

浅析湖库富营养化防控研究

陈诺¹, 周蕊¹, 唐鑫¹, 宋宏炎^{2,3*}

¹鄂北地区水资源配置工程建设与管理局(筹), 湖北 武汉

²长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉

³武汉长江水资源保护科技咨询有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年11月3日; 录用日期: 2025年11月24日; 发布日期: 2026年2月26日

摘要

富营养化是影响湖库水环境安全的主要问题。本文通过梳理总结湖库富营养化驱动因子、陆域污染源模拟与阻控技术、水域富营养化模拟与控制技术以及富营养化水陆协同防控研究现状, 针对传统的机理模型无法模拟漫散流、水陆分治无法保障富营养化防控效果的长效性等问题, 提出水量再分配视角下农田面源污染模拟、富营养化水陆协同防控研究建议, 以期为湖库富营养化的系统性治理方案制定提供借鉴思路。

关键词

湖泊, 水库, 面源污染, 富营养化, 水环境风险

A Brief Analysis of Research on the Prevention and Control of Eutrophication in Lakes and Reservoirs

Nuo Chen¹, Rui Zhou¹, Xin Tang¹, Hongyan Song^{2,3*}

¹Construction & Management Bureau of North Hu Bei Water Transfer Project, Wuhan Hubei

²Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan Hubei

³Wuhan Changjiang Water Resources Protection Technology Consulting Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: November 3, 2025; accepted: November 24, 2025; published: February 26, 2026

Abstract

Eutrophication is the main problem affecting the safety of lake and reservoir water environment. This pa-

作者简介: 陈诺, 出生于 1989 年 6 月, 武汉人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为环境工程和水土保持工程管理, Email: 468898977@qq.com

*通讯作者 Email: 1456093262@qq.com

文章引用: 陈诺, 周蕊, 唐鑫, 宋宏炎. 浅析湖库富营养化防控研究[J]. 水资源研究, 2026, 15(1): 12-18.

DOI: 10.12677/jwrr.2026.151002

per, by summarizing the current research status of the driving factors of eutrophication in lakes and reservoirs, the simulation and control technologies of land-based pollution sources, the simulation and control technologies of eutrophication in water areas, and the research on the coordinated prevention and control of eutrophication in water and land, proposes research suggestions on the simulation of non-point source pollution from farmland and the coordinated prevention and control of eutrophication in water and land from the perspective of water quantity redistribution, to solve the problems that traditional mechanism models cannot simulate the diffuse flow, and the problems that water-land separation management cannot ensure the long-term effectiveness of eutrophication control as well. It aims to provide reference ideas for the formulation of systematic governance plans for eutrophication in lakes and reservoirs.

Keywords

Lake, Reservoir, Non-Point Source Pollution, Eutrophication, Water Environment Risk

Copyright © 2026 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

富营养化是指水体氮、磷等营养物质丰富，藻类及其他浮游生物生产力旺盛的现象，易导致水体溶解氧含量下降、水质恶化，是影响湖库水环境安全的主要问题[1]。较自然河流，封闭湖库更容易发生富营养化。例如，我国和南非超过 60% 的被调查水库均发生过富营养化现象[2] [3]。目前富营养化现象防控实践主要集中在陆域污染源管控、水域水环境风险应急处置和水域水生态调控等方面[4]-[9]，尚未形成水陆协同的防控技术体系，无法实现水环境风险防控的系统性和长效性。在此背景下，本文从富营养化水陆协同防控角度对当前较为主流的基础理论和研究进展进行系统综述，总结当前湖库富营养化防控主要技术方法，提出湖库富营养化防控研究展望。

2. 湖库富营养化驱动因子研究

驱动富营养化现象的因素因湖库所处的环境背景而异，包括磷酸盐和硝酸盐等营养富集，透光率、温度、水力停留时间等物理条件变化以及生物多样性水平等。

2.1. 营养富集

水体中氮磷等营养物质含量与藻类等浮游生物生长状况息息相关，因浮游生物元素组成中的氮磷比值约为 16:1，国外相关研究将磷作为藻类生长的限制元素，并考虑采用总磷浓度来估算湖库的营养状态指数。我国 40 多个长江湖泊研究亦表明，磷是控制藻类初级生产力的关键因素[10]；仅在总氮和氨氮浓度大于 5 mg/L 时，氮才对藻类有一定的负面影响且可促进沉积物磷的释放[11]。然而，我国 171 个湖泊的遥感监测成果显示，80% 的湖泊富营养化现象与氮和磷均显著相关[3]；全球 573 个湖泊研究成果表明，氮、磷或两者共同作为富营养化现象限制因素因湖库水深而异[12]。因此，富营养化现象防控应实施氮磷输入控制，还是氮或磷输入控制不可一概而论。

2.2. 物理条件变化

温度(气温或水温)、光照强度、透光率、水深和风速等物理条件通过影响藻类等浮游植物生存环境而对其种

群密度和生物量产生影响。藻类等浮游植物体内化学和生物过程速率随温度的不同而变化,大多数情况下高温(如超过 25℃)会延长藻类生长期,更有利于蓝藻的生长[13];同时,高温易引起水体垂向密度分层,使得深水处低密度的藻类上升聚集在水体表层,增加表层水体藻类生物量[14]。充足的太阳光与适宜的温度相协调,有助于藻类等浮游植物的生长,促使表层藻类等浮游植物生物量增加。进一步,藻类等浮游植物过度发育、聚集或水体浊度增加产生的阴影效应会影响光的穿透性,降低深水层植物的光合作用效果并加速其死亡和降解,反过来为表层藻类等浮游植物的生长提供营养盐。水深通过影响湖库水温结构亦会成为驱动富营养化现象的因素之一,当水深较浅时,湖库水温结构以混合层为主,水体扰动易使沉积物中的营养盐释放而增加水体磷等营养物质含量或减缓水体中营养物质下降速率,易发生富营养化现象[11]。风速或水动力条件是影响湖库表层水体流动性的主要因素之一,会对表层水体藻类的聚集程度产生影响,研究表明,我国过去 20 年发生的湖库富营养化现象中,80%的富营养化现象发生时水体表层风速小于 3 m/s、气温大于 16℃[3]。总体而言,各物理条件之间存在相互关联,但其关联程度因湖库所处地理环境的差异而有所不同[15][16]。尽管透光率和温度等大部分物理条件变化人为调控难度较大,但通过识别物理条件变化对营养状态的影响,仍然可为氮磷等营养物质输入管控方案的制定提供边界条件。

2.3. 生物多样性

水生态系统由微生物、水生植物和水生动物等组成,一个健康的生态系统能够抵御干扰并自我调节;相反,生物多样性的丧失会导致生态系统的紊乱,特别是在水生环境中,易引起微生物活动不平衡而造成水华。因此,保护水生生物多样性对于健康的生态系统功能尤为重要。

微生物群落可促进养分循环,起到调节水体营养平衡的作用[17]。水生植物是湖泊中主要的初级生产者,不同类型水生植物在光和营养盐获取方面存在竞争关系,如贫营养浅水湖泊中水体透光率较好,沉水植物和底栖藻类可从沉积物中获取充足营养盐,是优势初级生产者;随着营养盐的增加,浮游植物生物量逐步升高导致水体浊度增加,导致到达水下的光照强度减弱,影响底栖植物的生长[18][19]。尽管浮游植物在光和营养盐获取方面较底栖植物具有一定优势,但沉水植物能够通过释放化学物质影响浮游植物生长。因此,在营养物质较丰富的情况下,沉水植物与浮游植物之间的相互作用对藻类水华的发生具有一定抑制作用[20]。鱼类,尤其是滤食性鱼类通过捕食浮游植物可达到直接遏制藻类异常增殖、间接减少水体氮磷营养物质含量的效果[21]。以鲢为例,鲢对不同藻类的滤食效率无显著差异,不仅可通过摄食行为降低藻密度,同时可促进水体营养向磷限制转换[22];但不同体型大小的鲢对浮游植物的影响不同,比如小白鲢对浮游植物,尤其是微型浮游植物(<20 μm)的控制效果比大白鲢更好[4]。除了间接影响水体营养物质富集,鱼类密度也会通过影响水动力条件而对营养盐的沉积和扩散产生影响[23]。当底栖动物群落结构合理、具有较高的多样性水平时,通过控制湖库水体下部悬浮物含量,为底栖植物生长创造条件,反之亦然,如底栖动物中双壳类可以降低悬浮物浓度,从而有利于底栖植物的生长以及湖泊清水态的维持;但寡毛类的过度增殖会导致沉积物中营养成分的大量释放,导致富营养化湖泊中的水更加浑浊[19][24]。

3. 湖库富营养化防控关键技术研究

依据湖库富营养化驱动因子针对性提出水环境风险防控方案,考虑大部分物理条件(如温度、光照强度、透光率和风速等)人为调控难度较大,陆域营养盐输入阻控、水域水环境风险控制及富营养化水陆协同防控方案决策是湖库富营养化水陆协同防控研究需要把控的关键环节。

3.1. 农业面源污染模拟与阻控

农业面源污染是氮、磷、农药及其他有机或无机污染物质,通过农田地表径流、壤中流、农田排水和地下

渗漏, 进入水体而形成的污染, 具有随机性、广泛性及滞后性等特点。《第二次全国污染源普查公报》成果显示, 农业面源污染源化学需氧量、氨氮、总氮和总磷排放量占全国污染物排放总量的比例分别为 48.8%、22.4%、46.5% 和 67.2%, 是影响我国水环境质量的主要污染源, 加强农业面源污染模拟与阻控、降低氮磷入湖库量, 可减少浮游植物生长所需营养盐, 从源头防控湖库富营养化风险。

农业面源污染物模拟研究方法主要有野外实测、室内外试验、模型模拟等, 其中具有物理机制的流域模型, 通过径流模拟、土壤流失量预测和污染物迁移评估, 能用于预测不同管理模式径流、泥沙和养分迁移, 追溯污染物来源, 解析污染物浓度, 核算污染物负荷, 是制定面源污染治理对策、评估面源污染防治效果的有效手段。其中, 传统的机理模型适合模拟有明显高程差的地形产汇流过程, 但在平原耕作区存在一定局限性[25]。

当前主要的面源污染阻控技术可归纳为源头减量、过程拦截和末端消纳治理三个方面[26]。源头减量可通过两种方式减少农业面源污染物产生与排放, 一是在保证粮食作物产量的基本需求下, 适当调整区域种植结构[27]; 二是优化农业生产工艺, 包括合理施肥[28]、水肥一体化和缓/控释肥[29]、农业高效节水[30]、改良农田耕作方式(如少耕或翻耕配合泡田等)[31]等。过程拦截技术是一种在水流迁移途径上, 采用物理、生物的方法对农业面源污染物进行阻滞降解的技术体系, 包括建设田埂[32]、缓冲带[33]、生态沟渠[34]等。末端消纳治理技术主要是通过在水流末端采取降解措施进一步对水质进行净化, 如前置库[35]、人工湿地[36]-[38]。

3.2. 水库富营养化模拟与控制

水库富营养化模拟模型可分为统计模型和机理模型。机理模型主要是对水库水文、水动力、水质、水生态等过程的模拟, 可实现零维、一维、二维和三维的过程模拟, 因能克服统计模型对数据资料时间序列和数据资料种类要求较高的缺陷, 较统计模型, 机理模型具有广泛的应用性[39]。借助水库富营养化模拟与效果分析手段, 国内外从控制水库营养盐富集、水体水力停留时间等物理条件变化、生态系统结构调整等方面, 开展了一系列水库富营养化控制研究。

控制水库营养盐富集主要通过工程措施拦截和降解入库河流沿程输入营养盐、通过水生植物吸收库区水体营养盐等两种方式实现。其中第一种方式在农业面源污染物阻控技术研究方面已进行描述, 在此不再赘述。根据水生植物根系所处环境, 第二种方式可分为利用根系直接吸收底泥中的污染物和利用根系直接吸收水中的污染物两类。沉水植被等水生植物可去除底泥中的污染物并有效抑制底泥的再悬浮[40], 如胡小贞等(2012)研究发现滇池福保湾底泥污染控制与植被重建后对沉积物再悬浮抑制作用较为明显, 沉水植物对底泥再悬浮的抑制效果相对挺水植物显著[41]。作为一种生态修复技术, 生态浮岛兼具净水作用和观赏价值, 已广泛用于治理富营养化水体; 在实践过程中逐渐由单一的生态浮岛技术向组合型生态浮岛技术发展, 如火山石填料 + 蜂窝状活性炭网 - 生态浮岛技术、微纳米曝气 - 生态浮岛技术等[42]-[45]。

水流条件的变化通过影响营养盐在水体中的时空分布、底泥向水体中的营养盐释放量、水体内的悬移质和藻类的垂向运动以及浮游植物种群竞争关系等方式, 对浮游植物生长产生影响。目前, 对水库水流条件的调控主要集中在径流过程、水量、换水周期、水汽扰动等方面。如通过增大三峡水库库湾上游来水或坝址泄水量增加短时间内的水流流速, 可对库湾水体进行扰动以防止富营养化现象的发生[46]; 通过优化水库环流特性和水流紊动状况, 减少水龄、抑制蓝藻生长, 从而降低水库富营养化的风险[47] [48]。

生物操纵技术是利用种间竞争和捕食关系, 对水体中有害藻类进行摄食、转化、降解以及转移, 从而达到控制藻类丰度的目的, 包括经典生物操纵技术和非经典生物操纵技术。经典生物操纵技术是通过放养肉食性鱼类或直接捕(毒)杀等方法去除以浮游动物为食的鱼类, 保护和发展大型牧食性浮游动物, 使其生物量增加和体型增大, 提高其对浮游植物的摄食效率, 从而降低浮游植物的数量, 控制其过量繁殖; 非经典生物操纵技术则是通过投放鲢鳙等滤食性鱼类来直接摄食蓝藻等浮游生物。无论是经典的生物操纵技术, 还是非经典的生物操纵技术, 它们都各有长处, 同时也不可避免地存在着一些不足[49]。

3.3. 富营养化水陆协同防控现状

汇水范围内污染源以农业面源污染为主的水库，其水环境风险防控包括农业面源污染阻控、水库富营养化控制等。目前，水库水环境风险防控研究以陆域或水域分区治理为主，如王铮等(2024)从微生物、水生植物和水生动物三方面剖析了基于营养平衡调控的水体生态修复(生态浮岛、沉水植物、人工湿地、微生物修复)机理[6]；桑灿等(2024)利用 SWAT 模型模拟了化肥深埋、化肥减施、植被缓冲带、河道植草、15°以上退耕还林等 5 种最佳管理措施(BMPS)在白莲河流域总磷的削减效果[5]。水库水环境受污染物外源输入、水体理化性质变化和内源释放等综合影响，因此，为制定科学合理、经济可行的水库水环境风险防控方案，需考虑陆域、水域水环境风险协同防控。水库水环境风险调控方案研究以治理成本最小化、工程削减量最大化、水质和水生态改善效果最大化为目标函数，以治理措施的类型、规模和布局为决策变量，从海量方案组合中确定最优的方案集合，流域决策优化模型是实现上述目标较为有效的方法[50]。

4. 湖库富营养化防控研究展望

尽管陆域营养盐输入阻控、水域水环境风险控制已被国内外学者广泛研究，但水库富营养化水陆协同防控方案决策研究更多处于框架研究阶段，鲜有结合我国农业面源污染实际排放过程、富营养化风险防控涉及的工程建设运行经济成本和供水影响消除成本等经济因素和社会影响，论证最优富营养化水陆协同防控体系。

4.1. 水量再分配视角下农田面源污染模拟研究

水库汇水范围内农田区域一般由农田、人工输排水沟渠相互嵌套而成，连接水库的灌溉渠道改变了天然河道的水量空间分配过程，水库调度和农田灌溉制度影响着天然河道的水量时间分配过程，同时人工排水沟渠的槽蓄作用在一定程度上能够通过增加水力停留时间从而消减子流域出口的水量和水质浓度峰值，但现有模型不能精确刻画人工排水沟渠中污染物的迁移转化过程。因此，为准确描述水库农业面源污染物输入特征，亟须将水利工程分布对河流径流影响机理融入具有物理机制的流域模型，并耦合农业面源污染输移模型，开展土地利用方式和水利工程分布及其调控作用对河流径流和水质的影响机理研究。

4.2. 富营养化水陆协同防控研究

水库水环境风险陆域和水质分区治理仅能从表象解决问题，其中陆域污染物削减存在经济合理性、实际可操作性等方面的问题，而水域水环境风险控制存在“治标不治本”、经济代价大、水库功能受影响等问题。水库富营养化防控是一项系统性和长期性的工程，为保障各项措施的经济合理性、效果持续性、水库功能受影响最小化，需开展富营养化水陆协同防控研究，构建水环境风险防控决策体系，为不同情形下的富营养化风险防控方案确定提供量化的决策依据。

5. 结语

本文通过梳理总结湖库富营养化驱动因子、防控关键技术研究现状，提出了水量再分配视角下农田面源污染模拟、富营养化水陆协同防控研究建议，研究成果将有助于推动形成富营养化水陆协同防控技术体系。然而，鉴于理论水平和实践经验不足，下一步将深化富营养化水陆协同防控技术路线与方法研究，早日付诸实践。

基金项目

国家自然科学基金(52109005)。

参考文献

[1] 宋子豪, 邹伟, 桂智凡, 等. 我国常用湖泊营养状态指数研究进展与展望[J]. 湖泊科学, 2024, 36(4): 987-1001.

- [2] MARK, M., STEWART, B. Eutrophication and cyanobacteria in South Africa's standing water bodies: A view from space. *South African Journal of Science*, 2015, 111(5): 1-8.
- [3] WANG, Y., FENG, L. and HOU, X. J. Algal blooms in lakes in China over the past two decades: Patterns, trends, and drivers. *Water Resources Research*, 2023, 59: e2022WR033340.
- [4] 靳晓彤, 唐雅丽, 郭佳, 等. 不同体型大小的鲢对富营养化水体中浮游植物的影响[J]. *生态科学*, 2023, 42(3): 98-105.
- [5] 桑灿, 李兆华, 冯学高, 等. 基于 SWAT 模型的白莲河流域总磷关键源区识别与最佳管理措施(BMPs)研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(2): 374-386.
- [6] 王铮, 张艾, 林旭萌, 等. 从营养平衡角度分析富营养化水体生态修复方法[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(1): 118-126.
- [7] ZARAGÜETA, M., ACEBES, P. Controlling eutrophication in a mediterranean shallow reservoir by phosphorus loading reduction: The need for an integrated management approach. *Environmental Management*, 2017, 59(4): 635-651.
- [8] GARCÍA-GÓMEZ, H., EINARSSON, R., THEOBALD, M., et al. Impact of changing agricultural management on the exceedance of empirical critical loads of nitrogen in terrestrial habitats of Southwestern Europe. *Environmental pollution*, 2025, 383: 126867.
- [9] ABEYKOON, W., ZHANG, Y. Mitigation of harmful algal blooms using iron-modified clays inside the semi-permeable membrane tubes. *Algal Research*, 2025, 91: 104302.
- [10] 季鹏飞, 许海, 詹旭, 等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2020, 41(9): 4030-4041.
- [11] 王洪铸, 王海军, 李艳, 等. 湖泊富营养化治理: 集中控磷, 或氮磷皆控? [J]. *水生生物学报*, 2020, 44(5): 938-960.
- [12] XU, H., QIN, B., PAERL, H. W., et al. Environmental controls of harmful cyanobacterial blooms in Chinese inland waters. *Harmful Algae*, 2021, 110, 102127.
- [13] O'NEIL, J. M., DAVIS, T. W., BURFORD, M. A., et al. The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae*, 2012, 14: 313-334.
- [14] QIN, B. Q., ZHOU, J., ELSER, J. J., et al. Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(6), 3191-3198.
- [15] 孟靖雅, 宋浩铭, 解飞, 等. 富营养湖泊冰封期物理因子对初级生产力的驱动作用: 以辽宁含章湖为例[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(4): 1268-1278.
- [16] 冯昶瑞, 蒋名亮, 牛海林, 等. 滇池近 20 年水环境变化趋势与影响因素分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2024, 36(2): 12-18.
- [17] JIAO, C. C., ZHAO, D. L., HUANG, R., et al. Habitats and seasons differentiate the assembly of bacterial communities along a trophic gradient of freshwater lakes. *Freshwater Biology*, 2021, 66(8): 1515-1529.
- [18] VADEBONCOEUR, Y., LODGE, D. M. and CARPENTER, S. R. Whole-lake fertilization effects on distribution of primary production between benthic and pelagic habitats. *Ecology*, 2001, 82(4): 1065-1077.
- [19] 刘正文, 张修峰, 陈非洲, 等. 浅水湖泊底栖-敞水生境耦合对富营养化的响应与稳态转换机理: 对湖泊修复的启示[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 1-10.
- [20] 李朝, 吴涛, 迟伟伟, 等. 徐州九里湖沉水植物对富营养化湖泊的生态改善作用[J]. *环境监控与预警*, 2024, 16(1): 80-86.
- [21] 李晓杰, 唐敏, 李云, 等. 鲢鳙在长寿湖水生态系统氮磷循环中的作用[J]. *淡水渔业*, 2018, 48(3): 40-46.
- [22] 朱思嫻, 胡红娟, 贾佳, 等. 鲢滤食不同藻类的磷吸收及排泄过程研究[J]. *水生生物学报*, 2024, 48(5): 744-752.
- [23] HUSER, B. J., BAJER, P. G., CHIZINSKI, C. J., et al. Effects of common carp (*Cyprinus carpio*) on sediment mixing depth and mobile phosphorus mass in the active sediment layer of a shallow lake. *Hydrobiologia*, 2016, 763(1): 23-33.
- [24] 莫竞瑜, 池仕运, 王竹, 等. 城市人工浅水湖泊底栖动物群落结构及影响因素分析[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(5): 58-66.
- [25] 夏永秋, 赵娣, 严星, 等. 我国农业面源污染过程模拟的困境与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(11): 2327-2337.
- [26] 李裕元, 李希, 孟岑, 等. 我国农村水体面源污染问题解析与综合防控技术及实施路径[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(2): 185-197.
- [27] 刘旭华, 张佳慧, 刘华民, 等. 基于种植结构改进的 SWAT 模型模拟乌梁素海流域面源污染负荷[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(8): 2505-2514.
- [28] 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 等. 种植业面源污染防治技术发展历程分析及趋势预测[J]. *环境科学*, 2020, 41(8): 3870-3878.
- [29] 张金鸽, 肖广江, 苏柱华, 等. 广东省农业面源污染防治研究[J]. *热带农业科*, 2016, 36(9): 109-116.
- [30] 张宝忠, 张彦群, 闫晋阳, 等. 河套灌区农业高效节水与面源污染防治技术[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(5): 1-7.
- [31] 王维刚, 史海滨, 李仙岳, 等. 基于改进 SWAT 模型的灌溉施肥耕作对乌梁素海流域营养物负荷及作物产量的影响[J].

湖泊科学, 2022, 34(5): 1505-1523.

- [32] 任加国, 范坤, 陈清, 等. 田埂在农业面源污染治理中的应用现状与展望[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 262-269.
- [33] 张靖雨, 夏小林, 汪邦稳, 等. 不同配置乡村植被缓冲带阻控径流污染特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 383-391.
- [34] 秦沂樟, 白静, 赵健, 等. 生态沟渠磷拦截效应对不同因子的响应特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 122-130.
- [35] 杨兵, 何丙辉, 王德宝. 三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4586-4595.
- [36] 路鑫雨, 徐惠风, 文波龙, 等. 湿地植物对农田退水的生理生态响应[J/OL]. 分子植物育种, 2023: 1-15.
<https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20230704.1102.005>, 2026-01-16.
- [37] 常洋, 王文富, 王冠峰, 等. 芦苇碳源水平潜流人工湿地强化农田退水脱氮效能研究[J]. 环境科学学报, 2024, 44(1): 275-282.
- [38] 苏萌白, 王克勤, 宋娅丽, 等. 生态塘-潜表流复合人工湿地对抚仙湖入湖河流水质净化效应及途径[J]. 环境科学研究, 2024, 37(3): 572-585.
- [39] ANAGNOSTOU, E., GIANNI, A. and ZACHARIAS, I. Ecological modeling and eutrophication: A review. Natural Resource Modeling, 2017, 30(3): E12130.
- [40] 高帅强, 陈志远, 李锋民, 等. 沉水植物矮慈姑对重污染底泥的耐受及其中主要污染物的去除[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2182-2189.
- [41] 胡小贞, 刘倩, 李英杰. 滇池福保湾植被重建对底泥再悬浮及营养盐释放的控制[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1288-1292.
- [42] 方媛媛, 刘聚涛, 戴国飞, 等. 生态浮岛技术及其在富营养化水体修复中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2019, 44(10): 71-75.
- [43] 高寒, 贺振洲, 赵军, 等. 组合型生态浮岛原位修复重污染水体[J]. 环境工程学报, 2019, 13(12): 2884-2889.
- [44] 潘俊, 孙舶洋, 魏炜, 等. 微纳米曝气-生态浮岛联合技术处理氮磷污染水体[J]. 环境工程, 2020, 38(5): 49-53.
- [45] 杨中华, 杨水草, 李丹, 等. 三峡水库支流小江富营养化模型构建及在水量调度控藻中的应用[J]. 湖泊科学, 2016, 28(4): 755-764.
- [46] 黄宇波, 曹光荣, 范向军, 等. 汛期水库调度对小江水华的影响[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(1): 52-58+74.
- [47] 杨金艳, 徐勇, 周杰, 等. 基于水龄抑制蓝藻水华的供水水库取水方案优选[J]. 水利水电工程学报, 2020(2): 85-90.
- [48] 王小冬, 刘子秋, 刘兴国, 等. 不同浓度微囊藻水华在曝气扰动下的光合作用[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(12): 136-143.
- [49] 王寿兵, 屈云芳, 徐紫然. 基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制实践[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 1-4+23.
- [50] 刘永, 蒋青松, 梁中耀, 等. 湖泊富营养化响应与流域优化调控决策的模型研究进展[J]. 湖泊科学, 2021, 33(1): 49-63.