

湖库浊水形成机制、演变规律与调控技术研究进展

黄安君¹, 蔡奕^{1,2*}, 王梅³, 周念清^{1,2}, 蒙振思², 王平⁴, 和田歌¹

¹同济大学土木工程学院, 上海

²长江水环境教育部重点实验室(同济大学), 上海

³恒晟水环境治理股份有限公司, 广西 桂林

⁴黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年1月11日; 录用日期: 2026年2月18日; 发布日期: 2026年2月26日

摘要

湖库作为关键的水资源储存库具有重要的调蓄功能, 在维持区域生态平衡与支撑社会经济发展方面发挥着不可替代的作用。因其水体交换缓慢、自净能力有限, 对流域人类活动与全球气候变化胁迫尤为敏感, 常因暴雨引发库区水土流失导致湖库水体浊度持续升高、生态系统服务功能衰退等一系列连锁问题。本文系统阐述了水动力条件改变、外源负荷输入及内源负荷释放等多尺度驱动因素对浊水形成的复合作用机制, 并综合评估了物理、化学与生态等治理技术的适用条件、局限性与实效性。在此基础上, 提出了未来需要重点研究和突破的3个发展方向: (1) 深究多过程耦合驱动下持久浊水的形成机理; (2) 构建多维度高分辨率浊水监测网络; (3) 构建全链条协同的湖库浊水治理新范式, 旨在为实现湖库水环境质量精准管理与长效改善提供理论和技术支撑。

关键词

湖泊水库, 浊度, 形成机制, 时空演变, 治理方法

Advances in the Formation Mechanisms, Evolution Patterns, and Regulation Technologies of Turbid Water in Lakes and Reservoirs

Anjun Huang¹, Yi Cai^{1,2*}, Mei Wang³, Nianqing Zhou^{1,2}, Zhensi Meng², Ping Wang⁴, Tiange He¹

¹College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

*通讯作者。

²The Yangtze River Environment Key Laboratory of the Ministry of Education (Tongji University), Shanghai

³Hengsheng Water Environment Treatment Co., Ltd., Guilin Guangxi

⁴Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou Henan

Received: January 11, 2026; accepted: February 18, 2026; published: February 26, 2026

Abstract

Lakes and reservoirs, as critical water storage bodies with significant regulatory functions, play an irreplaceable role in maintaining regional ecological balance and supporting socioeconomic development. Due to their slow water exchange and limited self-purification capacity, they are particularly sensitive to stressors from watershed human activities and global climate change. Heavy rainfall often triggers soil erosion in reservoir areas, leading to persistently elevated turbidity and a series of cascading issues such as the degradation of ecosystem services. This paper systematically elucidates the composite mechanisms driving turbid water formation under multi-scale factors, including altered hydrodynamic conditions, external pollutant loads, and internal nutrient release. It also comprehensively evaluates the applicability, limitations, and effectiveness of current treatment technologies spanning physical, chemical, and ecological approaches. Based on this, three priority research directions are proposed for future focus and advancement: (1) in-depth investigation into the formation mechanisms of persistent turbidity driven by multi-process coupling; (2) development of a multi-dimensional, high-resolution monitoring network for turbid water; and (3) establishment of a full-chain, synergistic paradigm for turbidity management in lakes and reservoirs. These initiatives aim to provide theoretical and technical support for precise management and long-term improvement of water environmental quality in lakes and reservoirs.

Keywords

Lakes and Reservoirs, Turbidity, Formation Mechanisms, Spatiotemporal Evolution, Solutions

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

湖泊与水库(以下简称“湖库”)作为地球上关键的淡水资源储库与物种基因库,在维系人类生产生活与保护生物多样性等方面发挥着不可替代的作用[1]。然而,在全球气候变化加剧与区域人类活动不断增强的背景下,湖库水体普遍面临悬浮物含量上升的挑战,其成分包括悬浮泥沙、浮游藻类以及各类胶体颗粒等,导致水体透明度显著下降,形成视觉与生态学意义上的浊水现象[2]。湖库浊化不仅直接抑制水生生态系统的光合作用与初级生产力,更可引发水质恶化、生物多样性丧失以及生态系统功能退化等一系列连锁效应[3]。此外,高浊度还严重威胁城乡供水安全和自然景观价值。值得注意的是,该现象已从传统认知的干旱半干旱区,扩展至水资源相对丰沛的地区,呈现出广泛性与普遍性[4][5]。因此,科学揭示湖库浊水的形成与系统演变机理,已成为应对其衍生环境问题的当务之急。

由于湖库普遍具有水力滞留时间长、水体交换缓慢的特点,其水质动态深受外源输入、内源释放及人工调控等多重过程的复杂影响,致使浊水问题的治理难度显著增大。本文旨在系统梳理湖库浊水的形成机制、时空演变规律及现有调控技术手段与效能,进而展望该领域未来研究的重点方向,以期为湖库水环境的精准治理与长效管理提供理论依据与技术支撑。

2. 湖库浊水的形成机制

湖库浊水的形成是一个由悬浮物来源、迁移运输及絮凝沉降等多过程共同驱动的复杂非线性过程，其核心是水体中悬浮颗粒物的输入、转化与归属，具体概念模型如图 1 所示，各环节的关键驱动因素与机理存在很大的差异。

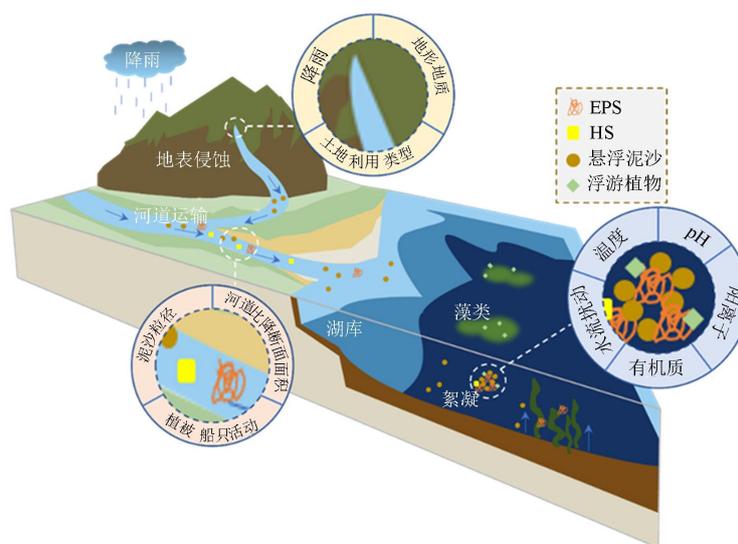


Figure 1. Conceptual model of turbid water formation in lakes and reservoirs
图 1. 湖库浊水形成的概念模式

2.1. 悬浮物的来源与输入

湖库悬浮物来源复杂，主要包括外源输入与内源释放两类。外源以流域地表侵蚀产生的悬浮泥沙为主，内源则涉及藻类繁殖、底泥再悬浮以及胶体物质等。水中的胶体物质分为有机胶体(如胞外聚合物(EPS)、腐殖质(HS))、无机胶体(如黏土矿物、金属氢氧化物、氧化物等)、有机-无机复合胶体[6][7]。悬浮物的类型与负荷受区域地层结构、地形地貌特征、土地利用方式及气候条件变化的综合调控。

岩性、风化程度和地形坡度共同决定了区域的侵蚀本底。我国黄土高原土体质地疏松、坡陡沟深，在重力与水力触发作用下极易发生坍塌、泻溜[8][9]。西南喀斯特地区岩溶发育则因浅薄的土层与活跃的地下漏失并存，极易形成独特的地上-地下双重侵蚀模式[10]。且该区域山多坡陡，本就存在水土流失风险，不适宜的坡地耕种将显著加剧此过程的发生[11]。广泛分布于我国东南、西南和西北部的红层地貌区是形成红土区的物质基础，其土壤多由紫红色砾岩、砂岩和泥质岩等经风化作用而成，地貌以丘陵、盆地为主。该地区土壤结构松散、抗蚀力弱，在强降雨驱动下易出现红层荒漠化现象[12]。

地表覆被的改变可直接影响和调控侵蚀强度。研究表明，农田环绕的湖泊其浊度(平均约 57.0 NTU)远高于森林流域湖泊(平均约 4.7 NTU)[13]。这是因为农田耕作加剧了降雨侵蚀作用，同时化肥、农药随灌溉水流进入水体，引起藻类爆发会间接降低透明度。坡耕地转化为林地或草地可显著降低土壤侵蚀模数，这在黄土高原及长江中下游湖泊流域的研究中均得到验证[14][15]。

降雨是侵蚀的根本动力，尤其在地形起伏较大或土壤疏松的地区，其影响尤为显著。研究发现，我国青藏高原与北方地区的土壤侵蚀模数随降雨量增加而急剧增大[16]。在丹江口库区，近 90%的侵蚀量集中于 5~9 月暴雨期[17]。黄土高原地区极端降雨事件可贡献约 90%的年土壤侵蚀量[18]。此外，径流输入的有机质会促进藻类增殖与微生物活动，进而产生腐殖质等微生物源胶体[19]，形成生物源浊度。

2.2. 悬浮物的迁移与运输

悬浮物(尤指泥沙)在河道中的运移是决定其能否进入湖库的关键环节。以洪泽湖为例,其 80%的泥沙经淮河干流输入[20]。输运能力主要受泥沙自身特征(粒径、矿物组成)与水动力条件(流速、河道形态)的耦合影响。

河道比降与断面形态主要通过改变水流速度影响输沙强度。研究表明,宽浅河道输沙能力普遍弱于窄深河道[21]。一般在入湖河口,因断面扩大导致流速骤减,粗颗粒泥沙往往在此发生初始沉积。河道中生长的植被可以改变水流结构影响泥沙淤积,但其作用受植物的排列模式、密度、流速等因素的影响。水生植被的错落排列模式会显著增加流动阻力。当水流速度较高且植被密度较大时,可能会产生强水流紊动,导致底泥再悬浮[22]。河道通航活动则直接导致河岸侵蚀与底泥扰动,尤其在狭窄水域,船舶航行可显著抑制水生植被,削弱其固岸缓流功能[23][24],促进了泥沙的迁移与运输。

2.3. 湖库内的絮凝与沉降

悬浮物进入湖库后的最终归宿在很大程度上取决于絮凝动力学过程,该过程受物理、化学与生物因素的综合调控[25]。泥沙粒径、温度、pH 值、阳离子、水流扰动、有机质等因素通过影响悬浮颗粒的碰撞频率和表面电化学特性来影响絮凝动力学过程[26][27]。

既有研究表明,泥沙絮凝存在粒径临界范围,黏性泥沙的絮凝临界粒径通常分布在 0.01~0.03 mm 之间,其具体值受水温、离子环境和水动力等条件共同调控[28]。温度通过影响水体黏性及颗粒界面作用力调控絮凝动力学过程。温度升高会降低水体黏性,从而加速絮团沉降并提升水体澄清晰度;反之,低温条件下,水体黏性增大且吸附水膜变薄,导致絮凝过程中需克服的排斥势能增加,进而显著降低絮凝效率。有研究指出,当水温低于 10°C 时,细颗粒絮凝过程明显受抑制[29]。然而,湖库表层和底层之间存在显著的温差(可达 15°C 左右)会形成稳定的热分层结构,这会阻碍水体的垂向混合,导致浊度层长期滞留于温跃层附近[30][31]。pH 值与阳离子种类/浓度通过调控颗粒表面电荷影响其稳定性。例如,在 Fe³⁺-蒙脱石体系中,pH ≈ 4.5 时絮凝效果显著增强[32]。高价阳离子(如 Ca²⁺、Al³⁺)可通过压缩双电层厚度及电荷中和作用促进颗粒碰撞与絮凝。然而,该促进效应存在浓度阈值,超过阈值后,颗粒表面可能带正电,导致泥沙颗粒间排斥力增强,从而降低粘结概率[33]。

絮凝动力学过程同样受控于水流扰动。水体紊动对细颗粒絮凝具有显著的双重效应,一方面可提高颗粒间的碰撞频率促进絮凝;但超过临界紊动剪切临界值(约 15~40 s⁻¹),又会增加絮团破碎概率,从而抑制絮凝过程[34]。有研究表明,当流速高于 0.3~0.4 m/s 时,絮凝体稳定性显著降低,沉降过程受抑制[28]。洪水期间较强的水流扰动会阻碍絮凝体沉降,致使细颗粒泥沙维持悬浮,造成水体长期浑浊。同时,水库的取水操作不仅会干扰洪水异重流,促使浑水团蔓延[35],而且在无排沙洞的南方水库中,取水或发电引起的流量波动更易搅动底床沉积物,引发再悬浮,从而持续加剧水库的浑浊现象。

藻源胞外聚合物(EPS)和陆源腐殖质(HS)是水体中两种典型的有机质,但二者对悬浮颗粒的絮凝行为具有截然不同的效应,这种差异本质上源于其在颗粒-水界面上的不同交互机制。EPS 作为藻类等水生生物分泌的高分子聚合物,分子结构复杂且电荷分布不均,易通过静电作用、氢键及 Ca²⁺等二价阳离子桥接吸附于颗粒表面并发挥桥接作用,从而促进颗粒聚集。夏季高温藻华期间,EPS 比例上升,有助于形成更大、更易沉降的絮团[36]。相反,HS 通常带有较高密度的负电荷,其在悬浮颗粒表面的吸附更倾向于形成连续、均匀的覆盖层,从而增强颗粒间的双电层斥力并产生明显的空间位阻效应,抑制颗粒聚集[37][38]。HS 主要通过降雨径流输入湖库,在光照不足的条件下其降解受阻,导致大量累积。高浓度的 HS 会竞争颗粒表面的吸附点位,削弱 EPS 的桥接功能,进而降低整体絮凝效率并增强悬浮体系的稳定性。

可见,湖库浊水的形成机制涵盖“来源-输运-絮凝”全链条,是自然因素与人类活动交互作用的结果。现有观测表明,我国浊水类型呈现明显的区域分异:北方多为“高沙高浊”型,而南方则常见“低沙高浊”现象,其浊度持续偏高的关键原因在于,水体中悬浮的黏粒和胶体等颗粒物易于形成稳定的胶体分散体系。但目前对于持久浊水的形成机理尚不明确,特别是对细颗粒胶体与腐殖质的协同稳定性、水体热分层对浊度垂向分布的“锁定效应”、人为扰动下反复的絮凝-再悬浮动态平衡等问题,缺乏系统的理论与模型阐释。

3. 湖库浊水的时空演变规律

湖库浊水的形成是多重动力过程耦合作用的结果,这必然导致其在水体中所呈现的浑浊状态具有典型的时空异质性。深入解析其动态特征与空间分布模式,是预测浊水演变趋势与实现科学调控的理论基础。

3.1. 浊水的动态特征与驱动机制

浊度的时序波动是外部驱动因子与湖库本身水动力条件、地貌形态互馈的直观体现,依据水深与水文连通性,可大致归纳为两种典型模式,即“夏低冬高”型和“夏高冬低”型。

我国东部平原区的典型浅水湖泊,如鄱阳湖、巢湖、太湖等,其浊度年内变化通常呈现“夏低冬高”的格局[39]。该特征主要由水位-风浪协同调控机制驱动:夏季丰水期,高水位削弱了风浪对底泥的扰动能力,同时水文植被繁茂,水体浊度较低;而春冬季水位下降与风力增强共同作用,易引发大规模的沉积物再悬浮,导致浊度显著升高[40][41]。研究表明,风浪扰动是浅水湖泊浊度变化的主导因素。太湖悬浮物浓度与日均风速之间存在显著相关关系($R^2 = 0.685$) [42];鄱阳湖和洞庭湖在春冬季浊度显著高于夏秋季,其浊度与风速呈正相关[43][44];巢湖在冬季强风期间浊度可达 90 NTU [45];呼伦湖 10 月(风速较高)悬浮物浓度(74.9 mg/L)约为 7 月(37.7 mg/L)的 2 倍[46]。此外,极端气候事件对浊度具有瞬时驱动效应,如查干湖在台风过境后浊度剧增 1.4 倍,其总悬浮物浓度与浊度均与风速呈正相关(R^2 分别为 0.79 和 0.45) [47]。

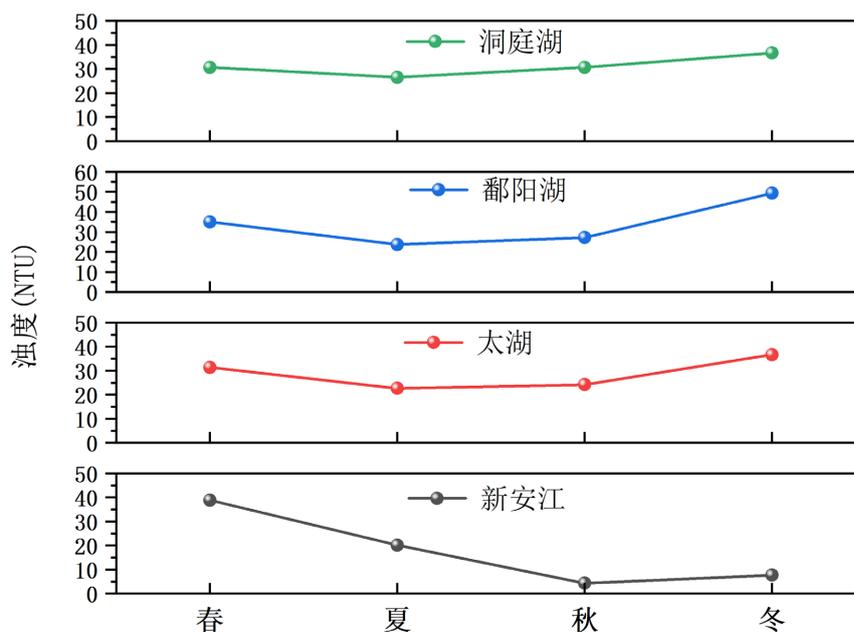


Figure 2. Seasonal variations in turbidity of different lakes (or reservoirs)

图 2. 不同湖库水体浊度的季节变化

不同于浅水湖库，深水湖库的浊度动态则多表现为“夏高冬低”的特征。如图 2 所示，洞庭湖、鄱阳湖及太湖 3 个浅水湖泊的冬季平均浊度比夏季高约 15~30 NTU，而深水湖库新安江的冬季平均浊度比夏季低约 15 NTU。夏季暴雨将流域内大量悬浮物与营养盐冲刷入湖，直接推高浊度并形成持续影响。例如，新安江水库降雨量与浊度增长率显著正相关($R^2 = 0.81$)，大雨及暴雨条件下浊度峰值常滞后于降雨 1~2 天[48]；滇池在 7~8 月受暴雨径流影响，浊度升高与浮游植物增殖形成复合污染[49]；邛海夏季受极端降雨驱动，悬浮物浓度与浊度同步大幅上升[50]。澜沧江梯级水库的浊度变幅进一步揭示了水体滞留时间的调控作用：丰水期浊度(35.6~292.0 FNU)显著高于枯水期(2.1~50.6 FNU)，且库容越小，浊度变幅越大，反映悬浮物沉降效率受水力停留时间制约[51]。在青藏高原等特殊区域，冰川融水成为关键驱动力，如色林错 6 月起因融水径流输送的细颗粒物导致悬浮物浓度持续攀升，并于 7 月达到峰值[52]。可见，深水湖库浊度演变的主导机制为径流 - 泥沙输入。

尽管已有研究明确了湖库浊水动态的主要模式及驱动因子，但对多因子非线性耦合机制仍缺乏定量解析。尤其对持久性浊水现象的形成过程、持续时长与运移路径等关键问题尚未阐明，这极大限制了对浊水演化过程的精准刻画和未来趋势的可靠预测。

3.2. 浊水的空间分布与三维异质性

浊度在湖库中呈现出复杂的空间结构，其分布在横向、纵向与垂向三维空间上均存在显著差异。横向分布主要受水深、植被格局与人类活动的三重控制。浅水区易受风浪扰动导致再悬浮，因而常呈高浊度特征，如涌湖东南部(平均水深仅为 1.05 m)为该湖浊度最高区域[53]；色林错的高浊度区集中于水浅的东岸[54]。植被通过消浪、吸附及固持底泥成为天然的“浊度稳定器”，如太湖胥口湾及东太湖植被茂盛区浊度常年较低，而北部无植被或植被稀疏的湖湾区则成为高浊度核心区[55]。此外，采砂、疏浚等局部高强度人类活动可直接塑造浊度的“热点”区域[56] [57]。

浊度的纵向分布遵循“入库 - 沿程 - 坝前”的典型沉降序列。来自河流的悬浮物在向库心运移过程中，因水力条件变化而不断沉降，导致浊度沿程递减。新安江和碧流河水库的观测数据为此提供了有力证据：前者坝前悬浮物浓度可降至入库端的约 1% [48]；后者在强降雨后，浊度值从入库口的 80 FNU 锐减至坝前的 10 FNU [58]。这种一致的空间分布模式，明晰地印证了沿程沉降是控制水库浊度格局的关键物理过程。

垂向上，湖库水体浊度通常呈现中、底层高于表层的分布特征，其主要驱动因素包括风浪扰动和异重流作用。以夏季太湖为例，风浪扰动导致底泥再悬浮，使底层浊度显著高于中、表层，且不同湖区表现出明显的空间异质性：藻型湖区(如梅梁湾、贡湖湾)浊度随水深呈先降后升趋势；开敞型湖区(如西部及湖心区)在水深 2.25 m 以上浊度变化平缓，而在临近沉积物界面时迅速升高至最大值；草型湖区(如胥口湾、东太湖)的垂向分布格局与开敞型湖区类似[55]。澜沧江干流梯级水库在夏季暴雨入流期间，受异重流影响，下层浊度亦普遍高于表层。其中，位于功果桥水库(日调节)与苗尾水库(周调节)因水体滞留时间短，垂向掺混作用强烈，浊度垂向梯度变化显著。两者浊度均自表层向下逐渐升高，至水深 10 m 处达到峰值，分别为 47 FNU 和 54 FNU [51]。

湖库浊度的复杂时空分布是水流输沙动力过程与环境条件的综合体现。现有研究虽已初步揭示其宏观规律，但认知深度仍受限于监测数据时空分辨率的不足。传统定点观测无法有效捕捉浊水团在风生流及异重流驱动下的瞬态迁移，也难以刻画其垂向分层结构的细微演变。正是这种高分辨率数据的缺失，制约了模型对浊度动态进行高精度模拟与预测的能力。

4. 湖库浊水调控技术

为实现湖库浊水的有效治理，需在厘清其时空演变规律的基础上，构建从精准监测到综合治理的技

术体系。目前,湖库浊水调控主要围绕工程、化学及生态三类技术展开,旨在通过不同作用机制降低浊度、缩短高浊水体的持续时间。

4.1. 工程措施:快速响应与结构限制

工程措施主要通过构建水工结构物改变水体流动或干扰条件,实现快速控浊,常见的有分层取水、减浪工程和旁路系统等。目前,遥感技术已成为流域尺度水体浊度参数获取的核心数据源与关键技术支撑[59][60]。针对内陆水体光学特性复杂、传统反演模型适用性受限的问题,近年研究通过引入优化算法与集合建模方法,显著提升了浊度遥感反演的精度与稳定性,并有效降低了模型不确定性,为构建基于遥感数据的浊度数字孪生模型奠定了重要的数据和模型基础[61]。

在实际应用中,分层取水系统通过识别不同水深的浊度分布,动态调整取水口位置,规避高浊水层,从而抑制浊水扩散[62]。例如,美国 Schoharie 水库通过布设三层取水口,将高浊度状态持续时间缩短至单层取水模式的 2.6% [63]。结合机器学习模型对浊度的预测能力,可进一步优化取水策略,提升系统响应灵敏度[64]-[66]。减浪工程在浅水湖泊中尤为重要。以太湖琼梅湾为例,建设 3.3 km 防浪屏障后,在台风期间,其保护区域内沉积物再悬浮率仅为未保护区域的 36.5%,若配合软围护结构,悬浮率更可降至 16.7% [67]。旁路系统将高浊度来水直接导流至水库下游,虽能显著减轻主体水库的浊度负荷,但其处理能力在高浊水输入情形下易达上限。此外,水库的形态设计也可纳入前置调控范畴,如美国 Ashokan 水库采用“双盆地”结构,将西盆地作为初级沉淀区,有效拦截悬浮物,并通过调控东西盆地间的水流实现动态净化[68]。物理工程措施具有响应快、可控性强等优点,但普遍面临建设与运维成本高、可能带来生态连通性障碍等长期结构性问题。

随着工程调控对监测数据依赖性的日益加深,单一监测手段难以满足精细化运行的要求。遥感观测虽能获取水体表层浊度信息,却难以刻画浊度的垂向分层结构及其对水动力过程的动态响应;同时,受卫星重访周期与云雨遮挡等因素制约,遥感手段在实现浊度时空演变过程的高频次、连续性及三维监测方面仍存在显著局限。因此,为支撑数字孪生湖库的构建,亟需发展融合“空-天-地-水”一体化高维实时监测体系,并在此基础上建立湖库浊水运动的高精度数学模型,从而为工程调度提供量化、智能的决策依据。

4.2. 化学絮凝技术:高效去浊与潜在风险

化学方法主要通过投加絮凝剂,通过电荷中和与吸附架桥等作用,促使悬浮物聚集沉降,包括无机絮凝剂(如 $AlCl_3$ 、 $FeCl_3$ 、聚合氯化铝(PAC)等)、有机絮凝剂(如聚丙烯酰胺、非离子型聚丙烯酰胺等)及有机-无机混合絮凝剂(如聚合氯化铝-丙烯酰胺-甲基丙烯酰胺氧乙基三甲基氯化铵等) [69]-[71]。研究表明,混合絮凝剂在降浊效率、絮体密度及化学残留控制方面均优于单一组分,具备更优的应用潜力[72]。

然而,絮凝剂的使用需严格控制投加量,过量使用可能导致水体二次污染。如铝盐残留会对水生植物与浮游生物产生毒理效应[73][74]。水体的 pH 值显著影响其作用效能,通常情况下,中性或弱碱性环境更有利于其效果发挥,如 $AlCl_3$ 在 pH 值为 6~7 时效果最佳,而聚合氯化铝(PAC)在较宽的 pH 范围(5~8)内均能保持良好絮凝性能[75]。尽管化学方法具备高处理效率与广适性,但其仍面临药剂成本高、存在生态风险等问题。因此,在实际应用中必须综合考虑水体化学背景与生态安全性,审慎确定投加工况。

4.3. 生态修复手段:可持续治理与时效约束

生态修复是治理湖库浊度的可持续途径,其中植被措施尤为常用。植被不仅能够发挥水土保持、拦截泥沙的功能,还能促进悬浮颗粒的絮凝沉降,抑制底泥再悬浮,是一种环境友好的治理方式[76]。陆域

植被通过增强土壤稳定性、减少地表径流，从源头遏制陆源悬浮物输入。研究表明，与农田或裸地相比，森林与草地区域输出的泥沙浓度显著降低[77]。在我国黄土高原与美国密西西比河流域的实践均证明植树造林和建设河岸缓冲带能有效削减入河泥沙负荷[78][79]。河岸与水生植被不仅可固持岸坡与底泥，其茎叶结构还可削弱波浪能量、减缓流速，从而抑制沉积物再悬浮，促进悬浮物沉降[80][81]。水生植被(如苦草、轮叶黑藻等沉水植物和芦苇、香蒲等挺水植物)的恢复是湖库内源浊度控制的关键。需注意的是，沉水植物的生长与分布受水体 pH 值制约。大多数物种适宜在中性至弱碱性环境(pH 为 7~8) 中生长，仅少数物种(如狐尾藻、苦草)对碱性环境(pH ≥ 9)表现出较强的耐受性[82][83]。

除植被外，微生物亦可协同参与浊度治理。例如，丛枝菌根真菌可通过增强植物根系结构，提升土壤抗蚀能力，从而减少泥沙流失[84]。此外，微生物絮凝剂作为一种可降解、高效且环境友好的替代品，在改善湖库浊度方面展现出潜力，主要包括微生物细胞絮凝剂、细胞提取物絮凝剂及胞外代谢产物絮凝剂等类型[85]。研究表明，将其与化学絮凝剂联用，可显著提高絮凝效率，降低投加量，并在去除胶体颗粒方面表现出独特优势[86]。然而，目前相关研究多处于实验阶段，尚未实现规模化生产与应用。相比于工程和化学方法，生态修复手段具有长期效益与环境兼容性，能够在提升水体透明度的同时增强生态系统稳定性；其局限在于治理周期通常较长，在应对紧急浊水事件时存在时效性约束。

Table 1. Mechanisms of action and comparative analysis of turbid water regulation technologies in lakes and reservoirs
表 1. 湖库浊水调控技术的作用机制及对比分析

调控技术	具体措施	机制	优势	局限性
工程措施	分层取水	通过物理方式对高浊度水体进行结构性隔离、分流或能量耗散	响应迅速、过程高度可控	基建与运维成本高昂，存在生态扰动风险
	减浪工程			
	旁路系统			
化学措施	无机絮凝剂	通过电荷中和、吸附架桥等作用促进颗粒物聚集沉降	处理效率高、适应性强	存在化学残留与二次污染风险，生态安全性存疑
	有机絮凝剂			
	混合絮凝剂			
生态措施	陆域/河岸植被	植被通过根系固土、茎叶消能等方式实现水土保持与促淤，微生物固土和促进絮凝	环境友好、具有长期可持续性	见效慢、周期长、受环境因子限制明显
	水生植被			
	微生物			

综上所述，现有湖库浊水调控技术主要基于物理、化学与生态三大途径，各有其作用机理与适用范围(表 1)。工程措施长于快速控制，化学手段精于瞬时去除，而生态修复则赢在长期稳定。尽管这些措施在实践中已取得一定成效，但多数仍停留于单一技术应用层面，尚未形成多技术耦合联控的体系化解决方案。特别是对由胶体颗粒主导的持久性浊水缺乏特异性的高效控制手段。

5. 结论与展望

湖库浊水现象是流域内悬浮物在“源-运-汇”全过程中物理、化学及生物作用综合驱动的结果，呈现显著的空间异质性与时间动态性。当前研究已初步揭示了浊水在形成机制、时空演变等方面的基本规律，为本领域的深入探索奠定了坚实基础。然而，面对不同区域湖库的显著差异性，现有知识体系在指导精准治理实践时仍显不足。为真正构建从源头到末端的链式调控技术体系，实现湖库水体的“降浊升清”，必须聚焦于以下几个关键领域的突破。

(1) 深究多过程耦合驱动下持久浊水的形成机理。湖库浊水的形成是悬浮物输入、迁移运输与絮凝沉

降多过程非线性耦合的结果。当前对于多驱动因子(如复合污染、水文扰动、生态系统反馈)协同作用下,特别是细颗粒胶体与腐殖质等主导的持久浊水的形成临界条件、稳定状态与维持机制的认识尚不深入。未来应在区域分类比较研究的框架下,综合运用野外观测、控制实验与数值模拟等手段,系统解析自然过程与人类活动对悬浮物行为路径的综合影响,重点阐明持久浊水形成的动力学阈值与内稳机制,为靶向干预提供理论依据。

(2) 构建多维度高分辨率的浊水动态监测网络。现有监测手段(如定期采样、传统遥感)受限于时空分辨率、垂向探测能力及天气影响,难以支撑对浊水动态过程与三维结构的精确刻画。未来的核心任务是研发稳定可靠的多参数传感设备,构建“空-天-地-水”一体化的分布式智能监测体系,综合运用传感器高频自动监测、卫星和无人机遥感、水下滑翔机等技术,实现浊度在纵向、横向、垂向、时间四维尺度上的同步连续感知,从而精准量化气象、水文、人类活动等多因素与湖库浊水的复杂耦合关系。应构建基于物理机制的高精度浊水运动数值模型,并耦合深度学习算法,实现水体浊度变化趋势的精准动态预测。

(3) 构建全链条协同的湖库浊水治理新范式。现行的湖库浊水治理主要依赖单一的工程、化学或生态措施,在应对由稳定胶体体系主导的胶粒型浊水时,普遍存在降浊效率低、针对性弱或潜在生态风险等问题。未来的治理范式必须转向系统调控,统筹浊水迁移全过程,实现多技术手段的联合和协同应用,重点探讨在丰、枯水季条件下源头削减与末端治理的权重配置,以及以生态修复为主的长期调控措施与应急化学絮凝等短期手段之间的衔接时序与转换条件,从而提升湖库浊水治理的针对性、适应性与可持续性。

基金项目

本研究受广西壮族自治区重点研发计划项目“漓江补源水体‘降浊升清’链式调控关键技术研究与应用示范”(桂科 AB24010036)资助。

参考文献

- [1] 张甘霖, 谷孝鸿, 赵涛, 等. 中国湖泊生态环境变化与保护对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 358-364.
- [2] Huynh, T.T., Kim, J., Kim, W., Hur, J., Ho, Q.N., Bi, Q., *et al.* (2023) Dynamics of Suspended Particulate Matter in an Impounded River under Dry and Wet Weather Conditions. *Water Resources Research*, **59**, e2022WR033629. <https://doi.org/10.1029/2022wr033629>
- [3] van Wijk, D., Chang, M., Janssen, A.B.G., Teurlinx, S. and Mooij, W.M. (2023) Regime Shifts in Shallow Lakes Explained by Critical Turbidity. *Water Research*, **242**, Article ID: 119950. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119950>
- [4] 刁瑞翔, 青松, 越亚螺, 等. 北方半干旱区典型湖泊-岱海透明度遥感反演(2013-2020年)[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1072-1087.
- [5] 郑丙辉, 曹晶, 王坤, 等. 水质较好湖泊环境保护的理论基础及中国实践[J]. 湖泊科学, 2022, 34(3): 699-710.
- [6] 李芳芳, 徐华成, 江和龙. 胶体 TiO₂ 颗粒对不同来源溶解性有机质光降解的影响: 基于分子量差异分析[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1163-1174.
- [7] Xu, H., Xu, M., Li, Y., Liu, X., Guo, L. and Jiang, H. (2018) Characterization, Origin and Aggregation Behavior of Colloids in Eutrophic Shallow Lake. *Water Research*, **142**, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.059>
- [8] 张建国, 李晶晶, 余红兵. 黄河流域黄土高原地区水土流失动态变化及分布特征[J]. 水土保持研究, 2025, 32(4): 110-116.
- [9] 张攀, 韩志刚, 王靖淑, 等. 黄土高原土壤侵蚀模型现状、问题及对策研究[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1): 1-10.
- [10] 马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [11] 吴文贤, 李渊, 刘子琦. 喀斯特地区安顺市土壤侵蚀时空变化特征及驱动因素[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1): 359-367.
- [12] 陈金凤, 余世钦, 符加方, 等. 华南红层地貌区不同利用方式土壤质量特征及其影响因素——以南雄盆地为例[J].

- 生态环境学报, 2022, 31(5): 918-930.
- [13] Li, Y., Li, S., Song, K., Liu, G., Wen, Z., Fang, C., *et al.* (2023) Sentinel-3 OLCI Observations of Chinese Lake Turbidity Using Machine Learning Algorithms. *Journal of Hydrology*, **622**, Article ID: 129668. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129668>
- [14] 杨波, 焦菊英, 马晓武, 等. 2022 年黄土高原典型暴雨侵蚀及洪水灾害调查分析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 1-13.
- [15] Song, K., Liu, G., Wang, Q., Wen, Z., Lyu, L., Du, Y., *et al.* (2020) Quantification of Lake Clarity in China Using Landsat OLI Imagery Data. *Remote Sensing of Environment*, **243**, Article ID: 111800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111800>
- [16] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. 地理研究, 2002, 21(3): 384-390.
- [17] 朱明勇, 党海山, 谭淑端, 等. 湖北丹江口水库库区降雨侵蚀力特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(9): 837-842.
- [18] Zhao, Y., Zhu, D., Wu, Z. and Cao, Z. (2024) Extreme Rainfall Erosivity: Research Advances and Future Perspectives. *Science of the Total Environment*, **917**, Article ID: 170425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170425>
- [19] 韩子怡, 周永强, 耿春女. 太湖藻华高发区 DOM 的组成和时空分布特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(12): 3568-3575.
- [20] 虞邦义, 郁玉锁. 洪泽湖泥沙淤积分析[J]. 泥沙研究, 2010, 35(6): 36-41.
- [21] 申红彬, 张小峰, 严军, 等. 黄河下游河道断面宽深比对输沙能力的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(3): 273-276+312.
- [22] 米章毅. 含有植被河道中流速分布规律及泥沙起动流速的解析研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- [23] Vilmin, L., Flipo, N., de Fouquet, C. and Poulin, M. (2015) Pluri-Annual Sediment Budget in a Navigated River System: The Seine River (France). *Science of the Total Environment*, **502**, 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.110>
- [24] Gabel, F., Lorenz, S. and Stoll, S. (2017) Effects of Ship-Induced Waves on Aquatic Ecosystems. *Science of the Total Environment*, **601**, 926-939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.206>
- [25] Walch, H., von der Kammer, F. and Hofmann, T. (2022) Freshwater Suspended Particulate Matter—Key Components and Processes in Floc Formation and Dynamics. *Water Research*, **220**, Article ID: 118655. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118655>
- [26] 张金凤, 张庆河, 乔光全. 水体紊动对黏性泥沙絮凝影响研究[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 67-72+82.
- [27] Mhashhash, A., Bockelmann-Evans, B. and Pan, S. (2017) Effect of Hydrodynamics Factors on Sediment Flocculation Processes in Estuaries. *Journal of Soils and Sediments*, **18**, 3094-3103. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1837-7>
- [28] 柴朝晖, 李昊洁, 王茜, 等. 黏性泥沙絮凝研究进展[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(2): 1-9+18.
- [29] 乔光全, 张金凤, 张庆河. 温度对黏性泥沙絮凝影响的机理研究[J]. 泥沙研究, 2017, 42(2): 35-40.
- [30] 靖争, 张爵宏, 曹慧群, 等. 水库水温研究进展及趋势[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 52-59+66.
- [31] 陈飞勇, 堀田哲夫, 刘兵. 水温分层水库中大规模高浓度泥沙侵入及长期浊水放流问题的对策[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(3): 1-5+25.
- [32] Borgnino, L. (2013) Experimental Determination of the Colloidal Stability of Fe(III)-Montmorillonite: Effects of Organic Matter, Ionic Strength and Ph Conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **423**, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.01.065>
- [33] 柴朝晖, 方红卫, 王茜, 等. 水流和电解质对黏性泥沙絮凝沉降影响试验[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 285-292.
- [34] 郭超, 何青. 黏性泥沙絮凝研究综述与展望[J]. 泥沙研究, 2021, 46(2): 66-73.
- [35] 王洁, 刘羽, 任劫. 石头河水库含沙量模拟及分层取水方案研究[J]. 陕西水利, 2024, (3): 118-121.
- [36] Lee, B.J., Kim, J., Hur, J., Choi, I.H., Toorman, E.A., Fettweis, M., *et al.* (2019) Seasonal Dynamics of Organic Matter Composition and Its Effects on Suspended Sediment Flocculation in River Water. *Water Resources Research*, **55**, 6968-6985. <https://doi.org/10.1029/2018wr024486>
- [37] Song, X., Zhao, M., Chen, A., Xie, X., Yang, H., Zhang, S., *et al.* (2022) Effects of Input of Terrestrial Materials on Photodegradation and Biodegradation of DOM in Rivers: The Case of Heilongjiang River. *Journal of Hydrology*, **609**, Article ID: 127792. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127792>
- [38] Hu, X., Li, J., Wang, J., Yin, L., Shi, K., Huang, H., *et al.* (2023) Characterization and Stability of Sedimentary Colloids in Different Ecology Regions in Taihu Lake. *Journal of Oceanology and Limnology*, **41**, 2146-2159.

- <https://doi.org/10.1007/s00343-022-2254-3>
- [39] Li, J. and Xia, C. (2023) Drivers of Spatial and Temporal Dynamics in Water Turbidity of China Yangtze River Basin. *Water*, **15**, Article No. 1264. <https://doi.org/10.3390/w15071264>
- [40] Shen, M., Duan, H., Cao, Z., Xue, K., Qi, T., Ma, J., *et al.* (2020) Sentinel-3 OLCI Observations of Water Clarity in Large Lakes in Eastern China: Implications for SDG 6.3.2 Evaluation. *Remote Sensing of Environment*, **247**, Article ID: 111950. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111950>
- [41] Ma, Y., Song, K., Wen, Z., Liu, G., Shang, Y., Lyu, L., *et al.* (2021) Remote Sensing of Turbidity for Lakes in Northeast China Using Sentinel-2 Images with Machine Learning Algorithms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **14**, 9132-9146. <https://doi.org/10.1109/jstars.2021.3109292>
- [42] Shi, K., Zhang, Y., Zhu, G., Liu, X., Zhou, Y., Xu, H., *et al.* (2015) Long-Term Remote Monitoring of Total Suspended Matter Concentration in Lake Taihu Using 250m MODIS-Aqua Data. *Remote Sensing of Environment*, **164**, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.029>
- [43] 赵巧华, 陈诗祺, 陈纾杨. 水体浊度对风速、风向及其时间累积效应的响应——以太湖贡湖湾为例[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1587-1598.
- [44] 渠姗, 王健健, 袁媛. 太湖梅梁湾浊度对风值的时滞性响应研究[J]. 中国环境科学, 2023, 43(6): 3141-3149.
- [45] 晁明灿, 赵强, 杨铁利, 等. 基于 GF-1 影像的巢湖浊度遥感监测及时空变化研究[J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(2): 149.
- [46] 李含含, 许金朵, 隗晓琪, 等. 呼伦湖 2002-2021 年悬浮物浓度数据集[J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2023, 8(4): 278-289.
- [47] 陈方方, 王强, 宋开山, 等. 基于 Sentinel-3OLCI 的查干湖水质参数定量反演[J]. 中国环境科学, 2023, 43(5): 2450-2459.
- [48] 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 等. 新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2137-2148.
- [49] 陈冬, 杨姣姣, 何锋, 等. 滇池外海透明度变化及其影响因子[J]. 环境科学导刊, 2023, 42(3): 1-4.
- [50] 陈璐莹. 基于 Sentinel-2 遥感影像的邛海水质参数反演时空变化及影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川师范大学, 2025.
- [51] 聂小芬, 杨正健, 王从锋, 等. 澜沧江梯级水库建设下水体电导率和浊度时空分布特征[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(1): 18-24.
- [52] 赵爽, 柳锦宝, 耿蔚, 等. 基于 PIE-Engine Studio 的西藏典型湖泊总悬浮物反演[J]. 人民长江, 2024, 55(9): 85-92+99.
- [53] 吴晓东, 王露, 晁建颖, 等. 太湖流域漏湖水体悬浮物分布特征及其影响因素[J]. 湖泊科学, 2020, 32(6): 1848-1857.
- [54] Mi, H., Fichot, C.G., Bryan, K.R., Qiao, G. and Fagherazzi, S. (2020) Rapid Shoreline Flooding Enhances Water Turbidity by Sediment Resuspension: An Example in a Large Tibetan Lake. *Earth Surface Processes and Landforms*, **45**, 3780-3790. <https://doi.org/10.1002/esp.5000>
- [55] 周莉, 冯胜, 李忠玉, 等. 夏季太湖浊度分布特征及其在水-沉积物界面识别中的应用[J]. 中国环境科学, 2015, 35(10): 3108-3116.
- [56] 曹志刚, 段洪涛, 崔海山, 等. 基于 VIIRS 数据洪泽湖悬浮物浓度估算算法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(4): 462-469.
- [57] Cui, L., Wu, G. and Liu, Y. (2008) Monitoring the Impact of Backflow and Dredging on Water Clarity Using MODIS Images of Poyang Lake, China. *Hydrological Processes*, **23**, 342-350. <https://doi.org/10.1002/hyp.7163>
- [58] Li, W., Chen, X., Xu, S., Wang, T., Han, D. and Xiao, Y. (2024) Effects of Storm Runoff on the Spatial-Temporal Variation and Stratified Water Quality in Biliuhe Reservoir, a Drinking Water Reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, **31**, 19556-19574. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32431-w>
- [59] 李媛媛, 沈芳, 陈嵩钰, 等. 基于 XGBoost 的内陆河湖浊度反演与长时序分析[J]. 环境工程学报, 2024, 18(2): 398-408.
- [60] 王波, 黄津辉, 郭宏伟, 等. 基于遥感的内陆水体水质监测研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 117-124.
- [61] 冶运涛, 蒋钟钟, 曹引, 等. 智慧水利理论体系与数字孪生流域虚拟模型研究成果述要[J]. 中国水利, 2024(5): 41-51.
- [62] Anohin, V.V., Imberger, J., Romero, J.R. and Ivey, G.N. (2006) Effect of Long Internal Waves on the Quality of Water

- Withdrawn from a Stratified Reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**, 1134-1145.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2006\)132:11\(1134\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2006)132:11(1134))
- [63] Gelda, R.K. and Effler, S.W. (2007) Simulation of Operations and Water Quality Performance of Reservoir Multilevel Intake Configurations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **133**, 78-86.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2007\)133:1\(78\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2007)133:1(78))
- [64] 袁洁, 肖启涛, 冯霞, 等. 人工智能在我国湖泊治理中的应用与展望[J]. 生态学报, 2025, 45(8): 3569-3578.
- [65] Lu, X., Mo, Z., Zhao, J. and Ma, C. (2024) Remote Monitoring of Water Clarity in Coastal Oceans of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China Based on Machine Learning. *Ecological Indicators*, **160**, Article ID: 111789.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111789>
- [66] 李明轩, 黎雷. 机器学习在水环境典型水质参数遥感反演中的应用[J]. 净水技术, 2024, 43(8): 45-53.
- [67] Huang, P. and Liu, Z. (2009) The Effect of Wave-Reduction Engineering on Sediment Resuspension in a Large, Shallow, Eutrophic Lake (Lake Taihu). *Ecological Engineering*, **35**, 1619-1623. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.10.007>
- [68] Rossi, N., DeCristofaro, L., Steinschneider, S., Brown, C. and Palmer, R. (2016) Potential Impacts of Changes in Climate on Turbidity in New York City's Ashokan Reservoir. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **142**, Article ID: 04015066. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000614](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000614)
- [69] 李青芝, 张根广, 孟若霖, 等. 絮凝剂作用下黏性细沙絮凝沉降规律研究[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(6): 124-129+146.
- [70] 陈洪松, 邵明安. AICI3 对细颗粒泥沙絮凝沉降的影响[J]. 水科学进展, 2001, 12(4): 445-449.
- [71] 史志鹏. 非离子聚丙烯酰胺(NPAM)对絮凝体沉降特性的影响研究[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
- [72] Abbasi Moud, A. (2022) Polymer Based Flocculants: Review of Water Purification Applications. *Journal of Water Process Engineering*, **48**, Article ID: 102938. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102938>
- [73] Immers, A.K., Vendrig, K., Ibelings, B.W., Van Donk, E., Ter Heerdt, G.N.J., Geurts, J.J.M., *et al.* (2014) Iron Addition as a Measure to Restore Water Quality: Implications for Macrophyte Growth. *Aquatic Botany*, **116**, 44-52.
<https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.01.007>
- [74] Dondajewska, R., Kozak, A., Kowalczywska-Madura, K., Budzyńska, A., Gołdyn, R., Podsiadłowski, S., *et al.* (2018) The Response of a Shallow Hypertrophic Lake to Innovative Restoration Measures—Uzarzewskie Lake Case Study. *Ecological Engineering*, **121**, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.010>
- [75] Yang, Z.L., Gao, B.Y., Yue, Q.Y. and Wang, Y. (2010) Effect of pH on the Coagulation Performance of Al-Based Coagulants and Residual Aluminum Speciation during the Treatment of Humic Acid-Kaolin Synthetic Water. *Journal of Hazardous Materials*, **178**, 596-603. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.127>
- [76] Zhang, L., Xin, Z., Feng, L., Hu, C., Zhou, H., Wang, Y., *et al.* (2022) Turbidity Dynamics of Large Lakes and Reservoirs in Northeastern China in Response to Natural Factors and Human Activities. *Journal of Cleaner Production*, **368**, Article ID: 133148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133148>
- [77] 杨艳芬, 王兵, 王国梁, 等. 黄土高原生态分区及概况[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7389-7397.
- [78] 张珂, 李可, 朱海丽, 等. 黄河源高寒草甸河岸带根-土复合体抗冲特性[J]. 泥沙研究, 2022, 47(2): 43-50.
- [79] 杨江洁, 戴志军, 梅雪菲, 等. 密西西比河入海水体悬沙浓度变化过程研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(7): 71-81.
- [80] 于鲁冀, 范鹏宇, 陈涛, 等. 人工湿地生物降固池对悬浮物及总氮的净化效果[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4298-4302.
- [81] 耿荣妹, 胡小贞, 许秋瑾, 等. 太湖东岸湖滨带水生植物特征及影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(12): 17-23.
- [82] 印金凤, 操瑜, 吕超超, 等. 典型亚热带城市(武汉)湖泊修复中密刺苦草的生境需求分析[J]. 湖泊科学, 2025, 37(4): 1357-1366.
- [83] 王寿兵, 隗琪, 陈浩, 等. 水体高 pH 值对滇池生态修复的潜在影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(4): 26-31.
- [84] Koziol, L. and Bever, J.D. (2016) The Missing Link in Grassland Restoration: Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation Increases Plant Diversity and Accelerates Succession. *Journal of Applied Ecology*, **54**, 1301-1309.
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.12843>
- [85] 叶欣, 易春龙, 李泰来, 等. 水环境微生物制剂的应用研究现状[J]. 四川环境, 2021, 40(6): 240-245.
- [86] Zhou, Y., Yang, Z., Huang, J., Xu, R., Song, P., Zhang, Y., *et al.* (2017) Ni(II) Removal from Aqueous Solution by Biosorption and Flocculation Using Microbial Flocculant Gal. *Research on Chemical Intermediates*, **43**, 3939-3959.
<https://doi.org/10.1007/s11164-016-2845-8>