

李莎,吴涵,常思静,等.生物炭载体固定化功能菌修复铅污染土壤的研究进展[J].环境科学与技术,2025,48(11):56-66. Li Sha, Wu Han, Chang Sijing, et al. Research progress on immobilization of functional bacteria on biochar carrier for remediation of lead-contaminated soil[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(11): 56-66.

生物炭载体固定化功能菌修复铅污染土壤的研究进展

李莎^{1,2*}, 吴涵¹, 常思静^{1,2}, 张晓艳¹,
孙红玉¹, 张成园¹

(1. 兰州交通大学生物与制药工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃省微生物资源开发利用重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要:近年来,随着工业化进程的加快,土壤重金属污染问题日益突出,以铅为代表的有毒重金属对生态安全和人体健康造成了严重的威胁。针对土壤铅污染的治理和修复,生物炭载体固定化功能菌技术受到了越来越多的关注,它结合了生物炭的物理化学特性与功能细菌的生物活性,在修复铅污染土壤领域得到了广泛的研究和应用。该文阐述了生物炭载体固定化功能菌的基本原理和常用方法,系统梳理了该技术修复铅污染土壤的修复效果、环境效应、影响因素以及作用机制,并提出了生物炭载体固定化功能菌在未来实际应用中可能面对的风险与挑战。

关键词:生物炭; 固定化细菌; 铅污染; 土壤修复

中图分类号:X53 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.0578.25.338 文章编号:1003-6504(2025)11-0056-11

Research Progress on Immobilization of Functional Bacteria on Biochar Carrier for Remediation of Lead-contaminated Soil

LI Sha^{1,2*}, WU Han¹, CHANG Sijing^{1,2}, ZHANG Xiaoyan¹,
SUN Hongyu¹, ZHANG Chengyuan¹

(1. School of Biological and Pharmaceutical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Key Laboratory of Microbial Resources Exploitation and Application of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In recent years, with the acceleration of industrialization, heavy metal contamination of soil has become increasingly prominent issue. Toxic heavy metals, particularly lead, have posed a significant threat to both ecological security and human health. To address and remediate lead pollution in soil, the immobilization of functional bacteria on biochar carrier has attracted growing attention. This approach combines the physicochemical properties of biochar with the biological activity of functional bacteria, and has been widely studied and applied in the remediation of lead-contaminated soil. This paper discusses the basic principles and common methods of immobilizing functional bacteria on biochar carriers. It systematically reviews the remediation effects, environmental impacts, influencing factors, and underlying mechanisms of this technology, and highlights the risks and challenges that may arise in its future practical applications.

Key words: biochar; immobilized bacteria; lead pollution; soil remediation

我国土壤重金属污染问题十分严重,根据2014年《全国土壤污染状况调查公报》发布的数据^[1],受到镉(Cd)、铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)等重金属污染的土壤点位超标率高达19.4%,其中Pb的点位超标率为1.5%。Pb是一种十分常见的重金属,常被用于电池制造以及合金制备^[2]。随着工业化的不断加速,矿山开

采、工业排放、污水灌溉等人类活动导致越来越多的Pb被排放到土壤环境中。据统计,我国耕地受到Pb污染的面积超过200万hm²,因此导致的粮食产量年均减少超过100万t,累计经济损失超过数十亿元^[3]。通过食物链和污染的空气,环境中的Pb可经皮肤、呼吸系统和消化系统进入人体,如果Pb蓄积在骨骼或

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://tjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2025-03-27;修回2025-04-24

基金项目:甘肃省自然科学基金项目(25JRRA167);甘肃省极端环境微生物资源与工程重点实验室开放基金项目(EEMRE202402);兰州交通大学-天津大学联合创新基金项目(LH2023007);兰州交通大学大学生创新创业训练计划项目(DC2510732CX0219)

作者简介:李莎(1987-),女,副教授,博士,主要从事微生物资源开发利用及重金属污染的生物修复研究,(电子信箱)lisha@lztu.edu.cn;*通讯作者。

儿童的重要组织器官中,可能会导致神经、生殖、心血管系统损伤和发育障碍,甚至引起内源性 Pb 中毒^[4,5]。因此,如何有效地修复 Pb 污染土壤,维持生态系统的绿色可持续发展,已成为全球环境保护和生态修复领域亟须解决的重点问题之一。

Pb 污染土壤的修复方式可分为物理、化学和生物三大类^[6]。传统的物理化学修复技术不仅成本高、扰动土壤的原生结构,还会引入二次污染^[7,8];生物修复技术主要包括动物修复、植物修复和微生物修复^[9,10]。细菌作为地球上分布最广泛的微生物,因其具有生长迅速和耐受性强等特点,已被广泛应用于 Pb 污染修复。然而,细菌的生长繁殖易受到外界环境因素(如温度、pH、营养物质和能量来源等)的影响而导致修复效果大打折扣^[11]。因此,研究者们将目光转向了将细菌固定在合适的载体上——生物炭,为其提供稳定的生存环境。

生物炭是一种由废弃生物质经过热解或炭化过程得到的炭质材料^[12],拥有独特的物理和化学性质,将具备重金属吸附、转化功能的细菌固定到生物炭上是一种创新的修复策略。生物炭具有发达的孔隙结构和巨大的比表面积,其表面丰富的羧基、酚羟基等官能团与微生物细胞具有强亲合力^[13],可促进功能菌的富集和定殖。同时,生物炭能为细菌提供庇护所,缓冲外界环境变化(如温度、pH、重金属浓度等)对功

能菌活性的影响,显著提高功能菌在高浓度重金属污染土壤中的存活率,从而延长修复时间并增强修复的稳定性。此外,生物炭含有的营养元素(如碳、磷、钾、钙、钠、镁等)可为功能菌代谢提供额外的碳源和矿质养分,促进功能菌的繁殖^[14]。因此,生物炭载体固定化功能菌技术在治理和修复 Pb 污染土壤方面展现出巨大的潜力。

在 Web of Science 数据库中以 lead、biochar、immobilization 和 bacteria 为关键词,检索 2020–2024 年间的文献,对相关性最高的前 200 篇文献的关键词共现进行整理,可以较为精确地反映生物炭载体固定化功能菌研究的前沿、热点和未来趋势。结果显示,近 5 年来,生物炭载体固定化功能菌在去除和修复水体、土壤重金属污染方面的研究日益深入,其中 Pb 污染土壤的修复是重要研究方向之一。本文主要介绍生物炭载体固定化功能菌修复 Pb 污染土壤的效果、影响因素和作用机制。

1 生物炭载体固定化功能菌的制备方法

生物炭载体固定化功能菌的制备方法如表 1 所示,这些方法可以将细菌固定在生物炭的表面或内部,增强细菌的附着和生长能力^[15]。在实际应用中,根据土壤性质、污染程度以及修复目标等因素,可选择合适的固定化方式,以达到最佳的修复效果。

表 1 常见生物炭载体固定化功能菌的制备方法及其特点比较

Table 1 Comparison of common preparation methods and characteristics of immobilization of functional bacteria on biochar carrier

固定化方法	原理	优点	缺点	参考文献
吸附法	通过生物炭和细菌表面的作用力(范德华力、氢键和电荷吸引)使两者吸附结合在一起	相对简单且容易实现,成本低	细菌和生物炭之间的相互作用力较弱且不稳定,导致细菌易发生解吸而脱落	[16,17]
包埋法	利用聚乙烯醇、海藻酸盐等高分子聚合物的凝胶网状结构,将生物炭和细菌包裹在里面	不可逆、成本低、易操作,既能减少细菌在固定化过程中的泄漏,又能隔绝外界影响从而保持细菌的高活性	海藻酸盐易降解,机械稳定性差,对螯合剂敏感;聚乙烯醇、聚苯乙烯等也存在传质性差、通透性不足的缺点,会影响细菌的物质交换和呼吸作用	[18]
介质捕获法	源自膜生物法,主要利用载体的特殊结构,在一定范围内捕获或限制目标细菌	捕获技术可以保护细胞免受外部侵害,为反应过程提供温和的条件	适用范围较小,多用于水体修复,且存在易结垢、易堵塞膜等缺点	[19]
共价化合/交联法	细菌表面的化学物质与生物炭中的某些官能团反应形成牢固的共价键,如果没有特定活性基团就需要使用活化剂或者交联剂	可以显著增加细菌固定的稳定性,还有助于提高细菌对重金属等污染物的处理能力	基团结合时反应剧烈难以控制,且目前研究的相关案例较少。若使用活化剂或交联剂,多数会降低细菌的活性	[20,21]
复合固定法	将上述 2 种或多种固定方法进行组合	可以根据污染的实际情况,结合选用不同的固定化方法,以使其优势互补,得到性能更优异的复合固定载体	成本较高且操作困难	[22]

2 生物炭载体固定化功能菌在 Pb 污染土壤修复中的应用

2.1 生物炭载体固定化不同功能菌对 Pb 污染的修复效果

2.1.1 生物炭载体固定化解磷菌对 Pb 污染的修复效果

解磷菌(phosphate solubilizing bacteria, PSB)能够在土壤环境中将难以被植物吸收利用的磷转化为可吸收利用的形态,这类细菌包含芽孢杆菌属、假单

胞菌属、欧文氏菌属、沙门氏菌属、肠杆菌属等约20类,无论是单独使用还是与植物结合使用,PSB 都已被证明在重金属污染土壤的修复与治理中发挥重要作用^[23]。

芽孢杆菌属(*Bacillus*)中诸如*Bacillus cereus*、*Bacillus thuringiensis*、*Bacillus megaterium* 等均有解磷作用,同时具备修复重金属污染土壤的功能。Song等^[24]将200 mL具有解磷功能的*Bacillus sp. KSB7*混悬液负载到40 g花生壳生物炭上,投加到废弃焦化厂的污染土壤中,发现土壤中生物可利用的Pb含量比对照组下降了33 mg/kg左右,比单独添加*Bacillus sp. KSB7*和花生壳生物炭组分别下降了约19 mg/kg和8 mg/kg。Ji等^[25]研究了生物炭固定化混合菌群修复重金属污染土壤的可行性,将解磷菌*Bacillus velezensis* HN8、*Bacillus velezensis* HN11和*Bacillus amyloliquefaciens* HN2、*Bacillus cereus* GS6以2种不同的固定化方式一起负载到钙改性玉米秸秆生物炭上,发现2种方式均有较好的修复效果,土壤中Pb的固定率分别达到70.80%和60.34%,说明生物炭与混合菌群具有良好的协同效应。通过X射线光电子能谱(XPS)、傅立叶变换红外光谱(FTIR)、X射线衍射(XRD)等分析技术,进一步证实了生物炭固定化芽孢杆菌在修复Pb污染土壤时,涉及Pb²⁺的沉淀、络合等作用机制。

除了芽孢杆菌属,其他属的PSB也具备修复Pb污染土壤的功能。Chen等^[26]的研究认为,生物炭不仅可以通过自身孔隙、电子传递、调节pH等特性提高PSB对Pb胁迫的抗性,还能激发PSB自身的解毒还原途径。同时,他们采用猪粪生物炭固定一株PSB(*Enterobacter sp. CGMCC17428*),发现其对Pb²⁺的去除率比单独使用PSB高148.77%。Zhu等^[27]以小麦秸秆生物炭固定一株无机磷溶解菌——*Acinetobacter calcoaceticus* iPSB20-3,制成生物复合材料并研究其对土壤Pb的修复效果,结果表明生物炭固定化菌株可通过生物吸附和生物沉淀的方式达到更好的Pb钝化效果,XRD分析表明主要沉淀物为Pb₅(PO₄)₃Cl。此后,Zhu等^[28]从陕西省宝鸡市某尾矿污染土壤中筛选出一株有机磷溶解菌——*Serratia marcescens* OPB3-6-1,将其负载到核桃壳生物炭上,发现该偶联体系对Pb²⁺的吸附具有协同作用,拟合的动力学模型表明Pb²⁺的吸附过程以化学反应为主。由于PSB能在培养基和生物炭中有效释放磷,因而既能维持细菌自身的生长,又能为矿物沉淀的形成提供有效磷源,更容易将Pb²⁺矿化成Pb₅(PO₄)₃OH和Pb₅(PO₄)₃Cl等稳定的无机矿物质。因此,生物炭固定化PSB是近年来重金属污染修复领域的一个热点,具有很好的应用前景。

2.1.2 生物炭载体固定化固氮菌对Pb污染的修复效果

土壤中的固氮细菌(nitrogen fixing bacteria)种类繁多,如固氮菌属(*Azotobacter*)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)、根瘤菌属(*Rhizobium*)、弗兰克氏菌属(*Frankia*)和巴氏梭菌(*Clostridium pasteurianum*)。除此之外,一些芽孢杆菌如*Bacillus subtilis*和*Bacillus amyloliquefaciens*,以及产碱杆菌属(*Alcaligenes*)等也具备固氮功能。已有多项研究证明固氮细菌具有修复Pb污染的功能。如Ali等^[29]的研究表明*Klebsiella aerogenes*和*Klebsiella pneumoniae*的抗氧化能力使其能够耐受Pb暴露,而刘文竹^[30]分离出的固氮菌*Klebsiella trevisan*与Pb²⁺有较强相互结合作用,张静等^[31]通过共生固氮菌*Sinorhizobium fredii* S15阻控大豆吸收Pb²⁺,缓解Pb胁迫。

目前已有部分研究将固氮细菌固定于生物炭载体上修复Pb污染土壤。Zhu等^[32]将固氮菌*Bacillus subtilis* HJFbgrTM固定在玉米秸秆生物炭上,通过扫描电镜(SEM)观察到菌株与生物炭黏附良好,形成了较厚的生物膜,且该材料使土壤中有效Pb的含量降低了70.4%,同时使玉米茎、叶中的Pb含量降低了61.1%,根中的Pb含量降低了71.1%,结果表明*Bacillus subtilis*作为一种促进植物生长和增强植物抗病性的根瘤菌,与生物炭具有良好的协同效应,能显著降低土壤中Pb的生物有效性,并减少玉米植株中的Pb积累。

2.1.3 生物炭载体固定化硫酸盐还原菌对Pb污染的修复效果

硫酸盐还原菌(sulfate reducing bacteria, SRB)在厌氧条件下可以把硫酸根还原为硫化氢或硫离子,并与重金属离子结合生成金属硫化物沉淀,从而实现土壤重金属的钝化^[33]。Lyu等^[34]选取广西某工农业发达地区受多种重金属污染的农田为研究对象,将含有SRB(*Desulfovibrio*为主要功能菌)的菌液喷入试验区土壤,后续通过Tessier五步提取实验验证了土壤中Cd、Cr、Cu、Pb和Zn等重金属从可迁移态转化为了稳定的化学形态,证明SRB修复土壤重金属污染的能力。然而,受到诸多环境因素的影响,单独使用SRB可能会造成其活性被抑制,从而导致重金属污染修复效率降低。因此,生物炭载体固定化SRB技术的开发是非常必要的。

Wu等^[35]从有色金属冶炼厂分离得到一株SRB——*Clostridium thiogenes* thermostable HY-1,并将其固定到秸秆生物炭上,发现在液体培养基中对Pb²⁺的去除率高达95.7%,同时,通过XRD和XPS进一步确认,固定产物为PbS。刘泽铭等^[36]将筛选出的SRB和*Thiobacillus ferrooxidans*固定到以污水处理厂人工湿地植物为原料的生物炭上,研究其对某渣场铜矿选冶

渣中重金属的修复效果,经过 30 d 处理后,测得酸可溶态的 Pb 比例下降至 0.68%,残渣态 Pb 的比例增加至 94.60%,修复效果显著。Ye 等^[37]的研究表明,混合 *Thiobacillus* 能够在硫铁改性生物炭上吸附并富集,生物炭中的硫和铁促进了 *Thiobacillus* 的生长,并且制成的生物炭载体固定化菌剂使土壤中的 Pb 的可交换部分由 22.86% 增加到 37.19%,再利用黑麦草吸收积累 Pb。

2.2 生物炭载体固定化功能菌对植物生长和土壤性质的影响

2.2.1 生物炭载体固定化功能菌对植物生长的影响

生物炭载体固定化功能菌已被证明可以减少作物可食用部位的金属积累,同时提高作物品质^[38]。Wei 等^[39]用 *Enterobacter asburiae* G3、*Enterobacter tabaci* I12、*Klebsiella trevisan* J2 按照 1:3:3 的比例构建复合菌群,并通过物理吸附和海藻酸钠包埋固定在玉米秸秆生物炭上,研究其对 Cd、Pb 污染土壤中小白菜生长的影响。结果表明,物理吸附法比包埋法表现出更好的修复效果,小白菜的根和地上部鲜重分别增加了 76.81% 和 186.18%,干重分别增加了 128.57% 和 240.64%。其他研究表明,*Enterobacter asburiae* 和 *Enterobacter tabaci* 可能是通过产生植物激素吲哚乙酸来促进重金属胁迫下植物的生长^[38]。Chen 等^[40]将 *Bacillus cereus* WHX-1 固定到浒苔生物炭上,发现该方法对重金属污染下黑麦草的生长情况具有良好的改善效果,相较于单独使用生物炭或 WHX-1,添加了生物炭载体固定化 WHX-1 菌株的盆栽黑麦草比对照组根长平均长 3.3 cm,株高平均高 10 cm,同时叶绿素含量增加 76.89%,间接改善了植物的光合作用。

另外,生物炭载体固定化功能菌还会影响植物体内丙二醛(malondialdehyde,MDA)的含量和抗氧化酶活性。在 Pb 胁迫下,植物体内会产生大量的活性氧自由基,导致氧化损伤。而抗氧化酶是植物抵御氧化损伤的重要防线。生物炭载体固定化功能菌通过降低 Pb 的生物毒性,可减轻植物的氧化应激反应,有助于植物更好地应对 Pb 污染带来的危害,维持正常的生理功能。赵睿^[41]在 Cd、Pb、Zn、Hg 复合污染的试验土壤中种植龙葵进行植物修复,将前期筛选的 *Bacillus cereus*、*Bacillus* sp. BG3-7、*Pseudomonas fluorescens* 和 *Achromobacter spanius* 构建复合菌群,固定到硫化纳米零价铁生物炭上并添加到土壤中,结果发现,单纯植物修复组的龙葵体内 MDA 含量最高,而添加了生物炭载体固定化功能菌群的联合修复处理中,龙葵的 MDA 含量有所下降,同时还增强了龙葵 3 种抗氧化酶超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和过氧化物酶(peroxidase,

POD)的活性,表明生物炭固定化复合菌群有助于缓解重金属复合污染对植物产生的氧化胁迫。

总体而言,生物炭载体固定化功能菌可通过增强植物重金属耐受性、增加有益微生物定殖以及提高重金属的稳定性等方式来促进植物生长^[42],包括促进根长、株高、叶绿素的合成以及抗氧化酶活性等(图 1)。这些积极影响共同作用,使得生物炭载体固定化功能菌成为一种有效的重金属污染土壤修复技术,为植物在 Pb 污染土壤环境中的健康生长提供了有力支持。

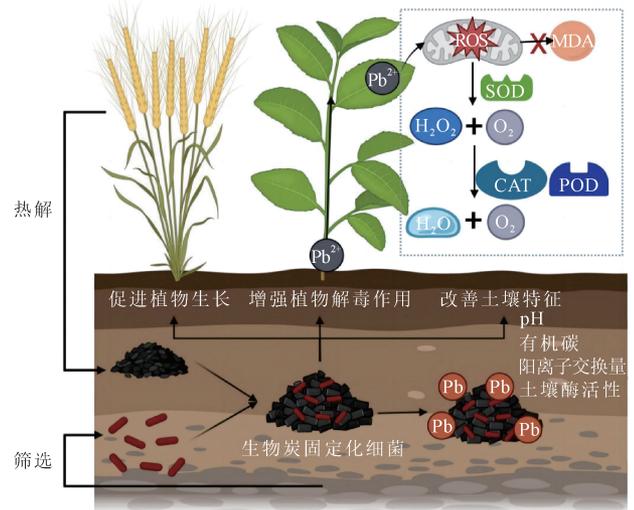


图 1 生物炭载体固定化功能菌对植物生长和土壤性质的影响
Fig.1 Effects of immobilization of functional bacteria on biochar carrier on plant growth and soil properties

2.2.2 生物炭载体固定化功能菌对土壤性质的影响

生物炭载体固定化功能菌对土壤的影响是一个多维度且复杂的过程,不仅能降低土壤中的有效 Pb 含量,还能显著改善土壤的各项理化性质。Gou 等^[43]研究表明,生物炭载体固定化功能菌可以调节土壤 pH 和电容,增加土壤有机碳和养分含量,提高土壤酶活性,最终达到改善土壤环境的目的,使该技术成为一种可持续的重金属污染土壤修复技术。

土壤酶包括脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶等,在土壤有机质分解、养分循环和氧化还原反应中发挥重要作用。土壤酶对各种胁迫尤其是重金属胁迫高度敏感,因此,可以作为评估土壤质量和肥力的综合生物指标^[44]。Wei 等^[45]用玉米秸秆生物炭分别负载 *Enterobacter tabaci* I12 和 *Enterobacter asburiae* G3,并将其添加到受 Cd、Pb 污染的土壤中,发现无论是单一使用功能菌株或生物炭,还是采用生物炭载体固定化功能菌的组合,均能提高 3 类土壤酶的活性,特别是生物炭固定化 G3 处理组的提升效果最明显,脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶的活性分别提高了 70.35%、77.19% 和 53.95%。原因可能是有益菌处理可以刺激植物分泌各种有机物(蛋白质、氨基酸、糖类和有机酸等),从而

促进了土壤微生物的增殖和代谢,最终使得土壤酶活性增强^[46]。同时,生物炭载体固定化功能菌还可以调节土壤碳氮比,协调植物根际微生态环境与营养物,为微生物的生长发育提供养分。

2.2.3 生物炭载体固定化功能菌对土壤微生物群落的影响

生物炭载体固定化功能菌的应用还可重塑土壤微生物群落结构。通过降低土壤有效重金属浓度,改善土壤环境质量,减轻重金属对土壤微生物群落的胁迫,促进有益功能菌群的富集。

魏书奇^[47]用牛骨生物炭固定 *Enterobacter* sp. CGMCC 1.1733. 制成功能化菌剂并添加到 Pb 污染土壤中。发现原本污染土壤中主要的优势菌门为变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)和厚壁菌门(Firmicutes)。在添加功能化菌剂后,虽然没有改变原有的优势菌门,但是影响了其相对丰度,变形菌门、芽单胞菌门和厚壁菌门丰度下降,而放线菌门、绿弯菌门和酸杆菌门丰度增加。分析表明,土壤 Pb 污染物导致重金属耐受微生物群落的相对丰度较高,而生物炭载体固定化功能菌的添加有效地钝化了可迁移态的 Pb,减轻了 Pb 对微生物的毒性,从而显著降低了耐受微生物群落的相对丰度。Wei 等^[39]的研究同样表明,在添加了 2 种不同方式固定功能菌株的生物炭之后,土壤细菌群落发生了显著的变化。与对照组相比,物理吸附法固定制备的玉米秸秆生物炭和椰壳生物炭使土壤中鞘氨醇单胞菌的相对丰度从 7.19% 分别增加到 13.13% 和 16.19%。而包埋法固定制备的 2 种生物炭使肠杆菌的相对丰度从 0.32% 分别增加到 0.87% 和 2.43%。同时,2 种方法还使乳酸菌得到了富集。

3 生物炭载体固定化功能菌修复 Pb 污染土壤的影响因素

3.1 生物炭的性质对修复效果的影响

生物炭的物理性质(如孔径、表面积)和化学性质(如官能团、碳含量)会对炭载体与细菌的相互作用和重金属污染修复效率产生重要影响,制备生物炭的热解工艺条件和原料类型会影响最终的炭载体结构和官能团数量^[48]。生物炭的物理结构通常取决于炭化温度,因为热解过程中挥发分的排放有助于孔隙的发育,温度的升高迫使挥发分从炭中析出,推动孔径和表面积的增加^[16],进而可以提高吸附 Pb 的效率。王红等^[49]的研究表明,随着热解温度的升高,生物炭对土壤中 Pb 的吸附率和单位吸附量均呈现逐渐增大的趋势。与低温条件制得的生物炭相比,高温下制得的生

物炭产生的芳香碳环层更多,稳定性更强^[50],更容易负载细菌,从而更好地发挥协同修复作用。而将特定细菌负载至生物炭上也能够显著改善生物炭的孔径结构。陈颢明等^[51]将一株 PSB 固定到稻壳生物炭和污泥生物炭上,由于该菌株能产有机酸,从而使 2 种生物炭的比表面积分别增加了 175.0% 和 47.4%,显著增强了对 Pb²⁺ 的吸附作用。原料类型主要通过影响生物炭的灰分含量、阳离子交换能力和表面官能团来改变生物炭的化学性质^[52]。如动物粪便热解得到的生物炭一般灰分含量高,而植物体制成的生物炭通常具有较高的阳离子交换能力。不同原料制成的生物炭表面官能团的含量和类型也各不相同,因而对土壤中 Pb 污染的修复效率存在差异。

3.2 土壤 pH 对修复效果的影响

pH 通过改变细菌的活性、生物炭表面的正负电荷、Pb 的形态和生物有效性等对修复效果产生重要影响^[16]。在酸性土壤中,土壤胶体表面的阳离子交换位点被 H⁺ 占据,使 Pb 的迁移性增强,主要以可溶性离子或游离态存在,生物有效性高、毒性强,因此可能导致功能菌活性降低,修复效率差强人意。而在中性至碱性土壤中,Pb 易形成难溶性沉淀(如 Pb(OH)₂、PbCO₃ 等),生物有效性降低,同时生物炭表面的负电荷增加,更易吸附 Pb²⁺^[53],因而使土壤修复的效率提升。多数参与修复的功能菌如假单胞菌、芽孢杆菌都适宜中性至弱碱性环境^[40]。Lai 等^[54]的研究表明,由于稻壳生物炭含有一定数量的碱性物质,添加稻壳生物炭能使土壤的 pH 值提高 25.80%,从而强化对重金属污染的修复效果。Wang 等^[55]将一株 PSB(*Leclercia adecarboxylata* L1-5)负载到铁改性生物炭上用以修复 Pb 污染土壤,结果表明,该处理提升了土壤 pH,使土壤中残渣态的 Pb 含量提高了 64.85%,钝化效率显著提高。

3.3 环境温度对修复效果的影响

细菌的代谢活性受到环境温度的影响,多数细菌在 25~37 °C 时代谢旺盛,分泌胞外聚合物或酶促进 Pb 的固定^[56]。当环境温度低于 15 °C 时,酶活性降低,细菌生长停滞;当环境温度超过 40 °C 时,可能导致蛋白质变性,部分菌种进入休眠或死亡^[16]。因此,无论是低温还是高温条件,都会使生物炭载体固定化功能菌对 Pb 污染土壤的修复效率显著下降。

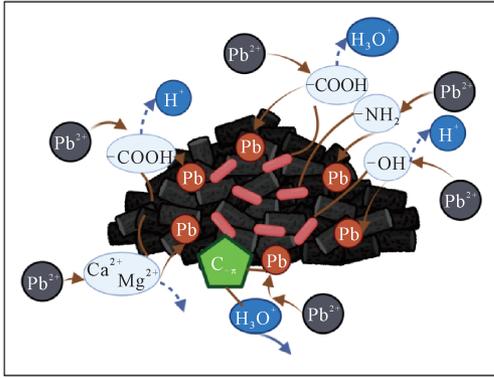
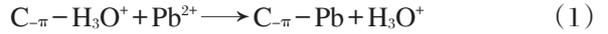
4 生物炭载体固定化功能菌修复 Pb 污染的作用机制

4.1 吸附/生物吸附

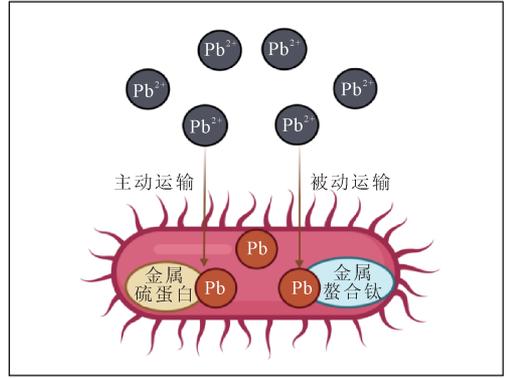
生物炭和细菌可分别通过不同方式吸附土壤中的重金属(图 2(a))。生物炭可通过静电引力、范德华力等物理作用实现重金属吸附^[57]。研究表明,生物炭

表面具有丰富的芳香环结构,其中的 π 电子可以与带正电荷的重金属离子发生静电吸引,从而实现生物炭

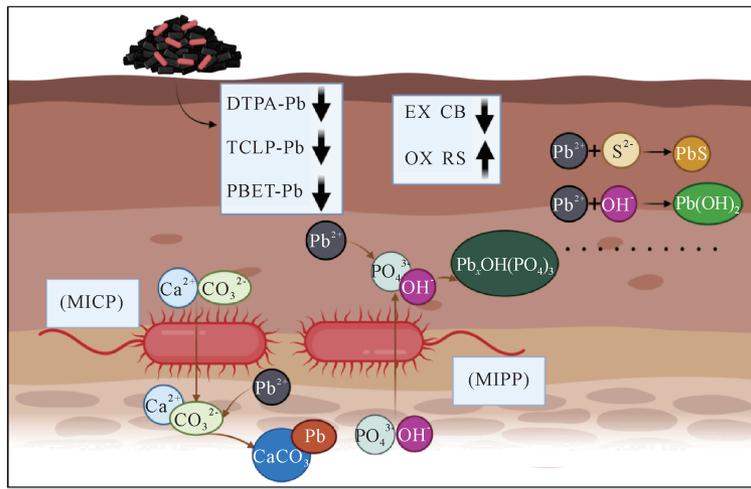
对 Pb^{2+} 的稳定吸附^[58]。反应式如下:



(a) 吸附/生物吸附



(b) 生物累积



(c) 生物转化

图2 生物炭载体固定化功能菌修复Pb污染的作用机制

Fig.2 Mechanism of immobilization of functional bacteria on biochar carrier to remediate lead pollution

Hao 等^[59]的研究表明,生物炭表面富含的羟基、羧基等官能团与 Pb^{2+} 发生络合作用也是生物炭吸附 Pb^{2+} 的主要机制之一。除此之外,生物炭还可以通过释放 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 等可交换性盐基阳离子与 Pb^{2+} 进行离子交换,从而实现对 Pb 污染土壤的修复^[60]。与生物炭类似,细菌的离子交换作用也可以发生在环境中的 Pb^{2+} 和细胞壁表面的阳离子之间,且细菌表面的电负性官能团同样可以络合 Pb^{2+} ,形成金属络合物,被吸附固定在细胞表面^[61]。除菌体本身之外,细菌分泌的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)也在吸附过程中发挥着重要作用^[62]。

当功能菌固定在生物炭载体上时,二者之间的相互作用使得对重金属的吸附更加高效。生物炭的多孔结构为功能菌提供了良好的生长环境,使其能够在生物炭表面或内部大量繁殖,进一步增加了 Pb^{2+} 的吸附位点,提高了 Pb^{2+} 的吸附容量,因此,固定在生物炭上的功能菌具有更强大的吸附能力^[53]。Zuo 等^[63]将 *Bacillus thuringiensis* HM-311 用海藻酸钙微

球固定在复合材料生物炭上,发现在 8 h 时 Pb^{2+} 的吸附率达到 75%,是游离 HM-311 菌株的 1.5 倍。Zhu 等^[27]的研究表明,小麦秸秆生物炭固定化 *Acinetobacter calcoaceticus* iPSB20-3 对 Pb^{2+} 的平衡吸附率分别比小麦秸秆生物炭和 iPSB20-3 菌株的单一吸附率高 22.63% 和 33.59%。功能菌还能通过代谢活动改变生物炭表面的化学性质^[64],如增加官能团的数量或改变官能团的种类,从而增强生物炭对 Pb^{2+} 的吸附能力。

4.2 生物累积

Pb^{2+} 既可通过被动扩散也可通过主动运输的方式进入细胞,留在液泡中或与细胞质分子结合^[65]。细胞中存在多种分子如金属硫蛋白(metallothioneins, MTs)、金属螯合肽、谷胱甘肽和半胱氨酸等可以直接或间接与 Pb^{2+} 络合,并通过区室化作用将这些重金属螯合物封存在特定细胞器内,从而实现重金属的生物累积^[66](图 2(b))。MTs 不仅参与细胞内 Pb 的隔离,还参与 Pb^{2+} 的转运和络合。Naik 等^[67]的研究发现,由于存在编码 MTs 的 *bmtA* 基因, *Pseudomonas aeruginosa* WI-1 可以

将 Pb^{2+} 隔离在细胞内,最大累积能力达到 26.5 mg/g, 其还在 *Salmonella cholerae* 4A 中发现了与 Pb 耐受相关的 MTs 的基因 *smtA*, 对 Pb 的累积量可达 19 mg/g^[68]。据报道,在 Pb 污染土壤修复中,芽孢杆菌属也具有强大的 Pb 累积能力^[32]。活跃生长的细菌更容易发生铅的生物累积^[69],如将这些细菌固定在生物炭上,将能够更有效地捕获土壤中的 Pb。Zhang 等^[70]的研究表明,改性生物炭固定化 *Bacillus cereus* PSB-2 可通过提高 *cmtR*、*smtB* 等基因的表达来增强对 Pb 的生物累积,从而降低土壤中的 Pb 浓度。*cmtR*、*smtB* 不仅是 *ArsR* 家族的转录调节因子,也是 Pb 应答的转录抑制因子。从重金属抗性基因的物种贡献来看,同一基因在不同处理中的物种贡献不同,*Janibacter* 是处理组中抗性基因的主要贡献者。

4.3 生物转化

生物转化是指细菌通过生物矿化、生物沉淀和氧化还原等途径将土壤中的 Pb 从可迁移态钝化为更多的稳定形态。细菌代谢产生的碳酸根离子、硫离子和

磷酸根离子,可以与金属离子发生沉淀反应,将有机的重金属转化为无毒或低毒的金属沉淀^[25]。生物矿化主要是指细菌通过生物活动诱导无机矿物的沉淀过程。金属可在各种细胞代谢物(如磷酸盐、硫化物、氢氧化物或碳酸盐)的作用下在细胞内外矿化^[71],与一般沉淀作用的区别是生物矿化能够形成晶体结构明确的矿物。生物矿化的主要机制是微生物诱导碳酸盐沉淀(microbial induced carbonate precipitation, MICP)和磷酸盐沉淀(microbial induced phosphate precipitation, MIPP)(图 2(c))^[72]。例如,细菌可以吸附 Pb^{2+} ,在强碱条件下, Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 结合形成 $CaCO_3$ 沉淀,同时共沉淀 Pb^{2+} ,通过在细胞表面沉淀含铅碳酸盐矿物,诱导 Pb^{2+} 的生物转化^[73]。Jalilvand 等^[74]的研究发现,嗜根葡萄球菌可以将 96.3% 的可溶性碳酸盐转化为不溶性碳酸盐矿物,其中存在 Pb 矿物晶体。MIPP 过程是通过添加磷酸盐,使微生物分泌的磷酸酶或植酸酶等代谢活性增加,从而沉淀 Pb^{2+} ,并以含 Pb 磷矿物的形式附着在细胞表面,涉及 MIPP 的生化反应方程如下^[73]:



初诗禹等^[75]发现筛选出的矿化细菌 *Bacillus paramycoides* GS-2 能够通过菌株表面的羟基、羧基、酰胺基和磷酸基团等将 Pb^{2+} 诱导矿化成 $Ca_{2.5}Pb_{7.5}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$ 、 $Ca_{2.1}Pb_{7.9}Cl_2(\text{PO}_4)_6$ 和 $Pb_3(\text{PO}_4)_2$ 等晶体矿物。同时,该研究还发现,与游离矿化细菌相比,生物炭载体固定的矿化功能菌具有更强的矿化活性,因为生物炭能够促进功能菌的代谢活动,从而诱导碳酸盐/磷酸盐沉淀形成来实现 Pb^{2+} 的有效固定。Wei 等^[76]将一株 PSB 固定到 CMC-FeS 纳米颗粒改性牛骨生物炭上,制成生物炭基微生物菌剂 CFBi-P 来钝化土壤中的 Pb,发现 CFBi-P 上的 nFeS 和 PSB 可以通过生物矿化和沉淀作用与 Pb 转化成结晶化合物 PbS 、 $PbS(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ 、 $Pb_3(\text{PO}_4)_2$ 和 $PbS(\text{CO}_3)_3\text{OH}$,从而将土壤中的 Pb 从不稳定的金属可交换态(EX)、碳酸盐结合态(CB)转化为相对稳定的铁锰氧化物结合态(OX)和残渣态(RS)。同时,该研究表明 CFBi-P 处理组的 Pb 在土壤中的生物有效性(DTPA-Pb)、浸出毒性(TCLP-Pb)和生物可给性(PBET-Pb)分别降低了 56.61%、69.78% 和 25.42%,钝化性能显著优于生物炭和 PSB 单独处理组。

5 结论与展望

本文综述了生物炭载体固定化功能菌修复 Pb 污染土壤的研究进展,总结了生物炭载体固定化功能

菌的基本原理和方法,阐述了该技术修复 Pb 污染土壤的作用机制、修复效果以及对植物生长、土壤性质及微生物群落的影响等。总体而言,生物炭载体固定化功能菌将生物炭的物理化学特性与功能菌的生物活性有效结合,能够减少土壤中的 Pb 含量,降低 Pb 的生物可利用性,同时,还可以促进植物生长,改善土壤环境质量,并对土壤微生物群落产生显著影响。因此,生物炭载体固定化功能菌技术用于修复 Pb 污染土壤展现出广阔的前景,但在实际应用中仍面临一些挑战,因此,在相关领域的研究工作仍需深入推进。

(1) 目前大部分生物炭载体固定化功能菌的研究只开展了短期的修复治理,这种技术如何在长期的持续应用中保持高效和稳定还需进一步研究,尤其是生物炭应用后的老化过程会对修复造成什么影响。部分研究已经证明了生物炭载体固定化功能菌的长期有效性,甚至可以持续 2~3 a。但也有研究发现,随着老化时间的延长,生物炭载体固定化功能菌的效果存在不稳定性 and 不确定性。因此,仍需要进行长期监测和评估,以确定生物炭载体固定化功能菌在重金属污染修复中的持久性与稳定性。

(2) 生物炭载体固定化功能菌修复 Pb 污染土壤已被证明是有效的。但是,在实际修复实践中使用的

剂量和比例并不确定,还需要根据污染土壤的具体情况采取有效的修复措施。同时,在田间大量施用生物炭可能带来难以承受的成本,甚至有可能造成二次污染。因此,优化生物炭的规模化生产,提高经济效益和环境效益,需要探索最佳固定比例、施用剂量、施用方法以及大规模实施的可行性。

(3)在实际应用时,必须考虑生物炭载体固定化功能菌在干旱、雨天、甚至是酸雨、洪涝等极端天气下的稳定性。同时,还需研究在复杂污染(如多种重金属复合污染、重金属与有机物复合污染等)的情况下,生物炭载体固定化功能菌修复技术的有效性。

(4)如何开发效益更高、性质更稳定、无毒、孔隙率更高、比表面积更大、更适合细菌定殖的生物炭,是今后需要进一步深入研究的问题。目前,改性生物炭(球磨改性、紫外线辐射改性、酸碱改性、氧化剂改性、金属改性、纳米改性等)作为有效载体受到越来越多的关注。

(5)土壤中的土著微生物可能与固定到生物炭上的细菌之间竞争电子供体,因此,还需进一步研究其他共存微生物对修复效果的影响。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL].(2014-04-17).http://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/njs/sjdt/201404/t20140418_1194725.html.
- [2] 沈浩宇,王振波. 铅炭电池在“双碳”目标实现过程中的应用前景分析[J]. 蓄电池, 2021,58(5):217-226.
Shen Haoyu, Wang Zhenbo. Application prospect analysis of lead-carbon energy storage battery in the process of “double carbon” target realization[J]. Chinese Labat Man, 2021,58(5):217-226.
- [3] 刁杰. 我国农田土壤重金属污染现状、危害及风险评价研究[J]. 江西化工, 2021,37(6):27-29.
Diao Jie. Research of current situation, hazard and risk assessment of heavy metal contamination in agricultural soils in China[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2021,37(6):27-29.
- [4] Shan B, Hao R X, Zhang J M, et al. Microbial remediation mechanisms and applications for lead-contaminated environments[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2022,39(2):38.
- [5] de Godoy Gonçalves J, Souza L R R, da Veiga M A M S. Lead in urban soils: relation between the hazard exposure from bioaccessible fraction and soil fractionation[J]. Soil and Sediment Contamination: an International Journal, 2023, 32(2):164-178.
- [6] Azhar U, Ahmad H, Shafqat H, et al. Remediation techniques for elimination of heavy metal pollutants from soil: a review[J]. Environmental Research, 2022,214:113918.
- [7] Kumar V, Rout C, Singh J, et al. A review on the clean-up technologies for heavy metal ions contaminated soil samples [J]. Heliyon, 2023,9(5):e15472.
- [8] Zhang Y Q, Xu C B, Lu J, et al. An effective strategy for dual enhancements on bioethanol production and trace metal removal using *Miscanthus* straws[J]. Industrial Crops and Products, 2020,152:112393.
- [9] 何茂强. 土壤重金属污染治理技术研究[J]. 资源节约与环保, 2023(9):106-109.
He Maoqiang. Study on treatment technology of heavy metal pollution in soil[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2023(9):106-109.
- [10] 任文,李嗣艺,李中阳,等. 生物特征及物种组合对重金属污染修复的影响[J]. 环境科学与技术, 2024,47(S1):59-69.
Ren Wen, Li Siyi, Li Zhongyang, et al. Impacts of biological characteristics and species combinations of organisms on the remediation of heavy metal pollution[J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(S1):59-69.
- [11] 郝雅静,李建华,靳东升,等. 重金属污染土壤的微生物修复技术探讨[J]. 山西农业科学, 2018,46(1):150-154.
Gao Yajing, Li Jianhua, Jin Dongsheng, et al. Discussion on microbial remediation technology of heavy metal contaminated soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(1):150-154.
- [12] Al Masud M A, Annamalai S, Shin W S. Remediation of ciprofloxacin in soil using peroxymonosulfate activated by ball-milled seaweed kelp biochar: performance, mechanism, and phytotoxicity[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 465: 142908.
- [13] He L Z, Zhong H, Liu G X, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: mechanisms, potential risks and applications in China[J]. Environmental Pollution, 2019, 252:846-855.
- [14] Du Z L, Chen H A, Yao Y P, et al. Research progress of biochar immobilized microorganism in soil pollution remediation[J]. Journal of Agro-environment Science, 2022,41(12): 2584-2592.
- [15] Li R, Wang B, Niu A P, et al. Application of biochar immobilized microorganisms for pollutants removal from wastewater: a review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 837:155563.
- [16] Wu C C, Zhi D, Yao B, et al. Immobilization of microbes on biochar for water and soil remediation: a review[J]. Environmental Research, 2022,212:113226.
- [17] Lou L P, Huang Q, Lou Y L, et al. Adsorption and degradation in the removal of nonylphenol from water by cells immobilized on biochar[J]. Chemosphere, 2019,228:676-684.
- [18] 孙漱玉,黄梦鑫,孔强,等. 生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展[J]. 环境科学, 2024,45(4):2185-2194.

- Sun Shuyu, Huang Mengxin, Kong Qiang, et al. Research progress in application of biochar-immobilized bacteria composites in environmental remediation[J]. *Environmental Science*, 2024,45(4):2185-2194.
- [19] Bayat Z, Hassanshahian M, Cappello S. Immobilization of microbes for bioremediation of crude oil polluted environments: a mini review[J]. *The Open Microbiology Journal*, 2015,9:48-54.
- [20] 张浩轩,李龙,董浩然. 固定化微生物技术修复重金属污染土壤的研究进展[J]. *能源环境保护*, 2023,37(2):147-155.
- Zhang Haoxuan, Li Long, Dong Haoran. Research progress of immobilized microbial technology in remediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023,37(2):147-155.
- [21] Gong Y Z, Niu Q Y, Liu Y G, et al. Development of multifarious carrier materials and impact conditions of immobilised microbial technology for environmental remediation: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2022,314:120232.
- [22] Luo Q L, Chen Z, Li Y X, et al. Highly efficient and recyclable *Shewanella xiamenensis*-grafted graphene oxide/poly(vinyl alcohol) biofilm catalysts for increased Cr(VI) reduction[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019,7(14):12611-12620.
- [23] Gul I, Adil M, Lyu F L, et al. Microbial strategies for lead remediation in agricultural soils and wastewater: mechanisms, applications, and future directions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024,15:1434921.
- [24] Song L C, Niu X G, Zhou B, et al. Application of biochar-immobilized *Bacillus* sp. KSB7 to enhance the phytoremediation of PAHs and heavy metals in a coking plant[J]. *Chemosphere*, 2022,307(Pt 4):136084.
- [25] Ji X W, Wan J, Wang X D, et al. Mixed bacteria-loaded biochar for the immobilization of arsenic, lead, and cadmium in a polluted soil system: effects and mechanisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2022,811:152112.
- [26] Chen H M, Min F F, Hu X, et al. Biochar assists phosphate solubilizing bacteria to resist combined Pb and Cd stress by promoting acid secretion and extracellular electron transfer [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023,452:131176.
- [27] Zhu X L, Li X, Shen B S, et al. Bioremediation of lead-contaminated soil by inorganic phosphate-solubilizing bacteria immobilized on biochar[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022,237:113524.
- [28] Zhu X L, Wang K, Ma X J, et al. Loading organic phosphorus-degrading bacteria enhanced biochar performance for heavy metals adsorption[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2024,34:103585.
- [29] Ali H H, Sridhar B B M, Rosenzweig J A. *Klebsiella* spp. isolates from Houston bayous exhibit increased resistance to lead exposure and possess enhanced virulence potential[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,789:147818.
- [30] 刘文竹. 不同浓度铅离子与固氮菌(*Klebsiella trevisan*)胞外聚合物结合特性及其毒性效应分析[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2020.
- Liu Wenzhu. Analysis of EPS Binding Characteristics and Toxicity Effects of Different Concentrations of Lead Ions and *Klebsiella trevisan*[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [31] 张静,张亚见,周倩倩,等. *Sinorhizobiumfredii* S15阻控大豆吸收镉、铅的效果及作用机制研究[J]. *大豆科学*, 2020,39(5):767-774.
- Zhang Jing, Zhang Yajian, Zhou Qianqian, et al. Effects and mechanism of *Sinorhizobiumfredii* S15 in reducing cadmium and lead uptake of soybean[J]. *Soybean Science*, 2020,39(5):767-774.
- [32] Zhu X J, Xiang Q Y, Chen L, et al. Engineered *Bacillus subtilis* Biofilm@Biochar living materials for *in situ* sensing and bioremediation of heavy metal ions pollution[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024,465:133119.
- [33] 庞安冉,张晓丹,刘森,等. 不同pH值条件下硫酸盐还原菌组成及硫酸盐还原机制分析[J]. *微生物学报*, 2024,64(4):1081-1094.
- Pang Anran, Zhang Xiaodan, Liu Miao, et al. Dominant sulfate-reducing bacteria at different pH and mechanism of sulfate reduction[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2024,64(4):1081-1094.
- [34] Lyu Y, Zhu X Z, Zhang M J, et al. In-situ bioremediation of multiple heavy metals contaminated farmland soil by sulfate-reducing bacteria[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2022,31(2):1747-1755.
- [35] Wu Z, Firmin K A, Cheng M L, et al. Biochar enhanced Cd and Pb immobilization by sulfate-reducing bacterium isolated from acid mine drainage environment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022,366:132823.
- [36] 刘泽铭,傅开彬,钟秋红,等. 生物炭协同微生物修复四川某铜矿选冶渣重金属复合污染研究[J]. *金属矿山*, 2023(9):240-246.
- Liu Zeming, Fu Kaibin, Zhong QiuHong, et al. Study on bio-carbon enhanced microbial remediation of heavy metal complex pollution from a smelting slag in Sichuan[J]. *Metal Mine*, 2023(9):240-246.
- [37] Ye J P, Liao W M, Zhang P Y, et al. Fe₁-S/biochar combined with *Thiobacillus* enhancing lead phytoavailability in contaminated soil: preparation of biochar, enrichment of *Thiobacillus* and their function on soil lead[J]. *Environmental Pollution*, 2020,267:115447.
- [38] Ma H, Wei M Y, Wang Z R, et al. Bioremediation of cadmium polluted soil using a novel cadmium immobilizing plant growth promotion strain *Bacillus* sp. TZ5 loaded on biochar [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020,388:122065.

- [39] Wei T, Li X, Li H, et al. The potential effectiveness of mixed bacteria-loaded biochar/activated carbon to remediate Cd, Pb co-contaminated soil and improve the performance of pak-choi plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 435: 129006.
- [40] Chen Y Y, Wu H X, Sun P, et al. Remediation of chromium-contaminated soil based on *Bacillus cereus* WHX-1 immobilized on biochar: Cr(VI) transformation and functional microbial enrichment[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 641913.
- [41] 赵睿. 重金属复合污染土壤的植物与微生物-碳基纳米铁联合修复技术[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- Zhao Rui. The Combined Remediation of Compound Heavy Metal-contaminated Soils with Plant, Microbe and Carbon-based Nano-iron[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [42] Wu J T, Fu X F, 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.
- [43] Gou Z C, Zheng H Y, He Z Q, et al. The combined action of biochar and nitrogen-fixing bacteria on microbial and enzymatic activities of soil N cycling[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 317: 120790.
- [44] Bhattacharjya S, Adhikari T, Sahu A, et al. Ecotoxicological effect of TiO₂ nano particles on different soil enzymes and microbial community[J]. *Ecotoxicology*, 2021, 30(4): 719-732.
- [45] Wei T, Gao H, An F Q, et al. Performance of heavy metal-immobilizing bacteria combined with biochar on remediation of cadmium and lead co-contaminated soil[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(8): 6009-6026.
- [46] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 422-432.
- Feng Huilin, Xu Chensheng, He Huanhui, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 422-432.
- [47] 魏书奇. 功能化菌剂钝化土壤铅及缓解铅对黄瓜胁迫的机制研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- Wei Shuqi. Mechanisms of Lead Contaminated Soil Remediation by Functionalized Bacteria Agent and Alleviation of Lead Stress on Cucumber Seedlings[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.
- [48] Pandey D, Daverey A, Arunachalam K. Biochar: production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 255: 120267.
- [49] 王红, 夏雯, 卢平, 等. 生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性[J]. *环境科学*, 2017, 38(9): 3944-3952.
- Wang Hong, Xia Wen, Lu Ping, et al. Adsorption characteristics of biochar on heavy metals (Pb and Zn) in soil[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(9): 3944-3952.
- [50] Hassan M, Liu Y J, Naidu R, et al. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 744: 140714.
- [51] 陈颖明, 胡亦舒, 李真. 溶磷微生物改性生物炭吸附重金属的机理研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 684-692.
- Chen Haoming, Hu Yishu, Li Zhen. Adsorption mechanism of heavy metals by phosphate-solubilizing microorganism modified biochar[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(2): 684-692.
- [52] Das S K, Ghosh G K, Avasthe R K, et al. Compositional heterogeneity of different biochar: effect of pyrolysis temperature and feedstocks[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278: 111501.
- [53] Huang F, Li K, Wu R R, et al. Insight into the Cd²⁺ biosorption by viable *Bacillus cereus* RC-1 immobilized on different biochars: roles of bacterial cell and biochar matrix[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 122743.
- [54] Lai W W, Wu Y Y, Zhang C N, et al. Combination of biochar and phosphorus solubilizing bacteria to improve the stable form of toxic metal minerals and microbial abundance in lead/cadmium-contaminated soil[J]. *Agronomy*, 2022, 12(5): 1003.
- [55] Wang G T, Zhao X, Luo W Q, et al. Noval porous phosphate-solubilizing bacteria beads loaded with BC/nZVI enhanced the transformation of lead fractions and its microecological regulation mechanism in soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 437: 129402.
- [56] Huang S W, Chen X, Wang D D, et al. Bio-reduction and synchronous removal of hexavalent chromium from aqueous solutions using novel microbial cell/algal-derived biochar particles: turning an environmental problem into an opportunity[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 309: 123304.
- [57] 孙莉霞, 郁红艳, 郑雷, 等. 改性生物炭在 Cd(II) 污染修复中的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(S2): 184-193.
- Sun Lixia, Yu Hongyan, Zheng Lei, et al. Research progress of modified biochar in Cd(II) pollution remediation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(S2): 184-193.
- [58] 肖龙恒, 唐续龙, 卢光华, 等. 重毒性铅污染土壤清洁高效修复研究进展[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(2): 289-304.
- Xiao Longheng, Tang Xulong, Lu Guanghua, et al. Research progress in cleaning and efficient remediation of heavy, toxic, leadcontaminated soil[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(2): 289-304.
- [59] Hao N, Cao J N, Ye J S, et al. Content and morphology of lead remediated by activated carbon and biochar: a spectral induced polarization study[J]. *Journal of Hazardous Materi-*

- als, 2021,411:124605.
- [60] Liu N, Zhang Y T, Xu C, et al. Removal mechanisms of aqueous Cr(VI) using apple wood biochar: a spectroscopic study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,384:121371.
- [61] Wang Y, Narayanan M, Shi X J, et al. Plant growth-promoting bacteria in metal-contaminated soil: current perspectives on remediation mechanisms[J]. Frontiers in Microbiology, 2022,13:966226.
- [62] Zheng X M, Xu W H, Dong J, et al. The effects of biochar and its applications in the microbial remediation of contaminated soil: a review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022,438:129557.
- [63] Zuo W L, Song B Y, Shi Y X, et al. Using *Bacillus thuringiensis* HM-311@hydroxyapatite@biochar beads to remediate Pb and Cd contaminated farmland soil[J]. Chemosphere, 2022,307:135797.
- [64] Ouyang P, Narayanan M, Shi X J, et al. Integrating biochar and bacteria for sustainable remediation of metal-contaminated soils[J]. Biochar, 2023,5(1):63.
- [65] Sevak P I, Pushkar B K, Kapadne P N. Lead pollution and bacterial bioremediation: a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2021,19(6):4463-4488.
- [66] Li J N, Hao R X, Zhang J M, et al. Proteomics study on immobilization of Pb(II) by *Penicillium polonicum*[J]. Fungal Biology, 2022,126(6/7):449-460.
- [67] Naik M M, Pandey A, Dubey S K. *Pseudomonas aeruginosa* strain WI-1 from Mandovi estuary possesses metallothionein to alleviate lead toxicity and promotes plant growth[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012,79:129-133.
- [68] Naik M M, Shamim K, Dubey K S. Biological characterization of lead-resistant bacteria to explore role of bacterial metallothionein in lead resistance[J]. Current Science, 2012, 103(4).
- [69] Gupta P, Kumar V. Value added phytoremediation of metal stressed soils using phosphate solubilizing microbial consortium[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2016,33(1):9.
- [70] Zhang Y X, Peng J, Wang Z W, et al. Metagenomic analysis revealed the bioremediation mechanism of lead and cadmium contamination by modified biochar synergized with *Bacillus cereus* PSB-2 in phosphate mining wasteland[J]. Frontiers in Microbiology, 2025,16:1529784.
- [71] Karim S, Ting Y P. Recycling pathways for platinum group metals from spent automotive catalyst: a review on conventional approaches and bio-processes[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021,170:105588.
- [72] Lin H, Zhou M Y, Li B, et al. Mechanisms, application advances and future perspectives of microbial-induced heavy metal precipitation: a review[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2023,178:105544.
- [73] Shan B, Hao R X, Xu H, et al. A review on mechanism of biomineralization using microbial-induced precipitation for immobilizing lead ions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28(24):30486-30498.
- [74] Jalilvand N, Akhgar A, Ali Alikhani H, et al. Removal of heavy metals zinc, lead, and cadmium by biomineralization of urease-producing bacteria isolated from Iranian Mine calcareous soils[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020,20(1):206-219.
- [75] 初诗禹,王瀚瑛,黎再权,等. 矿化细菌 *Bacillus paramycooides* 对重金属 Pb(II) 和 Cd(II) 的去除及矿化特性[J]. 有色金属工程, 2024,14(3):188-200.
- Chu Shiyu, Wang Hanying, Li Zaiquan, et al. Removal and mineralization of heavy metals Pb(II) and Cd(II) by mineralizing bacterium *Bacillus paramycooides*[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024,14(3):188-200.
- [76] Wei S Q, Liu X Y, Tao Y, et al. Strategy for enhanced soil lead passivation and mitigating lead toxicity to plants by biochar-based microbial agents[J]. Journal of Hazardous Materials, 2025,489:137512.