

土壤重金属污染的微生物修复技术研究进展

姚航^{1,2}, 张杏锋^{1,2*}, 吴焱珊^{1,2} (1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西桂林 541004; 2. 桂林理工大学广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西桂林 541004)

摘要 为了进一步认识土壤重金属污染的微生物修复技术, 综述了目前国内外微生物修复技术、植物辅助微生物修复技术的作用机理、优缺点及其研究现状等, 并对其发展前景、研究趋势进行了展望。

关键词 土壤污染; 重金属; 微生物修复; 微生物-植物联合修复

中图分类号 S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)12-068-03

Research Advances on Microbial Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil

YAO Hang^{1,2}, ZHANG Xing-feng^{1,2*}, WU Chi-shan^{1,2} (1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Guangxi Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract In order to further understand microbial remediation technology for heavy metals contaminated soil, the mechanisms, advantages and disadvantages, research status of microbial remediation technology and microbe-plant combined remediation at home and abroad were reviewed, the development prospect and research trend was forecasted.

Key words Soil pollution; Heavy metals; Microbial remediation; Microbe-plant combined remediation

近年来,随着采矿、化工、印染纺织业的快速发展及农业生产中化学药品的过量施用,导致土壤重金属污染日益加剧。土壤重金属污染具有隐蔽性、滞后性和难降解性的特点,对人类健康存在安全隐患^[1-2]。据国家环保局统计,我国受重金属污染的耕地面积达到2 000万hm²,约为总耕地面积的20%,每年受重金属污染的粮食达到1.2×10⁶万kg,造成的经济损失超过200亿元^[3]。因此,土壤重金属污染的治理修复迫在眉睫,目前受到各级环保部门和科研机构的高度关注。

重金属污染土壤的修复原理可概括为两类:一是改变重金属在土壤中的存在形态,使其固定从而降低其在环境中的迁移和生物可利用性;二是将重金属从土壤中去除,使其残留浓度接近或达到背景值^[4]。按照处理工艺原理,可分为物理化学修复、农业生态修复、微生物修复^[5]。物理化学修复技术主要包括土壤淋洗、化学固化及电动修复等,但该技术存在着一系列的局限性,如成本昂贵,土壤自身的结构受到破坏,可能造成二次污染等^[6]。农业生态修复技术是指在农业生产过程中,因地制宜地采用相关的耕作管理手段,改善农田生态环境,具有修复费用相对较低,操作实施方便快捷等特点,但只适用于中轻度污染的土壤修复^[7]。相对物理化学修复和农业生态修复而言,微生物修复技术显示出其独特的优越性,如处理成本低,处理效果好,对环境影响小,很少造成二次污染,操作简便,可以就地进行处理等^[8]。因此,该修复方法受到土壤修复领域学者的广泛关注,应用前景广阔。笔者综述了近年来国内外关于土壤重金属污染的微生物修复技术研究进展,以期对土壤重金属污染治理提供

借鉴。

1 微生物修复技术

微生物修复技术出现在20世纪80年代,是指在人为强化的条件下,利用自然界中存在的或者人工培育的功能微生物的生长代谢过程,对环境中的污染物进行降解、转化、去除的方法^[9]。微生物修复技术是实现环境净化、生态效应恢复的生物措施,是重金属污染土壤的环境友好型治理技术^[10]。微生物修复土壤重金属污染的机理主要包括表面生物大分子吸收转运、生物吸附、细胞代谢、空泡吞饮、沉淀和氧化还原反应等^[11]。微生物修复技术中较常使用的微生物主要有细菌、真菌、放射菌三大类。不同种类的微生物对重金属的耐性不同,耐性由大到小依次为真菌、细菌、放射菌^[12]。

土壤微生物可以通过多种方式影响土壤重金属的毒性,微生物修复土壤重金属污染主要是利用微生物的以下两种作用:一是通过微生物的吸附、代谢作用,达到消减、净化、固定重金属的目的;二是通过微生物转化重金属离子的化学形态,降低重金属的生物可利用性,以减少重金属对土壤中植物的危害^[13]。

1.1 微生物对重金属离子的吸附作用 微生物对重金属离子的吸附是指微生物通过对重金属的吸附作用改变重金属在土壤中的形态,进而影响其生物有效性,或使生物有效性降低从而减小危害性,或使生物有效性增强以便与其他技术联用修复^[14]。表现形式主要有胞外沉淀、胞外络合、胞内积累。作用方式:①细菌胞外多聚体;②金属磷酸盐、金属硫化物沉淀;③铁载体;④金属硫蛋白、植物螯合肽和其他金属结合蛋白;⑤真菌来源物质及其分泌物对重金属的去除^[15]。微生物细胞壁表面一些化学基团通过络合、配位作用可与重金属离子形成离子共价键,从而达到吸附重金属离子的目的^[16]。被吸附的重金属离子通常沉积在微生物细胞的不同部位,如沉积于细胞的胞外基质或者被轻度螯合于生物多聚物。微生物对重金属的吸附能力通常取决于微生物本身的

基金项目 广西自然科学基金项目(2013GXNSFBA019026);广西自然科学基金项目(2013GXNSFEA053002);广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(0024010130)。

作者简介 姚航(1993-),女,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向:土壤重金属修复。*通讯作者,副教授,博士,硕士生导师,从事环境污染治理研究。

收稿日期 2016-03-22

性质(如吸附类型、活性位点数量、菌龄等)、重金属种类和价态同时也受外界环境因素(如 pH、温度、共存污染物等)的影响^[17]。

1.2 微生物对重金属离子的转化作用 微生物对重金属离子转化作用的机理主要包括微生物对重金属离子的生物氧化和还原、甲基化与去甲基化及其对重金属离子的溶解作用等^[18]。

微生物对重金属离子氧化还原作用的主要机理是通过改变重金属离子的化合价来改变重金属的稳定性及络合能力^[19]。如耐铬微生物能够将 Cr(VI)还原成 Cr(III),使铬的毒性降低。张雪霞等^[20]在受砷污染的土壤中发现了富集砷抗性的细菌,在厌氧环境中对该细菌进行培养,观察其对砷的还原能力,结果表明:在 21 h 内,As(V)就被完全还原为 As(III)。Chang 等^[21]在污水处理厂的水体中发现了 1 株嗜硫酸盐细菌(Sulfate-reducing bacteria, SRB),该细菌可以将 Cr⁶⁺还原为低毒的溶解度较小的 Cr³⁺,使水体中重金属的毒性大大减弱。

在微生物(主要为假单胞菌属)的作用下,土壤中 Cd、As、Hg、Pb 等金属或类金属离子都能够发生甲基化反应,从而降低重金属离子对其的毒性。

微生物对重金属离子的溶解作用主要是指土壤中的微生物在土壤滤液过程中分泌出的有机酸能将土壤中的重金属离子络合、溶解^[22]。

2 微生物和植物联合修复技术

目前,单一应用微生物修复方法修复土壤中的重金属污染仍存在一定局限性,如土壤中的土著菌修复效率低,其活性易受一系列外界环境条件的影响。为了克服这些缺点,改善和提高微生物修复土壤重金属污染的效果,微生物和植物联合修复技术被广泛应用于实践中^[23]。

微生物和植物联合修复是通过微生物、植物之间的互利作用来提高土壤重金属的修复效率。植物为微生物提供了良好的生长环境,叶片光合作用、根系分泌物、落叶残体等为根系土壤微生物提供了生长所需的各种营养元素。微生物则通过活化土壤中的重金属,促进植物吸收土壤中的有益生长元素,以增加植物生物量的方式提高植物的修复效率^[24]。冯莉等^[25]将荧光假单胞菌施入烟草根际土壤后,烟草根系数量明显增多,根长而粗,根系活力明显提高。目前,对于微生物和植物联合修复技术的研究主要有:①对微生物和植物联合修复中菌根作用的研究;②对微生物和植物联合修复中植物根际分泌物作用的研究。

2.1 微生物和植物修复中菌根的作用 菌根是指土壤中真菌菌丝和高等植物营养根系形成的一种共生体,广泛存在于自然界中^[26]。在这一共生体中,植物为寄宿在其根部菌根的生长提供必要的碳水化合物。菌根的作用表现在以下 3 方面:①通过庞大的菌丝网络伸展到植物根系难以到达的区域,从而促进植物对土壤中矿质养分的吸收;②将土壤重金属吸附并聚集在菌根菌丝、泡囊和植物根系等部位,以阻止重金属向植物体内传输,同时改变土壤的理化性质,促进植

物的稳定生长;③提高植物的抗逆性,进而增加植物根系以及地上部分的生物量^[27-28]。

根据菌根生长位置的不同,可将菌根分为外生菌根、内生菌根及内外生菌根,其中应用最广泛的是外生菌根真菌和内生菌根真菌^[29]。

外生菌根是真菌和植物营养根系所形成的一种共生体,其结构可分为哈蒂氏网(Harting net)、外延菌丝(Extraradical hyphae)、菌套(Mantle)、和菌索(Rhizomorph)四大部分。王小敏等^[30]通过研究菌根影响超富集植物对 Cd、Zn 等重金属富集程度发现,外延菌丝的密集程度与菌丝吸附重金属的能力呈正相关。

目前,对于植物内生菌根的研究主要集中于丛枝菌根真菌(AMF)及深色有隔内生真菌(Dark Septate Endophytes, DSE)。

当重金属胁迫丛枝菌根(*Glomus intraradices*)时,丛枝菌根会分泌出一些特殊物质改变重金属在植物体内的分配以及生物有效性,从而降低重金属对植物的毒害程度,提高植物对重金属的耐受性。此外,AMF 还可以通过改变土壤的酸碱度、改善植物的营养状况及植物分泌物组成来改变根际微环境,从而减弱重金属对植物的毒性。刘茵^[31]研究发现,黑麦草在接种丛枝菌根后,根部所积累的 Cd 元素明显增加,同时改变了黑麦草地上部的品质。王宇涛等^[32]研究发现,玉米在接种丛枝菌根真菌后,明显抑制了重金属对其的毒害作用,生物量和株高明显增加。

DSE 是一类生态学功能多样、种类组成广泛、定殖于植物根内、不产孢子或产无性孢子的子囊菌或半知菌。目前,DSE 与植物根系形成的共生复合体被广泛应用于重金属污染土壤的生物修复及污染土壤植被修复方面。DSE 是植物根际重要的益生菌,与宿主植物互作形成共生体,对宿主植物具有促生抗逆作用,包括提高植物对干旱及重金属污染等逆境胁迫的抗性、诱导植物产生系统抗性、抵御病原菌生物胁迫等^[33]。Li 等^[34]研究表明,种植在含铅、锌、镉混合污染土壤中的玉米在接入 DSE 菌株(外瓶霉属 H93)后,该菌株成功地与玉米根系形成共生复合体,使玉米有效地缓解了重金属的胁迫作用,促进了玉米根系与叶的生长发育,限制了土壤中的重金属离子由植物根部向其地上部分的传输、运转,从而阻断有毒重金属在食物链中的传播。

2.2 微生物和植物联合修复中根系分泌物的作用 根系分泌物是指植物在生长过程中通过根的不同部位向生长基质释放的一组种类繁多的物质,这些物质包括低分子量的有机物质、高分子的黏胶物质和根细胞脱落物及其分解产物、气体、质子和养分离离子等^[35]。在微生物和植物联合修复重金属污染的土壤中,根际分泌物提高植物抗重金属污染的能力主要通过以下 2 个方面的作用实现。①根系分泌物可以改变植物根系周围土壤重金属离子的形态,酸化土壤中不溶性重金属离子,螯合、还原土壤重金属离子等^[36]。②根系分泌物可以改变植物根系周围土壤环境的酸碱度,并使其周围的土壤持续处于氧化还原状态。植物根际环境的改变为根际

微生物提供了丰富的营养物质,同时吸引了微生物在根际周围聚集,从而产生根际聚集效应。

3 展望

相比于传统的物理化学方法,应用微生物方法修复土壤重金属污染简捷高效,应用范围广,具有良好的社会、生态综合效益,在土壤重金属污染的修复实践中必将有广阔的前景和巨大的潜能。目前,虽然对微生物修复技术研究取得了一定进展,但有待于在以下几个方面进一步研究。①在已有的研究基础上,继续筛选、驯化新的高效降解微生物菌种,开发基因工程菌。②将微生物修复技术与植物修复、生态修复、物理化学修复相结合,提高修复效果和增加修复的经济效益。③多学科、多技术、多角度研究微生物修复技术的机理、工艺流程。土壤的重金属污染修复是一项系统、复杂的工程,需要物理、化学、生物学、生态学、地质学等不同学科的交叉应用,运用基因工程、细胞工程、酶工程等新的生物技术解决修复过程中可能出现的各种问题,从而提高生物修复的效率、降低处理成本。④制订并出台有关生物修复技术的国家标准及行业规范。针对修复过程中出现的具体情况制订相应的规范制度,使生物修复具有更强的针对性、规范性与可操作性。⑤生物修复技术应由实验室向大田试验验证的方向不断推进,将理论与修复实践相结合。⑥建立有关生物修复大田试验的标准,推动系统修复污染土壤产业发展以及我国生物修复产业化进程。⑦加大对排污企业执法检查,严惩不达标排放,真正做到从源头上截断污染源,形成防治并举的良好格局。

参考文献

- [1] 熊鸿斌,胡海文,王振祥,等.淮南煤矿区土壤重金属污染分布特征及污染溯源研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015(5):686-693.
- [2] HE J S, CHEN J P. A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools [J]. *Bioresource technology*, 2014, 160: 67-78.
- [3] 王海慧, 邹恒福, 罗瑛, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术[J]. 中国农学通报, 2009, 25(11): 210-214.
- [4] 丁竹红, 胡昕, 尹大强. 螯合剂在重金属污染土壤修复中应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 777-782.
- [5] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 409-417.
- [6] 王学刚, 王光辉, 刘金生. 矿区重金属污染土壤的修复技术研究进展[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(4): 29-31.
- [7] 马铁铮, 马友华, 徐露露. 农田土壤重金属污染的农业生态修复技术[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(5): 39-43.
- [8] 朱兰保, 盛蒂. 重金属污染土壤生物修复技术研究进展[J]. 工业安全与环保, 2011, 37(2): 20-21.
- [9] 周际海, 袁颖红, 朱志保, 等. 土壤有机物生物修复技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2015(2): 343-351.
- [10] 吴瑞娟, 金卫根, 邱峰芳. 土壤重金属污染的生物修复[J]. 安徽农业科

学, 2008, 36(7): 2916-2918.

- [11] 徐良将, 张明礼, 杨浩. 土壤重金属镉污染的生物修复技术研究进展[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2011, 34(1): 102-106.
- [12] HIROKI M. Effects of heavy metal contamination on soil microbial population [J]. *Soil Sci Plant Nur*, 1992, 38: 141-147.
- [13] 邓红艳, 陈刚. 铬污染土壤的微生物修复技术研究进展[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 466-472.
- [14] 张闻, 陈贵虹, 高永超, 等. 石油和重金属污染土壤的微生物修复研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(S2): 174-181, 205.
- [15] 滕应, 骆永明, 李振高. 污染土壤的微生物修复原理与技术进展[J]. 土壤, 2007(4): 497-502.
- [16] 刘云国, 冯宝莹, 樊霆, 等. 真菌吸附重金属离子的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(1): 71-74.
- [17] 王建龙, 陈灿. 生物吸附法去除重金属离子的研究进展[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 673-700.
- [18] TAKEUCHI M, KAWAHATA H, GUPTA L P, et al. Arsenic resistance and removal by marine and non-marine bacteria [J]. *Journal of biotechnology*, 2007, 127(3): 434-442.
- [19] 王凤花, 罗小三, 林爱军, 等. 土壤铬(VI)污染及微生物修复研究进展[J]. 生态毒理学报, 2010, 5(2): 153-161.
- [20] 张雪霞, 贾永锋, 陈亮, 等. 硝还原菌群对砷的还原作用及菌群的多样性分析[J]. 生态学杂志, 2009(1): 64-69.
- [21] CHANG I S, KIM B H. Effect of sulfate reduction activity on biological treatment of hexavalent Chromium [Cr(VI)] contaminated electroplating wastewater under sulfate-rich condition [J]. *Chemosphere*, 2007, 68(2): 218-226.
- [22] 张艳, 邓扬梧, 罗仙平, 等. 土壤重金属污染以及微生物修复技术探讨[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(1): 63-66.
- [23] 向捷, 陈永华, 向敏, 等. 土壤重金属污染修复技术比较研究[J]. 安徽农业科学, 2014(22): 7367-7369, 7377.
- [24] 宋想斌, 方向京, 李贵祥, 等. 重金属污染土壤植物联合修复技术研究进展[J]. 广东农业科学, 2014(24): 58-62.
- [25] 冯莉, 张玲华, 田兴山. 荧光假单胞菌对烟草根际微生物种群数量及根系活力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 2(S2): 537-539.
- [26] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究现状与展望[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 757-762.
- [27] 陈保冬, 李晓林, 朱永官. 丛枝菌根真菌菌丝体吸附重金属的潜力及特征[J]. 菌物学报, 2005, 24(2): 283-291.
- [28] 赵中秋, 崔玉静, 朱永官. 菌根和根分泌物在植物抗重金属中的作用[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 81-84.
- [29] 张玉秀, 于帅, 文镇宋, 等. 重金属污染土壤的生物修复技术[J]. 金属矿山, 2009(4): 146-149.
- [30] 王小敏, 纪宏伟, 刘文菊, 等. 巨大芽孢杆菌与印度芥菜对Cd污染土壤的联合修复效果研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 232-236.
- [31] 刘茵. *Glomus intraradices* 对黑麦草生长和富集镉的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(12): 2409-2412.
- [32] 王宇涛, 邱丘, 李韶山, 等. 镉、铜复合污染下从枝菌根真菌对玉米重金属吸收的影响[J]. 科技导报, 2014, 32(21): 15-20.
- [33] 邓勤, 宋小双, 尹大川, 等. 深色有隔内生真菌提高宿主植物抗逆性的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(31): 10-11.
- [34] LI T, LIU M J, ZHANG X T, et al. Improved tolerance of maize (*Zea mays* L.) to heavy metals by colonization of a dark septate endophyte (*DSE*) *Exophiala pisciphila* [J]. *Science of the total environment*, 2011, 409(6): 1069-1074.
- [35] 王树起, 韩晓增, 乔云发. 根系分泌物的化感作用及其对土壤微生物的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(6): 1219-1223.
- [36] XU W H, HUANG H, WANG A H, et al. Advance in studies on activation of heavy metal by root exudates and mechanism [J]. *Ecology and environment*, 2006, 15(1): 184-189.