

引文格式:李佳芮,郑亚楠,祁过劲,等. 生物菌剂在有色冶金污染治理中的研究进展[J]. 中国有色冶金, 2025, 54(1): 52–60.
LI Jiarui, ZHENG Yanan, QI Guojin, et al. Research progress in treatment of nonferrous metallurgical pollution by biological agents[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(1): 52–60.

生物菌剂在有色冶金污染治理中的研究进展

李佳芮¹, 郑亚楠¹, 祁过劲¹, 吴恒^{2,3}, 邢志林³

(1. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100;
3. 重庆理工大学化学化工学院, 重庆 400054)

[摘要] 有色冶金工业废弃物排放量持续增长, 面临愈发严峻的环保挑战。传统物理化学治理技术虽有效, 但成本较高。生物菌剂技术因其清洁可持续、低成本的优势, 在有色冶金污染治理领域受到关注, 应用于土壤修复和废水处理, 但是对其应用进展缺乏综述。通过文献计量分析, 发现近20年生物菌剂技术研究热度逐年攀升, 特别是华东、西北和东北地区。应用方面, 代表性策略为构建菌株-植株共生体系、菌藻共生体系, 辅以多孔载体固定化手段。机制方面, 明确了微生物主要通过细胞壁吸附、胞内积累和胞外沉淀吸附重金属。未来发展, 针对该技术受菌属种类、温度、pH值因素干扰, 应加强新型菌剂研发与中试应用测试、优化复合菌剂设计策略、开发新型载体材料; 针对应用机制研究不够深入全面, 应耦合代谢组学、转录组学、同位素标记深入研究基因调节机制。文章系统性综述菌剂技术在有色冶金污染治理中研究热度、应用现状以及微生物机制, 为该技术的改进以及实际应用提供了理论参考。

[关键词] 有色冶金; 重金属排放物; 除重金属; 生物菌剂; 土壤修复; 废水处理

[中图分类号] X758 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-6103(2025)01-0052-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.01.006

有色金属冶炼过程产生大量排放物, 这些废弃物成分复杂、有害元素浓度高^[1], 对环境具有严重的破坏性, 例如水体富营养化、土壤退化等, 排放之前需要进行有效处理。为防控有色金属冶炼排放物导致的水体污染和土壤污染的技术有蒙脱石吸附^[2]、土壤淋洗技术^[3], 可以分别去除水体和土壤中的有色金属污染物。尽管物理化学技术处理效果显著, 但是成本昂贵、工艺复杂, 另外此类技术具有很强的应用局限性, 适用场景单一^[4]。

相比之下, 生物技术不仅具有低成本、可持续的特点, 而且应用场景多样, 代表性技术为生物菌剂吸附重金属技术^[5]。不同的菌株能够应对不同的重金属污染, 通过复配多菌株菌剂可以实现对复合重

金属污染的处理、矿化回收^[6-9]。因此, 生物菌剂技术在有色冶金污染治理中被广泛应用。然而, 对于发展趋势, 研究热度是否持续增加尚不明确, 高频研究主题有待揭露; 对于应用研究, 应用参数和效果缺乏系统性报道, 缺少可参考的技术策略; 对于潜在机制, 微生物机制综述报道较少, 研究深度不清晰。

为解决上述问题, 本文报道以下内容: ①通过文献计量分析揭示生物菌剂技术的研究热度, 凸显研究热点; ②总结生物菌剂技术在土壤和水体中的高效应用策略, 提供改进措施; ③关注生物菌剂技术的机制研究进展, 剖析当前研究的局限性。

1 文献计量分析

为验证生物菌剂在有色冶金废物处理中的研究热度, 对近20年相关文献进行可视化分析。在知网以“菌剂”为主题且篇关摘为“重金属”进行检索, 获得640篇文献。图1表明相关文献数量持续增加, 说明生物菌剂技术的研究热度逐年上升。特别是在华东、西北和东北地区关注颇多(图2)。图3表明

[收稿日期] 2024-08-18 [修订日期] 2024-09-18

[录用日期] 2024-09-19 [出版日期] 2025-02-01

[第一作者] 李佳芮(2002—), 山西运城人, 本科, 环境科学专业。

[通信作者] 吴恒(1997—), 男, 四川南充人, 博士, 主要从事污水与固废资源化研究。

[基金项目] 重庆市教委技术研究项目(KJQN202201131)。

检索所得文献主要聚焦于重金属、微生物菌剂、微生物、复合菌剂、生物修复和微生物修复。其中,重金属和微生物菌剂的文献颇多,说明该领域是高频次研究主题。由图 4 可知,生物菌剂技术的研究层次主要集中在技术研究,但是对技术开发和工程研究缺乏关注。由此可知,生物菌剂在有色冶金废物处理中的研究热度逐年递增,后续应侧重于技术开发和工程研究。

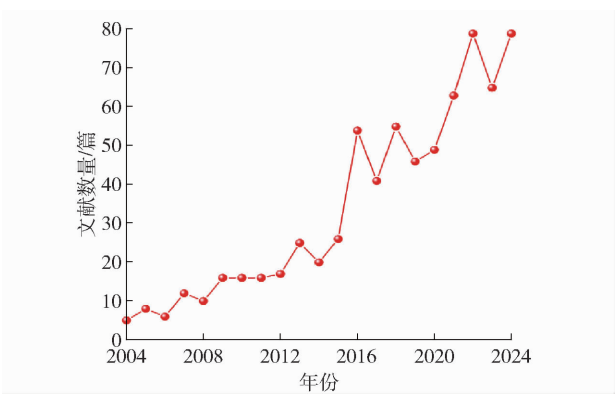


图 1 近 20 年生物菌剂技术相关文献发表数量
Fig.1 The number of papers related to biological agent technology in recent 20 years

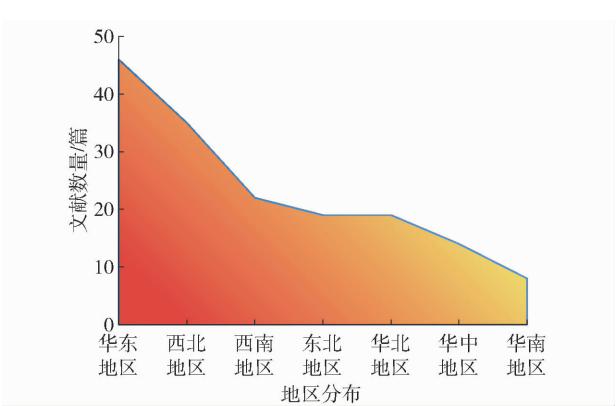


图 2 各地区生物菌剂技术相关文献发布热度
Fig.2 Heat of publishing literature related to biological agent technology by region

2 有色冶金土壤污染修复

2.1 实验室研究

有色金属开采中,矿石运输频繁,产生大量含重金属的尾矿和废水,易导致周边土壤重金属污染;在矿石加工过程中也会向周围土壤环境中释放多种重金属,常见的有色冶金污染物有铅、铜、铬等,危害性

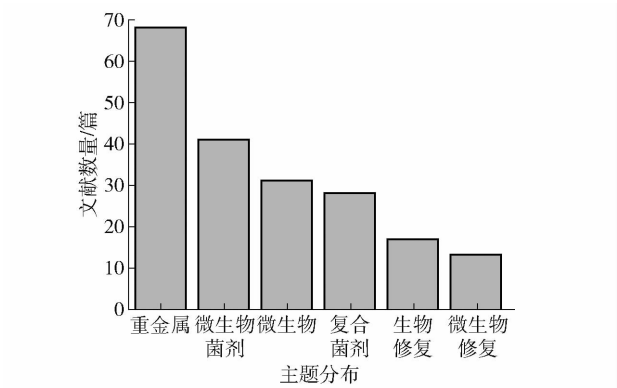


图 3 生物菌剂技术相关文献高频次词汇
Fig.3 High frequency vocabulary in papers related to biological agent technology

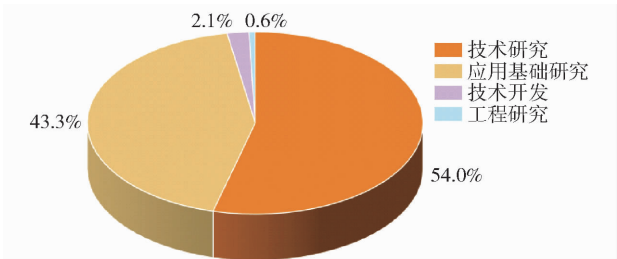


图 4 生物菌剂技术相关文献研究类别占比
Fig.4 The proportion of research categories related to biological agent technology papers

大、易积累。张林等^[10]通过骨炭负载羧甲基纤维素稳定化的硫化亚铁,耦合 *Enterobacter* sp. 制备功能化菌剂,使土壤中铅的积累量从 63.84 mg·kg⁻¹降低到 5.59 mg·kg⁻¹,证明了生物菌剂治理土壤重金属污染的可行性。此外,通过添加以 *Bacterioidetes*(拟杆菌属)为核心的高效菌剂 Tcd-1 可以去除 60.7% 的镉,削弱土壤中可交换态和碳酸盐结合态途径^[11]。但是生物菌剂加入土壤中后容易受到土著微生物竞争,需要提供稳定附着环境以提高其存活率和应用效果。以茎生物炭制备新型多孔载体,对菌剂进行负载,成功将重金属去除率提高到 77.8%^[12]。多孔载体本身也吸附了部分重金属,约占 55.5%,是重要吸附途径之一^[13]。此外,核桃青皮发酵产物和生物炭配制的固定化菌剂(硫酸盐还原菌 SRB15-3-2)也有效降低铜和镉的迁移性和生物毒性,在载体吸附作用协助下对铜和镉的去除率分别达到了 92.92% 和 72.83%^[14]。季晓雯等^[15]也证实利用生物炭负载措施提高了 *Bacillus amyloliquefaciens*(解淀粉芽孢杆菌)对铅、铬复合污染的削

减效果。但是,载体的固定化效果与制备材料特性息息相关,不同材料、不同制备条件将导致载体差异。例如,椰壳、玉米芯、小麦秸秆在不同温度下制备的负载效果存在差异,椰壳在 700 °C 热解后可获得最大的比表面积 358.82 m²/g,远高于其他载体^[16]。同时,生物炭能够改善土壤的理化性质,促进微生物的进一步富集^[17]。

但是,环境中往往存在许多高浓度抑制剂,会严重阻碍其发挥作用,以致于单一菌剂难以实现高效去除。刘泽浩等^[18]通过制备改性固定化载体,将 *Mucor mucedo* (毛霉)、*Aspergillus niger* (黑曲霉) 和 *Mycobacterium gilvum* (分枝杆菌) SN12 复配而成的菌剂进行负载,在 25 °C、pH 为 8 的条件下应用去除高浓度多氯联苯土壤中 35.38% 的镉。类似的,使用鹿粪生物炭与菌群 HHP-3X 配合,制成的复合菌剂 5LF-PH,不仅去除 90.00% 的镉,还去除了 95.61% 的芘^[19]。此外,通过将 *Bacillus toyonensis* (东京芽孢杆菌)、*Klebsiella pneumoniae* (肺炎克雷伯氏菌) 和 *Bacillus subtilis* (枯草芽孢杆菌) 复配处理土壤中的汞,发现去除率达到 84%,约为单一菌株的 2 倍^[20]。这些研究证实了复合菌剂实现多污染物协同治理的可行性和有效性。为了提高菌株对土著微生物的竞争力,最大限度发挥菌剂的去除效果,构建了菌株-植株共生体系。王欢等^[21]通过将 7 株耐重金属优势菌株 (C1-h、C4-h、C8-h、M1-h、M3-h、P2-h、P3-h) 以等比例复配,与骆驼蓬结合在尾矿区域种植,显著降低了土壤中的重金属含量,其中铅、镉、锰的去除率分别达到 54.74%、57.46%、24.97%。此外,对于镉污染土壤还可以使用龙葵与枯草芽孢杆菌、*Enterobacter cloacae* (阴沟肠杆菌)、*Hafnia alvei* (蜂房哈夫尼亚菌) 和 *Bacillus cereus* (蜡样芽孢杆菌) 的复配菌剂构成植株-菌株共生体系,对土壤中的有效态 Cd²⁺ 的去除率可达 77.97%^[22]。利用 *Rhodococcus qingshengii* (樊庆生红球菌) 与东南景天进行联合培养,可使该植株对 Cd 的富集量提高 110%~260%,对 Ni 和 Zn 富集量分别提高约 100% 和 90%^[23]。而张东豪等^[24]通过应用复合菌剂 PGP6+5 与亚麻、菊苣组成菌株-植株共生体系,在重金属污染的环境中显著提高了植物的对镉、铅吸附量,达到 420.49 μg/株和 162.16 μg/株,比单一处理方式高出了 78.25% 和 66.47%。因此,菌株-植株共生体系的应用潜力优于单一生

物体系。

如图 5 所示^[25],微生物-植物共生体系可提高植物个体抗性并降低重金属毒性,其优势为:①微生物可以将营养元素转化为植物可用的形式,并通过磷溶解和铁载体生产为植物提供足够的营养元素;②微生物可以通过产生植物激素来诱导植物产生抗氧化酶,从而提高植物的抗氧化能力;③在营养元素充足、抗氧化能力强的条件下,微生物群落可以提高植物叶片对光的捕获和利用能力,促进植物的光合作用;④微生物-植物共生体系通过生物蓄积、生物吸附和生物转化来降低重金属的生物利用度和毒性。

2.2 应用研究

在实际应用中,赵颖豪等^[26]在西北煤矿破损失态区将由 *Arthrobacter* (节杆菌属)、*Bacillus* (芽孢杆菌属)、*Acinetobacter* (不动杆菌属)、*Pseudomonas* (假单胞菌属) 和 *Desulfovibrio* (脱硫弧菌属) 组成的复合菌剂加入到土壤中。经过 150 d 的修复,土壤中砷含量降低 49%,铜含量降低 41%,对土壤质地的改善起到关键作用。此外,庞浩^[27]选择对重金属铅、锌和镉具有良好耐受性的蒙科优菌修复复合重金属污染土壤,利用助剂负载菌剂后投入土壤中;经过 10 d 的修复,土壤中铅去除率最高可达 74.21%,锌和镉的去除率在 50% 至 60% 之间,显著改善了土壤的结构和营养含量。

综上所述,生物菌剂在土壤有色金属污染治理当中已经得到广泛研究,但是缺乏实际应用。基于单一菌株的菌剂难以满足愈发复杂的污染形势,需要采用多孔载体固定化、多菌株复配、菌株-植株共生体系构建等措施提高菌剂应用效果。

3 有色冶金废水处理

3.1 实验室研究

有色冶金工业矿物资源开采及加工废水产量大,主要来自矿石淋洗、设备清洁以及矿石冶炼等工序。此类废水含有高浓度重金属,其随意排放可能会导致周围水体中重金属含量增加,破坏生态系统。重金属在水体中的存在方式与在土壤中不同,主要通过沉淀、吸附等方式进入土壤中,并且由于土壤环境相对稳定,重金属难以发生迁移。但是,在水体中重金属多以离子或结合态悬浮颗粒的形式存在,由于水体的流动性会导致重金属随水流扩散。此外,

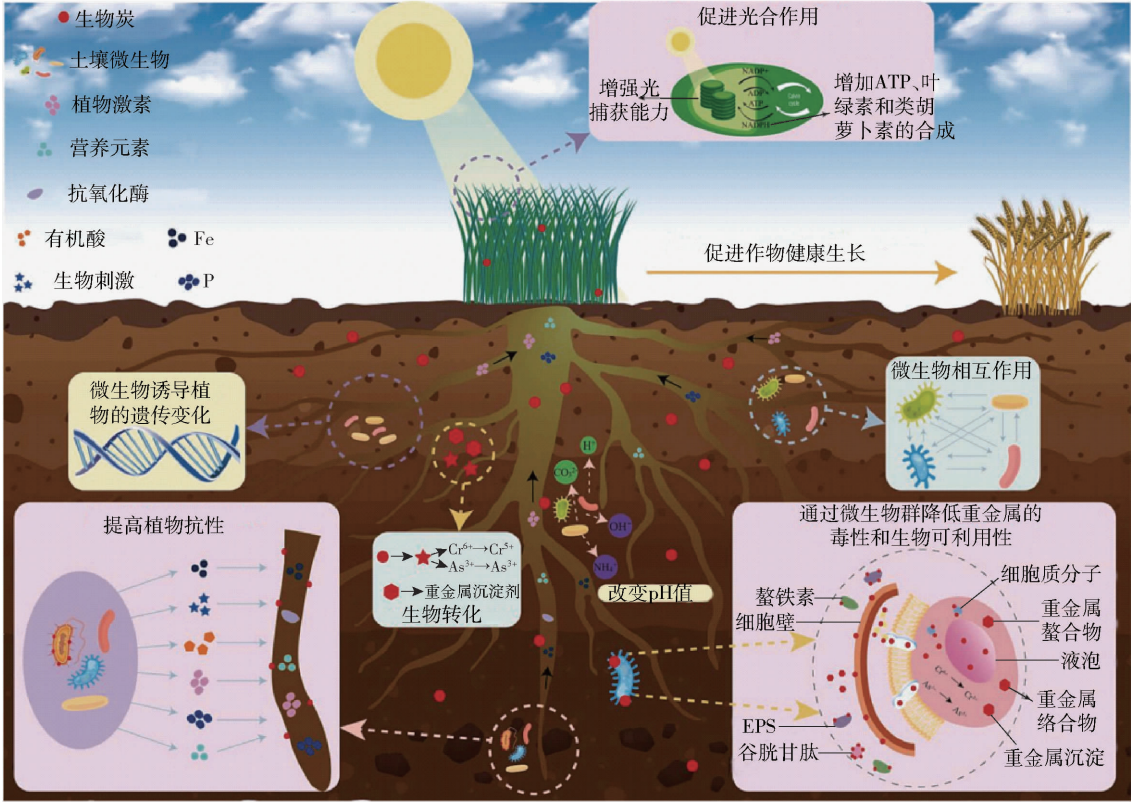


图 5 植株-菌株共生体系^[25]

Fig. 5 Plant-strain symbiosis pattern

水体的流动性将降低单位体积水体内的菌剂浓度，导致治理难度更大。因此，需要考察菌剂在相对稳定的环境中去除重金属的可行性，以初步判断该技术的可行性。顾乃鹏等^[28]通过筛选发现 *Mucor circinelloides* (卷枝毛霉) FNZJ3-2-2 在 33 ℃、pH 为 5 的批次反应器中能有效去除水中 90.22% 的 Cr^{6+} ，证明生物菌剂可以有效去除水环境中重金属。相比单一菌剂，复合菌剂间构建的共生体系可以极大提高菌株个体对环境的适应能力。例如，吕琳洁^[29]等以 3:2:2.5:2.5 的比例枯草芽孢杆菌、阴沟肠杆菌、*Pseudomonas aeruginosa* (铜绿假单胞菌)、*Enterobacter ludwigia* (路德维氏肠杆菌) 组成耐铅复合菌剂，在温度 35 ℃、pH 为 5 条件下反应 6 h 的铅去除率最终高达 99.48%。为了促进微生物富集，通过利用竹生物炭作为载体固定耐镉菌群，在 pH 为 6 的酸性矿山废水中对 Cd^{2+} 的去除效率达 89.49%，显著提高了吸附性能^[30]。添加竹生物炭不仅可以通过富集微生物提高重金属去除率，还可以通过自身吸附作用去除部分重金属。正如李芙蓉等^[31]以蒲公英

英中药渣生物炭 DBC-500 为固定化载体负载耐铜枯草芽孢杆菌，其中枯草芽孢杆菌和生物炭 DBC-500 分别占去除量的 23.12% 和 76.88%，可见载体的种类可以在很大程度上提高重金属的去除率。富磷生物质材料对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Zn^{2+} 吸附容量分别可以达到 67.84 mg/g, 80.23 mg/g, 50.56 mg/g 和 63.07 mg/g^[32]。这些研究证实添加载体可以通过多途径吸附重金属，有效提高重金属去除率。有色冶金废水中不仅只含有重金属，由于化学试剂添加还导致氨氮、硫酸盐等污染物的存在。为此，徐芝芬^[33]等通过采用片球菌属、乳酸菌和芽孢杆菌形成的复合菌剂对生物反应器进行生物强化，去除了废水中 S^{2-} 和 Cr^{3+} 。但是需要注意的是，菌剂应用的 pH 条件会逐渐波动，需要采取措施，保持稳定^[34]。

为了能进一步提高菌剂在水体微环境中的适应能力和富集效果，构建了菌-藻共生体系 (图 6)，通过中间代谢产物协同代谢网络形成共生体系。例如，郑格格等^[35]通过利用筛选出耐砷和汞的菌株构建复合菌剂，并利用海藻酸钠-聚乙烯醇制备成菌

藻固定球载体,将功能菌株与微藻固定化处理后应用于含砷和汞废水的处理,铬、铜、砷、镉、铅、汞去除率分别可以达到 62.71%、63.20%、71.35%、57.88%、34.51%、67.10%。如图 6 所示^[36],微藻与细菌能够形成互补的共生体系,特点如下:①在光照条件下,微藻和细菌可以实现二氧化碳和氧气自给自足,形成自循环体系;②微藻利用氮和磷等无机物质合成有机化合物为细菌营造适宜生长环境,而细菌可以分解由藻类死亡细胞或其产生的有机物,二者通过代谢产物互换而实现共生^[37];③对于一些特殊情况,藻类与具备特定功能的细菌可以形成密切的外共生关系^[38],比如微藻和固氮细菌可以共同进行碳氮固定,并在营养供应不足时通过自我调节满足生长需求^[39];④提高生物体系的物理吸附作用^[40]。

3.2 应用研究

在实际镉污染水体中,何小三等^[41]研究选用铜绿假单胞菌混合到 pH 为 5.5 营养液中,每 7 d 在水体中添加一次。结果显示,菌剂处理显著降低了水体植物各部位的镉含量,其中水面以上部分镉含量下降了 59.9%,同时降低了镉的迁移系数和富集系数。不仅如此,徐州市的三个污水处理厂处理污水时添加 *Bacillus benzoovorans* (食苯芽孢杆菌) 和 *Pseudomonasputida* (恶臭假单胞菌),辅以木屑,结果发现剩余污泥中的锌、铬、镍的生物有效性大幅度降低^[42]。但需要注意的是,实际应用中菌剂的长效性和经济性也需要进一步评估,以确保能够实现大规模应用。

因此,生物菌剂在有色冶金废水处理中已得到广泛研究,但是实际应用相对较少。多孔载体固定化、多菌株复配也是有效的强化措施,但是与土壤修复不同的是水体中宜构建菌藻共生体系,这被视为有色冶金废水处理中的更具潜力的强化措施。

4 微生物机制

在土壤和水体重金属污染治理中,微生物代谢途径的调控至关重要^[43],有必要对微生物代谢机制进行深入揭示。有色冶金污水处理中的优势细菌主要为 Proteobacteria (变形菌门)、Actinobacteria (放线菌门)、Chloroflexi (绿弯菌门)、Firmicutes (厚壁菌门) 和 Acidobacteria (酸杆菌门),而优势真菌主要为 Ascomycota (子囊菌门)、Basidiomycota (担子菌门)

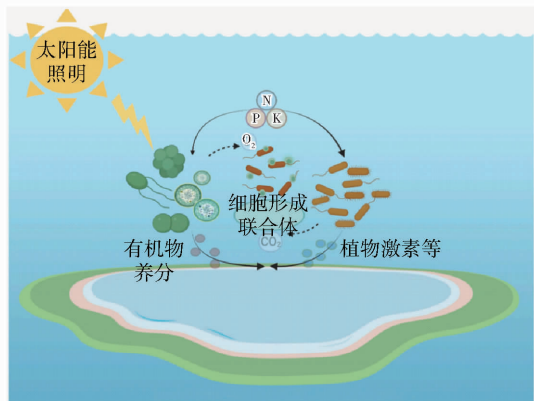


图 6 微藻-细菌共生体系修复废水重金属^[36]

Fig. 6 Remediation of heavy metals by microalgae-bacteria symbiotic system in wastewater

和 Rozellomycota (罗兹菌门)^[44],被证实可以制成重金属修复菌剂。不同菌株几乎都是通过吸附去除重金属,但是吸附过程存在差异,主要分为以下三类:①细胞壁吸附,细胞壁上的多糖、蛋白质和脂类可以通过静电吸附、离子交换等方式结合重金属离子^[45];②胞内积累,微生物可以通过细胞膜上的转运蛋白将重金属离子主动转运至胞内,并将其储存在细胞器或以络合物形式存在,避免细胞中毒^[46];③胞外沉淀,某些微生物能够分泌代谢产物,如有机酸和生物聚合物,这些物质与重金属离子结合形成不溶性沉淀,从而实现重金属的固定化^[47]。进一步,图 7 展示了微生物如何通过胞内积累和基因表达调控促进特定基因(金属转运、金属结合蛋白编码基因以及金属抗性基因等)表达,从而实现重金属的去除或稳定化过程^[48]。 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 抗性相关的功能基因簇,如 *copABC* 基因簇负责 Cu^{2+} 的固定和运输,*copZ* 基因有助于调节 *cop* 操纵子的表达,*PbrABR* 基因簇主要参与 Pb^{2+} 的调节、固定和运输^[48]。微生物矿化技术也是一个重要的处理方法,生物炭的添加可以改善土壤的物理结构,增加了导气性和导水性,促进高活性微生物对脲酶等酶类分泌,导致重金属与碳酸钙形成共沉淀。如图 8 所示^[49],载体本身通过静电吸附、离子交换、氧化还原、络合和沉淀作用可以促进土壤中重金属固定化,协助菌剂对重金属的去除^[50-51]。

因此,建议选择上述高频次检出菌门用作菌剂制备。尽管菌株和载体去除重金属的机制已经得到揭示,但是多菌株协同代谢机制、实际污水和土壤环

境中的复合污染物耦合去除途径还缺乏深入研究。

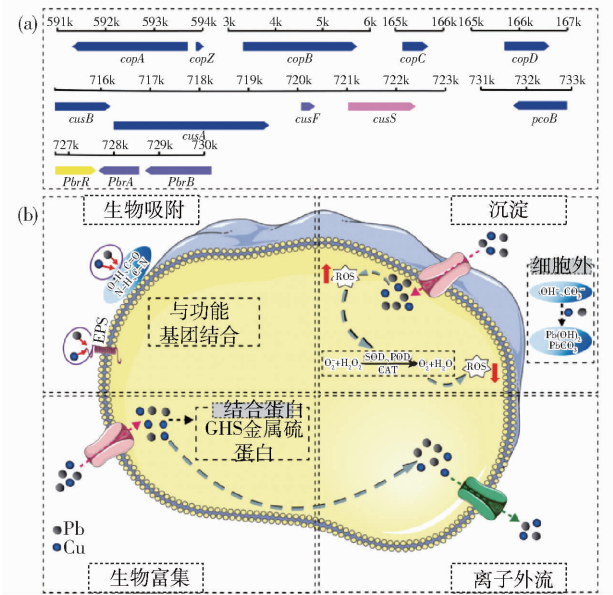


图 7 (a)YH 菌株中 Pb 和 Cu 相关抗性基因簇^[48], (b)YH 对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的去除机理^[48]

Fig. 7 (a) The Pb and Cu-related resistance gene clusters in bacteria consortium YH. (b) Removal mechanism of Pb^{2+} and Cu^{2+} by YH

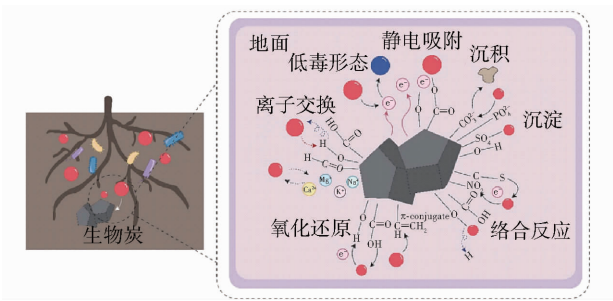


图 8 生物炭提高土壤重金属稳定性机制图^[49]

Fig. 8 Mechanism diagram of biochar improving heavy metals stability in soil

5 结论与展望

有色冶金工业的蓬勃发展导致重金属废弃物排放量逐渐增加,相比于物化技术,生物菌剂技术因其清洁高效的优点而在重金属土壤修复和废水处理中受到广泛应用。综上所述,可以得到以下结论:①生物菌剂技术热度持续增加,镉、铅是重点关注对象,在东北、东南地区研究较为广泛;②生物菌剂技术已经实现了在土壤修复和废水处理中的广泛应用,其

中多孔载体固定化、多菌株复配是常见的强化措施,其中土壤中更适合构建菌株-植株共生体系,而废水中更适合构建菌藻共生体系;③建议选择变形菌门、放线菌门、绿弯菌门、厚壁菌门和酸杆菌门中的菌株用作菌剂制备,pH 宜为 5。

虽然对生物菌剂研究热度不断攀升,但仍然面临一些挑战:①在实际应用方面多选择假单胞菌属和芽孢杆菌属制备菌剂,其具有高效的重金属吸附能力,但其余菌属大多还未能应用于实际;②生物菌剂的效果受如温度、pH 值、营养成分等环境条件的影响,需要进一步研究生物菌剂的长效性和可持续性,确保其稳定应用;③生物菌剂应用机制缺乏深入、详细报道,复合重金属相互作用特征、菌株-重金属协同代谢途径还缺乏揭露。

对于未来的发展趋势:①针对生物菌剂实际应用较少,建议菌剂研究不能只停留在实验室小试阶段,应考察真实冶金污水、中试处理规模应用效果,验证应用潜力、优化应用策略,同时还应关注经济效益评估;②针对菌剂修复的局限性,如单一菌株菌剂处理复杂污染效果有限、复合菌剂间协同效应不明、微生物富集不持久等问题,建议优化复合功能菌剂设计,研究多菌株间的协同作用,特别是需要关注菌株-植株和菌藻共生体系、开发新型高效炭基载体;③针对基础研究薄弱,建议采用代谢组学耦合转录组学技术揭示生物菌剂技术去除重金属的基因调节机制,利用同位素标记技术辅以验证。

[参考文献]

[1] 温珊,易娟,吴旭. 锌铜合金灰选择性浸出分离回收铜试验研究[J]. 有色金属工程,2024;1-14.
WEN Shan, YI Juan, WU Xu. Experimental study on selective leaching separation and recovery of copper from zinc-copper alloy ash [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024; 1-14.

[2] 张浩浩. Ba 基蒙脱石水化性能的分子动力学研究[J]. 中国水运,2023,23(14):158-160.
ZHANG Haohao. Molecular dynamics study of hydration properties of ba-based montmorillonite [J]. China Water Transport, 2023, 23(14): 158-160.

[3] 李卫娜,蔡虹明,袁玮,等. 土柱实验在土壤重金属污染研究中的应用进展与展望[J]. 地球与环境,2024,1-10.
LI Weina, CAI Hongming, YUAN Wei, et al. Research progress and prospects in soil column experiments to study soil heavy metal pollution [J]. Earth and Environment, 2024, 1-10.

[4] 王玉杰,张艳梅,栾金义,等. 酶催化固碳过程及其强化技术研究进展[J]. 化工进展,2024,43(1):232-245.
WANG Yujie, ZHANG Yanmei, LUAN Jinyi, et al. Enzyme-

- catalyzed carbon sequestration processes and enhancement technologies [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(1): 232–245.
- [5] 张文姬. 重金属抗性植物促生细菌阻控作物富集重金属效应与菌株保藏工艺研究[D]. 南京:南京农业大学,2017.
ZHANG Wenji. Reduced Heavy Metals Accumulation of Crops in the Presence of Heavy Metal Resistant and Plant Growth-Promoting Bacteria and Their Preservation Technology [D]. Nanjing Agricultural University, 2017.
- [6] 谢伟霞,朱梦可,范瑞娟,等. 抗镉菌株的吸附特性及抗镉机制[J]. 农业环境科学学报,1–13.
XIE Weixia, ZHU Mengke, FAN Ruijuan, et al. Cadmium adsorption characteristics and mechanisms of cadmium-resistant strains [J]. Journal of Agro-Environment Science, 1–13.
- [7] 徐艺珈. 重金属矿化细菌的筛选与固定化应用研究[D]. 南宁:广西大学,2023.
XU Yijia. Screening of Heavy-Metal Mineralizing Bacteria and Their Immobilization Application [D]. Guangxi University, 2023.
- [8] 朱乐明,傅开彬,钟秋红,等. 硫酸盐还原菌修复四川某典型铜矿选冶渣复合重金属污染研究[J]. 金属矿山,2024(3): 278–283.
ZHU Leming, FU Kaibin, ZHONG Qiuhong, et al. Study on the remediation of composite heavy metal pollution of slag in a typical copper mine in sichuan using sulfate-reducing bacteria [J]. Metal Mine, 2024(3): 278–283.
- [9] 姜久宁. 金矿堆浸场地降菌圈、产表面活性剂菌的复合微生物淋洗[J]. 绿色矿冶,2024,40(1):61–70.
JIANG Jiuning. Compound microbial shower of cyanogen-reducing bacteria and surfactant-producing bacteria in the gold deposit heap leaching site [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(1): 61–70.
- [10] 张林,魏书奇,毕馥漩,等. 功能化菌剂钝化土壤铅及促进黄爪瓜生长研究[J]. 农业环境科学学报, 2023,42(8):1729–1738.
ZHANG Lin, WEI Shuqi, BI Fuxuan, et al. Passivation of Pb (II) in soil and promoting cucumber growth using functional microbial agents [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(8): 1729–1738.
- [11] 何小三. 耐镉菌株 TCd-1 对水稻镉污染的修复效应及机理研究[D]. 福州:福建农林大学, 2018.
HE Xiaosan. Study on the remediation effects and mechanisms of cadmium tolerant strain TCd-1 on cadmium contaminated rice (Oryza sativa) [D]. Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.
- [12] 周高婷,杜剑波. 硫酸盐还原菌 WH16-1 对烟草吸收镉的影响[J]. 工业微生物,2023,53(6): 170–174.
ZHOU Gaoting, DU Jianbo. The effectiveness of Cd content of tobacco in Cd-contaminated tobacco soil by sulfate reducing bacterium WH16-1 [J]. Industrial Microbiology, 2023, 53(6): 170–174.
- [13] 牛磊,郑春丽. 生物炭协同微生物矿化技术修复复合重金属污染农田土壤[J]. 有色金属工程, 2023,13(11):141–155.
NIU Lei, ZHENG Chunli. Remediation of Farmland Soil Polluted by Compound Heavy Metals by Biochar Combined with Microbial Mineralization [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(11): 141–155.
- [14] 朱晓丽,赵锦秀,程燕萍,等. 核桃青皮在土壤重金属植物修复中的应用[J]. 西北大学学报(自然科学版),2023(6): 1004–1015.
ZHU Xiaoli, ZHAO Jinxiu, CHENG Yanping, et al. Here is the cleaned-up title with appropriate spacing and capitalization: The Application of Walnut Green Husk in Soil Heavy Metal Phytoremediation [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2023(6): 1004–1015.
- [15] 季晓雯. 生物炭负载微生物对砷铅镉复合污染土壤修复效果及机理研究[D]. 上海:华东理工大学,2022.
Ji Xiaowen. Effect and Mechanism of Bacteria Loaded Biochar on Remediation of Arsenic, Lead, and Cadmium Complex Contaminated Soil [D]. East China University of Science and Technology, 2022.
- [16] 郑曦萌. 生物炭固定化微生物技术对镉污染土壤的稳定化效果及其影响因素研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.
ZHENG Ximeng. Research on the Stabilization Effect and Influencing Factors of Biochar Immobilized Microorganisms on Cadmium Contaminated Soil [D]. Xi'an University of Technology, 2023.
- [17] 金明兰,赵海川,李华南,等. 秸秆生物炭与生物菌剂协同处理土壤中重金属和抗生素的研究[J]. 北方园艺,2024
JIN Minglan, ZHAO Haichuan, LI Huanan, et al. Synergistic treatment of heavy metals and antibiotics in pollutant soil by straw biochar and microbial agents soil [J]. Northern Horticulture, 2024.
- [18] 刘泽浩. Cd-PAHs 复合污染土壤的固定化微生物修复研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2023.
LIU Zehao. Immobilized microbial remediation of Cd-PAHs composite contaminated soil [D]. Liaoning University of Technology, 2023.
- [19] 徐继伟. 炭菌复合体治理红壤虫害及重金属铬污染的机制研究[D]. 昆明:云南师范大学,2023.
XU Jiwei. Effect and Mechanism of Bacteria Loaded Biochar on Remediation of Arsenic, Lead, and Cadmium Complex Contaminated Soil [D]. Yunnan Normal University, 2023.
- [20] 张文媛. 汞污染土壤耐汞菌的分离生长特性及除汞效果研究[D]. 西安:西安科技大学,2022.
ZHANG Wenyuan. Isolation and growth characteristics of mercury tolerant bacteria in mercury-contaminated soil and study on mercury removal effect [D]. Xi'an University of Science and Technology, 2022.
- [21] 王欢. 微生物复合菌剂的构建及其联合植物修复铁尾矿[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
WANG Huan. Construction of microbial compound bacterial agent and its combination with plants for iron tailings remediation [D]. Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [22] 杨梦姣. 龙葵联合微生物菌剂对镉污染土壤修复效果研究

- [D]. 西安:西安理工大学,2023.
- Yang Mengjiao. Title: Study On Fixing And Repairing Effect Of Solanum Nigra Combined With Microbial Agent On Soil Cadmium Element [D]. Xi'an University of Technology, 2023.
- [23] 王胜涛,卢琪,王羽,等. 樊庆生红球菌菌剂制备优化及其重金属修复促进效果研究[J]. 环境科学学报,2022,42(4): 403-411.
- WANG Shengtao, LU Qi, WANG Yu, et al. Rhodococcus qingshengi inoculant preparation and its role in promoting efficient heavy metal phytoremediation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, 42(4): 403-411.
- [24] 张东豪. 复合微生物菌剂强化植物萃取重金属的机理及应用研究[D]. 南京:南京农业大学,2021.
- ZHANG Donghao. Study on the Mechanism and Application of Compound Microbial Inoculum for Enhanced Plant Extraction of Heavy Metals [D]. Nanjing Agricultural University, 2021.
- [25] NA W, WANG X X, LI C, et al. Biological roles of soil microbial consortium on promoting safe crop production in heavy metal (loid) contaminated soil: A systematic review [J]. The Science of the Total Environment, 2023, 912.
- [26] 赵颖豪,刘兴宇,吕莹,等. 微生物复合菌剂在西北典型煤矿破损生态区修复中的应用[J]. 微生物学通报,2024,51(5): 1391-1404.
- ZHAO Yinghao, LIU Xingyu, LV Ying, et al. Application of microbial compound preparations in the restoration of damaged ecological areas in typical coal mines in the Northwest [J]. Microbiology Bulletin, 2024, 51(5): 1391-1404.
- [27] 庞浩. 复合重金属污染农田土壤的微生物矿化修复技术及示范[D]. 包头:内蒙古科技大学,2022.
- PANG Hao. Microbial mineralization remediation technology and demonstration for farmland soil contaminated with heavy metals [D]. Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022.
- [28] 顾乃鹏. 优势菌剂对六价铬和二氯苯混合废水的去除特性及机制[D]. 盐城市:盐城工学院,2023.
- GU Naipeng. Removal characteristics and mechanism of hexavalent chromium and dichlorobenzene mixed wastewater by dominant strains [D]. Yancheng Institute of Technology, 2023.
- [29] 吕琳洁. 复合菌剂对含铅废水吸附效果的实验研究[D]. 西安:西安理工大学,2021.
- LV Linjie. Experimental Study on the Adsorption Effect of Compound Bacteria on Lead-Containing Wastewater [D]. Xi'an University of Technology, 2021.
- [30] 贺晓晗. 生物炭固定耐镉菌群对水体中镉的吸附性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.
- HE Xiaohan. Immobilization of cadmium-tolerant bacterial flora of biochar on cadmium in water bodies adsorption performance study [D]. South China University of Technology, 2022.
- [31] 李芙蓉. 蒲公英中药渣生物炭负载枯草芽孢杆菌对水中 Cu²⁺ 的去除研究[D]. 长春:吉林农业大学,2023.
- LI Furong. Study on the removal of Cu²⁺ in water by biochar-loaded *Bacillus subtilis* in dandelion Chinese medicine residue [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.
- [32] 王丽敏. 高效聚磷菌处理含磷废水及菌剂吸附重金属的行为研究[D]. 长沙:中南大学,2022.
- WANG Limin. Study on the treatment of phosphorus-containing wastewater by high-efficiency PAOs and the adsorption behavior of heavy metals by biosorbents [D]. Central South University, 2022.
- [33] 徐芝芬. 制革废水多污染物生物强化协同去除机制研究[D]. 西安:陕西科技大学,2023.
- XU Zhifen. Synergistic Removal Mechanism of Multi-pollutants in Tannery Wastewater during Bioaugmentation Treatment Process [D]. Shaanxi University of Science and Technology, 2023.
- [34] 贾亚文. 一株耐酸真菌的分离鉴定及其对矿山废水修复作用初探[D]. 合肥:合肥工业大学,2021.
- JIA Yawen. Isolation and identification of an acid-resistant fungus and its effect on mine wastewater remediation [D]. Hefei University of Technology, 2021.
- [35] 郑格格. 菌藻固定化处理含 As(Ⅲ)和 Hg(Ⅱ)废水的研究及生物多样性分析[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
- ZHENG Gege. Study on the Immobilization of Bacteria and Algae for the Treatment of Wastewater Containing As(Ⅲ) and Hg(Ⅱ) and Analysis of Biodiversity [D]. Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [36] ZHAO D, CHEAH W Y, LAI S H, et al. Symbiosis of microalgae and bacteria consortium for heavy metal remediation in wastewater. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(3): 109943.
- [37] GONZALEZ-CAMEJO J, BARAT R, PACHES, M, et al. Wastewater nutrient removal in a mixed microalgae-bacteria culture; effect of light and temperature on the microalgae-bacteria competition [J]. Environmental Technology, 39(4): 503-515.
- [38] XU L, CHENG X, WANG Q. Enhanced Lipid Production in *Chlamydomonas reinhardtii* by Co-culturing With *Azotobacter chroococcum* [J]. Front Plant Sci, 2018, 9: 741.
- [39] ABURAI N, TSUKAGOSHI T, SEKIGUCHI S, et al. Mutual supply of carbon and nitrogen sources in the co-culture of aerial microalgae and nitrogen-fixing bacteria [J]. Algal Research, 2023, 70: 103001.
- [40] PRIYADARSHANEE M, DAS S. Biosorption and removal of toxic heavy metals by metal tolerating bacteria for bioremediation of metal contamination: A comprehensive review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(1): 104686.
- [41] 何小三,王微,肖清铁,等. 铜绿假单胞菌对镉胁迫水稻苗期生长与镉积累的影响[J]. 中国生态农业学报,2018,26(6)
- HE Xiaosan, WANG Wei, XIAO Qingtie, et al. Effects of *Pseudomonas aeruginosa* on growth and cadmium accumulation of rice seedlings under cadmium stress [J]. Journal of Chinese Ecological Agriculture, 2018, 26(6).
- [42] 瞿一清,赵雨桐,曹丹宁,等. 徐州城市污泥重金属赋存形态及生物有效性研究[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2016,34(1): 43-46.

- QU Yiqing, ZHAO Yutong, CAO Danning, et al. Study on the heavy metal speciation and bioavailability in urban sewage sludge in Xuzhou [J]. *Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 34(1): 43–46.
- [43] 方瑾, 郑巨浩, 钱佳丽. 简述土壤重金属污染源解析与修复技术的研究进展[J]. *皮革制作与环保科技*, 2024, 5(3): 100–102.
- FANG Jin, ZHENG Juhao, QIAN Jiali. A brief introduction to the research progress on source analysis and remediation techniques of soil heavy metal pollution [J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2024, 5(3): 100–102.
- [44] 杨正桥, 邹奇, 韦行, 等. 金属尾矿微生物对尾矿环境的适应与调控机制研究进展[J]. *生态环境学报*, 2024, 33(1): 156–166.
- YANG Zhengqiao, ZOU Qi, WEI Hang, et al. Micro-organisms in Metal Tailings [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2024, 33(1): 156–166.
- [45] DAVIS A T, VOLESKY B, MUCCI A. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae [J]. *Water Research*, 2003, 37(18): 4311–4330.
- [46] BRUINS R M, KAPIL S, OEHEME W F. Microbial resistance to metals in the environment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2000, 45(3): 198–207.
- [47] WANG J, CHEN C. Biosorbents for heavy metals removal and their future [J]. *Biotechnology Advances*, 2008, 27(2): 195–226.
- [48] SU Y, ZHU M, ZHANG H, et al. Application of bacterial agent YH for remediation of pyrene-heavy metal co-pollution system: Efficiency, mechanism, and microbial response [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119841.
- [49] WU J, FU X, ZHAO L, et al. Biochar as a partner of plants and beneficial microorganisms to assist in-situ bioremediation of heavy metal contaminated soil [J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 923: 171442.
- [50] LUO Y, LI Z, XU H, et al. Development of phosphorus composite biochar for simultaneous enhanced carbon sink and heavy metal immobilization in soil [J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 831: 154845.
- [51] XU X, WU Y, WU X, et al. Effect of physicochemical properties of biochar from different feed stock on remediation of heavy metal contaminated soil in mining area [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2022, 32: 102058.

Research progress in treatment of nonferrous metallurgical pollution by biological agents

LI Jiarui¹, ZHENG Yanan¹, QI Guojin¹, WU Heng^{2,3}, XING Zhilin³

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. College of Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: The discharge of waste from the non-ferrous metallurgical industry continues to grow, posing increasingly severe environmental challenges. Traditional physicochemical treatment technologies, while effective, are associated with high costs. Biological agent technology has garnered attention in the field of non-ferrous metallurgical pollution treatment due to its advantages of cleanliness, sustainability, and low cost. It has been applied in soil remediation and wastewater treatment, yet a comprehensive review of its application progress is lacking. Through bibliometric analysis, it is found that research interest in biological agent technology has been climbing annually over the past two decades, especially in East China, Northwest China, and Northeast China. In terms of application, representative strategies include constructing strain-plant symbiotic systems and algae-bacteria symbiotic systems, supplemented by immobilization methods using porous carriers. Mechanistically, it has been clarified that microorganisms primarily adsorb heavy metals through cell wall adsorption, intracellular accumulation, and extracellular precipitation. In the future, in response to the interference of bacterial species, temperature, and pH values on this technology, efforts should be intensified in the research and development of novel biological agents, pilot-scale application testing, optimization of composite agent design strategies, and the development of new carrier materials. Additionally, given the inadequate and incomplete research on application mechanisms, it is advisable to couple metabolomics, transcriptomics, and isotope labeling to delve deeper into gene regulation mechanisms. This article systematically reviews the research hotspot, application status, and microbial mechanisms of biological agent technology in the treatment of non-ferrous metallurgical pollution, providing a theoretical reference for the improvement and practical application of this technology.

Key words: nonferrous metallurgy; heavy metal emissions; heavy metals removal; biological agents; soil remediation; wastewater treatment