

# Discussion on Microbial Remediation Technology of Heavy Metal Pollution in Soil

Fuling Deng<sup>1</sup>, Yan Xu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Email: 2639035554@qq.com

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 17<sup>th</sup>, 2020; published: Apr. 24<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Microbial remediation is a healthy, economical and sustainable remediation technology for heavy metal pollution, which has the advantages of environmental friendliness, safety, ecology, and low consumption. Through the literature research, this paper reviews the current situation, the remediation mechanism, influencing factors and enhanced remediation of microorganism-based remediation for heavy metal pollution, attempting to provide a reference for microbial remediation of heavy metal pollution.

## Keywords

Soil, Heavy Metal Pollution, Microbial Remediation

---

# 土壤重金属污染微生物修复技术浅析

邓富玲<sup>1</sup>, 徐艳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

Email: 2639035554@qq.com

收稿日期: 2020年3月28日; 录用日期: 2020年4月17日; 发布日期: 2020年4月24日

---

## 摘要

微生物修复具有环境友好、安全生态、低耗等优点, 是一种健康、经济、可持续的重金属污染修复技术。本文通过文献调研, 综述了微生物对重金属污染的修复现状、修复机理、影响因素及强化修复等, 期为重金属污染微生物修复提供参考。

文章引用: 邓富玲, 徐艳. 土壤重金属污染微生物修复技术浅析[J]. 土壤科学, 2020, 8(2): 112-117.

DOI: 10.12677/hjss.2020.82016

## 关键词

土壤, 重金属污染, 微生物修复

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微生物种类繁多, 数量庞大, 分布广泛, 功能多样, 是土壤生命体的有机构成, 可作为表征土壤生态环境变化的一个重要指标。微生物修复主要是利用土著微生物或人为投加的特效微生物在特定的条件下吸收、转化、固化或分解土壤、水体中的重金属污染物, 改善环境质量、促进生态修复的一种生物措施。是一种低耗、高效、环保安全的修复技术。本文通过文献调研, 综述微生物对重金属污染物的修复机理, 影响因素及强化修复效果等方面的研究, 以期为微生物修复重金属污染提供借鉴。

## 2. 微生物修复重金属污染现状研究

微生物修复具有低耗、高效、环保安全的优势, 使人们对微生物修复重金属污染的关注越来越多。常用的修复型微生物主要分为土著微生物、外来微生物和基因工程菌三大类。近年来, 国内外学者在利用细菌、真菌、藻类等微生物吸附重金属方面做了大量的研究。

### 2.1. 细菌修复重金属污染

细菌作为微生物中的最大群体, 它本身及其产生的各种物质广泛参与水体、土壤、矿渣和沉积物等环境中的多种反应, 进而影响诸多元素的迁移转化[1]。它通过对重金属的吸附富集、氧化还原、成矿沉淀、淋滤、植物协同等修复土壤中的重金属污染[2], Langley 等[3]指出, 假单胞菌可将 Au 富集在细胞内, 将 Cu 吸附在其表面, 有效降低了重金属流动性。陈明等[4]利用污泥中分离的革兰氏阳性细菌 A-7 处理某冶炼厂废水发现  $Pb^{2+}$  和  $Zn^{2+}$  几乎全部去除, 这一发现对类似重金属污染冶炼厂废水处理具有较强的参考意义, 同时, 对寻找优势修复型细菌提供了方向。细菌可与植物进行联合修复, 借助自身功能直接修复污染物或者通过强化植物功能间接修复污染物, 克服单一修复局限性, 实现协同修复或分步骤修复[5] [6] [7]。

### 2.2. 真菌修复重金属污染

许多真菌对重金属具有抗性和吸附性, 尤其在重金属污染区域存活的真菌具有较强耐性, 对甄选区域优势生物种群具有指导意义。目前, 对菌根真菌、大型真菌、酿酒酵母、青霉菌及曲霉菌等修复重金属污染研究较多。研究发现, 丛枝菌根真菌不仅自身具有耐受重金属毒害的能力, 还可通过直接或间接作用提高宿主对重金属的耐受性, 实现生物对重金属土壤的双重修复[8]。菌根真菌分布广泛, 能与大多数陆生高等植物形成共生体系, 相互作用增加适应外界环境的能力。酿酒酵母对  $Cd^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  等重金属离子具备较强的吸附和抗性, 通过相互作用, 细胞表面能够吸附大量上述金属离子, 或使其转化为沉淀而去除[9] [10] [11]。段靖禹等[12]运用青霉菌与生物炭复合修复方式处理土壤中的砷, 发现  $As^{3+}$  含量基本无变化, 约有 27% 的  $As^{5+}$  被青霉菌与生物炭固定。曲霉菌和青霉菌种类繁多, 且普遍重金属耐受性强, 可改变 Cd, As, CR, Pb 等金属形态达到去除、固化或转化目的。

### 2.3. 藻类修复重金属污染

藻类修复水体重金属具有投资小、针对性强、吸附量大、污染小等特点。典型的水体重金属修复藻类有绿藻门、蓝藻门和褐藻门的部分藻类, 其中海藻和褐藻吸附重金属的能力较强[12]。不同藻类对不同重金属的吸附、富集能力不同, 李英敏等[13]发现叉鞭金藻对  $\text{Cu}^{2+}$  有较强的富集能力, 吴海锁等[14]发现小球藻对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附性明显高于其他重金属离子。死的细菌对重金属具有吸附作用, 死的藻类细胞同样具有这样的特性, 李志勇等[15]研究发现死亡的藻细胞相比活的具有更强的吸附能力, 且更为经济。

## 3. 微生物对重金属污染物的修复机理

微生物可通过多种作用方式影响土壤重金属的活性, 主要由吸附、转化、矿化固定和淋滤四个方面来实现。

### 3.1. 微生物对重金属的吸附作用

微生物的吸附能力与其细胞壁结构、成分密切相关。微生物吸附重金属主要是利用细胞表面的带电荷阴离子吸附重金属[16]。有研究表明, 细胞内的金属硫蛋白同 Hg, Zn, Cd, Cu, Ag 等重金属有强烈的亲合性, 可富集并抑制重金属毒性, 多种微生物通过金属硫蛋白发挥贮存、调节金属离子浓度的作用。如, 裂殖酵母菌、某些藻类中分离出的一些多肽能结合 Cd, Cu, Zn, Hg, Pb 等重金属[17]; 真菌的金属硫蛋白能与细胞内的重金属离子结合形成不具有生物活性的无毒的螯合物。同时, 微生物细胞外多聚物表面含有大量可与金属离子发生相互作用的官能团(如羧基、羟基等), 可对金属离子发生吸附或螯合作用[18]。陈光村[19]揭示了胞外多聚物中胞外核酸能参与 Cu 的络合。White 等[20]研究表明生物膜能将 Cd 以硫化镉的形式沉积在生物膜表层, 能将 Cu 以硫化铜的形式沉淀在生物膜表层和液相界面处, 从而实现重金属的吸附。

### 3.2. 微生物对重金属的转化作用

环境中重金属离子的长期存在使自然界形成了一些特殊微生物, 这类微生物对重金属具有一定的抗性, 使金属离子发生转化, 改变重金属离子的存在状态, 这一作用对微生物而言是一种解毒作用, 对环境而言是一种修复作用, 主要包括甲基化或去甲基化、氧化还原及重金属的溶解和有机络合配位降解等。

#### 3.2.1. 甲基化和去甲基化作用

Hg、Cd、Pb、As 等重金属能在微生物作用下发生甲基化或去甲基化反应。如在厌氧条件下, 汞甲基化硫酸盐还原菌和铁还原菌等微生物能将无机汞甲基化[21]; 去甲基化硫酸盐还原菌、产甲烷菌的去甲基作用和水藻分解甲基汞等[22]。

#### 3.2.2. 微生物对重金属离子的氧化还原作用

微生物的转化作用主要通过改变金属离子的氧化还原态, 进而影响其稳定性和络合能力。如, 脱弧杆菌在厌氧条件下可将  $\text{Fe}^{3+}$  还原为  $\text{Fe}^{2+}$ , 厌气的固氮梭状杆菌能通过酶的催化作用还原氧化铁和氧化锰[23]。硫还原细菌可使  $\text{S}^{2-}$  分泌于体外, 与  $\text{Cd}^{2+}$  形成沉淀实现重金属 Cd 的修复[24]。在厌氧条件下, 硫酸盐还原菌可还原硫酸盐生成硫化氢, 与  $\text{Hg}^{2+}$  形成  $\text{HgS}$  沉淀, 从而抑制  $\text{Hg}^{2+}$  的活性[25]。

### 3.3. 微生物固定重金属作用

#### 3.3.1. 矿化固定重金属

微生物矿化固定重金属是指在微生物作用下将离子态重金属转变为固相态, 降低其生物有效性。真

菌细胞壁组分如几丁质等对重金属的钝化固定、真菌体内有机酸根离子或无机酸根离子与重金属形成沉淀等作用, 均可使土壤中的重金属固化, 从而有效降低重金属对宿主植物的毒害。

### 3.3.2. 络合固定重金属

一些微生物能分泌产生具有络合重金属元素的物质, 如胞外聚合物多糖、核酸、蛋白质等吸附重金属离子, 为微生物建成一道有效的屏障, 真菌细胞壁分泌的粘液和真菌组织中的聚磷酸和有机酸能络合重金属, 减少重金属向植株地上部分运输, 减少重金属富集的危害[26]。

### 3.3.3. 与植物协同作用

菌根是土壤中的真菌与高等植物根系形成的共生体, 绝大多数陆地高等生物都能形成菌根共生体, 该共生体与非生命的土壤形成微生态系统, 菌根真菌可吸收、固定土壤重金属, 也可促进植物根系对土壤矿物质的吸收而生长, 提高植物重金属耐受性。菌根真菌与植物的相互协同作用有效改善了重金属土壤中植物根际环境, 使植物根际环境与周边重金属环境达到一个平衡状态。

## 4. 影响微生物修复重金属污染的因素

### 4.1. 重金属污染浓度

重金属污染主要以 Cu, Zn, Cd, Pb, As 等污染为主。微生物对不同浓度的同种重金属的耐受性及吸附能力不同。李芳等选用卷缘桩菇和点柄粘盖牛肝菌两种真菌对比 Zn, Cd, Pb 的耐性, 研究发现真菌的干物重总体趋势为随加入的重金属离子浓度的升高而下降, 浓度最高时两种真菌的生物量最低[27]。

### 4.2. 环境条件

pH 是影响微生物抗重金属能力的重要因素。不同的菌丝体, 对重金属的吸附能力受 PH 值的影响, 菌根真菌在不同的 pH 环境下生物量会发生显著的变化[28]。随着 PH 值的降低, 重金属的吸附性减弱, 从而移动性增强, 反之, 重金属与 OH<sup>-</sup> 生产氢氧化物沉淀, 降低金属离子的移动性[29]。但在强碱环境下, 金属离子易于 OH<sup>-</sup> 形成络合物, 其移动性反而增强[30]。在某一浓度微生物对重金属的吸收随外界条件不同而不同, 有其最适合的 pH 条件。

### 4.3. 复合污染

因不同重金属之间的相互作用, 微生物去除重金属的能力会随重金属复合的种类及浓度的不同而不同, 对其污染的土壤修复具有很高的挑战性。通过研究离子之间的竞争作用发现, 微生物对单独的 Cd 污染吸附量较大, 但 Cd 与 Ca 或者 Zn 混合添加的时候吸附 Cd 的量明显下降[31]。赵祥伟等[32]研究受 Cd, Cu, Pb, Zn 复合污染的农田土壤发现, 土壤里的微生物生物量碳降低, 能明显改变土壤微生物群落的遗传多样性。滕应等[33]发现 Ag, Pb, Zn 复合污染能降低微生物群落代谢剖面, 引起微生物生物量的下降, 导致土壤呼吸量的变化。可见, 重金属复合污染对土壤中的微生物生境影响较大, 可生存微生物范围变窄。

## 5. 展望与建议

微生物物种资源丰富, 对修复重金属污染具有多方优势, 且随着分子生物学技术的不断发展, 微生物修复重金属的机理研究将更加深入, 从中发现和可利用的微生物将不断充实, 其修复能力也将不断增强。同时, 研究特定重金属污染生境下的土著微生物的细胞结构、吸附重金属的成分、修复机理等对强化微生物修复能力具有很大推动作用。

对微生物修复重金属污染的各个环节加以研究、分析、调控有助于提高修复效率,同时也便于掌握微生物修复的安全性和可控性。

复合重金属污染、高浓度重金属污染是重金属污染修复的难点和重点,在研究强化各类修复技术的同时,做好各类修复技术的复合,处理好现有物理、化学、生物及工程修复技术优缺点,发挥所长,制定一套复合修复系统,实现最大的修复效应。

## 参考文献

- [1] 谢先德, 张刚生. 微生物-矿物相互作用之环境意义的研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2001(4): 382-386.
- [2] 陈素华, 孙铁珩, 周启星, 吴国平. 微生物与重金属间的相互作用及其应用研究[J]. 应用生态学报, 2002(2): 239-242.
- [3] Langley, S. and Beveridge, T.J. (1999) Effect of O-Side-Chain-Lipopolysaccharide Chemistry on Metal Binding. *Applied and Environmental Microbiology*, **65**, 489-498. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.2.489-498.1999>
- [4] 陈明, 赵永红. 微生物吸附重金属离子的试验研究[J]. 南方冶金学院, 2001(3): 168-173 + 184.
- [5] 卢晋晶, 郜春花, 武雪萍, 等. 植物-微生物联合修复技术在 Cd 污染土壤中的研究进展[J]. 山西农业科学, 2019, 47(6): 1115-1120.
- [6] 张倩, 赵秀芳, 高欢欢, 等. 植物联合固氮菌修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 资源与环境科学, 现代农业科技, 2019(8): 180-183.
- [7] 敬路淮, 陈晓明, 肖伟, 等. 黑麦草修复重金属污染土壤与废水及富集植物的微生物降解[J]. 环境工程学报, 2019, 13(6): 1449-1456.
- [8] 罗巧玉, 王晓娟, 林双双, 等. AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 3898-3899.
- [9] 武运, 杨海燕, 朱建雯, 王祖林. 固定化啤酒酵母菌体吸附  $\text{Cu}^{2+}$  的研究[J]. 新疆农业大学学报, 2007, 30(4): 102-105.
- [10] 郜瑞莹, 陈灿, 王建龙. 酿酒酵母吸附  $\text{Zn}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的动力学[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(6): 897-900.
- [11] 李成鹏, 张超, 刘玉倩. 酵母细胞对溶液中  $\text{Co}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的生物富集[J]. 环境工程学报, 2015(3): 1501-1506.
- [12] Chen, C. and Wang, J.L. (2011) Cell Surface Characteristics of *Saccharomyces cerevisiae* after Pb(II) Uptake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **31**, 1587-1593.
- [13] 李英敏, 杨海波, 吕福荣, 张欣华, 刘艳, 于媛. 叉鞭金藻生物吸附  $\text{Cu}^{2+}$  影响因素的研究[J]. 水产科学, 2003(4): 21-23.
- [14] 吴海锁, 张洪玲, 张爱茜, 王连生, 王连军. 小球藻吸附重金属离子的试验研究[J]. 环境化学, 2004(2): 173-177.
- [15] 李志勇, 郭祀远, 李琳, 蔡妙颜. 利用藻类去除与回收工业废水中的金属[J]. 重庆环境科学, 1997(6): 29-34.
- [16] Xu, L.L., Huang, Q. and Chen, W.L. (2004) Bacterial Bioremediation and Biodetection of Heavy Metal Contaminated Environment. *Chinese Journal Applied and Environmental Biology*, **10**, 256-262.
- [17] Lee, J., Bae, H. and Jeong, J. (2003) Functional Expression of a Bacterial Heavy Metal Transporter in *Arbidopsis* Enhances Resistance and Decrease Uptake of Heavy Metals. *Plant Physiology*, **133**, 589-596. <https://doi.org/10.1104/pp.103.021972>
- [18] Chen, W.F., Zhang, J.F., Zhang, X.M., et al. (2016) Investigation of Heavy Metal (Cu, Pb, Cd, Cr) Stabilization in River Sediment by Carbon Composite. *Environmental Science Pollution Research*, **23**, 1460-1470. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5387-5>
- [19] 陈光村. 恶臭假单胞菌 CZ1 非饱和生物膜耐受和累积重金属的分子机制[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [20] White, C.G. (1998) Accumulation and Effects of Cadmium on Sulfate Reducing Bacterial Biofilms. *Microbiology*, **144**, 1407-1415. <https://doi.org/10.1099/00221287-144-5-1407>
- [21] 胡海燕, 冯新斌, 曾永平, 仇广乐. 汞的微生物甲基化研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 874-882.
- [22] 谷春豪, 许怀凤, 仇广乐. 汞的微生物甲基化与去甲基化机理研究进展[J]. 环境化学, 2013, 32(6): 926-936.
- [23] Francis, A.J. and Dodge, C.J. (1988) Anaerobic Microbial Dissolution of Transition and Heavy Metal Oxidides. *Applied*



- 
- and Environmental Microbiology*, **54**, 1009-1014. <https://doi.org/10.1128/AEM.54.4.1009-1014.1988>
- [24] Wang, C.L., Maratukulam, P.M., Lum, A.M., Clark, D.S. and Deasling, J.D. (2000) Metabolic Engineering of an Aerobic Sulfate Reduction Pathway and Its Application to Precipitation of Cadmium on the Cell Surface. *Applied and Environmental Microbiology*, **66**, 4497-4502. <https://doi.org/10.1128/AEM.66.10.4497-4502.2000>
- [25] 陈玉成. 污染环境生物修复工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [26] 常学秀, 施晓东, 王焕校. 利用生物固定土壤重金属的机理及在农产品安全中的应用[J]. 生态学杂志, 2003(5): 88-93.
- [27] 李芳, 张俊伶, 冯固, 李晓林. 两种外生菌根真菌对重金属 Zn、Cd 和 Pb 耐性的研究[J]. 环境科学学报, 2003(6): 807-812.
- [28] Savvaidis, M.N. and Hughes, R.K. (2003) Copper Biosorption by Pseudo Monasce Pacia and Other Strains. *World Journal of Microbiology Biotechnology*, **19**, 117-121. <https://doi.org/10.1023/A:1023284723636>
- [29] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 杨永亮. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1441-1453.
- [30] Van der Sloot, H.A., Heasman, L. and Quevauviller, P. (1997) Harmonization of Leaching/Extraction Tests. Elsevier, Amsterdam.
- [31] 曹德菊, 杨训, 张千, 等. 重金属污染环境的微生物修复原理研究进展[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(6): 315-321.
- [32] 赵祥伟, 骆永明, 滕应, 等. 重金属复合污染农田土壤的微生物群落遗传多样性研究[J]. 环境科学学报, 2005(2): 186-191.
- [33] 滕应, 骆永明, 李振高. 污染土壤的微生物多样性研究[J]. 土壤学报, 2006(6): 1018-1026.