

基于微藻修复土壤重金属污染研究进展

罗 军^{1,2*}

(1.江西现代职业技术学院,江西 南昌 330095; 2.江西农业大学国土资源与环境学院,江西 南昌 330045)

摘要:系统综述了微藻修复土壤重金属的研究进展,重点阐述了其对重金属的富集及解毒机制。总结了微藻在实际修复中的应用效果,并指出其在修复效率、环境因子影响、生物质分离等方面存在的挑战。最后,对未来研究方向提出展望,以推动微藻修复技术从理论研究走向工程应用。

关键词:微藻;土壤修复;重金属污染;富集;解毒

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)07-0029-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.07.006

Research progress on remediation of soil heavy metal pollution based on microalgae

LUO Jun^{1,2*}

(1.Jiangxi Modern Polytechnic College, Nanchang 330095, China;

2.College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: This paper provides a systematic review of the research progress in using microalgae for soil heavy metal remediation, with a particular focus on the mechanisms for heavy metal enrichment and detoxification. The application effectiveness of microalgae in practical remediation is summarized, while challenges such as remediation efficiency, influences of environmental factors, and biomass separation are discussed. Finally, future research directions are proposed to facilitate the transition of microalgae-based remediation technology from theoretical research to engineering applications.

Key words: microalgae; soil remediation; heavy metal pollution; enrichment; detoxification

随着工业化和城市化的快速推进,土壤重金属污染成为目前全球面临的最为严峻的环境挑战之一。工业排放、矿产资源不合理开发、农业污水灌溉及含重金属废弃物不当处置等人为活动,导致镉(Cd)、铅(Pb)、砷(As)、汞(Hg)等有毒重金属在土壤环境中持续累积。据报道,全球每年有数百万吨重金属排入水体,14%~17%的耕地存在重金属超标,影响范围覆盖9~14亿人口^[1]。我国土壤总的点位超标率达到16.1%,其中重金属镉、汞、砷污染位列前三。因具有不可生物降解性、高迁移性和生物富集性等特征,重金属对土壤生态功能、农作物及地下水安全构成严重威胁。更为严重的是,重金属可通过“土壤-植物-人体”链式途径传递,引发各种慢性疾病,危害人体健康。因此,关于土壤重金属污染修复一直是环境科学与工程领域的研究热点。

生物修复技术主要是利用植物、微生物对重金属进行吸附、富集或转化,从而降低其生物有效性和环境毒性。微藻是一类分布广泛、物种丰富的单细胞或简单多细胞光合自养生物,具有个体小、生长快、环境适应性强等特点,因良好的吸附性能,已作

为生物吸附材料用于水体重金属处理研究。然而,目前针对微藻在土壤重金属污染修复中的应用研究仍相对有限。本文中在系统梳理国内外相关文献的基础上,全面评述了微藻修复土壤重金属的研究进展,重点阐释了其吸附与吸收机制以及解毒机理,指出了该技术在实际应用中面临的问题,并对未来的重点发展方向进行了展望,以期土壤重金属污染治理的理论创新与工程实践提供参考。

1 土壤重金属修复

土壤中重金属因残留性高、累积性强和不可生物降解性而导致处理难度大和修复效果不理想。如表1所示,常见的处理方法如物理、化学、联合修复等存在成本高、易二次污染、周期过长等不足。相较于这些修复技术,生物修复具有去除效率高、环境友好、成本低以及可原位修复等优势。而作为土壤生态系统中重要生物组成部分的微藻,在土壤质量提升、污染治理和病虫害防治等方面具有不可替代的功能,因而被广泛认为是一种具有良好应用前景的生物修复工具。

收稿日期:2025-09-30;修回日期:2026-05-03

基金项目:国家自然科学基金项目(56120002);江西省教育厅科技研究项目(GJJ2405210)

作者简介:罗军(1989-),男,博士,讲师,研究方向为水与土壤污染治理等,通讯联系人,1156073121@qq.com。

表 1 土壤重金属物化修复技术

修复技术	适用范围	成本	优势	不足
物理修复 热处理 ^[2]	Hg、As 等沸点低的重金属污染土壤	高	周期短、高效、安全性好、无二次污染、可实现土壤与污染物资源化	设备昂贵、脱附时间长
客土换土 ^[3]	小型重污染土壤	高	操作简单、见效快、适用范围广	破坏土壤性质、存在二次污染风险
化学修复 化学淋洗 ^[4]	小型重污染土壤, 不适用于黏性大、渗透性差的土壤	较高	周期短、高效、可与其他技术联用	威胁生态安全、存在二次污染风险
化学稳定 ^[5]	适用范围广、不适合特殊污染物土壤	较低	高效便捷、土壤扰动小	修复不彻底、环境条件影响大、存在二次污染风险
电动 ^[6]	低渗透性的黏土和粉土	高	高效、原位修复、环境友好	能耗高、周期长、技术复杂
联合修复 超声-淋洗 ^[7]	高浓度污染土壤	较高	高效、周期短、适用性广	影响土壤性质、存在二次污染风险、需长期监测
电动-渗透反应墙 ^[8]	低渗透性土壤	较高	效率高、持久性强、环境扰动小	系统复杂、能耗高、存在二次污染风险

如表 2 所示,微藻对土壤中的多种重金属均表现出良好的修复效果。土壤生物结皮是生长于土壤表面的一层由微生物(如藻类、苔藓、真菌)及其分泌物与土壤颗粒胶结形成的特殊复合体,不仅具有改善土壤肥力、稳定土壤结构等功效,而且在固定和降低重金属有效性方面同样发挥重要作用。研究发现^[9],稻田土壤生物结皮对镉具有较好的富集作用,吸附容量可达 8.48 mg/g,其中蓝藻(Cyanobacteria)作为生物结皮中主要的生物质在富集中起主导作用。土壤微生物群落组成和功能与环境因子密切相关,在长期暴露于重金属污染的环境中,微藻可表现

出对金属离子的耐受性,并逐渐发展成为优势藻种。Mao 等^[10]从雄黄矿区土壤中分离得到对砷具有较强富集和适应能力的丝状蓝藻(Leptolyngbya sp. XZMQ),将其分别接种于农田土和尾矿土中形成生物结皮后,对砷的积累量分别达到 279.89、269.57 mg/kg。硅藻是土壤中的常见藻类,其细胞形态、生理活动及群落结构的特征性变化可作为重金属污染的有效生物指标。不仅如此,拥有纳米结构细胞壁和丰富表面配体的硅藻,能为吸附重金属离子提供较大的比表面积和大量的吸附位点,因而成为生物吸附材料的“有力竞争者”。

表 2 微藻修复土壤重金属污染

微藻名称	试验尺度	添加量	土壤有效态重金属降低量/%	作物类型	作物部位重金属降低量/%
念珠藻 ^[11]	田间	1×10^{10} cells/m ²	Cd 26.3	水稻	稻谷 Cd 55
细鞘丝藻 ^[12]	盆栽	1 ± 0.1 μ g/cm ²	Pb 12.5, Zn 14.3	—	—
固氮鱼腥藻 ^[13]	盆栽	2.3×10^6 cells/100 g	Cd 55	小麦	根 Cd 40, 茎 Cd 26
颤藻 ^[14]	盆栽	1.4 g/80 g	Cr(Ⅲ) 15~38	马齿苋	根 Cr 18, 茎 Cr 17
细鞘丝藻 ^[15]	盆栽	100 mL/1500 g	As 20	向日葵	叶 As 36

2 微藻富集重金属机制

根据代谢依赖性,微藻对重金属富集过程可分为细胞吸附和吸收 2 类(图 1),其中涉及的生物机

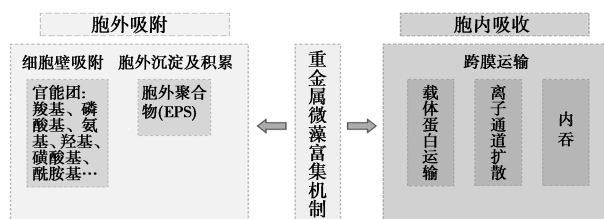


图 1 重金属微藻富集机制

制主要分为 3 种:细胞表面吸附;活细胞对重金属的细胞外沉淀及积累;需要微生物活性或代谢过程的细胞吸收。

2.1 表面吸附

微藻细胞壁主要由多糖、蛋白质和脂质等多功能大分子聚合物构成,这些聚合物富含带负电的官能团,如羧基($-\text{COOH}$)、羟基($-\text{OH}$)、磷酸基 $[-\text{PO}(\text{OH})_2]$ 、氨基($-\text{NH}_2$)和磺酸基($-\text{SO}_3\text{H}$)等。当重金属离子与微藻接触时,这些官能团作为主要的结合位点,通过离子交换、表面络合、静电吸附等机制捕获阳离子,这使得细胞壁表面吸附成为

去除重金属的第一道防线。该过程快速、效率高且不依赖于代谢,在吸附容量上一般占主导作用。研究表明^[16],在蓝藻生物量 2.8 g/L、初始金属浓度 80 $\mu\text{g/mL}$ 的最佳水平下,蓝藻(*Nostoc muscorum*)可通过表面吸附去除 85% Pb 和 79% Cd,而胞内吸收贡献率仅为 5% 和 4%。Cheng 等^[17]通过实验发现,失活普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)对重金属同样具有吸附能力,Cd 的最大吸附量为 16.65 mg/g,比活细胞还要高 1.9%,这可能是由于细胞结构破坏导致原本被掩埋的官能团充分暴露出来,从而增加了可用于结合重金属的有效位点数量。值得注意的是,即使在同一重金属污染介质中,不同属种微藻的敏感性和吸附效率会因细胞壁组成结构不同而存在显著差异。此外,同属物种间也存在细胞壁组成差异,如普通小球藻细胞壁为内层单层结构,而佐芬格绿球藻和同形球藻则为内外双层结构。因此,利用微藻去除重金属必须了解细胞壁的结构、组成与特性。

2.2 胞外聚合物吸附

胞外聚合物(EPS)是包括微藻在内的微生物分泌到细胞外的高分子聚合物,主要成分为多糖、蛋白质、核酸和脂质等,具有丰富的金属结合位点。大量研究证实,当环境中存在重金属等有毒物质时,微藻会通过增加 EPS 产量来提高其吸附率。例如,莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)在 60 $\mu\text{mol/L}$ 镉处理下,EPS 中多糖和蛋白质相比对照组分别增加 28% 和 35%^[18]。Zhang 等^[19]通过实验发现 EPS 有利于增强细胞对砷离子的吸附能力,完整蛋白核小球藻(*C. pyrenoidosa*)对 As(Ⅲ)、As(Ⅴ)的吸附量分别为 254.82 ± 2.97 、 413.05 ± 2.88 $\mu\text{mol/g}$,相比无 EPS 的蛋白核小球藻(*C. pyrenoidosa*)提高了 58%、30%。此外,作为“生物胶水”,EPS 能使微藻黏附在土壤表面,不仅增加了土壤内聚力和稳定性,而且构建出一个有组织的“微菌落”结构,有效阻止了消毒剂、抗生素、重金属等有害物质的迁移渗透。

2.3 细胞吸收

代谢依赖性的生物吸收是活性微藻富集重金属的关键途径,与生物吸附不同,该过程通常包含 2 个连续阶段。第一阶段为快速被动吸附:金属阳离子与细胞壁及膜表面的负电官能团发生静电结合;第二阶段为依赖能量的主动跨膜运输:金属离子借助特异性或非特异性离子通道、载体蛋白,甚至内吞作用等途径进入细胞质。此后,为抵御金属离子引发的氧化胁迫等毒性效应,藻细胞会迅速激活一系列

复杂的细胞内解毒机制,例如合成金属硫蛋白、植物螯合素等特异配体进行螯合,或将金属区室化隔离于液泡等特定细胞器内,从而实现耐受与富集。

3 微藻对重金属解毒机制

在长期进化过程中,为抵御非必需重金属的毒害,微藻发展出了一系列复杂的细胞内调控机制。这些适应性机制主要包括螯合、细胞区室化、外排、生物转化等。

3.1 螯合作用

3.1.1 植物螯合素

植物螯合素(PCs)是一类由酶促反应合成,而非基因编码的小分子多肽。这类含硫醇基的肽链由 3 种氨基酸构成:谷氨酸(Glu)、半胱氨酸(Cys)和甘氨酸(Gly),通用结构为 $(\gamma\text{-Glu-Cys})_n\text{-Gly}$,其中半胱氨酸分子的巯基($-\text{SH}$)能够螯合重金属。研究发现,PCs 还具备清除过氧化氢(H_2O_2)和超氧阴离子自由基(O_2^-)的能力。与 PCs 不同,并非所有真核藻类均都能合成 PCs,而谷胱甘肽(GSH)作为一种广泛存在于生物体内的肽类物质,不仅是 PCs 生物合成的前体,也是细胞内非蛋白硫醇的主要来源。在胞内金属浓度较低时,GSH 能够作为直接与重金属结合的主要配体,参与金属螯合与解毒过程。

3.1.2 金属硫蛋白

金属硫蛋白(MTs)是一类由基因编码的低分子质量金属结合蛋白,具有丰富的半胱氨,主要参与调节金属离子的稳态平衡,并在解毒过程中发挥关键作用。然而,相较于其他生物体,目前关于微藻金属硫蛋白的研究并不多,尤其对于重金属的解毒功能尚未完全明确。一种假设认为,MTs 可能作为细胞内重金属的储存库,参与重金属的区室化分隔;另有观点指出,MTs 可能作为转运蛋白,将过量重金属从敏感部位转移至需求区域或毒性较低的区域。因此,未来可开展基因、生化或细胞水平等方面的实验研究,深入理解金属硫蛋白解毒重金属的具体机制。

3.1.3 多磷酸体

自然界中,多磷酸体在真核和原核生物中普遍存在,在微藻中主要分布于液泡、细胞壁、细胞质、线粒体及细胞核等区室,广泛参与多个细胞过程及应激响应,包括重金属的螯合与解毒、海洋磷循环、磷库的形成、营养匮乏适应以及渗透压和热应激响应等。Wang 等^[20]研究发现,高磷条件下,莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)细胞内镉、铜积累增加,

据此推断出多磷酸体可能参与了金属解毒。此外,基于X射线能谱分析进一步证实,多种重金属在微藻(*Plectonema boryanum*)体内的富集也与多磷酸体密切相关^[21]。值得注意的是,在磷营养受限环境中,多磷酸体发生分解并释放正磷酸盐以满足细胞的代谢需求。与此同时,此前通过配位结合的重金属离子重新解离并进入细胞质中。因此,维持充足的磷供给是保障多磷酸体介导的重金属解毒机制持续有效的必要条件。

3.2 细胞区室化

如前所述,将重金属离子运输到特定的细胞区室进行稳定隔离,能有效阻止其与细胞质中的生物大分子相互作用,从而保护细胞结构与功能的完整性。涂梦姿等^[22]通过TEM观察到,Cd离子胁迫下小球藻液泡内积累有黑色球状电子致密颗粒。Volland等^[23]则利用TEM-EELS-ESI联用技术,在另一绿藻(*Microcystis denticulata*)细胞内检测到以铬-铁-氧化合物形式的Cr(IV)富集,并伴有液泡化增强现象。而关于重金属在叶绿体、线粒体、类囊体、蛋白核等细胞器中的积累现象也已被广泛报道。

3.3 外排作用

通过改变细胞膜通透性和细胞壁功能来激活外排系统是微藻抵抗重金属毒害的另一重要机制。Victoria等^[24]从软管藻(*Haplosiphonaceae*)耐镉藻株JJU2基因组中分离出与抗性相关的*czcA*、*czcB*及*cadA*基因,这些基因所编码的CzcA、CzcB和CusA蛋白是细胞膜上参与重金属外排系统的关键组分。Blaby-Haas等^[25]发现莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)在金属过量或干扰细胞代谢时会激活主动外排系统,利用转运蛋白Ccc1/VIT1降低细胞质浓度。在集胞藻(*Synechocystis* sp. PCC 6803)中,*arsB*基因负责编码一种特异性外排泵,能够将砷酸盐(AsO_4^{3-})或亚砷酸盐(As^{3+})转运至胞外,进而实现解毒功能^[26]。

3.4 生物转化

在微藻修复重金属领域,生物转化主要是通过酶促反应和形成金属纳米颗粒等方式将环境中有毒的可溶性重金属转化为低毒或稳定的形态,从而实现解毒和净化。

3.4.1 酶促生物转化

重金属的酶促生物转化可定义为通过氧化还原反应进行电子转移,将高毒性形态转化为低毒性形态的化学过程。虽然重金属无法被降解,但可通过

改变氧化态或形成无机配合物来降低毒性。Lee等^[27]发现普通小球藻能通过铬酸盐还原酶催化将Cr(VI)转化为Cr(III),而铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)可将99%的亚砷酸盐在氧化作用下转化为砷酸盐^[28]。

3.4.2 形成金属纳米颗粒

有毒金属离子通过氧化还原反应转变后,在此基础上可形成不同形态的金属纳米颗粒(nanoparticles, NPs)。金属纳米颗粒的生物合成可在胞外和胞内发生,具体取决于纳米颗粒合成位点及还原剂种类。研究表明,微藻能通过结合蛋白质、脂类、碳水化合物、色素及其他抗氧化分子,将毒性重金属电荷归零^[29]。在胞外环境中,细胞表面带电官能团、胞外聚合物(EPS)、结合位点和有机配体也可通过氧化还原反应改变重金属形态。相较于胞内环境,金属纳米颗粒的胞外生物合成更为简易。Mahawar等^[30]研究表明Ag NPs、ZnO NPs和CuO NPs积累在眉藻(*Calothrix elenkinii*)细胞表面。

4 结论与展望

微藻修复土壤重金属污染是一项前景广阔的生物修复技术,利用微藻的生物富集和生物转化来降低土壤中重金属的活性和毒性。然而,该技术在实际应用中还面临一些问题与挑战。

(1)天然微藻菌株对目标重金属的吸附容量和选择性往往有限,修复效率难以满足实际场地的治理需求。这主要源于其自身生物量水平较低、细胞表面有效吸附位点不足,以及对特定重金属离子的亲和力较弱。

(2)微藻在土壤环境中的活性与修复能力易受多种非生物因子制约,包括土壤pH、温度、盐度、有机质含量及共存竞争离子等。这些因素直接影响微藻的活性、生理状态及对重金属的吸附-解吸行为,导致修复效果不稳定。此外,土壤是一个复杂的三相体系,通透性、营养分布和水分状况均与水生环境迥异,极大限制了微藻的迁移、分布和持续增殖。

(3)修复完成后,如何高效、低成本地将微藻生物质从土壤中分离出来是阻碍该技术工程化应用的关键瓶颈之一。传统的离心、过滤等方法存在操作成本高、难以规模化应用等问题,尤其不适于土壤基质。而富含重金属的藻体若不能得到妥善处置,可能造成二次释放风险。

针对这一系列问题,建议未来应从以下方面进行深入研究。

(1) 开发环境安全的定向遗传改良技术, 并利用多组学技术深入解析重金属吸附-转化的分子机制, 为精准育种提供基因靶点; 同时, 积极探索构建微藻联合修复技术并与农艺调控措施相结合, 通过协同效应整体提升修复效率与稳定性。

(2) 采用“选育-适配”策略, 即优先筛选本地适应性藻种, 并结合微生物共固定化技术(如构建藻-菌共生微球)以增强抗逆性与定殖能力。同时加强研究以系统阐明微藻在土壤三相体系中的迁移定殖规律及其与土著微生物群的互作机制, 并开发针对性的微藻接种技术。

(3) 开发低成本、可生物降解的新型固定化载体(如磁性纳米载体)以实现藻体的高效分离, 同时发展安全资源化路径并重点评估不同资源化路径的全生命周期环境效益与经济可行性, 特别是重金属在产物中的稳定性与泄漏风险, 通过建立从修复到资源化的完整工艺链与技术标准, 推动工程化示范与应用。

参考文献

- [1] Hou D, Jia X, Wang L, *et al.* Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health [J]. *Science*, 2025, 388 (6744): 316–321.
- [2] Zhao C, Dong Y, Feng Y, *et al.* Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review [J]. *Chemosphere*, 2019, 221: 841–855.
- [3] Mai X, Tang J, Tang J, *et al.* Research progress on the environmental risk assessment and remediation technologies of heavy metal pollution in agricultural soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 149: 1–20.
- [4] Hu W, Niu Y, Zhu H, *et al.* Remediation of zinc-contaminated soils by using the two-step washing with citric acid and water-soluble chitosan [J]. *Chemosphere*, 2021, 282: 131092.
- [5] Xu D M, Fu R B, Wang J X, *et al.* Chemical stabilization remediation for heavy metals in contaminated soils on the latest decade: Available stabilizing materials and associated evaluation methods-A critical review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321: 128730.
- [6] Wen D, Fu R, Li Q. Removal of inorganic contaminants in soil by electrokinetic remediation technologies: A review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123345.
- [7] Choi J, Lee D, Son Y. Ultrasound-assisted soil washing processes for the remediation of heavy metals contaminated soils: The mechanism of the ultrasonic desorption [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 74: 105574.
- [8] Zhou H, Liu Z, Li X, *et al.* Remediation of lead(II)-contaminated soil using electrokinetics assisted by permeable reactive barrier with different filling materials [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 408: 124885.
- [9] 李智义. 南方稻田生物结皮对镉选择性富集及形态转化机制研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- [10] Mao Q, Xie Z, Pei F, *et al.* Indigenous cyanobacteria enhances remediation of arsenic-contaminated soils by regulating physicochemical properties, microbial community structure and function in soil microenvironment [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 860: 160543.
- [11] Hu T, Chen A, Jiang Y, *et al.* Application of a newly recorded diazotrophic cyanobacterium in acidified and Cd contaminated paddy soil: Promotes rice yield and decreases Cd accumulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 814: 152630.
- [12] Hou L, Li D, Wan S, *et al.* Enhanced lead-zinc tailing remediation by inoculating cyanobacteria to induce biological soil crusts [J]. *Algal Research*, 2025: 104103.
- [13] Liu J, Liu Y, Jiang H, *et al.* Application of microalgae in remediation of heavy metal-contaminated soils and its stimulatory effect on wheat growth [J]. *Algal Research*, 2025, 88: 103995.
- [14] Zanganeh F, Heidari A, Sepehr A, *et al.* Bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil by a synergistic effect of cyanobacteria inoculation, biochar, and purslane (*Portulaca oleracea* L.) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(4): 6040–6059.
- [15] Mao Q, Xie Z, Pinzon-Nuñez D A, *et al.* Leptolyngbya sp. XZMQ and *Bacillus* XZM co-inoculation reduced sunflower arsenic toxicity by regulating rhizosphere microbial structure and enzyme activity [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 341: 123001.
- [16] Dixit S, Singh D P. An evaluation of phycoremediation potential of cyanobacterium *Nostoc muscorum*: Characterization of heavy metal removal efficiency [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2014, 26(3): 1331–1342.
- [17] Cheng J, Yin W, Chang Z, *et al.* Biosorption capacity and kinetics of cadmium(II) on live and dead *Chlorella vulgaris* [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, 29(1): 211–221.
- [18] Yu Z, Zhang T, Hao R, *et al.* Sensitivity of *Chlamydomonas reinhardtii* to cadmium stress is associated with phototaxis [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2019, 21(6): 1011–1020.
- [19] Zhang J, Zhou F, Liu Y, *et al.* Effect of extracellular polymeric substances on arsenic accumulation in *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135368.
- [20] Wang W X, Dei R C H. Metal stoichiometry in predicting Cd and Cu toxicity to a freshwater green alga *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142(2): 303–312.
- [21] Jensen T E, Baxter M, Rachlin J W, *et al.* Uptake of heavy metals by *Plectonema boryanum* (Cyanophyceae) into cellular components, especially polyphosphate bodies: An X-ray energy dispersive study [J]. *Environmental Pollution Series A, Ecological and Biological*, 1982, 27(2): 119–127.
- [22] 涂梦姿, 尹鑫, 赖发英, 等. Cd(II) 对小球藻生长抑制和恢复研究 [J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(8): 17–23.

(下转第 39 页)

- gine of the biofuel obtained by hydrodeoxygenation of oleic acid with Pt/ γ -Al₂O₃ catalysts [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021, 40(4): e13582.
- [10] Mohammed S T, Hamad K I, Ghani S A, *et al.* Enhancement of stability of Pd/AC deoxygenation catalyst for hydrothermal production of green diesel fuel from waste cooking oil [J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 251: 117489.
- [11] Cao X, Zhao J, Long F, *et al.* Al-modified Pd@mSiO₂ core-shell catalysts for the selective hydrodeoxygenation of fatty acid esters: Influence of catalyst structure and Al atoms incorporation [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2022, 305: 121068.
- [12] Ali A, Zhao C. Ru nanoparticles supported on hydrophilic mesoporous carbon catalyzed low-temperature hydrodeoxygenation of microalgae oil to alkanes at aqueous-phase [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2020, 41(8): 1174–1185.
- [13] Ma C, Dai Y, Zhuang G, *et al.* Advances in hydrodeoxygenation techniques and catalysts for the sustainable conversion of microalgal oil into biofuels [J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 318: 122168.
- [14] Fangkoch S, Boonkum S, Ratchahat S, *et al.* Solvent-free hydrodeoxygenation of triglycerides to diesel-like hydrocarbons over Pt-decorated MoO₂ catalysts [J]. *ACS Omega*, 2020, 5(12): 6956–6966.
- [15] Cao X, Zhao J, Long F, *et al.* Highly dispersed MoO_x-Ru/C bimetallic catalyst for efficient hydrogenolysis of esters to alkanes [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2025, 71: 256–266.
- [16] Papageridis K N, Charisiou N D, Douvartzides S L, *et al.* Effect of operating parameters on the selective catalytic deoxygenation of palm oil to produce renewable diesel over Ni supported on Al₂O₃, ZrO₂ and SiO₂ catalysts [J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 209: 106547.
- [17] Torres-Bujalance V, Prieto C A, Rodriguez Espinoza K E, *et al.* Production of biofuels from hydrodeoxygenation and hydroisomerization of triglycerides with metal-supported SAPO-11 molecular sieves [J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(5): 4312–4324.
- [18] 廖正江. 高性能介孔 Ni/ γ -Al₂O₃ 催化剂制备及油脂加氢脱氧性能研究 [D]. 重庆: 重庆工商大学, 2022.
- [19] Chen S, Zeng J, Liao Z, *et al.* Controllable preparation of highly dispersed Ni/ γ -Al₂O₃ catalyst for lipids hydrodeoxygenation to biofuel [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, 13(5): 117518.
- [20] Li X, Li R, Lin M, *et al.* High hydrothermal stability Co@NC catalyst for hydrothermal deoxygenation of algae-based bio-oil model compound [J]. *Chemical Engineering Science*, 2024, 284: 119450.
- [21] 郭效博, 王玮, 赵佳平, 等. Ni-Fe 合金催化剂制备及催化硬脂酸加氢脱氧性能 [J]. *煤炭学报*, 2023, 48(6): 2315–2325.
- [22] Guo X, Wang W, Zhao J, *et al.* Comparative study of Ni-Fe catalysts loaded on different supports for fatty acid hydrodeoxygenation [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2025, 202: 108242.
- [23] Zhao C, Luo J, Zhu W, *et al.* Efficient hydrodeoxygenation of methyl palmitate over NiMo/ZrO₂ catalyst with electron transfer between Ni and Mo [J]. *Catalysis Today*, 2024, 437: 114780.
- [24] 孙伟倩. 生物油脂加氢脱氧非负载 Ni 基催化剂的制备及性能研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
- [25] Qian Z, Wang L, Da W, *et al.* Highly-efficient NiCo alloy catalysts towards hydrodeoxygenation of fatty acids to prepare alkanes [J]. *Molecular Catalysis*, 2025, 572: 114754.
- [26] Long F, Cao Y, Zhang B, *et al.* Subnanometric Ni-anchored on boron, nitrogen co-doped carbon with vertically aligned MoS₂ boosting catalytic activity in fatty acid hydrogenation [J]. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 2025, 371: 125243.
- [27] Levy R B, Boudart M. Platinum-like behavior of tungsten carbide in surface catalysis [J]. *Science*, 1973, 181(4099): 547–549.
- [28] Tirumareddy P, Boahene P, Dalai A K. Enhanced hydrodeoxygenation of biocrude using NiMo carbide catalysts [J]. *Catalysis Today*, 2025, 460: 115490.
- [29] Zhang Z, Bi G, Zhang H, *et al.* Highly active and selective hydrodeoxygenation of oleic acid to second generation bio-diesel over SiO₂-supported Co_xNi_{1-x}P catalysts [J]. *Fuel*, 2019, 247: 26–35.
- [30] Zhao C X, Wang J, Chen X, *et al.* Nickel molybdenum bimetallic nitrides as efficient catalysts for the hydrodeoxygenation of methyl palmitate [J]. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2023, 26(17): e202300073. ■

(上接第 33 页)

- [23] Volland S, Lütz C, Michalke B, *et al.* Intracellular chromium localization and cell physiological response in the unicellular alga *Microcystis* [J]. *Aquatic Toxicology*, 2012, 109: 59–69.
- [24] Victoria A J, Cao E, Salmaso N, *et al.* Draft genome sequence of the cadmium-resistant strain JJU2, belonging to the family Hapalosiphonaceae of the cyanobacteria [J]. *Microbiology Resource Announcements*, 2018, 7(8): e00876–18.
- [25] Blaby-Haas C E, Merchant S S. The ins and outs of algal metal transport [J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*, 2012, 1823(9): 1531–1552.
- [26] Sánchez-Riego A M, López-Maury L, Florencio F J. Genomic responses to arsenic in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803 [J]. *PLoS One*, 2014, 9(5): e96826.
- [27] Lee L, Hsu C Y, Yen H W. The effects of hydraulic retention time (HRT) on chromium(VI) reduction using autotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2017, 40(12): 1725–1731.
- [28] Wang Z, Luo Z, Yan C. Accumulation, transformation, and release of inorganic arsenic by the freshwater cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(10): 7286–7295.
- [29] Chaudhary R, Nawaz K, Khan A K, *et al.* An overview of the algae-mediated biosynthesis of nanoparticles and their biomedical applications [J]. *Biomolecules*, 2020, 10(11): 1498.
- [30] Mahawar H, Prasanna R, Singh S B, *et al.* Influence of silver, zinc oxide and copper oxide nanoparticles on the cyanobacterium *Calothrix elenkinii* [J]. *BioNanoScience*, 2018, 8(3): 802–810. ■