

镧系锁磷剂(LMB)施用对沉水植物影响的研究进展

刘 琪, 钟圆盛, 田雨婷, 姚 熠, 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6月8日; 录用日期: 2025年6月30日; 发布日期: 2025年7月10日

摘 要

以镧系锁磷剂(LMB)为代表的原位钝化技术越来越多地应用于湖泊沉积物内源磷释放的控制中, 期望达到控制富营养化, 促使湖泊由浊水态向清水态转变的目的。沉水植物在湖泊清水态的形成和维持中起着核心作用, 也常常用于湖泊富营养化修复中。因此, 为了确保修复效果, 明确沉水植物对原位钝化技术的响应情况十分必要。本文系统综述了镧系锁磷剂LMB施用对沉水植物的影响研究进展, 重点关注沉水植物生物量、形态学特征、生理生化特征和种间关系等方面的变化情况, 同时分析了作用机理, 并指出当前研究的局限性, 对未来研究方向提出了建议, 以期为富营养化水体修复中锁磷剂的科学应用提供理论依据。

关键词

富营养化, 镧改性膨润土, 沉水植物

Research Progress of the Effects of Lanthanum Modified Bentonite Application on Submerged Macrophytes

Qi Liu, Yuansheng Zhong, Yuting Tian, Yi Yao, Yanqing Han*

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

Received: Jun. 8th, 2025; accepted: Jun. 30th, 2025; published: Jul. 10th, 2025

Abstract

In situ phosphorus inactivation technologies, represented by lanthanum-modified bentonite (LMB),

*通讯作者。

文章引用: 刘琪, 钟圆盛, 田雨婷, 姚熠, 韩燕青. 镧系锁磷剂(LMB)施用对沉水植物影响的研究进展[J]. 水污染及处理, 2025, 13(3): 58-64. DOI: 10.12677/wpt.2025.133008

are increasingly being applied to control the release of internal phosphorus from lake sediments, with the aim of mitigating eutrophication and facilitating the transition of lakes from a turbid to a clear water state. Submerged macrophytes play a central role in the establishment and maintenance of clear water conditions in lakes and are often used in the restoration of eutrophic lakes. Therefore, in order to ensure the restoration efficacy, it is essential to clarify the response mechanism of submerged macrophytes to the application of *in situ* inactivation technologies such as LMB. This paper systematically reviews the progress of research on the effects of LMB application on submerged macrophytes, with a focus on the changes in aspects such as the biomass, morphological characteristics, physiological and biochemical characteristics, and interspecific relationships of submerged macrophytes. The mechanisms underlying these effects are analyzed, current research limitations are identified, and future research directions are proposed, providing a theoretical foundation for the scientific application of LMB in eutrophic waterbody restoration.

Keywords

Eutrophication, Lanthanum Modified Bentonite, Submerged Macrophytes

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

富营养化是全球湖泊生态系统面临的主要环境问题之一[1]。对分布广泛的 2058 个内陆水体的研究显示,富营养化和中营养化水体占比分别为 63%和 26%,且集中在非洲中部、亚洲东部、北美州中北部和东南部等人口较为稠密的平原地区[2]。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,按输入来源又可分为外源输入和内源输入,外源输入主要来自农业化肥、农药流失、污水排放等,内源输入则指沉积物中的营养物质释放。因此,在富营养化治理中,除了采取一定措施控制外源输入时,内源输入的控制也尤为重要。此外,生态系统中的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态系统中[3]。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(包括外源磷和内源磷输入)是缓解湖泊富营养化的关键[4]。

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[5]。近年来,由于镧对磷酸根具有很强的选择吸附性,镧改性膨润土(LMB)在内源磷释放的控制中越来越受到关注[6]。商业化的镧改性膨润土由 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,如图 1 所示,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[7]。LMB 一般通过两种途径发挥作用:首先,LMB 在下沉过程中,能够吸附水体中的可溶性活性磷(SRP);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,抑制浮游植物生长,改善水体透明度,促使湖泊由浊水态向清水态转变[8]。但有研究同时表明,LMB 在取得良好的修复效果的同时,其对水体环境和沉积物环境瞬时或长时间的改变,也对水生生物如浮游动物、底栖动物等产生了不同程度的影响,进而影响水生态环境。因此,LMB 施用的生物和生态效应也值得持续关注。

沉水植物在湖泊清水态的形成和维持中起着核心作用。富营养浅水湖泊从浊水态向清水态转换的关键是实现浮游植物向大型水生高等植物的转换[9] [10]。沉水植物联系着水体各种生源要素,是浅水湖泊

生态系统结构的塑造者和功能的维持者,在维持水体清澈度、提供生物栖息地和促进物质循环等方面发挥着不可替代的作用。因此,沉水植被恢复是实现浊水态向清水态转变以及维持清水态稳定的关键[11][12]。在湖泊修复中,沉水植物移植也常常作为一种修复手段与其他修复措施联合施用[13][14]。随着富营养化水体治理需求的增加,镧系锁磷剂因其高效持久的控磷效果在湖泊修复中得到广泛应用。然而,这类锁磷剂可能通过改变水体磷的生物有效性而直接或间接影响沉水植物的生长和生理状态。因此,考虑到原位钝化技术运用趋势、沉水植物在湖泊清水稳态形成和维持阶段的核心作用,明确沉水植物在原位钝化技术施用后的生长变化特征十分必要。本文聚焦镧系锁磷剂 LMB,系统梳理其对沉水植物生物量、形态学特征、生理生化特征和种间关系等的影响研究,旨在为富营养化水体生态修复中锁磷剂的优化使用提供科学参考。

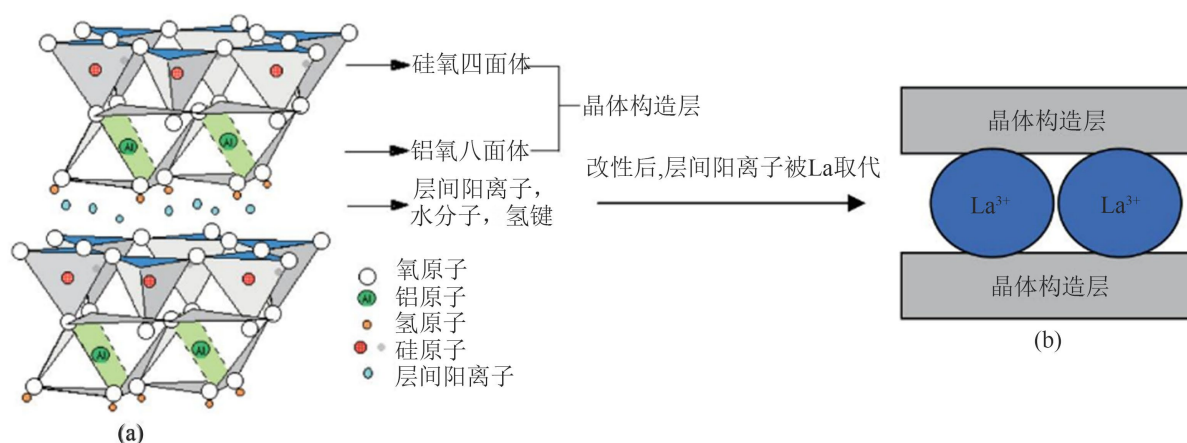


Figure 1. The structures of bentonite (a) and LMB (b)

图 1. 膨润土(a)及 LMB (b)结构

2. 沉水植物生物量

LMB 对沉水植物生物量的影响存在一定差异。在模拟研究中,较多研究发现,在 LMB 施用后,沉水植物生长受到抑制,生物量和生长速率降低。符亦舒等人[15]研究了两种水体营养盐浓度下沉积物添加 LMB 对轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)生长的影响,发现在水体磷浓度为 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,无 LMB 组轮叶黑藻生物量及相对生长率达到了 LMB 组的 2 倍,在水体磷浓度为 $150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,无 LMB 组轮叶黑藻生物量和相对生长率也均显著高于 LMB 组。Zhang 等人[14]研究了不同剂量 LMB 与沉水植物联用对磷失活的影响,发现随着 LMB 剂量的增加,苦草(*Vallisneria denseserrulata*)的生长受到显著抑制,生物量逐渐降低,一些相关研究也发现类似结果[16]-[18]。与此相反,李敏娟等人[13]在锁磷剂-苦草联用对沉积物水界面中钴的影响研究中发现,在 66 天实验结束时,LMB 组苦草生物量比未添加 LMB 组苦草生物量高 41.01%。Yan 等人[19]的研究同样表明苦草生物量在 LMB 添加后得到提高。此外,Han 等人[20]研究表明,在存在生物(底栖杂食性鱼类鲫鱼)扰动情况下,LMB 的添加促进了苦草的生长,苦草生物量和生长速率均显著增加。在模拟实验研究中,LMB 对沉水植物生物量影响出现以上差异与 LMB 对沉水植物的正向作用和负面作用息息相关,LMB 可降低水体磷浓度,抑制藻类生长,改善水质,提高水体透明度,增强沉水植物光合作用,进而促进沉水植物生长,但也可通过降低水体和沉积物生物可利用磷含量,导致沉水植物生长磷限制,抑制沉水植物生长。因此,当 LMB 对沉水植物的正向作用大于负向作用时,LMB 促进沉水植物生长,生物量增加,当 LMB 对沉水植物的正向作用小于负向作用时,LMB 抑制沉水植物生长,生物量降低。为了降低 LMB 的负面影响,在施用 LMB 时,可以采用少量多次原则,分批次

添加 LMB, 消除或减弱因一次添加 LMB 对沉水植物产生的负面作用。

在湖泊修复实践中, 沉水植物因 LMB 施用对水环境的改善作用, 生长和繁殖得到促进, 生物量增加。荷兰 De Kuil 湖在 2009 年施用 LMB 后, 总磷浓度和叶绿素 *a* 浓度显著降低, 透明度从 1992~2008 年的 2.31 m 增加到 2009~2014 年的 3.12 m, 大型水生植物的覆盖范围从 2009 年到 2011 年增加了 2 倍, 普生轮藻(*Chara vulgaris*)和伊乐藻(*Elodea nuttallii*)等水生高等植物覆盖面积显著增加, 生长的最大深度达到 4~5 m, 生物量显著增加[21]。Gunn 等人[22]研究了英国苏格兰 Loch Flemington 湖施用 LMB 后的大型水生植物生长情况, 发现 LMB 施用后水生植物的定植深度增加, 覆盖范围也显著扩大, 然而沉水植被仍以入侵种伊乐藻属植物(*Elodea canadensis* Michx)为主, 水生大型植物群落指标无明显变化。Spears 等人[23]对 18 个施用过 LMB 的湖泊监测发现, 在施用 LMB 后 24 个月内, 湖泊水质普遍改善, 水生大型植物群落得到改善, 水生大型植物种类数量从 5.5 种增加到 7.0 种, 最大根植深度从 1.8 m 增加到 2.5 m, 沉水植物生物量显著增加。因此, 湖泊修复实践表明, LMB 的施用可通过降低水体磷和藻类浓度, 提高水体透明度和光照条件, 促进沉水植物生长和繁殖。LMB 对沉水植物生物量的影响研究结果在模拟实验研究尺度和修复实践尺度存在一定差异, 这与模拟研究实验的条件简单、时间尺度和空间尺度有限存有一定关系, 模拟研究未能完全反应实际情况, 并在一定程度上放大了 LMB 对沉水植物的负向作用。

3. 沉水植物形态学特征

在 LMB 施用后, 沉水植物形态学特征也发生了变化, 显现出沉水植物对生存环境改变的生存策略。Lin 等人[24]在穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)的研究中发现, 沉积物添加 LMB 会改变穗花狐尾藻形态, 表现为穗花狐尾藻地上部分指标如叶片数、地上部分生物量相较于对照组显著降低, 地下部分指标如根长、根数增加, 根冠比得到提高。符亦舒等人[15]的研究也发现类似现象, 在两种营养盐水平下(总磷浓度分别为 50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 在 LMB 组, 轮叶黑藻株高和地上部分生物量降低, 根长、地下部分生物量、根冠比得到提高。植物通过加大对于地下部分如根系的生物量分配, 有利于其获取更多的营养盐, 维持种群生长。董百丽等人[25]也发现, 苦草在沉积物添加锁磷剂后有利于根系的生长, 而对地上部分则表现为抑制作用。在 LMB 施用后, 表层沉积物生物可利用性磷含量显著降低, 沉水植物为了摄取足够的磷, 满足自身生长需求, 通过延长根长, 增加根数, 扩大对磷的摄取范围和能力。与上述结果不同, Lin 等人[17]研究了 LMB 对黑藻形态学特征的影响, 发现 LMB 抑制黑藻根的生长, 表现为根长和根数的降低, 并认为黑藻根生长收到抑制与 LMB 造成沉积物缺氧有关。在无强烈水动力扰动情况下, LMB 将会在沉积物表层形成致密的覆盖层, 对氧气的下渗造成阻碍, 导致沉积物表层缺氧环境的形成, 潜在影响沉水植物根的生长发育, 进而抑制沉水植物生长。但随着时间的延长, 由于风浪和生物扰动的存在, LMB 会逐渐与沉积物混合, 向深层沉积物迁移, 对表层沉积物理化性质的影响将逐渐减弱。LMB 对黑藻形态学特征的影响在不同研究中有所差异, 这也与具体的实验条件如 LMB 剂量、水质和沉积物等存在一定差异有关。此外, Han 等人[20]的研究表明, 底栖杂食性鱼类鲫鱼扰动可显著恶化水质, 降低水体透明度, 导致苦草分蘖数、叶片数降低, 株高和根长增加, 而在此情况下添加 LMB 可显著降低鱼类扰动的负面效应, 改善水质, 增加水体透明度, 降低苦草株高和根长, 提高分蘖数、叶片数, 促进苦草生长和繁殖。

4. 沉水植物生理生化特征

在 LMB 施用后, 不同种类沉水植物生理生化指标也发生不同程度的响应。Lin 等人[17]研究了 LMB 对黑藻生理生化特征的影响, 发现 LMB 降低黑藻丙二醛(MDA)含量, 但对叶片叶绿素 *a*、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)无显著影响。Han 等人[26]的研究同样表明, 高剂量和低剂量 LMB 组苦草

叶片丙二醛含量分别比对照组显著降低 63%和 53%, 而叶片叶绿素 *a* 和 *b* 含量无显著变化。此外, 在水动力较弱的水体中, LMB 在沉降时可附着在沉水植物叶片上, 对沉水植物产生遮光作用, 潜在影响沉水植物个体的光合生理特征。在化学计量学方面, 对穗花狐尾藻的研究表明 LMB 施用导致沉积物生物可利用性磷含量降低, 影响穗花狐尾藻对磷的吸收利用, 导致穗花狐尾藻总磷含量降低[24], 在对黑藻的研究中也同样发现此类现象[27]。化学计量内稳性理论认为在生物生长进化过程中, 生物有机体的碳、氮、磷等化学元素的含量及其比例会保持动态稳定[28] [29]。因此, LMB 施用对沉水植物体内磷含量的影响可能引起沉水植物体内氮和碳含量的改变, 并且在不同稳态植物间有所差异。

在 LMB 施用后, 镉在沉水植物体内出现积累现象。Waajen 等人[30]对两个施用 LMB 的池塘中的沉水植物伊乐藻进行研究, 发现在锁磷剂施用 8 个月至 24 月间, 未施用 LMB 区伊乐藻体内镉含量分别在 $0.24\sim7.03\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.14\sim13.53\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 间, 而施用 LMB 区域伊乐藻体内镉含量分别在 $8.55\sim380.30\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $38.63\sim871.33\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 间, 均显著高于未施用 LMB 区域。对荷兰 Rauwbraken 湖的监测同样显示, 在 LMB 应用前, 伊乐藻 La 浓度为 $7.5\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 施用 LMB 后, 镉浓度增加到 $1764\sim2925\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 对应增加 235~389 倍[31]。研究生虽然发现镉在沉水植物体内出现积累现象, 但并未发现镉对沉水植物产生生态毒理学效应, 关于镉积累是否对沉水植物生理生化特征产生影响还需进一步研究。

5. 种间关系

LMB 对沉水植物种间关系如种间竞争的研究较少。在修复实践中, 由于现实环境的复杂性, 很难通过沉水植物分布变化情况来阐明 LMB 对沉水植物种间竞争关系的影响机理, 虽然在湖泊修复实践中发现在 LMB 施用后, 沉水植物物种数量和分布范围有所变化[23]。沉水植物种间竞争格局变化的模拟实验研究也较少, 有研究表明 LMB 对高生长速率的沉水植物轮叶黑藻生长抑制作用显著高于苦草, 可能改变苦草和黑藻的竞争格局[26]。在我国, 苦草和黑藻是很多天然水生生态系统的优势种, 也常常用于富营养湖泊的修复中[32] [33]。与苦草相比, 黑藻由于较高的生长速率和无性繁殖能力, 在沉水植被恢复时常常具有竞争优势[34], 能在较短时间内于上层水体形成极大生物量, 从而压制苦草生长。因此, LMB 对黑藻生长显著的抑制作用可能可以降低其对苦草的竞争优势, 改变苦草黑藻竞争格局, 解决黑藻在沉水植被恢复期过量生长问题。关于 LMB 施用后, 沉水植物种间竞争格局相关研究还有待进一步加强。

6. 总结与展望

LMB 通过降低水体和沉积物生物可利用性磷含量, 改变沉水植物生存环境, 进而对沉水植物产生多层次影响, 并在不同情景下表现出抑制或促进作用, 并体现出一定的剂量依赖性。现有 LMB 施用对沉水植物影响的研究表明, 在湖泊使用 LMB 对沉水植物的负面影响有限, 较为安全, 但现有研究仍存在一些不足, 还需开展深入研究, 以进一步确定 LMB 的生态安全性。首先, 大多数研究关注短期效应, 长期跟踪观测数据不足, 难以进一步评估 LMB 的累积生态风险。其次, 沉水植物种类较为局限, 多集中于两三种沉水植物, 研究对象还有待扩展。第三, LMB 与其他环境因子的交互作用研究较少。

考虑到现有研究的不足, 未来研究应重点关注以下几个方面: (1) 开展长期定位观测, 评估 LMB 的累积效应, 同时将长期定位观测和模型模拟结合起来, 预测 LMB 对沉水植物群落的长期影响; (2) 以不同类型的沉水植物为研究对象, 开展 LMB 对沉水植物多尺度的影响研究, 包括沉水植物种间竞争关系研究; (3) 研究 LMB 与光照、温度等环境因子对沉水植物的交互作用; (4) 结合组学技术(如转录组、代谢组), 探索沉水植物对 LMB 适应的分子机制。

锁磷剂是控制湖泊内源磷释放的有效手段, 但其对沉水植物的影响具有剂量依赖性和物种特异性。未来研究应加强长期生态效应评估, 开发生态友好型锁磷剂, 并结合沉水植物恢复技术, 实现富营养化

湖泊的生态可持续修复。

基金项目

滁州学院大学生创新创业训练计划项目 - 沉水植物对锁磷剂施用的生态响应机制研究 (2024CXXL141)。

参考文献

- [1] 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>
- [2] Wang, S., Li, J., Zhang, B., Spyarakos, E., Tyler, A.N., Shen, Q., *et al.* (2018) Trophic State Assessment of Global Inland Waters Using a Modis-Derived Forel-Ule Index. *Remote Sensing of Environment*, **217**, 444-460. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.026>
- [3] 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*, **105**, 11254-11258. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805108105>
- [4] 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>
- [5] 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>
- [6] 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.
- [7] 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>
- [8] 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>
- [9] Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C. and Walker, B. (2001) Catastrophic Shifts in Ecosystems. *Nature*, **413**, 591-596. <https://doi.org/10.1038/35098000>
- [10] Scheffer, M. and Jeppesen, E. (2007) Regime Shifts in Shallow Lakes. *Ecosystems*, **10**, 1-3. <https://doi.org/10.1007/s10021-006-9002-y>
- [11] Jeppesen, E., Søndergaard, M., Søndergaard, K. and Christoffersen (1998) The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes. Springer.
- [12] Levi, P.S., Riis, T., Alnøe, A.B., Peipoch, M., Maetzel, K., Bruus, C., *et al.* (2015) Macrophyte Complexity Controls Nutrient Uptake in Lowland Streams. *Ecosystems*, **18**, 914-931. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9872-y>
- [13] 李敏娟, 燕文明, 陈翔, 李琪, 何翔宇, 吴婧玮, 郭梓锐. 锁磷剂-苦草联用对沉积物水界面中钴的影响研究[J]. 中国环境科学, 2024, 44(12): 6838-6845.
- [14] Zhang, X., Zhen, W., Cui, S., Wang, S., Chen, W., Zhou, Q., *et al.* (2024) The Effects of Different Doses of Lanthanum-Modified Bentonite in Combination with a Submerged Macrophyte (*Vallisneria spiralis*) on Phosphorus Inactivation and Macrophyte Growth: A Mesocosm Study. *Journal of Environmental Management*, **352**, Article ID: 120053. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120053>
- [15] 符亦舒, 何虎, 何宏业, 马路生, 苏雅玲, 刘正文. 不同水体营养盐浓度下沉积物添加镧改性膨润土(Phoslock®)对轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)生长的影响[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 388-396.
- [16] Zhang, X., Zhen, W., Jensen, H.S., Reitzel, K., Jeppesen, E. and Liu, Z. (2021) The Combined Effects of Macrophytes (*Vallisneria spiralis*) and a Lanthanum-Modified Bentonite on Water Quality of Shallow Eutrophic Lakes: A Mesocosm Study. *Environmental Pollution*, **277**, Article ID: 116720. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116720>
- [17] Lin, J., Zhong, Y., Fan, H., Song, C., Yu, C., Gao, Y., *et al.* (2016) Chemical Treatment of Contaminated Sediment for Phosphorus Control and Subsequent Effects on Ammonia-Oxidizing and Ammonia-Denitrifying Microorganisms and on Submerged Macrophyte Revegetation. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**, 1007-1018. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7828-1>

- [18] Yu, W., Yang, H., Yang, Y., Chen, J., Liao, P., Wang, J., *et al.* (2022) Synergistic Effects and Ecological Responses of Combined *In Situ* Passivation and Macrophytes toward the Water Quality of a Macrophytes-Dominated Eutrophic Lake. *Water*, **14**, Article No. 1847. <https://doi.org/10.3390/w14121847>
- [19] Yan, W., He, X., Wu, T., Chen, M., Lin, J., Chen, X., *et al.* (2023) A Combined Study on Vallisneria Spiralis and Lanthanum Modified Bentonite to Immobilize Arsenic in Sediments. *Environmental Research*, **216**, Article ID: 114689. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114689>
- [20] 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>
- [21] 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>
- [22] Gunn, I.D.M., Meis, S., Maberly, S.C. and Spears, B.M. (2013) Assessing the Responses of Aquatic Macrophytes to the Application of a Lanthanum Modified Bentonite Clay, at Loch Flemington, Scotland, UK. *Hydrobiologia*, **737**, 309-320. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1765-5>
- [23] Spears, B.M., Mackay, E.B., Yasserli, S., Gunn, I.D.M., Waters, K.E., Andrews, C., *et al.* (2016) A Meta-Analysis of Water Quality and Aquatic Macrophyte Responses in 18 Lakes Treated with Lanthanum Modified Bentonite (Phoslock®). *Water Research*, **97**, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.020>
- [24] Lin, Z., Zhong, C., Yu, G., Fu, Y., Guan, B., Liu, Z., *et al.* (2021) Effects of Sediments Phosphorus Inactivation on the Life Strategies of Myriophyllum Spicatum: Implications for Lake Restoration. *Water*, **13**, Article No. 2112. <https://doi.org/10.3390/w13152112>
- [25] 董百丽, 秦伯强, 龚志军, 王永平. 三种沉积物改良措施比较及其对苦草生长的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2726-2731.
- [26] Han, Y., Zou, X., Li, Q., Zhang, Y. and Li, K. (2022) Responses of Different Submerged Macrophytes to the Application of Lanthanum-Modified Bentonite (LMB): A Mesocosm Study. *Water*, **14**, Article No. 1783. <https://doi.org/10.3390/w14111783>
- [27] Wang, C., He, R., Wu, Y., Lüring, M., Cai, H., Jiang, H., *et al.* (2017) Bioavailable Phosphorus (P) Reduction Is Less than Mobile P Immobilization in Lake Sediment for Eutrophication Control by Inactivating Agents. *Water Research*, **109**, 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.045>
- [28] Ågren, G.I. (2004) The C: N: P Stoichiometry of Autotrophs—Theory and Observations. *Ecology Letters*, **7**, 185-191. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00567.x>
- [29] Rao, Q., Su, H., Ruan, L., Deng, X., Wang, L., Rao, X., *et al.* (2021) Stoichiometric and Physiological Mechanisms That Link Hub Traits of Submerged Macrophytes with Ecosystem Structure and Functioning. *Water Research*, **202**, Article ID: 117392. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117392>
- [30] Waajen, G., van Oosterhout, F. and Lüring, M. (2017) Bio-Accumulation of Lanthanum from Lanthanum Modified Bentonite Treatments in Lake Restoration. *Environmental Pollution*, **230**, 911-918. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.046>
- [31] van Oosterhout, F., Waajen, G., Yasserli, S., Manzi Marinho, M., Pessoa Noyma, N., Mucci, M., *et al.* (2020) Lanthanum in Water, Sediment, Macrophytes and Chironomid Larvae Following Application of Lanthanum Modified Bentonite to Lake Rauwbraken (the Netherlands). *Science of the Total Environment*, **706**, Article ID: 135188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135188>
- [32] Li, Y., Wang, L., Chao, C., Yu, H., Yu, D. and Liu, C. (2021) Submerged Macrophytes Successfully Restored a Subtropical Aquacultural Lake by Controlling Its Internal Phosphorus Loading. *Environmental Pollution*, **268**, Article ID: 115949. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115949>
- [33] Liu, Z., Hu, J., Zhong, P., Zhang, X., Ning, J., Larsen, S.E., *et al.* (2018) Successful Restoration of a Tropical Shallow Eutrophic Lake: Strong Bottom-Up but Weak Top-Down Effects Recorded. *Water Research*, **146**, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.007>
- [34] Jain, M.S. and Kalamdhad, A.S. (2018) A Review on Management of *Hydrilla verticillata* and Its Utilization as Potential Nitrogen-Rich Biomass for Compost or Biogas Production. *Bioresource Technology Reports*, **1**, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.03.001>