

过氧化钙修复水体沉积物过程中微生物响应机制研究进展

陈艳姣^{1,2}, 杨旭楠^{2*}, 张多英^{1*}, 许玫英²

1 黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨

2 广东省科学院微生物研究所, 华南应用微生物国家重点实验室, 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广东 广州

陈艳姣, 杨旭楠, 张多英, 许玫英. 过氧化钙修复水体沉积物过程中微生物响应机制研究进展[J]. 微生物学报, 2025, 65(6): 2418-2432.

CHEN Yanjiao, YANG Xunan, ZHANG Duoying, XU Meiyang. Advances in microbial response mechanisms during calcium peroxide remediation of aquatic sediments[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2025, 65(6): 2418-2432.

摘要: 水体沉积物中的微生物群落对环境变化极为敏感, 是评估生态系统健康的关键指标。作为新型生态修复材料, 过氧化钙(calcium peroxide, CaO₂)在水体沉积物处理中的应用日益广泛, 其对微生物群落的影响已成为生态学研究的前沿领域。本文从微生物生态学视角, 系统综述了CaO₂对水体沉积物微生物群落的影响机制。CaO₂通过显著改变沉积物的氧化还原环境, 对微生物群落结构和功能产生多维度影响: 在群落多样性层面, 显著提高了微生物群落α多样性, 增加了物种丰富度; 在群落组成层面, CaO₂促进了亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)、硫杆菌属(*Thiobacillus*)等具有氨氧化或硫氧化功能菌属的增殖, 同时抑制了梭菌属(*Clostridium*)、脱硫弧菌属(*Desulfovibrio*)等厌氧发酵或硫酸盐还原菌属的生长, 对微生物群落的调控呈现出明显的功能导向特征, 即通过选择性富集具有促进氮、硫等物质循环功能的菌群, 抑制厌氧生成有害产物菌群的生长, 从而优化了沉积物微生物群落的功能结构。本文进一步阐释了CaO₂对微生物群落的生态效应, 揭示了其作为生态修复材料在调控水体沉积物微生物生态系统中的作用机制, 为水体沉积物生态修复提供了重要的理论参考和科学依据。

关键词: 过氧化钙; 沉积物; 微生物群落; 功能演替; 生态效应

资助项目: 国家重点研发计划(2022YFF1301203); 广州市重点研发计划(2025B03J0004)

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFF1301203) and the Guangzhou Key Research and Development Program (2025B03J0004).

*Corresponding authors. E-mail: YANG Xunan, yangxn@gdim.cn; ZHANG Duoying, duo0314@163.com

Received: 2025-02-18; Accepted: 2025-03-27; Published online: 2025-04-27

Advances in microbial response mechanisms during calcium peroxide remediation of aquatic sediments

CHEN Yanjiao^{1,2}, YANG Xunan^{2*}, ZHANG Duoying^{1*}, XU Meiyong²

1 School of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang, China

2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, State Key Laboratory of Applied Microbiology Southern China, Institute of Microbiology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong, China

Abstract: Microbial communities in aquatic sediments are highly sensitive to environmental changes and serve as key indicators for assessing ecosystem health. As an emerging ecological remediation material, calcium peroxide (CaO₂) has showcased increasing application in the treatment of aquatic sediments, and its impact on microbial communities has become a frontier topic in ecological research. This review focuses on the influencing mechanisms of CaO₂ on microbial communities in aquatic sediments from the perspective of microbial ecology. CaO₂ exerts multidimensional effects on the structures and functions of microbial communities by significantly altering the redox environment of the sediments. Regarding the community diversity, CaO₂ substantially enhances the alpha-diversity and species richness of microbial communities. In terms of the community composition, CaO₂ promotes the proliferation of functional genera such as *Nitrosomonas* and *Thiobacillus*, which possess ammonia-oxidizing and sulfur-oxidizing capabilities, respectively, while suppressing the growth of anaerobic fermenters (e. g., *Clostridium*) and sulfate reducers (e. g., *Desulfovibrio*). This function-oriented control mechanism indicates that CaO₂ selectively enriches microbial groups that facilitate nitrogen and sulfur cycling, while inhibiting the proliferation of anaerobic taxa that produce harmful metabolites, thereby optimizing the functions and structures of microbial communities in the sediments. This review further elucidates the ecological effects of CaO₂ on microbial communities, revealing its mechanistic role as an ecological remediation material in regulating microbial ecosystems within aquatic sediments. These findings provide significant theoretical references and scientific foundations for ecological restoration of waterbody sediments.

Keywords: calcium peroxide; sediment; microbial community; functional succession; ecological effect

城市水体在城市生态和社会经济中发挥着重要作用, 具有净化空气、防洪排涝、供水灌溉、美化环境等多种生态功能^[1]。随着工业化和城市化进程的加速推进, 大量有机污染物的流入导致水体富营养化和黑臭沉积物的形成, 损害了水体的生态功能。近年来, 得益于我国水环境治理行动的深入推进, 水体污染已得到显

著遏制, 但在水质得到明显改善的同时, 沉积物中蓄积性内源污染物向上覆水的扩散逐渐成为新的问题, 给水体带来了污染反复的风险^[1]。为确保水生态功能的长期稳定, 沉积物将成为水环境治理工作的重点。

过氧化钙(calcium peroxide, CP)是一种新型生态修复材料, 因其安全、绿色、经济被广泛

应用于黑臭沉积物的原位修复^[2-4]。相比传统修复剂, CaO_2 可以缓慢、持续地释放氧气, 提高沉积物的氧化还原电位, 促进硫化铁(FeS)、硫化氢(H_2S)等致使黑臭沉积物形成的硫化物被氧化为硫酸盐^[2,4-5], 并释放 Ca^{2+} 与磷酸盐离子反应形成稳定的钙磷矿物质, 从而减少沉积物中的磷释放到上覆水中, 缓解了沉积物内源污染问题^[6]。在 CaO_2 发挥其化学氧化和钙沉淀作用的同时, 也会对生物产生作用, 特别是影响沉积物物质循环的微生物。 CaO_2 可以通过诱导沉积物中功能菌的增加, 促进氮、硫和磷等物质的循环, 进一步加快沉积物的生态恢复过程, 而实际上, CaO_2 的修复效果也往往体现在对微生物的调控及特征微生物驱动下的物质循环上。因此, 系统总结 CaO_2 修复水体沉积物过程中的微生物群落结构变化及功能响应, 可为提高 CaO_2 对水体沉积物的生物修复能力提供有价值的参考。

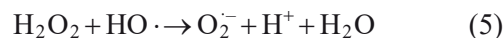
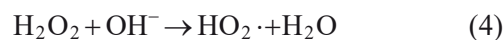
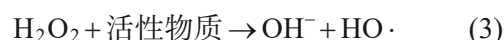
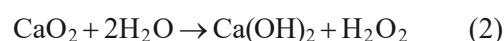
近几十年来, CaO_2 在沉积物修复领域已从实验研究阶段发展到实际应用阶段^[7]。尽管前人已经对 CaO_2 的性质及应用进行了总结, 但大多聚焦于废水处理、活性污泥处理以及污染土壤修复领域上, 而关于 CaO_2 对水体沉积物修复的生态效应及对微生物群落结构的影响机制尚缺乏系统性的综述^[5,8-9]。本文概述了 CaO_2 修复水体沉积物的原理, 并从微生物生态学的角度总结了在修复过程中微生物群落演替及功能响应的研究进展, 包括 CaO_2 对微生物的氧化驱动作用、群落结构变化、功能响应及优化策略等, 旨在深入理解 CaO_2 在水体沉积物修复中的应用潜力及生态效应, 为水体沉积物的生态修复提供科学依据, 并为制定更加高效、合理的沉积物修复策略提供理论支持和指导。

1 过氧化钙修复沉积物的原理

1.1 过氧化钙简介

CaO_2 是一种白色或淡黄色结晶状粉末, 无

臭无味, 属于碱土金属过氧化物, 具有高能过氧化物共价键和良好的热稳定性, 与含水介质接触时能够缓慢释放氧气, 生成氢氧化钙和过氧化氢(H_2O_2), 如方程式(1)–(2)所示。 H_2O_2 具有引发高级氧化过程的能力, 可产生多种自由基, 包括羟基自由基($\text{HO}\cdot$)、超氧化氢自由基($\text{HO}_2\cdot$)和超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$)等, 如方程式(3)–(5)所示, 其中 $\text{HO}\cdot$ 具有极强的氧化能力^[10-13]。



基于以上特性, CaO_2 被广泛应用于农渔业中的供氧、调节 pH 和除臭等领域^[14-15]。因其具有较高的热稳定性, 且不易受大气水分和二氧化碳的影响, 还可用于冶金、聚合物化学和无机合成^[16]。随着环境技术的发展, CaO_2 也逐渐应用到土壤治理、废水处理、活性污泥预处理以及沉积物修复等领域, 以实现环境修复中污染物的化学氧化和生物降解^[17-21]。在沉积物修复中, 最普遍的应用方法是将 CaO_2 通过混合、覆盖或者注射的方法施加到受污染沉积物中进行修复^[7,22-26]。为提高 CaO_2 的比表面积和反应活性, 也可以通过物理或化学方法将其制备成纳米级颗粒, 提供更多与污染物反应的活性位点, 从而提高反应速率和效率; 此外, 基于 CaO_2 的固态形式和高稳定性, 还可以采用多种材料对其进行表面修饰, 如聚乙二醇、葡聚糖、海藻酸钠等, 增强纳米 CaO_2 的稳定性和适用性^[27-29]。将 CaO_2 纳米化技术与生物降解策略结合也是当前的研究热点之一, 即通过引入特定的微生物菌群协同 CaO_2 修复沉积物, 以适应更加复杂的环境条件^[30-31]。 CaO_2 修复沉积物的原理如图 1 所示。

1.2 锁磷机制

厌氧环境会促使沉积物中的内源磷持续释

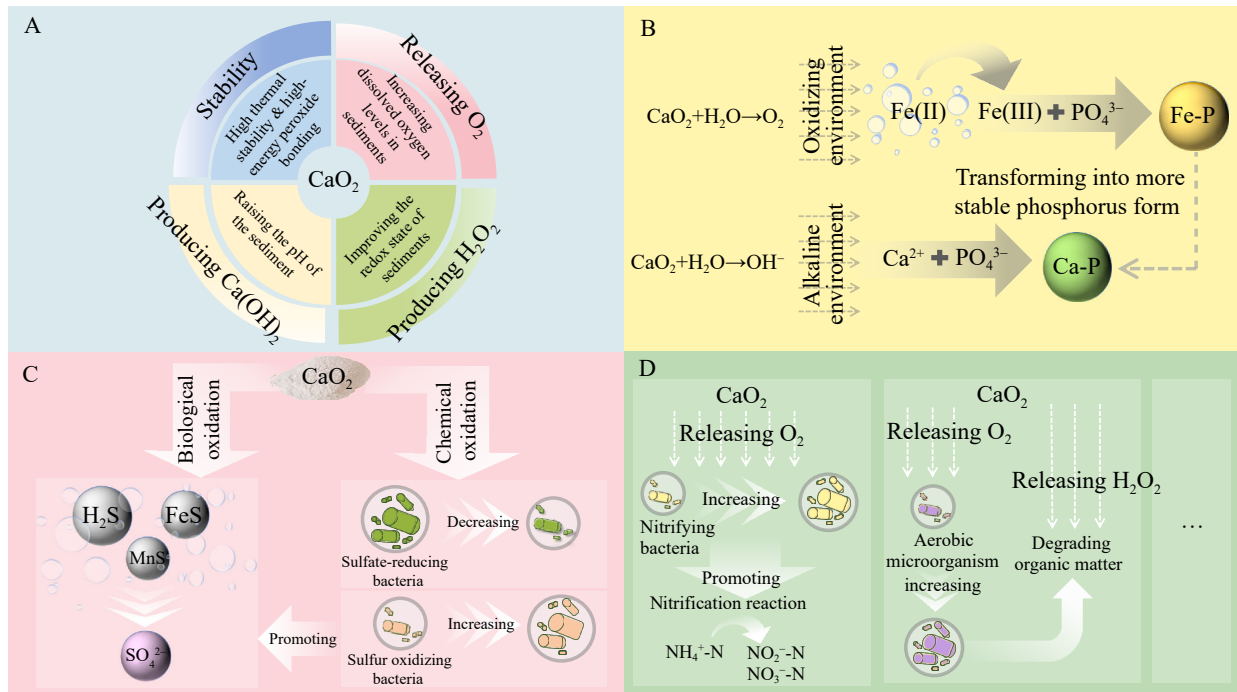


图1 过氧化钙修复沉积物的原理。A: CaO_2 的特性; B: 锁磷机制; C: 硫氧化作用; D: 其他效应。

Figure 1 Schematic diagram of calcium peroxide remediation of sediment. A: Characteristics of CaO_2 ; B: Phosphorus locking mechanism; C: Sulfur oxidation; D: Other effects.

放到上覆水中^[11], 进一步加剧水体富营养化问题。 CaO_2 由于其释氧性, 具备显著提高沉积物溶解氧水平的能力, 改善沉积物的氧化还原环境并提高沉积物的 pH。氧气的升高可以减缓厌氧条件下的内源磷释放^[6], 氧化性的增强使得沉积物中的 Fe(II) 转化为 Fe(III) 羟基氧化物, 后者对游离的磷酸盐离子具有较强的吸附能力, 增加了难溶性铁磷的含量^[5,22]。此外, CaO_2 分解产生的 Ca^{2+} 在碱性条件下更易与磷酸盐离子结合生成磷酸钙沉淀, 并最终形成稳定的羟基磷灰石^[6,22,32]。同时, Ca^{2+} 浓度的提高会促使其他磷形态(如铁磷、有机磷等)转变为钙磷, 从而使原本易于释放到水体中的磷转化为更稳定的形态, 有效实现磷在表层沉积物的固定化^[6]。

1.3 硫氧化作用

硫元素是致使黑臭沉积物产生的关键因素之一^[33]。在厌氧状态下, 硫酸盐还原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)能将硫酸盐还原为具有臭

味的 H_2S 气体^[34], 同时促进沉积物中的铁和锰等(氢)氧化物转变为低价的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等金属离子, 然后与 S^{2-} 结合生成黑色金属硫化物, 导致沉积物变黑变臭^[35-36]。 CaO_2 在修复沉积物过程中的硫氧化机理主要涉及化学氧化和生物氧化的协同作用, 其中化学氧化占据主导地位, 提供了主要驱动力, 而生物氧化则维持了长期的修复效果。在修复初期, CaO_2 凭借其强氧化性直接与沉积物中的硫化物发生化学氧化反应, 将其转化为硫酸盐^[2,37]。随着 CaO_2 的持续释放, 其营造的好氧环境一方面抑制了 SRB 的代谢活性, 阻碍沉积物中的硫酸盐转化为硫化物; 另一方面显著促进了硫氧化菌等微生物的增殖, 进一步加速了硫化物的生物氧化过程^[2,26,37-38]。

1.4 其他效应

CaO_2 的添加还可以显著降低上覆水中氨氮等污染物的浓度, 提高水质质量^[37,39]。沉积物向上覆水中释放的氮元素主要以氨氮形式存在^[39],

CaO₂ 溶解产生的强氧化性物质(氧气、H₂O₂ 和 HO·等)促进了氨氮的氧化转化^[40]。同时, CaO₂ 通过改善沉积物的厌氧状态, 促进了硝化菌等好氧微生物的生长, 加强了硝化反应的进行, 有效抑制了内源氨氮从间隙水向上覆水体的扩散^[39]。

CaO₂ 与水反应产生的 HO·具有很高的氧化电位, 可以有效地氧化沉积物中的有机物, 加速其降解^[41]。然而, HO·会随时间逐渐减少, 而氧化还原电位的增长可以维持更长的时间, 因此生物氧化逐渐取代化学氧化占据主导地位, 好氧微生物的丰度和多样性增加, 进一步降解沉积物中的有机物^[5,41]。

CaO₂ 还可通过氧化、吸附和共沉淀等多重机制对沉积物中的重金属产生作用。CaO₂ 提供的氧化环境促进了铁(II)、锰(II)向铁、锰羟基氧化物的转化^[42], 形成的铁锰氧化物胶体可吸附固定钨等重金属, 降低其生物毒性和迁移性^[43-45], 显著改善沉积物的生态环境。

2 过氧化钙驱动的微生物群落演替

微生物群落是河湖沉积物生态系统中的重要组成部分, 其群落演替对沉积物的环境和生态系统的稳定性具有决定性影响。通过研究微生物群落可以深入了解其在沉积物修复过程中的作用机制, 从而制定更有效的修复策略。

2.1 过氧化钙对微生物群落丰度和多样性的影响

在微生物群落分析中, 通常用 ACE、Chao1、Shannon、Simpson 等多样性指数来对其进行评价。ACE 和 Chao1 指数可用于评价微生物群落的丰度^[46], 而 Shannon 和 Simpson 指数可用于表征微生物群落的多样性^[47]。ACE、Chao1 指数与微生物丰度呈正相关, Shannon 指数越高或 Simpson 指数越低, 则代表微生物多样性越高。

研究表明, CaO₂ 对沉积物微生物群落丰度

和多样性具有显著的调控作用。Chen 等^[22]发现在湖泊沉积物中添加 CaO₂ 后, Chao1 和 ACE 指数升高(1 490.62–1 524.97; 1 487.68–1 503.83), 修复后沉积物微生物的丰度增加。这种现象也表现在较长期的修复过程中, 李雨平等^[38]发现沉积物修复 61 d 后, Shannon 指数从 4.65 提升至 4.81, Simpson 指数由 0.03 降至 0.02, 说明 CaO₂ 处理显著增加了微生物的多样性。除此之外, 还有更多研究也证实了 CaO₂ 可以通过改变沉积物的微环境促进微生物数量的增长和新功能微生物的衍生^[2,26]。

进一步研究发现, CaO₂ 的投加剂量和方式对微生物群落具有不同的调控效果。Shao 等^[7]将 CaO₂ 注射到河流沉积物的不同深度, 发现浅层注射的微生物丰度高于深层, 但微生物多样性低于深层; Zhou 等^[25]用改性 CaO₂ 陶粒通过不同投加比修复河流沉积物, 观察到投加剂量为 1:1 时 ACE、Chao1 和 Shannon 指数均升高(2 630–2 750; 2 600–2 730; 6.23–6.32), Simpson 指数降低(0.008 3–0.005 9), 微生物丰度和多样性增加, 但随着投加比从 1:1 增加到 1:4, 沉积物中微生物的操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU)、Shannon、ACE 和 Chao1 指数值逐渐降低, 表明适当剂量的 CaO₂ 可以促进沉积物中微生物的生长, 但剂量过高会抑制沉积物中微生物丰度和多样性。

因此, 适量的 CaO₂ 修复沉积物可以提高沉积物中微生物群落的丰度和多样性。更高的微生物群落多样性意味着微生物的代谢能力更强, 物质能量循环更完整, 有利于沉积物生态系统的稳定性^[48]。同时, 微生物群落的丰度和多样性也受加药位置、加药剂量等多种其他因素的影响, 具体的影响效果及其机制仍有待未来深入探究。

2.2 过氧化钙对微生物群落结构和组成的影响

微生物群落作为沉积物生态系统的核心功

能载体, 研究其结构变化能够更深入地揭示 CaO_2 的环境行为及其生态效应。研究表明, CaO_2 处理会改变沉积物中的微生物群落结构^[2,23,25], 其主要通过提高好氧微生物的增殖, 抑制厌氧微生物的生长, 衍生新的功能菌, 并通过积极影响与氮、硫循环紧密相关的微生物菌群, 引导其向更有利于沉积物生态恢复的方向发展。

从门分类的角度看, 变形菌门 (*Pseudomonadota*)、拟杆菌门 (*Bacteroidota*)、硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae*) 等微生物的丰度增加, 这些门中大多是好氧菌, CaO_2 改善了沉积物的厌氧状况, 因此为其提供了适宜的增殖环境。其中, 变形菌门 (*Pseudomonadota*) 和拟杆菌门 (*Bacteroidota*) 能有效降解沉积物中的有机质^[7,26]; 硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae*) 可以促进沉积物中的硝化过程, 将氨氮氧化为硝酸盐, 为反硝化细菌提供底物^[25-26]; 嗜热脱硫藻 (*Thermodesulfobacter*) 可以抑制恶臭气体 (H_2S) 和黑色金属硫化物 (MnS 、 FeS) 的形成, 改善沉积物的黑臭现象^[26]。厌氧菌如厚壁菌门 (*Bacillota*)、绿屈挠菌门 (*Chloroflexi*)、螺旋体门 (*Spirochaetota*) 的丰度减少, 厚壁菌门 (*Bacillota*) 的丰度与沉积物中活性磷含量呈正相关, 其减少有助于降低沉积物中的磷释放^[26]。螺旋体门 (*Spirochaetota*) 与产甲烷菌共同作用实现沉积物中有机质的发酵, 易造成沉积物再悬浮和臭味的形成^[26]。绿屈挠菌门 (*Chloroflexi*) 通常作为水体富营养化的指标, 可加速沉积物中有机质的厌氧消化^[25-26]。放线菌门 (*Actinomycetota*) 是淡水中常见的细菌类群, 其丰度与沉积物中污染物含量呈正相关^[26]。

然而, 门水平分类难以反映微生物的功能响应规律, 因此本文进一步在科与属水平上深入探究, 以揭示不同分类单元的微生物功能响应差异 (图 2)。由图 2 可见, 醋杆菌科 (*Acetobacteraceae*) (固氮)、*Dethiobacteraceae* (乙酸代谢) 和硝化杆菌科 (*Nitrobacteraceae*) (氨氧化) 等好氧菌群被多次报道在 CaO_2 处理的沉积物中丰度增

加^[49-51], 这与 CaO_2 营造的好氧环境密切相关。相反, 热境丝菌科 (*Caldiseriaceae*) (硫代硫酸盐还原)、脱硫杆菌科 (*Desulfobacteriaceae*) (硫酸盐还原) 和厌氧绳菌科 (*Anaerolineaceae*) (烷烃降解产甲烷) 等厌氧功能菌群受到明显抑制^[52-54], 减少了硫化物的形成和有害代谢产物的积累, 修复了沉积物的整体环境并维护了整个水生生态系统的稳定性。

从属分类水平看, 添加 CaO_2 后沉积物中涉及硝化/反硝化、硫氧化和有机物降解等功能的微生物丰度发生改变, 主要促进了氮、硫、磷的去除和降解有机污染物等功能。

(1) 氮循环功能响应。好氧反硝化菌如褐指藻杆菌属 (*Phaeodactylibacter*) 的增加能够在有氧条件下对沉积物进行生物脱氮^[26]。硝化菌 [如 *Nitrosomonas*、*Nitrospirae*、硝化杆菌属 (*Nitrobacter*) 等] 与反硝化菌 [如热单胞菌属 (*Thermomonas*)、脱氯单胞菌属 (*Dechloromonas*)、褐指藻杆菌属 (*Phaeodactylibacter*) 等] 之间能形成硝化-反硝化交替反应, 其丰度的提高推动了沉积物的脱氮过程^[26,38,55-57]。

(2) 磷循环功能响应。脱氯单胞菌属 (*Dechloromonas*)、变形菌属 (*Proteus*) 和 *Saccharimonadales* 等微生物的丰度增加。脱氯单胞菌属 (*Dechloromonas*) 可以通过反硝化除磷耦合途径实现脱氮除磷的双效去除^[38,58-59]。变形菌属 (*Proteus*) 是常见的具有脱氮除磷功能的菌属, 且具有很好的降解有机物的能力^[2,37]。*Saccharimonadales* 能够对有机磷进行水解, 释放的 PO_4^{3-} 在 Ca^{2+} 富集环境下形成羟基磷灰石沉淀, 实现沉积物中磷的固定^[26]。

(3) 硫循环功能响应。脱硫微菌属 (*Desulfomicrobium*) 和硫杆菌属 (*Thiobacillus*) 等硫化物功能菌数量增加, 它们能够氧化硫化物, 不仅改善了沉积物的黑臭现象, 还能与前述硝化/反硝化体系进一步结合, 实现硫-氮的耦合去除^[2,38]。热境丝菌属 (*Caldisericum*)、脱硫杆菌属 (*Desulfobacterium*) 和岩石单胞菌属 (*Petrimonas*)

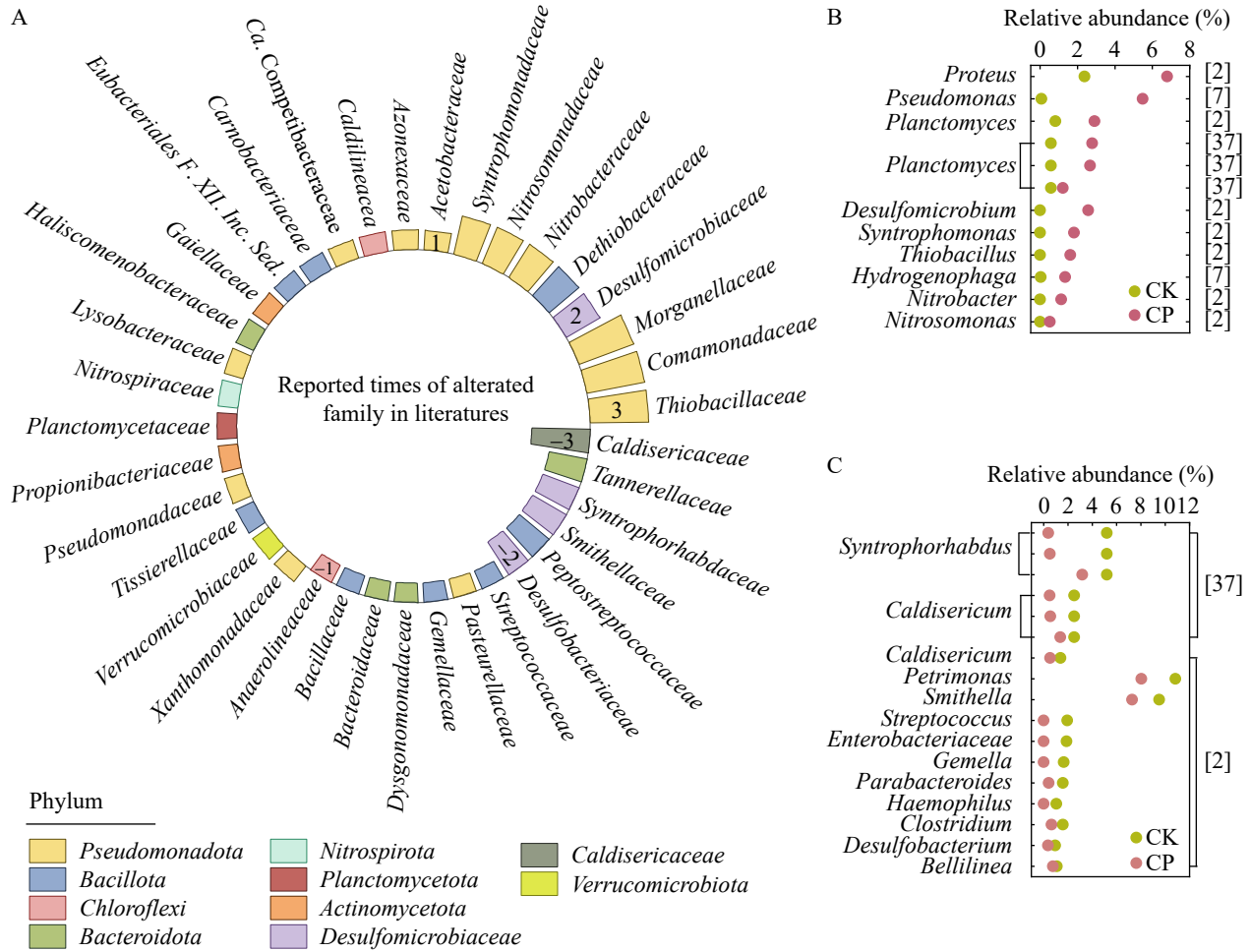


图2 过氧化钙修复后沉积物中微生物群落的变化。A: 文献中关于科水平微生物丰度增减提及的次数; B: 属水平丰度增加的微生物; C: 属水平丰度降低的微生物。

Figure 2 Microbial community changes in sediments following calcium peroxide remediation. A: The number of times mentioned in the literature about the increase and decrease of microbial abundance at the family level; B: Microorganisms with increased horizontal abundance at the genus level; C: Microorganisms with reduced horizontal abundance at the genus level.

等硫还原菌的代谢活性被显著抑制,从而有效减少了沉积物中硫化物的生成与积累^[2,37]。

(4) 碳循环功能响应。共养单胞菌属(*Syntrophomonas*)、盖亚女神菌属(*Gaiella*)、海岸线菌属(*Litorilinea*)、食氢产水菌属(*Hydrogenophaga*)、浮霉状菌属(*Planctomyces*)和疣微菌属(*Verrucomicrobium*)等菌属增加。共养单胞菌属(*Syntrophomonas*)能将有机酸降解为 CO_2 和 H_2O ^[37]。盖亚女神菌属(*Gaiella*)、海岸线菌

属(*Litorilinea*)、食氢产水菌属(*Hydrogenophaga*)、浮霉状菌属(*Planctomyces*)和疣微菌属(*Verrucomicrobium*)等菌属均为需氧微生物,能够降解多种有机污染物^[37,60-64]。丽线菌属(*Bellilinea*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、*Clostridium_sensu_stricto_1*、*norank_f_Anaerolineaceae*、龙包茨氏菌属(*Romboutsia*)和互养棍状菌属(*Syntrophorhabdus*)等菌属丰度降低。丽线菌属(*Bellilinea*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)和*Clostridium_*

*sensu stricto*_1 等厌氧菌能够在厌氧条件下降解烷烃生成乙酸、丁酸及 CH_4 、 CO_2 等温室气体^[37]。*Norank_f_Anaerolineaceae* 能厌氧分解含氮有机物, 增加水体中氨氮的浓度^[38], 龙包茨氏菌属 (*Romboutsia*) 和互养棍状菌属 (*Syntrophorhabdus*) 是厌氧产酸的主要菌属, 会导致水体酸化的加重^[38]。这些菌属丰度的改变有效抑制了挥发性脂肪酸的积累, 缓解了沉积物酸化风险, 同时减少了厌氧降解产生的有害代谢产物, 阻断了有机污染物厌氧降解产甲烷途径, 显著降低了温室气体排放, 实现了水体的生态净化。

然而, 也有少数研究发现微生物结构无显著变化^[65], 这有可能与 CaO_2 的投加剂量、投加方式、沉积物性质差异等多种因素有关。

2.3 环境因素与微生物群落的相互作用

微生物常被用作预测环境潜在变化的指标^[66], 同时, 环境也是塑造微生物群落结构的关键因素^[7]。Yang 等研究发现, 不同功能菌群对氧化还原电位变化的响应存在显著差异^[67], 进一步证实了微生物与环境之间的双向反馈机制。研究沉积物中环境因素与微生物群落的相互作用可深入揭示微生物的功能响应规律。

CaO_2 营造的高溶解氧水平给好氧菌提供了良好的生长条件, 同时抑制了厌氧菌的增殖, 而 CaO_2 分解产生的 H_2O_2 通过提升沉积物氧化还原电位, 选择性抑制了对此应激敏感的微生物如蓝细菌门 (*Cyanobacteria*) 和放线菌门 (*Actinomycetota*) 的生长^[68]。另外 Hung 等^[60] 探究 CaO_2 (CP)、水葫芦生物炭 (water hyacinth biochar, WHBC) 及其联用 (WHBC/CP) 对河流沉积物微生物群落的影响, 发现 WHBC 处理的多样性指数要高于 CP 处理和 WHBC/CP 处理, 说明 CaO_2 在修复过程中释放的碱性物质提高了沉积物的 pH, 一定程度上对沉积物中部分微生物的增殖起到了抑制作用^[69]。上述 CaO_2 引发的环境变化显著调控了微生物多样性, 而微生物群落的响应又会进一步反作用于沉积物环

境。如沉积物的厌氧环境改善后, 变形菌 (*Proteobacteria*) 的丰度增加, 它可以促进沉积物中有机质和氮元素的去除, 与氨氮、化学需氧量呈负相关^[7,68]。氨氧化菌的基因组中含有与磷降解相关的代谢基因, 因此沉积物中总磷含量是氨氧化菌丰度变化的重要影响因素^[65,70]。硝态氮的去除率与解蛋白质菌属 (*Proteiniclasticum*) 有很大的关联, 说明该微生物在反硝化过程中起着重要作用^[71]。因此, 环境与微生物相互作用的动态反馈共同促进了沉积物环境质量的提高及水生生态系统的功能恢复。

3 微生物对过氧化钙的功能响应机制

过氧化钙显著影响了沉积物中微生物群落结构的变化, 这一变化不仅体现在微生物丰度的增减上, 还深刻地影响了微生物的代谢功能活性 (图 3)。微生物作为生态系统中物质循环的主要驱动者, 其丰度和活性的变化直接关联到硫、氮循环等关键生态过程的动态平衡。因此, 深入探究微生物对过氧化钙的功能响应机制, 对于理解过氧化钙对生态系统的影响具有重要意义。

3.1 过氧化钙的强氧化性对微生物活性的抑制作用

CaO_2 修复沉积物过程中释放的 H_2O_2 和自由基等具有强氧化性的物质, 超过一定水平会对部分微生物造成损害^[72]。以往研究表明, H_2O_2 会对蓝细菌门 (*Cyanobacteria*) 和放线杆菌门 (*Actinomycetota*) 的细胞结构造成严重破坏^[73-74]。蓝细菌门 (*Cyanobacteria*) 与水华和富营养化有关, 其减少有助于水体生态系统的恢复^[73]。另一方面, CaO_2 对与光合作用有关的功能基因具有显著抑制作用。Ma 等^[68] 的研究指出, CaO_2 破坏了微生物的光合作用机制, 导致化学异养逐渐占主导地位, 这一转变增加了有机质的生物可利用性。值得注意的是, CaO_2 化学反应产

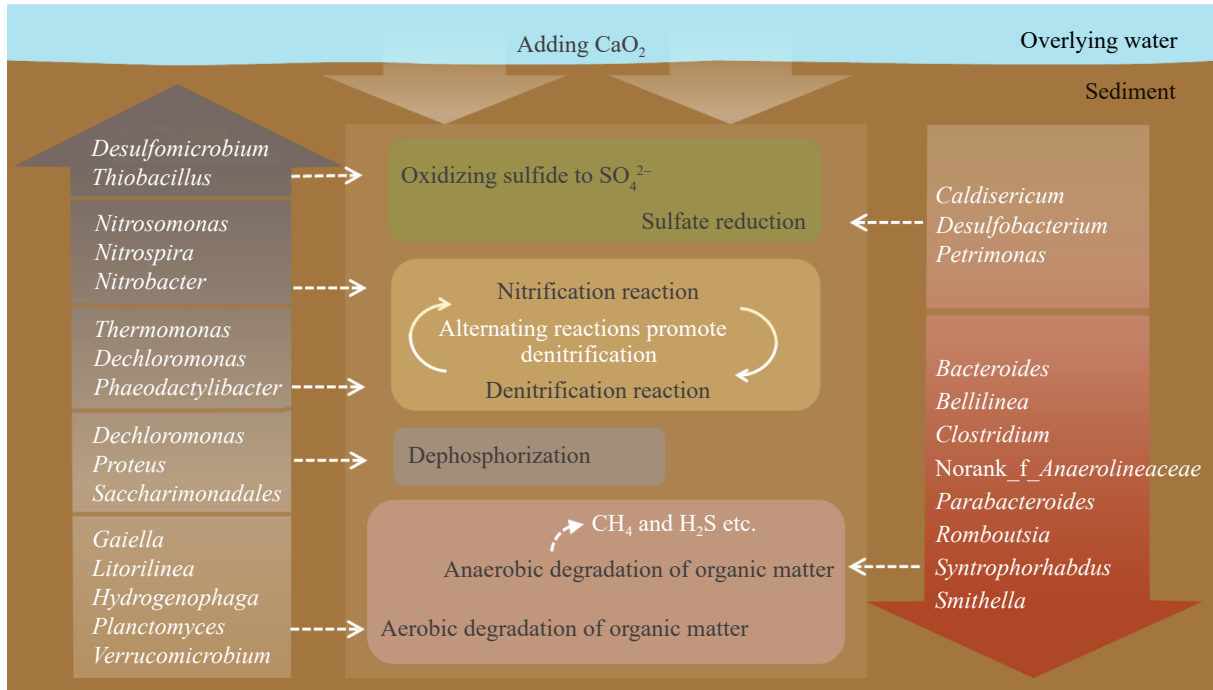


图3 微生物对过氧化钙的响应机理

Figure 3 Mechanism diagram of microbial response to calcium peroxide.

生的强氧化性往往是短暂的，且主要发生在水层或沉积物表面^[2]，因此，其对微生物的活性抑制也主要发生在沉积物表层环境，这一空间分布特征与光合微生物所在的位置高度重叠。反硝化、亚硝酸盐呼吸等与氮利用相关的功能基因却出现增加的趋势^[68]，这可能是由于这些功能菌群主要分布在沉积物深层，该区域不仅受 CaO_2 氧化作用影响较小，而且因表层有机物矿化增强而获得更多可利用的底物，因此氮循环功能性微生物群落并未受 CaO_2 强氧化性的影响。另有研究表明，由于革兰氏阳性菌的细胞膜中存在较厚的肽聚糖层，在面对强氧化性时往往比革兰氏阴性菌表现出较小的损害^[75]。这些发现说明 CaO_2 的强氧化性对其接触的微生物活性产生抑制是应用其修复沉积物时需要考虑的重要因素。

3.2 过氧化钙氧化势驱动下的微生物好氧氧化作用

CaO_2 因其释氧性可显著提高沉积物的氧化

势能，进而驱动一系列微生物的好氧化作用。在沉积物的厌氧环境得到改善后，变形菌门 (*Pseudomonadota*)、拟杆菌门 (*Bacteroidota*)、硝化螺旋菌门 (*Nitrospirae*) 等好氧微生物的相对丰度增加^[23,25,56]。这些好氧微生物能够利用 CaO_2 释放的氧气进行好氧呼吸，从而修复沉积物。同时，厚壁菌门 (*Bacillota*)、绿屈挠菌门 (*Chloroflexi*) 和螺旋体门 (*Spirochaetota*) 等厌氧菌的相对丰度降低^[23,26,60]，减少了沉积物中氮的释放和温室气体的排放。

CaO_2 驱动的氧化反应过程主要包括氨氧化、硫氧化和铁氧化等。亚硝化细菌如亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 能够在 CaO_2 提供的有氧环境中将氨氧化为亚硝酸盐，进而被 *Nitrospira*、*Nitrobacter* 等硝化菌氧化为硝酸盐^[2,26]。硝酸盐是微生物进行厌氧呼吸首选的电子受体^[49]，其氧化还原电位高于硫酸根，避免了微生物氧化硫酸根为 S^{2-} ，从而加剧沉积物黑臭化^[76]。黑臭沉积物中富含大量的硫化物，有利于脱硫微菌

属(*Desulfomicrobium*)、硫杆菌属(*Thiobacillus*)等硫氧化微生物将还原态硫化物氧化为硫酸盐,降低沉积物中的硫化物含量^[2]。此外,铁氧化微生物也会在 CaO_2 的作用下将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ,降低沉积物中的还原性物质含量,减轻黑臭现象^[25]。

3.3 过氧化钙氧化势驱动下的微生物厌氧氧化作用

CaO_2 的氧化效应不仅体现在直接促进好氧微生物的活性上,其产生的氧化产物(如硝酸盐、硫酸盐等)在沉积物中的扩散和迁移还为深层厌氧微生物的代谢提供了重要的电子受体,使得沉积物表层以好氧氧化为主导,而随着深度的增加逐步过渡到以反硝化、硫酸盐还原等厌氧过程为主的代谢模式。

CaO_2 通过促进微生物的反硝化过程增强了沉积物氮循环过程。 CaO_2 的强氧化性可以将大分子有机物分解成小分子,但不会干扰沉积物中微生物群落的反硝化功能^[68],这些小分子有机物可以作为反硝化菌的电子供体从一定程度上促进反硝化过程。硫自养反硝化菌能够以硫化物为电子供体、硝酸盐或亚硝酸盐为电子受体,在还原硝酸盐的过程中氧化硫化物并降解有机污染物^[1],从而实现沉积物中氮、硫和有机物的同步去除,恢复沉积物的生态功能。

CaO_2 通过调控 SRB 和硫氧化菌的活性维持了硫循环的动态平衡。SRB 是严格厌氧或兼性厌氧的微生物,以 SRB 为主导的异化硫酸盐还原是沉积物中有机质降解的主要厌氧矿化途径^[77],并同时向生态系统中释放 H_2S ^[78]。 CaO_2 的添加会增加沉积物中的溶解氧含量,从而抑制 SRB 如脱硫杆菌属(*Desulfobacterium*)的活性,促进硫氧化菌的增殖,但 CaO_2 释放的溶解氧会随时间逐渐减少,氧化还原电位的增长却能持续更长时间^[56],硫氧化菌的生长会产生更多的硫酸盐,可能会在一定程度上促进 SRB 对硫酸盐的还原作用,形成动态的硫循环,为硫氧化

菌提供持续的硫酸盐来源^[79]。

4 未来研究方向与优化策略

4.1 现有技术局限

尽管 CaO_2 在水体沉积物修复中展现出显著效果,但在实际应用过程中仍面临着挑战。首先, CaO_2 与水快速反应产生的短期氧化冲击可能抑制部分微生物的活性,特别是对蓝细菌门(*Cyanobacteria*)和放线菌门(*Actinomycetota*)等敏感菌群造成损害^[73-74]。因此,在制定修复目标时需充分考虑这一机制。其次, CaO_2 的释氧动力学与微生物代谢活动存在时空失配,过快的释氧速率导致氧气利用效率低下,难以维持长期的修复效果^[5,25]。因此,在制定修复方案时不仅要利用其化学氧化性,还需充分利用厌氧氧化作用。

4.2 工程优化方向

针对上述技术局限,目前的优化研究主要集中在材料改性、生物强化和监测评估 3 个方面,这些创新策略为提升 CaO_2 修复效果提供了新的思路。(1) 材料改性优化:为解决 CaO_2 快速释氧的问题,研究者开发了多种控释材料策略,例如采用葡聚糖包覆可显著延缓 CaO_2 的水解速率^[29],海藻酸钠复合材料能实现脉冲式释氧,更好地匹配微生物的代谢规律^[80]。此外,纳米级 CaO_2 的表面修饰也为提高其生物相容性提供了新思路^[81-82]。(2) 生物强化策略:将功能菌株与 CaO_2 联合使用是提升修复效果的重要途径,例如固定化硫氧化菌可持续降解硫化物^[37-38],磷积累菌的添加能够促进磷的生物固定等^[26]。(3) 监测评估体系:构建基于组学技术的微生物功能评价体系十分必要。宏基因组测序可揭示群落结构变化^[22],代谢组学分析能够表征关键代谢通路的响应^[83],这些方法的整合将为修复效果评估提供多维度依据。

4.3 微生物调控新维度

随着分子生物学技术的发展和生态学认知

的深入, 微生物调控研究正从群落水平向分子机制、种间互作及功能评价等多个维度拓展, 这些新的研究方向将为 CaO_2 修复技术的优化提供更高层次的理论支撑。(1) 分子机制解析: 深入研究 CaO_2 处理下微生物对有机碳分子结构的影响, 例如利用傅里叶变换红外光谱分析技术结合有机碳与峰面积之间的函数关系对沉积物中的有机碳库进行评估^[84], 明确 CaO_2 对碳循环的分子级联效应。(2) 群落重构研究: 基于生态网络分析, 可以揭示不同氧化梯度下微生物种间互作关系的动态变化, 例如 CaO_2 处理对关键物种间协同/拮抗关系的重塑, 会直接影响到生态系统的稳定性。(3) 功能恢复评价: 建立微生物群落特征与生态功能恢复的定量关联模型, 例如 Shannon 多样性指数与污染物去除率之间的相关性, 这类模型可为修复终点的判定提供科学依据。

5 总结与展望

本文阐述了利用 CaO_2 修复水体沉积物的机理, 并从微生物生态学的视角综合了在修复过程中微生物群落的动态变化及其功能响应的研究进展。具体内容包括 CaO_2 对微生物的氧化促进作用、群落构成的演变与功能响应, CaO_2 的应用风险及优化策略等, 得出以下主要结论: (1) CaO_2 通过提高化学氧化及钙沉淀等作用, 促进沉积物中的硫氧化和磷固定等过程, 实现沉积物的修复; (2) CaO_2 处理提高了沉积物中微生物的丰度和多样性, 促进了好氧微生物的增殖, 抑制了厌氧微生物的生长并衍生了新功能性微生物, 改变了沉积物中的微生物群落结构; (3) CaO_2 的强氧化性在显著修复沉积物的同时也有可能损伤微生物的活性, 但对反硝化等有自身机制的功能性微生物作用基本无影响; (4) CaO_2 的氧化势能驱动了氨氧化、硫氧化和铁氧化等好氧化过程, 有效改善了沉积物环境质量。同时, CaO_2 的氧化性为深层沉积物中的微生物提供了电子受体, 促进了厌氧氧化作用

如反硝化过程, 且影响了 SRB 与硫氧化菌的动态平衡, 实现了氮、硫和有机物的同步去除, 促进了沉积物生态功能的恢复。未来研究应聚焦 CaO_2 修复技术的长效性与生态安全性, 通过材料改性及生物强化协同策略突破释氧过快的瓶颈。结合多组学技术和生态网络分析, 建立污染物去除-碳氮循环-群落特征的多维度评价体系, 实现沉积物修复的精准调控与生态风险管控。

作者贡献声明

陈艳姣: 文献检索、图表绘制、初稿撰写及修改; 杨旭楠: 框架设计、图表绘制、内容修订及补充; 张多英: 学术监督与指导; 许玫英: 主题选择、提供专业领域见解。

作者利益冲突公开声明

作者声明不存在任何可能会影响本文所报告工作的已知经济利益或个人关系。

参考文献

- [1] 陈文龙, 罗欢, 吴琼, 杨旭楠, 李宁. 基于“先泥后水”模式的重污染河道底泥碳氮硫同步去除技术研究[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 16-23, 42.
CHEN WL, LUO H, WU Q, YANG XN, LI N. A synchronous removal technology of carbon, nitrogen and sulfur pollutants from sediment in heavily polluted rivers based on “treating sediment before water” model[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(3): 16-23, 42 (in Chinese).
- [2] WANG WH, WANG Y, FAN P, CHEN LF, CHAI BH, ZHAO JC, SUN LQ. Effect of calcium peroxide on the water quality and bacterium community of sediment in black-odor water[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 248: 18-27.
- [3] DE JONGE M, TEUCHIES J, MEIRE P, BLUST R, BERVOETS L. The impact of increased oxygen conditions on metal-contaminated sediments part I: effects on redox status, sediment geochemistry and metal bioavailability[J]. *Water Research*, 2012, 46(7): 2205-2214.
- [4] XU Y, HAN FE, LI DP, ZHOU J, HUANG Y. Transformation of internal sedimentary phosphorus fractions by point injection of CaO_2 [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 343: 408-415.
- [5] LU SG, ZHANG X, XUE YF. Application of calcium peroxide in water and soil treatment: a review[J]. *Journal*

- of Hazardous Materials, 2017, 337: 163-177.
- [6] 张亚雷, 章明, 李建华, 朱洪光, 柴世伟, 滕衍行, 赵建夫. CaO_2 不同投加方式对底泥磷释放的抑制效果分析[J]. 环境科学, 2006, 27(11): 2188-2193.
ZHANG YL, ZHANG M, LI JH, ZHU HG, CHAI SW, TENG YH, ZHAO JF. Effect on different adding means of calcium peroxide to control phosphorus release from sediment[J]. Environmental Science, 2006, 27(11): 2188-2193 (in Chinese).
- [7] SHAO YT, HE Q, FU YS, ZHANG GL, LIU YQ. Environmental impact and variation analysis of different CaO_2 and $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ dosing modes on microbial community in black-odorous sediment[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 167: 641-650.
- [8] 杨进, 酃和生, 王崇, 王彬. 过氧化钙降解有机污染物研究进展[J]. 化工环保, 2021, 41(2): 140-145.
YANG J, LI HS, WANG D, WANG B. Research progresses in degradation of organic pollutants with calcium peroxide[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2021, 41(2): 140-145 (in Chinese).
- [9] MA MS, DUAN WY, HUANG X, ZENG DJ, HU LS, GUI WJ, ZHU GM, JIANG JH. Application of calcium peroxide in promoting resource recovery from municipal sludge: a review[J]. Chemosphere, 2024, 354: 141704.
- [10] WANG J, LOU Y, MA DM, FENG K, CHEN C, ZHAO L, XING DF. Co-treatment with free nitrous acid and calcium peroxide regulates microbiome and metabolic functions of acidogenesis and methanogenesis in sludge anaerobic digestion[J]. Science of the Total Environment, 2023, 870: 161924.
- [11] TANG ZZ, XU HL, ZHU RL, XIE CY, XIAO HJ, LIANG ZX, LI HZ. Enhancement of sewer sediment control and disruption of adhesive gelatinous sediment structure using low-dose calcium peroxide[J]. Environmental Research, 2024, 243: 117852.
- [12] XU QX, HUANG QS, WEI W, SUN J, DAI XH, NI BJ. Improving the treatment of waste activated sludge using calcium peroxide[J]. Water Research, 2020, 187: 116440.
- [13] WANG HF, ZHAO YS, LI TY, CHEN Z, WANG YN, QIN CY. Properties of calcium peroxide for release of hydrogen peroxide and oxygen: a kinetics study[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 303: 450-457.
- [14] THANI QA, SCHAFFER B, LIU GD, VARGAS AI, CRANE JH. Chemical oxygen fertilization reduces stress and increases recovery and survival of flooded papaya (*Carica papaya* L.) plants[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 202: 173-183.
- [15] GAGO I. Solid particles containing metal peroxides, their preparation and their use for the amendment of soils: U.S. Patent 4,470,839[P]. 1984-9-11.
- [16] MASSALIMOV IA, SHAYAKHMETOV AU, MUSTAFIN AG. Specific features of thermal decomposition of mechanically activated calcium peroxide[J]. Russian Journal of Applied Chemistry, 2010, 83(10): 1794-1798.
- [17] PING Q, ZHENG M, DAI XH, LI YM. Metagenomic characterization of the enhanced performance of anaerobic fermentation of waste activated sludge with CaO_2 addition at ambient temperature: fatty acid biosynthesis metabolic pathway and CAZymes[J]. Water Research, 2020, 170: 115309.
- [18] GAO DM, ZHANG MS, HONG B. The quality control of eutrophic culture sediment by immobilized cells and conditions manipulation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 644: 5169-5173.
- [19] PARKER DB, CAI LS, KIM KH, HALES KE, SPIEHS MJ, WOODBURY BL, ATKIN AL, NICKERSON KW, PATEFIELD KD. Reducing odorous VOC emissions from swine manure using soybean peroxidase and peroxides[J]. Bioresource Technology, 2012, 124: 95-104.
- [20] ZHAI J, JIANG CH. Synthesis of calcium peroxide microparticles and its application in glyphosate wastewater pretreatment[J]. Advanced Materials Research, 2014, 881: 1139-1143.
- [21] CASSIDYDP, IRVINERL. Use of calcium peroxide to provide oxygen for contaminant biodegradation in a saturated soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, 69(1): 25-39.
- [22] CHEN X, LIU L, WANG Y, YOU XH, YAN WM, LI MJ, LI Q, HE XY, ZHANG L, ZHOU L, XIAO J, ZHU DD, YAN JB, HANG XS. Combining lanthanum-modified bentonite and calcium peroxide to enhance phosphorus removal from lake sediments[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 353: 120150.
- [23] WANG Y, WANG WH, LU XX, FENG LL, XUE FR, SUN LQ. Impact of calcium peroxide dosage on the control of nutrients release from sediment in the anoxic landscape water[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(36): 37070-37081.
- [24] HAQUE N, KWON SH. Nutrient dynamics study of overlying water affected by peroxide-treated sediment[J]. Journal of Ecology and Environment, 2017, 41(1): 32.
- [25] ZHOU J, LI DP, ZHAO ZH, HUANG Y. Phosphorus bioavailability and the diversity of microbial community in sediment in response to modified calcium peroxide ceramsite capping[J]. Environmental Research, 2021, 195: 110682.
- [26] WANG WH, WANG Y, ZHOU K, LI HM, YANG PL. Response mechanism of microorganisms to the inhibition of endogenous pollution release by calcium peroxide[J]. Science of the Total Environment, 2022, 848: 157708.
- [27] MOSMERI H, ALAIE E, SHAVANDI M, DASTGHEIB SMM, TASHARROFI S. Bioremediation of benzene from groundwater by calcium peroxide (CaO_2) nanoparticles encapsulated in sodium alginate[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 78: 299-306.
- [28] KHODAVEISI J, BANEJAD H, AFKHAMI A, OLYAIE E, LASHGARI S, DASHTI R. Synthesis of calcium peroxide nanoparticles as an innovative reagent for *in situ* chemical oxidation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 192(3): 1437-1440.

- [29] AMERHAIDER NUAR NN, MD JAMIL SNA, LI F, MAT AZMI ID, CHIANG PC, CHOONG TSY. Synthesis of controlled-release calcium peroxide nanoparticles coated with dextran for removal of doxycycline from aqueous system[J]. *Polymers*, 2022, 14(18): 3866.
- [30] TANG L, SUN YL, LU WY, CHEN XW, MOSA A, MINKINA T, GAO YZ, LING WT. A novel remediation strategy of mixed calcium peroxide and degrading bacteria for polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: 134122.
- [31] WANG XY, ZHANG L, HAN CM, ZHANG YY, ZHUO JX. Simulation study of oxytetracycline contamination remediation in groundwater circulation wells enhanced by nano-calcium peroxide and ozone[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 9136.
- [32] YAN J, WU LY, ZHANG FR, CAO YM, BENOIT G, ZHANG SH. Effects of switching redox conditions on sediment phosphorus immobilization by calcium/aluminum composite capping: performance, ecological safety and mechanisms[J]. *Chemosphere*, 2023, 343: 140294.
- [33] CAO JX, SUN Q, ZHAO DH, XU MY, SHEN QS, WANG D, WANG Y, DING SM. A critical review of the appearance of black-odorous waterbodies in China and treatment methods[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 385: 121511.
- [34] 李宁, 吴琼, 罗欢, 庞素艳, 杨旭楠, 张淦. 硝酸钙-微生物协同缓释颗粒原位修复污染底泥[J]. *环境科技*, 2022, 35(6): 6-12.
LI N, WU Q, LUO H, PANG SY, YANG XN, ZHANG G. *In-situ* remediation of contaminated sediment with calcium nitrate coupled microbial sustained-release granular[J]. *Environmental Science and Technology*, 2022, 35(6): 6-12 (in Chinese).
- [35] ATKINSON CA, JOLLEY DF, SIMPSON SL. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen, salinity and sediment disturbances on metal release and sequestration from metal contaminated marine sediments[J]. *Chemosphere*, 2007, 69(9): 1428-1437.
- [36] BEUTEL MW. Hypolimnetic anoxia and sediment oxygen demand in California drinking water reservoirs[J]. *Lake and Reservoir Management*, 2003, 19(3): 208-221.
- [37] WANG WH, WANG Y, LI JJ, ZHANG H, YAN FL, SUN LQ. Dose effects of calcium peroxide on harmful gases emissions in the anoxic/anaerobic landscape water system[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255: 112989.
- [38] 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋. 过氧化钙(CaO₂)联合生物炭对河道底泥的修复[J]. *环境科学*, 2020, 41(8): 3629-3636.
LI YP, JIANG YY, LIU BM, RUAN WQ, MIAO HF. Restoration of river sediment by calcium peroxide (CaO₂) combined with biochar[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8): 3629-3636 (in Chinese).
- [39] WANG WH, WANG Y, ZHAO KX, ZHU Z, HAN XY. Active and synchronous control of nitrogen and organic matter release from sediments induced with calcium peroxide[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 802: 149855.
- [40] XUE YF, SUI Q, BRUSSEAU ML, ZHANG X, QIU ZF, LYU SG. Insight on the generation of reactive oxygen species in the CaO₂/Fe(II) Fenton system and the hydroxyl radical advancing strategy[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 353: 657-665.
- [41] LIU TZ, ZHANG Z, MAO YQ, YAN DYS. Induced metal redistribution and bioavailability enhancement in contaminated river sediment during *in situ* biogeochemical remediation[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23(7): 6353-6362.
- [42] CHEN X, LIU L, YAN WM, LI MJ, LI Q, HE XY, ZHAO ZY, LIU RY, ZHANG ST, HUANG YF, JIANG F. Impacts of calcium peroxide on phosphorus and tungsten releases from sediments[J]. *Environmental Research*, 2023, 231: 116060.
- [43] ZHOU J, LI DP, ZHAO ZH, SONG XJ, HUANG Y, YANG JJ. Phosphorus immobilization by the surface sediments under the capping with new calcium peroxide material[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 247: 119135.
- [44] CHEN MS, DING SM, WU YX, FAN XF, JIN ZF, TSANG DCW, WANG Y, ZHANG CS. Phosphorus mobilization in lake sediments: experimental evidence of strong control by iron and negligible influences of manganese redox reactions[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 472-481.
- [45] BOSTICK BC, SUN J, LANDIS JD, CLAUSEN JL. Tungsten speciation and solubility in munitions-impacted soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(3): 1045-1053.
- [46] LI WP, ZHANG SK, ZHANG LY, LI XG, WANG F, LI GW, LI JX, LI W. *In-situ* remediation of sediment by calcium nitrate combined with composite microorganisms under low-DO regulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134109.
- [47] CHEN YN, LUO XL, LI YP, LIU YH, CHEN L, JIANG HJ, CHEN YR, QIN XL, TANG P, YAN HQ. Effects of CaO₂ based Fenton-like reaction on heavy metals and microbial community during co-composting of straw and sediment[J]. *Chemosphere*, 2022, 301: 134563.
- [48] TILMAN D, REICH PB, KNOPS JMH. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment[J]. *Nature*, 2006, 441(7093): 629-632.
- [49] BOMBACH P, RICHNOW HH, KÄSTNER M, FISCHER A. Current approaches for the assessment of *in situ* biodegradation[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 86(3): 839-852.
- [50] REIS VM, TEIXEIRA KR. Nitrogen fixing bacteria in the family *Acetobacteraceae* and their role in agriculture[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2015, 55(8): 931-949.

- [51] BÉDARD C, KNOWLES R. Physiology, biochemistry, and specific inhibitors of CH₄, NH₄⁺, and CO oxidation by methanotrophs and nitrifiers[J]. *Microbiological Reviews*, 1989, 53(1): 68-84.
- [52] LIANG B, WANG LY, MBADINGA SM, LIU JF, YANG SZ, GU JD, MU BZ. *Anaerolineaceae* and *Methanosaeta* turned to be the dominant microorganisms in alkanes-dependent methanogenic culture after long-term of incubation[J]. *AMB Express*, 2015, 5(1): 117.
- [53] MORI K, YAMAGUCHI K, SAKIYAMA Y, URABE T, SUZUKI KI. *Caldisericum exile* gen. nov., sp. nov., an anaerobic, thermophilic, filamentous bacterium of a novel bacterial phylum, *Caldiserica* phyl. nov., originally called the candidate phylum OP5, and description of *Caldiseriaceae* fam. nov., *Caldisericales* ord. nov. and *Caldisericia* classis nov. [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2009, 59(Pt 11): 2894-2898.
- [54] ROONEY-VARGA JN, SHARAK GENTHNER BR, DEVEREUX R, WILLIS SG, FRIEDMAN SD, HINES ME. Phylogenetic and physiological diversity of sulphate-reducing bacteria isolated from a salt marsh sediment[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1998, 21(4): 557-568.
- [55] XUE M, NIE YT, CAO XW, ZHOU X. Deciphering the influence of S/N ratio in a sulfite-driven autotrophic denitrification reactor[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 836: 155612.
- [56] WANG Y, WANG WH, YAN FL, DING Z, FENG LL, ZHAO JC. Effects and mechanisms of calcium peroxide on purification of severely eutrophic water[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2796-2806.
- [57] WANG Y, LIANG LN, LIU JY, GUO DP, ZHU ZP, DONG HM. Impact of anaerobic digestion on reactive nitrogen gas emissions from dairy slurry storage[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115306.
- [58] PETRIGLIERI F, SINGLETON C, PECES M, PETERSEN JF, NIERYCHLO M, NIELSEN PH. “*Candidatus* *Dechloromonas phosphoritropha*” and “*Ca. D. phosphorivorans*”, novel polyphosphate accumulating organisms abundant in wastewater treatment systems[J]. *The ISME Journal*, 2021, 15(12): 3605-3614.
- [59] ZHAO WH, BI XJ, PENG YZ, BAI M. Research advances of the phosphorus-accumulating organisms of *Candidatus* *Accumulibacter*, *Dechloromonas* and *Tetrasphaera*: metabolic mechanisms, applications and influencing factors[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 135675.
- [60] HUNG CM, CHEN CW, HUANG CP, DONG CD. Degradation of 4-nonylphenol in marine sediments using calcium peroxide activated by water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) -derived biochar[J]. *Environmental Research*, 2022, 211: 113076.
- [61] KALE V, BJÖRNSDÓTTIR SH, FRIÐJÓNSSON ÓH, PÉTURSDÓTTIR SK, ÓMARSÐÓTTIR S, HREGGVIÐSSON GÓ. *Litorilinea aerophila* gen. nov., sp. nov., an aerobic member of the class *Caldilineae*, phylum *Chloroflexi*, isolated from an intertidal hot spring[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2013, 63(Pt 3): 1149-1154.
- [62] RAIYANI NM, SINGH SP. Microbial community and predictive functionalities associated with the marine sediment of Coastal Gujarat[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2023, 30(15): 43245-43266.
- [63] RUAN MY, ZHANG YX, CHAI TY. Rhizosphere soil microbial properties on *Tetraena mongolica* in the arid and semi-arid regions, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(14): 5142.
- [64] WANG F, WANG HJ, ZHAO ZL, DONG WY, WU ZJ, ZHANG SL, LI WT, WU XY. Simultaneous elimination of black-odor and stabilization of heavy metals in contaminated sediment using calcium peroxide/hydroxyapatite: microbial responses and ecotoxicological effects[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 429: 128298.
- [65] LI ZF, LIU Y, XIE J, WANG GJ, CHENG XJ, ZHANG JW, SANG CJ, LIU ZJ. Impact of microecological agents on water environment restoration and microbial community structures of trench system in a Baiyangdian wetland ecosystem[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2022, 132(3): 2450-2463.
- [66] CHEN Y, JIANG YM, HUANG HY, MOU LC, RU JL, ZHAO JH, XIAO S. Long-term and high-concentration heavy-metal contamination strongly influences the microbiome and functional genes in Yellow River sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637: 1400-1412.
- [67] YANG XN, LI EZ, LIU FF, XU MY. Interactions of PAH-degradation and nitrate-/sulfate-reducing assemblages in anaerobic sediment microbial community[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 122068.
- [68] MA ZH, GE ZH, LIU KX, WANG C, WU T, ZHANG JB. Application of calcium peroxide for efficient treatment of surface water turbidity: mechanisms and microbial community responses[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(5): 110905.
- [69] PING Q, ZHANG ZP, DAI XH, LI YM. Novel CaO₂ beads used in the anaerobic fermentation of iron-rich sludge for simultaneous short-chain fatty acids and phosphorus recovery under ambient conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 322: 124553.
- [70] SPANG A, POEHLEIN A, OFFRE P, ZUMBRÄGEL S, HAIDER S, RYCHLIK N, NOWKA B, SCHMEISSER C, LEBEDEVA EV, RATTEI T, BÖHM C, SCHMID M, GALUSHKO A, HATZENPICHLER R, WEINMAIER T, DANIEL R, SCHLEPER C, SPIECK E, STREIT W, WAGNER M. The genome of the ammonia-oxidizing *Candidatus* *Nitrososphaera gargensis*: insights into metabolic versatility and environmental adaptations[J].

- Environmental Microbiology, 2012, 14(12): 3122-3145.
- [71] WANG HY, LYU WL, HU XL, CHEN L, HE QL, ZHANG W, SONG JY, WU J. Effects of current intensities on the performances and microbial communities in a combined bio-electrochemical and sulfur autotrophic denitrification (CBSAD) system[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133775.
- [72] FOX R, TUCHMAN M. The assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS) program[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1996, 22(3): 493-494.
- [73] DRÁBKOVÁ M, ADMIRAAL W, MARSÁLEK B. Combined exposure to hydrogen peroxide and light selective effects on cyanobacteria, green algae, and diatoms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(1): 309-314.
- [74] LUSTY MW, GOBLER CJ. Repeated hydrogen peroxide dosing briefly reduces cyanobacterial blooms and microcystin while increasing fecal bacteria indicators in a eutrophic pond[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 124: 522-543.
- [75] KIM T, CHO J, CHA D, KIM MS, PARK EJ, LEE HJ, LEE CH. Cupric ion in combination with hydrogen peroxide and hydroxylamine applied to inactivation of different microorganisms[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 400: 123305.
- [76] BABIN J, MURPHY T, LYNN J. *In situ* sediment treatment in Kai Tak Nullah to control odours and methane production[C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on River Sedimentation. Hong Kong, China, 1998.
- [77] WATANABE T, KOJIMA H, TAKANO Y, FUKUI M. Diversity of sulfur-cycle prokaryotes in freshwater lake sediments investigated using *aprA* as the functional marker gene[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2013, 36(6): 436-443.
- [78] TIAN HM, GAO PK, CHEN ZH, LI YS, LI Y, WANG YS, ZHOU JF, LI GQ, MA T. Compositions and abundances of sulfate-reducing and sulfur-oxidizing microorganisms in water-flooded petroleum reservoirs with different temperatures in China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 143.
- [79] YANG XN, LI Y, PU J, HUANG YD, LUAN TG, XU MY. Effects of cable bacteria on vertical redox profile formation and phenanthrene biodegradation in intertidal sediment responded to tide[J]. *Water Research*, 2024, 265: 122283.
- [80] LEE CS, LE THANH T, KIM EJ, GONG JY, CHANG YY, CHANG YS. Fabrication of novel oxygen-releasing alginate beads as an efficient oxygen carrier for the enhancement of aerobic bioremediation of 1,4-dioxane contaminated groundwater[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171: 59-65.
- [81] ZHANG M, SONG RX, LIU YY, YI ZG, MENG XF, ZHANG JW, TANG ZM, YAO ZW, LIU Y, LIU XG, BU WB. Calcium-overload-mediated tumor therapy by calcium peroxide nanoparticles[J]. *Chem*, 2019, 5(8): 2171-2182.
- [82] WANG YL, HE XL, ZHOU C, BAI YW, LI TQ, LIU JC, JU SG, WANG CY, XIANG GY, XIONG B. Nanoscale CaO₂ materials for synergistic transarterial chemoembolization in a VX2 orthotopic rabbit liver cancer model[J]. *Acta Biomaterialia*, 2022, 154: 536-548.
- [83] ZHANG C, LI M, SUN JM, ZHANG SW, HUANG JJ. The mechanism of C–N–S interconnection degradation in organic-rich sediments by Ca(NO₃)₂-CaO₂ synergistic remediation[J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 113992.
- [84] 杨旭楠, 张义栋, 普佳, 许玫英. 一种基于红外光谱分析的区域沉积物有机碳库评估方法及装置: CN202411422492.3[P]. 2025-01-07.
- YANG XN, Zhang YD, Pu J, XU MY. A method and device for regional sediment organic carbon pool assessment based on infrared spectroscopy analysis: CN202411422492.3[P]. 2025-01-07 (in Chinese).