

湖泊内源磷钝化材料的研究现状

李陈敏, 赵元勋, 李小娣*, 余军霞

武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月2日; 录用日期: 2025年3月25日; 发布日期: 2025年4月8日

摘要

通常认为, 磷是造成湖泊富营养化的关键因子, 控制其含量是湖泊治理的关键。然而, 在外源磷负荷得到有效控制时, 沉积物中的内源磷仍可能维持湖泊富营养化状态。底泥原位钝化技术因其剪操作性强、控磷效果明显, 而被广泛用作湖泊内源磷的控制手段。本文综述了近年来关于湖泊沉积物磷钝化材料的研究状况, 包括常见钝化材料的种类、钝化控磷的环境影响因素, 以及存在的问题, 并对未来研究方向进行了展望, 以期为湖泊沉积物污染治理提供科学依据和技术支持。

关键词

水体富营养化, 磷钝化, 钝化材料, 内源控制

Research Status of Phosphorus Passivation Materials in Lakes

Chenmin Li, Yuanxun Zhao, Xiaodi Li*, Junxia Yu

School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Mar. 2nd, 2025; accepted: Mar. 25th, 2025; published: Apr. 8th, 2025

Abstract

It is generally believed that phosphorus is the key factor causing lake eutrophication, and controlling its content is the key to lake management. However, when the external phosphorus load is effectively controlled, the endogenous phosphorus in the sediment may still maintain the eutrophication state of the lake. *In-situ* passivation of sediment is widely used as a control method for phosphorus in lakes because of its strong operability and obvious phosphorus control effect. In this pa-

*通讯作者。

per, the research status of phosphorus passivation materials in lake sediments in recent years is reviewed, including the types of common passivation materials, environmental factors affecting phosphorus passivation control, and existing problems, and the future research direction is prospected, in order to provide scientific basis and technical support for lake sediment pollution control.

Keywords

Water Eutrophication, Phosphorus Passivation, Passivating Material, Endogenous Control

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

湖泊富营养化是当前国内外普遍面临的主要水环境问题，也是导致水生生态系统破坏的主要原因之一。其原因主要源自于磷和氮等营养物质的富集。根据 2022 年中国生态环境状况公报显示，在开展营养状态监测的 210 个重要湖泊(水库)中，贫营养状态湖泊(水库)占 9.80%、中营养状态占 60.30%、轻度富营养状态占 24.0%、中度富营养状态占 5.90%。我国湖泊(水库)富营养化呈现逐年增长趋势且维持在较高水平。其中磷作为水体富营养化的主要限制性元素，容易导致藻类大量繁殖，引发水华、水体缺氧及水生动物死亡等环境问题，影响水生态系统和人类健康[1]。因此，有效控制水体中磷的含量对控制水体富营养化具有重大意义。

湖泊中磷的来源主要包括外源磷输入和内源磷释放，外源磷输入主要来自城市污水、工业污水和农业污水的排放，而内源磷释放主要是从沉积物和底泥中释放出来。随着我国对污染排放严格控制及湖泊水质管理与保护力度的加大，外源磷输入得到了有效控制，然而富营养化问题依旧存在，水体污染仍能持续几十年[2]。这是因为赋存在底泥中的内源磷在水体温度、酸碱度、溶解氧及季节等环境条件发生变化时，有向上覆水中释放的风险，再度导致湖泊富营养化[3]。因此，降低湖泊沉积物中磷的释放，控制水体磷浓度，成为湖泊水质管理中的关键任务。

目前常见的内源污染控制技术主要有底泥疏浚、原位钝化、植物生态修复等，其中，底泥疏浚成本高昂、修复效果可持续性较差[4] [5]。植物生态修复周期长，见效慢，且易受到高内负荷和季节变化的影响[6] [7]。与之相比，原位钝化技术具有成本低、见效快、效果稳定等优势，可改善沉积物-水界面的理化环境，为水生植物的恢复创造良好生境，因此在浅水湖泊内源修复中日益受到重视[8] [9]。

原位钝化技术是指在湖泊中投加活性材料，将磷吸附并固定在沉积物中，或改变沉积物中磷的形态，使其转化为不易被生物利用的形态，以达到控制沉积物磷释放的目的。近年来，磷钝化材料的研究取得了显著进展，各种天然矿物、人工合成材料以及废弃物被应用于湖泊沉积物磷钝化研究中，取得了良好的效果。本文将对当前磷钝化材料的研究现状进行综述，分析其应用效果、机理及存在的问题，并探讨未来研究的方向。

2. 钝化材料的种类

目前，应用较多的磷钝化材料主要分为两大类，即金属盐类(铝、铁及钙等)和不溶性固体钝化剂类(改性黏土矿物等)。

2.1. 铝盐钝化剂

铝盐(如硫酸铝、氯化铝、聚合氯化铝等)在水中水解生成 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体, 这些胶体具有较大的比表面积和丰富的表面羟基, 在 pH 值为 6~8 之间对磷具有很高的亲和力, 能够与磷酸根离子形成 AlPO_4 或羟基磷酸盐 $[\text{Al}(\text{OH})_y(\text{PO}_4)_z]$ 而去除水体中的磷, 同时, 为节约成本, 铝盐也会被负载在粘土矿物上, 形成的改性材料而作为磷钝化剂, 其在控制沉积物内源磷释放方面得到了许多研究。

Churchill 等人[10]在华盛顿州詹姆逊湖的马蒂森河流河口处添加硫酸铝溶液后, 发现 5 mg/L 的硫酸铝足以将水体磷含量由原来的 0.13 mg/L 下降至 0.02 mg/L。包先明等人[11]也做了类似研究, 研究者通过向上覆水中添加硫酸铝, 发现总磷去除率随铝盐投入量的增加而上升, 当投加量为 10 mg/L 时, 水体总磷去除率为 62.6%。Wang 等人[12]采用硫酸铝、粘土和石粉合成铝改性粘土(AMC)作为磷钝化剂, 研究其在厌氧和好氧条件下对水库富磷沉积物的修复效果。研究发现, 在厌氧条件下, AMC 有效降低了沉积物中溶解性活性磷的释放通量, AMC 通过表面吸附反机制与磷结合生成了稳定的 Al-P 沉淀, 从而在沉积物表面形成一层惰性屏障, 抑制了沉积物中的磷向孔隙水和上覆水的迁移扩散。

铝盐钝化剂是早期应用于减少湖泊内源磷最早的方法之一, 其磷钝化机制主要包括:

1) 铝盐溶于水后水解产生 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体, 该胶体因其较大的比表面积和丰富的表面, 能够通过静电吸附作用固定磷酸盐。在 pH 值为 6~8 的环境中, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体表面带正电, 吸引带负电的磷酸根离子, 此过程不仅中和了部分胶体表面电荷, 还增强了胶体间的碰撞频率, 加速了微粒间的凝聚过程。

2) 铝离子经过水解和缩聚反应, 转化为具有线性结构的高分子聚合物, 这些聚合物如同桥梁, 连接并吸附相距较远的两个胶粒。通过这种“吸附架桥”机制, 微粒逐渐聚集成更大的颗粒, 发生团聚现象。

3) $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体在吸附和沉淀上覆水溶解活性磷和悬浮物, 有效降低磷浓度的同时还能提升水体透明度。随着胶体体积和质量的增长, 它们向水体底部沉降。同时, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 胶体的絮凝效应在沉降途中将悬浮颗粒物(包括含磷颗粒)凝聚成较大的絮体, 加速沉降, 从而增强了水体的透明度。

4) 在沉积物表面形成掩蔽层, 通过物理阻隔和化学吸附的双重作用, 有效阻碍了沉积物中的活性磷向上覆水体的释放。

2.2. 铁盐钝化剂

铁盐中 Fe^{3+} 在水体、沉积物中水解形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 通过表面吸附减少水体中溶解态磷, 并与 PO_4^{3-} 形成少量 FePO_4 , 同时在沉积物表面形成一层微氧化层, 阻止沉积物磷释放。常用的铁盐包括 FeCl_3 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 等。铁盐钝化剂无毒, 但其钝化效果受氧化还原电位和 pH 值的影响较大, 在氧化条件下效果更佳, 这是因为在低溶解氧时, 铁离子可能被还原为亚铁离子, 从而导致吸附的磷被释放, 与此同时, 钝化更适用于 pH 在 5~7 的酸性水体中, 随着 pH 值的增加, 逐渐增多的 OH^- 会与 PO_4^{3-} 发生竞争吸附而使磷吸附性能下降, 正是铁盐钝化剂的性能易受水体各种因素的影响, 所以单独应用铁盐作为磷钝化剂的案例较少, 为解决这一难题, 研究人员将铁盐负载在粘土矿物上形成铁盐改性的粘土矿物以及开发许多新型铁基材料以控制沉积物内源磷的释放。

Zhan 等人[13]用铁盐对天然沸石(NAT-Z)进行改性, 合成铁改性沸石(IM-Z), 将其用于阻止磷从沉积物向上覆水的释放。研究发现, 改性的 IM-Z 不仅能有效降低上覆水中的可溶性磷, 而且在沉积物-水界面形成了一个静态层, 有效阻止沉积 P 释放的风险。Zou 等人[14]合成水铁矿钝化剂(Fh), 并以 0.3、0.6 和 0.9 cm 的厚度覆盖到沉积物-水界面上方。结果发现, 厚度为 0.3、0.6 和 0.9 cm 的 Fh 在封存和减少湖泊中沉积物中磷的释放方面表现良好, 覆盖后, 0.6 cm 厚的材料覆盖层对沉积物磷的释放在氧化还原条件下也可以起到较好的截留效果。

2.3. 钙盐钝化剂

钙盐也是一类重要的底泥钝化材料,用于磷钝化的主要有碳酸钙(方解石)和氢氧化钙等。钙盐通过与磷酸盐结合形成羟基磷灰石($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$)去除水体磷,羟基磷灰石在 $\text{pH} > 9.5$ 时溶解度很小,磷吸附性强。过低的 pH 值或水体中 CO_2 含量增加会导致碳酸钙和羟基磷灰石的溶解,释放吸附的磷。与 Fe 盐不同的是,钙盐几乎不受氧化还原条件的影响,与钙结合的磷在沉积物中更稳定。钙盐的应用范围和频率少于铝盐,但不意味着它去除磷酸盐的效率更低。在实验室和野外研究中,钙盐都显著抑制了湖泊沉积物中的磷释放。Berg 等人[15]发现,施加 1 cm 厚的方解石覆盖层可在 2~3 个月的时间内使沉积物磷通量降低 80%。Dittrich 等人[16]将 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 应用于德国 Luzin 湖,研究发现 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的添加会引起碳酸钙的沉淀,增加了表层沉积物中磷酸盐结合磷,提高了沉积物的磷滞留能力,有效控制了沉积物中磷向上覆水的释放。刘广容等人[17]研究了 CaCl_2 对武汉东湖底泥向上覆水释放磷的影响,发现用 CaCl_2 处理后的底泥释放磷的平均释放速率从 $7.548 \text{ mg}/(\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$ 降为 $0.174 \text{ mg}/(\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$,钝化后的钙盐态的磷即使在水体环境发生变化时,也不容易释放出来,从而增加了底泥的稳定性。

2.4. 镧基钝化剂

镧是一种稀土元素,对磷酸根离子有强烈的亲和力,能与 PO_4^{3-} 形成稳定的 LaPO_4 沉淀。近年来,镧基材料在沉积物钝磷方面极具应用前景。常见镧基钝化材料包括镧基化合物和镧改性材料,如氢氧化镧、碳酸镧、镧改性沸石、镧改性膨润土等等,它们在实验室和实际工程中得到了诸多研究。

何思琪等人[18]考察了氢氧化镧改良沉积物对磷酸盐的吸附特征,结果发现,改良后的沉积物吸磷能力明显强于未改良沉积物,且改良沉积物吸附的磷大多以低释放风险的形态(NaOH-P 和 HCl-P)存在。Wu 等人[19]在对碳酸镧(LaCO_3)和氢氧化镧($\text{La}(\text{OH})_3$)处理沉积物磷迁移的影响进行对比中发现两者均能显著降低沉积物磷释放的风险,且 $\text{La}(\text{OH})_3$ 对磷的吸附能力更强一些,而 LaCO_3 中 La^{3+} 释放的风险更低,而且它对沉积物微生物多样性的影响更小,对环境更加友好。此外,王哲等人[20]以工业废弃物粉煤灰为原料,在碱性环境下通入氯化镧制备了镧改性沸石,并评估了该材料对湖泊沉积物磷释放的抑制效果。结果发现,镧改性沸石对磷的吸附速率非常快,30 min 内能达到 81% 的吸附位点利用率,而且材料吸磷容量为 $71.94 \text{ mg}/\text{g}$,远远强于市售锁磷剂。

镧基钝化剂吸附去除水中磷酸盐的作用机制主要有静电吸引、沉淀与共沉淀作用、配位体交换和路易斯酸碱反应,能有效控制沉积物中溶解性磷的释放,同时会促使底泥中松结合态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)、铁锰结合态磷(BD-P)、铝结合态磷(NaOH-P)、有机磷(Org-P)向较稳定的磷(钙结合态磷,残渣态磷)形态转化。

2.5. 工农业废弃物

含磷废水中磷资源的高效、便捷回收与大宗固废的综合利用方法一直是环境领域所关注的两类重难点问题。近年来,研究人员调查了各种由典型固体废物和生物质材料制成的磷钝化材料,以减轻富营养化。该领域的一些热门研究对象包括钢渣、煤石和粉煤灰。固体废物再利用的主要优势之一是帮助工厂避免集中处理的成本和场地要求,同时防止与处置相关的环境问题,实现废物再利用的目的。生物炭是一种广泛使用的生物质材料,来源于农作物秸秆、贝壳、污泥和蛋壳等。这些生物质来源制备的大多数新材料在实际应用中不会对环境造成二次伤害。从这些材料制备的吸附剂具有显著的价格优势和环境影响。

粉煤灰作为煤炭燃烧最主要的大宗固体废物之一,其产量最多、成分最复杂,长期堆存不仅占用大量的土地,而且对水体、大气、土壤等生态环境均造成了严重的污染,甚至会威胁人类的身体健康,因此实现粉煤灰的高值化和资源化利用迫在眉睫。粉煤灰颗粒呈多孔蜂窝组织,具有良好的吸附性和

分离作用,因此将粉煤灰应用于底泥钝化具有良好的环境价值。王哲等人[20]以粉煤灰和氯化镧为原料制备镧沸石,并将其用于对湖泊沉积物磷释放的控制,结果发现,镧沸石在沉积物内源磷控制方面具有较好的潜力,在40d的模拟钝化试验中,质量分数1.65%的镧沸石可有效降低上覆水中SRP和TP的浓度,同时将沉积物非稳定态的BD-P、NaOH-P和Org-P转化为稳定态的HCl-P和Res-P,降低了磷的释放风险。

蛋壳含有约83%的碳酸钙,高温热解时生成二氧化碳,是天然的造孔剂,同时蛋壳中极高的含钙量能够为磷酸盐提供大量的吸附位点,Sun等人[21]采用掺杂蛋壳的方法制备了块体粉煤灰地质聚合物吸附剂(EFG),并考察了其用于养猪场废水预处理和磷回收的潜在可行性。研究发现,EFG对磷酸盐的最大吸附容量为49.92 mg P/g且对磷酸盐具有良好的缓释性能(可维持长达60天)。

此外,Li等人[22]使用玉米秸秆为原材料,采用凝胶煅烧法合成了镁改性生物炭珠(Ca/Mg BC),该合成方法不仅扩大了生物碳材料的尺寸,实现了再生利用,同时对 PO_4^{3-} 优异的吸附性能,其最大吸附量为253.95 mg/L,是一种很有前途的磷酸盐吸附剂,可用于废水磷回收与土壤磷流失控制。值得一提的是,研究发现,将生物炭材料与纳米材料结合,能进一步提升材料的性能,Dong等人[23]制备的纳米复合吸附剂Fe@N-BC对磷酸盐具有高吸附速率和吸附容量,在高浓度竞争离子Cl⁻存在的条件下,Fe@N-BC对磷酸盐的吸附量比工业磷酸盐吸附剂D201大3~5倍。

2.6. 改性粘土类

近年来,改性粘土矿物作为一种新型磷钝化材料已引起了广泛关注。粘土矿物是一种层状硅酸盐矿物,是构成黏土岩、土壤的主要矿物组分,它们大部分是由自然环境中的硅酸盐矿物经风化而形成,在自然界中分布广泛,粘土矿物的种类很多,如高岭石、埃洛石、伊利石、蒙脱石、海绿石等,有的还以混层矿物存在,如凹凸棒石、海泡石等。黏土矿物的晶体一般小于2 μm,属于胶体范围,孔隙多,比表面积大,极性高,具有较强的吸附性和离子交换性能,在污染治理与水环境修复中发挥着重要作用。粘土矿物在磷钝化技术方面的应用主要是借助粘土矿物的表面吸附性、离子交换性以及层间吸附性能减少水体中磷的含量,并沉降于沉积物表面形成覆盖层,阻止沉积物磷释放。然而,由于粘土矿物内部杂质较多,将其直接用于磷的钝化效果总体不佳,近年来,研究人员通过各种方法对粘土矿物进行改性,使其钝化效果得到进一步的提高。对粘土矿物的改性主要有以下三种方法:① 物理改性,即通过物理方法改变其结构,如加热。Yin等人[24]将凹凸棒土在700℃下进行改性,并用以评估其在减少沉积物内部磷负荷的能力,在40天的实验期间,平均35.4%的P移动被固定在表层2 cm的沉积层中,且沉积物中移动态-P向相对稳定的Ca-P的转化。② 化学改性,即通过添加一些化学试剂如铝盐、铁盐、有机物、稀土元素或者利用碱液改性。澳大利亚CSIRO研究机构用通过离子交换作用将稀土元素镧负载在膨润土上而研发了一种著名的磷钝化剂——镧改性膨润土(LMB或Phoslock®)[25][26],旨在去除水中的溶解态活性磷(FRP),并阻止沉积物的磷释放。其作用机理如图1所示。③ 复合改性,即采取物理与化学相结合的方式进行改性。Yin等人[27]将水合铝引入多孔的热处理富钙凹凸棒(TCAP)中,用于沉积物内部P的负荷处理,室内实验表明,添加Al@TCAP不会引起上层水的pH变化。与对照处理相比,移动P在表层沉积物(0~2厘米)中显著减少,同时沉积物中的Al-P显著增加,Ca-P也适度增加,说明Al@TCAP有良好的钝化效果,具备修复富营养化浅水湖泊沉积物的潜力。

3. 沉积物钝化控磷的影响因素

磷钝化材料施加后,其钝磷效果也会受到一些因素的影响。首先是钝化剂自身的性质,如活性成分含量、投加量等,其次是水体环境的状况,如水体温度、pH、共存阴阳离子等。为了更好地应用磷钝化

材料, 我们进一步对影响磷钝化材料钝化效果的因素进行整合, 其中, 材料自身的性质要结合材料自身的优缺点, 投加量也要根据实际水体环境进行斟酌, 接下来, 我们主要总结水体环境变化对磷钝化材料控磷带来的影响。

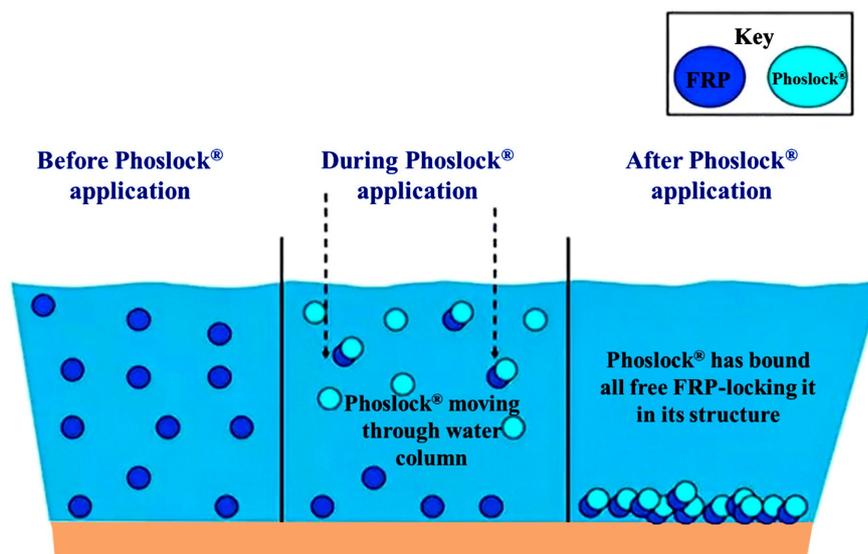


Figure 1. Phoslock® water depth phosphorus removal technology schematic
图 1. Phoslock®水体深度除磷技术原理示意

(1) 水体温度: 有研究表明[28], 沉积物的磷释放风险与温度呈正相关。这是因为, 温度越高, 沉积物微生物繁殖能力越强, 耗氧量越多, 这会导致沉积物氧化还原电位变低, 从而使 Fe-P 释放风险增大。此外微生物繁殖速度的增强, 会促进有机质降解速率升高, 从而使有机磷分解溶出的风险越大。同时有机质降解产生 CO_2 , 会增加 Ca-P 的溶解释放。因此温度升高导致沉积物磷释放量增加, 从而对钝化材料的效果产生影响。

(2) pH: 一方面, pH 值可以改变水体和沉积物中磷的赋存形态, 另一方面 pH 值也会影响磷钝化剂本身性质, 合适的 pH 条件可以提高材料对磷的钝化效率, 但不同材料的钝化效果对 pH 值变化的响应并不相同。如铝盐钝化剂的最佳 pH 应用范围在 6~8, 铁盐钝化更适用于 pH 在 5~7 的酸性水体中在此范围内, 钙盐更适合 pH > 9.5 的碱性硬水湖泊环境, Phoslock®发挥最佳除磷效果的 pH 值范围在 5~7, 因此根据不同材料选择适宜的 pH 环境, 可提高材料钝化效果。

(3) 共存阴阳离子: 富营养化水体中存在大量阴阳离子, 如 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 SiO_4^{2-} 等, 这些离子会对钝化材料去除磷产生影响。一般来说, 阳离子的存在会与磷酸根形成沉淀, 增强钝化效果, 而阴离子通过与 PO_4^{3-} 竞争钝化材料的吸附位点减弱钝化效果。

4. 磷钝化剂运用中存在的问题

磷钝化剂的选择和使用可以有效控制沉积物的磷负荷, 但使用磷钝化剂处理大面积水体时, 需要大量的钝化剂, 从经济和性能的角度来看, 这将显著增加治理成本。以上化学处理的成本如图 2 所示。例如, 在 6 公顷的湖面上施用 17.5 吨 Phoslock® (LMB) (相对较低的剂量), 化学成本接近 6000 USD/h [29]。要完全防止 P 从沉积物中释放, 需要 278 g/m^2 剂量的 Phoslock® [30], 在这种剂量下, 每公顷的磷钝化处理成本将增加到 9000 USD。根据 Blazquez-Pall 的研究, 要去除湖泊沉积物中 35% 的总磷, 1 kg 的磷需要大约 1400 美元的 Phoslock®材料。

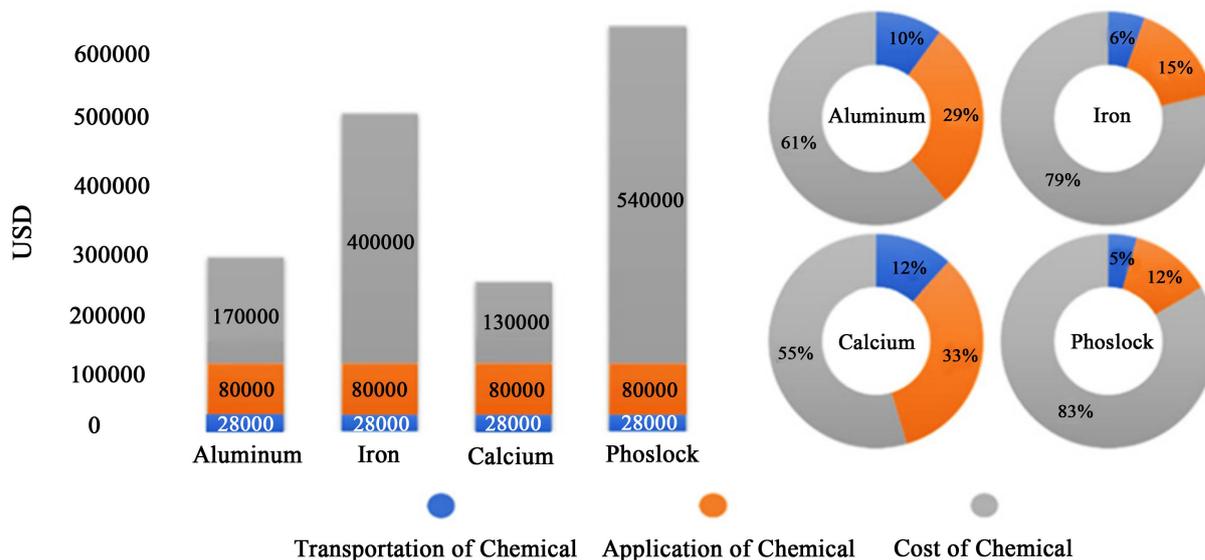


Figure 2. Cost analysis of various chemical processes (including bar chart of cost comparison and pie chart of cost comparison breakdown)

图 2. 各种化学处理的成本分析(包括成本比较的条形图和成本比较分解的饼状图)

此外,大量磷钝化剂的使用可能对生态系统产生潜在的影响。例如,某些钝化剂可能对水生生物产生毒害作用,破坏生态平衡,Albarano 等人[31]综述了沸石、活性炭、纳米零价铁(nZVI)、磷灰石、有机黏土原位钝化时材料对底泥环境的毒性,发现以上材料均存在急性或慢性毒性,毒性表现为活性炭 > 纳米零价铁 > 有机黏土 > 磷灰石 > 沸石。

最后,底泥原位钝化技术的长期效果尚不确定。虽然一些研究表明钝化层可以持续数年之久,但随着时间的推移,钝化层可能会逐渐失效或被破坏,这可能对钝化层的长期效果产生负面影响。

5. 总结与展望

在治理水体富营养化这一全球性环境问题上,原位钝化技术展现出了其独特的优势。它不仅具备高效、稳定的控磷能力,能够在短时间内显著降低水体中的磷含量,而且相对于其他治理方法,操作更加方便,且不会对生态环境造成额外的风险或污染。因此,开发和利用磷钝化材料被视为湖泊富营养化污染调控的有效技术手段之一,具有广泛的应用前景。

然而,尽管新型磷钝化材料在治理水体富营养化方面取得了显著的成效,但当前的技术仍存在一定的不足和局限性,尚未达到完全成熟的阶段。因此,对于新型磷钝化材料的未来研究,可以从以下四个方面进行深入探索:

一是进一步优化磷钝化材料的合成工艺,提高其吸附效率和稳定性:当前磷钝化材料的合成工艺存在能耗高,吸附效率有限及稳定性差等缺点,未来需探索基于绿色化学原则的合成路径,同时可引入纳米技术调控材料形貌与活性位点分布,提高其对磷酸盐的吸附能力[23]。

二是研究磷钝化材料在不同环境条件下的适应性,以扩大其应用范围:由于现有磷钝化材料在过酸,过碱,高盐环境中存在易失活而限制了其应用,针对这一问题,可开发一些 pH 响应材料,例如酸性环境中可通过释放碱性离子中和酸性等[20]。

三是探索磷钝化材料与其他治理方法的协同作用,以实现更高效的水体净化效果:由于单一钝化技术难以应对更为复杂的污染,构建吸附/催化多功能材料,可同步实现重金属离子,有机物,藻类和 P 的去除[32]。

四是评估磷钝化材料对生态环境的长远影响, 确保其安全、可靠地应用于实际治理工作中: 由于钝化材料的剂量超过一定范围, 可能会产生一定的毒性作用, 在进行室外实验之前, 可利用水和底泥中常见动物(如斑马鱼、田螺等)开展毒性试验, 明确其对生态系统的潜在影响。同时在投加过后加强水质和水生生物的实时监测, 以避免钝化材料对水生生态系统产生危害[32]。

通过这些研究方向的深入探索, 相信未来新型磷钝化材料将在水体富营养化治理领域发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] Paerl, H.W. and Otten, T.G. (2013) Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences, and Controls. *Microbial Ecology*, **65**, 995-1010. <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0159-y>
- [2] 杨洁, 刘波, 常素云, 张凯, 任必穷. 富营养化水体原位控磷技术研究及应用[J]. 水资源保护, 2013(2): 10-17.
- [3] Wang, L. and Liang, T. (2016) Distribution Patterns and Dynamics of Phosphorus Forms in the Overlying Water and Sediment of Dongting Lake. *Journal of Great Lakes Research*, **42**, 565-570. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.03.013>
- [4] Fathollahzadeh, H., Kaczala, F., Bhatnagar, A. and Hogland, W. (2015) Significance of Environmental Dredging on Metal Mobility from Contaminated Sediments in the Oskarshamn Harbor, Sweden. *Chemosphere*, **119**, 445-451. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.008>
- [5] 钟继承, 范成新. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 1-10.
- [6] Waajen, G., Pauwels, M. and Lüring, M. (2017) Effects of Combined Flocculant—Lanthanum Modified Bentonite Treatment on Aquatic Macroinvertebrate Fauna. *Water Research*, **122**, 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.075>
- [7] 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>
- [8] Babin, J., Prepas, E.E., Murphy, T.P. and Hamilton, H.R. (1989) A Test of the Effects of Lime on Algal Biomass and Total Phosphorus Concentrations in Edmonton Stormwater Retention Lakes. *Lake and Reservoir Management*, **5**, 129-135. <https://doi.org/10.1080/07438148909354689>
- [9] Cooke, G.D., Welch, E.B., Martin, A.B., Fulmer, D.G., Hyde, J.B. and Schriever, G.D. (1993) Effectiveness of Al, Ca, and Fe Salts for Control of Internal Phosphorus Loading in Shallow and Deep Lakes. *Hydrobiologia*, **253**, 323-335. <https://doi.org/10.1007/bf00050758>
- [10] Churchill, J.J., Beutel, M.W. and Burgoon, P.S. (2009) Evaluation of Optimal Dose and Mixing Regime for Alum Treatment of Matthiesen Creek Inflow to Jameson Lake, Washington. *Lake and Reservoir Management*, **25**, 102-110. <https://doi.org/10.1080/07438140802714510>
- [11] 包先明, 陈开宁, 范成新. 化学物添加控制湖泊内源磷负荷的有效性研究[J]. 生态环境, 2007(1): 8-11.
- [12] Wang, J., Chen, J., Chen, Q., Yang, H., Zeng, Y., Yu, P., *et al.* (2019) Assessment on the Effects of Aluminum-Modified Clay in Inactivating Internal Phosphorus in Deep Eutrophic Reservoirs. *Chemosphere*, **215**, 657-667. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.095>
- [13] Zhan, Y., Yu, Y., Lin, J., Wu, X., Wang, Y. and Zhao, Y. (2019) Simultaneous Control of Nitrogen and Phosphorus Release from Sediments Using Iron-Modified Zeolite as Capping and Amendment Materials. *Journal of Environmental Management*, **249**, Article ID: 109369. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109369>
- [14] Zou, Y., Grace, M.R., Roberts, K.L. and Yu, X. (2017) Thin Ferrihydrite Sediment Capping Sequesters Phosphorus Experiencing Redox Conditions in a Shallow Temperate Lacustrine Wetland. *Chemosphere*, **185**, 673-680. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.052>
- [15] Berg, U., Neumann, T., Donnert, D., Nüesch, R. and Stüben, D. (2004) Sediment Capping in Eutrophic Lakes—Efficiency of Undisturbed Calcite Barriers to Immobilize Phosphorus. *Applied Geochemistry*, **19**, 1759-1771. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.05.004>
- [16] Dittrich, M., Gabriel, O., Rutzen, C. and Koschel, R. (2011) Lake Restoration by Hypolimnetic Ca(OH)₂ Treatment: Impact on Phosphorus Sedimentation and Release from Sediment. *Science of the Total Environment*, **409**, 1504-1515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.006>
- [17] 刘广容, 叶春松, 贺靖皓, 戴文津. 原位化学处理对东湖底泥中磷释放的影响[J]. 武汉大学学报(理学版), 2008(4): 409-413.

- [18] 何思琪, 周亚义, 林建伟, 张宏华, 汪振华, 詹艳慧, 汲雨, 奚秀清, 邢云青, 高春梅. 氢氧化镧改良沉积物对水中磷的吸附特征[J]. 环境化学, 2018, 37(11): 2565-2574.
- [19] Wu, D., Zhan, Y., Lin, J., Zhang, Z. and Xie, B. (2022) Contrasting Effect of Lanthanum Hydroxide and Lanthanum Carbonate Treatments on Phosphorus Mobilization in Sediment. *Chemical Engineering Journal*, **427**, Article ID: 132021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132021>
- [20] 王哲, 张波, 朱俊, 强国泉, 闫德馨, 丁亮亮, 李家科, 李怀恩. 镧沸石控制人工湖泊沉积物磷释放的试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(7): 77-84.
- [21] Sun, C., Huang, C., Wang, P., Yin, J., Tian, H., Liu, Z., *et al.* (2024) Low-Cost Eggshell-Fly Ash Adsorbent for Phosphate Recovery: A Potential Slow-Release Phosphate Fertilizer. *Water Research*, **255**, Article ID: 121483. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121483>
- [22] Li, H., Wang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Feng, J. and Sun, F. (2023) Efficient Simultaneous Phosphate and Ammonia Adsorption Using Magnesium-Modified Biochar Beads and Their Recovery Performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **11**, Article ID: 110875. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110875>
- [23] Dong, L., Li, Y., Wen, X., Zhao, M., Zhang, L., Zhu, M., *et al.* (2024) A New Strategy for Enhanced Phosphate Removal from Waters Using Ferric Oxide Impregnated Biochar. *Chemical Engineering Journal*, **485**, Article ID: 149953. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149953>
- [24] Yin, H. and Kong, M. (2015) Reduction of Sediment Internal P-Loading from Eutrophic Lakes Using Thermally Modified Calcium-Rich Attapulgite-Based Thin-Layer Cap. *Journal of Environmental Management*, **151**, 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.01.003>
- [25] Douglas, G., Adeney, J. and Robb, M. (1999) A Novel Technique for Reducing Bioavailable Phosphorus in Water and Sediments. *International Association Water Quality Conference on Diffuse Pollution*, 1999, Perth, 16-20 May 1999, 517-523.
- [26] Douglas, G., Adeney, J. and Zappia, L. (2000) Sediment Remediation Project: 1998/9 Laboratory Trial Report CSIRO Land and Water. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization.
- [27] Yin, H., Ren, C. and Li, W. (2018) Introducing Hydrate Aluminum into Porous Thermally-Treated Calcium-Rich Attapulgite to Enhance Its Phosphorus Sorption Capacity for Sediment Internal Loading Management. *Chemical Engineering Journal*, **348**, 704-712. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.065>
- [28] 郑苗壮, 卢少勇, 金相灿, 胡小贞, 张帆, 卢维盛. 温度对钝化剂抑制滇池底泥磷释放的影响[J]. 环境科学, 2008(9): 2465-2469.
- [29] Epe, T.S., Finsterle, K. and Yasseri, S. (2017) Nine Years of Phosphorus Management with Lanthanum Modified Bentonite (Phoslock) in a Eutrophic, Shallow Swimming Lake in Germany. *Lake and Reservoir Management*, **33**, 119-129. <https://doi.org/10.1080/10402381.2016.1263693>
- [30] Gibbs, M. and Özkundakci, D. (2010) Effects of a Modified Zeolite on P and N Processes and Fluxes across the Lake Sediment-Water Interface Using Core Incubations. *Hydrobiologia*, **661**, 21-35. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-0071-8>
- [31] Albarano, L., Lofrano, G., Costantini, M., Zupo, V., Carraturo, F., Guida, M., *et al.* (2021) Comparison of in Situ Sediment Remediation Amendments: Risk Perspectives from Species Sensitivity Distribution. *Environmental Pollution*, **272**, Article ID: 115995. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115995>
- [32] Luo, Q., Zhang, X., Wei, J., Zhang, J., Guo, Z. and Song, Y. (2025) High-Efficiency Lanthanum-Modified Zeolite Adsorbents for Phosphorus Control and Algal Suppression: Preparation, Characterization and Mechanistic Insights. *Separation and Purification Technology*, **352**, Article ID: 128146. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128146>