

张坤, 程健康, 王静, 等. 微生物絮凝剂去除水体中重金属的作用机理及影响因素研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(8): 11-21.

Zhang K, Cheng J K, Wang J, et al. Research progress of action mechanism and influencing factors of microbial flocculants for heavy metals removal in water bodies [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(8): 11-21.

微生物絮凝剂去除水体中重金属的作用机理及影响因素研究进展

张 坤¹, 程健康², 王 静^{1,*}, 刘 兵^{1,3,*}, 胡 杨⁴, 伊同跃¹

(1. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东济南 250101; 2. 上海大学生命科学学院, 上海 200444; 3. 山东建筑大学资源与环境创新研究院, 山东济南 250101; 4. 山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东济南 250101)

摘 要 【目的】微生物絮凝剂(MBFs)因其成本低、效率高和绿色环保等优势成为重金属废水处理领域的研究热点之一, 然而其详细作用机理以及影响因素等尚未阐明。为探索并补充上述理论的空缺, 本文系统总结了近年来相关领域的研究成果, 以期对 MBFs 的开发和利用提供依据。【方法】本文系统梳理 MBFs 的组成特性与功能差异, 深度解析其去除重金属的 6 类作用机理并明确主导机制, 结合现有研究数据分析 pH、温度、投加浓度及共存金属离子等关键影响因素, 界定各因素的最佳作用条件。【结果】多糖类 MBFs 因官能团丰富、稳定性优异成为当前最具应用潜力的 MBFs 类型; 通过电荷中和、吸附架桥、络合螯合和离子交换等机制协同作用实现水体中重金属高效去除; 环境因素直接影响絮凝效能, 弱酸性与温和温度(如 pH 值为 5~7、温度为 30~50 ℃)条件下可激发 MBFs 活性并保持稳定性, 投加浓度需匹配重金属浓度以避免活性位点被屏蔽, 部分金属阳离子可显著强化架桥作用, 二价阳离子(如 Ca^{2+})助凝效果最佳, 而 Fe^{3+} 易因过度中和或水解抑制絮凝效能。【结论】本文明确了 MBFs 的主要类型、主导絮凝机制及影响因素最佳参数范围, 可为重金属废水处理中的 MBFs 精准选型与工艺优化提供依据, 同时为脂质和核酸类 MBFs 开发、量化分析其作用机理与影响因素, 并建立相关数据库奠定理论基础。

关键词 重金属离子; 微生物絮凝剂; 组成成分; 作用机理; 影响因素

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)08-0011-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.08.002

Research Progress of Action Mechanism and Influencing Factors of Microbial Flocculants for Heavy Metals Removal in Water Bodies

Zhang Kun¹, Cheng Jiankang², Wang Jing^{1,*}, Liu Bing^{1,3,*}, Hu Yang⁴, Yi Tongyue¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. School of Life Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

3. Institute of Innovation in Resources and Environmental Innovation, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

4. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract [Objective] Microbial flocculants (MBFs) have been recognized as one of the research hotspots in the field of heavy metal wastewater treatment due to their advantages of low cost, high efficiency, and environmental friendliness. However, their detailed action mechanisms, influencing factors, and other related aspects have not been clarified yet. In order to explore and fill the gaps in the aforementioned theories, this paper systematically summarizes the research achievements in related fields in recent years, with the aim of providing a basis for the development and application of MBFs. [Methods] The compositional characteristics and functional differences of MBFs are systematically sorted out. Six types of action mechanisms for heavy metal removal are analyzed in depth, and

[收稿日期] 2025-09-06

[基金项目] 山东省自然科学基金(ZR2024ME129); 山东省交通设计集团 2023 年度科技攻关“揭榜挂帅”项目(鲁交设-KC.YS-2023-006); 山东环境科学学会课题(201417); 山东省高端人才项目支持计划(0031504)

[作者简介] 张坤(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水中重金属去除材料的开发与应用, E-mail: zhangk202607@163.com。

[通信作者] 王静(1978—), 女, 副教授, 研究方向为废水生物处理以及环境功能材料的开发与应用, E-mail: jwang@sdjzu.edu.cn;

刘兵(1982—), 男, 教授, 研究方向为环境模型开发与工艺模拟, E-mail: b-liu@sdjzu.edu.cn。

the dominant mechanisms are identified. Combined with existing research data, key influencing factors such as pH, temperature, dosage concentration and coexisting metal ions are analyzed. The optimal operating conditions for each factor are defined. [**Results**] Polysaccharide-based MBFs have become the most promising type of application at present due to their abundant functional groups and excellent stability. Efficient heavy metal removal is achieved through the synergistic effect of dominant mechanisms, including charge neutralization, adsorption bridging, complexation and chelation, and ion exchange. Environmental factors directly affect flocculation efficiency. A weakly acidic environment and a mild temperature range (e. g. , pH value is 5–7 and temperature is 30 –50 °C) can stimulate the activity of MBFs and maintain their stability. The dosage concentration needs to match the heavy metal content to avoid the shielding of active sites. Some metal cations can significantly enhance the bridging effect, among which divalent cations (e. g. , Ca^{2+}) have the best coagulation-aiding effect. However, Fe^{3+} is easily inhibited in terms of flocculation efficiency due to excessive neutralization or hydrolysis. [**Conclusion**] This paper clarifies the main types of MBFs, the dominant flocculation mechanisms and the optimal parameter ranges of influencing factors. It provides a basis for the accurate selection of MBFs and process optimization in heavy metal wastewater treatment. Meanwhile, it lays a theoretical foundation for the development of lipid-based and nucleic acid-based MBFs, the quantitative analysis of their action mechanisms and influencing factors, and the establishment of relevant databases.

Keywords heavy metal ion; microbial flocculants (MBFs); component; mechanism; influencing factor

近年来,随着全球城市化进程的加速和工农业的迅猛发展,水体污染问题日益严峻,其中以重金属污染最为突出。工业生产中排放大量的铬、镍、铜、铅等金属,这些重金属具有不可生物降解性和生物富集性^[1],经食物链累积后,不仅导致水生态系统失衡,更直接威胁人类健康,引发免疫系统紊乱、器官损伤甚至癌变^[2]。我国《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)^[3]和美国《综合环境反应、赔偿和责任法案》(CERCLA)^[4]等标准及法规,对废水中重金属浓度作出严格限制(如 Cd 的质量浓度 ≤ 0.1 mg/L; Cr^{6+} 的质量浓度 ≤ 0.5 mg/L),因此对重金属污染的治理迫在眉睫。目前,工业废水重金属去除主要方法有吸附法^[5-7]、膜法^[8]、化学法^[9]、电化学法^[10],但部分方法存在二次污染、成本高昂等问题,限制了其广泛应用。

不同于无机絮凝剂和高分子有机絮凝剂,微生物絮凝剂是一类由微生物菌体或其代谢产物组成的物质^[11],凭借高效、成本较低、可生物降解的特性,成为重金属废水处理的研究热点^[12]。作为生物制剂,微生物絮凝剂具有环境友好、菌种来源广泛且改良较易等优点^[13]。尽管微生物絮凝剂在绿色水处理中展现出巨大潜力,但其研究仍面临多重挑战:复杂污染体系下的协同机制尚未明晰,极端环境下的稳定性亟待提升。本文旨在系统梳理现有成果,并针对上述瓶颈提出未来研究方向,为微生物絮凝剂的实际应用提供理论支撑与技术路径。

1 微生物絮凝剂的分类、组成和性质

微生物絮凝剂具有丰富的官能团结构,能够与水中的重金属离子结合,降低水体重金属离子含量,从而起到净化水体的作用^[2]。基于发挥絮凝作用的化学组分,可以将其分为多糖类、蛋白质类、脂质类和核酸类。

1.1 多糖类微生物絮凝剂

多糖类微生物絮凝剂理化性质优异,具有良好的流变特性、反应活性和选择性^[14],是目前研究最多的一类微生物絮凝剂^[15]。多糖类生物絮凝剂之所以具有良好的絮凝性能,与多糖的结构和性质有关,其主要由葡萄糖、甘露糖等单糖,通过 α 或 β 糖苷键连接构成杂多糖或均聚物^[16-17],其中存在大量羟基、羧基和甲氧基等高反应性的基团及亲水基团^[18-19]。此外,多糖的线性或支链结构赋予其分子链柔性,实现重金属离子间的吸附架桥作用^[18]。多糖生物聚合物因其组成和性质,在水处理中表现出良好的絮凝性能^[20]。姜彬慧等^[21]分析确认类芽孢杆菌 A9 (*Paenibacillus* A9) 生产多糖类微生物絮凝剂 MBFA9 的成分为多糖,MBFA9 在羟基、酰胺基、羧基等官能团作用下,对 Pb^{2+} 去除效率达 98% 以上。Xia 等^[14]利用枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 制备多糖类微生物絮凝剂,在丰富官能团(羟基、羧基、磷酸基)的作用下,实现对 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的高效去除。

1.2 蛋白质类微生物絮凝剂

蛋白质和糖蛋白是蛋白质类微生物絮凝剂的主要成分,高蛋白含量为其提供了更加丰富的官能团

(羟基、羧基和胺基)结构,有利于去除水中重金属离子^[22]。同时,蛋白质对蛋白酶敏感,热稳定性较低。Liu 等^[23]培养大邱金黄杆菌 W6 (*Chryseobacterium daeguense* W6)分离得到新型细胞内生物絮凝剂 MBF-W6,纯化后分析该微生物絮凝剂主要成分为蛋白质。Mabinya 等^[24]分离并培养节杆菌属菌株 (*Arthrobacter* sp.) 生产生物絮凝剂,以乳糖和尿素为唯一碳源和氮源,控制培养基初始 pH 值为 7.0 并补充 Mg^{2+} ,确保处于最佳培养条件,所得絮凝剂主要由 56% 的蛋白质和 25% 的碳水化合物组成。Han 等^[25]培养得到主要成分为蛋白质的微生物絮凝剂 EPC-7,其具有羧基、羟基和氢键以及多孔结构,可通过架桥作用吸附更多的重金属离子。

1.3 脂质类和核酸类微生物絮凝剂

关于脂质类微生物絮凝剂的相关研究较少, Kurane 等^[26]培养红平红球菌 S-1 (*Rhodococcus erythropolis* S-1) 获得 1 种脂质生物絮凝剂,可经碱水解生成糖和脂肪酸^[27]。其主要活性成分为海藻糖二霉菌酸酯、葡萄糖单霉菌酸酯和海藻糖单霉菌酸酯,分子链具有羟基和羧基等活性官能团,在碱性条件下解离,与带正电的重金属阳离子通过静电力

结合。

核酸类生物絮凝剂的相关研究也较少,可能与其产量较低密切相关^[15]。在多数情况下,核酸仅作为 1 种低含量组分存在于其他类型的微生物絮凝剂中,如在胞外聚合物中,核酸组分的含量通常仅为 1% ~ 10%^[28]。Sakka 等^[29]利用盐酸胍 (*Pseudomonas* sp.) 处理得到 1 种具有絮凝活性的成分。试验证实,参与絮凝过程的物质为相对分子质量超过 6×10^6 的高度聚合双链脱氧核糖核酸 (DNA)。核酸中磷酸基团带负电,通过静电吸引力与重金属阳离子直接结合,同时,线性或分支结构可同时吸附多个重金属离子,通过吸附架桥促进重金属离子聚集,形成较大絮体。

2 微生物絮凝剂对重金属的去除机理

已有较多研究报道了微生物絮凝剂对水中重金属离子去除具有优异性能^[30-32],同时也探索了微生物絮凝剂的絮凝机理,微生物絮凝剂对水中重金属离子的去除机理十分复杂,有待进一步深入研究^[33]。微生物絮凝剂去除重金属离子的作用类型可分为 6 种:吸附架桥、网捕卷扫、电荷中和、络合和螯合反应、离子交换以及不完全中和沉淀(表 1)。

表 1 微生物絮凝剂对水体中重金属去除的絮凝机理和效果
Tab. 1 Flocculation Mechanism and Effect of Microbial Flocculants on Heavy Metals Removal in Water Bodies

作用类型	絮凝机理	菌种	絮凝剂	絮凝效果	参考文献
吸附架桥	微生物絮凝剂作为“桥梁”,同时结合多个重金属离子,形成大尺寸絮体	枯草芽孢杆菌 35A (<i>Bacillus subtilis</i> 35A)	多糖、蛋白质	Cr^{6+} 去除率为 41.05%	[34]
	通过“物理吸附-桥接-聚集”过程实现重金属离子的捕获与去除	巨大芽孢杆菌 PL8 (<i>Bacillus megaterium</i> PL8)	多糖	Pb^{2+} 去除率为 82.64%	[35]
网捕卷扫	形成微小絮体重力沉降,在沉降过程中卷扫水中的重金属离子形成更大絮体	阴沟肠杆菌 W (<i>Enterobacter cloacae</i> W)	多糖、蛋白质	Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 等去除率达 90% 以上	[36]
电荷中和	微生物絮凝剂带有与含重金属胶体颗粒相反电荷时,降低颗粒表面的 Zeta 电位,破坏颗粒稳定性	多粘类芽孢杆菌 GA1 (<i>Paenibacillus polymyxa</i> GA1)	多糖、蛋白质	Pb^{2+} 去除率为 99.85%	[37]
	絮凝剂表面负电基团与重金属阳离子发生静电中和,削弱颗粒间排斥力,促进初始团聚	假单胞菌 PR1 (<i>Pseudomonas</i> sp. PR1)	多糖、蛋白质、核酸	Pb^{2+} 去除率为 99.27%; Zn^{2+} 去除率为 92.98%	[38]
络合和螯合反应	功能性基团如羧基、羟基等,可以与重金属离子形成络合物而从溶液中分离	类芽孢杆菌 (<i>Paenibacillus</i> sp.)	肽聚糖、脂质	对 Pb^{2+} 的最高去除率可达 95.1%	[39]
	γ -PGA 对 Pb^{2+} 络合为单核双齿配位模式,理论上每个羧基可结合 0.5 个 Pb^{2+} (结构演化促进 COOH 与 Pb^{2+} 的结合)	地衣芽孢杆菌 ATCC 9945A (<i>Bacillus licheniformis</i> ATCC 9945A)	蛋白质、多肽	每个羧基结合 0.49 个 Pb^{2+}	[40]
	絮凝反应导致溶液 pH 值下降,絮凝剂表面的活性基团 H^+ 等,被金属离子置换,使金属离子被固定,进而随絮体去除	地衣芽孢杆菌 KX657843 (<i>Bacillus licheniformis</i> KX657843)	多糖、蛋白质和核酸	Zn^{2+} 去除率为 54.4%	[41]

(续表1)

作用类型	絮凝机理	菌种	絮凝剂	絮凝效果	参考文献
离子交换	溶液中重金属离子与质子竞争结合位点	嗜麦芽窄食单胞菌 (<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>)	肽聚糖、脂质	Cu^{2+} 吸附容量为 26 mg/g	[42]
不完全中和沉淀	重金属离子沉淀不完全,生物絮凝剂协同吸附游离重金属离子	多粘类芽孢杆菌 GA1 (<i>Paenibacillus polymyxa</i> GA1)	多糖	Ni^{2+} 去除率为 99.35%	[43]
	多种重金属离子与微生物絮凝剂发生絮凝,促使废水 pH 从酸性升至近中性,重金属离子与硫化物、碳酸盐结合沉淀	谷氨酸棒杆菌 Cg1-P30 (<i>Corynebacterium glutamicum</i> Cg1-P30)	多糖、蛋白质	对酸性矿山废水中 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的去除率均高于 70%	[44]

2.1 吸附架桥

微生物絮凝剂通过其分子链状结构上的多个吸附位点,同时结合溶液中重金属离子,形成“桥梁”产生连接作用,促使分散的重金属离子聚集形成大絮体^[45],从而实现对重金属离子的高效去除(图1)。姚敏杰等^[46]在试验中证明微生物絮凝剂对重

金属离子的去除主要通过吸附架桥机制进行,金属离子的吸附沉淀受价态和浓度的影响,高价态金属离子携带更多的正电荷,为絮凝剂提供更多的结合位点,两者通过吸附架桥形成较大絮体,加速沉降,但受限于絮凝剂有限的功能性官能团,重金属离子浓度升高会导致其去除率下降。

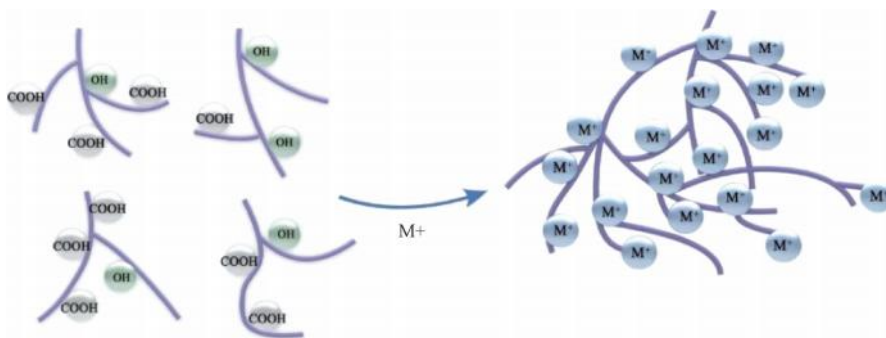


图1 吸附架桥作用机制

Fig. 1 Mechanism of Adsorption and Bridging

2.2 网捕卷扫

网捕卷扫作用是一种物理机械作用^[47]。当体系内加入大量高分子微生物絮凝剂时,絮凝剂与胶体颗粒吸附形成较小絮体,在絮凝过程中,溶液上层

絮体与下层絮体发生碰撞而结合,从而形成1个较大絮体。溶液中其他重金属离子也因卷扫作用随絮体下沉,达到净化水质的目的^[48](图2)。钱宝钢^[36]以硝酸镉和高岭土溶液为研究对象,研究微生物絮

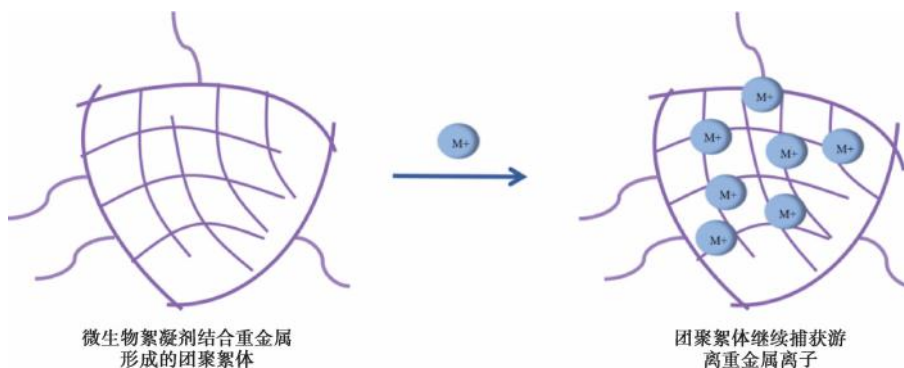


图2 网捕卷扫作用机制

Fig. 2 Mechanism of Sweep Flocculation

凝剂 MBFE-61 的絮凝机理,模拟废水经 MBFE-61 处理后,重金属离子浓度下降,MBFE-61 处理高岭土颗粒扫描电子显微镜(SEM)图显示,通过微生物絮凝剂处理后的高岭土颗粒呈聚集状态,说明网捕卷扫作用在微生物絮凝剂絮凝沉降高岭土颗粒及重金属离子起主要作用。

2.3 电荷中和

电荷中和理论是基于德贾桂因-朗道-维韦-奥弗比克(DLVO)胶体体系稳定性理论^[33]和吸附凝聚理论^[49]发展的学说,微生物絮凝剂带有与重金属离子相反电荷时,其表面 Zeta 电位因吸附重金属离子而降低,从而破坏两者在水体中的稳定

性(图 3)。有研究发现,电荷中和对微生物絮凝剂去除重金属离子起关键作用^[11]。祝瑄^[32]对解淀粉 *Bacillus* 产多糖型絮凝剂(MBF-Y)的研究揭示,MBF-Y 絮凝去除 Pb^{2+} 后,在不同 pH 条件下其 Zeta 电位负值变小、绝对值下降,直接证明废水中 Pb^{2+} 与带负电的 MBF-Y 发生电荷中和反应。Feng 等^[37]研究微生物絮凝剂 MBFGA1 絮凝去除 Pb^{2+} 时发现,向模拟水样添加 0.002% GA1 后,其表面的负电荷官能团通过静电引力与 Pb^{2+} 结合,使溶液体系中 Zeta 电位从 40.8 mV 骤降至 16.3 mV,絮体间静电斥力显著降低而脱稳聚集,最终形成沉淀。

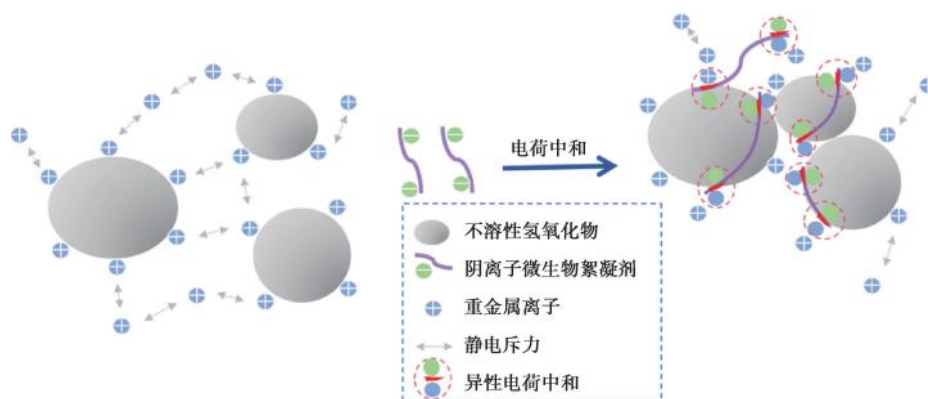


图 3 电荷中和作用机制

Fig. 3 Mechanism of Charge Neutralisation

2.4 络合和螯合反应

络合是指微生物絮凝剂含有羧基、羟基等带孤对电子的官能团,在中性 pH 条件下,易与溶液中的重金属离子形成配位键,生成稳定的络合物^[50]。Jiang 等^[39]在研究 *Bacillus* 的发酵液捕获 Pb^{2+} 的试验中证明细菌细胞壁上的肽聚糖、羧基及羟基可与金属离子形成稳定的络合物,并结合在细胞壁上。发酵液中的有机酸小分子也易与金属离子形成络合物,与 Pb^{2+} 结合后形成铅-有机酸二元络合物。

螯合是指微生物絮凝剂的配体与金属离子可逆结合,形成螯合物的金属络合物,且螯合物的稳定性随着配位点数量的增加而增加^[51]。例如,微生物絮凝剂上的羧基和羟基等官能团通过配位键与金属离子结合形成螯合物,且随 pH 升高,吸附位点增多,对重金属离子的结合能力增强^[52]。作用机理如图 4 所示。

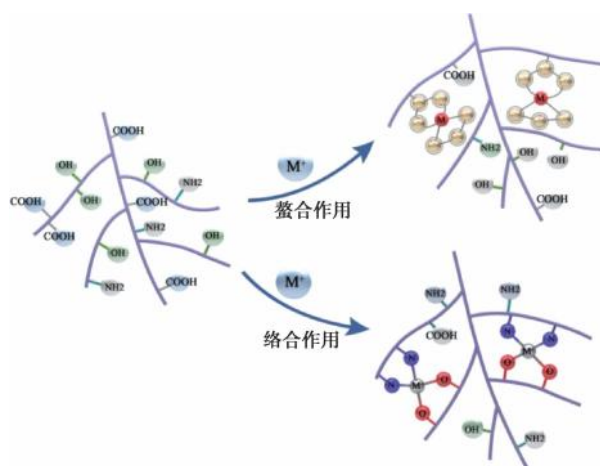


图 4 络合和螯合作用机制

Fig. 4 Mechanism of Complexation and Chelation

2.5 离子交换

离子交换是指金属阳离子通过置换微生物絮凝剂上的原有阳离子实现重金属吸附^[53](图

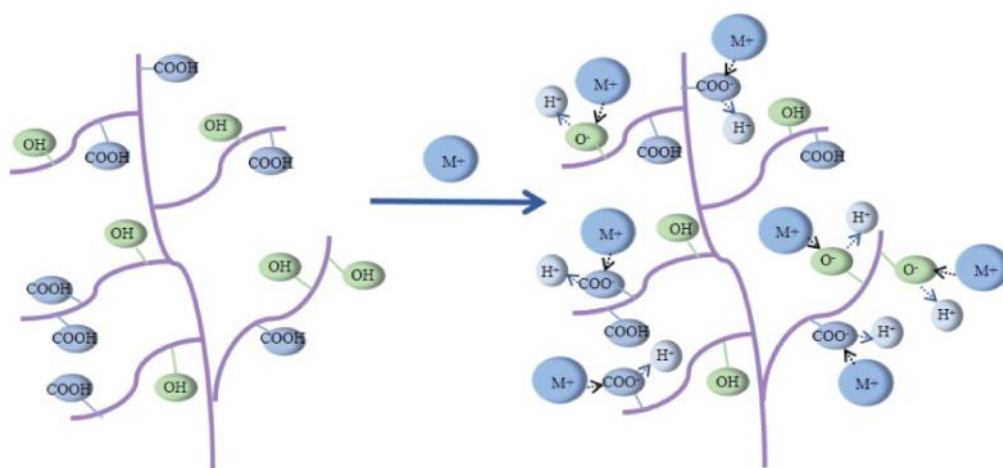


图5 离子交换作用机制

Fig. 5 Mechanism of Ion Exchange

5)。该过程受细胞表面官能团种类、数量及电离状态的影响,而 pH 和酸解离常数 (pK_a) 值共同决定基团的质子化程度;胺基质子化时带正电,去质子化后呈中性;磷酸基、羧基和硫酸基质子化时为中性,去质子化时带负电。Ye 等^[42]在苯并[a]芘存在下 *Stenotrophomonas maltophilia* 对铜生物吸附的试验中,发现 *Stenotrophomonas maltophilia* 对 Cu^{2+} 的吸附与 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的释放有关,并表明 *Stenotrophomonas maltophilia* 对 Cu^{2+} 的吸附存在离子交换机制。pH 是影响离子交换的重要因素,当 pH 较低时,溶液中的 H^+ 会竞争性结合在絮凝剂吸附位点上,López 等^[54]的试验证明,荧光假单胞菌 4F39 在 pH 较高的情况下,对镍的生物吸附是离子交换的微沉淀作用结果。

2.6 不完全中和沉淀

不完全中和沉淀是指通过调节 pH 使部分重金属离子形成氢氧化物沉淀(仍有游离重金属离子存在),沉淀颗粒表面的羟基可作为微生物絮凝剂的吸附位点,通过架桥、络合等作用促进游离离子与沉淀颗粒团聚,从而协同提高重金属的去除率^[35](图6)。Zhou 等^[43]使用碱性试剂 CaO 和 $Ca(OH)_2$ 联合微生物絮凝剂 MBFGA1 去除 Ni^{2+} 。试验中,在 Zeta 电位平稳期添加 MBFGA1 更有利于发挥该微生物絮凝剂的絮凝和吸附活性,验证了在不完全中和沉淀阶段投加微生物絮凝剂会更有利于重金属离子的去除。Huang 等^[55]也在试验中证明了不完全的氢氧化物沉淀与 MBFGA1 的生物吸附相结合,表明生物吸附与生物絮凝之间存在协同效应,进一步促进微生物絮凝剂的絮凝效果。

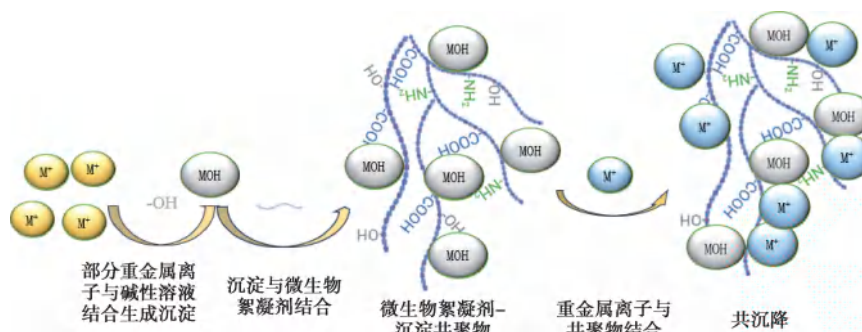


图6 不完全中和沉淀作用机制

Fig. 6 Mechanism of Incomplete Neutralization and Sedimentation

2.7 微生物絮凝剂去除重金属的主导机制

微生物絮凝剂通过生物大分子链带有丰富的羧

基、羟基等官能团与重金属离子直接结合或促进其聚集,这一过程往往需要多种机制协同作用,其中络

合螯合、离子交换、电荷中和与吸附架桥起主导作用。Wang 等^[40]利用胞外聚合物 γ -聚谷氨酸(γ -PGA)对水中 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 进行去除,研究发现,络合螯合作用可形成稳定的 γ -PGA-金属配合物,并在桥接作用下实现粒径的快速增长,加速絮体沉降;Dai 等^[34]使用微生物絮凝剂 MBF-35A 去除水中 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} ,其多种官能团去质子化后带负电,通过静电力实现对重金属的吸附架桥;Lu 等^[38]生产多糖型微生物絮凝剂 PR1,其大分子链中含有多种官能团,如 $\text{O}-\text{H}$ 、 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 、 $\text{C}-\text{O}$ 和 $\text{N}-\text{H}$,依靠吸附桥接和电荷中和机制实现对水中 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 的高效去除。Ye 等^[42]利用 *Stenotrophomonas maltophilia* 去除水中 Cu^{2+} ,菌体会释放含有官能团的大分子物质去除 Cu^{2+} ,在此过程中发生离子交换与吸附螯合的协同作用。此外,还有其他机制在特定条件下或在主导机制的基础上发挥作用。不完全中和沉淀可在碱性条件下辅助形成氢氧化物沉淀,并与絮凝剂协同吸附残留离子^[43];网捕卷扫依赖主导机制形成的絮体,在沉降过程中物理包裹悬浮态重金属颗粒,进一步提升分离效果,适用于高浑浊度或多颗粒物体系^[36]。在微生物絮凝剂去除重金属的过程中,上述多种机制协同作用,共同构成微生物絮凝剂去除重金属的完整作用体系。

3 影响因素

重金属离子的去除受多种外部条件影响,主要包括 pH、温度、微生物絮凝剂初始浓度、金属离子等。

3.1 pH

pH 是影响微生物絮凝剂吸附重金属离子的重要因素,pH 通过调控微生物絮凝剂官能团的解离状态与重金属离子的存在形态,影响两者的结合能力。微生物絮凝剂中主要官能团受 pH 的影响,羧基在 pH 值为 3~4 时开始去质子化转变为带负电的羧基离子($-\text{COO}^-$),羟基则在 pH 值为 4~7 时逐步去质子化^[56],pH 的改变直接影响微生物絮凝剂吸附和电荷中和的能力。Wang 等^[57]在研究胞外聚合物对溶液中 Pb^{2+} 和 Zn^{2+} 的吸附时发现,在 pH 较低时,溶液中的质子与金属离子竞争配体,从而减少金属离子与吸附剂的结合;当 pH 升高时,微生物絮凝剂对重金属离子的去除效率增加,在 pH 值为 5.0 时对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 达到最大吸附量。在低 pH 时,金属离

子与微生物絮凝剂上的吸附位点结合,随着 pH 的升高,金属离子与微生物絮凝剂的结合更稳定,当 pH 超过一定值时,金属离子易形成电中性或带负电荷的羟基络合物,降低阴离子型微生物絮凝剂吸附效率^[58]。因此,重金属的去除率随 pH 的升高而增加,当 pH 增加到一定值时重金属去除率下降,在偏弱酸性(pH 值为 5~7)环境下能激发微生物絮凝剂絮凝性能^[59]。

3.2 温度

微生物絮凝剂活性对温度具有较高的敏感性,温度通过影响微生物絮凝剂的分子活性、结构稳定性及官能团效能,间接调控重金属去除效果。低温条件下,分子热运动减缓,絮凝剂的链状分子柔韧性下降,难以通过吸附架桥作用连接多个重金属离子,同时羧基、羟基等官能团的活性降低,与重金属离子的配位反应速率减慢,导致絮体形成缓慢、结构松散,絮凝效果较差^[60]。温度过高时,对蛋白质类絮凝剂影响尤为显著,高温导致维持其空间结构的氢键、二硫键断裂,肽链解旋,原本暴露的胺基、羧基等活性位点被包裹,无法与重金属结合^[61];此外,高温还会加快分子热运动,使已吸附的重金属离子克服结合力重新溶解到溶液中,导致去除率明显下降^[62]。Agunbiade 等^[63]在研究淡水放线菌生物絮凝剂絮凝活性的试验中,发现微生物絮凝剂在温度为 30℃ 和 50℃ 时,絮凝活性在 80% 以上,当温度升高到 70℃ 和 90℃ 后,絮凝活性下降到 60% 以下。因此,温和温度(30~50℃)有利于微生物絮凝剂保持较高的絮凝活性。

3.3 絮凝剂初始浓度

微生物絮凝剂的初始浓度也会影响絮凝效果。闵军呈^[20]在试验中发现,随着多糖型微生物絮凝剂浓度逐渐增高,其对重金属离子 Pb^{2+} 的吸附效能也逐渐增强。当微生物絮凝剂浓度较低时,絮凝剂所提供的羧基、羟基、胺基等活性位点总量远低于水体中重金属离子含量,随着微生物絮凝剂浓度的增加,重金属离子可利用的结合位点数量也随之增加,去除率随浓度升高而增长;絮凝剂浓度适中时活性位点总量与重金属离子需求匹配时,去除率达到峰值,且絮体形成速度快、沉降性能优^[64]。但当微生物絮凝剂的浓度增大到一定值时,多糖型微生物絮凝剂对重金属离子 Pb^{2+} 的吸附效能反而下降。与此相同,Nouha 等^[65]利用胞外聚合物去除重金属(Al^{3+} 、

Cu^{2+} 、 Fe^{3+}) 的试验中,去除率随胞外聚合物浓度升高反而下降。这可能是高浓度微生物絮凝剂导致活性位点被屏蔽,阻碍重金属离子接近结合位点,并抑制絮体聚集,进而导致重金属离子的去除率下降^[20]。

3.4 其他金属离子

向溶液中添加不同的金属离子也会对微生物絮凝剂絮凝活性产生影响,共存金属离子会通过“促进架桥”或“竞争位点”2 种方式双向调控絮凝效果,且影响方向取决于离子价态及结合能力。 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Al^{3+} 可以形成离子桥促进架桥作用^[35,66],但 Fe^{3+} 却能抑制絮凝作用,因其电荷过强且易水解,会过量中和胶体负电致其反带正电,引发颗粒同号排斥,且在常规 pH 下易生成氢氧化铁沉淀,包裹絮凝剂活性位点或胶体颗粒。此外, Fe^{3+} 与絮凝剂官能团强配位结合,破坏其线性架桥结构,导致絮凝效能下降^[67-68]。Feng 等^[37] 向微生物絮凝剂与 Pb^{2+} 的共存体系中注入 CaCl_2 后发现, Ca^{2+} 可压缩重金属胶体颗粒的扩散双电层,进一步降低 Zeta 电位,强化电荷中和效果;在第二阶段则作为桥接促进剂,强化颗粒间的架桥作用。Nwodo 等^[69] 分别评估了单价、二价及三价金属离子对 2 种微生物絮凝剂 PPB 和 CPB 絮凝效果的促进作用,结果表明,二价金属离子的促进效果最佳,相比单价离子(Na^+ 、 K^+),其正电荷可更高效中和胶体负电荷、形成稳定“絮凝剂-离子-重金属”桥接结构;相比三价离子(Fe^{3+} 、 Al^{3+}),其电荷不会过度中和致反排斥,且不易水解生成干扰性沉淀,在中和效率、架桥能力与体系稳定性上达到最佳平衡^[70]。

4 结论与展望

本文综述了微生物絮凝剂种类、去除水中重金属离子的作用机理以及影响因素。结果显示,目前多糖类为最佳微生物絮凝剂类型,以络合螯合、离子交换、吸附架桥和电荷中和为主导机制,且 pH 值(5~7)偏弱酸性与温和温度(30~50℃)等为关键影响因素的适宜范围,为微生物絮凝剂去除重金属废水提供坚实理论依据。

基于研究现状,仍存在对部分微生物絮凝剂类型的研究较少、缺少各种机制贡献及絮凝影响因素全周期量化数据的研究缺口与应用瓶颈。为推动理论深化与实际应用,后续需聚焦以下方向突破:

(1) 筛选脂质与核酸类絮凝剂高产菌株,并借助傅里叶变换红外光谱、X 射线光电子能谱等表征技术解析其活性基团与重金属的结合机制,明确其在单一/复合金属体系中的絮凝潜力;(2) 构建复合污染模拟体系,结合分子动力学模拟分析多机制协同规律,建立含各机制贡献系数的动力学模型,量化影响因素以支撑复杂废水处理;(3) 开展跨类型絮凝剂的影响因素响应试验,明确各类型适用条件,建立“絮凝剂类型-废水特性-最优参数”数据库,辅助工程参数优化。

参考文献

- [1] Fei Y H, Hu Y H. Recent progress in removal of heavy metals from wastewater: A comprehensive review [J]. *Chemosphere*, 2023, 335: 139077. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.139077.
- [2] Pooja G, Kumar P S, Prasannamedha G, et al. Sustainable approach on removal of toxic metals from electroplating industrial wastewater using dissolved air flotation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295: 113147. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113147.
- [3] GB 8978—1996 污水综合排放标准[S]. GB 8978—1996 Integrated wastewater discharge standard[S].
- [4] Priya A K, Gnanasekaran L, Dutta K, et al. Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 135957. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135957.
- [5] Duan C Y, Ma T Y, Wang J Y, et al. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37: 101339. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101339.
- [6] Liu L H, Liu S Y, Zhao L, et al. Fabrication of novel magnetic core-shell chelating adsorbent for rapid and highly efficient adsorption of heavy metal ions from aqueous solution[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 313: 113593. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.113593.
- [7] Xu G R, An Z H, Xu K, et al. Metal organic framework (MOF)-based micro/nanoscaled materials for heavy metal ions removal: The cutting-edge study on designs, synthesis, and applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2021, 427: 213554. DOI: 10.1016/j.ccr.2020.213554.
- [8] Abdullah N, Yusof N, Lau W J, et al. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 76: 17–38. DOI: 10.1016/j.jiec.2019.03.029.
- [9] Kurniawan T A, Chan G Y S, Lo W H, et al. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals[J].

- Chemical Engineering Journal, 2006, 118(1/2): 83–98.
- [10] Ingelsson M, Yasri N, Roberts E P L. Electrode passivation, faradaic efficiency, and performance enhancement strategies in electrocoagulation—a review[J]. Water Research, 2020, 187: 116433. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116433.
- [11] El-Gaayda J, Titchou F E, Oukhrib R, et al. Natural flocculants for the treatment of wastewaters containing dyes or heavy metals: A state-of-the-art review[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5): 106060. DOI: 10.1016/J.JECE.2021.106060.
- [12] Yang Y, Jiang C C, Wang X, et al. Unraveling the potential of microbial flocculants: Preparation, performance, and applications in wastewater treatment[J]. Water, 2024, 16(14): 1995.
- [13] Liu C, Sun D, Liu J W, et al. Recent advances and perspectives in efforts to reduce the production and application cost of microbial flocculants[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2021, 8: 51. DOI: 10.1186/s40643-021-00405-2.
- [14] Xia M C, Zhou H, Amanze C, et al. A novel polysaccharides-based bioflocculant produced by *Bacillus subtilis* ZHX3 and its application in the treatment of multiple pollutants [J]. Chemosphere, 2022, 289: 133185. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133185.
- [15] 皮姗姗. 多糖型微生物絮凝剂的生物学合成机制及重金属去除研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
Pi S S. Biosynthesis mechanism of polysaccharide-based microbial flocculants in biology and heavy metal removal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [16] Guo H P, Fu X Z, Chen Y F, et al. Production of polysaccharide bioflocculants and gene co-expression network analysis in a biomass-degrading bacterium, *Pseudomonas* sp. G02[J]. Renewable Energy, 2022, 188: 997–1007. DOI: 10.1016/j.renene.2022.02.084.
- [17] Li O, Lu C, Liu A, et al. Optimization and characterization of polysaccharide-based bioflocculant produced by *Paenibacillus elgii* B69 and its application in wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2013, 134: 87–93. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.02.013.
- [18] 罗来鹏. *Raoultella ornithinolytica* 160-1 产生物絮凝剂的特性及其发酵优化[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2020.
Luo L P. Characteristics of *Raoultella ornithinolytica* 160-1 produced flocculant and its fermentation optimization[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2020.
- [19] 邹娟. 深海盐单胞菌(*Halomonas* sp.) V₃a' 产胞外多糖的絮凝作用及机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
Zou J. Flocculation behavior and mechanism of a polysaccharide produced by *Halomonas* sp. V₃a' [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [20] 闵军呈. 多糖生物絮凝剂的分离纯化及在污水处理中的应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
Min J C. Studies on the separation of a polysaccharide bioflocculant and its application in wastewater treatment [D]. Xiamen: Xiamen University, 2017.
- [21] 姜彬慧, 李凤达, 刘倩, 等. 微生物絮凝剂 MBFA9 去除水中 Pb²⁺ 的机理[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2016, 37(11): 1588–1592.
Jiang B H, Li F D, Liu Q, et al. Removal mechanism of lead (II) ions by bioflocculant MBFA9 from aqueous solution [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2016, 37(11): 1588–1592.
- [22] 魏薇. 蛋白型微生物絮凝剂去除水中重金属离子的效能与机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Wei W. Removal efficiency and mechanism of heavy metal ions in water by protein type bioflocculant [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [23] Liu W J, Wang K, Li B Z, et al. Production and characterization of an intracellular bioflocculant by *Chryseobacterium daeguense* W6 cultured in low nutrition medium [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(3): 1044–1048.
- [24] Mabinya L V, Cosa S, Nwodo U, Okoh A I. Studies on bioflocculant production by *Arthrobacter* sp. Raats, a freshwater bacteria isolated from Tyume River, South Africa [J]. International journal of molecular sciences, 2012, 13(1): 1054–1065.
- [25] Han M M, Dong Y H, Dong L H, et al. Characteristics and functionality of high efficiency composite microbial flocculant (EPC-7) for the treatment of black smelly river wastewater[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 54: 103952. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103952.
- [26] Kurane R, Hatamochi K, Kakuno T, et al. Chemical structure of lipid bioflocculant produced by *Rhodococcus erythropolis* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1995, 59(9): 1652–1656.
- [27] Kurane R, Hatamochi K, Kakuno T, et al. Purification and characterization of lipid bioflocculant produced by *Rhodococcus erythropolis* [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 1994, 58(11): 1977–1982.
- [28] Siddharth T, Sridhar P, Vinila V, et al. Environmental applications of microbial extracellular polymeric substance (EPS): A review[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 287: 112307. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112307.
- [29] Sakka K, Takahashi H. DNA as a flocculation factor in *Pseudomonas* sp. [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1981, 45(12): 2869–2876.
- [30] 魏薇. 生物复合型絮凝剂去除水中重金属离子的效能及机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Wei W. Research on effect and mechanism of the adsorption of heavy metal ions in the water by biological compound flocculant

- [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [31] 曾繁城. 一种微生物絮凝剂的研制及其对水中铜离子的絮凝研究[D]. 吉林: 吉林化工学院, 2021.
- Zeng F C. A study on development of a microbial flocculant and flocculation of copper ions in water[D]. Jilin: Jilin Institute of Chemical Technology, 2021.
- [32] 祝瑄. 多糖型微生物絮凝剂去除废水中黄药与重金属离子的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- Zhu X. Study on removal of xanthate and heavy metal ions in wastewater by polysaccharide microbial flocculant[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [33] Warren L J. Shear-flocculation of ultrafine scheelite in sodium oleate solutions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1975, 50(2): 307–318.
- [34] Dai J P, Zhao X X, Mu S D, et al. A novel polysaccharide-based bioflocculant produced by *Bacillus subtilis* 35A and its application in the treatment of dye decolorization, heavy metal ion adsorption and meat product wastewater[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1457909. DOI: 10. 3389/fmicb. 2024. 1457909.
- [35] Pu L, Zeng Y J, Xu P, et al. Using a novel polysaccharide BM2 produced by *Bacillus megaterium* strain PL8 as an efficient bioflocculant for wastewater treatment[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 374–384. DOI: 10. 1016/j. ijbiomac. 2020. 06. 167.
- [36] 钱宝钢. *E. Cloacae* W 产絮凝剂的制备与絮凝特性研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2011.
- Qian B G. Study on the production of bioflocculant by *E. cloacae* W and the characteristics of flocculating[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2011.
- [37] Feng J, Yang Z H, Zeng G M, et al. The adsorption behavior and mechanism investigation of Pb(II) removal by flocculation using microbial flocculant GA1[J]. Bioresource Technology, 2013, 148: 414–421. DOI: 10. 1016/j. biortech. 2013. 09. 011.
- [38] Lu Y Q, Huang Z L, Wang Y W, et al. Evaluation of flocculation performance for Pb²⁺ and Zn²⁺ removal from wastewater using the *Pseudomonas* sp. PR1 flocculant by response surface methodology[J]. Water Reuse, 2025, 15(1): 24–38.
- [39] Jiang B H, Fu L L, Cao W, et al. Microbial flocculant produced by a novel *Paenibacillus* sp., strain A9, using food processing wastewater to replace fermentation medium and its application for the removal of Pb(II) from aqueous solution[J]. Adsorption Science & Technology, 2019, 37(9/10): 683–697.
- [40] Wang L L, Liu Y M, Liu H M, et al. The role of structural evolution in the complexation and flocculation of heavy metals by the microbial product poly- γ -glutamic acid[J]. Chemosphere, 2022, 308: 136441. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2022. 136441.
- [41] Biswas J K, Banerjee A, Sarkar B, et al. Exploration of an extracellular polymeric substance from earthworm gut bacterium (*Bacillus licheniformis*) for bioflocculation and heavy metal removal potential[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 349.
- [42] Ye J S, Yin H, Xie D P, et al. Copper biosorption and ions release by *Stenotrophomonas maltophilia* in the presence of benzo[a] pyrene[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 219: 1–9. DOI: 10. 1016/j. cej. 2012. 12. 093.
- [43] Zhou Y, Yang Z H, Huang J, et al. Ni(II) removal from aqueous solution by biosorption and flocculation using microbial flocculant GA1[J]. Research on Chemical Intermediates, 2017, 43(7): 3939–3959.
- [44] Liu Y L, Zeng Y, Yang J G, et al. A bioflocculant from *Corynebacterium glutamicum* and its application in acid mine wastewater treatment[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2023, 11: 1136473. DOI: 10. 3389/fbioe. 2023. 1136473.
- [45] 魏淑梅, 杨朝晖, 曾光明, 等. 微生物絮凝剂去除废水中 Cd(II) 的 CCD 优化及絮凝机制[J]. 环境工程学报, 2013, 7(9): 3270–3276.
- Wei S M, Yang Z H, Zeng G M, et al. Optimization of cadmium removal using CCD design by microbial flocculants and investigation of flocculation mechanism[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(9): 3270–3276.
- [46] 姚敏杰, 连宾. 微生物絮凝剂对高浓度重金属离子废水絮凝作用研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(11): 1–4.
- Yao M J, Lian B. Microbial flocculability on wastewater containing high concentration heavy metal ions[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(11): 1–4.
- [47] 李立欣. 基于松花江水源水絮凝沉淀工艺的微生物絮凝剂净水效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- Li L X. Research on water purification efficiency of bioflocculant based on the flocculation sedimentation process for Songhua River source water treatment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [48] Rahul R, Kumar S, Jha U, et al. Cationic inulin: A plant based natural biopolymer for algal biomass harvesting[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 72: 868–874. DOI: 10. 1016/j. ijbiomac. 2014. 09. 039.
- [49] Committee A C. Committee report: Coagulation as an integrated water treatment process[J]. Journal AWWA, 1989, 81(10): 72–78.
- [50] 裴润全. 多种微生物絮凝剂的去除水中铅锌离子的效能与机制[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
- Pei R Q. Effectiveness and mechanism of multiple microbial flocculants to remove lead and zinc ions from water[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021.
- [51] Razzak S A, Faruque M O, Alsheikh Z, et al. A comprehensive

- review on conventional and biological-driven heavy metals removal from industrial wastewater[J]. Environmental Advances, 2022, 7: 100168. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2014.09.039.
- [52] Joshi P M, Juwarkar A A. In vivo studies to elucidate the role of extracellular polymeric substances from *Azotobacter* in immobilization of heavy metals[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(15): 5884–5889.
- [53] 华景秋. 利用芽孢杆菌在高盐浓度下生产微生物絮凝剂的机理及应用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2021.
Hua J Q. Mechanism and application of bioflocculant produced under high-salt condition by using strain *Bacillus* sp. [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021.
- [54] López A, Lázaro N, Priego J M, et al. Effect of pH on the biosorption of nickel and other heavy metals by *Pseudomonas fluorescens* 4F39 [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2000, 24(2): 146–151.
- [55] Huang J, Huang Z L, Zhou J X, et al. Enhancement of heavy metals removal by microbial flocculant produced by *Paenibacillus polymyxa* combined with an insufficient hydroxide precipitation [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 374: 880–894. DOI: 10.1016/j.cej.2019.06.009.
- [56] Guo J Y, Yu J. Sorption characteristics and mechanisms of Pb (II) from aqueous solution by using bioflocculant MBFR10543 [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(14): 6431–6441.
- [57] Wang L L, Yang J X, Chen Z L, et al. Biosorption of Pb(II) and Zn(II) by extracellular polymeric substance (eps) of *Rhizobium radiobacter*: Equilibrium, kinetics and reuse studies [J]. Archives of Environmental Protection, 2013, 39(2): 129–140.
- [58] Eman Zakaria G. Production and characteristics of a heavy metals removing bioflocculant produced by *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Polish Journal of Microbiology, 2012, 61(4): 281–289.
- [59] Xiao X F, Sun Y J, Liu J W, et al. Flocculation of heavy metal by functionalized starch-based bioflocculants: Characterization and process evaluation [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 267: 118628. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118628.
- [60] Wang D L, Zhang Q L, Chen Q S, et al. Temperature variation characteristics in flocculation settlement of tailings and its mechanism[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(11): 1438–1448.
- [61] Tsilo P H, Basson A K, Ntombela Z G, et al. Production and characterization of a bioflocculant from *Pichia kudriavzevii* MH545928.1 and its application in wastewater treatment [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(6): 3148.
- [62] 张云, 向地玖, 余玲, 等. 微生物絮凝剂对 Cr 的去除性能研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(2): 57–61.
Zhang Y, Xiang D J, Yu L, et al. Study on removal performance of Cr by microbial flocculant [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(2): 57–61.
- [63] Agunbiade M O, Pohl C, Van Heerden E, et al. Evaluation of fresh water actinomycete bioflocculant and its biotechnological applications in wastewaters treatment and removal of heavy metals [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(18): 3337.
- [64] You L J, Song L D, Lu F F, et al. Fabrication of a copolymer flocculant and application for Cr(VI) removal [J]. Polymer Engineering & Science, 2016, 56(11): 1213–1220.
- [65] Nouha K, Kumar R S, Tyagi R D. Heavy metals removal from wastewater using extracellular polymeric substances produced by *Cloacibacterium normanense* in wastewater sludge supplemented with crude glycerol and study of extracellular polymeric substances extraction by different methods [J]. Bioresource Technology, 2016, 212: 120–129. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.04.021.
- [66] Mishra V K. Microbial flocculants and its application in wastewater treatments: A review[J]. Journal of Water Pollution & Purification Research, 2016, 3(1): 42–50.
- [67] 覃敏杰. 铅锌-*Chryseobacterium* sp. 絮凝剂的制备及其特性研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.
Qin M J. Study on preparation and characteristics of lead and zinc-*Chryseobacterium* sp. flocculants [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018.
- [68] Feng D L, Xu S H. Characterization of bioflocculant MBF₃-3 produced by an isolated *Bacillus* sp [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2008, 24(9): 1627–1632.
- [69] Nwodo U, Agunbiade M, Green E, et al. Characterization of an exopolymeric flocculant produced by a *Brachyбактерium* sp [J]. Materials, 2013, 6(4): 1237–1254.
- [70] Mohammed J N, Dagang W R Z W. Role of cationization in bioflocculant efficiency: A review[J]. Environmental Processes, 2019, 6(2): 355–376.