

湖泊热浪影响下锁磷剂对蔚然湖磷的钝化效果研究

王梓轩, 王毅鑫, 韩燕青*

滁州学院土木与建筑工程学院, 安徽 滁州

收稿日期: 2025年8月4日; 录用日期: 2025年9月2日; 发布日期: 2025年9月15日

摘 要

受持续的温室气体排放影响, 全球气候不断变暖, 湖泊热浪事件频发, 深度影响湖泊各类功能的发挥。本研究以滁州学院校园湖泊蔚然湖为研究对象, 探究镧系锁磷剂(LMB)在不同温度情景(常温25℃, 热浪期35℃)下对磷的钝化效果和机制。室内模拟实验结果显示, 30℃组水体总溶解性氮TDN、总溶解性磷TDP和可溶性磷酸盐SRP浓度分别比25℃组高11.26%、18.55%和15.11%, 30℃ + LMB组水体TDN浓度比25℃ + LMB组高9.70%, 水体TDP浓度和SRP浓度比25℃ + LMB组分别降低46.55%和77.74%。本研究表明湖泊热浪促进了蔚然湖沉积物氮磷释放, 提高水体氮磷浓度, 但镧系锁磷剂仍然有着较好的控磷效果, 可显著抑制沉积物磷释放, 降低蔚然湖水体磷浓度。

关键词

湖泊热浪, 磷, 锁磷剂

Study on the Passivation Effect of Phosphorus Locking Agents on Phosphorus in Weiran Lake under the Influence of Lake Heatwaves

Zixuan Wang, Yixin Wang, Yanqing Han*

College of Civil and Architecture Engineering, Chuzhou University, Chuzhou Anhui

Received: Aug. 4th, 2025; accepted: Sep. 2nd, 2025; published: Sep. 15th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 王梓轩, 王毅鑫, 韩燕青. 湖泊热浪影响下锁磷剂对蔚然湖磷的钝化效果研究[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(9): 1223-1230. DOI: 10.12677/aep.2025.159137

Abstract

Affected by persistent greenhouse gas emissions, global warming continues to intensify, leading to frequent lake heatwave events that profoundly impact various lake functions. This study focuses on Weiran Lake, a campus lake at Chuzhou University, to investigate the passivation effect and mechanisms of lanthanum-modified bentonite (LMB) on phosphorus under different temperature scenarios (normal temperature: 25°C; heatwave period: 35°C). Indoor simulation experiments revealed that the concentrations of total dissolved nitrogen (TDN), total dissolved phosphorus (TDP), and soluble reactive phosphorus (SRP) in the 30°C group were 11.26%, 18.55%, and 15.11% higher, respectively, than those in the 25°C group. In the 30°C + LMB group, the TDN concentration was 9.70% higher than in the 25°C + LMB group, while the TDP and SRP concentrations decreased by 46.55% and 77.74%, respectively, compared to the 25°C + LMB group. The study reveals that lake heatwaves promote the release of nitrogen and phosphorus from sediments in Weiran Lake, increasing their concentrations in the water. However, LMB still demonstrates effective phosphorus control, significantly inhibiting sediment phosphorus release and reducing phosphorus levels in the lake water.

Keywords

Lake Heatwaves, Phosphorus, Phosphorus Locking Agents

Copyright © 2025 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

湖泊是“山水林田湖草沙冰”生命共同体的核心构成，是流域系统健康的晴雨表，在水资源安全保障、防洪抗旱和经济社会发展等方面发挥着不可替代的作用[1] [2]。目前，富营养化是全球湖泊生态系统面临的主要环境问题之一[3]。一般而言，人类活动诱导的氮、磷营养盐过度输入是导致湖泊富营养化的主要原因。磷循环为典型的沉积型循环，而氮存在气体形式，固氮蓝藻可以通过固氮功能将氮气纳入水生生态系统中[4]。因此，在湖泊富营养化修复进程中，考虑到磷的可控性和有效性，普遍认为减少磷的输入是缓解湖泊富营养化的关键[5]。

原位钝化技术是国内外用于抑制湖泊沉积物内源磷释放，控制湖泊富营养化的主要方法之一[6]。近年来，由于镧对磷酸根具有很强的选择吸附性，镧系锁磷剂在内源磷释放的控制中越来越受到关注[7]。镧改性膨润土(LMB)为商业化的镧系锁磷剂，其由 95%的膨润土和 5%的稀土镧组成，镧通过离子交换形式被固定在膨润土中，在与磷酸盐的反应中可形成不溶于水且生物利用性较低的磷酸镧[8]。目前，LMB 已经在全球数百个水体中得到应用，控磷效果显著。但有研究同时表明，LMB 富营养化治理效果，也受诸多因素的影响，如用量、碱度、有机质等。因此，在 LMB 使用时，为了确保施用效果，有必要因地制宜，研究环境因素对 LMB 修复效果的影响。

自工业革命以来，大气 CO₂ 浓度显著升高，联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告(AR6)综合报告(SYR)《气候变化 2023》指出，受持续的温室气体排放影响，2011~2020 年全球地表温度比 1850~1900 年升高了 1.1℃，并预测全球温升会在 2021~2040 年达到 1.5℃。气候变暖对湖泊最直接的影响表现为湖泊温度的升高，即湖泊热浪事件[9]。当湖面温度超过某一历史时期的 90 百分位值就可以

定义为一次湖泊热浪事件[10]。在持续变暖的情况下,湖泊热浪的强度和持续时间将不断增加[11],湖泊热浪将成为湖泊生态系统重要的干扰因素,对湖泊水质以及生物多样性产生深远影响。

有研究表明,湖泊热浪可强化内部养分循环,加剧水华的爆发,通过正反馈机制加剧浅水湖泊富营养化程度。在一定温度范围内,微生物群落代谢活动强度和温度成正比,温度越高,微生物的矿化作用越强烈,沉积物内源营养释放越剧烈[12][13]。因此,湖泊热浪对沉积物内源营养的释放有着显著的促进作用,可能潜在影响 LMB 对湖泊磷的钝化效果。考虑到湖泊热浪的负面影响,本文以滁州学院校园湖泊蔚然湖为研究对象,采用室内模拟实验方法,研究湖泊热浪影响下锁磷剂对蔚然湖磷的钝化效果,为锁磷剂的施用提供理论支撑。

2. 材料与方法

2.1. 锁磷剂、沉积物和水来源说明

在本研究实验中,镧系锁磷剂 LMB 由上海风斯乐环境科技有限公司提供,实验用沉积物和水均采集自蔚然湖。

2.2. 沉积物和水处理及实验方法

1) 沉积物处理

采用彼得逊采泥器从蔚然湖采集表层沉积物,收集带回实验室后经 0.5 cm 筛网滤除大体积砾石和其他杂物。为了保证均一性,在实验使用前将过滤后的沉积物搅拌均匀。

2) 水处理

采用柱状采水器从蔚然湖湖区采集湖水,带回实验室后经 380 μm 网滤除杂质。实验开始前,为了保证均一性,将过滤后的湖水搅拌均匀。

3) 实验设计

室内静态实验为双因素实验,湖泊热浪(基础温度、热浪升温)和钝化剂(无钝化剂、LMB)为两个实验变量,共计 4 个处理组,即 a) 基础温度组, 25 $^{\circ}\text{C}$; b) 基础温度 + LMB 组, 25 $^{\circ}\text{C}$ + LMB; c) 热浪升温组, 30 $^{\circ}\text{C}$; d) 热浪升温 + LMB 组, 30 $^{\circ}\text{C}$ +LMB, 每个处理设置 6 个重复。

实验所用容器为直径 10 cm, 高度 26 cm 的聚乙烯塑料瓶。实验开始前,向每个塑料瓶中分别加入 5 cm 厚的沉积物,随后虹吸加入 15 L 湖水,避免扰动沉积物。随后向添加 LMB 处理的塑料瓶的上覆水水面均匀喷洒 LMB 悬浊液, LMB 用量为 4 g, 相当于添加量为 500 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 在湖泊实际施用剂量范围内。待添加 LMB 组水体变澄清后,将 25 $^{\circ}\text{C}$ 和 25 $^{\circ}\text{C}$ + LMB 组所有塑料瓶放入一个塑料箱中, 30 $^{\circ}\text{C}$ 和 30 $^{\circ}\text{C}$ + LMB 组所有塑料瓶放入另一个塑料箱中,在两个塑料箱中装入自来水,保持塑料箱水面与塑料瓶水面持平。最后,向塑料箱中放入加热棒,水体温度分别维持在 25 $^{\circ}\text{C}$ 和 30 $^{\circ}\text{C}$, 开始实验。

实验持续 7 天,实验开始前和实验结束后分别测定水体电导率和 pH,同时采集 1 份水样用于水体总溶解性氮(TDN)、总溶解性磷(DTP)和可溶性磷酸盐(SRP)浓度的测定。

2.3. 测试分析指标及方法

电导率和 pH 由手持式多参数水质分析仪 ProQuatro-C (赛莱默, 北京, 中国)测定,依据《湖泊富营养化调查规范》提出的方法测定各种营养盐浓度,水体 TDN 浓度采用碱性过硫酸钾法测定,采用钼酸铵分光光度计法测定水体 DTP 和 SRP 浓度。氮释放速率 S_{TDN} 和磷释放速率 S_{DTP} 、 S_{SRP} 计算公式如下:

$$S(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}) = [C_n \times V - C_{n-1} \times (V - V_{\#})]/(A \times t)$$

式中, t 为实验时间, d ; C_n 为实验第 n 次采样时上覆水 TDN、DTP、SRP 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; C_{n-1} 为实验第

$n - 1$ 次取样时上覆水 TDN、DTP、SRP 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; V 为实验泥柱中上覆水的体积, L; V 样为每次采集的水样体积, L; A 为底泥与水体的接触面积, m^2 。根据上述公式计算出沉积物氮磷的释放速率。

3. 结果与分析

3.1. 电导率和 pH

LMB 和温度均可显著提高水体电导率($p < 0.01$), 但两者的交互作用不显著($p > 0.05$, 表 1, 图 1a)。在实验结束时, 各处理组电导率均存在显著差异, 表现为 $30^\circ\text{C} + \text{LMB}$ 组电导率最高, 30°C 组次之, 25°C 组最低($p < 0.05$, 图 1a)。温度升高显著降低水体 pH 值, 表现为 25°C 组水体 pH 显著高于 30°C 组, $25^\circ\text{C} + \text{LMB}$ 组水体 pH 显著高于 $30^\circ\text{C} + \text{LMB}$ 组($p < 0.05$, 图 1b)。LMB 对水体 pH 值的影响不一致, 表现为 25°C 提高水体 pH 值, 30°C 时降低水体 pH 值。

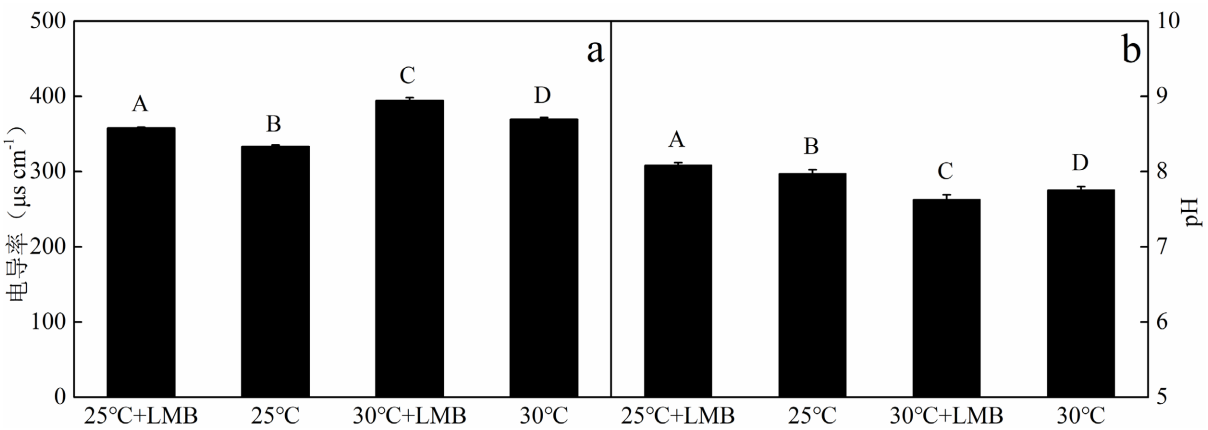


Figure 1. Conductivity and pH of water in the different treatment, error bars represented standard deviation, significant differences between treatments are indicated by different letters (A-D, $p < 0.05$)

图 1. 不同处理组水体电导率和 pH, 误差线表示标准偏差, 不同字母(A-D)表示处理间差异显著($p < 0.05$)

Table 1. Two-way ANOVA analysis of water physicochemical parameters at the end of the experiment

表 1. 实验结束时水体理化指标双因素方差分析结果

	<i>df</i>	电导率		pH		TDN		<i>S</i> _{TDN}	
		<i>F</i>	Pr > <i>F</i>	<i>F</i>	Pr > <i>F</i>	<i>F</i>	Pr > <i>F</i>	<i>F</i>	Pr > <i>F</i>
温度	1	740.56	**	192.16	**	19.93	**	11.45	**
LMB	1	340.94	**	0.06	n.s.	0.12	n.s.	1.32	n.s.
温度 × LMB	1	0.03	n.s.	23.42	**	0.10	n.s.	0.56	n.s.
		TDP		<i>S</i> _{TDP}		SRP		<i>S</i> _{SRP}	
温度	1	0.71	n.s.	1.96	n.s.	0.85	n.s.	0.55	n.s.
LMB	1	132.98	**	108.87	**	56.21	**	34.73	**
温度 × LMB	1	17.59	**	32.65	**	5.48	*	6.15	*

**.: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$; n.s.: $p > 0.05$.

3.2. TDN 和 *S*_{TDN}

温度升高显著提高水体 TDN 浓度($p < 0.01$), 但 LMB 对水体 TDN 无显著影响, 与温度也不存在交互作用($p > 0.05$, 表 1, 图 2a)。实验结束时, $30^\circ\text{C} + \text{LMB}$ 组水体 TDN 浓度比 $25^\circ\text{C} + \text{LMB}$ 组高 9.70%,

30℃组水体 TDN 浓度比 25℃组高 11.26%。与 TDN 一致, 温度升高显著提高 S_{TDN} ($p < 0.01$), 但 LMB 对 S_{TDN} 无显著影响, 与温度也不存在交互作用 ($p > 0.05$, 表 1, 图 2b)。实验结束时, 30℃ + LMB 组水体 S_{TDN} 比 25℃ + LMB 组高 21.02%, 30℃组水体 S_{TDN} 比 25℃组高 38.94%。

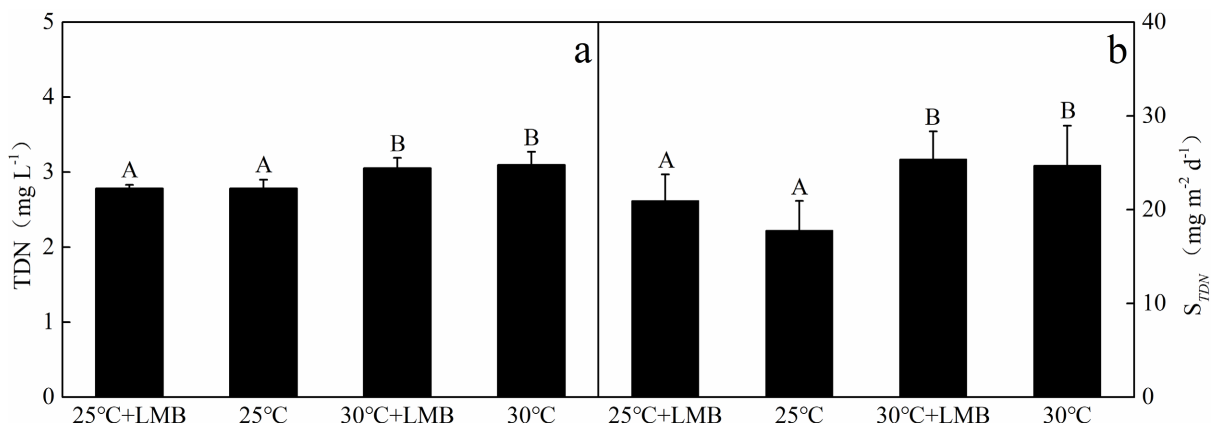


Figure 2. TDN and S_{TDN} in the different treatment, error bars represented standard deviation, significant differences between treatments are indicated by different letters (A-B, $p < 0.05$)

图 2. 不同处理组 TDN 和 S_{TDN} , 误差线表示标准偏差, 不同字母(A-B)表示处理间差异显著($p < 0.05$)

3.3. TDP 和 S_{TDP}

LMB 施用显著降低水体 TDP 浓度和 S_{TDP} ($p < 0.01$, 表 1, 图 3)。实验结束时, 25℃ + LMB 组水体 TDP 浓度和 S_{TDP} 比 25℃组分别降低 40.25%和 50.70%, 30℃ + LMB 组水体 TDP 浓度和 S_{TDP} 也分别显著低于 30℃组。此外, 30℃组水体 TDP 浓度和 S_{TDP} 比 25℃组分别升高 18.55%和 46.28%, 表明温度升高促进了磷的释放(TDP), 虽然双因素方差分析温度对水体 SRP 浓度和 S_{SRP} 影响不显著。此外, 30℃ + LMB 组水体 TDP 浓度和 S_{TDP} 分别比 25℃ + LMB 组显著降低, 表明 LMB 在湖泊热浪期间加强了对磷(TDP)的控制效果。

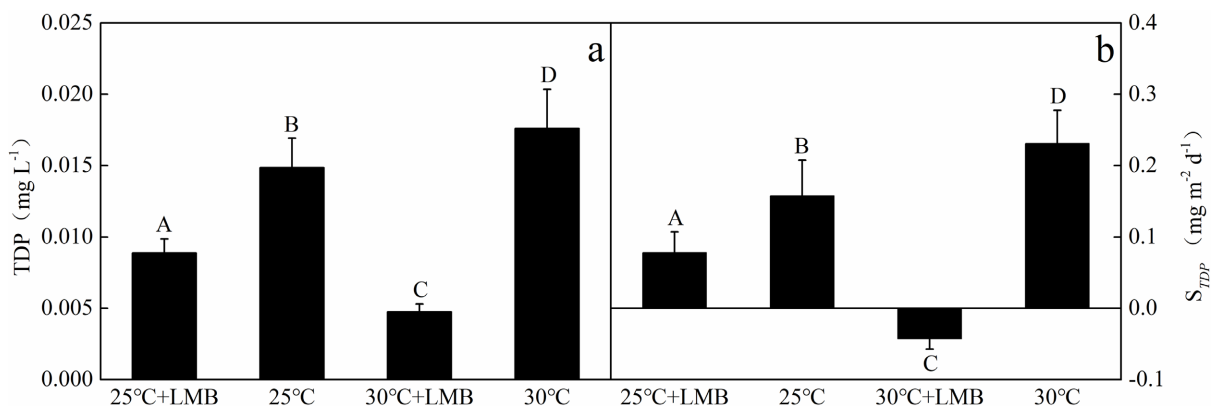


Figure 3. TDP and S_{TDP} in the different treatment, error bars represented standard deviation, significant differences between treatments are indicated by different letters (A-D, $p < 0.05$)

图 3. 不同处理组 TDP 和 S_{TDP} , 误差线表示标准偏差, 不同字母(A-D)表示处理间差异显著($p < 0.05$)

3.4. SRP 和 S_{SRP}

LMB 施用显著降低水体 SRP 浓度和 S_{SRP} ($p < 0.01$, 表 1, 图 4)。实验结束时, 25℃ + LMB 组水体

TDP 浓度和 S_{TDP} 比 25℃ 组分别降低 55.01% 和 51.54%，30℃ + LMB 组水体 TDP 浓度和 S_{TDP} 比 30℃ 组分别降低 91.30% 和 95.82%。此外，与 TDP 浓度和 S_{TDP} 情况一致，30℃ 组水体 SRP 浓度和 S_{SRP} 分别显著高于 25℃ 组，30℃ + LMB 组水体 SRP 浓度和 S_{SRP} 分别显著低于 25℃ + LMB 组，表明了温度升高促进了磷(SRP)的释放，但 LMB 在湖泊热浪期间加强了对磷(SRP)的控制效果。

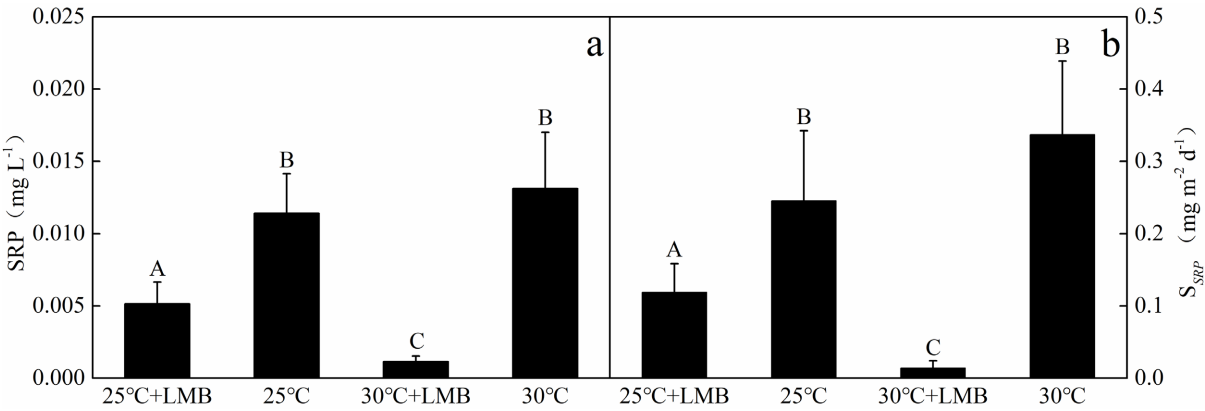


Figure 4. SRP and S_{SRP} in the different treatment, error bars represented standard deviation, significant differences between treatments are indicated by different letters (A-C, $p < 0.05$)

图 4. 不同处理组 SRP 和 S_{SRP} ，误差线表示标准偏差，不同字母(A-C)表示处理间差异显著($p < 0.05$)

4. 讨论

4.1. 湖泊热浪对蔚然湖水质的影响

湖泊热浪对蔚然湖水水质产生显著的负面影响，主要体现为氮磷等营养盐浓度的升高。本研究显示在湖泊热浪期间，沉积物氮磷释放速率增加，导致水体 TDN、TDP 和 SRP 浓度升高。在一些研究中同样发现此类现象[13]-[15]，并认为与多方面因素有关，如热力分层强化，使底层水体与大气气交换中断，溶解氧消耗速率超过补充速率，触发还原性环境[16]。缺氧条件下，沉积物中铁氧化物被还原为可溶性 Fe^{2+} ，释放吸附的磷酸盐[17]。此外，高温可促进微生物矿化作用，使有机磷转化为溶解性活性磷 SRP[12]。在湖泊热浪影响下，湖泊水体营养盐浓度升高，可进一步促进藻类生长，导致藻类水华出现时间提前或延长，强度增加，将不利于湖泊富营养化的管控。

4.2. LMB 施用对蔚然湖水质的影响

LMB 施用可显著降低水体磷含量。在本研究中，不论是在 25℃ 温度下，还是在 30℃ 温度下，LMB 施用后，沉积物磷释放速率(S_{TDP} 和 S_{SRP})均显著降低，导致水体 TDP 和 SRP 浓度相比未施用 LMB 组显著降低，本研究结果与一些实验尺度和实践修复尺度研究结果一致[18]-[20]。一般而言，LMB 对磷的控制可分为两种途径，首先，LMB 在下沉过程中，能够吸附水体中的可溶性活性磷 SRP，形成磷酸镧沉淀，从而降低水体磷浓度。其次，LMB 沉降后覆盖于沉积物表面并形成钝化层，抑制下层沉积物中磷的释放，从而降低水体磷浓度[21]。在本研究中，未发现 LMB 对水体氮存在影响，但 LMB 施用导致水体电导率升高，一些研究同样发现此类现象，认为与 LMB 的相关特性有关[22]。

4.3. 湖泊热浪对 LMB 功效的影响

湖泊热浪期间，LMB 加强了对磷的控制效果。在本研究中，通过对比研究发现，在 30℃ 组水体 TDP 和 SRP 浓度高于 25℃ 组情况下，30℃ + LMB 组水体 TDP 和 SRP 均显著低于 25 + LMB 组，表明湖泊

热浪促进了 LMB 对磷的控制效果。有研究表明,在 5℃到 35℃温度范围内,LMB 最高 SRP 吸附容量出现在 30℃,与本实验结果相似[23]。温度较低时,镧改性膨润土的吸附速率可能减慢,因为低温会降低磷酸根离子的扩散速度和镧活性位点的反应活性。适当的温度通常会促进化学吸附(镧与磷酸根的配位反应),提高吸附速率和容量。此外,LMB 在 30℃条件下较好的控磷效果还可能与水体 pH 有关,相关研究发现水体 pH 值在 5~9 范围内,LMB 均有显著的除磷效果,最适 pH 值在 5-7 范围内[23]-[25]。本研究中 30℃温度下水体 pH 低于 25℃,更为靠近 LMB 施用的最适 pH 范围。本研究选取了 25℃为基础温度,30℃为湖泊热浪温度,基于 2023 年秋季在蔚然湖观察到的现象。2023 年 10 月部分时间段,滁州市温度较往年同期有所提升,出现热浪事件,滁州学院会峰校区蔚然湖水面温度升高,蔚然湖湖面出现水华。因此,如若基础温度设置更低(春季)或更高(夏季),湖泊热浪温度相应设置更低或更高,实验结果可能有所不同,还需开展进一步研究。

蔚然湖所属的长江中下游地区分布着众多湖泊,如中国五大淡水湖鄱阳湖、太湖和巢湖,这些湖泊在当地经济发展、水资源安全保障等方面起着极为重要的作用,但在全球持续变暖情况下,它们将不断面临湖泊热浪的威胁。长江中下游地区夏季高温多雨,且易受西太平洋副热带高压的影响,气温高、湿度大,相关研究表明,长江中下游地区是我国高温热浪事件发生频率最高、持续时间最长的典型区域之一[26]-[28]。此外,长江中下游地区社会经济发展水平和城市化水平较高,城市热岛效应明显,进一步加剧了该地区的热环境[29] [30]。因此,考虑到长江中下游地区湖泊的重要作用及面临的湖泊热浪威胁,有必要从多角度、多层次和多方面持续开展长江中下游地区湖泊对湖泊热浪的响应研究。

基金项目

滁州学院大学生创新创业训练计划项目——湖泊热浪袭扰下蔚然湖沉积物氮磷释放特征及钝化机制研究(202410377051)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 祁国华,马晓双,何诗瑜,等.基于多源遥感数据的巢湖水华长时序时空变化(2009-2018 年)分析与发生概率预测[J].湖泊科学,2021,33(2): 414-427.
- [3] Smith, V.H. and Schindler, D.W. (2009) Eutrophication Science: Where Do We Go from Here? *Trends in Ecology & Evolution*, **24**, 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>
- [4] Schindler, D.W., Hecky, R.E., Findlay, D.L., Stainton, M.P., Parker, B.R., Paterson, M.J., et al. (2008) Eutrophication of Lakes Cannot Be Controlled by Reducing Nitrogen Input: Results of a 37-Year Whole-Ecosystem Experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**, 11254-11258. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805108105>
- [5] Schindler, D.W., Carpenter, S.R., Chapra, S.C., Hecky, R.E. and Orihel, D.M. (2016) Reducing Phosphorus to Curb Lake Eutrophication Is a Success. *Environmental Science & Technology*, **50**, 8923-8929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>
- [6] Mackay, E., Maberly, S., Pan, G., Reitzel, K., Bruere, A., Corker, N., et al. (2014) Geoengineering in Lakes: Welcome Attraction or Fatal Distraction? *Inland Waters*, **4**, 349-356. <https://doi.org/10.5268/iw-4.4.769>
- [7] 张巧颖,杜瑛珣,罗春燕,刘正文.镧改性膨润土钝化湖泊中的磷及其生态风险的研究进展[J].湖泊科学,2019,31(6): 1499-1509.
- [8] Dithmer, L., Lipton, A.S., Reitzel, K., Warner, T.E., Lundberg, D. and Nielsen, U.G. (2015) Characterization of Phosphate Sequestration by a Lanthanum Modified Bentonite Clay: A Solid-State NMR, EXAFS, and PXRD Study. *Environmental Science & Technology*, **49**, 4559-4566. <https://doi.org/10.1021/es506182s>
- [9] Woolway, R.I., Albergel, C., Frölicher, T.L. and Perroud, M. (2022) Severe Lake Heatwaves Attributable to Human-induced Global Warming. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2021GL097031. <https://doi.org/10.1029/2021gl097031>

- [10] Woolway, R.I., Jennings, E., Shatwell, T., Golub, M., Pierson, D.C. and Maberly, S.C. (2021) Lake Heatwaves under Climate Change. *Nature*, **589**, 402-407. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03119-1>
- [11] Tassone, S.J., Besterman, A.F., Buelo, C.D., Ha, D.T., Walter, J.A. and Pace, M.L. (2022) Increasing Heatwave Frequency in Streams and Rivers of the United States. *Limnology and Oceanography Letters*, **8**, 295-304. <https://doi.org/10.1002/lol2.10284>
- [12] Ding, S., Chen, M., Gong, M., Fan, X., Qin, B., Xu, H., *et al.* (2018) Internal Phosphorus Loading from Sediments Causes Seasonal Nitrogen Limitation for Harmful Algal Blooms. *Science of the Total Environment*, **625**, 872-884. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.348>
- [13] Yindong, T., Xiwen, X., Miao, Q., Jingjing, S., Yiyan, Z., Wei, Z., *et al.* (2021) Lake Warming Intensifies the Seasonal Pattern of Internal Nutrient Cycling in the Eutrophic Lake and Potential Impacts on Algal Blooms. *Water Research*, **188**, Article ID: 116570. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116570>
- [14] Jeppesen, E., Kronvang, B., Meerhoff, M., Søndergaard, M., Hansen, K.M., Andersen, H.E., *et al.* (2009) Climate Change Effects on Runoff, Catchment Phosphorus Loading and Lake Ecological State, and Potential Adaptations. *Journal of Environmental Quality*, **38**, 1930-1941. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0113>
- [15] Qin, B., Deng, J., Shi, K., Wang, J., Brookes, J., Zhou, J., *et al.* (2021) Extreme Climate Anomalies Enhancing Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lake Taihu, China. *Water Resources Research*, **57**, e2020WR029371. <https://doi.org/10.1029/2020wr029371>
- [16] Kraemer, B.M., Anneville, O., Chandra, S., Dix, M., Kuusisto, E., Livingstone, D.M., *et al.* (2015) Morphometry and Average Temperature Affect Lake Stratification Responses to Climate Change. *Geophysical Research Letters*, **42**, 4981-4988. <https://doi.org/10.1002/2015gl064097>
- [17] 尹大强, 覃秋荣, 阎航. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 1994, 6(3): 240-244.
- [18] Han, Y., Zhang, Y., He, H., Ning, X., Zhang, L. and Li, K. (2025) External Nitrogen Influxes Hinder the Efficacy of Lanthanum-Modified Bentonite (LMB) on Phosphorus and Algae Control in Shallow Lakes. *Environmental Research*, **264**, Article ID: 120364. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120364>
- [19] Waajen, G., van Oosterhout, F., Douglas, G. and Lüring, M. (2016) Management of Eutrophication in Lake De Kuil (the Netherlands) Using Combined Flocculant—Lanthanum Modified Bentonite Treatment. *Water Research*, **97**, 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.034>
- [20] Han, Y., Li, Q., He, H., Gu, J., Wu, Z., Huang, X., *et al.* (2021) Effect of Juvenile Omni-Benthivorous Fish (*Carassius carassius*) Disturbance on the Efficiency of Lanthanum-Modified Bentonite (LMB) for Eutrophication Control: A Mesocosm Study. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 21779-21788. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12045-8>
- [21] Copetti, D., Finsterle, K., Marziali, L., Stefani, F., Tartari, G., Douglas, G., *et al.* (2016) Eutrophication Management in Surface Waters Using Lanthanum Modified Bentonite: A Review. *Water Research*, **97**, 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.056>
- [22] Han, Y., Zhang, Y., Li, Q., Lüring, M., Li, W., He, H., *et al.* (2021) Submerged Macrophytes Benefit from Lanthanum Modified Bentonite Treatment under Juvenile Omni-Benthivorous Fish Disturbance: Implications for Shallow Lake Restoration. *Freshwater Biology*, **67**, 672-683. <https://doi.org/10.1111/fwb.13871>
- [23] Kang, L., Mucci, M. and Lüring, M. (2022) Influence of Temperature and Ph on Phosphate Removal Efficiency of Different Sorbents Used in Lake Restoration. *Science of the Total Environment*, **812**, Article ID: 151489. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151489>
- [24] Ross, G., Haghsersht, F. and Cloete, T.E. (2008) The Effect of Ph and Anoxia on the Performance of Phoslock®, a Phosphorus Binding Clay. *Harmful Algae*, **7**, 545-550. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2007.12.007>
- [25] Mucci, M., Maliaka, V., Noyma, N.P., Marinho, M.M. and Lüring, M. (2018) Assessment of Possible Solid-Phase Phosphate Sorbents to Mitigate Eutrophication: Influence of pH and Anoxia. *Science of the total Environment*, **619**, 1431-1440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.198>
- [26] 郭禹慧, 黄晓军, 郑殿元, 李艳雨. 极端高温胁迫下中国城市脆弱性格局与影响因素[J]. 热带地理, 2021, 41(3): 596-608.
- [27] 张玉星, 黄晓军, 郑殿元. 长江经济带高温热浪时空特征及脆弱性评价[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(2): 440-450.
- [28] Guo, G., Wang, D., Ren, Z., Yin, Q. and Gao, Y. (2021) A New Method to Estimate Heat Exposure Days and Its Impacts in China. *Atmosphere*, **12**, Article 1294. <https://doi.org/10.3390/atmos12101294>
- [29] Sun, Y., Zhang, X., Zwiers, F.W., Song, L., Wan, H., Hu, T., *et al.* (2014) Rapid Increase in the Risk of Extreme Summer Heat in Eastern China. *Nature Climate Change*, **4**, 1082-1085. <https://doi.org/10.1038/nclimate2410>
- [30] 谢志清, 杜银, 曾燕, 苗茜. 长江三角洲城市群化发展对极端高温事件空间格局的影响[J]. 科学通报, 2017, 62(Z1): 233-244.