

微生物修复水体重金属技术研究进展

蒋梦雨¹ 冯英杰² 杨多江² 刘少敏¹

1 安徽理工大学地球与环境学院 2 淮河能源集团张集煤矿

DOI:10.12238/eep.v7i4.2046

[摘要] 随着我国工业化飞速进步与发展,河湖水体重金属污染越来越严重,如何高效处理含有重金属污染的水体,已成为当前重要研究内容,生物修复水体重金属污染因高效、低成本和环保等优点逐渐走进人们的视野。该文对重金属污染的生物修复处理技术原理进行了简单的论述,分析了微生物法治理的作用以及新兴的一种微藻-真菌/细菌共生系统,扩展了对整体生物学方法和重金属污染后果的未来进展的分析。

[关键词] 微生物; 重金属; 修复技术; 共生系统

中图分类号: F416.41 文献标识码: A

Research progress of microbial heavy metal technology in water

Mengyu Jiang¹ Yingjie Feng² Duojiang Yang² Shaomin Liu¹

1 School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology

2 Zhangji Coal Mine, Huaihe Energy Group

[Abstract] With the rapid progress and development of China's industrialization at the same time, the heavy metal pollution of river and lake water bodies is also becoming more and more serious, how to efficiently deal with water bodies containing heavy metal pollution has become an important part of the current research, bioremediation of heavy metal pollution in water bodies due to the advantages of high efficiency, low cost and environmental protection has gradually come into people's view. The paper briefly discusses the principles of bioremediation treatment technology for heavy metal pollution, analyzes the basic principles and developmental overview of microbial method of governance, as well as an emerging microalgae-fungi/bacteria symbiotic system, and also extends the analysis of the overall biological approach and the future progress of the consequences of heavy metal pollution.

[Key words] Microorganisms; heavy metals; remediation technologies; symbiotic systems

引言

重金属是水环境中严重污染物,因其毒性和在环境中的持久性和生物蓄积性,不仅会对生态环境造成破坏,也对人体健康产生威胁^[1]。相对于现在主要运用的重金属污染处理的方法,寻求一种更有效方法成为了必然趋势。到目前为止,用于处理修复水体重金属离子已经形成了一系列传统的方法,这些方法包括混凝、超滤、电渗析、蒸发回收、絮凝、离子交换、纳滤和反渗透。这些技术旨在通过采用各种机制(例如形成固体颗粒、电分离、蒸发、过滤和吸附)来减少或消除重金属污染。每种方法都有其特定的优点和局限性,但总的来说,它们会产生二次污染为环境治理问题带来不便^[2,3]。然而生物修复是一种利用自然生物机制,通过微生物、植物、细菌、真菌和藻类的共同作用,利用这些生物体将水体中有害污染物转化为无毒化合物,最终目标是将受污染的场地恢复到原始状态,而不会对环境造成任

何额外的危害,这是环境科学的一个有希望的发展^[4,5]。

1 微生物修复重金属技术的基本原理

一种被称为生物修复的方法用于从受损的水体中清除有害污染物。这可以通过将污染物转化为危害较小的元素或完全消除它们来实现。无论是活的还是死的,生物物质都可以用来分解和改变分解成无害物质的物质。正在处理的介质类型(土壤或水)决定了生物修复技术,可以是就地也可以是异地^[6]。其中原位修复和异地生物修复是两种主要的生物修复技术。异地生物修复需要从场地中提取受污染的介质,随后在另一个地方进行修复,而原位生物修复涉及对受污染场地直接进行处理^[7]。

近年来,生物修复治理技术因为比较环保且一定方法下可以循环使用,能够节约成本且反应处理时间快。所谓微生物修复技术就是在恰当的环境或者条件下,应用不同的微生物去针对治理相关的重金属污染。主要应用的种类为细菌、真菌和藻类

等微生物。重金属离子一般具有很大的毒性,微生物的类型不同对重金属离子毒性的耐性一般也不同。正常情况下顺序为:放线菌<细菌<真菌^[8]。

1.1 生物吸附

生物吸附是通过使用菌类或藻类等生物物质从流体中去除重金属的过程^[5],利用微生物细胞表面对重金属的吸附性质对重金属物质进行吸附是水体污染处理方式中效果非常显著的一种方式。其中微生物种类繁多,包括众多藻类、细菌和真菌等微生物^[9]。

水体中的重金属离子中绝大多数为阳离子,而微生物中所包含的离子更多的为阴离子,会对阳离子造成吸引,在这一过程中,随着阳离子的聚集会逐渐形成重金属的阳离子核,不断吸引更多的有害金属物质。利用细胞表面对重金属进行吸附的技术在具体的应用中具有更好的普适性,微生物中的阴离子对绝大多数的阳离子都能够产生明显的吸附作用。此外,微生物细胞壁中,带有具备一定活性的分子结构,这种特征下,能够实现重金属离子向细胞表面的良好整合,最终起到较好的吸附作用^[10]。生物吸附在去除或回收重金属方面的实际应用主要是由于这一过程的可逆性^[11]。

1.2 生物转化

微生物具有很强的转化作用,其中包括对重金属的生物氧化还原作用、甲基化或去甲基化反应等,并且能够溶解重金属和有机络合物发生配位降解反应^[12],从而使重金属得到转化。转化后的重金属会被降低毒性,以达到微生物净化水体的目的。如从制革厂下水道分离的革兰氏阳性细菌,导致高毒性铬(VI)还原成毒性较低的铬(III),使其可以从环境中去除^[13]。

1.3 生物蓄积

生物蓄积是指生物体积积累重金属或其他污染物的现象。该过程由代谢过程驱动,涉及生物吸附剂对金属离子的吸收,然后进入细胞间水平的活细胞内并积累^[14]。例如,生物沉淀和生物结晶由于微生物的活动,重金属化合物可能会发生沉淀或结晶,这使得金属有节制地转化为形态,从而降低了它们的毒性。同一时间,一些沉淀和生物结晶过程参与生物地球化学循环,如形成微体化石、铁和锰的沉积以及银和锰的矿化。金属在细胞表面或内部的沉淀不仅可能是酶的直接活性的结果,也可能是次生代谢物半乳糖化的结果^[15]。

2 微生物在修复中的作用

2.1 放线菌对重金属污染的修复作用

一般而言,放线菌的种类和数量较多,并且广泛分布于水、土壤和植物表面且适应性强,放线菌包括表型多样的生物,具有从球菌到高度分化的菌丝体和孢子的各种形态,这可能有利于长距离传播^[16],再加上放线菌能够释放出絮状活性分泌物,进而与重金属离子产生反应,最终使重金属离子的含量有所降低^[17]。链霉菌属(*Streptomyces*)是土壤细菌和放线菌中最丰富的属^[18],能够产生多种金属离子螯合剂,以防止不需要的重金属对特定金属吸收的代谢过程的负面影响^[19],还产生胞外聚合

物(EPS)^[20],同时链霉菌在聚合大分子的碳循环中也起着重要作用^[21]。

2.2 细菌对重金属污染的修复作用

细菌在处理重金属离子污染的作用更加着重表现在吸收和聚集上,究其原因这是由于细菌的细胞表面具有与其他微生物明显不同的结构,它能够利用自身的细胞壁去对重金属离子进行聚集,且这种吸附聚集能力较为稳定,可以达到长期吸附的效果。Mosa等人^[22]使用细菌物种如黄杆菌属、假单胞菌属、肠杆菌属、杆菌属和微球菌属对几种重金属进行了测试,它们强大的生物吸附能力是由于它们高的表面积-体积比和细胞壁上潜在的活性化学吸附位点(磷壁酸)。Sannasi等人^[23]发现当细菌在混合培养物中时,它们更稳定并且存活得更好。

2.3 真菌对重金属污染的修复作用

西方国家的相关专家,早在19世纪就对真菌修复方式进行研究,得出其能够有效治理土壤重金属离子污染问题。通过实际研究发现^[24],真菌自身的对抗性是修复金属离子的主要原因,随后,许多专家学者也在他们的研究中证明了这一论点,认为真菌对重金属离子具有耐受力。当前更多的专家学者在研究中采用的是青霉菌、黑曲菌等真菌,利用显微技术和生物形态学技术,得知真菌在吸附铅离子后,自身形态会发生变化,这样可以降低铅离子的含量,会有一些铅离子沉淀于溶液中,这种吸附方法能更有效地降低铅、汞的排放,达到较好的重金属污染治理效果^[25]。

2.4 微藻对重金属污染的修复作用

在水体环境中,大多适合于藻类的生长和繁殖,因此,利用藻类来处理水体重金属污染会取得十分理想的效果,这种方式也是较为常见的一种。藻类因其较高的重金属富集能力和优良的再生特性,在重金属污染治理和贵金属回收方面显示出巨大的优势。藻类修复是利用各种类型的藻类和蓝细菌通过去除或降解有毒物质来修复重金属^[26]。多数藻类均属于光合自养型微生物且表面含有许多官能团(例如羟基、羧基、巯基和磷酸二酯基团),这些官能团可以为金属离子的结合提供吸附位点^[27],能够有效吸附重金属离子,起到较好的净化效果。

2.5 微生物共生系统对重金属污染的修复作用

2.5.1 微藻-真菌共生系统

丝状真菌和微藻可以形成真菌-微藻共生系统(FMSS),这是一种新型的固定化模式。在这个系统中,丝状真菌形成的小球可以将生物质作为载体^[28]。例如通过吸附和包埋固定在菌丝球表面和内部的微藻。丝状真菌在FMSS中的重要作用之一是作为载体材料来固定微藻。微藻和真菌共生可以提高生物量,降低培养成本。NH₃可以作为真菌的氮源,真菌代谢葡萄糖并释放CO₂,CO₂可以作为藻类的碳源促进光合作用,微藻光合作用的产物可以为真菌生长提供有机质和其他营养物质,真菌还可以通过保持水分来保护微藻免受强光伤害,并为微藻提供无机盐、矿质营养等营养物质^[29]。在收获和回收方面,真菌-微藻颗粒可以通过简单的过滤或机械打捞的方法去除,这可以有效地解决废水中微藻收获的问题。

由微藻和真菌组成的生物颗粒能有效去除水溶液中的重金属离子^[30]。一般来说,在微藻存在的情况下,重金属通过细胞壁上的初始快速吸附(生物吸附)被去除,随后缓慢运输并在细胞膜上(生物累积)。微藻去除重金属离子的主要机制主要依靠的就是生物吸附。微藻细胞壁上的化学基团为金属离子的吸附提供了场所。许多真菌最重要的特征是分泌有机酸。这创造了酸性条件,可能导致金属络合物的形成或刺激氧化还原导致有毒金属状态转化为毒性较低状态的反应^[31]。面对重金属离子的胁迫,微藻和真菌通过共生合作产生一系列主动防御机制来应对或减缓重金属离子对细胞的毒性。这些机制包括微生物产生的胞外聚合物(EPS)。EPS能够螯合和络合重金属离子,参与金属离子的絮凝和结合,在重金属的吸附中发挥重要作用,是影响吸附能力的关键因素。胞外多糖主要由胞外多糖、蛋白质、核酸和其他成分组成^[21]。胞外多糖富含带负电荷的官能团。去除重金属的能力与胞外多糖的含量有关。胞外蛋白在抵抗重金属毒害和维持细胞膜稳定性方面起着重要作用。EPS能够结合高水平的金属离子^[32]。

王俊军^[21]等人研究了烟曲霉和微藻的共生系统,研究表明共生体系具有较高的稳定性和较好的Cd(II)吸附效率,共生系统延长了微藻在海水中的生长周期吸附,最终发现胞外多糖和胞外蛋白在共生系统中对应对重金属胁迫和抵抗重金属毒害起着重要作用。在无真菌培养基和有真菌培养基的条件下,构建了菌丝球和不同浓度微藻的共生系统,比较了它们对Cd(II)的吸附行为。单个真菌菌丝球对Cd(II)的吸附效率很低,添加微藻后效率显著变高,在吸附过程中,溶液中没有离子回收,这表明真菌的存在可以显著增加共生系统对降低Cd(II)对微藻的毒性。在对抗毒性中,因为细胞机制会产生EPS应对毒性。

目前对重金属胁迫下真菌尤其是真菌与微藻共生系统胞外多、糖动态变化与吸附效果关系的研究较少,不利于阐明重金属胁迫下真菌-微藻共生系统胞外多糖的变化规律和机理,制约了具有高吸附性能和选择性的真菌-微藻共生系统的开发和工业化应用。

2.5.2 微藻-细菌共生系统

细菌和微藻可以形成细菌-微藻共生系统(AMSS), ABSS中微藻与细菌之间存在两种关系,协同促进和竞争抑制。协同作用是细菌和微藻之间的良性促进,这种组合可以提高彼此的加工效率^[33]。近年来,微藻及其与细菌的共生关系已被应用于处理重金属废水^[34]。相关研究表明,细菌与微藻的共生系统具有诸多优势,是当今备受关注的新型污水处理技术,满足了绿色低碳的处理方法^[33,35]。微藻是水生态系统中能够通过光合作用产生O₂的主要生产者之一产生碳水化合物、蛋白质、脂类、维生素、色素等代谢产物^[36]。细菌是原核生物,个体微小,结构简单,代谢快,繁殖快,广泛分布于陆地、海洋和湖泊^[37]。此外,细菌可以通过吸附和分解废水中的有机物和有毒物质来去除水体中的污染物^[38]。研究表明,细菌和微藻之间的相互作用在水生环境中普遍存在,包括共生、共栖、寄生、拮抗和捕食^[39]。

Sabeela Beevi Ummalyama, Anamika Singh等人^[16]研究了不同环境下的细菌和微藻之间形成的共生系统的稳定性。他们根据细菌来源,可将MBC分为三种类型,包括微藻相关细菌群落(MABC)、微藻活性污泥群落(MASC)和微藻已知细菌群落(MKBC)。MABC指的是将微藻直接应用于未消毒的废水,以形成自然MBC,其通常具有非常大的微生物群落结构。MASC通常用于城市污水处理,主要是因为活性污泥具有丰富的脱氮除磷细菌。相比之下, MKBC是一个由微藻和具有特定功能的已知细菌菌株组成的共生系统,其中包括抗污染物和促进生长的细菌。

在营养交换中,微藻在生长过程中向周围环境释放多种代谢产物,如多糖、氨基酸、酶和有机酸^[40]。这些物质可以被细菌利用,细菌释放有机营养物质、辅因子、维生素、螯合剂或植物激素来促进藻类的生长^[41]。此外,细菌产生的一些代谢产物可以抑制微藻的生长。细菌产生葡萄糖苷酶、几丁质酶和纤维素酶,它们参与藻类细胞的分解^[42],并通过分泌胞外代谢物如蛋白质、肽、生物碱、氨基酸、色素和脂肪酸化合物来抑制藻类生长^[43]。

石景欣^[44]等人研究发现在微藻-细菌共生系统中引入聚氨酯(PU)可以强化氮杂环化合物的降解,对喹啉和吡啶的降解具有较好的稳定性和较高的降解率。聚氨酯、聚氨酯-小球藻、聚氨酯-细菌和聚氨酯-小球藻-细菌的红外光谱。结果表明,聚氨酯-小球藻、聚氨酯-细菌和聚氨酯-小球藻-细菌表面含有丰富的官能团。还探索小球藻、细菌的作用及其协同作用对NHCs去除效率的影响,结果表明聚氨酯-小球藻-细菌降解率最高。还研究了不同操作下三者的协同降解作用,结果表明聚氨酯-小球藻-细菌最稳定且降解率最高,因为细菌保护了微藻,降低了重金属对微藻的毒性。

在共生系统的形成当中,影响重金属修复的参数包括环境因素,如pH、温度、腐殖酸和低分子量酸,它们可以改变金属离子的运输、价态和金属离子对微生物的生物利用率。通常来说在较低的pH值下,金属形成具有更多可用质子的自由离子种类,以使金属结合位点饱和。在较高的pH值下,吸附剂表面带正电荷,这减少了金属阳离子和吸附剂之间的相互作用。同时温度也影响了很多方面的因素,如:温度的升高影响重金属的溶解度温度还影响微生物的代谢和酶的活性,这将促进生物修复。因此在不同的环境下观察三种系统的重金属离子的处理效果更能探究共生系统的优点和缺点,和保证单一系统或者共生系统实现最大效率的条件。

3 未来的发展

生物膜是天然存在的微生物群落,具有出色的吸附能力。未来的发展可能包括制造具有特定特性的生物膜,以提高吸附效率、稳定性和抗污性。微流体、先进的生物反应器设计和微流体系统可以对流动力学、营养物质输送和微生物生长条件进行精细控制,从而获得更好的吸附性能。这些技术可实现连续高效的吸附过程。机器学习方法和计算机建模的集成有助于生物吸附系统的设计和优化。预测模型有助于研究吸附机理、优化操作参数以及预测各种污染物的吸附性能。生物修复的未来困

难包括处理发展中的污染物,提高复杂生态系统的有效性,以及扩大规模应用的方法。集中精力开发针对持久性有机污染物(POPs)和微塑料的生物修复技术尤为重要。此外,将生物修复与纳米材料和基因改造等未来技术相结合可以加速污染物分解。研究人员应专注于创建生物增强方法,将专门的细菌用于有针对性的污染物降解。学术界、工业界和政府之间的合作对于克服这些障碍和实现生物修复在有效解决环境污染方面的全部潜力至关重要。这些未来的发展有可能彻底改变生物吸附,从而实现更高效、可持续和更具成本效益的水和废水中重金属处理以及环境修复。跨学科的持续研究和合作对于实现这些突破并成功实施至关重要。

4 结束语

当前,在微生物修复水体重金属污染的研究具有十分广阔的发展前景与空间,同样在治理重金属污染上也是关键的一步。因为使用物理化学方法进行修复会造成二次污染并且能耗较高,所以利用生物修复技术已成为必然的趋势。其中微生物之间的共生系统的构建也成为当下的热门,具有单一微生物所不具备的更多功能,同时共生系统内部因素之间也能够相互促进净化水体功能的实现。同时在微藻-细菌(真菌)的共生体系中,添加合适的物质也可以提高水体中重金属离子的去除率。对水体重金属修复一定不是使用单一的方法,而是多种方法相结合,以达到省时省力高效的治理重金属污染的目的,还要选用合适的方法,尽可能的减少负面影响,实现可持续发展。

[参考文献]

[1]Anser,M. K.; Hanif, I.; Vo, X. V.; Alharthi, M. The long-run and short-run influence of environmental pollution, energy consumption, and economic activities on health quality in emerging countries. *Environmental Science and Pollution Research* 2020,27(26),32518-32532.

[2]Briffa,J.; Sinagra, E.; Blundell, R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon* 2020,6(9),e04691.

[3]Kapahi,M.; Sachdeva,S. Bioremediation Options for Heavy Metal Pollution. *Journal of Health and Pollution* 2019, 9 (24), 191203.

[4]Zhao,M.; Zhang, X.; Zhang, M.; Guo, J.; Zhang, J.; Zheng, G.; Feng,B.; Chen,Y. Bacterial and microalgal co-fixation for remediation of industrial wastewater contaminated with arsenic, mercury, and other pollutants. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2024,113099.

[5]Razzak,S.A.; Faruque,M. O.; Alsheikh, Z.; Alsheikhmohamad, L.; Alkuroud, D.; Alfayez, A.; Hossain, S. M. Z.; Hossain, M. M. A comprehensive review on conventional and biological-driven heavy metals removal from industrial wastewater. *Environmental Advances* 2022,7,100168.

[6]Ajiboye,T.O.; Kuvarega,A.T.; Onwudiwe,D.C. Recent Strateg

ies for Environmental Remediation of Organochlorine Pesticides. In *Applied Sciences*, 2020; Vol.10.

[7]Sharma,B.; Shukla,P. A comparative analysis of heavy metal bioaccumulation and functional gene annotation towards multiple metal resistant potential by *Ochrobactrum intermedium* BPS-20 and *Ochrobactrum ciceri* BPS-26. *Bioresource Technology* 2021,320,124330.

[8]王兴利.水生植物生态修复重金属污染水体研究进展. *环境污染与防治* 2020,42(1):6.

[9]焦迎迎,闫斐,吕淑华.微生物在重金属污染土壤修复中的作用[J]. *皮革制作与环保科技*, 2022,3(9):105-107.

[10]李司宇,刘雪,王文婧.微生物在重金属离子污染修复及治理中的应用研究[J]. *环境与可持续发展*, 2020,45(2):158-160.

[11]詹敬江.微生物修复技术在重金属污染治理中的应用研究[J]. *资源节约与环保*, 2017,(3):22,24.

[12]Medfu Tarekegn, M.; Zewdu Salilih, F.; Ishetu, A. I. Microbes used as a tool for bioremediation of heavy metal from the environment. *Cogent Food & Agriculture* 2020,6.

[13]刘晓.微生物技术在重金属污染土壤修复中的应用研究[J]. *现代农业研究*, 2022,28(6):25-27.

[14]Ray,S.; Vashishth, R. From water to plate: Reviewing the bioaccumulation of heavy metals in fish and unraveling human health risks in the food chain. *Emerging Contaminants* 2024,10(4),100358.

[15]Kisielowska,E.; Holda,A.A.; Niedoba, T. Removal of heavy metals from coal medium with application of biotechnological methods. 2010.

[16]Ummalyama,S.B.; Singh,A. Importance of algae and bacteria in the bioremediation of heavy metals from wastewater treatment plants. 2021.

[17]Sanglier,J.J.; Haag,H.; Huck,T.A.; Fehr, T. Novel bioactive compounds from Actinomycetes: a short review (1988-1992). *Res Microbiol* 1993,144(8),633-642.

[18]Locatelli, F. M.; Goo, K. S.; Ulanova, D. Effects of trace metal ions on secondary metabolism and the morphological development of streptomycetes. *Metallomics: integrated biometal science* 2016,85,469-480.

[19]Bérdy,J. Bioactive Microbial Metabolites. *The Journal of Antibiotics* 2005,58(1):1-26.

[20]Abbas,A.S.; Edwards,C. Effects of Metals on a Range of *Streptomyces* Species. *Applied and Environmental Microbiology* 1989,55,2030-2035.

[21]Wang,J.; Chen,R.; Fan, L.; Cui, L.; Zhang, Y.; Cheng, J.; Wu, X.; Zeng, W.; Tian, Q.; Shen, L. Construction of fungi-microalgae symbiotic system and adsorption study of heavy metal ions. *Separation and Purification Technology* 2021,268,118689.

- [22]Mosa,K.;Saadoun, I.; Kumar, K.; Helmy, M.; Dhankher, O. P. Potential Biotechnological Strategies for the Cleanup of Heavy Metals and Metalloids.Frontiers in Plant Science 2016,7.
- [23]Sannasi, P.; Kader, J.; Othman, O. M.; Salmijah, S. Single and Multi - Metal Removal by an Environmental Mixed Bacterial Isolate.2008.
- [24]Chaturvedi,M.Studies on Chromate Removal by Chromium-Resistant Bacillus sp. Isolated from Tannery Effluent. Journal of Environmental Protection 2011,2,76-82.
- [25]Zhao, W.-W.; Zhu, G.; Daugulis, A. J.; Chen, Q.; Ma, H.-Y.; Zheng, P.; Liang, J.; Ma, X.-k. Removal and biomineralization of Pb²⁺ in water by fungus *Phanerochaete chrysosporium*. Journal of Cleaner Production 2020,260,120980.
- [26]Anerao, P.; Kumar, H.; Kaware, R.; Prasad, K.; Kumar, M.; Singh,L.Algal-Based Biofuel Production: Opportunities, Challenges, and Prospects. In Bio-Clean Energy Technologies: Volume 1,Chowdhary,P.,Khanna,N., Pandit, S., Kumar, R. Eds.; Springer Nature Singapore,2022;pp155-180.
- [27]Guo,G.; Cao, W.; Sun, S.; Zhao, Y.; Hu, C. Nutrient removal and biogas upgrading by integrating fungal - microalgal cultivation with anaerobically digested swine wastewater treatment.Journal of Applied Phycology 2017,29 (6),2857-2866.
- [28]Bodin, H.; Asp, H.; Hultberg, M. Effects of biopellets composed of microalgae and fungi on cadmium present at environmentally relevant levels in water. International Journal of Phytoremediation2017,19,500-504.
- [29]Qian, X.; Fang, C.; Huang, M.; Acha, V. Characterization of fungal-mediated carbonate precipitation in the biomineralization of chromate and lead from an aqueous solution and soil. Journal of Cleaner Production 2017,164,198-208.
- [30]Park,D.;Yun,Y.S.;Jo,J.H.;Park,J.M.Mechanism of hexavalent chromium removal by dead fungal biomass of *Aspergillus niger*.Water research 2005,394,533-540.
- [31]Cui, L.; Fan, L.; Li, Z.; Wang, J.; Chen, R.; Zhang, Y.; Cheng, J.; Wu, X.; Li, J.; Yin, H.; et al. Characterization of extracellular polymeric substances from *Synechocystis* sp. PCC6803 under Cd (II),Pb(II) and Cr (VI) stress. Journal of Environmental Chemical Engineering 2021,9(4),105347.
- [32]Rizwan, M.; Mujtaba, G.; Memon, S. A.; Lee, K.; Rashid, N.Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018,92,394-404.
- [33]Li,L.;Liu,W.;Liang,T.; Ma, F. The adsorption mechanisms of algae-bacteria symbiotic system and its fast formation process. Bioresource Technology 2020,315,123854.
- [34]Li,L.-b.;Liu, B.-l.;Liu, W.-l.; Chiu, Y.-H. Efficiency evaluation of the regional high-tech industry in China: A new framework based on meta-frontier dynamic DEA analysis. Socio-Economic Planning Sciences 2017,60,24-33.
- [35]Leihui,X.;Qiaoyun,H.;Wenli,C. Bacterial bioremediation and bio-detection of heavy metal-contaminated environments. Chinese Journal of Applied Environmental Biology 2004, 10,256-262.
- [36]Ren, Y.; Hao Ngo, H.; Guo, W.; Wang, D.; Peng, L.; Ni, B.-J.; Wei, W.; Liu, Y. New perspectives on microbial communities and biological nitrogen removal processes in wastewater treatment systems. Bioresource Technology2020,297,122491.
- [37]Wang, Y.; Wang, H.; Wang, X.; Xiao, Y.; Zhou, Y.; Su, X.; Cai, J.;Sun,F.Resuscitation, isolation and immobilization of bacterial species for efficient textile wastewater treatment: A critical review and update. Science of The Total Environment 2020,730,139034.
- [38]Ramanan, R.; Kim, B.; Cho, D. H.; Oh, H.-M.; Kim, H.-S. Algae-bacteria interactions: Evolution, ecology and emerging applications. Biotechnology advances 2016,341,14-29.
- [39]Amin, S. A.; Parker, M. S.; Armbrust, E. V. Interactions between diatoms and bacteria. Microbiol Mol Biol Rev 2012, 76 (3),667-684.
- [40]Zhang, B.; Li, W.; Guo, Y.; Zhang, Z.; Shi, W.; Cui, F.; Lens, P.N.L.;Tay,J.H.Microalgal-bacterial consortia: From interspecies interactions to biotechnological applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2020,118,109563.
- [41]Ferrier,M.D.;Martin,J.L.;Rooney-Varga,J.N.Stimulation of *Alexandrium fundyense* growth by bacterial assemblages from the Bay of Fundy.Journal of Applied Microbiology 2002,92.
- [42]Mugnai,S.; Derossi, N.; Hendlin, Y. Algae communication, conspecific and interspecific: the concepts of phycosphere and algal-bacteria consortia in a photobioreactor (PBR). Plant Signaling & Behavior 2023,18.
- [43]Sun, R.; Sun, P.; Zhang, J.; Esquivel-Elizondo, S.; Wu, Y. Microorganisms-based methods for harmful algal blooms control: A review. Bioresource Technology 2018, 248,12-20.
- [44]Shi,J.;Zheng,M.;Zhang,Z.;Han,H.;Xu,C.Enhanced biodegradation of quinoline and indole with a novel symbiotic system of Polyurethane-chlorella-bacteria. Journal of Water Process Engineering 2020,37,101525.

作者简介:

蒋梦雨(1999--),女,汉族,安徽濉溪县人,硕士研究生,研究方向:水生态保护与修复研究。

通讯作者:

刘少敏(1972--),男,汉族,安徽宿松人,博士,安徽理工大学教授,研究方向:矿区水环境治理。