

气候变化背景下湖泊热分层与混合过程的响应及其生态效应研究进展

李 桐^{1,2}

¹云南师范大学地理学部, 云南 昆明

²教育部西部资源与环境地理信息技术工程研究中心, 云南 昆明

收稿日期: 2026年9月12日; 录用日期: 2026年10月5日; 发布日期: 2026年10月10日

摘 要

全球气候变暖持续改变湖泊热力收支平衡, 引发热分层物候偏移、分层强度提升、混合层萎缩及水下热浪频发等结构性变异, 重塑湖泊垂直混合物理过程。热分层的异常强化通过水体垂向阻隔效应, 打破湖泊原有物质循环与自净规律, 诱发底层持续性缺氧、内源氮磷污染激增、藻类水华频发等水环境问题, 大幅加剧湖泊水体污染与富营养化风险, 抵消流域外源治污成效, 已成为当前湖泊水环境管控的新型难点。相较于传统人为污染, 气候驱动的湖泊热力结构变异具备隐蔽性、持续性与不可逆性特征, 且在高原湖泊、浅水多次混合湖等不同类型湖泊中呈现差异化污染响应规律。本文以气候变化下湖泊热分层与垂直混合过程演变为核心, 系统梳理湖泊热力格局的全球变化响应特征, 完整阐释热分层变异介导湖泊水体污染恶化的内在机制与生态连锁效应, 结合当前该领域研究短板与湖泊治理现实问题, 针对性构建适配气候变暖背景、突出气候适应性增量措施的湖泊水污染防控与生态治理体系, 以期气候变化下湖泊水环境长效治理与生态安全保障提供科学参考。

关键词

湖泊热分层, 气候变化, 水体混合过程, 水体污染, 生态效应

Research Progress on the Responses of Lake Thermal Stratification and Mixing Processes to Climate Change and Their Ecological Effects

Tong Li^{1,2}

¹Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

²The Engineering Research Center of GIS Technology in Western China, Ministry of Education, Kunming Yunnan

文章引用: 李桐. 气候变化背景下湖泊热分层与混合过程的响应及其生态效应研究进展[J]. 水污染及处理, 2026, 14(4): 218-225. DOI: 10.12677/wpt.2026.144023

Abstract

Ongoing global warming alters the thermal budget balance of lakes, triggering structural variations including shifted thermal stratification phenology, enhanced stratification strength, shrinking mixed layers, and frequent underwater heatwaves, thereby reshaping the physical processes of vertical mixing in lakes. The abnormal intensification of thermal stratification creates vertical isolation within the water column, disrupting lakes' original material cycling and self-purification regimes. This induces persistent hypoxia in bottom waters, surges in internal nitrogen and phosphorus loading, frequent algal blooms and other aquatic environmental issues, greatly exacerbating water pollution and eutrophication risks in lakes and offsetting the effectiveness of catchment external pollution control. It has emerged as a new challenge for current lake water environmental management. Compared with conventional anthropogenic pollution, climate-driven variations in lake thermal structures are cryptic, persistent and largely irreversible, with divergent pollution response patterns observed across lake types such as plateau lakes and shallow polymictic lakes. Focusing on the evolution of lake thermal stratification and vertical mixing processes under climate change, this paper systematically reviews the global response characteristics of lake thermal regimes to changing climate, fully elaborates the internal mechanisms and cascading ecological effects by which altered thermal stratification exacerbates lake water pollution. In light of existing research gaps and practical challenges in lake restoration, it develops a targeted lake water pollution prevention and ecological governance framework featuring climate-adaptive incremental measures suitable for a warming world. This work aims to provide scientific references for long-term lake water environment management and ecological security protection under climate change.

Keywords

Lake Thermal Stratification, Climate Change, Water-Column Mixing Processes, Water Pollution, Ecological Effects

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

湖泊作为陆地水圈的核心组成单元，承载着区域水资源供给、水环境净化、生物多样性维系及局地气候调节等多重生态功能，对流域生态系统稳定与可持续发展具有不可替代的作用。全球湖泊储存的淡水资源支撑着陆地生态系统与人类生产生活，湖泊水体的循环更新与物质迁移转化状态直接决定水环境质量水平，湖泊热力状态的细微改变均可引发整个湖泊系统的连锁响应。已有研究通过地统计手段系统估算了全球湖泊的水资源储量与水体周转周期，明确全球湖泊水资源储量庞大但空间分异显著，水体热力结构变化能够直接调控湖泊水循环速率与生物地球化学循环过程，深刻影响湖泊水环境演化趋势[1]。湖泊热分层与垂直混合是湖泊最基础的物理过程，在季节性温度差异驱动下，温暖期湖泊水体可形成稳定的表温层、温跃层与均温层三层垂向结构，依据年内分层与混合的循环差异，湖泊可划分为单次混合、二次混合与多次混合等不同类型，各类湖泊的热力节律与水体交换特征存在明显区别[2]。自然状态下分层与混合的周期性交替，能够保障表底层水体氧气、营养盐的均衡交换，维持湖泊正常的自净能力与水

环境稳态,是湖泊生态系统健康运转的物理基础。

在全球气候变暖的大背景下,大气升温、极端热浪频发、区域风场改变及湖泊冰物候提前消退等多重环境变化,共同扰动湖泊热量收支平衡,驱动全球湖泊热力结构发生普遍性、系统性的改变。已有全球湖泊综述研究明确指出,气候变暖导致全球多数湖泊表层水温显著升高、热分层持续时间不断延长、混合层趋于变浅,部分湖泊的混合模式发生根本性转换,水下热浪等新型热胁迫不断涌现,彻底改变了湖泊传统热力演变规律[3]。热力结构的异常变化进一步对湖泊水环境产生深刻负面影响,热分层稳定性增强会阻隔水体垂向交换,削弱湖泊复氧能力与自净功能,诱发底泥内源营养盐释放,加剧湖泊富营养化态势。值得关注的是,这种气候驱动的水环境恶化具有明显的抵消治理效应,即便流域外源营养负荷得到有效管控,持续稳定的热分层仍可通过底层缺氧与内源营养盐释放,形成阶段性营养盐脉冲,刺激浮游植物异常增殖,大幅削弱外源污染治理的实际成效[4]。

当前湖泊热分层相关研究已从早期单一湖泊的物理过程观测,逐步发展为全球多湖对比分析与数值模拟预测的综合研究阶段,但该领域仍存在明显的研究短板与认知局限。现阶段学界尚未形成统一规范的热分层与混合层深度定量识别标准,不同算法与阈值参数带来的结果偏差,极大增加了跨湖泊、跨研究成果对比的不确定性,制约了对湖泊热力演变规律的系统性认知[5]。同时,现有研究多集中于温带深水二次混合湖泊,对于分布广泛、生态响应敏感的浅水多次混合湖泊,以及环境特殊、生态脆弱的青藏高原湖泊,其热分层与混合过程对气候变化的响应机制及污染效应研究仍较为薄弱,难以支撑不同类型湖泊的差异化保护治理工作[6]-[8]。与此同时,当前湖泊水环境治理体系多针对传统人为外源污染构建,尚未充分适配气候变暖引发的热力变异与内源污染新问题,治理理念、技术措施与管控模式存在明显滞后性。基于此,本文系统梳理气候变化背景下湖泊热分层与垂直混合过程的演变特征,深入阐释热分层变异引发的湖泊水体污染机制与生态负面效应,总结研究过程中遇到的认知短板与治理痛点,提出适配气候响应特征、侧重气候适应性增量举措的湖泊水污染防控与生态治理对策,为新时代湖泊气候适应性保护与水环境精细化治理提供理论依据。

2. 气候变化下湖泊热分层与垂直混合过程的整体演变特征

气候变暖通过改变湖泊热量收支、大气扰动强度与冰情演变过程,从物候节律、分层强度、混合层结构及混合模式等多个维度重塑湖泊热力与物理过程,形成区别于自然状态的稳定热力格局,为湖泊水体污染累积、水质持续恶化提供了核心物理条件。湖泊本身的水深、水域面积、海拔高程、水体透明度与盐度等固有属性,会进一步调控湖泊对气候变暖的响应幅度,使得不同区域、不同类型湖泊的热力演变趋势呈现显著空间分异,也直接导致各类湖泊水污染响应程度存在明显差异[9]。

2.1. 热分层物候偏移与分层稳定性增强

气候变暖最直观的影响是湖泊热分层物候的系统性偏移与分层稳定性的持续增强,全球尺度的湖泊集成研究已充分证实这一演变规律。在全球升温背景下,湖泊春季热力分层建立时间显著提前,秋季分层解体时间不断推迟,全年热分层持续周期明显延长,大幅压缩了冬季湖泊完全混合与整体复氧的时间窗口,使得湖泊长期处于垂向水体隔离状态[10]。湖泊表层水体受大气升温直接影响快速增温,而底层水体温度变化相对滞后,表底层水温差异持续拉大,水体垂向密度梯度不断增强,最终表现为湖泊热稳定性显著提升,分层结构更加稳固[11]。除了年均态的热力变化,夏季频发的极端热浪事件会进一步加剧湖泊热力异常,诱发持续性、高强度的异常分层现象,打破湖泊常规年内热力节律。针对多次混合浅水湖泊的长期高频观测显示,极端高温天气可维持数周至数月的异常稳定分层,彻底改变浅水湖泊频繁翻转混合的固有特征,造成湖泊物理环境的剧烈扰动[12]。与此同时,湖泊冰物候的消退提前进一步延长了无

冰期时长,间接拓展了夏季热分层发育窗口,推动湖泊热力结构持续异化[13]。近年来学界提出的水下热浪概念,涵盖了湖泊表层与次表层的异常高温事件,这类新型热胁迫可进一步强化水体分层稳定性,加剧湖泊热力环境异常,成为驱动湖泊水环境退化的重要新型因子[14]。

现有研究多聚焦气候平均态变化带来的湖泊长期演变趋势,对热浪、强风暴等极端气候事件诱发的突发性分层扰动、脉冲式污染爆发及长期生态后效认知有限,无法支撑极端场景下的湖泊风险预警与应急管控[14]。

2.2. 混合层深度萎缩, 水体垂直交换能力下降

伴随热分层稳定性的增强,湖泊混合层深度整体呈现持续萎缩趋势,水体垂直交换能力显著弱化,直接改变湖泊内部物质与能量的分配规律。混合层作为湖泊上层充分混合的水体单元,其深度直接决定光照渗透范围、氧气垂向输送效率与营养盐垂向分配格局,是衔接湖泊物理过程与水环境生态过程的关键纽带。气候变暖引发的表层水体加热效应,促使热量聚集于湖泊上层水体,难以向下传导,温跃层逐步上移,最终造成混合层持续变浅。湖泊储热特性可进一步放大大气升温信号,强化热力分层效应,加剧混合层萎缩态势[15]。海拔梯度对比研究表明,高海拔湖泊升温速率显著高于低海拔区域,但湖泊热分层的响应规律并非单一线性变化,受冰物候演变、短波辐射强弱及湖泊地形形态的共同调控,无法直接套用低海拔湖泊的演变规律推演高原湖泊变化特征[9]。我国青藏高原湖泊具备独特的双对流混合模式,盐度变化与热力升温过程相互叠加,塑造了区别于温带湖泊的特殊热力结构,使得高原湖泊混合过程与物质循环演变更为复杂,对水环境演化的影响也更为独特[7]。

热分层定量识别方法的不统一,制约了湖泊污染响应规律的精准研判与跨区域对比分析。当前学界尚无统一的混合层深度、热分层强度定量计算标准,不同研究采用的算法、阈值参数存在显著差异,同一组观测数据通过不同方法得到的热力参数结果偏差极大,直接导致不同研究的污染响应规律难以对比、归纳[5]。

2.3. 湖泊混合模式发生转型, 水环境稳态趋向恶化

长期气候变暖不仅改变湖泊分层强度与混合层结构,更会引发部分湖泊混合模式的根本性转变,造成湖泊水环境稳态的持续性恶化。传统每年两次完全混合的深水二次混合湖泊,逐步向全年不完全混合、甚至永久分层的湖泊类型转变,底层水体长期隔绝大气,缺氧与污染累积成为常态;而原本依靠高频全湖翻转维持水体均匀混合的浅水多次混合湖泊,在极端热浪驱动下稳定分层事件频发,年内水体循环由频繁翻转变为间歇性长期分层与阶段性快速翻转交替的状态[12]。湖泊混合模式的转变往往具备不可逆特征,一旦从全年全混合稳态转变为不完全混合稳态,湖泊底层污染物质持续富集、缺氧环境常态化发育,水体自净能力难以恢复,水环境质量将持续退化。这种物理稳态的转变,是当前众多湖泊外源污染持续削减但水质难以改善、富营养化反复反弹的核心物理诱因。

与此同时,现有研究多聚焦单一因子的独立影响,对气候变暖、热力分层变异、流域人类活动、水体盐度与透明度变化等多因子耦合交互机制解析不足,难以精准区分气候驱动与人为污染的贡献占比,无法精准厘清湖泊水污染恶化的核心驱动因素,导致治理靶向性不足[16]。从观测体系上看,长期高频原位观测多集中于温带深水二次混合湖泊,针对浅水多次混合湖泊、青藏高原湖泊热力-水质同步观测数据极为匮乏[6][7]。

3. 热分层变异驱动湖泊水体污染加剧的机制与生态效应

气候变暖诱发的湖泊热分层强化与垂直混合弱化,并非单纯的物理过程改变,而是通过多路径耦合

驱动湖泊水体污染常态化、复杂化与严重化,从底层缺氧污染、内源营养盐释放、突发性污染脉冲、藻类污染爆发等多个维度破坏湖泊水环境平衡,形成自我强化的污染正反馈循环,持续加剧湖泊水质恶化与生态退化。

3.1. 分层阻隔诱发底层缺氧,内源污染常态化释放

热分层形成的垂向阻隔屏障是湖泊底层缺氧与内源污染持续释放的核心诱因,稳定的温跃层彻底切断表层富氧水体与底层水体的交换通道,底层水体完全丧失大气复氧途径,沉积物与水体有机质持续分解不断消耗溶解氧,快速形成底层缺氧甚至厌氧还原环境[3]。长期厌氧环境彻底改变底泥界面的氧化还原条件,大幅促进底泥中束缚态营养盐的活化释放,其中磷元素的释放响应最为显著,厌氧条件下铁磷结合体系解体,大量结合态磷转化为可溶性活性磷进入底层水体,形成稳定的底层营养盐富集库[12]。持续强化的热分层不断延长缺氧时长、扩大缺氧水域范围,使得内源磷、氨氮等污染物释放强度持续提升,即便流域外源营养输入得到有效管控,底泥内源持续释放的营养盐仍可维持水体高营养盐水平,支撑富营养化态势持续存在[4]。针对高原深水湖泊的研究也证实,温跃层低氧区的时空演变与湖泊热力分层过程高度耦合,热分层结构的细微变化即可调控底层缺氧范围与内源污染释放强度,深刻影响湖泊水质演变[17]。在长期分层背景下,底层缺氧脱氧已成为全球湖泊的共性演变趋势,冬季混合窗口期压缩导致底层水体年度复氧不足,缺氧问题逐年累积,深水湖泊缺氧范围持续扩张,原本不易发生缺氧的浅水多次混合湖泊,也因间歇性稳定分层的出现,常态化出现季节性底层缺氧与内源污染释放问题[18]。

3.2. 分层翻转诱发污染物脉冲,引发突发性水污染事件

热分层解体翻转过程引发的污染物脉冲式释放,是气候变暖背景下湖泊突发性水污染事件频发的关键诱因。经过整个分层周期的累积,湖泊底层水体富集大量内源氮磷营养盐、还原性污染物与有机碎屑,水体污染负荷处于高位,当秋季水温下降或强风扰动打破分层结构时,全湖水体快速翻转混合,底层高浓度污染物质瞬间输送至表层真光层,形成高强度的营养盐与污染脉冲,短期内大幅恶化水体水质,直接诱发浮游植物异常增殖[12]。对于多次混合浅水湖泊而言,这种脉冲式污染效应更为突出,自然状态下浅水湖泊分层周期短、混合频繁,污染物难以大量累积,但气候变暖带来的间歇性长期分层为污染富集提供了条件,每一次分层翻转都会引发剧烈的水环境扰动,造成水质大幅波动。这种气候驱动的内源污染脉冲,能够有效抵消流域外源污染治理成效,解释了当前多数湖泊外源减排到位但水质反复、富营养化久治难愈的现实治理困境,成为湖泊水环境管控的新型难点[4]。

3.3. 热力格局改变加剧藻类污染,放大富营养化风险

热力格局变异进一步通过调控浮游植物生长环境与营养盐供给,加剧湖泊藻类污染与富营养化风险。混合层变浅、表层水体稳定度提升与水温升高,为喜高温、耐强光、适应稳定水体环境的蓝藻等有害藻类提供了优越的生长条件,稳定的表层水环境延长了藻类光合作用时长,促进藻类生物量快速累积[12]。热分层物候偏移进一步重塑藻类水华的物候节律,分层启动提前使得春季水华爆发时间前移,分层解体推迟延长了秋季水华持续周期,全年藻类污染胁迫时长显著增加。分层期内源营养盐的持续释放与翻转期的营养脉冲供给,为藻类持续增殖提供了充足物质保障,使得湖泊有害藻华爆发频次、持续时长与影响范围持续提升[12]。在高原湖泊系统中,热力分层与盐度分层的双重调控作用改变了浮游植物垂向分布格局,藻类多集中分布于温跃层附近,热力结构的改变直接影响浮游植物群落结构与初级生产力水平,进而改变高原湖泊原有清洁水环境状态,提升生态污染风险[6]。藻类大规模增殖会进一步降低水体透明度,削弱光照垂向渗透,进一步稳定热分层结构,形成“分层强化→污染加剧→藻类爆发→分层更稳定”

的正反馈循环,持续放大湖泊生态退化风险[19]。

3.4. 不同类型湖泊水污染的差异化响应特征

不同类型湖泊因地形、海拔、水深与水体属性差异,对气候变暖的响应程度不同,水污染演变特征也呈现显著差异化规律。温带深水二次混合湖泊分层周期长、稳定性高,底层缺氧范围大、内源污染累积量高,富营养化与藻类污染问题最为突出,是当前气候污染响应最显著的湖泊类型[10]。浅水多次混合湖泊虽无常年稳定分层,但极端热浪诱发的间歇性分层会带来突发性、高强度污染脉冲,水质波动剧烈、污染扰动性强,长期以来被忽视的气候型污染风险持续凸显[18]。青藏高原高海拔湖泊升温速率更快,冰物候消退迅速,热力分层与盐度分层耦合作用显著,原本清洁的水体逐步出现底层缺氧与内源污染问题,且高原湖泊生态极度脆弱、自我修复能力弱,一旦发生水质退化与生态稳态转换,难以实现恢复治理[7][8]。干旱半干旱区湖泊受升温蒸发加剧、盐度升高影响,热力分层与盐度分层叠加发育,水体混合能力持续弱化,污染物极易在底层长期富集,水质退化问题日趋严峻[18]。

当前湖泊水环境治理体系存在理念滞后、措施单一、精准度不足、风险防控薄弱等诸多问题。长期以来湖泊治理核心聚焦流域外源污染削减,通过截污治污、面源管控等手段降低入湖污染负荷,普遍忽视了气候变暖引发的热分层强化、底层缺氧、内源污染反弹等新型问题[4]。在外源污染持续削减的治理背景下,气候驱动的内源污染已成为湖泊水质波动、富营养化反复的核心诱因,但现有治理模式尚未将湖泊热力结构调控、内源污染气候响应纳入治理体系,治理根源性短板长期存在。现有湖泊生态修复与水质治理措施多针对常态水污染问题设计,缺乏针对性的水动力与热力调控手段,无法有效打破水体分层阻隔、改善底层缺氧环境,难以解决气候诱发的持续性内源污染问题,导致多数湖泊治理成效不稳定、水质易反弹[20]。此外,当前湖泊治理普遍缺乏分型分类的差异化管控思维,忽略不同类型湖泊的热力污染响应差异,采用统一化治理标准应对所有湖泊,造成治理资源浪费与重点湖泊治理失效。同时,现有水环境监测预警体系不完善,监测指标多集中于常规水质参数,未纳入热分层强度、混合层深度、水下热浪等气候热力指标,无法提前预判极端气候引发的突发性水污染与藻华爆发事件,被动治理问题突出,难以适配气候变暖背景下的湖泊风险防控需求[14]。

4. 气候变暖背景下湖泊水污染防控与生态治理对策

针对气候变暖驱动的湖泊热分层变异与新型水污染特征,结合当前基础研究短板与治理实践痛点,湖泊水环境治理需彻底突破传统外源污染管控的单一思维。流域截污、面源治理等传统措施作为基础,本部分重点阐述面向气候变化的增量治理举措,构建适配气候响应规律、兼顾物理调控与生态修复、覆盖常态治理与极端防控的新型湖泊治理体系,实现湖泊水环境的气候适应性长效治理。

4.1. 构建外源-内源协同治理框架,革新湖泊治理理念

治理工作首先需要革新核心治理理念,树立“外源控污、内源控层、气候适应、系统治理”的全新思路,在持续巩固流域外源污染治理成果的基础上,将湖泊热力结构优化、水体混合能力提升、缺氧环境改善作为内源污染治理的核心抓手。持续完善环湖截污体系、入湖河流污染管控与农业面源治理,稳步削减流域外源污染负荷,降低湖泊污染本底;同时重点破解气候变暖引发的水体分层阻隔、底层缺氧、内源污染脉冲释放等新型问题,构建外源减排与内源调控协同推进的双重治理模式,从根本上解决湖泊水质反复、富营养化久治难愈的治理困境[4][20]。

4.2. 实施物理调控与分型管控,缓解分层带来的污染胁迫

针对热分层阻隔、水体垂直交换弱化的核心物理缺陷,需强化湖泊水动力与热力过程人工调控,从

物理层面破解气候型水污染的根源性问题。对于深水分层湖泊,可通过扬水曝气、垂直水体扰动、温跃层适度调控等工程手段,弱化水体分层稳定性,促进表底层水体交换,提升底层水体溶解氧水平,抑制底泥污染物活化释放,削减内源污染库容。对于浅水多次混合湖泊,重点优化湖区水体调度,通过适度人工扰动缩短极端气候诱发的异常分层时长,降低分层翻转带来的脉冲式污染强度,稳定水体水环境状态[12]。同时充分利用冬季自然混合窗口期,强化湖泊整体复氧能力,缓解年度缺氧污染累积问题,逐步改善湖泊底层水环境稳态。

治理过程中需严格遵循湖泊差异化响应规律,推行分型分类精准治理,杜绝一刀切治理模式。针对温带深水二次混合湖泊,重点防控长期稳定分层引发的底层内源污染累积与夏季蓝藻水华爆发;针对浅水多次混合湖泊,重点加强极端热浪天气下的水质动态监测;针对青藏高原高原湖泊,坚持生态优先、预防为主的治理原则,提前防范气候驱动的水质退化与生态突变风险;针对干旱半干旱区湖泊,兼顾盐度调控与热力分层治理,维持水体混合交换能力[8] [18]。

4.3. 完善一体化监测预警体系,提升极端事件防控能力

为提升极端气候污染防控能力,需全面优化湖泊立体化监测预警体系,构建热力参数、水质指标与生态指标一体化的动态监测网络。作为气候适应性关键增量措施:将气候模型预测与湖泊水动力-水质模型相耦合,实现热浪等极端事件的超前风险预警。在常规水质监测基础上,新增水温垂向剖面、混合层深度、热分层稳定性、水下热浪等热力监测指标,实现湖泊热力结构演变的精准动态捕捉[5]。强化底层溶解氧、内源活性磷、浮游生物群落等关键指标的高频监测,精准识别分层期内源污染累积过程与翻转期污染爆发过程。依托现有水动力与生态模型,耦合区域气候模式输出,构建极端热浪、强风暴等气候事件的水污染风险预警机制,实现从被动治理向主动预判、提前防控转变。同时统一热分层定量识别标准,规范算法与阈值参数,保障监测数据与风险评估结果的规范性与可比性[5]。

4.4. 推进流域-湖区生态修复,健全长效治理保障机制

依托生态修复手段提升湖泊气候抗逆能力,构建稳定健康的水生态体系,弱化气候变暖带来的污染胁迫。流域层面持续推进水源涵养区保护、水土流失治理与湖滨湿地修复,构建流域生态缓冲体系,减少外源泥沙与污染物输入,优化湖泊水环境基底[16]。湖区层面针对性开展沉水植被恢复、水生生物群落重构,通过植被调控水体透明度、稳定水体结构,弱化热分层发育强度;优化湖泊食物链结构,提升浮游动物控藻能力,增强生态系统自我调节能力[19]。

最后需持续强化基础科研支撑与制度体系建设,补齐浅水多次混合湖泊、高原湖泊的长期高频原位观测短板,厘清不同类型湖泊热力变异与水污染的耦合机制。同时将气候变化影响纳入湖泊水环境规划、治理方案与长效考核体系,建立湖泊热力与水质动态跟踪评估机制,根据湖泊气候响应规律动态优化治理策略,全面提升气候变暖背景下湖泊生态安全保障能力。

参考文献

- [1] Messenger, M.L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I. and Schmitt, O. (2016) Estimating the Volume and Age of Water Stored in Global Lakes Using a Geo-Statistical Approach. *Nature Communications*, 7, Article No. 13603. <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>
- [2] 刘杰. 探秘湖泊热力分层[EB/OL]. 科学智慧火花. https://idea.cas.cn/xyx/xyx_lxzwpx/xyx_2022/info/2023/524893.html, 2026-09-28.
- [3] Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lenters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M. and Sharma, S. (2020) Global Lake Responses to Climate Change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 388-403. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>

-
- [4] 娄保锋, 段友爱, 黄杰, 等. 滇池富营养化问题综合诊断[J]. 人民长江, 2025, 56(12): 60-69.
- [5] Wilson, H.L., Ayala, A.I., Jones, I.D., Rolston, A., Pierson, D., de Eyto, E., *et al.* (2020) Variability in Epilimnion Depth Estimations in Lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*, **24**, 5559-5577. <https://doi.org/10.5194/hess-24-5559-2020>
- [6] 易文斌, 拉珠, 罗伟, 甘红敏, 欧美香, 等. 青藏高原湖泊热力结构和盐度分层对浮游植物生物量垂直分布的影响[J/OL]. 湖泊科学, 2025: 1-17. <https://jlakes.alljournals.cn/hpkx/article/pdf/HP266323>, 2026-09-28.
- [7] 秦璇, 王君波, 叶传永, 开金磊, 汪嫒. 西藏第一大湖泊色林错热力学变化特征: 双对流混合及影响因素[J]. 湖泊科学, 2025, 37(6): 2248-2259.
- [8] 杨孟豪, 巢世军. 青藏高原水生生态系统对气候变化的响应[J]. 青海科技, 2024, 31(3): 21-26.
- [9] Råman Vinnå, L., Medhaug, I., Schmid, M. and Bouffard, D. (2021) The Vulnerability of Lakes to Climate Change along an Altitudinal Gradient. *Communications Earth & Environment*, **2**, Article No. 35. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00106-w>.
- [10] Woolway, R.I., Sharma, S., Weyhenmeyer, G.A., Debolskiy, A., Golub, M., Mercado-Bettín, D., *et al.* (2021) Phenological Shifts in Lake Stratification under Climate Change. *Nature Communications*, **12**, Article No. 2318. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22657-4>
- [11] Oleksy, I.A. and Richardson, D.C. (2021) Climate Change and Teleconnections Amplify Lake Stratification with Differential Local Controls of Surface Water Warming and Deep Water Cooling. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL090959. <https://doi.org/10.1029/2020gl090959>
- [12] Shi, W., Qin, B., Zhang, Q., Paerl, H.W., Van Dam, B., Jeppesen, E., *et al.* (2024) Global Lake Phytoplankton Proliferation Intensifies Climate Warming. *Nature Communications*, **15**, Article No. 10572. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54926-3>
- [13] Cannon, D., Fujisaki-Manome, A., Wang, J., Kessler, J. and Chu, P. (2023) Modeling Changes in Ice Dynamics and Subsurface Thermal Structure in Lake Michigan-Huron between 1979 and 2021. *Ocean Dynamics*, **73**, 201-218. <https://doi.org/10.1007/s10236-023-01544-0>
- [14] Woolway, R.I., Kayastha, M.B., Tong, Y., Feng, L., Shi, H. and Xue, P. (2025) Subsurface Heatwaves in Lakes. *Nature Climate Change*, **15**, 554-559. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02314-0>
- [15] Qiu, Y., Chen, J., Chen, D., Thiery, W., Mercado-Bettín, D., Xiong, L., *et al.* (2025) Enhanced Heating Effect of Lakes under Global Warming. *Nature Communications*, **16**, Article No. 3954. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59291-3>
- [16] 黄雯婷, 戴强玉, 徐勇, 等. 气候变化和人类活动对中国典型湖泊流域植被动态影响[J]. 环境科学, 2025, 46(5): 2987-2996.
- [17] 韩雪欣, 荀凡, 赵成, 等. 抚仙湖温跃层低氧区时空演变特征及关键驱动过程[J]. 湖泊科学, 2026, 38(4): 1755-1768.
- [18] 刘旭华, 刘华民, 于洪波, 等. 气候变化对干旱半干旱区湖泊水质的影响[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(1): 41-48.
- [19] 王荣, 张恩楼. 气候变化加剧了湖泊生态系统的突变风险[J]. 中国科学: 地球科学, 2026, 56(3): 1197-1199.
- [20] 罗昊, 周雪欣, 何颖清. 云南省高原湖泊生态环境治理策略研究[J]. 水利技术监督, 2026(3): 85-88+139.