

微藻生物质修复水体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:系统综述了微藻生物质修复水体重金属的研究进展,重点分析了 pH、温度、生物质浓度、初始金属浓度、接触时间及共存离子等因素对去除效果的影响,深入探讨了微藻在重金属胁迫下的生理生化适应机制及其解毒机理。在此基础上,总结了微藻固定化、功能化改性、微藻联合体及基因工程等强化技术的优势与局限。最后,针对当前微藻修复重金属实际应用所面临的挑战提出了未来的研究建议,以期为该技术的规模化发展提供理论基础和技术参考。

关键词:微藻;重金属污染;修复;因素;机制

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)09-0073-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.014

Research progress on the remediation of heavy metal-contaminated water by microalgal biomass

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 systematically reviews recent advances in the use of microalgal biomass for the remediation of heavy metal-contaminated water, with a focus on the influence of key factors—such as pH, temperature, biomass concentration, initial metal concentration, contact time, and coexisting ions—on removal efficiency. It also delves into the physiological and biochemical adaptation mechanisms of microalgae under heavy metal stress and their detoxification processes. Furthermore, the advantages and limitations of various enhancement strategies, including microalgal immobilization, functional modification, microbial consortia, and genetic engineering, are summarized. Finally, future research directions are proposed to address the current challenges in the practical application of microalgae-based heavy metal remediation, aiming to provide a theoretical foundation and technical reference for the scalable development of this technology.

Key words: microalgae; heavy metal pollution; remediation; factors; mechanisms

自工业革命以来,随着人口的快速增长和城镇化进程的持续推进,工业污染、农业面源污染和城市生活污染不断加剧,由此引发的重金属污染问题已成为制约人类社会可持续发展的重要因素。重金属具有来源广、毒性强、难以生物降解等特点^[1],可通过水体中的初级生产者沿着食物链传递被人体吸收和积累,导致人体出现生长发育迟缓、骨质疏松、肺功能不全等多种疾病,并增加患癌风险。因此,如何减少重金属污染和降低对人体健康和生态平衡构成的威胁,长期以来是科研人员们研究的热点。

微藻是一类在自然界中普遍存在、种类丰富的微生物,具有繁殖速度快、生长要求低、环境适应性强等特点^[2]。同时,作为水生生态系统的主要初级生产者,微藻在能量流动、物质循环和信息传递等方面发挥着重要作用。近年来,越来越多的研究证实微藻可作为生物吸附材料用于去除水中重金属^[3]。然而,目前关于微藻修复水体重金属的综合评述仍

较为缺乏,尤其是在影响因素、作用机制及技术强化等方面的深入分析尚不完善。为此,本文中综述了微藻生物质去除重金属污染的利用现状并分析了其影响因素,讨论了重金属胁迫下微藻的适应和解毒机理及其吸附吸收作用机制,同时针对现阶段规模化应用存在的问题提出了未来研究方向,以期基于微藻生物质修复水体重金属污染的大规模应用研究提供科学依据和借鉴参考。

1 废水中重金属的去除

废水中的重金属因来源广泛、成分复杂和迁移能力强等导致处理难度大、效果不理想。常见的处理方法有化学沉淀、吸附、离子交换、混凝-絮凝、电化学等,如表1所示,这些方法在适用范围、去除效果、成本等方面均存在一定的缺陷或不足。相较于传统修复技术,微藻具有高效、成本低、操作方便、环保等优势,在重金属修复领域具有较大潜力。研究

收稿日期:2025-11-03;修回日期:2026-07-03

基金项目:江西省重点研发项目(JXNK202307-05);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,研究方向为水环境保护与土壤修复等,通讯联系人,zchh3366@163.com。

表明,在静态吸附 8 d 条件下,微藻 (*Parachlorella kessleri Bh-2*) 对 Cd 和 Cr 的去除分别能达到 89.0%

和 96.15%^[4]。Pradhan 等^[5]发现栅藻 (*Scenedesmus sp.*) 能去除溶液中 92.89% 的 Cr。

表 1 废水重金属修复技术

修复技术	适用范围	成本	优势	不足
化学沉淀 ^[6]	高浓度废水	低	操作简单、材料易获取	产生大量污泥、对低浓度废水效果差、需后续处理
吸附 ^[7]	低浓度废水	低	灵活高效、材料多样、易操作	部分吸附剂成本高、再生困难、选择性差
离子交换 ^[8]	微量重金属废水	高	去除率高、选择吸附性强、可回收	树脂易污染、需频繁再生
重金属				
混凝-絮凝 ^[9]	含悬浮物和胶体的重金属废水	较低	操作简单、可同时去除悬浮物	需大量化学药剂、产生污泥、对溶解态金属效果差
离子浮选 ^[10]	高浓度重金属废水	高	选择性高、能耗低、污泥量少	需投加表面活性剂、操作复杂、成本较高
膜过滤 ^[11]	高纯度出水需求,特定离子分离	高	高效、选择吸附性强	膜污染严重、能耗高、维护成本高
电化学 ^[12]	高附加值金属回收	高	选择性高、无需化学药剂、可回收	能耗高、电极成本高、对复杂废水适用性差
金属				

Cheng 等^[13]对比了活性和失活普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 对 Cd(Ⅱ) 的去除能力。结果显示,二者对 Cd(Ⅱ) 的去除率都超过 90%,其中失活藻细胞的去除率甚至比活细胞高 1.6%,这可能是因为失活藻细胞不受重金属毒害的影响。值得注意的是,利用微藻生物质修复水体重金属污染效果受多种环境因子影响。

2 微藻生物质去除重金属的主要影响因素

2.1 pH

微藻去除重金属的过程非常复杂,其中 pH 是决定去除效果的关键性因素之一。研究证实,pH 变化显著影响溶液中金属离子的电离和藻类吸附剂的表面电荷^[14]。在强酸环境中,生物吸附剂表面的官能团会被大量水合 H⁺ 离子包围,导致可用于结合金属离子的有效活性位点被占据,吸附容量降低。同时,由于 H⁺ 离子与目标金属离子具有同种电荷,两者之间会产生静电排斥,进一步阻碍了重金属离子与吸附剂活性位点的有效接触。相反,当提高体系 pH 时,OH⁻ 离子浓度增加会导致细胞表面活性位点去质子化,从而促进金属离子吸附性能提升。Lekshmi 等^[15]研究发现,在生物用量 0.4 g、接触时间 40 min 和初始金属浓度 30 mg/L 条件下,绿藻 (*Ulva flexuosa*) 在 pH=4 时对 Cd²⁺ 的吸附能力最强,去除率达到 (94.8 ± 3.3)%,较 pH=3 时提高 99.32%。此外,Langmuir 等温线常数 R² 达到 0.980,表现出良好的吸附性能。通常情况下,中性或弱酸环境最有利于金属离子的吸附,原因是微藻的位点零电荷多位于 pH 4.0~6.1 之间。

2.2 温度

多数研究表明,微藻在温度 20~35℃ 范围内去

除重金属的效率最高。Verma 等^[16]发现丝状褐藻 (*S.filipendula*) 对 Cd 的吸附随温度的上升而增加,在 35℃ 时达到最大吸附量 103.5 mg/g,这表明微藻对金属的吸附是一个吸热过程。适当升高温度能够增强微藻对重金属的吸附性能,原因是温度升高可提高微藻表面活性位点数量及其反应活性,同时促进孔隙结构的扩张,并减小界面处的扩散边界层厚度。此外,温度升高可增加重金属的溶解度以及迁移扩散速率,从而促进重金属的生物可利用性。然而,高温容易导致官能团键断裂而使活性位点失活,同时降低金属离子与位点间的吸附引力,从而引发解吸现象。

2.3 生物质浓度

在特定重金属浓度下,提升生物质投加量可提供更多用于结合的官能团,从而增强重金属的整体去除率。Foroutan 等^[17]研究了褐藻 (*Padina sanctae-crucis*) 生物质质量对重金属去除效率的影响,结果表明,在 1~7 g/L 范围内,Cu²⁺ 和 Co²⁺ 的去除率会随着生物质投加量的增加而增加,并在 4 g/L 达到最大值,继续增加投加量,重金属去除率呈现下降趋势。此现象可归因于过量生物质容易形成细胞聚集体而产生“外壳效应”,不仅减少了有效吸附面积,而且通过调节 pH 至等电点抑制了配合物生成,从而使总体去除率降低。此外,生物质浓度增加会降低单位藻细胞的吸附量。Gong 等^[18]发现,随着螺旋藻 (*Spirulina maxima*) 生物质投加量从 0.1 g/L 升高至 20 g/L,其对铅的吸附能力明显减弱,单位吸附量由 121 mg/g 降至 21 mg/L。

2.4 初始金属浓度和类型

作为金属离子与微藻间传质过程的关键驱动力,重金属浓度变化直接影响吸附容量及去除效率,

其中一个重要原因是微藻细胞表面分布有多种功能基团,这些基团对离子不同浓度时的结合能力有所差别。低亲和力基团在金属浓度较高时发挥吸附作用,高亲和力基团则在低浓度条件下更易与金属离子结合。Rezaei^[19]考察了螺旋藻(*Spirulina* sp.)对Cr离子的吸附特性,发现在10~100 mg/L范围内随着初始Cr浓度的增加,吸附容量也在增加,当Cr浓度为100 mg/L时,螺旋藻对Cr的吸附容量达到最大值59.57 mg/g,然而去除效率却与之相反。这主要是由于微藻表面活性位点的数量和比例有限,无法与过高浓度的离子实现充分结合;同时,浓度超过微藻耐受毒性阈值时,会抑制其生理活性、延缓生长甚至导致细胞死亡,从而进一步削弱整体去除率。此外,不同重金属的电负性、水解常数和离子半径不同,而这些也是影响其与微藻结合的关键因素。电负性决定金属-配体键的共价性程度,电负性越高,与藻类表面官能团的电子云重叠越显著。对于水解常数较高的金属离子(如 Fe^{3+} , $\log K_h = 2.19$),其在水中更易形成羟基配合物,从而有助于与生物吸附剂表面发生静电吸引。而离子半径较小的金属具有更强的扩散动力学优势,可快速占据吸附位点,因此 Ni^{2+} (离子半径0.69 Å)比 Cd^{2+} (0.95 Å)和 Cu^{2+} (0.73 Å)在吸附位点上具有更高的亲和力。

2.5 接触时间

接触时间与重金属离子的生物吸附密切相关。微藻生物吸附过程可分为2个阶段:①快速吸附,金属离子吸附量在较短时间内迅速增加。②吸附平衡,一定时间后生物吸附和解吸速率将相等,重金属吸附量趋于稳定。Lieswito等^[20]使用固定化混合微藻在180 min内可去除96.4%的 Cu^{2+} ,而普通小球藻(*C. vulgaris*)在初始5 min内则可以摄取超过90%的溶解铀^[21]。这些结果表明,吸附过程初期微藻表面具有大量未被占据的活性位点,重金属离子间尚未发生竞争或置换作用;而随着吸附进行,离子逐渐向藻细胞表面扩散并结合,可用位点不断减少,导致吸附速率下降并最终达到平衡。

2.6 离子体系的存在

通常情况下,废水中存在多种阴离子和阳离子,这给重金属的藻类吸附带来更多复杂性。Kaewsarn等^[22]研究若干阴离子对 Cu^{2+} 生物吸附的影响,发现在EDTA、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 和 CO_3^{2-} 存在的情况下,海藻(*Durvillaea potatorum*)对 Cu^{2+} 的积累均有所降低,这可能是由于离子强度效应,或生成的沉淀物和配合物覆盖藻类表面,从而堵塞了吸附位点。其他阳离

子(包括金属离子)的存在同样会影响微藻对目标金属的吸附,这是因为金属离子会竞争生物吸附剂表面上的活性位点,浓度和亲和力高的重金属离子会优先吸附到结合位点。此外,与单一金属相比,多种金属的存在对微藻的总吸附能力也会造成影响。Mokone等^[23]发现,当从单金属体系转为多金属体系时,固定在藻酸盐珠中的微藻最大生物吸附量由9.812 mg/g降至6.855 mg/g;而硅胶固定化微藻的吸附效率下降更为显著,降幅高达40%。

3 微藻对重金属的适应和解毒机制

3.1 适应机制

微藻作为水生生态系统的关键组成部分,在长期进化过程中形成了一系列应对重金属胁迫的复杂响应机制,体现在生理、生化等多个层面的适应性变化上。在生理层面,微藻通过多层次的形态重塑与超微结构重构实现对毒性环境的有效适应。在生化层面,微藻通过激活抗氧化系统和调节代谢以应对重金属胁迫。重金属胁迫诱导产生的活性氧(ROS)会抑制微藻的光合作用,破坏蛋白质、脂质、DNA和其他生物分子的结构和功能,导致细胞和细胞膜完整性受损,甚至死亡。为清除ROS,微藻激活酶促抗氧化物质(如超氧化物歧化酶SOD、过氧化氢酶CAT)和非酶促抗氧化物质(如谷胱甘肽GSH、类胡萝卜素)来保护细胞免受氧化损伤。此外,非酶类抗氧化剂谷胱甘肽和抗坏血酸(ASC)通过促进抗氧化物质合成、与重金属离子直接结合或辅助抗氧化酶的催化反应等可进一步提升微藻的抗氧化能力。值得注意的是,有研究发现螺旋藻(*Spirulina platensis*)在 Zn^{2+} 作用下,饱和与多不饱和脂肪酸比例则会增加^[24],而普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)在 Cd^{2+} 胁迫下出现三酰甘油减少和总脂质含量增加^[25],这些现象表明微藻还能通过调节代谢来响应重金属胁迫。

3.2 重金属去除与解毒机制

大量研究表明,细胞表面吸附是去除重金属的主要过程,细胞壁中的多糖、蛋白质和脂质成分富含羧基、羟基、氨基等官能团,这些基团能与重金属离子发生静电吸附、络和、离子交换、配位结合等作用,并阻止其进入细胞内部。此外,微藻分泌的富含糖醛酸的胞外多糖是一种复杂的阴离子配合物,通过与重金属离子的结合来减少其进入胞内的数量。因此,表面吸附构成了微藻抵抗重金属毒害的第一道防线。然而,有些重金属离子具有亲水性,可通过由

特定转运蛋白介导的亲脂性生物膜的运输进入细胞内并产生毒害作用。此外,重金属引起的渗透压过大时会增加细胞膜的通透性,使得重金属离子也可通过自由扩散的方式进入藻细胞。在此情况下,酶促产生的植物螯合素和基因编码的金属硫蛋白会与重金属结合,形成的复合物最终被运输到多磷酸体、叶绿体、液泡等细胞器进行隔离或排出细胞。因此,如图 1 所示,微藻表面吸附与细胞内积累共同构成了对重金属的去除与解毒机制。

4 微藻修复重金属技术强化

近年来,随着微藻修复水体重金属污染研究的深入,涌现出不少微藻强化技术以提升重金属修复效能。如表 2 所示,尽管这些强化技术显著提升了微藻修复重金属的效率,但在考虑实际工程应用时,

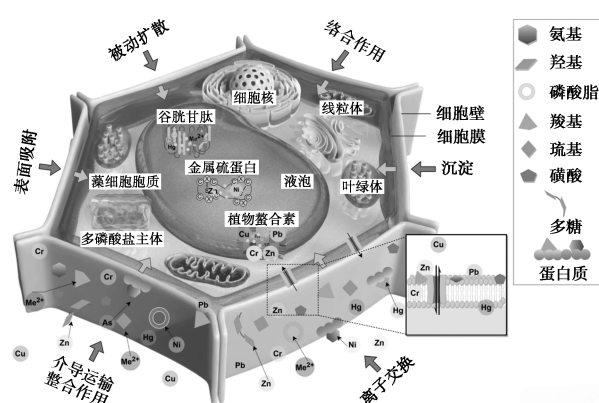


图 1 重金属去除与解毒机制

必须综合评估各类技术在经济成本、操作难度和生态安全等方面面临的挑战。未来的研究应致力于克服这些技术瓶颈,以实现该技术从实验室研究到规模化工程应用的高效转化。

表 2 微藻修复重金属强化技术对比分析

技术类型	技术原理	成本	操作难度	优势	挑战
微藻固定化 ^[26]	通过物理包埋或化学交联将藻细胞固定在多孔载体内部或表面	中等偏高	中等	操作稳定性与重复利用性提升,易于固液分离,细胞对恶劣环境的耐受能力增强	传质限制较大,且载体材料在长期运行中的机械与化学稳定性是主要制约因素
微藻功能化 ^[27]	通过化学修饰或复合纳米材料,在藻体表面引入特异性官能团	中等偏高	高	对目标重金属的吸附容量与选择性增强,实现性能的定向强化	涉及复杂的化学合成过程,可能引发环境二次污染,且改性材料的长期稳定性与生物相容性有待评估
微藻改性 ^[28]	通过物理或化学方法预处理生物物质,破坏细胞结构	中等偏低	较低	方法简便、成本较低,能有效增大比表面积并暴露更多结合位点	仅限于非活性吸附,失去了持续生物修复的潜力,且预处理过程可能产生二次废物
微藻联合体 ^[29]	构建微藻-细菌等微生物共生系统	中等偏低	高	微生物协同提升系统稳定性与综合修复效能,有助于实现多污染物同步去除	群落结构控制复杂,培养条件优化困难,在实际环境中维持功能稳定性难度较大
微藻基因改良 ^[30]	通过基因工程手段强化藻类的耐受与富集能力	高	高	从根源上赋予微藻超强的修复潜力,为实现精准、高效的“设计型”修复提供了可能	存在生态安全风险,技术门槛极高

5 结论与展望

作为一种高效、环保、价廉且可持续的重金属污染修复方法,微藻在过去 10 年受到越来越多的关注。然而,实际规模化应用仍面临以下挑战。

(1) 不同微藻物种对重金属的耐受性差异显著,部分物种对重金属高度敏感,难以在污染环境中存活。此外,微藻对生长环境变化敏感,营养物质、温度、光照等都会影响微藻的生长,并且实际废水成分往往复杂,同样影响微藻对重金属的吸附和转化效率。

(2) 微藻死亡或代谢活动异常时,细胞内积累的重金属可能重新释放到水体中,造成二次污染。

(3) 微藻吸收重金属的分子机制(如离子通道

介导的跨膜运输、生物转化的酶促反应)尚未完全阐明,限制了通过基因工程优化微藻吸附性能的能力。

针对这一系列问题,建议未来从以下方面进行深入研究。

(1) 定向筛选和驯化对环境波动不敏感、富集力和抗逆性强的本地优势藻种,或利用基因工程改造藻株。同时,构建“藻-菌-真菌”功能协同的人工生态系统,通过微生物间的分工协作(如毒性还原、高效吸附、原位固定),实现对重金属污染的高效、稳定修复。

(2) 开展全生命周期评估(LCA),量化技术链的环境足迹,并制定生态风险预警模型。同时,开发高效低耗分离技术,研究天然有机絮凝剂、混凝剂、

磁性纳米颗粒等分离材料的应用潜力。

(3) 深度融合转录组、蛋白组等多组学技术,系统解析微藻吸收重金属的关键基因与蛋白作用机制,为遗传改良提供精确靶点;同时,大力发展人工智能学习模型,利用大数据预测修复性能、优化工艺参数并指导藻种设计,从而提升修复效率与技术的可行性,推动工程化应用进程。

微藻在水体重金属污染修复领域具有广阔的应用前景,未来也可积极探索将微藻修复技术引入传统工艺或者耦合其他技术,以发展出高效且经济的新型处理系统。

参考文献

- [1] Saravanan P, Saravanan V, Rajeshkannan R, et al. Comprehensive review on toxic heavy metals in the aquatic system; Sources, identification, treatment strategies, and health risk assessment [J]. Environmental Research, 2024, 258: 119440.
- [2] Elisabeth B, Rayen F, Behnam T. Microalgae culture quality indicators: A review [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2021, 41(4): 457–473.
- [3] Ethiraj S, Samuel M S. A comprehensive review of the challenges and opportunities in microalgae-based wastewater treatment for eliminating organic, inorganic, and emerging pollutants [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2024, 60: 103316.
- [4] Bauenova M O, Sadvakasova A K, Mustapayeva Z O, et al. Potential of microalgae *Parachlorella kessleri* Bh-2 as bioremediation agent of heavy metals cadmium and chromium [J]. Algal Research, 2021, 59: 102463.
- [5] Pradhan D, Sukla L B, Mishra B B, et al. Biosorption for removal of hexavalent chromium using microalgae *Scenedesmus* sp. [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 209: 617–629.
- [6] Shrestha R, Ban S, Devkota S, et al. Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105688.
- [7] Yang X, Wan Y, Zheng Y, et al. Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: A critical review [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 366: 608–621.
- [8] Fei Y, Hu Y H. Recent progress in removal of heavy metals from wastewater: A comprehensive review [J]. Chemosphere, 2023, 335: 139077.
- [9] Fu F, Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(3): 407–418.
- [10] Qasem N A A, Mohammed R H, Lawal D U. Removal of heavy metal ions from wastewater: A comprehensive and critical review [J]. Npj Clean Water, 2021, 4(1): 36.
- [11] Xiang H R, Min X B, Tang C J, et al. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review [J]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 49: 103023.
- [12] Li M, Chen N, Shang H, et al. An electrochemical strategy for simultaneous heavy metal complexes wastewater treatment and resource recovery [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(15): 10945–10953.
- [13] 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.
- [14] Znad H, Awual M R, Martini S. The utilization of algae and seaweed biomass for bioremediation of heavy metal-contaminated wastewater [J]. Molecules, 2022, 27(4): 1275.
- [15] Lekshmi R, Rejiniemon T S, Sathya R, et al. Adsorption of heavy metals from the aqueous solution using activated biomass from *Ulva flexuosa* [J]. Chemosphere, 2022, 306: 135479.
- [16] Verma A, Kumar S, Kumar S. Statistical modeling, equilibrium and kinetic studies of cadmium ions biosorption from aqueous solution using *S. filipendula* [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(3): 2290–2304.
- [17] Foroutan R, Esmaeili H, Abbasi M, et al. Adsorption behavior of Cu (II) and Co (III) using chemically modified marine algae [J]. Environmental Technology, 2018, 39(21): 2792–2800.
- [18] Gong R, Ding Y, Liu H, et al. Lead biosorption and desorption by intact and pretreated *Spirulina maxima* biomass [J]. Chemosphere, 2005, 58(1): 125–130.
- [19] Rezaei H. Biosorption of chromium by using *Spirulina* sp [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2016, 9(6): 846–853.
- [20] Lieswito N A, Rinanti A, Fachrul M F. Removal of heavy metal (Cu²⁺) by immobilized microalgae biosorbent with effect of temperature and contact time [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, 1402(2): 022106.
- [21] Vogel M, Günther A, Rossberg A, et al. Biosorption of U(VI) by the green algae *Chlorella vulgaris* in dependence of pH value and cell activity [J]. Science of the Total Environment, 2010, 409(2): 384–395.
- [22] Kaewsarn P, Yu Q, Ma W. Interference of co-ions in biosorption of Cu²⁺ by biosorbent from marine alga *Durvillaea potatorum* [J]. Environmental Engineering Science, 2001, 18(2): 99–104.
- [23] Mokone J G, Tutu H, Chimuka L, et al. Optimization and characterization of *Cladophora* sp. alga immobilized in alginate beads and silica gel for the biosorption of mercury from aqueous solutions [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2018, 229(7): 215.
- [24] Zhou T, Wang J, Zheng H, et al. Characterization of additional zinc ions on the growth, biochemical composition and photosynthetic performance from *Spirulina platensis* [J]. Bioresource Technology, 2018, 269: 285–291.
- [25] Yang J S, Cao J, Xing G L, et al. Lipid production combined with biosorption and bioaccumulation of cadmium, copper, manganese and zinc by oleaginous microalgae *Chlorella minutissima* UTEX2341 [J]. Bioresource Technology, 2015, 175: 537–544.
- [26] Barquilha C E R, Cossich E S, Tavares C R G, et al. Biosorption of nickel (II) and copper (II) ions in batch and fixed-bed columns by free and immobilized marine algae *Sargassum* sp. [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 150: 58–64.
- [27] Jiang X, Zhou X, Li C, et al. Adsorption of copper by flocculated *Chlamydomonas microspheara* microalgae and polyaluminium chloride in heavy metal-contaminated water [J]. Journal of Applied Phycology, 2019, 31(2): 1143–1151.
- [28] Pham B N, Kang J K, Lee C G, et al. Removal of heavy metals (Cd²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Pb²⁺) from aqueous solution using *Hizikia fusiformis* as an algae-based bioadsorbent [J]. Applied Sciences, 2021, 11(18): 8604.
- [29] Yang X, Zhao Z, Yu Y, et al. Enhanced biosorption of Cr(VI) from synthetic wastewater using algal-bacterial aerobic granular sludge: Batch experiments, kinetics and mechanisms [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 251: 117323.
- [30] Piña-Olavide R, Paz-Maldonado L M T, Alfaro-De La Torre M C, et al. Increased removal of cadmium by *Chlamydomonas reinhardtii* modified with a synthetic gene for γ -glutamylcysteine synthetase [J]. International Journal of Phytoremediation, 2020, 22(12): 1269–1277. ■