繁殖量、栖息环境等产生明显影响^[13-15];水利工程截留泥沙并改变河流与洪泛区的自然水交换过程,全球已有近 50%的河流受人工调控影响产生不同程度的栖息地破碎化^[16],造成天然河流涨落和泥沙沉积作用下的下游洪泛区破碎化和三角洲流失,从而破坏鱼类产卵、觅食和育幼的关键栖息地^[10,17]。水利工程对鱼类的影响在全球范围内已显著存在,开展生态调控以降低对水生态的不利影响,成为探寻人类发展与鱼类保护平衡点的重要方法与实践。

以水库生态调度为核心的水利工程生态调控体系已在全球范围内形成广泛实践。生态调度通过优化工程运行方式,在考虑水利工程运行经济社会需求目标的前提下,尽可能满足包括鱼类在内的水生生物不同生命阶段所需的水动力条件、湿地植被生长水分需求和漫滩过程、河流输沙用水、河口适宜盐度维持需求等^[18]。典型的生态调控包括生态环境流量补给^[19-20]、水温调控、人造洪峰等,与之配套的工程措施包括连通性恢复(如鱼类过坝设施,包括鱼道、升鱼机、集鱼放流等,用于辅助鱼类洄游)^[21-22]、生境评价与补偿修复(如水生态及栖息地健康评价与修复^[23-25]、支流拆坝^[26]、人工繁育放流^[27])等,共同构成水利工程运行下的鱼类保护基本技术体系。目前,全球生态调度实践已取得积极成效,如三峡工程连续 12 年开展“四大家鱼”产漂流性卵鱼类繁殖生态调度试验,2022 年宜都江段产卵量达 89 亿颗(试验前年均不足 10 亿颗)^[28-29];美国科罗拉多河格伦峡谷大坝通过人造洪峰试验成功

恢复了 Humpback Chub 种群数量^[30];澳大利亚墨累河休姆水库通过恢复特定中小型洪水过程成功促进了本地金鲈和银鲈产卵和种群恢复^[31]。然而,现有生态调控在以下 3 个层面仍存在明显不足:科学认知层面,当前研究对河流生态系统的复杂性、非线性交互和阈值效应认识有限,难以全面把握不同水文因子对鱼类生命周期各阶段的综合影响;技术实践层面,现有调控多基于单点、单维度调控,难以应对复杂河流生态系统的整体性需求,缺乏跨尺度、多要素的综合调控能力与技术,特别是在梯级开发流域中,碎片化单点调控难以形成系统性生态效益,也无法适应变化环境下的日益复杂的水文情势与生态需求^[32-33];优化决策层面,现有调控实践缺乏有效量化和调控水利工程生态外部性的机制,特别是调控对自然流态的干扰(负外部性)和适宜生境的营造(正外部性)难以纳入多目标决策权衡过程。这些不足反映了当前生态调控范式的本质局限——将生态需求作为工程服务人类的附属考量,尚未改变以人类为主体的自然水系统开发利用逻辑,亟须构建一种新的理论框架,将人类和鱼类视为平等的水系统使用者,通过系统性多层次博弈实现“人-鱼”双主体和谐共生。

针对现有生态调控范式的局限,本文提出“人鱼博弈”全新视角,将生态调控视为人类与鱼类围绕水系统的双主体博弈过程。人鱼博弈视角从调控的基本立场层面出发,摒弃“人类优先”、排他的单向度思维,将人类发展权与鱼类生存权置于平等地位,建立经济-社会-生态多维平衡的决策框架。在此基础上,本文引入外部性理论,将水利工程调控行为对鱼类栖息环境的影响明确界定为生态外部性,包括改变天然流态造成的负外部性和主动创造适宜生境的正外部性,为人鱼博弈提供量化评价指标,从而提出基于外部性的“三次博弈”水库群生态调控理论框架,构建分层递进的博弈均衡体系:一次博弈聚焦多目标基础均衡,确保防洪、发电等刚性需求的同时保障鱼类基本生存阈值;二次博弈追求负外部性最小化,通过量化控制水文畸变程度,最大限度减少水库调度对自然流态的扰动;三次博弈致力于正外部性最大化,主动塑造生境适宜度,促进鱼类种群恢复与生态系统功能提升。为支撑三次博弈理论应用,需综合发展外部性评估技术、精细化模拟技术和多目标调度技术三大关键技术,形成人鱼博弈视角下基于外部性的水库群多维均衡生态调控理论-方法-技术的完整体系。该体系以人鱼平等博弈为核心创新,契合人与自然和谐共生的生态文明建设理念,将弥补现有生态调度理论体系在多主体决策机

制方面的不足,为水库群生态调控与管理提供新理论框架、量化方法与实践指导,推动流域水与生态治理从单一目标优化向多元价值协同转变。该体系不仅可为复杂河流系统中人类需求与生态保护的博弈平衡提供科学支撑,也为我国大型流域生态保护与修复实践提供新路径与方法,是构建尊重自然、顺应自然的流域生态管理模式的新尝试与新探索。

1 人鱼博弈内涵分析

生态调度作为协调人水关系的关键技术手段,其本质是人类发展诉求与鱼类生存需求在有限资源约束下的动态博弈过程。这种博弈既存在目标冲突的对抗性,又具备共生的耦合,形成了具有复杂反馈特征的“胁迫-适应”系统。本章从权属关系、利益平衡、代际伦理 3 个维度,系统解构人鱼博弈的内在逻辑机理。

1.1 人类发展权与鱼类生存权博弈

人类对河流水资源的开发利用,必然导致生境的结构性改变,这种改变直接作用于鱼类生存的水文情势与栖息环境,因此存在人类发展权与鱼类生存权的博弈。人类发展权是指人类追求经济增长、社会发展和生活水平提高的权利,其中,水资源的利用贯穿经济社会发展的各个方面,而水库群的建设与调度在其中发挥着重要作用:防洪层面,水库群通过调蓄洪水降低下游洪涝风险,保障沿岸居民生命财产安全;供水层面,依托水库调蓄和跨流域水量调配解决水资源时空分布不均问题,确保城乡居民生活用水与工农业生产用水需求;发电层面,水力发电是清洁能源的重要来源,也对区域经济发展和能源结构优化有积极作用。鱼类生存权是指鱼类在自然环境中拥有生存、繁殖和维持种群健康的基本权利,该权利能否实现取决于以产卵场、索饵场和越冬场为核心的生境格局。在繁殖阶段,产卵期鱼类需在特定生境条件完成产卵行为,如洄游性鱼类依赖水系的连通性从栖息地向产卵场迁移,底栖鱼类需要稳定的河床结构与适宜水流维持生存环境,鱼卵孵化与幼鱼发育阶段则对底质稳定性、水温、水位波动和流速等环境条件尤为敏感;进入索饵期,充足的食物资源与适宜的水域结构共同构成了鱼类育肥生长的基础;越冬期鱼类则需要温暖、流速较缓的深水区来御寒或捕食。

水资源的过度开发可能对鱼类的生存环境造成威胁,水库防洪调度导致长期高水位运行,发电调峰引发日内流量骤变,过度引水发电和灌溉取水造成生态基流匮乏等,均可能致使河流水文节律发生改变,甚至造成河道断流,鱼类产卵场萎缩、栖息地退

化,进而导致鱼卵孵化率和幼鱼存活率下降,食物链破坏,种群衰退甚至灭亡;而严格的生态调度要求又会限制人类对水资源的开发利用,影响社会经济效益。因此,人类发展权与鱼类生存权的博弈,本质上是水资源经济效用与生态服务功能的权衡,核心在于如何在确保经济发展与水资源高效利用的同时,构建可持续的水生态保护机制,实现人与自然的共生共赢。

1.2 长期利益与短期利益博弈

人鱼博弈不仅存在于权属层面,深层次的矛盾在于:作为生态系统的共生单元,人类与鱼类的命运通过水循环过程紧密交织,短期内以牺牲生态为代价获取的经济效益,长期可能被生态系统反噬,影响长期效益的发挥,这就是长期利益与短期利益的博弈。

长期利益注重长期的生态保护与资源可持续利用,强调生态系统的完整性和可持续性,注重维持水生态健康、保护生物多样性,确保资源的长远利用价值。从鱼类角度来看,鱼类不仅是水生态系统中的生物成员,更是维持水生态稳定的重要调节者。长期利益就是在保护鱼类及其生境的前提下得到效益,其导向下的生态调度需要考虑生物多样性保护、流域韧性增强等长远收益。短期效益则主要集中在满足即时经济需求,人类活动优先服务于当年社会经济增长需求,往往忽略生态系统健康与稳定,使其受到栖息地破坏、水环境污染等影响。短期利益驱动下的水电密集开发、农业超量取水等行为,虽能快速提升经济指标,却可能导致鱼类栖息地碎片化、产卵场萎缩和洄游通道阻断,威胁鱼类的生存与繁衍,进而造成关键种群的衰退甚至局部灭绝。鱼类作为水生态系统物质循环与能量流动的重要环节,其种群衰退将直接引发食物网结构紊乱、物种间关系失衡,造成水生生物多样性下降,进而削弱生态系统的自我调节能力,最终反噬到人类社会饮水安全及流域整体韧性。

人类与鱼类共处于同一个生态系统之中,是难以分割的命运共同体,水生态的健康决定了社会发展的可持续性,因此,短期利益与长期利益,也就是短期经济目标与长期生态保护之间的平衡,不只是鱼类生存的问题,而是关乎人类自身发展的关键抉择。

1.3 当代利益与世代利益的博弈

在水资源开发与生态保护的过程中,人鱼博弈除了短期与长期利益的权衡,还涉及更长时间尺度上的代际公平问题,即当代利益与世代利益的博弈。

当代利益注重经济发展、基础设施建设和资源

的快速利用,以满足当代需求,如最大化水资源利用以支持农业、工业、能源等领域的发展,同时利用渔业资源进行捕捞、养殖、市场交易等,创造经济价值。世代利益则关注生态系统的长期健康和稳定,确保未来世代可以持续享受自然资源和生态系统服务。水资源和生态系统不仅属于当代,也属于未来世代;从当代利益的角度来看,水库调度与渔业开发往往服务于当前经济增长目标,如利用水库调节流量来促进渔业养殖、大规模捕捞经济鱼种以满足当前经济社会发展的高需求。从世代利益的角度来看,鱼类不仅是生态系统的关键组成部分,还是人类依赖的重要经济和生态资源,其可持续性直接关系到后代人的生存与发展。然而,当代的过度发展可能超出生态系统承载能力,破坏生态系统服务功能,如过度捕捞、破坏鱼类产卵场,可能导致鱼类种群衰退,影响生态系统的健康状态,使后代人面临渔业资源枯竭、生态系统退化的困境,对世代生态健康和资源安全构成严重威胁。

当代人如何利用水资源和渔业资源,将决定未来世代是否还能享有健康的生态环境与可持续的渔业资源。因此,当代利益与世代利益的博弈,关键在于水资源和鱼类资源的合理利用。当代人不能只关注短期的经济增长,而应承担起生态责任,为世代留下健康的水生态环境和稳定的渔业资源。

2 基于外部性的水库群生态调控三次博弈理论

2.1 水库群生态调度外部性

外部性是指某种行为或决策对未直接参与该行为或决策的第三方所产生的影响,这些影响可以是

积极的(正面)或消极的(负面)。按照影响的方向,外部性分为正外部性与负外部性。正外部性是指某行为或决策对第三方产生了积极的、有益的影响,而负外部性是指其对第三方造成了消极的、不利的影响。水库群生态调度作为人类干预自然水循环的核心手段,其对鱼类及其生境的影响呈现出显著的双向外外部性,如图 1 所示。外部性既包含对生态系统的负面冲击(生态负外部性),也包含潜在的积极改善(生态正外部性)。本节从正负两方面系统分析水库调度的外部性特征。

2.1.1 生态负外部性

生态负外部性主要指水库群调度过程中对生态系统造成的不利影响,这种负面效应体现在多个方面。首先,水库群调度改变了河流的天然流态和水文特性,导致水位和流量剧烈波动,破坏了原生栖息地。鱼类及其他水生生物在长期适应自然流态的过程中形成了稳定的生境条件,水库群调度使得流态偏离了天然状态,其洄游通道、产卵场所以以及幼鱼生长环境均受到严重干扰。其次,水库形成的静水环境易造成营养物质富集,引发藻华现象,不仅会显著降低水体中溶解氧含量,威胁鱼类和其他水生生物生存,还可能因有毒藻类释放毒素在食物链中累积,危害整个生态系统的健康。再次,水库群调度引发的泥沙淤积与河床侵蚀问题亦不容忽视,下游河道因泥沙补给减少而发生河床侵蚀,进而影响河道稳定性,削弱其航运、防洪等功能,并对依赖河流生态系统的动植物造成连锁负面影响。此外,水库群调度运行还可能引起局地微气候变化,例如夏季水温升高可能缩短某些冷水性鱼类的产卵期,降低其繁殖成功率。上述因素共同作用,削弱了生态系统的

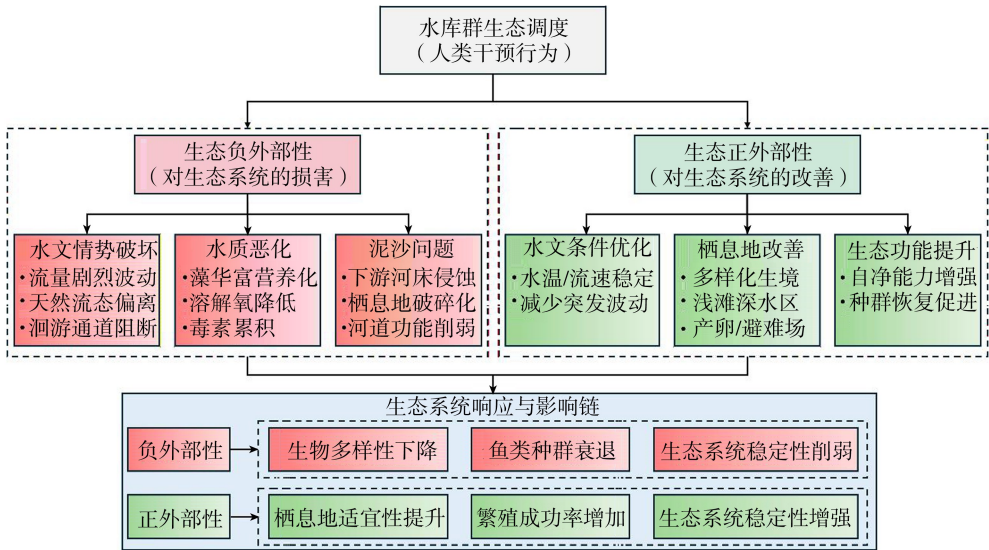


图 1 水库群生态调度外部性示意图

Fig. 1 Diagram of reservoir groups ecological regulation externalities

整体稳定性与健康水平,进而对整个水生生态系统的结构与功能构成威胁。

2.1.2 生态正外部性

生态正外部性主要体现为水库群调度在合理调控下对生态环境的改善作用。通过科学调度,水库不仅可以调节水文条件,使水体温度和流速保持在相对稳定的范围内,还能扩大水域面积,为鱼类提供更多样化的栖息环境。在适当的调度策略下,水库可以构造出多层次、多功能的水体结构,如浅滩区和深水区的合理分布,为鱼类提供产卵、觅食和避难的理想场所。与此同时,调度活动能够优化水文条件,减少突发性水流波动对鱼类生境的不利影响,从而提高鱼卵孵化率和幼鱼存活率。此外,通过调控水库水位,促进水生植被的生长,不仅改善了水质,也为生态系统提供了自然净化功能,使整个水域生态系统朝着更健康、更稳定的方向发展。生态正外部性的形成,意味着在满足工程多目标要求的同时,调度策略能够最大限度地发挥生态系统自我恢复和保护的功能,实现人类利用与生态保护之间的良性互动。

2.2 三次博弈理论

传统的生态调度理论多以人类为中心,聚焦于经济效益、防洪安全和供水保障等目标,而对鱼类生存需求的考量往往停留在表层约束条件,缺乏系统性理论支撑。针对此问题,本文提出基于外部性视角的三次博弈理论,通过对生态负外部性最小化和生态正外部性最大化的多层次均衡分析,探索人鱼关系的最佳均衡点,其框架如表 1 所示。这一理论不仅是对传统多目标调度范式的突破,更是对生态系统共生逻辑的深度重构,具有显著的理论创新性和实践指导意义。本节将详细阐述三次博弈理论的内涵、逻辑机理及其实现路径。

2.2.1 一次博弈

水库群生态调控本质上是一个多维多目标博弈问题,其复杂性源于参与主体的多样性,目标的冲突性以及资源约束的有限性。在梯级水库群中,各水库围绕防洪,发电,供水,航运和生态保护等多个目标展开竞争博弈,同时受到水量调配、水位控制等策略维度的约束。设水库群包含 n 个水库,每个水库

i 在 m 个策略维度(如水量,水位等)上制定策略,记为 $s_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{im}\}$,其中 $i=1, 2, \dots, n$ 。所有水库的策略集合可表示为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 。每个水库的收益函数不仅依赖于自身策略,还受到其他水库策略的耦合作用,因此第 i 个水库的收益向量可表达为

$$U_i(S) = (u_{i1}(S), u_{i2}(S), \dots, u_{iL}(S)) \quad (1)$$

式中: $u_{ik}(S)$ ($k=1, 2, \dots, L$) 为第 i 个水库在第 k 个目标(如防洪,发电,生态等)上的收益值; L 为目标数量。当 $L=1$ 时, $U_i(S) = (u_{i1}(S))$ 退化为一个标量,问题简化为多维单目标博弈;当 $m=1$ 时,每个水库的策略 $s_i = \{s_{i1}\}$ 退化为单变量,表现为多目标单变量博弈。在实际水库群调度中, $L>1$ 且 $m>1$, 博弈呈现高度非线性与多目标耦合特征,导致均衡解的求解需综合考虑多维策略空间与多目标间的权衡。

一次博弈的目标是在各水库完全理性假设下,通过充分竞争达成多目标均衡解,即在满足生态阈值(如鱼类生存所需的最小流量、适宜水温等)的前提下,优化防洪、发电、供水等人类需求。假设生态阈值约束为 C_e , 则博弈的数学表达为

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^n U_i(S) \\ \text{s. t. } g(S) \geq C_e \end{cases} \quad (2)$$

式中: $g(S)$ 为生态约束函数,衡量策略集合 S 下水文条件对鱼类生存的保障程度; $\sum_{i=1}^n U_i(S)$ 为所有水库收益之和。由于博弈结构的复杂性、信息不对称及参与方的有限理性,一次博弈的均衡解往往不是唯一的,呈现出多样化的非劣解集(Pareto 前沿),例如,在防洪优先的情景下,可能牺牲部分发电效益以保障下游安全,而在发电优先的情景下,则可能通过调峰操作影响生态流量。这种多样性为后续精炼提供了基础,但也增加了决策的复杂性。

一次博弈的核心贡献在于初步界定了人鱼博弈的多目标竞争边界,为生态调控提供了可行解空间。然而,其局限性在于未能充分考虑生态外部性的动态反馈效应,仅将生态保护作为静态约束,未能在理论上实现人类与鱼类需求的深度耦合。因此,需要

表 1 水库群生态调控三次博弈理论框架

Table 1 The three-stage game theoretical framework of ecological regulation for reservoir groups			
核心前提	理论要素	数学表达	基本特征与目标
多主体利益冲突	一次博弈	$\max \sum U_i(S) \quad \text{s. t. } g(S) \geq C_e$	基础均衡;满足系统基本需求
存在可量化外部性	二次博弈	$\min E^-(s) \quad \text{s. t. } s \in S_{1j}$	损害控制;减少行为对系统的被动伤害
系统行为收敛	三次博弈	$\max E^+(s) \quad \text{s. t. } s \in S_2$	效益提升;主动创造系统的增值效益

注: E^- 为负外部性函数; S_{1j} 为一次博弈解集; E^+ 为正外部性函数; S_2 为二次博弈解集。

通过二次博弈进一步精炼结果。

2.2.2 二次博弈

一次博弈的多目标均衡解集为后续优化提供了丰富的候选方案,但其解集规模庞大且均衡不唯一,导致实际应用中的决策困难。多目标博弈的 Pareto-Nash 均衡通常难以保证唯一性,甚至可能形成一个较大的均衡集。为解决这一问题,传统研究通过弱 Pareto-Nash 均衡的稳定性分析、策略集扰动或标量化方法对均衡集进行精炼。然而,在水库群生态调控的复杂场景中,这些方法的效果有限,尤其是在生态外部性未被充分量化时,均衡解精炼的精度和适用性受到制约。

二次博弈的创新在于引入生态负外部性作为精炼准则,旨在从一次博弈的非劣解集中筛选出对生态系统破坏最小的均衡解。生态负外部性是指水库调度对鱼类生存环境的不利影响,如水文节律改变,栖息地碎片化,产卵场萎缩等。定义负外部性函数 $E^-(s)$ 为生态调控下的流态对天然流态的偏离程度,负外部性的大小反映了水库调度对鱼类生存环境的胁迫强度。

二次博弈的具体步骤如下:

- a. 获取一次博弈结果并初步筛选:从一次博弈的非劣解集中剔除明显不合理的方案(如违反物理约束或生态阈值的解),得到候选解集 S_1 。
- b. 负外部性聚类分析:对 S_1 中的每个解计算 $E^-(s)$,根据负外部性值进行聚类分析,划分为若干子集 $\{S_{1,1}, S_{1,2}, \dots, S_{1,p}\}$ 。
- c. 子集精炼与选择:对每个子集 $S_{1,j}$ 计算负外部性的算术平均值 $\overline{E_{1,j}^-} = \frac{1}{|S_{1,j}|} \sum_{s \in S_{1,j}} E^-(s)$,选择 $\overline{E_{1,j}^-}$ 最小的子集 S_{1,j^*} 作为二次博弈的结果,记为 S_2 。

二次博弈的理论逻辑在于,通过聚焦生态负外部性,将多目标博弈的多维冲突转化为单一维度的优化问题,从而显著缩小均衡解集的规模。例如,在某流域水库群调度中,一次博弈可能生成数百个非劣解,涵盖不同防洪—发电—生态组合,而二次博弈通过聚类分析,可能将解集精炼至 10~20 个负外部性较低的方案。这种精炼不仅提高了决策效率,还在理论上强化了生态保护的优先级,为人鱼博弈的平等化提供了重要支撑。然而,二次博弈仅关注负外部性最小化,未充分挖掘调度对生态系统的正向贡献。因此,需要通过三次博弈进一步优化均衡解。

2.2.3 三次博弈

三次博弈是对二次博弈结果的进一步精炼,旨在从负外部性最小的子集中筛选出生态正外部性最大的确定解,从而实现人鱼博弈的最佳均衡点。生

态正外部性是指水库调度对鱼类生存环境的积极影响,如通过优化流量释放恢复水文连通性,提升鱼类产卵成功率或扩大栖息地范围。定义正外部性函数 $E^+(s)$ 为调度策略 s 对鱼类生存空间的改善程度,正外部性的大小反映了调度对鱼类种群健康和生态系统稳定的促进作用。

三次博弈的具体步骤如下:

- a. 获取二次博弈结果:以 S_2 作为输入,保留负外部性最小的候选解集。
- b. 正外部性评估:对 S_2 中的每个解计算 $E^+(s)$,评估其对生态系统的正向贡献。
- c. 最优解选择:在 S_2 中选择 $E^+(s)$ 最大的解 s^* 作为三次博弈的最终结果,即人鱼博弈的最佳均衡点。

三次博弈的理论创新在于将正外部性与负外部性相结合,构建了一个三重优化的博弈框架,其核心目标是 minimized 生态破坏的同时最大化生态效益,从而实现人类发展与鱼类生存的动态平衡。

3 基于三次博弈的水库群生态调控关键技术

3.1 外部性评估技术

外部性评估技术是支撑三次博弈理论实施的基础环节,其核心任务是定量刻画水库群调控对生态系统造成的双向效应,包括对鱼类及其生境的不利影响(生态负外部性)与潜在增益(生态正外部性)。合理构建外部性评估体系,不仅是区分调度策略生态优劣的关键手段,也是实现“负外部性最小化与正外部性最大化”双重优化目标的必要条件。相较于传统调度评估侧重水量、经济效益等人类目标指标,外部性评估更加强调从鱼类生境视角出发,综合反映水文情势变异、生境可达性、水体质量与水动力条件等生态要素的系统性变化。

生态负外部性评估的核心任务是量化调度对生态系统结构与功能造成的损害程度。传统方法通常以模拟或还原的天然流态作为生态健康的基准参照,通过计算实际调度流量过程相对于该基准的偏差,并结合鱼类特定敏感时期(如繁殖期、幼鱼育幼期)赋予时序权重,构建反映流量过程偏离程度的综合扰动指数。这类基于水文情势偏离的评估方法能够有效识别流量涨落规律改变、脉冲事件消失或畸变等对生境稳定性的扰动,为二次博弈中筛选“负外部性最小化”方案提供基础支撑。然而,需要认识到,单一依赖流量维度的评估存在显著局限性,无法充分捕捉调度行为引发的多维度复合生态胁迫效应,如水温的剧烈波动(影响鱼类代谢与繁殖生

理)、流速场的突然改变(破坏鱼卵附着或幼鱼索饵行为)、关键水质参数(如溶解氧、营养盐)的恶化趋势,以及关键栖息地斑块(如产卵场、索饵场、越冬场)之间生态连通性的断裂(阻碍鱼类洄游、基因交流与种群补充)。为克服这一局限,负外部性评估须拓展为涵盖多维度影响的综合框架,即在基础流量偏离分析基础上,进一步量化对基流保障程度、涨落速率、洪水脉冲频率与历时等敏感水文指标的系统性改变;重点评估因调度导致的栖息地连通性损失程度;同时系统评价调度对水体理化环境(特别是溶解氧、水温稳定性、营养水平)的负面影响及其导致的鱼类生存适宜度下降。最终,通过加权融合上述水文变异、栖息地连通性损失及水质劣化等多维度评估结果,形成综合负外部性指数,该指数值的高低直接表征调度方案对生态系统整体破坏性的强弱,其权重构成可根据特定流域的生态特征和保护目标鱼种的敏感需求进行动态调整。

生态正外部性评估则着眼于量化调度策略对鱼类栖息环境与生态系统功能产生的积极改善效应。其评估需超越对简单水量增减或栖息地面积变化的度量,深入衡量调度对鱼类关键生命过程(如繁殖行为触发、幼体存活与生长)以及生态系统长期恢复力的实际促进作用。核心评估内容包括:调度期总水量相对于天然状态的增益比例,反映其对潜在生存空间的扩展能力;人造洪水脉冲的模拟效能,重点评估洪峰流量强度、有效维持时间及其与目标鱼类自然繁殖窗口期的同步程度,以衡量成功激发产卵行为的可能性;栖息地质量增益率,基于水动力-水生态耦合模型模拟,计算调度后相对于天然状态的高适宜度栖息地(满足特定水深、流速、底质、遮蔽条件)面积的变化率——需要特别强调的是,该指标数值具有双向属性:正值表征调度主动创造或显著提升了高质量栖息地的比例,是核心正外部性的体现;负值则表明栖息地质量发生退化,其反映的损害效应应归属负外部性评估范畴;此外,还应评估调度对关键生态过程的直接促进效能,如量化人造洪峰对特定鱼类产卵行为的实际触发成功率;以及评估调度对生态系统长期恢复力的贡献,如评估调度优化水流条件对提升水体自净能力或维持生物多样性潜力的作用。最终,通过加权整合反映主动增益的指标(其中栖息地质量增益率仅计入其正值部分),构建综合正外部性指数,该指数值的高低直接反映调度方案对生态系统功能的主动改善和提升作用的显著程度。

该评估技术体系的有效实施可显著提升对水文过程、流场结构、水质参数时空演变以及栖息地适宜

度动态的表征精度,使生态响应评估得以从静态指标迈向动态过程模拟,极大地增强评估结果的可靠性和适用性。在二次博弈阶段,通过比较不同调度方案的综合负外部性指数,筛选出对生态系统扰动最小的方案集;在三次博弈阶段,依据综合正外部性指数,从方案集中确定能够最大化生态效益的最终调度解,由此形成“评估—反馈—优化”的闭环调控机制。这种覆盖多维度生态影响的综合量化框架,以及对评估指标属性的清晰界定与应用规则,为三次博弈理论中精准度量生态损益、最终实现负外部性最小化与正外部性最大化的核心目标,提供了坚实的科学基础和可操作的决策支持工具。

3.2 精细化模拟技术

水库群生态调控的核心矛盾之一在于流域生态系统的整体性、连续性与传统调控手段的离散性、局部性之间存在根本冲突。传统以水文断面监测数据为基础的调控模式,本质是通过有限的空间采样点来反演流域整体状态,这种“以点代面”的简化方法存在显著的生态表征缺陷:其一,断面数据仅能反映一维线性水文过程,无法捕捉水体三维动态特性(如垂向分层流、横向环流等)及其对鱼类栖息地的多维度影响;其二,离散化的监测网络难以量化水库群联合调度产生的生态累积效应和时空叠加影响,特别是对于长距离洄游鱼类的关键生境连通性评估存在盲区;其三,现有技术体系缺乏对极端气象事件与复杂水力响应耦合机制的动态预判能力,导致生态调度在气候变化背景下的适应性不足。而现代生态学研究表明,水生生态系统作为有机整体,其物质循环与能量流动具有显著的空间异质性和时间累积性特征,鱼类对水生生境的需求呈现连续、立体、动态的特点,特别是产卵场、索饵场等关键生境的局部破坏往往通过食物网传递引发种群级别的不可逆衰退。因此,构建覆盖“大气-陆地-水体”全要素、贯通“预报-模拟-评估”全链条的高分辨率气象水文水动力耦合模拟技术体系,成为突破传统调控范式、实现基于三次博弈理论的水库群生态调控的关键科学支撑。

一是发展融合数值预报与人工智能的千米级气象场生成技术。该技术需突破传统模式在降水相态、强度预报上的局限,通过陆-气耦合参数化方案改进边界层过程表征,结合动态降尺度框架将区域气候模式输出降尺度至生态敏感区所需的百米级分辨率。同时,需集成三维卷积神经网络等深度学习方法实现观测数据与模式输出的实时同化,重点提升14 d 预见期内日尺度降水预报准确率至85%以上,温度预报误差控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 范围内,为生态调度

提供高时空分辨率的输入边界条件。

二是建立多物理场耦合的高分辨率水文-水动力-水生态耦合仿真体系。该体系需要融合多源遥感与实测数据构建亚米级河床数字高程模型,精确表征深潭、急滩等微地形特征;开发结构与非结构化网格下的水文-水动力-水生态耦合模型,模拟流速场、溶解氧等生境因子的四维时空演变,定量评估不同调度情景对产卵刺激流量、幼鱼漂流通道等关键生态过程的影响。此外,为满足调度决策的实时性要求,需发展 GPU 并行计算架构,优化三维浅水方程求解算法,通过自适应时间步长控制与区域分解策略,将百米级分辨率的全流域模拟耗时缩短至小时级,实现生态响应的快速反馈与方案比选。

3.3 多目标调度技术

水库群生态调度的调度技术难点在于兴利减灾目标与生态目标的深层次矛盾。传统多目标调度技术已发展出多种理论框架和算法体系,但在人鱼博弈新视角下,方法论层面还存在以下问题:现有调度优化结构将生态目标处理为经济社会目标的约束条件、低权重目标或简单指标聚合,本质上依然是单一主体决策模式,无法真正体现鱼类作为平等博弈主体的地位;传统参数化优化方法难以有效量化调度行为的生态外部性,特别是在区分负外部性(对天然流态的扰动)和正外部性(对适宜生境的主动营造)方面存在短板;水库群级联效应产生的外部性传递机制表现出显著的非线性和累积性特征,限制了传统调度算法的直接应用;三次博弈理论要求调度技术能够支持多层次优化过程,而非传统的单次求解,这需要建立从多目标初始均衡到负外部性最小化再到正外部性最大化的完整技术链。因此,水库群生态调度不应仅是对经济社会目标的简单约束和单次优化,需从静态单次优化向动态多层次优化范式转变,实现生态外部性的精确量化以及与外部性评估、精细化模拟的系统集成,为人鱼博弈提供调度技术支撑。

发展基于外部性的层次化多目标调度技术需要突破传统优化框架的局限,构建分层递进的三次优化结构。该结构需将传统单层优化拓展为“阈值保障→负外部性最小化→正外部性最大化”的递进式决策链。第一阶段在生态基本阈值约束下进行多目标优化,形成满足防洪、发电等刚性需求,同时保障鱼类基本生存权的非劣解集;第二阶段利用外部性评估技术,对初始非劣解进行生态负外部性量化评估,筛选出对天然流态干扰最小的解集;第三阶段通过生态正外部性最大化原则,确定能主动营造适宜生境的最终解。为处理鱼类对水文条件的复杂非线性

性响应特性,需开发生态响应-多目标优化耦合技术,精确刻画调度过程与不同类型鱼类(如漂流性卵和粘沉性卵鱼类)对流量、水温等要素响应的动态关联。针对水库群高维优化难题,需要构建全局-局部分解框架,将系统分解为全局协调层和局部优化层,同时构建跨时间尺度的优化策略,实现年度、季节、日等不同时间尺度的决策协同,确保全周期水库群运行的生态外部性整体最优。

围绕生态调控的动态层次化优化,多目标调度技术需与外部性评估和精细化模拟形成联动机制,构建完整的技术应用流程。首先,多目标调度需接收外部性评估技术提供的天然流态偏离指标,将其转化为优化模型中的目标函数和约束条件,为第二阶段的负外部性最小化提供量化依据;同时接收生境适宜度指标,构建第三阶段的正外部性最大化目标函数,实现生态外部性的可计算表达。其次,多目标调度与精细化模拟技术建立双向耦合,一方面利用模拟提供的能够反映水温分层、流场三维结构、水质演变等特征的立体连续生境数据作为优化求解的输入条件,另一方面将生成的调度方案反馈给模拟系统,评估其对水生态系统可能产生的影响,形成闭环反馈。基于上述联动机制,多目标调度按照系统化流程依次完成初始化非劣解集生成、外部性评估过滤、最终方案优化定解、全局协调与局部分解、多时间尺度均衡等技术环节,确保调度方案能够在满足防洪、发电等人类需求的同时,最大程度减少对自然流态的扰动并主动提升鱼类栖息地质量。作为三次博弈理论的核心执行技术,多目标调度技术可实现从人鱼博弈基本理念到具体水库运行方案的实质性转换,为基于外部性的水库群生态调控提供从方法论到实用工具的全链条技术支撑。

4 结 语

本文通过引入外部性量化机制与三次博弈框架,提出了基于人鱼博弈视角的水库群生态调控理论,为协调人类发展需求与鱼类生存需求提供了创新性理论范式与系统性实践路径。首先,揭示了水库调度与鱼类生存并非零和博弈的本质特征,明确了人类在最大限度满足自身发展需求的同时,可通过将生态负外部性控制到最小并最大化正外部性效应,实现人与鱼类的协同共赢。这一理念突破了传统以人类需求为核心的单向优化逻辑,将人类发展权与鱼类生存权置于平等地位,构建了经济效益、社会福祉与生态保护多维平衡的决策体系。在此基础上,提出了三次博弈理论,通过多目标基础均衡、负外部性最小化与正外部性最大化的分层递进优化,

首次实现了复杂博弈问题的三层最优均衡解,为水库群生态调度提供了科学的理论支撑与操作框架。一次博弈通过多目标均衡奠定了人类需求与生态阈值的共存基础;二次博弈聚焦负外部性最小化,有效控制了水库调度对天然流态的扰动;三次博弈通过正外部性最大化,主动营造适宜生境,促进了鱼类繁殖与生态系统功能的恢复。该理论不仅确保了防洪、发电、供水等刚性需求的满足,还通过精准调控水文情势与生境条件,显著提升鱼类种群健康与生态系统稳定性,从而实现生态优先与以人为本的协调统一。

未来,将进一步扩展基于三次博弈的水库群生态调控理论与技术体系。在理论层面,深化人鱼博弈模型,融入食物网动态、生态系统服务价值等多元维度,构建更全面的博弈分析框架,从而捕捉流域生态系统的复杂非线性特征;在技术层面,加速人工智能、大数据与高精度模拟技术的深度融合,构建水库群自主生态调控智能体,为流域生态环境提供大模型决策支持;在实践层面,以全球典型流域为试点,开展基于三次博弈的生态调度试验,进一步验证理论与技术的适用性与推广价值,并通过政策激励与国际合作,推动该框架在全球水资源管理中的广泛应用。

参考文献:

[1] 王浩,龙爱华,于福亮,等. 社会水循环理论基础探析 I:定义内涵与动力机制[J]. 水利学报,2011,42(4): 379-387. (WANG Hao, LONG Aihua, YU Fuliang, et al. Study on theoretical method of social water cycle I: Definition and dynamical mechanism [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42 (4): 379-387. (in Chinese))

[2] International Commission on Large Dams. World register of dams general synthesis [EB/OL]. [2025-04-11]. https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp.

[3] International Hydropower Association. 2024 world hydropower outlook [EB/OL]. [2025-04-11]. <https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook>.

[4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Land Statistics and Indicators 2000-2021 Global, Regional and Country Trends[R]. Rome:Food & Agriculture Org, 2023.

[5] World Bank. Water in agriculture[EB/OL]. [2025-04-11]. <https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2023/07/26/water-in-agriculture>.

[6] International Hydropower Association. 2023 World

Hydropower Outlook [EB/OL]. [2025-04-11]. <https://www.hydropower.org/publications/2023-world-hydropower-outlook>.

[7] International Hydropower Association. Harnessing the power of dams for flood protection[EB/OL]. [2025-04-11]. <https://www.hydropower.org/blog/harnessing-the-power-of-dams-for-flood-protection>.

[8] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world’ s free-flowing rivers [J]. Nature, 2019, 569 (7755):215-221.

[9] World Wide Fund for Nature. Living planet report 2024 a system in peril[R]. Berlin:WWF Deutschland,2024.

[10] HE F, ZARFL C, TOCKNER K, et al. Hydropower impacts on riverine biodiversity [J]. Nature Reviews Earth & Environment,2024,5(11):755-772.

[11] DEINET S, SCOTT-GATTY K, ROTTON H, et al. The Living Planet Index (LPI) for migratory freshwater fish - technical report [R]. Groningen: World Fish Migration Foundation,2020.

[12] ANDERSEN M E. Status and trends of the grand canyon population of humpback chub:fact sheet 2009-3035[R]. Reston;U. S. Geological Survey,2009.

[13] HUANG Z,WANG L. Yangtze dams increasingly threaten the survival of the Chinese sturgeon[J]. Current Biology, 2018,28(22):3640-3647.

[14] 王康,肖洋,毛劲乔,等. 水温变化影响下金沙江下游典型鱼类繁殖期研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2): 50-55. (WANG Kang, XIAO Yang, MAO Jingqiao, et al. Study on the spawning period of typical fishes in the lower reaches of Jinsha River under the influence of water temperature change[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (2): 50-55. (in Chinese))

[15] 戴凌全,张培培,常曼琪,等. 三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51 (5): 38-45. (DAI Lingquan,ZHANG Peipei,CHANG Manqi,et al. Effect of outflow from Three Gorges Reservoir on spawning habitat of sedentary fish in Dongting Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023,51(5):38-45. (in Chinese))

[16] GRILL G, LEHNER B, LUMSDON A E, et al. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales [J]. Environmental Research Letters, 2015,10(1):015001.

[17] CHEN Q, LI Q, LIN Y, et al. River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures [J]. Reviews of Geophysics,2023,61(4):e2023RG000819.

[18] 王浩,胡鹏. 基于二元视角的河湖生态环境复苏与生态流量保障路径[J]. 中国水利, 2022 (7): 11-15.

- (WANG Hao, HU Peng. Recovery of eco-environment and safeguarding path of ecological flow of rivers and lakes based on binary perspective[J]. China Water Resources, 2022(7):11-15. (in Chinese))
- [19] 侯俊,裴佳琦,黄喻威,等. 基于鱼类需求的息县枢纽工程闸下河段环境流量研究[J]. 水资源保护,2020,36(2):8-12. (HOU Jun, PEI Jiaqi, HUANG Yuwei, et al. Study on environmental flow of lower reach of Xi County hub project based on fish demand[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):8-12. (in Chinese))
- [20] 黄冬菁,李一平,崔广柏,等. 基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法[J]. 水资源保护,2024,40(1):142-148. (HUANG Dongjing, LI Yiping, CUI Guangbo, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1):142-148. (in Chinese))
- [21] 李恒,王晓刚,郑飞东. 梯形断面鱼道内水流的三维特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):61-65. (LI Heng, WANG Xiaogang, ZHENG Feidong. Three-dimensional characteristics analysis of flow in trapezoidal fishway[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1):61-65. (in Chinese))
- [22] 缪婧娴,王晓刚,辛沛,等. 进鱼口水深不足时竖缝式鱼道水力特性及进出口允许最大水深差[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):99-105. (MIAO Jingxian, WANG Xiaogang, XIN Pei, et al. Hydraulic characteristics of vertical slot fishway and allowable maximum water depth difference between inlet and outlet subject to insufficient inlet water depth[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2):99-105. (in Chinese))
- [23] STOFFERS T, COLLAS F P L, BUIJSE A D, et al. 30 years of large river restoration: How long do restored floodplain channels remain suitable for targeted rheophilic fishes in the lower river Rhine? [J]. Science of the Total Environment, 2021, 755:142931.
- [24] 李美萍,段斌,王海胜,等. 大渡河上游某河段鱼类栖息地适宜性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):30-36. (LI Meiping, DUAN Bin, WANG Haisheng, et al. Suitability evaluation of fish habitat for one upper reach of Dadu River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5):30-36. (in Chinese))
- [25] 易雨君,丁航,叶敬吁. 基于生态完整性的水生态健康评价研究综述[J]. 水资源保护,2024,40(5):1-10. (YI Yujun, DING Hang, YE Jingxu. Review of water ecological health assessment based on ecological integrity [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5):1-10. (in Chinese))
- [26] LOVETT R A. Dam removals: Rivers on the run [J]. Nature, 2014, 511(7511):521-523.
- [27] 杨君兴,潘晓赋,陈小勇,等. 中国淡水鱼类人工增殖放流现状[J]. 动物学研究,2013,34(4):267-280. (YANG Junxing, PAN Xiaobin, CHEN Xiaoyong, et al. Overview of the artificial enhancement and release of endemic freshwater fish in China [J]. Zoological Research, 2013, 34(4):267-280. (in Chinese))
- [28] 陈诚,黎明政,高欣,等. 长江中游宜昌江段鱼类早期资源现状及水文影响条件[J]. 水生生物学报,2020,44(5):1055-1063. (CHEN Cheng, LI Mingzheng, GAO Xin, et al. The status of the early-stage fish resources and hydrologic influencing conditions in the Yichang section in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2020, 44(5):1055-1063. (in Chinese))
- [29] 三峡工程公报[R]. 北京:中华人民共和国水利部,2022.
- [30] MELIS T, WALTERS C, KORMAN J. Surprise and opportunity for learning in Grand Canyon: the Glen Canyon Dam adaptive management program [J]. Ecology and Society, 2015, 20(3):22.
- [31] KING A J, WARD K A, O'CONNOR P, et al. Adaptive management of an environmental watering event to enhance native fish spawning and recruitment [J]. Freshwater Biology, 2010, 55(1):17-31.
- [32] 王钦,王银堂,胡庆芳,等. 考虑河道内生态需水与径流情势的水库群优化调度[J]. 水资源保护,2023,39(5):109-117. (WANG Qin, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Optimization of reservoir group operation considering instream ecological water demand and flow regime[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):109-117. (in Chinese))
- [33] 冯平,白粟,张婷,等. 径流变异对滹沱河流域水库生态调度的影响[J]. 水资源保护,2023,39(5):99-108. (FENG Ping, BAI Su, ZHANG Ting, et al. Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5):99-108. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-03 编辑:彭桃英)