

重金属污染土壤微生物修复技术新进展

宋亚儒¹, 杨金强¹, 李媛媛^{1*}, 魏明俐^{2,3}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 江苏中宜生态土研究院有限公司, 江苏 宜兴 214200)

摘要: 针对当前因工业生产活动以及其他多种因素所引发的土壤重金属污染问题日益严峻的现状, 采取有效的措施进行土壤修复工作显得尤为迫切。在众多修复技术中, 微生物修复技术凭借其高效性、环境友好性以及经济可行性, 在土壤污染治理领域脱颖而出, 受到了广泛的关注与研究。简要介绍了重金属污染土壤现状及微生物修复的机理, 并综述了近年来重金属污染土壤修复领域的热点技术研究进展, 特别是那些展现出巨大潜力的微生物修复技术, 如微生物联合植物修复、微生物燃料电池、微生物诱导碳酸盐沉淀固定重金属、微生物胞外聚合物修复、以生物炭等为载体的微生物修复等技术, 并分析了这些技术的修复机理、研究现状和应用案例, 旨在整合重金属污染土壤修复领域的热点微生物修复技术, 为新型微生物修复技术的发展提供一个综合性的视角。

关键词: 土壤修复; 重金属污染; 微生物修复技术

中图分类号: X 53

文献标志码: A

Advancements of Microbial Remediation Techniques for Heavy Metal Polluted Soils

Song Yaru¹, Yang Jinqiang¹, Li Yuanyuan^{1*}, Wei Mingli^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Jiangsu Institute of Zoneco Co., Ltd., Yixing 214200, China)

Abstract: The heavy metal pollution in soil caused by industrial production and other factors is becoming increasingly severe so that it's especially urgent to take effective measures for soil remediation. Among many remediation technologies, microbial remediation is remarkable and has great concern and research because of its attributes of efficiency, environmental compatibility, and economic viability. This paper provides a succinct overview of the current state of heavy metal contamination in soil and the underlying mechanisms of microbial remediation. It also presents a comprehensive review of the latest research advancements, with a particular focus on the most promising microbial remediation technologies such as microbial-plant combined remediation, microbial fuel cells, microbial-induced carbonate precipitation fixed heavy metals, extracellular polymeric substance remediation, and microbial remediation by a carrier of biochar. The paper meticulously analyzes the remediation mechanisms, current research status, and practical application cases of these technologies, with the objective of consolidating knowledge in the field and offering a holistic perspective for the advancement of innovative microbial remediation techniques.

Key words: soil remediation; heavy metal pollution; microbial remediation techniques

收稿日期: 2024-10-11

基金项目: 山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE148); 江苏省自然科学基金项目(BK2023022776)

作者简介: 宋亚儒, 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为环境岩土工程, E-mail: s13205478591@163.com。

通讯作者: 李媛媛, 女, 副教授, 博士, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作, E-mail: rainli00@qut.edu.cn。

引文格式: 宋亚儒, 杨金强, 李媛媛, 等. 重金属污染土壤微生物修复技术新进展[J]. 市政技术, 2025, 43(2): 145-153, 197. (SONG Y R, YANG J Q, LI Y Y, et al. Advancements of microbial remediation techniques for heavy metal polluted soils[J]. Journal of municipal technology, 2025, 43(2): 145-153, 197.)

自 2004 年国家环境保护总局发布《关于切实做好企业搬迁过程中环境污染防治工作的通知》开始到今天,我国的污染土壤修复工作已经进行了 20 年,但仍存在着污染面积大、污染程度深的问题,耕地、采矿区等区域环境污染状况不容乐观^[1]。我国的金属矿、煤矿等采矿区主要分布于中部地区,这导致中部地区的受污染程度明显高于东、西部地区,中部地区受污染土壤占比高达 36.21%^[2-3]。相比采矿区,耕地的污染更直接地影响到了国民的生活。我国有 20% 的耕地受到不同程度的重金属污染,经济损失高达 200 亿元^[2]。另外,经过修复后的污染场地,重金属污染物的长期稳定性无法保证^[4]。从我国各省份的土壤重金属污染情况来看,整体呈现南高北低、东高西低的特征^[5]。李增贝等^[6]对黄河流域土壤修复技术相关专利进行了统计研究,结果显示自 2010 年起相关专利的申请数量急速增长,到 2016 年已达到近 600 项/年,由此不难看出当下重金属污染土壤修复的急迫性和必要性。同样,国外也面临着类似的问题,芝加哥和莫斯科等发达国家的城市土壤中检测到了较高浓度的重金属,发展中国家如印度、巴基斯坦和孟加拉国的被检测土壤中更是存在大量有毒元素^[7]。Barapukuria 煤矿是孟加拉国煤炭供应的主要来源,其供应的煤炭量占比超过 90%,但该煤矿在开采过程中由于粉尘扩散、污水排放等原因导致了周边的稻米铬含量超标,对当地居民产生了潜在的健康风险^[8]。Niu 等^[9]对来自六大洲的 286 条河流及 133 个湖泊的沉积物进行了研究,发现欧洲和北美洲的污染程度普遍高于非洲、亚洲和南美洲。由此可见,土壤受重金属污染的程度与国家工业发展程度息息相关。

目前,对重金属污染土壤的修复还是以物理化学修复技术为主。然而,传统的修复技术如固化/稳定化技术等在对重度污染时,并不能将重金属浓度指标降低至目标范围;当面对类似于我国中部地区污染面积大、污染程度较轻的情况时^[1],使用物理化学修复技术的经济效益就会变得非常低;同时,我国经济社会发展正向绿色、低碳、环保的方向转型,传统的修复技术并不能做到完全的绿色、低碳,比如土壤洗涤技术可能会产生废弃的洗涤液造成二次污染^[10],物理修复过程会消耗大量能源^[11]。因此,重金属污染土壤修复领域急需一种能够做到高效、经济、环保的新型修复技术。微生物作为一种柔和的

环保修复技术,对土壤结构和功能的影响最小,不会像传统物理化学修复技术那样产生残留物或者造成二次污染,由其所发展出来的新型修复技术在重金属污染土壤修复领域将会是非常具有前景的。既往综述多聚焦于微生物的修复机制与种类,而技术综合评估尚显不足。鉴于此,笔者对近十年重金属污染土壤的微生物修复技术进行了全面回顾。

1 微生物修复机理及优势

1.1 微生物修复机理

目前,重金属污染土壤修复的策略本质聚焦于两大核心途径:一种途径是通过微生物的氧化还原作用改变重金属价态,将高毒性价态的金属氧化或者还原成毒性小且稳定的价态,比如将六价铬还原成三价铬^[12]、将三价砷氧化成五价砷^[13]等;另一种途径是微生物对重金属形态的转化,这一过程利用了重金属不同形态间迁移性与生物活性的显著差异,通过微生物活动促进重金属由高生物活性、高迁移性的可交换态和碳酸盐结合态向低生物活性、低迁移性的有机物结合态或残渣态转化,从而显著降低其环境危害^[14]。

近几年,有关重金属污染土壤的微生物修复技术研究中主要将微生物改变重金属价态和形态的机制分为 3 种:一是微生物的吸附作用,即通过细胞表面或其分泌的胞外聚合物(EPS)对重金属离子进行高效吸附,减少其在环境中的自由态浓度^[15];二是微生物的沉淀及矿化作用,即微生物诱导的矿物形成过程,如形成硫化物、碳酸盐或磷酸盐沉淀,将重金属固定于矿物晶格中,实现长效的稳定^[16];三是前文所述的氧化还原作用,即通过酶促反应直接改变重金属的价态,降低其毒性或便于后续处理^[17]。

1.2 微生物修复的优势

传统的物理化学修复技术具有一定的局限性。物理修复技术虽然成熟且应用广泛,能高效处理大量污染物,但存在二次污染风险及高成本的问题;化学修复技术灵活高效,能针对性改变重金属形态,但也需要处理产生的化学副产品。相比之下,生物修复技术尤其是微生物修复技术,凭借生物吸附、转化及积累机制能有效清除重金属离子^[18],因其具有环境友好、成本低廉及促进土壤生态恢复的优势而备受青睐^[19]。微生物修复技术的另一个显著优势为长期稳定性,其能够在二次污染的环境中持续发挥作用,

而不是仅仅进行一次性的修复。因此,微生物修复技术在未来的重金属污染土壤修复领域拥有较大潜力^[20]。

2 热点微生物修复技术

了解热点微生物修复技术的原理,不仅可以为新型微生物修复技术的研究提供技术基础、创新思路 and 市场需求等方面的支持,还有助于在新型技术的研究中更好地运用这些原理,提高修复效率。在重金属污染土壤修复领域,目前比较热门的微生物修复技术包括:微生物联合植物修复、微生物燃料电池(MFC)、微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)固定重金属、微生物胞外聚合物(EPS)修复、以生物炭等为载体的微生物修复等。

2.1 微生物联合植物修复

植物修复作为生物修复的一类,具有成本低、不破坏环境等众多优点,在无机污染土壤修复领域有很高的研究价值。但是,植物修复也存在不可忽视的缺点,比如修复周期长、修复效率低。而通过微生物联合植物共同修复,既能够减轻各种重金属对植物的毒害作用,也能够使修复效果达到相对较高的水平^[21]。植物接种的微生物种类广泛,涵盖根瘤菌、丛枝菌根真菌及内生菌等。在微生物和植物共同形成的土壤修复体系中,植物可以为微生物提供营养物质,微生物也可以影响植物的生长繁殖及其对重金属的转运吸收,是一种积极的互利共生关系^[22-25]。一些根际细菌通过改变土壤理化性质和分泌次级代谢产物来影响植物对重金属的吸收^[26],比如:一种内生真菌通过降低王草根际土壤的pH值,提高有机质和酶活性来增加土壤中的生物量,促进王草将镉和铬从土壤向地上部分的转运和积累^[27]。在重金属复合污染土壤的修复中,重金属间的竞争效应显著,部分高浓度重金属会抑制植物对竞争性较弱重金属的吸收,影响整体修复效果^[28]。Mo等^[29]的研究进一步揭示了这一机制:在低浓度铅和镉环境中,微生物系统有效促进了植物对二者的吸收;而在高浓度镉环境中,铅的富集受到抑制,但镉的积累却有所增加,这突显了重金属间的复杂竞争关系。多种重金属之间的竞争在修复过程中非常常见,同时也是目前微生物修复技术研究过程中需要关注的重点问题之一。通过揭示重金属间的相互作用规律,可以更好地理解它们在环境中的迁移转化过程,从而设

计出更加精准、高效的修复策略。

农田和采矿区等区域,由于污染严重,环境条件极为苛刻,多为重金属复合污染区域,因此对修复技术的要求也更为严苛。随着环境保护意识的逐渐普及,人们对污染土壤修复后的生物可利用性给予了越来越高的关注。微生物联合植物修复技术,作为一种生物修复手段,其环保性不言而喻,因此,该修复技术的发展空间将会十分广阔。

2.2 微生物燃料电池(MFC)

微生物燃料电池(MFC)通常由阳极室、阴极室及离子交换膜构成,利用微生物作为催化剂,将有机物氧化产生的电子经阳极传递至外部电路,再传递至阴极,使重金属离子得电子还原,从而解毒并产生电能^[30]。图1展示了微生物燃料电池的结构及原理。为提升MFC的修复效能,Wang等^[31]深入评估了4种离子交换膜(PEM、CEM、AEM、BEM),发现双极膜(BEM)在pH调控、COD去除及重金属(镉、铬)去除方面均表现最优,重金属去除率能够达到89.8%和95.6%。此外,辅助试剂的添加也会显著影响MFC性能,如柠檬酸、盐酸和醋酸3种辅助试剂都能在很大程度上提升重金属去除率及MFC发电性能^[32]。在MFC系统中添加不同比例的小麦秸秆作为固体相燃料也可以提高MFC的电压输出,进而提高铅和锌的迁移及去除效率^[33],这种改进方式不仅为废弃小麦秸秆提供了新用途,而且与一般的MFC相比不需要离子交换膜,降低了修复成本。此外,通过改变阳极材料提高MFC的产电性能也是该技术在未来的重要发展趋势^[34]。

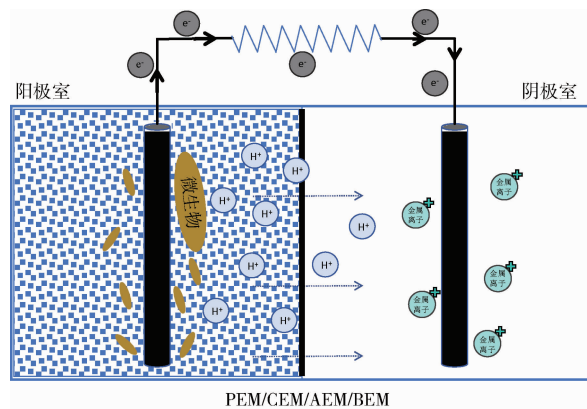


图1 微生物燃料电池示意图^[30]

Fig. 1 Schematic diagram of microbial fuel cell

以上研究不仅展现了MFC在重金属污染治理

中的巨大潜力,也强调了技术创新对于提升环境修复效率的重要性。相对于传统的原位修复技术,MFC 不需要复杂的设备和大量的化学药剂,运行过程中不产生有害物质,避免了传统原位修复技术可能带来的二次污染问题。并且 MFC 在修复重金属污染土壤的同时,能够产生电能,实现了能源的高效利用^[35],这种“边修复边产电”的模式降低了修复成本,减少了对外部能源的依赖。

2.3 微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)固定重金属

生物矿化作为生物修复领域的一类极具潜力的方法,其中微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)更是一个引人注目的研究热点^[36]。MICP 通过微生物的代谢活动分解尿素(通常是脲酶水解尿素),从而诱导碳酸盐沉淀生成。该方法可以有效稳定土壤中的铜、镉、铅、镍、锌、铬等重金属离子及其混合物,降低其迁移性和生物毒性^[37]。MICP 修复重金属污染土壤的原理如图 2 所示。Qiao 等^[38]的研究显示,尿素酶活性和沉淀能力较强的尿素分解菌在 2 h 内对铜、锌、镍和

镉的去除率分别达到了 75.10%、98.03%、59.46% 和 96.18%。这一修复过程的核心在于微生物将重金属离子转化为不溶性碳酸盐沉淀^[39],而沉淀的生成依赖于微生物代谢产生的脲酶。Eltarahony 等^[40]通过优化硝酸还原酶活性以显著加速碳酸盐沉淀的形成,提高铅和汞的去除效率。MICP 适应性强,在有氧和厌氧条件下都可运行,这极大地拓宽了其在不同环境条件下的适应性和应用潜力。也正是因为这种技术可以诱导大量碳酸钙晶体的形成,让其在土木工程领域备受青睐,不仅能够用于加固土壤、改善建筑材料性能,还能有效防止材料被渗透和侵蚀,提高地热能的利用效率,助力环境修复工作,促进自修复混凝土的发展,以及增强岩石的稳定性^[41-42]。He 等^[43]利用 MICP 与 CaO 耦合,不仅对各种重金属的修复效率显著提升,而且在修复过程中产生了大量方解石,提高了土壤的抗压强度和致密性。这种既能修复又能提供一定强度的特性对重金属污染土壤修复后的再利用十分重要。

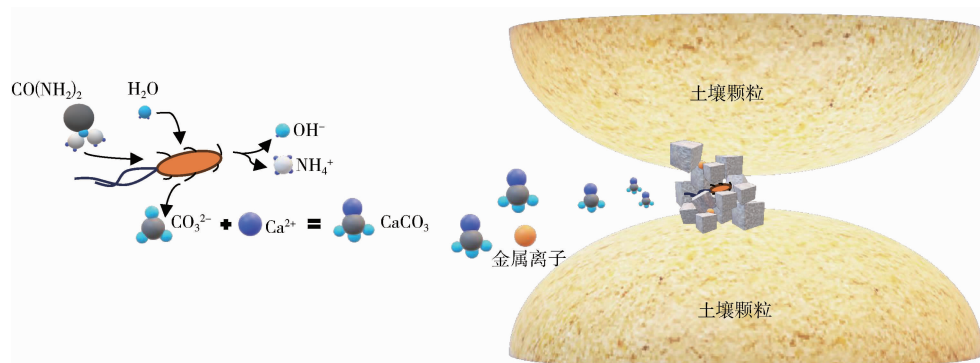


图 2 MICP 固定重金属示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heavy metal fixation by MICP

在重金属污染土壤的原位修复技术中,MICP 技术独特的优势在于采用液相基质作为修复材料,与传统固态修复材料相比,该技术显著增强了液相基质与污泥等污染土壤的混合均匀度,能够使药剂渗透至土壤微细结构中,确保修复材料与污染物充分接触,有效提升了修复过程的全面性和彻底性,从而实现了更高效、更深入的修复效果^[44]。参与修复的微生物能够在一定时间内保持活性与修复能力,持续稳定重金属,提高土壤强度。

2.4 微生物胞外聚合物(EPS)修复

除了微生物本体可以参与重金属污染土壤的修复以外,微生物的胞外聚合物(EPS)在重金属污

染土壤的修复中也扮演着重要角色。EPS 主要成分是一些高分子物质,如多糖、蛋白质、核酸等,它们松散地附着在细胞的表面或外部^[45]。EPS 有助于细胞间的聚集、与基质的黏附、絮凝物的形成,能够阻止水分散失和抵抗有害的外源物质,并且在重金属的吸附中发挥着至关重要的作用。由于 EPS 本质上属于聚阴离子,能够吸引重金属阳离子并形成络合物,因此能有效地修复重金属污染土壤^[46]。某些重金属的存在能够刺激微生物分泌更多的 EPS,比如 Zeng 等^[47]发现镉、铬、铜能刺激超抗锑氧化细菌 *Bacillus* sp. S3 分泌更多的 EPS,从而增强其对重金属的吸附与解毒能力,然而锑却不能刺激 EPS 分泌进一步

增加。这也说明超抗锑氧化细菌 *Bacillus sp.* S3 对镉、铬、铜的去除是通过 EPS 的生物吸附,而对锑的去除主要是通过细菌内部的积累。EPS 还能通过改变土壤微生物的群落结构,增加耐重金属细菌和真菌的相对丰度,从而提升整个微生物群落对重金属污染环境的适应能力^[48]。

EPS 修复重金属污染土壤具备操作简便和成本低廉的优势。相比之下,传统的化学沥滤剂,例如螯合剂和无机酸,存在成本高昂和可能对土壤环境造成二次污染的问题;而生物沥滤剂,尤其是以 EPS 作为淋滤剂的方法,已经显示出其独特的优势。Tang 等^[49]通过使用 EPS 作为淋滤剂,成功地从土壤柱中淋滤出镉、铬、铜、镍、铅和锌 6 种重金属元素,这为生物沥滤技术的应用提供了有力支持。

2.5 以生物炭等为载体的微生物修复

生物炭作为一种具有高度多孔性的固体材料,凭借其较大的比表面积和优异的吸附性能,不仅为微生物提供了理想的庇护所和丰富的营养源,还能有效调节土壤 pH 值,进而促进微生物的生长与繁殖^[50]。此外,生物炭本身也是重金属污染土壤修复的改良剂,其能够吸附重金属,利用生物炭联合微生物对重金属污染土壤进行修复更是极大地提高了微生物的修复效率^[51]。具体而言,生物炭表面的含氧官能团与细菌表面的多糖层均可与重金属离子发生络合反应,有效固定土壤中的重金属^[52];细菌可通过氧化还原作用改变重金属的价态,降低其生物毒性,而生物炭在这一过程中发挥了促进作用。Cui 等^[53]的研究显示,生物炭处理能够显著降低镉和铅的生物利用度,同时增加放线菌、真菌和土壤酶的数量。Schommer 等^[54]通过对比生物炭固定化芽孢杆菌和未固定化芽孢杆菌的修复效果,证明了联合修复效果确实优于单一应用生物炭或芽孢杆菌。在探讨对重金属复合污染土壤的修复效果时,由于重金属间

的竞争作用,导致生物炭与微生物在修复重金属复合污染土壤时的表现相较于单一重金属污染土壤略有下降^[55]。除了生物炭,可以作为微生物载体的物质还有很多,如聚乙烯醇^[56]、海藻酸钠^[57]、天然植物残体^[58]等,均可同时作为污染物吸附剂及微生物生长繁殖的场所,避免修复过程中与本地微生物的竞争作用。

近年来,以生物炭等为载体进行微生物修复的研究已取得了显著成效。与微生物联合植物修复技术一致,以生物炭等为载体的微生物修复技术也属于联合修复技术,多种技术联合修复是未来研究的必然趋势。另外,生物炭的制备成本相对较低,可规模化生产,为其联合微生物修复重金属污染土壤提供了重要物质基础。载体的存在有助于微生物的繁殖和代谢,从而在提高修复效率的同时大幅降低修复成本,提高经济效益。生物炭的加入还能改善土壤结构,提高土壤肥力,促进修复场所的植物生长和环境恢复^[50]。该技术的优势在于提高土壤的生物活性和物理性质,同时减少对环境的负面影响。微生物修复技术的成本大幅降低也为实现大规模修复提供了经济上的保障。因此,这些技术的研究与应用预示着此法在重金属污染土壤修复领域具有广阔的发展前景,有望在未来的环境治理中发挥关键作用。

表 1 搜集了近几年关于热点微生物修复技术在多种重金属(包括多种单一重金属污染及重金属复合污染)污染修复中的研究案例及相应的修复效果,能够更加直观地看出微生物修复技术应用于重金属污染土壤修复的广泛适用性和强大修复能力。从这些研究中微生物对多种重金属污染的修复效果来看,可以确认微生物修复技术具备成为重金属污染土壤修复领域一种高效、环保的修复方式的潜力,也进一步验证了该技术在重金属污染土壤修复中的有效性,表明其具有广阔的发展前景。

表 1 热点微生物修复技术的其他研究案例及修复效果				
Tab. 1 Other research cases and restoration effects of hotspot microbial remediation technologies				
微生物修复技术	微生物	重金属类型	修复效果	参考文献
微生物联合植物修复	本地微生物	Cu、Cd、Zn	促进重金属从非根际土壤向根际土壤迁移,并在根部和叶片中积累吸收	[59]
微生物联合植物修复	<i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Paecilomyces lilacinus</i>	Cd、As	植物体内镉含量提高了 33.93%~58.49%,砷含量提高了 56.49%~73.67%	[60]
微生物联合植物修复	<i>Glomus mosseae</i>	Pb、Zn	接种丛枝菌根真菌可以显著增强植物吸收和富集重金属的能力	[61]

续表

微生物修复技术	微生物	重金属类型	修复效果	参考文献
微生物燃料电池		Pb、Cd、Cr、Ni	对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 和 Ni^{2+} 的去除率分别达到了 83.67%、84.10%、84.55% 和 95.99%	[62]
微生物燃料电池		Pb、Cd	对于低浓度和中等浓度的 Pb 和 Cd 修复效果较好,但对于高浓度的 Pb 和 Cd 修复效果较差	[63]
MICP 固定重金属	<i>Bacillus pasteurii</i>	Cd、Pb	土壤中镉和铅分别降低了 43.88% 和 30.66% 对溶液中镉和铅的去除率达到了 96.17% 和 91.02%	[64]
MICP 固定重金属	<i>Lysinibacillus fusiformis</i> strain	Cu、Ni、Pb、Cr	对铜、镍、铅、铬的修复效率分别为 $78.8\% \pm 2.9\%$ 、 $78.1\% \pm 1.0\%$ 、 $89.2\% \pm 1.0\%$ 、 $97.8\% \pm 0.5\%$	[43]
微生物胞外聚合物修复	厌氧氨氧化颗粒污泥中的微生物	Pb、Cu、Ni、Zn	铅的修复效率高达 93.9%,铜的修复效率为 90.8%,镍的修复效率为 60.9%~62.2%,锌的修复效率仅为 15.9%	[65]
微生物胞外聚合物修复	<i>Serratia plymuthica</i> SC3I(2) 和 As3-5a(5)	Ni、Cu	SC3I(2) 菌株在 50 mg/L Ni^{2+} 溶液中对 Ni^{2+} 去除率可达 89.4%;而 As3-5a(5) 菌株在 200 mg/L Cu^{2+} 溶液中对 Cu^{2+} 去除率可达 91.5%	[66]
以生物炭等为载体的微生物修复	<i>Bacillus thuringiensis</i> HM-311	Pb、Cd	在 20 h 内将 1000 mg/L 的 Pb^{3+} 质量浓度降低至 14.59 mg/L,将 200 mg/L 的 Cd^{2+} 质量浓度降低至 5.40 mg/L	[67]
以生物炭等为载体的微生物修复	<i>Bacillus</i> sp. K1	Cd、As	<i>Bacillus</i> sp. K1 菌株对 Cd(II) 和 As(III) 的去除率分别达到了 25.04 mg/g 和 4.58 mg/g	[68]

3 挑战及发展方向

尽管微生物修复技术展现出对多种重金属污染土壤的治理潜力,具有成本低、操作简便、环境友好等优点,但在实际应用中仍存在一些缺陷和挑战:

1)在对重金属复合污染土壤进行修复时,存在多种重金属之间竞争的现象,竞争能力强的重金属会导致其他重金属的修复效果降低^[28,69]。

2)在修复过程中大多数微生物修复技术都会受到重金属污染程度的影响,当土壤中的重金属浓度过高时,会因为重金属毒性过大而杀死微生物,进而导致修复效果降低^[70-71]。

3)微生物修复效果受土壤 pH 值、温度、电导率等多种因素的影响,环境条件的不稳定可能导致修复效率的波动^[72-74]。

4)找到对特定污染物具有高效降解能力的微生物菌株是一个挑战,且这些菌株在自然环境中的生存和繁殖能力,以及与本地微生物之间的竞争能力也需要提高^[75]。

5)实验室条件下有效的微生物修复技术在大规模应用时可能会遇到技术和经济上的障碍^[76]。

目前,重金属污染土壤修复领域正逐渐转向多种技术联合修复的策略,微生物修复技术可以根据污染土壤的状况和环境要求与其他物理、化学及生物等方案相结合,形成优势互补的综合修复体系。除

了上文介绍的微生物联合植物修复技术、以生物炭等为载体的微生物修复技术,也有研究者利用纳米技术辅助微生物生产纳米材料,以更高的修复效率和更久的持续时间来处理污染物质^[77];而且一些能够与微生物产生协同效应的化学还原材料,比如铁和亚铁^[78],也可以作为微生物联合修复的方案进行尝试。展望微生物修复技术的未来,随着基因工程、合成生物学等新兴技术的引入,微生物修复技术有望实现更高效、更精准的污染控制,当前已经有许多学者通过基因工程来优化微生物的修复方式,以达到提高微生物对重金属的耐受性和大规模培养等目的,甚至在不久的将来可以通过基因编程技术大规模地研发出更精确高效的菌株^[79-80]。

4 结 语

综上所述,笔者介绍了微生物修复重金属污染土壤的机理和优势,以及目前处于热点的微生物修复技术,对这些技术的综述能够为未来新型微生物修复技术的研发提供新的思路。笔者综述的微生物修复技术展现出来的修复效果证明了其在重金属污染土壤修复领域的巨大潜力。然而,目前仍然存在着一些问题和挑战,如重金属之间的竞争关系、重金属浓度过高、环境因素影响、高效微生物菌株筛选困难、实验室条件下的微生物修复技术在大规模应用时可能遇到技术和经济上的障碍。微生物修复技

术为我国重金属污染土壤的治理开辟了重要路径,但未来仍需持续深化研究,结合各领域的先进技术,不断优化技术体系,提高修复效率与稳定性,并探索经济可行的规模化应用模式。

[参考文献]

- [1] 常跃畅,曹占强.我国土壤修复行业发展历程及开展模式分析[J].中国资源综合利用,2021,39(11):105-108.(CHANG Y C, CAO Z Q. Analysis on the development history and deployment mode of soil remediation industry in China[J]. China resources comprehensive utilization, 2021, 39(11): 105-108.)
- [2] 曹钰,宋晓曦.采矿区土壤重金属污染现状及检测方法研究[J].世界有色金属,2022(16):90-92.(CAO Y, SONG X X. Study on the status quo and detection methods of heavy metal pollution in soil of mining area[J]. World nonferrous metals, 2022(16): 90-92.)
- [3] 席海苏,曾微,林丹婷,等.土壤重金属污染现状及修复治理分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(10):102-104.(XI H S, ZENG W, LIN D T, et al. Discussion on analysis of heavy metal pollution in soil and remediation[J]. Leather manufacture and environmental technology, 2024, 5(10): 102-104.)
- [4] FENG H, CHENG J. Whole-process risk management of soil amendments for remediation of heavy metals in agricultural soil: a review[J]. International journal of environmental research and public health, 2023, 20(3): 1869.
- [5] 石航源,王鹏,郑家桐,等.中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分管管控对策[J].环境科学,2023,44(8):4706-4716.(SHI H Y, WANG P, ZHENG J T, et al. Spatial distribution of soil heavy metals and regional control strategies in China at province level[J]. Environmental science, 2023, 44(8): 4706-4716.)
- [6] 李增贝,何婷婷,原鹏丽,等.黄河流域土壤修复专利技术发展现状与对策分析[J].中国农业文摘-农业工程,2023,35(6):6-11.(LI Z B, HE T T, YUAN P L, et al. Analysis of the current status and countermeasures for soil remediation patent technology development in the Yellow River Basin[J]. Agricultural science and engineering in China, 2023, 35(6): 6-11.)
- [7] KHAN S, NAUSHAD M, LIMA E C, et al. Global soil pollution by toxic elements: current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies: a review[J]. Journal of hazardous materials, 2021, 417: 126039.
- [8] HOSSEN M A, CHOWDHURY A I H, MULLICK M R A, et al. Heavy metal pollution status and health risk assessment vicinity to Barapukuria coal mine area of Bangladesh[J]. Environmental nanotechnology, monitoring & management, 2021, 16: 100469.
- [9] NIU Y, CHEN F, LI Y, et al. Trends and sources of heavy metal pollution in global river and lake sediments from 1970 to 2018[J]. Reviews of environmental contamination and toxicology, 2021, 257: 1-35.
- [10] GUSIATIN Z M, KULIKOWSKA D, KLIK B. New-generation washing agents in remediation of metal-polluted soils and methods for washing effluent treatment: a review[J]. International journal of environmental research and public health, 2020, 17(17): 6220.
- [11] KHALID S, SHAHID M, NIAZI N K, et al. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils[J]. Journal of geochemical exploration, 2017, 182: 247-268.
- [12] SHI J, MCGILL W B, RUTHERFORD P M, et al. Aging shapes Cr(VI) speciation in five different soils[J]. Science of the total environment, 2022, 804: 150066.
- [13] WILLIAM V U, MAGPANTAY H D. Arsenic and microorganisms: genes, molecular mechanisms, and recent advances in microbial arsenic bioremediation[J]. Microorganisms, 2023, 12(1): 74.
- [14] GE S, JIANG W, ZHENG L, et al. Green remediation of high-lead contaminated soil by stabilization/solidification with insoluble humin: long-term leaching and mechanical characteristics[J]. Journal of cleaner production, 2021, 324: 129184.
- [15] MADDELA N R, REYES J J M, VIAFARA D, et al. Biosorption of copper(II) by the microorganisms isolated from the crude-oil-contaminated soil[J]. Soil and sediment contamination: an international journal, 2015, 24(8): 898-908.
- [16] ZHANG K, XUE Y, XU H, et al. Lead removal by phosphate solubilizing bacteria isolated from soil through biomineralization[J]. Chemosphere, 2019, 224: 272-279.
- [17] WAKATSUKI T. Metal oxidoreduction by microbial cells[J]. Journal of industrial microbiology, 1995, 14: 169-177.
- [18] SHAN B, HAO R, ZHANG J, et al. Microbial remediation mechanisms and applications for lead-contaminated environments[J]. World journal of microbiology and biotechnology, 2023, 39(2): 38.
- [19] SONG P, XU D, YUE J, et al. Recent advances in soil remediation technology for heavy metal contaminated sites: a critical review[J]. Science of the total environment, 2022, 838: 156417.
- [20] AGRAWAL K, RUHIL T, GUPTA V K, et al. Microbial assisted multifaceted amelioration processes of heavy-metal remediation: a clean perspective toward sustainable and greener future[J]. Critical reviews in biotechnology, 2024, 44(3): 429-447.
- [21] YANG Y, LIU Y, LI Z, et al. Significance of soil microbe in microbial-assisted phytoremediation: an effective way to enhance phytoremediation of contaminated soil[J]. International journal of environmental science and technology, 2020, 17(4): 2477-2484.
- [22] ENEBE M C, BABALOLA O O. The influence of plant growth-promoting rhizobacteria in plant tolerance to abiotic stress: a survival strategy[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2018, 102: 7821-7835.
- [23] SHEN G, JU W, LIU Y, et al. Impact of urea addition and rhizobium inoculation on plant resistance in metal contaminated soil[J]. International journal of environmental research and public health, 2019, 16(11): 1955.

- [24] YIN Z,ZHANG Y,HU N,et al. Differential responses of 23 maize cultivar seedlings to an arbuscular mycorrhizal fungus when grown in a metal-polluted soil[J]. *Science of the total environment*,2021,789:148015.
- [25] SIM C S F,TAN W S,TING A S Y. Endophytes from *Phragmites* for metal removal:evaluating their metal tolerance,adaptive tolerance behaviour and biosorption efficacy[J]. *Desalination and water treatment*,2016,57(15):6959-6966.
- [26] XIAO Y,CHEN L,LI C,et al. Role of the rhizosphere bacterial community in assisting phytoremediation in a lead-zinc area[J]. *Frontiers in plant science*,2023,13:1106985.
- [27] ZHANG K,ZHANG H,XIE C,et al. *Piriformospora indica* colonization enhances remediation of cadmium and chromium co-contaminated soils by king grass through plant growth promotion and rhizosphere microecological regulation[J]. *Journal of hazardous materials*,2024,462:132728.
- [28] PENG W,LI X,SONG J,et al. Bioremediation of cadmium-and zinc-contaminated soil using *Rhodobacter sphaeroides* [J]. *Chemosphere*,2018,197:33-41.
- [29] MO T,JIANG D,SHI D,et al. Remediation mechanism of “double-resistant” bacteria—*Sedum alfredii* hance on Pb-and Cd-contaminated soil[J]. *Ecological processes*,2022,11(1):20.
- [30] FANG C,ACHAL V. The potential of microbial fuel cells for remediation of heavy metals from soil and water:review of application[J]. *Microorganisms*,2019,7(12):697.
- [31] WANG H,ZHANG H,ZHANG X,et al. Bioelectrochemical remediation of Cr(VI)/Cd(II)-contaminated soil in bipolar membrane microbial fuel cells[J]. *Environmental research*,2020,186:109582.
- [32] ZHANG J,CAO X,WANG H,et al. Simultaneous enhancement of heavy metal removal and electricity generation in soil microbial fuel cell[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*,2020,192:110314.
- [33] SONG T S,ZHANG J,HOU S,et al. In situ electrokinetic remediation of toxic metal-contaminated soil driven by solid phase microbial fuel cells with a wheat straw addition[J]. *Journal of chemical technology & biotechnology*,2018,93(10):2860-2867.
- [34] 张叶婷. 微生物燃料电池阳极材料的研究进展[J]. *辽宁化工*,2024,53(9):1434-1437. (ZHANG Y T. Research progress of anode materials for microbial fuel cell[J]. *Liaoning chemical industry*,2024,53(9):1434-1437.)
- [35] 刘康楠,邱峥辉,蔺存国,等. 基于底栖型微生物燃料电池的水下供电系统构建与产能评价[J]. *装备环境工程*,2024,21(8):153-162. (LIU K N, QIU Z H, LIN C G, et al. Construction and output power evaluation of underwater power supply system based on benthic microbial fuel cells[J]. *Equipment environmental engineering*,2024,21(8):153-162.)
- [36] TAMAYO-FIGUEROA D P,CASTILLO E,BRANDÃO P F B. Metal and metalloid immobilization by microbiologically induced carbonates precipitation[J]. *World journal of microbiology and biotechnology*,2019,35:1-10.
- [37] KUMAR A,SONG H W,MISHRA S,et al. Application of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) techniques to remove heavy metal in the natural environment:a critical review [J]. *Chemosphere*,2023,318:137894.
- [38] QIAO S,ZENG G,WANG X,et al. Multiple heavy metals immobilization based on microbially induced carbonate precipitation by ureolytic bacteria and the precipitation patterns exploration [J]. *Chemosphere*,2021,274:129661.
- [39] KHADIM H J,AMMAR S H,EBRAHIM S E. Biomineralization based remediation of cadmium and nickel contaminated wastewater by ureolytic bacteria isolated from barn horses soil[J]. *Environmental technology & innovation*,2019,14:100315.
- [40] ELTARAHONY M,ZAKI S,ABD-EL-HALEEM D. Aerobic and anaerobic removal of lead and mercury via calcium carbonate precipitation mediated by statistically optimized nitrate reductases [J]. *Scientific reports*,2020,10(1):4029.
- [41] ZHANG K,TANG C S,JIANG N J,et al. Microbial-induced carbonate precipitation (MICP) technology:a review on the fundamentals and engineering applications[J]. *Environmental earth sciences*,2023,82(9):229.
- [42] JIANG L,XIA H,WANG W,et al. Applications of microbially induced calcium carbonate precipitation in civil engineering practice:a state-of-the-art review[J]. *Construction and building materials*,2023,404:133227.
- [43] HE Z,XU Y,WANG W,et al. Synergistic mechanism and application of microbially induced carbonate precipitation (MICP) and inorganic additives for passivation of heavy metals in copper-nickel tailings[J]. *Chemosphere*,2023,311:136981.
- [44] JI G,HUAN C,ZENG Y,et al. Microbiologically induced calcite precipitation (MICP) in situ remediated heavy metal contamination in sludge nutrient soil [J]. *Journal of hazardous materials*,2024,473:134600.
- [45] YU G H,HE P J,SHAO L M,et al. Extracellular polymeric substances (EPS) and extracellular enzymes in aerobic granules[J]. *Drying technology*,2010,28(7):910-915.
- [46] LI Y P,YANG X J,YU Y S,et al. Extrapolymeric substances (EPS) in *Mucilaginibacter rubeus* P2 displayed efficient metal (loid) bio-adsorption and production was induced by copper and zinc[J]. *Chemosphere*,2022,291:132712.
- [47] ZENG W,LI F,WU C,et al. Role of extracellular polymeric substance (EPS) in toxicity response of soil bacteria *Bacillus* sp. S3 to multiple heavy metals[J]. *Bioprocess and biosystems engineering*,2020,43:153-167.
- [48] LI Y,SHI X,LING Q,et al. Bacterial extracellular polymeric substances:impact on soil microbial community composition and their potential role in heavy metal-contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*,2022,240:113701.
- [49] TANG A,LU Y,LI Q,et al. Simultaneous leaching of multiple heavy metals from a soil column by extracellular polymeric sub-

- stances of *Aspergillus tubingensis* F12[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 127883.
- [50] LIANG M, LU L, HE H, et al. Applications of biochar and modified biochar in heavy metal contaminated soil: a descriptive review[J]. *Sustainability*, 2021, 13(24): 14041.
- [51] WANG Y, LIU Y, ZHAN W, et al. Stabilization of heavy metal-contaminated soils by biochar: challenges and recommendations[J]. *Science of the total environment*, 2020, 729: 139060.
- [52] OUYANG P, NARAYANAN M, SHI X, et al. Integrating biochar and bacteria for sustainable remediation of metal-contaminated soils[J]. *Biochar*, 2023, 5(1): 63.
- [53] CUI L, YAN J, YANG Y, et al. Influence of biochar on microbial activities of heavy metals contaminated paddy fields[J]. *Biore-sources*, 2013, 8(4): 5536-5548.
- [54] SCHOMMER V A, VANIN A P, NAZARI M T, et al. Biochar-immobilized *Bacillus* spp. for heavy metals bioremediation: a review on immobilization techniques, bioremediation mechanisms and effects on soil[J]. *Science of the total environment*, 2023, 881: 163385.
- [55] AZADI N, RAIESI F. Biochar alleviates metal toxicity and improves microbial community functions in a soil co-contaminated with cadmium and lead[J]. *Biochar*, 2021, 3(4): 485-498.
- [56] SU J, FAN Y, HUANG T, et al. Modified PVA (polyvinyl alcohol) biomaterials as carriers for simultaneous removal of nitrate, Cd(II), and Mn(II): performance and microbial community[J]. *Environmental science and pollution research*, 2020, 27: 28348-28359.
- [57] BUSTOS-TERRONES Y A. A review of the strategic use of sodium alginate polymer in the immobilization of microorganisms for water recycling[J]. *Polymers*, 2024, 16(6): 788.
- [58] ZHANG X, SHANG Q, ZHENG H, et al. Study on the building mechanism of straw immobilized microorganisms[C]. 2016 International Conference on Electrical, Mechanical and Industrial Engineering. Paris: Atlantis Press, 2016: 314-317.
- [59] WANG Z, ZHANG H, XIONG Y, et al. Remediation mechanism of high concentrations of multiple heavy metals in contaminated soil by *Sedum alfredii* and native microorganisms[J]. *Journal of environmental sciences*, 2025, 147: 179-188.
- [60] YAO S, ZHOU B. Enhancing phytoremediation of cadmium and arsenic in alkaline soil by *Miscanthus sinensis*: a study on the synergistic effect of endophytic fungi and biochar[J]. *Science of the total environment*, 2024: 171458.
- [61] FANG L, ZENG Z, JIA Q, et al. Physiological response and phytoremediation potential of dioecious *Hippophae rhamnoides* inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi to Pb and Zn pollution[J]. *Frontiers in plant science*, 2024, 14: 1321885.
- [62] ALSHAMMARI A S, ALEID G M, AHMAD A R D, et al. Oil palm biomass sap-rotten rice as a source to remove metal ions and generate electricity as by-products through microbial fuel cell technology[J]. *Journal of chemistry*, 2024, 2024.
- [63] ZHANG C, LU H, WANG B, et al. Study on the performance of two-compartment microbial fuel cells under different heavy metal concentrations[J]. *Water, air, & soil pollution*, 2024, 235(1): 58.
- [64] ZHANG L, WANG W, YUE C, et al. Biogenic calcium improved Cd²⁺ and Pb²⁺ immobilization in soil using the ureolytic bacteria *Bacillus pasteurii*[J]. *Science of the total environment*, 2024, 921: 171060.
- [65] PAGLIACCIA B, CARRETTI E, SEVERI M, et al. Heavy metal biosorption by extracellular polymeric substances (EPS) recovered from anammox granular sludge[J]. *Journal of hazardous materials*, 2022, 424: 126661.
- [66] ZANETTI R, ZECCHIN S, COLOMBO M, et al. Ni²⁺ and Cu²⁺ biosorption by EPS-producing *Serratia plymuthica* strains and potential bio-catalysis of the organo-metal complexes[J]. *Water*, 2022, 14(21): 3410.
- [67] ZUO W, SONG B, SHI Y, et al. Using *Bacillus thuringiensis* HM-311@ hydroxyapatite@ biochar beads to remediate Pb and Cd contaminated farmland soil[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 135797.
- [68] WANG L, LI Z, WANG Y, et al. Performance and mechanisms for remediation of Cd(II) and As(III) co-contamination by magnetic biochar-microbe biochemical composite: competition and synergy effects[J]. *Science of the total environment*, 2021, 750: 141672.
- [69] TAVAREZ M, MACRI A, SANKARAN R P. Cadmium and zinc partitioning and accumulation during grain filling in two near isogenic lines of durum wheat[J]. *Plant physiology and biochemistry*, 2015, 97: 461-469.
- [70] XU M, XIAO R, MEI C, et al. Rice husk biochar reduces Cd availability by affecting microbial community activity and structure in Cd-contaminated soils[J]. *Journal of soils and sediments*, 2024, 24(4): 1-13.
- [71] FENG H, XU L, CHEN R, et al. Detoxification mechanisms of electroactive microorganisms under toxicity stress: a review[J]. *Frontiers in microbiology*, 2022, 13: 1084530.
- [72] HUR M, PARK S J. Identification of microbial profiles in heavy-metal-contaminated soil from full-length 16s rRNA reads sequenced by a pacbio system[J]. *Microorganisms*, 2019, 7(9): 357.
- [73] KIM J H, LEE J Y. An optimum condition of MICP indigenous bacteria with contaminated wastes of heavy metal[J]. *Journal of material cycles and waste management*, 2019, 21: 239-247.
- [74] HU X, WANG J, LYU Y, et al. Effects of heavy metals/metalloids and soil properties on microbial communities in farmland in the vicinity of a metals smelter[J]. *Frontiers in microbiology*, 2021, 12: 707786.
- [75] SAHA L, TIWARI J, BAUDDH K, et al. Recent developments in microbe-plant-based bioremediation for tackling heavy metal-polluted soils[J]. *Frontiers in microbiology*, 2021, 12: 731723.
- [76] REISMAN H B. Problems in scale-up of biotechnology production processes[J]. *Critical reviews in biotechnology*, 1993, 13(3): 195-253.

- [5] 马悦帆,高俊锋.水性环氧乳化沥青在道路养护工程中的研究进展[J].市政技术,2024,42(2):75-80.(MA Y F,GAO J F. Research progress of waterborne epoxy emulsified asphalt in road maintenance engineering[J]. Journal of municipal technology, 2024,42(2):75-80.)
- [6] LEE E K. Emulsification of asphalt modified with styrene butadiene rubber (SBR) and styrene butadiene styrene (SBS); 1) phase stability behavior and 2) physical properties[J]. Elastomers and composites, 2019,54(4):335-344.
- [7] 瞿昌毓,姚鸿儒,李艳红,等.聚合物改性乳化沥青的研究进展[J].化工新型材料,2020,48(1):218-223.(ZI C Y,YAO H R, LI Y H, et al. Research progress of polymer modified bitumen emulsion[J]. New chemical materials, 2020,48(1):218-223.)
- [8] XIANG Q, XIAO F P. Applications of epoxy materials in pavement engineering[J]. Construction and building materials, 2020, 235:117529.
- [9] 鲁彬,邢鹏,陈相,等.水性环氧树脂乳化沥青制备与粘结性能研究[J].市政技术,2023,41(3):23-28.(LU B,XING P, CHEN X, et al. Study on preparation and bonding properties of waterborne epoxy resin emulsified asphalt[J]. Journal of municipal technology, 2023,41(3):23-28.)
- [10] 王苗,于明明,李文博,等.基于响应曲面法的 WER-SBR 复合改性乳化沥青性能研究[J].化工新型材料,2024,52(Sup1):363-370.(WANG M,YU M M,LI W B, et al. Study on the performance of WER-SBR composite modified emulsified asphalt based on response surface method[J]. New chemical materials, 2024,52(Sup1):363-370.)
- [11] 李秀君,高世柱,叶锴镔,等.水性环氧树脂对 SBR 改性乳化沥青与集料黏附性的影响[J].材料科学与工程学报,2022,40(1):116-122.(LI X J,GAO S Z,YE P P, et al. Effect of waterborne epoxy resin on adhesion of sbr modified emulsified asphalt to aggregate[J]. Journal of materials science and engineering, 2022, 40(1):116-122.)
- [12] 胡秀芝,周超,侯德华,等.水性环氧/液态丁苯橡胶复合改性乳化沥青性能评价[J].热固性树脂,2023,38(1):21-27.(HU X Z,ZHOU C,HOU D H, et al. Performance evaluation of waterborne epoxy/liquid styrene butadiene rubber composite modified emulsified asphalt[J]. Thermosetting resin, 2023,38(1):21-27.)
- [13] XU P J, ZHU X T, CONG P L, et al. Modification of alkyl group terminated hyperbranched polyester on paving epoxy asphalt[J]. Construction and building materials, 2018, 165:295-302.
- [14] YU X, WANG J Y, SI J J, et al. Research on compatibility mechanism of biobased cold-mixed epoxy asphalt binder[J]. Construction and building materials, 2020, 250:118868.
- [15] ZHANG Z Q, YANG J H, FANG Y, et al. Design and performance of waterborne epoxy-SBR asphalt emulsion (WESE) slurry seal as under-seal coat in rigid pavement[J]. Construction and building materials, 2021, 270:121467.
- [16] 孟建党,边朝阳,陈彦军,等. SBR 水性环氧树脂复合改性乳化沥青性能研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023,47(4):716-721.(MENG J D, BIAN C Y, CHEN Y J, et al. Study on properties of emulsified asphalt modified by SBR waterborne epoxy resin[J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2023,47(4):716-721.)
- [17] YAO X G, TAN L Z, XU T. Preparation, properties and compound modification mechanism of waterborne epoxy resin/styrene butadiene rubber latex modified emulsified asphalt[J]. Construction and building materials, 2022, 318:126178.
- [18] SI J J, JIA Z X, WANG J Y, et al. Comparative analysis of cold-mixed epoxy and epoxy SBS-modified asphalts: curing rheology, thermal, and mechanical properties[J]. Construction and building materials, 2018, 176:165-171.
- [19] MORA A S, TAYOUO R, BOUTEVIN B, et al. A perspective approach on the amine reactivity and the hydrogen bonds effect on epoxy-amine systems[J]. European polymer journal, 2020, 123:109460.
- [20] XU S, GIROUARD N, SCHUENEMAN G, et al. Mechanical and thermal properties of waterborne epoxy composites containing cellulose nanocrystals[J]. Polymer, 2013, 54(24):6589-6598.
- [21] MICHEL M, FERRIER E. Effect of curing temperature conditions on glass transition temperature values of epoxy polymer used for wet lay-up applications[J]. Construction and building materials, 2020, 231:117206.
- 其他作者:甘新立,男,副教授,博士,主要研究方向为道路工程。
许涛,男,教授,博士,主要研究方向为路面结构及新材料。

(上接第153页)

- [77] RAMEZANI M, RAD F A, GHAHARI S, et al. Nano-bioremediation application for environment contamination by microorganism[J]. Microbial rejuvenation of polluted environment, 2021, 2: 349-378.
- [78] TIAN T, YU H Q. Iron-assisted biological wastewater treatment: synergistic effect between iron and microbes[J]. Biotechnology advances, 2020, 44:107610.
- [79] SHARMA P, SIROHI R, TONG Y W, et al. Metal and metal (loids) removal efficiency using genetically engineered microbes: applications and challenges[J]. Journal of hazardous materials, 2021, 416:125855.
- [80] ZHU N, ZHANG B, YU Q. Genetic engineering-facilitated coassembly of synthetic bacterial cells and magnetic nanoparticles for efficient heavy metal removal[J]. ACS applied materials & interfaces, 2020, 12(20):22948-22957.
- 其他作者:杨金强,男,在读硕士研究生,主要研究方向为环境岩土工程。
魏明俐,男,高级工程师,博士,主要从事污染泥土渣资源化利用方面的研究工作。