

# 水文要素对河湖生态环境的调控效应研究进展

姜翠玲, 许睿亭

(河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 鉴于关键水文要素如水位、流速、流量对河湖生态环境调控的重要作用, 在参考大量国内外相关研究成果的基础上, 结合典型案例, 系统阐述了水位、流速、流量以及水文连通性对水环境和水生生物的影响, 分析了水文要素对生态环境的调控效应。水位通过改变光照强度、泥-水界面的氧化还原条件、生物栖息地面积等, 影响水体和沉积物中污染物的分解转化以及水生植物的光合能力; 流速与流量的变化则通过改变物质输移能力、沉积物状态、水生生物生长和繁殖需求, 影响生物栖息地的适宜性, 具有明显的阈值效应; 水文连通性反映了水文要素之间的协同作用和动态变化过程, 影响水生植被的分布格局以及鱼类的洄游和繁殖行为。最后介绍了相关研究采用的新技术和新方法, 展望了研究的发展动向。

**关键词:** 水文要素; 水文连通性; 水生生物; 河湖生态环境; 生态修复; 调控效应

**中图分类号:** X143

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2025)05-0119-10

**Research progress on regulation effects of hydrological factors on ecological environment of rivers and lakes//**  
JIANG Cuiling, XU Ruiting (College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Key hydrological factors such as water level, flow velocity, and discharge play a crucial role in regulating river and lake ecosystems. Based on extensive domestic and international research, and combining typical case studies, this paper systematically investigates the impacts of water level, flow velocity, flow rate, and hydrological connectivity on water environment and aquatic organisms. The regulation effects of these hydrological factors on ecological environment are analyzed. Water level influences the decomposition and transformation of pollutants in water and sediments, as well as the photosynthetic capacity of aquatic plants, by altering light intensity, redox conditions at the sediment-water interface, and the area of biological habitats. Changes in flow velocity and flow rate affect the suitability of biological habitats by modifying material transport capacity, sediment status, and the growth and reproductive needs of aquatic organisms, exhibiting significant threshold effects. Hydrological connectivity reflects the synergistic interactions and dynamic processes between hydrological elements, influencing the distribution of aquatic vegetation and the migratory and reproductive behaviors of fish. Finally, the paper introduces new technologies and methods used in related research and summarizes the current trends and developments in this field.

**Key words:** hydrological factors; hydrological connectivity; aquatic organisms; river and lake ecosystem; ecological restoration; regulation effects

水文要素包括水位、流量、流速、降水、蒸发、水温等, 是河湖生态系统中活跃且敏感的影响因子, 其动态变化直接或间接调控水体的物理、化学与生物学过程, 影响水生态系统的结构与功能。关键水文要素如水位、流速、流量以及水文连通性通过多重路径影响污染物迁移转化、水体自净能力及水生生物的栖息环境<sup>[1]</sup>, 如图1所示。自然条件下, 植物的萌发、生长、衰亡以及动物的产卵、孵化、洄游等生命节律与水位、流速、流量的季节变化高度一致, 这些水文要素的变化将对水生态系统健康带来巨大影响。

水位波动虽然不是影响水生态环境的直接因素, 但会通过影响光和溶解氧的垂向分布、改变泥-水界面压力和氧化还原强度, 影响水体和沉积物中污染物的分解转化、水生植物的光合能力。流速变化则通过剪切力作用影响污染物的迁移扩散、沉积物状态、生物的生长以及鱼类的产卵习性。流量通过水力学参数(流速、水深等)和水文节律发挥系统调控功能, 影响物质输移、生境面积、水生动物繁殖及鱼类洄游。水文连通性表征系统性水文特征, 反映水文要素之间的协同作用和动态变化过程, 对水环境和

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFC3207503)

**作者简介:** 姜翠玲(1966—), 女, 教授, 博士, 主要从事生态水利研究。E-mail: cljianghu@163.com

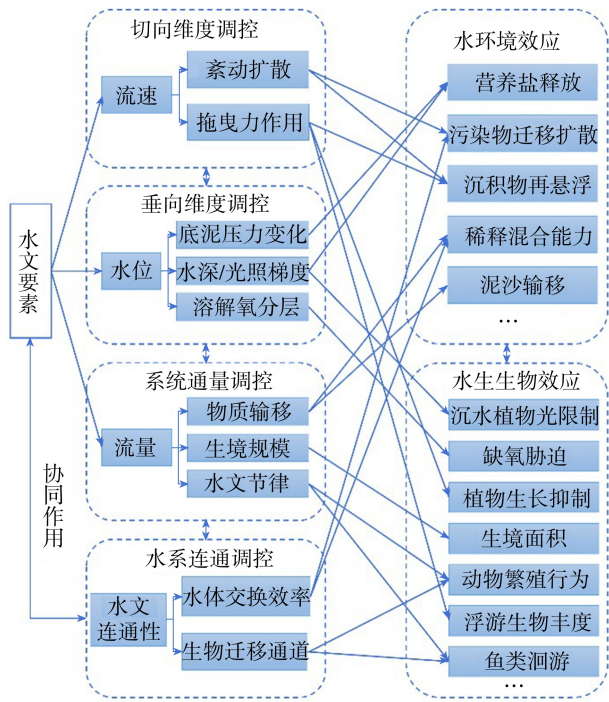


图1 关键水文要素及水文连通性对河湖水生态环境的调控路径

在全球气候变化与高强度人类活动的双重胁迫下,河湖水文情势的剧烈改变正日益威胁着水生态系统的健康与可持续服务功能<sup>[2-3]</sup>。近几十年来,为满足社会经济发展需求而建设完成的一系列水利工程,改变了天然水文模式,造成河湖水位、流速与流量丰枯交替的自然节律发生显著变化。建库、建闸、筑坝、筑堤等人类活动使河湖(群)的水文连通格局遭到极大破坏,导致河道片段化、湖泊面积萎缩,严重阻碍了水体中物质、能量和生物的迁移交换过程。为改善水环境、修复水生态,国内外开展了引水、调水、水文连通恢复工程等,改变了原来水体的流速、流量等水文情势,在取得显著成效的同时,也带来了一些负面影响和潜在风险,如防洪压力增大、局部水质恶化、群落演替等<sup>[4-5]</sup>。由此可见,各水文要素之间、水文要素与水环境因子、水生生物种群之间存在着动态的、非线性的复杂关系,系统梳理和理解这些关系,对保护水生态环境意义重大。

以往有关流速、流量等水文要素对水环境及水生生物的调控作用的研究大多关注单一水文要素的短期影响,少有多水文要素的生态环境效应开展综合探讨。本文在系统总结前人研究成果的基础上,聚焦关键水文要素(水位、流速、流量)及水文连通性,综述其变化对河湖水生态环境的调控机制与研究进展,结合典型案例,评估研究现状、凝练关键问题,展望未来研究动向,以期对河湖生态保护与修

## 1 水位的调控效应

水位变化主要通过垂向作用机制影响河湖水环境及生态系统,其短期波动影响泥-水界面物质的沉积和转化,长期变化引发生物群落演替及岸线变迁<sup>[6]</sup>。

### 1.1 水位波动对水环境的影响

水位对水环境的影响主要通过改变水体稀释混合能力、复氧效率、泥-水界面压力等来实现。低水位时,沉积物容易受到风和水流的扰动,发生再悬浮,导致沉积物表层的氮、磷等营养盐释放,加上低水位削弱了水体的稀释混合能力,造成水体营养物质浓度提高<sup>[7]</sup>。但低水位有利于大气中的氧气通过曝气作用到达水体的各个部位,尤其水体底层,提高了泥-水界面溶解氧浓度和氧化还原电位,促进沉积物表面污染物的好氧分解<sup>[8]</sup>。高水位条件下,由于上覆水压力大,对底泥污染物释放和再悬浮起到抑制作用,减轻了内源污染对水体的影响。例如鄱阳湖总氮、总磷浓度在丰水期达到年度最低值,与水位呈显著负相关关系<sup>[9]</sup>。然而,高水位也可能加剧水体底层或滞流区的缺氧状况,诱发还原反应,导致有机质、氨氮、硫化物的积累,降低污染物的分解速率。因此,水位对水环境的影响并非简单的“高优低劣”或“低优高劣”,而是具有高度的非线性、阶段性和空间异质性<sup>[10-11]</sup>。当前,有关水位对水环境的调控效应存在争议:有观点认为高水位能抑制底泥污染物释放,对改善水质有利<sup>[9]</sup>;而有的学者则主张污染重的河道采取低水位运行模式,有助于泥-水界面污染物的好氧分解,从而减轻水体的污染<sup>[8]</sup>。因此,对水位与水质的关系尚需深入研究,在水环境管理和生态修复实践中,片面理解水位的作用可能导致草率决策,进而增加水质恶化的风险。

水位变化对水环境的影响可以通过现场监测、室内水槽模拟实验、构建水动力-水质模型、工程调度实践等方法来确定。许多学者通过野外调查和现场监测,发现了河湖水质对水位的非线性不稳定响应过程<sup>[10-11]</sup>。太湖和密云水库多年水质监测数据显示<sup>[12-13]</sup>,在汛期高水位条件下,水质受到营养盐输入的影响显著,而在低水位条件下,风浪扰动造成的内源污染物释放对水质影响大。室内水槽模拟实验<sup>[14-15]</sup>发现,水深显著影响底泥中氯化物和营养盐的释放,总磷和氯的释放速率与底部切应力呈正相关关系,而与底部压强呈负相关关系,即水深增加时,总磷和氯化物的释放速率减小。水位对水质的影响可以通过水动力-水质耦合模型加以定量分析,

如 MIKE 和 EFDC 等模型被广泛用于模拟预测水文要素如水位、流速、流量变化对水环境的影响<sup>[16-17]</sup>。工程调度实践对判断水位和水质之间的关系更加直接和具体化。广州城市河道低水位运行生态修复工程为通过水位调控水环境提供了新范式,相较于高水位运行,低水位运行使河道水体光照、溶解氧、水温和水动力等条件得到明显改善,可快速消除底泥黑臭,有利于营造洲-滩-槽多样化生境<sup>[18]</sup>,显著改善河道的生态环境。此外,近年来已有很多引、调水工程,如南水北调工程、引江济太工程等,验证了通过调节水位调控水质的可行性<sup>[19]</sup>。

1.2 水位波动对水生生物的影响

水位波动通过改变水深、水下光照强度和溶解氧浓度等重要生境参数,显著影响水生生物的生理活动及生长繁育。作为水-陆交错带的关键调控因子,水位波动的时间、幅度和频率直接决定挺水、浮叶和沉水植物的生境及淹没暴露状态,并通过改变水下光照强度、营养盐浓度、二氧化碳分压及底质特性等环境参数,影响水生植物的个体发育、种群动态和群落演替<sup>[20-21]</sup>,其作用机制具有时空特异性。以太湖为例,常见水生植物生长的水深范围如表 1 所示<sup>[22]</sup>,浮叶、挺水和沉水植物主要分布在水深 2.5 m 以内的区域。在浅水湖泊中,周期性水位波动是调控水生植物萌发、生长和繁殖的关键。由于生活在水下,沉水植物对水位变化尤其敏感,春季适度低水位能促进沉水植物种子萌发,而异常低水位(干旱)或高水位会抑制繁殖体发育;夏季高水位通过光限制控制沉水植物生物量,异常低水位则导致其生物量激增<sup>[23]</sup>。极端水位事件与人类活动的叠加效应对水生态系统具有很大的破坏性,如鄱阳湖 1998—1999 年洪水引发水位骤升,导致优势种黑藻消失,2011 年干旱引起水位下降,使 9 个子湖水生植物群落崩溃<sup>[24]</sup>;洱海因水电站调控使水位变幅下降,导致沉水植物分布面积持续萎缩<sup>[25]</sup>。

表 1 太湖常见水生植物生长的水深范围

| 类别   | 研究对象  | 拉丁学名                         | 主要分布水深/m |
|------|-------|------------------------------|----------|
| 浮叶植物 | 荇菜    | <i>Nymphoides peltatum</i>   | 约 2      |
| 挺水植物 | 莲     | <i>Nelumbo nucifera</i>      | 0.5~1.0  |
|      | 菰     | <i>Zizania latifolia</i>     | 0.5~1.0  |
| 沉水植物 | 穗状狐尾藻 | <i>Myriophyllum spicatum</i> | 1.5~2.0  |
|      | 苦草    | <i>Vallisneria spiralis</i>  | 1.5~2.0  |
|      | 菹草    | <i>Potamogeton crispus</i>   | 1.5~2.0  |
|      | 马来眼子菜 | <i>Potamogeton malaianus</i> | 2.0~2.4  |

水生植物主要分布在水深较浅、水体较稳定的岸边和湖湾区域,其生命周期与自然水文节律一致。水深对水生植物的影响体现为形态可塑性响应;沉水植物通过调整株高、叶片形态保证在水下获取足

够的光照,挺水植物通过改变茎部结构和匍匐茎等级适应水位变化<sup>[26]</sup>。例如,洪水引发的水位骤升伴随外源营养输入,导致沉水植物根的生物量下降了 47%,而地上生物量可通过株高伸长维持稳定<sup>[27]</sup>。值得注意的是,水位波动与营养脉冲的协同作用会显著抑制植物的生物量和繁殖,尤其在氮磷富集条件下,复合胁迫可使沉水植物相对生长速率降低 60%<sup>[28-29]</sup>。这种多因子耦合效应可能通过干扰气体交换、抑制光合作用等途径,加剧水生态系统的退化风险。这些现象表明,水位的剧烈波动对植物具有很大的不利影响,维持适度的自然水位波动节律对水生植物群落稳定至关重要。

水位波动对水生动物的生态调控机制研究始于 20 世纪 70 年代水陆交错带理论的确立。洪水脉冲理论的提出,首次系统揭示了水位周期性变化对洪泛区鱼类等水生动物繁殖迁徙、资源利用的关键驱动作用。21 世纪以来,研究范畴拓展至浮游动物、底栖无脊椎动物及水鸟等类群<sup>[30]</sup>。水位波动通过三重路径影响水生动物群落:①物理生境重构,改变栖息地连通度与资源供给模式<sup>[31]</sup>,如水位下降导致浅水区消失,直接影响水鸟觅食生境的可利用性<sup>[31]</sup>;②生物地球化学循环扰动,水位剧烈波动会加速沉积物再悬浮,增加水体营养盐浓度<sup>[32]</sup>,进而改变浮游动物群落结构;③行为生态胁迫,如水位下降会加速蝌蚪变态发育进程,显著降低成体体型的大小<sup>[33]</sup>。上游梯级水电开发引起的极端水位波动可能超出鱼类产卵的生理耐受阈值<sup>[34]</sup>,造成鱼类生物种群数量下降甚至消失,如鄱阳湖江豚种群丰度与水位变幅呈显著负相关关系<sup>[35]</sup>。适度自然波动可维持高生物多样性,其关键在于可预测的季节性节律与物种生活史周期形成协同演化;而异常波动会导致栖息地异质性下降,诱发清水-浊水状态转换等生态系统的相变<sup>[36]</sup>。

1.3 生态水位的确定方法

通常采用生态水位管理来保障河道和湖泊的水量和水深,以满足生物生长和繁殖的需求。不同水生生物对水深、流速等参数有适应的阈值范围,目前,只有少量水生植物和动物的流速和水位阈值得到研究,这影响了河湖生态水位的科学界定。生态水位主要应用在湖泊、湿地以及城市河道中,湖泊生态水位主要通过生物空间法、最小月均水位法、湿周法和保证率法等来确定<sup>[37-38]</sup>。城市中通常以附近调蓄能力和影响较大的湖泊生态水位作为周边河道的生态水位。以往生态水位主要关注对动物的影响,特别是对珍稀物种、关键物种或主要经济鱼类的影响,因此,常用生物空间法来确定最小生态水位。

近年来,越来越多的学者开始关注水生植物生长敏感期对水位的要求<sup>[39]</sup>。水生植物多生长在水位变动大的边缘地带,有萌发、生长、枯萎、越冬等生命节律,需综合考虑不同生长期的水文要素需求,这使得生态水位的阈值确定更复杂。例如:孙泽悦等<sup>[40]</sup>通过野外采样调查了玄武湖水生植物的物种组成和分布,结合湖泊形态和生物空间需求,确定玄武湖的最低生态水位为 9.6 m,并提出了不同生长阶段的水位调控方案,以促进水生植物的生长和生态修复。保障生态水位,也是生态河湖、健康河湖、幸福河湖的基本要求。由于水位变动受季节、气象、人工调控等诸多要素影响,生态水位并非一个固定值,而应随自然节律发生变化。随着科学技术发展和实践经验积累,人们不断完善生态水位的计算和模拟方法,并尝试构建生态水位预警模型,通过物联网、大数据、云平台、人工智能等技术实现生态水位的智慧化、可视化预警<sup>[41]</sup>。

## 2 流速的调控效应

流速通过改变水动力条件、物质输移能力,从切向维度对水生态系统产生调控作用,其生态效应既体现为直接影响污染物扩散与生物行为,又体现为通过改变生境的物理特征间接调控群落结构。

### 2.1 流速对物质输移的影响

流速通过改变水体的紊动强度调控大气复氧效率,影响水体和泥-水界面污染物的分解和转化能力<sup>[42]</sup>。在流速较低的水体中,悬浮物、有机物和磷等营养盐易于沉降;而在流速较高的水体中,泥-水界面的颗粒物易发生再悬浮<sup>[42]</sup>,造成营养盐释放,水体透明度降低。湖流主要通过切应力作用于湖底沉积物,当切应力超过临界切应力时,沉积物发生悬浮,悬浮深度随扰动强度增加而增加<sup>[43]</sup>。虽然较高的流速能增强水体的稀释和混合能力,改善水质,但也可能导致沉积物再悬浮,降低水体透明度,进而恶化水质。悬浮颗粒物的沉积速率与流速呈非线性关系;而沉积物中总氮和总磷的释放率与流速呈指数增长关系<sup>[44]</sup>。此外,流速对水质的调控效应存在显著空间异质性。在水动力条件良好的区域,流速与水质具有较好的正相关性,而在污染严重的缓滞流区,流速与水质关联性较弱。因此,流速对水环境改善的调控效能受区域水动力特征与污染本底的共同制约。流速扰动下微界面(如沉积物-水界面、生物膜表面)的物理化学过程及其对污染物吸附/解吸、生物可利用性的影响机制是当前的研究热点。

### 2.2 流速对生物的调控效应及阈值

流速对水生植物的生长和功能发挥具有重要调

控作用。不同水生植物对水流速度有不同的适应范围。例如:轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)和竹叶眼子菜(*Potamogeton malaianus*)在水流速度小于 0.5 m/s 的条件下生长最佳;大叶藻(*Zostera marina*)耐受的流速范围为 3~180 cm/s,其适宜流速阈值为 8~10 cm/s,当流速超过 50 cm/s 时其植株密度显著降低<sup>[45-46]</sup>。较低的流速有利于水生植物生长,但不利于水质净化,河湖滞留区由于流速慢,交换能力差,水质往往较中心地带差。但如果低流速区有大量水生植物生长,往往能抵消对环境造成的负面效应,因此,在河湖近岸采取植物修复措施能明显改善水质。而较高的流速虽然不利于水生植物的生长,但能够显著提高水体的自净能力。高流速产生的拖曳力直接影响沉水植物的生存与分布:在湖泊入湖口、出湖口及风浪区,高的水交换速率引发的拖曳力可直接损毁植物地上组织,抑制繁殖体定植,甚至导致植株连根拔起,仅叶片柔韧、植株矮小的物种(如苔草)能适应此类环境<sup>[47]</sup>。慢水交换则延长营养盐滞留时间,在湖泊中促进浮游生物生长,加速湖泊从“草型”向“藻型”转变;而高流速引发沉积物再悬浮,降低透明度,对植物定植深度产生限制作用<sup>[48]</sup>。目前,流速对水生植物的调控效应研究大多采用野外观测与室内模拟相结合的方法,在实验室主要利用环形水槽、直形水槽等模拟水流条件,也有研究通过构建水动力-水生植被耦合模型从宏观角度模拟不同流速对水生植物的影响。

流速变化对浮游生物的群落结构具有显著调控效应,绿藻门与硅藻门的相对丰度随流速或水交换速率的升高而显著增加,而低流速有助于蓝藻富集,强垂向混合湍流对蓝藻水华的聚集有抑制作用<sup>[49]</sup>。

流速是鱼类感知环境和完成正常生活史的关键因素:一方面流速提高可刺激一些鱼类的产卵行为并加速胚胎发育<sup>[50]</sup>,另一方面流速可引导鱼类进入正确的洄游路线<sup>[51]</sup>。水电开发导致的坝前库区静水环境,对浮游植物、浮游动物以及定居型鱼类有利,而对洄游和半洄游性鱼类不利。流速降低可能导致增殖放流鱼类难以找到水流方向,使其洄游成功率显著下降。鱼类感应流速是指鱼类能感受到水流方向的最小流速,与鱼类的身长有关,常见淡水鱼类的感应流速多在 0.1~0.2 m/s 之间<sup>[51]</sup>。鱼类感应流速阈值的确定有助于鱼类放流点的正确选择,增加鱼类的成活率。近期多采用野外观测与构建三维水动力模型相结合的方法研究流速对鱼类的调控效应,无人机、雷达等遥感设备以及智能仿生鱼也被逐渐应用于研究、观测与采样中。

3 流量对生态环境的调控效应

流量是表征水体通量的综合参数,在维持河湖生态系统功能方面具有重要作用。流量变化影响物质输移能力、水体更新周期以及生境面积,是生态环境的关键调控因子。

3.1 流量变化对水环境的影响

流量变化对水环境的影响具有双重性。一方面,在污染负荷相对稳定的情况下,洪水季节,河道流量和流速大,稀释混合能力强,污染物浓度降低,水质改善;枯水季节,河道流量和流速小,自净能力弱,水质变差。例如:淮河流域枯水年氨氮浓度高于丰水年<sup>[52]</sup>;沔河总氮浓度与流量呈负相关关系<sup>[53]</sup>;黄河断流期间流量锐减导致总磷浓度骤升<sup>[54]</sup>,这些现象均验证了流量增大的稀释混合作用。另一方面,汛期流量增大可能导致更多流域内积累的污染物被携带进入河道,造成水质季节性恶化。例如:何子建等<sup>[55]</sup>发现长江宜昌段丰水期总磷浓度随径流量上升而增加;吴雪等<sup>[56]</sup>的研究表明随着流量增加,雨水径流带入的污染物(如悬浮物、化学需氧量、总氮、总磷等)浓度升高,导致城市河道水质恶化,这均与高流量期间面源污染输入增加有关<sup>[57]</sup>。因此,流量与水质的关系呈现显著的区域异质性和情景依赖性,需结合流域污染源特征和水动力背景进行综合判断。

3.2 生态流量与鱼类繁殖的阈值研究

繁殖期是鱼类最为敏感和关键的阶段,其对水文情势,尤其流量及其衍生的水力学条件的需求具有明确的阈值特征。科学确定满足鱼类繁殖需求的生态流量阈值,是实施生态调度、修复栖息地和维持生物多样性的重要依据。流量通过改变流速、水深、水面宽等直接影响鱼类产卵场适宜性。栖息地模拟法如河道内流量增加法和栖息地加权可利用面积法的核心在于建立流量与关键水力学参数(流速、水深)的关系,并结合目标鱼类繁殖期的栖息地适宜性指数,量化满足其产卵需求的生态流量范围<sup>[58]</sup>。例如黄河上游国家二级野生保护鱼类极边扁咽齿鱼产卵的适宜流速范围为 0.15~0.8 m/s,适宜水深为 0.5~2.4 m<sup>[59]</sup>;银鲴的产卵流速适宜区间为 0.6~1.1 m/s;赤眼鲮的产卵流速适宜区间则为 1.4~1.6 m/s<sup>[60]</sup>。对于产漂流性卵的鱼类,持续的涨水过程是刺激其性腺成熟和诱导其产卵行为的关键影响因素<sup>[60]</sup>。相关研究表明,流速增加不仅能提升水体溶解氧水平,更能直接刺激鱼类产卵行为并加速胚胎发育<sup>[61]</sup>。流量与流速的梯度变化通过阈值效应自然选择适应性繁殖鱼类,可为栖息地修复提供

量化依据。

3.3 数据驱动的生态流量智慧决策

随着遥感、物联网与人工智能的应用,生态流量评估进入动态化、精准化阶段。王谦等<sup>[62]</sup>构建了基于遥感技术的生态流量保障监管技术方法体系,其应用主要通过高精度监测控制断面的水面宽度变化来实现。近年来,深度学习模型快速发展,很多学者将深度学习方法用于还原河湖天然流量序列以及预测生态流量。例如:李铠峰等<sup>[63]</sup>基于气象和径流数据构建了 LSTM 模型并对研究区历史流量数据进行还原,以便进行生态流量的确定以及河湖健康的评估;王贝等<sup>[64]</sup>提出了基于 LSTM 模型的生态流量预报方法。上述研究通过算法创新与数据驱动,验证了深度学习模型在生态流量动态模拟与适应性管理中的技术可行性,为生态流量精细化调控提供了方法支撑。

4 水文连通性的调控效应

水文连通性是衡量水系中物质、能量和生物流动连接程度的重要指标,反映水文过程的动态性、系统性和时空异质性。它通常涉及水系中不同单元的水流连接,受地形、流量、流速等因素影响。近年来,我国颁布了多项与水系连通性相关的重要政策,强调流域的治理与生态修复。《中华人民共和国长江保护法》与《中华人民共和国湿地保护法》以立法形式禁止对长江干支流、湖泊及湿地的自然水文连通的破坏性活动,河湖长制则要求强化属地管理,统筹解决河道淤塞与非法截流问题。研究表明,水文连通恢复工程影响水位波动,改变水中营养物质输入和溶解氧含量,进而影响浮游动物的生物量和密度<sup>[65]</sup>。低水文连通条件下,浮游动物的生物多样性较低;而高水文连通条件下,不同水体连通增强了水环境的异质性,有助于增加浮游动物的多样性<sup>[66-67]</sup>。水文连通性通过改变湖泊水文水动力过程,如淹水频率、淹水面积等水文节律以及流量、流速等水动力特征,影响水生植被的生长发育和分布格局;通过改变水量、流速和水质等因素,影响鱼类洄游和繁殖行为<sup>[68-69]</sup>,如四大家鱼的产卵和越冬过程会因补水工程而发生变化,适当的水系连通能促进其洄游与生殖行为<sup>[70]</sup>。

然而,河湖水系连通也可能带来生态环境风险。例如:优质水体与劣质水体的连通可能导致污染物扩散与原水体水质下降;水系连通可能加剧生物物种之间的竞争,造成优势种的改变<sup>[71-72]</sup>。因此,尽管维持水系连通性对生态保护至关重要,但实际管理中有的湖泊如太湖、星云湖以及一些城市湖泊为

规避污染风险而人为限制其与周边劣质水体的交换,此举在保障局部水质的同时,是否因过度割裂自然水文循环而引发新的生态隐忧,需结合具体案例进行深入探讨。

以太湖为例,自 2002 年以来,太湖流域通过河湖水文连通性调控和引江济太工程改善水环境,减轻水体的富营养化,成效与争议并存。水文连通有助于提高换水效率,引江济太工程实施后,太湖换水周期由 210d 缩短至 184d,缩短约 12%,显著改善了河网水质<sup>[73]</sup>。然而,也有研究显示部分河网和湖湾由于特殊地形、水系特性、引水顶托、污染治理不力及生态系统受损等因素,水环境改善不明显,甚至有恶化趋势<sup>[74-75]</sup>。例如杨倩倩等<sup>[76]</sup>的研究表明,受来水水质影响,望虞河—贡湖—东太湖通道在夏季调水后受水区总氮、总磷及 COD<sub>Mn</sub> 浓度不降反升,水体交换导致东太湖出水口总磷浓度升高<sup>[73]</sup>。总体而言,引江济太工程取得了一定成效,但由于新老水问题的交织,仍需加强对引水工程的科学论证与管控<sup>[75]</sup>。水文连通性改变对水质的调控效应受补水量、水源与受纳水体的水质、环境容量和水体交换周期的共同影响<sup>[77]</sup>,具有“双刃剑”效应,需综合考虑以平衡其短期水质改善效益与长期生态风险。在生态治理层面,可通过建立水文连通性与营养盐通量、生物多样性及生物完整性指数的定量响应模型,结合水质-水动力耦合模拟,解析不同连通情景对水生生态系统的潜在影响<sup>[78]</sup>。

## 5 总结与展望

本文系统解析了水位、流速、流量及水文连通性对河湖水环境与生态系统的多维调控机制。水位波动通过物理扰动、生境重构及营养盐释放影响水生植物和动物的生命活动,保障生态水位是维护河湖健康水平的关键。流速显著影响污染物和营养盐在水体中的迁移扩散能力,也作用于水生植物的定植以及浮游生物的种群结构和空间分布,是鱼类感知环境和完成正常生活史的关键影响因素。流量变化影响污染物的稀释和混合能力,并通过水力学参数(流速、水深)与水文节律(如涨水脉冲)协同调控物种繁衍与群落动态,具有明显的阈值效应,确定生态流量是实施生态调度、修复栖息地的依据。水文连通性反映了水文过程的动态特征和时空异质性,影响水生植被的分布格局以及鱼类的洄游和繁殖行为。但河湖水系连通也可能带来环境和生态风险,如导致污染物转移、加剧物种之间的竞争和优势物种的演变,具有“双刃剑”效应。当前,新的监测技术和应用平台如遥感、物联网、数字孪生、智慧水利

的广泛推广以及水动力-水生态耦合模型的开发利用,为精准评估水文要素调控生态环境的机理和效能提供了技术支持。

尽管现有研究在该领域取得了显著成果,但由于水文要素-水环境因子-水生生物之间存在着复杂的交互关系,受认知局限与技术瓶颈限制,目前对多要素间的非线性、动态关联机制及其耦合生态效应研究薄弱;微观界面过程及宏观生态响应的定量因果关系揭示不足。现有的生态水位、生态流量阈值多基于静态历史情景,对气候变化与极端事件引发的水文情势突变适应性不足,动态阈值识别存在技术盲区。为应对挑战,推动河湖水生态系统科学调控与适应性管理,未来研究亟须在以下方向重点突破:

a. 开发复杂系统多过程耦合模型。为定量分析水文-水环境-水生态之间的复杂关系,在现有水动力-水质耦合模型基础上,深度融合生物生理响应机制与群落相互作用模块,重点发展能精确模拟极端水文情景下生态系统的非线性响应、阈值动态及恢复力的机理模型,克服对复杂生物过程模拟的局限,增强模型对微观变动驱动宏观过程的预测能力。

b. 发展融合生态机理的智能算法与动态阈值体系。结合多源实时监测数据,实现生态水位、生态流量等关键动态阈值的智能识别、实时更新与验证。构建覆盖不同流域、河湖类型的水文-水生态动态阈值信息库,并深度融合于流域、河湖数字孪生平台,显著提升决策支持系统的科学性与可信度。

c. 构建仿自然水文调控与智慧协同的治理范式。基于自然水文节律设计工程调控模式(如闸坝优化调度、生态流量保障、区域水文连通等),突破多源数据融合与跨平台协同瓶颈,构建全域水文-水质-水生态协同调控和治理的智慧平台,整合高精度监测、多模型模拟、情景推演与智能决策功能,推动管理从被动响应转向主动适应。建立基于生态风险实时预警的动态监管体系,为实现水文要素对生态环境调控的短期效益与长期可持续性提供科学支撑。

## 参考文献:

[ 1 ] 董哲仁. 论水生态系统五大生态要素特征[ J ]. 水利水电技术, 2015, 46( 6 ) : 42-47. ( DONG Zheren. On features of five dominant ecological components of aquatic ecosystem [ J ]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46( 6 ) : 42-47. ( in Chinese ) )  
[ 2 ] THOMPSON J R, CLILVERD H M, ZHENG Jiaxuan, et al. Revisiting hydro-ecological impacts of climate change on a restored floodplain wetland via hydrological/hydraulic

- modelling and the UK Climate Projections 2018 scenarios [J]. *Wetlands*, 2023, 43(6): 71.
- [ 3 ] ZHENG Hanwu, TETZLAFF D, BIRKEL C, et al. Hydrological connectivity and biogeochemical dynamics in the function and management of the lower Oder floodplain [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 653: 132708.
- [ 4 ] LIU Zejun, WANG Xihua, XU Y J, et al. Spatial heterogeneity of lake sediment hydraulic conductivity, hydrological connectivity and causes analysis under the influence of sand mining activities; in-situ tests in a typical large sand mining lake (Poyang Lake) [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2025, 274: 104671.
- [ 5 ] 王秀荣, 王广召, 罗鑫, 等. 连通工程对富营养化湖泊沉积物中污染物的影响 [J]. *水生生物学报*, 2016, 40(1): 139-146. (WANG Xiurong, WANG Guangzhao, LUO Xin, et al. Effects of the lake-interconnected engineering on the distribution of pollutants in the sediments of eutrophic lakes [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(1): 139-146. (in Chinese))
- [ 6 ] KOTOWSKI W, PIORKOWSKI H. Competition and succession affecting vegetation structure in riparian environments: implications for nature management [J]. *International Journal of Ecohydrology and Hydrobiology*, 2005, 5(1): 51-57.
- [ 7 ] 刘聚涛, 温春云, 韩柳, 等. 2012—2017 年鄱阳湖水位变化与氮磷响应特征研究 [J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(10): 1274-1279. (LIU Jutao, WEN Chunyun, HAN Liu, et al. Study on the response characteristics of nitrogen and phosphorus to water level change of Poyang Lake during 2012-2017 [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(10): 1274-1279. (in Chinese))
- [ 8 ] JEPPESEN E, BRUCET S, NASELLI-FLORES L, et al. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity [J]. *Hydrobiologia*, 2015, 750(1): 201-227.
- [ 9 ] LI Bing, YANG Guishan, WAN Rongrong, et al. Hydrodynamic and water quality modeling of a large floodplain lake (Poyang Lake) in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(35): 35084-35098.
- [ 10 ] HAN Quan, ZHOU Ling, SUN Wenchao, et al. Assessing alterations of water level due to environmental water allocation at multiple temporal scales and its impact on water quality in Baiyangdian Lake, China [J]. *Environmental Research*, 2022, 212: 113366.
- [ 11 ] YIN Yingze, XIA Rui, CHEN Yan, et al. Non-steady state fluctuations in water levels exacerbate long-term and seasonal degradation of water quality in river-connected lakes [J]. *Water Research*, 2023, 242: 120247.
- [ 12 ] WU Xuefeng, JIANG Yan, CHEN Yiping, et al. Identifying the key stages, pollutants, and driving mechanisms of water quality variation in relation to water level dynamics [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2025, 236(4): 213.
- [ 13 ] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 近 70 年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略 [J]. *湖泊科学*, 2021, 33(4): 957-973. (ZHU Guangwei, QIN Boqiang, ZHANG Yunlin, et al. Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(4): 957-973. (in Chinese))
- [ 14 ] 周锴, 钟小燕, 庾从蓉, 等. 太湖河道水深对底泥营养物质再释放过程的影响 [J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2): 597-603. (ZHOU Kai, ZHONG Xiaoyan, YU Congrong, et al. Water depth impact on nutrients re-release from sediment in Taihu River Channel [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2): 597-603. (in Chinese))
- [ 15 ] 吴宸晖, 姜翠玲. 东平湖氯化物质量浓度演变机理分析及预防对策 [J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(2): 15-22. (WU Chenhui, JIANG Cuiling. Analysis of evolution mechanism of chloride mass concentration in Dongping Lake and preventive measures [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(2): 15-22. (in Chinese))
- [ 16 ] 陈倩, 黄强, 陈浩. 基于 MIKE 模型下生态补水效果分析: 以无锡市滨湖区梁溪河为例 [J]. *中国水运*, 2025(2): 43-44. (CHEN Qian, HUANG Qiang, CHEN Hao. Analysis of ecological water replenishment effects based on the MIKE model: a case study of Liangxi River in Binhu District, Wuxi City [J]. *China Water Transport*, 2025(2): 43-44. (in Chinese))
- [ 17 ] 范振宇, 刘振杰, 白静, 等. 衡水湖水动力水质特征及驱动机制 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(3): 1001-1010. (FAN Zhenyu, LIU Zhenjie, BAI Jing, et al. Hydrodynamic water quality characteristics and driving mechanism in Hengshui Lake [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(3): 1001-1010. (in Chinese))
- [ 18 ] 李明, 陈文龙, 吴琼. 广州市城市河流低水位运行生态修复理念与实践 [J]. *中国水利*, 2023(9): 31-35. (LI Ming, CHEN Wenlong, WU Qiong. Ecological and practice of urban river low water level operation in Guangzhou City [J]. *China Water Resources*, 2023(9): 31-35. (in Chinese))
- [ 19 ] 张怡雅, 袁飞, 张利敏, 等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征 [J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(3): 14-19. (ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(3): 14-19. (in Chinese))

- Chinese))
- [20] 袁赛波,张晓可,刘学勤,等. 长江中下游湖泊水生植被的生态水位管理策略[J]. 水生生物学报,2019,43(增刊1): 104-109. (YUAN Saibo, ZHANG Xiaoke, LIU Xueqin, et al. Ecological water level management strategy for aquatic vegetation in the mid-lower Yangtze shallow lakes[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(Sup1): 104-109. (in Chinese))
  - [21] BUCAK T, SARAÖĞLU E, LEVI E E, et al. The influence of water level on macrophyte growth and trophic interactions in eutrophic Mediterranean shallow lakes: a mesocosm experiment with and without fish [J]. Freshwater Biology, 2012, 57(8): 1631-1642.
  - [22] 赵凯. 太湖水生植被分布格局及演变过程[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
  - [23] 王磊. 沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 对水位变化的生理生态适应性及机制研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
  - [24] ZHANG Xiaoke, LIU Xingquan, YANG Zhendong, et al. Restoration of aquatic plants after extreme flooding and drought: a case study from Poyang Lake national nature reserve [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17: 15657-15668.
  - [25] 符辉,袁桂香,曹特,等. 洱海近 50 a 来沉水植被演替及其主要驱动要素[J]. 湖泊科学, 2013, 25(6): 854-861. (FU Hui, YUAN Guixiang, CAO Te, et al. Succession of submerged macrophyte communities in relation to environmental change in Lake Erhai over the past 50 years [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(6): 854-861. (in Chinese))
  - [26] 丁明明,黎磊,金斌松,等. 水位波动的幅度与频率对刺苦草 (*Vallisneria spinulosa*) 生物量和形态特征的影响 [J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 192-203. (DING Mingming, LI Lei, JIN Binsong, et al. Impact of water level fluctuations with different amplitudes and frequencies on biomass and morphological traits of *Vallisneria spinulosa* [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(1): 192-203. (in Chinese))
  - [27] 罗东,黄文强,丁明明,等. 极端洪水导致的外源营养和水位升高对黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、附着藻类和水质的影响[J]. 湖泊科学, 2025, 37(1): 184-193. (LUO Dong, HUANG Wenqiang, DING Mingming, et al. Effects of increased nutrient loading and water level caused by extreme flooding on *Hydrilla verticillata*, periphyton and water properties [J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(1): 184-193. (in Chinese))
  - [28] 王国祥,王磊,高雨轩,等. 河湖水位波动:流域生态调控的重要途径[J]. 环境生态学, 2020, 2(7): 1-7. (WANG Guoxiang, WANG Lei, GAO Yuxuan, et al. Water level fluctuation of rivers and lakes: an important approach for ecological regulation of river basins[J]. Environmental Ecology, 2020, 2(7): 1-7. (in Chinese))
  - [29] CARMIGNANI J R, ROY A H. Annual winter water-level drawdowns influence physical habitat structure and macrophytes in Massachusetts, USA, lakes[J]. Ecosphere, 2021, 12(4): e03442.
  - [30] ZHANG Dongmei, ZHOU Lizhi, SONG Yunwei. Effect of water level fluctuations on temporal-spatial patterns of foraging activities by the wintering Hooded Crane (*Grus monacha*) [J]. Avian Research, 2015, 6(1): 16.
  - [31] LI Xin, HU Bisong, QI Shuhua, et al. The influence of short-term water level fluctuations on the habitat response and ecological fragility of Siberian cranes in Poyang Lake, China[J]. Remote Sensing, 2024, 16(23): 4431.
  - [32] LI Qiuhua, XIAO Jing, OU Teng, et al. Impact of water level fluctuations on the development of phytoplankton in a large subtropical reservoir: implications for the management of cyanobacteria[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(2): 1306-1318.
  - [33] GASCON C, TRAVIS J. Does the spatial scale of experimentation matter? A test with tadpoles and dragonflies[J]. Ecology, 1992, 73(6): 2237-2243.
  - [34] TAN Zhiqiang, LI Yunliang, ZHANG Qi, et al. Assessing effective hydrological connectivity for floodplains with a framework integrating habitat suitability and sediment suspension behavior [J]. Water Research, 2021, 201: 117253.
  - [35] HAO Zheng, WANG Qianhong, WANG Jianjun, et al. Water level fluctuations modulate the microbiomes involved in biogeochemical cycling in floodplains [J]. Microbial Ecology, 2024, 87(1): 24.
  - [36] MAO Zhigang, GU Xiaohong, CAO Yong, et al. Pelagic energy flow supports the food web of a shallow lake following a dramatic regime shift driven by water level changes [J]. Science of The Total Environment, 2021, 756: 143642.
  - [37] 杨恒,董世杰,吴江,等. 洞庭湖生态水位与生态需水量研究[J]. 人民长江, 2024, 55(5): 90-98. (YANG Heng, DONG Shijie, WU Jiang, et al. Study on ecological water level and ecological water demand of Dongting Lake[J]. Yangtze River, 2024, 55(5): 90-98. (in Chinese))
  - [38] 谷桂华,杨侃,杨文春,等. 抚仙湖适宜生态水位研究及水位改变度分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 54-60. (GU Guihua, YANG Kan, YANG Wenchun, et al. Research on the suitable ecological water level of Fuxian Lake and analysis of water level variation degree[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7): 54-60. (in Chinese))
  - [39] 谢得宝,周敏,冯俊,等. 闸控湖泊水生植物恢复的敏感生态水位研究:以固城湖为例[J]. 水利水运工程学报, 2025(3): 14-24. (XIE Debao, ZHOU Min, FENG Jun, et

- al. Research on the sensitive ecological water level for the restoration of aquatic plants in gate-controlled lakes: a case study of Gucheng Lake [J]. Hydro-Science and Engineering, 2025(3):14-24. (in Chinese))
- [40] 孙泽悦,姜翠玲. 基于水生植物修复的玄武湖生态水位研究[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 49-54. (SUN Zeyue, JIANG Cuiling. Study on ecological water level of Xuanwu Lake based on aquatic plant restoration [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(3): 49-54. (in Chinese))
- [41] 郭家诚. 智慧型河流生态水位预警系统的构建及应用[D]. 扬州:扬州大学, 2024.
- [42] 陈庆江,丁瑞,赵海. 平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 8-13. (CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 8-13. (in Chinese))
- [43] 梁培瑜,王烜,马芳冰. 水动力条件对水体富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 455-462. (LIANG Peiyu, WANG Xuan, MA Fangbing. Effect of hydrodynamic conditions on water eutrophication: a review [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, 25(4): 455-462. (in Chinese))
- [44] 童亚莉,梁涛,王凌青,等. 双向环形水槽模拟变化水位和流速下洞庭湖沉积物氮释放特征[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 59-67. (TONG Yali, LIANG Tao, WANG Lingqing, et al. Characteristics of nitrogen release from Lake Dongting sediments under variable water level and velocity in the two-way annular flume[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(1): 59-67. (in Chinese))
- [45] 张倩,柳杰,张沛东,等. 不同水流流速对大叶藻移植植株存活、生长及光合色素含量的影响[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 806-812. (ZHANG Qian, LIU Jie, ZHANG Peidong, et al. Effects of different current velocities on survival, growth and photosynthetic pigment contents of *Zostera marina* transplants [J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(6): 806-812. (in Chinese))
- [46] 魏华. 水流特性对水生植物的影响规律研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(5): 1084-1091. (WEI Hua. Advances in the research on the effect of water flow characteristics on aquatic plants [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(5): 1084-1091. (in Chinese))
- [47] VAN ZUIDAM B G, PEETERS E T H M. Wave forces limit the establishment of submerged macrophytes in large shallow lakes[J]. Limnology and Oceanography, 2015, 60(5): 1536-1549.
- [48] 吕兴菊,任婧,高登成,等. 湖泊水动力变化对沉水植物的影响研究综述[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4245-4254. (LYU Xingju, REN Jing, GAO Dengcheng, et al. Impacts of hydrodynamic variation on submerged macrophytes in lakes: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4245-4254. (in Chinese))
- [49] 吴挺峰,朱广伟,秦伯强,等. 前期风场控制的太湖北部湖湾水动力及对蓝藻水华影响[J]. 湖泊科学, 2012, 24(3): 409-415. (WU Tingfeng, ZHU Guangwei, QIN Boqiang, et al. Prior wind field induced hydrodynamics and its influence on cyanobacterial bloom in northern bays of Lake Taihu, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(3): 409-415. (in Chinese))
- [50] 柴凯. 水位及流速对典型黏性鱼卵孵化效果影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2023.
- [51] 高阳阳,陈卓,刘科,等. 基于鱼类感应流速的水库放流位置选择研究[J]. 人民珠江, 2025, 46(2): 83-90. (GAO Yangyang, CHEN Zhuo, LIU Ke, et al. Selection of reservoir release location based on fish induced velocity [J]. Pearl River, 2025, 46(2): 83-90. (in Chinese))
- [52] LIU Fangfang, SUN Tao, ZHAO Rui. Effects of rainfall and flow variations on water quality in the Huaihe River Basin, located in a transitional climate zone in China [C]//Proceedings of the 2009 International Conference on Energy and Environment Technology. Guilin: IEEE, 2009: 527-530.
- [53] 王华,李怀恩,王莉. 沔河水质与流量之间的关系分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 83-88. (WANG Hua, LI Huai'en, WANG Li. Analysis of relationship between water quality and flow in Fenghe River [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(6): 83-88. (in Chinese))
- [54] 何大伟,陈静生,崔树彬. 黄河下游“断流”河段水量与水质的关系[J]. 环境化学, 2002, 21(5): 423-429. (HE Dawei, CHEN Jingsheng, CUI Shubin. The relationship between water quality and water quantity in the lower Yellow River [J]. Environmental Chemistry, 2002, 21(5): 423-429. (in Chinese))
- [55] 何子建,刘瑞芬,辛小康. 近十年长江干流宜昌城区段水质变化分析[J]. 水电能源科学, 2022, 40(12): 112-115. (HE Zijian, LIU Ruifen, XIN Xiaokang. Analysis of water quality change in Yichang section of Yangtze River in recent ten years [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(12): 112-115. (in Chinese))
- [56] 吴雪,王燕彩,张英,等. 城市面源污染特征研究趋势与控制措施[J/OL]. 中国给水排水, (2025-05-07) [2025-05-07]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1073.TU.20250506.1726.002>. (WU Xue, WANG Yancai, ZHANG Ying, et al. Research trend and control measures on the characteristics of urban non-point source pollution [J/OL]. China Water Supply and Drainage, (2025-05-07) [2025-05-07]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1073.TU.20250506.1726.002>. (in Chinese))

- [57] ROSTAMI S, HE Jianxun, HASSAN Q K. Water quality response to river flow regime at three major rivers in Alberta [J]. *Water Quality Research Journal*, 2020, 55 (1):79-92.
- [58] 杨泽凡,胡鹏,王玉莲,等. 鱼类产卵敏感期河流生态流速的分区分类阈值研究[J]. *水利学报*, 2024, 55(2): 190-201. (YANG Zefan, HU Peng, WANG Yulian, et al. Zoning and classification of ecological flow velocity thresholds required by river fish during sensitivity spawning periods [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55(2): 190-201. (in Chinese))
- [59] 王伟营,章国勇,薛联芳,等. 水电站运行对库尾鱼类生态环境影响研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(6): 77-89. (WANG Weiying, ZHANG Guoyong, XUE Lianfang, et al. Research on the impact of hydropower plant operation on fish habitat at the reservoir tail [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(6): 77-89. (in Chinese))
- [60] 唐家璇,曾庆慧,胡鹏,等. 中国江河产漂流性卵鱼类物种分布及繁殖习性[J]. *生态学报*, 2025, 45(13): 6609-6622. (TANG Jiaxuan, ZENG Qinghui, HU Peng, et al. Distribution and reproductive habits of fishes that spawn semi-buoyant eggs in rivers of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(13): 6609-6622. (in Chinese))
- [61] ZHANG Qiaoling, LIU Zijun, WANG Weiying, et al. Quantitative determination of flow rate variations in reservoir eco-scheduling: a case study of Yangqu dam in the upper Yellow River [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121620.
- [62] 王谦,王雪蕾,徐雯婷,等. 河流生态流量保障程度遥感监管技术方法研究[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(7): 440-447. (WANG Qian, WANG Xuelei, XU Wenting, et al. Research on the evaluation technology and method of extent of river ecological flux guarantee based on remote sensing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(7): 440-447. (in Chinese))
- [63] 李铠峰,赵超,李文戡,等. 气候变化及人类活动影响下永安溪河流水文健康响应[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025, 53(1): 25-30. (LI Kaifeng, ZHAO Chao, LI Wenyu, et al. Hydrological health response of climate change and human activities impact of the Yong'an River [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(1): 25-30. (in Chinese))
- [64] 王贝,陈浩,何锡君,等. 基于 LSTM 深度学习的河湖生态流量预警预报模型研究[J]. *水文*, 2023, 43(3): 65-70. (WANG Bei, CHEN Hao, HE Xijun, et al. Study on early warning and forecasting model of ecological flow in rivers and lakes based on LSTM deep learning [J]. *Journal of China Hydrology*, 2023, 43(3): 65-70. (in Chinese))
- [65] GOŹDZIEJEWSKA A, GLIŃSKA-LEWCZUK K, OBOLEWSKI K, et al. Effects of lateral connectivity on zooplankton community structure in floodplain lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2016, 774(1): 7-21.
- [66] NAPIÓRKOWSKI P, BAKOWSKA M, MROZIŃSKA N, et al. The effect of hydrological connectivity on the zooplankton structure in floodplain lakes of a regulated large river (the lower Vistula, Poland) [J]. *Water*, 2019, 11(9): 1924.
- [67] 叶晓彤. 城市河湖连通水系轮虫与浮游细菌群落生态学研究[D]. 广州:暨南大学, 2020.
- [68] ZHANG Chen, LI Mingzheng, CHANG Tao, et al. The interaction processes of the fish assemblages between the Yangtze River and Poyang Lake, China [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2021, 30(4): 541-550.
- [69] SHAO Xiaojing, FANG Yu, JAWITZ J W, et al. River network connectivity and fish diversity [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 21-30.
- [70] 尚坤钰,姜明,林鹏程,等. 江湖阻隔对长江中下游湖泊鱼类群落分类多样性的影响[J]. *水生生物学报*, 2023, 47(1): 133-146. (SHANG Kunyu, JIANG Ming, LIN Pengcheng, et al. River-lake disconnection on fish taxonomic distinctness in lakes from middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(1): 133-146. (in Chinese))
- [71] 夏军,高扬,左其亭,等. 河湖水系连通特征及其利弊[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 26-31. (XIA Jun, GAO Yang, ZUO Qiting, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 26-31. (in Chinese))
- [72] 刘丹,王烜,李春晖,等. 水文连通性对湖泊生态环境影响的研究进展[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(7): 1702-1715. (LIU Dan, WANG Xuan, LI Chunhui, et al. Eco-environmental effects of hydrological connectivity on lakes: a review [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(7): 1702-1715. (in Chinese))
- [73] 朱伟,程林,薛宗璞,等. 太湖水体交换周期变化(1986—2018年)及对水质空间格局的影响[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(4): 1087-1099. (ZHU Wei, CHENG Lin, XUE Zongpu, et al. Changes of water exchange cycle in Lake Taihu (1986-2018) and its effect on the spatial pattern of water quality [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(4): 1087-1099. (in Chinese))
- [74] 朱广伟,许海,朱梦圆,等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(6): 1510-1524. (ZHU Guangwei, XU Hai, ZHU Mengyuan, et al. Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6): 1510-1524. (in Chinese))

(下转第 147 页)

改革的意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2016 (6): 47-50.

[10] 冯欣,姜文来,刘洋,等. 中国农业水价综合改革历程、问题和对策[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43 (3): 117-127. ( FENG Xin, JIANG Wenlai, LIU Yang, et al. History, problems and countermeasures of comprehensive reform of China's agricultural water price [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43 (3): 117-127. (in Chinese))

[11] 于真. 论机制与机制研究[J]. 社会学研究, 1989 (3): 57-62. ( YU Zhen. On mechanisms and mechanism research [J]. Sociological Studies, 1989 (3): 57-62. (in Chinese))

[12] 陈茂山. 农业水价综合改革的探索实践与方向重点 [J]. 中国水利, 2024 (19): 1-6. ( CHEN Maoshan. Exploring practices of integrated reform of agricultural water pricing system and main directions [J]. China Water Resources, 2024 (19): 1-6. (in Chinese))

[13] 姜文来,冯欣,刘洋,等. 合理农业水价形成机制构建研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40 (10): 1-4. (JIANG Wenlai, FENG Xin, LIU Yang, et al. Study on the establishment of formation mechanism of reasonable agricultural water price [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40 (10): 1-4. (in Chinese))

[14] 杨柠,高玉屏,刘阳. 水利工程供水价格两个管理办法修订影响分析[J]. 水利发展研究, 2025, 25 (2): 79-84. (YANG Ning, GAO Yuping, LIU Yang. Analysis of the impact of revising two management measures for water prices in water conservancy projects [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25 (2): 79-84. (in Chinese))

[15] 刘啸,戴向前. 对深化农业水价综合改革的若干思考 [J]. 水利发展研究, 2023, 23 (11): 70-73. (LIU Xiao, DAI Xiangqian. Thoughts on deepening the comprehensive reform of agricultural water pricing [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23 (11): 70-73. (in Chinese))

[16] 陈茂山. 关于深化粮食作物农业水价综合改革的思考 [J]. 水利发展研究, 2023, 23 (11): 8-13. ( CHEN Maoshan. Thoughts on deepening the comprehensive reform of agricultural water pricing [J]. Water Resources Development Research, 2023, 23 (11): 8-13. (in Chinese))

[17] 李国英. 进一步全面深化水利改革 为推动水利高质量发展、保障我国水安全作出新的贡献: 在 2025 年全国水利工作会议上的讲话 [J]. 水利发展研究, 2025, 25 (1): 1-12. (LI Guoying. Further comprehensively deepen water conservancy reform to promote high-quality development of water conservancy and safeguard national water security: a speech at the 2025 national water conservancy work conference [J]. Water Resources Development Research, 2025, 25 (1): 1-12. (in Chinese))

[18] 姜文来,刘洋,伊热鼓,等. 农业水价合理分担研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (5): 191-195. (JIANG Wenlai, LIU Yang, YI Regu, et al. Research progress in reasonable sharing of agricultural water price [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (5): 191-195. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-06-09 编辑: 俞云利)

+++++  
(上接第 128 页)

[75] 吴浩云,甘月云,金科. “引江济太”20 年: 工程实践、成效和未来挑战 [J]. 湖泊科学, 2022, 34 (5): 1393-1412. (WU Haoyun, GAN Yueyun, JIN Ke. A retrospect on the water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu during 2002-2021: practices, achievements and future challenges [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (5): 1393-1412. (in Chinese))

[76] 杨倩倩,吴时强,戴江玉,等. 夏季短期调水对太湖贡湖湾湖区水质及藻类的影响 [J]. 湖泊科学, 2018, 30 (1): 34-43. ( YANG Qianqian, WU Shiqiang, DAI Jiangyu, et al. Effects of short-term water diversion in summer on water quality and algae in Gonghu Bay, Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30 (1): 34-43. (in Chinese))

[77] 杨素,万荣荣,李冰. 太湖流域水文连通性: 现状、研究进展与未来挑战 [J]. 湖泊科学, 2022, 34 (4): 1055-1074. (YANG Su, WAN Rongrong, LI Bing. Hydrological connectivity research in Lake Taihu Basin: status, progress and future challenges [J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34 (4): 1055-1074. (in Chinese))

[78] ERIYAGAMA N, SMAKHTIN V, UDAMULLA L. How much artificial surface storage is acceptable in a river basin and where should it be located: a review [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 208: 103294. (收稿日期: 2025-06-13 编辑: 俞云利)