重金属与土壤微生物的相互  
作用及污染土壤修复

王新周启星

(中国科学院沈阳应用生态研究所，中国科学院陆地生态过程重点实验室，沈阳110016)

摘要阐述了微生物与重金属间的相互作用，指出土壤重金属污染影响微生物活性、生物量，且重金属对微生物具 有一定的生态毒性。可通过微生物的氧化-还原作用、生物吸附富集和溶解作用，达到修复重金属污染土壤的目的。

关键词重金属土壤微生物修复

Interaction between heavy metals and soil microorganisms  
and remediation of contaminated soils

Wang Xin Zhou Qixing

(Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

**Abstract** Interaction between heavy metals and soil microorganisms is theoretically expounded ・ Pollu­tion of heavy metals in soils affects the activity and biomass of microorganisms, and heavy metals possess poi­son to soil microorganisms ・ The soil pollution by heavy metals are remedied by oxidation, reduction, bioad­sorption and dissolution of soil microorganisms ・

**Key words** heavy metal； soil； microorganism； remediation

土壤是人类赖以生存的物质基础，是生态环境 的重要组成部分。各种工农业生产频繁活动及家庭 消费不断地向环境释放重金属，造成环境中重金属 超负荷，进而造成土壤重金属污染。土壤重金属污 染是一个难以解决的全球性的棘手问题。由于土壤 中重金属污染是一个不可逆的过程，且土壤中的重 金属具有非降解性及难以清除性，因此，采用传统的 淋滤法、客土法和吸附固定法等物理方法及络合浸 提法等化学方法修复重金属污染土壤是非常困难和 昂贵的[b 2]o传统方法往往投资昂贵，需要复杂的 设备条件或改变土层结构，而生物修复法能克服传 统方法中的缺点，越来越受到重视⑺。近10年来, 微生物、植物及动物3种生物修复技术成为土壤重 金属污染修复研究的热点同。而土壤微生物修复 在生物修复中又具有它的独特性。土壤微生物是土 壤中的活性胶体，它们比表面大、带电荷和代谢活动 旺盛。而且土壤中的微生物种类繁多，数量庞大，有 的不仅参与土壤中污染物的循环过程，还可作为环 境载体吸持重金属等污染物⑹。在重金属污染土 壤上，往往富集多种耐重金属的真菌和细菌，微生物 可通过多种作用方式影响土壤重金属的毒性凶及 重金属的迁移与释放⑺。由于微生物对重金属具 有积累和解毒作用的功能，可促进有毒、有害物质解 毒或降低毒性，使土壤重金属污染生物处理技术的 发展和应用倍受关注。因此，研究和运用微生物与 重金属间的相互关系和作用特点，对重金属污染土 壤的微生物修复具有重要的意义⑶O

**1** 土壤重金属污染的微生物效应及毒性

**1・1**重金属污染对土壤微生物活性的影响

微生物的代谢癇(qCO2 )是微生物活性反应指 标之一。它反映了单位生物量的微生物在单位时间 里的呼吸作用强度。当土壤受外来重金属污染物污 染时,微生物为了维持生存可能需要更多的能量，而

基金项目：国家杰出青年科学基金(20225722)；中国科学院知识创 新工程重要方向项目(KZCX2-SW-416)；国家重点基础研 究发展规划项目(G1999011808)；中国科学院沈阳应用生 态所陆地生态过程重点实验室资助项目

收稿日期：2003 — 08—01；修订日期：2003—10—16

作者简介：王新(1961〜)，女，副研究员，主要从事重金属污染生态 学的研究。E-mail： wangxin 0116 @sina. com 使土壤微生物的代谢活性发生不同程度的反应。土 壤微生物的代谢爛通常随着重金属污染程度的增加 而上升。Brookes［9］和Mcgrath等口切研究认为，重 金属污染土壤的代谢癇是未污染土壤的2倍。 Chander等研究认为，含高浓度重金属的土壤中 微生物利用有机碳更多地作为能量代谢，以C02的 形式释放，而低浓度重金属的土壤中微生物能更有 效地利用有机碳转化为生物量碳，土壤中的重金属 含量的高低影响了微生物的呼吸及代谢，进而影响 了土壤的呼吸作用。Fliepbach等2研究了重金属 胁迫下土壤微生物的呼吸效应，其结果表明，基础呼 吸随着重金属的污染程度而下降。但有人发现，加 入低浓度Cd和Zn反而会促进呼吸作用。Fliepbach 等【12］研究认为，代谢爛是评价重金属微生物效应的 敏感指标，它可以反映出土壤重金属污染程度。

**1・2**重金属污染对土壤微生物生物量的影响

土壤微生物生物量代表着参与调控土壤中能量 和养分循环以及有机质转化所对应生物量的数量， 而且土壤微生物碳或氮转化速率较快，可以很好地 表征土壤总碳或总氮的动态变化，是比较敏感的生 物学指标〔°。大量的研究表明，由于土壤重金属污 染造成微生物生物量发生变化。Kandeler等口勺研 究指出，Pb污染矿区土壤的微生物生物量受到严重 影响，靠近矿区附近土壤的微生物生物量明显低于 远离矿区土壤的微生物生物量。Fliepbach等el研 究结果表明，低浓度的重金属能刺激微生物生长，可 增加微生物生物量碳，而高浓度重金属污染则导致 土壤微生物生物量碳的明显下降。Khan等山］采用 室内培养实验研究了 Cd和Pb对红壤微生物的影 响，当其浓度分别为30 Mg/g和150 Mg/g时导致微 生物生物量的显著下降。

**1.3**重金属污染对微生物的生态毒性

土壤重金属浓度增加时就会影响甚至抑制微生 物的生长及代谢活动。某些非生物学功能的重金属 如Hg和Cd等在其浓度很低时即有高毒性［6 17］ o Hg对微生物的毒性主要表现在Hg能抑制大分子 如蛋白质和核酸的合成，破坏蛋白质的结构和功能， 尤其对一些有生理活性的蛋白质和多肽结构的破 坏，导致微生物细胞代谢紊乱，细胞突变，停止细胞 分裂，抑制生物氧化及运动性。Cd同样对细胞具有 致突变效应，导致DNA链断裂。Cd可与含竣基、氨 基，特别是含疏基的蛋白质分子结合，而使许多酶的 活性受到抑制和破坏，使肾、肝等组织中的酶系功能 受到损害。Pb可与体内一系列蛋白质、酶和氨基酸 内的功能团相结合，从多方面干扰机体的生化和生 理功能。可造成细胞膜的损伤，破坏营养物质的 运输。

**2**微生物对重金属环境化学行为的影响

2.1微生物对重金属的生物吸附和富集

土壤微生物本身及其代谢产物都能吸附和转化 重金属。微生物对重金属的生物积累机理主要表现 在胞外络合作用、胞外沉淀作用以及胞内积累3种 形式。微生物可通过带电荷的细胞表面吸附重金属 离子，或通过摄取必要的营养元素主动吸收重金属 离子，将重金属离子富集在细胞表面或内部［⑻阂。 微生物表面结构对重金属的吸附起着重要的作用， 微生物细胞壁和黏液层能直接吸收或吸附重金属。 微生物表面即带正电荷，又带负电荷，但大多数微生 物所带的是阴离子基团，有利于对重金属的吸附。 已有很多报道指出，细菌细胞吸附重金属离子的组 分主要是肽聚糖、脂多糖、磷壁酸和胞外多 糖［20, 21］,它们是细菌细胞壁的组分。革兰氏阴性 细菌富集重金属离子的位点主要是指多糖分子中的 核心低聚糖和氮乙酰葡萄糖残基上的磷酸基及2- 酮-3-脱氧辛酸残基上的竣基㈡］。革兰氏阳性细菌 的吸附位点是细胞壁肽聚糖、磷壁酸上的竣基和糖 醛酸上的磷酸基。Beveridge［23］认为，重金属首先被 吸附于细菌表面的活性位点上，这个过程符合化学 计量规律，并且形成一个重金属的“核”，重金属不断 在“核”周围累积，直到填满核周围的空隙为止。 Macaskie等创 报道，革兰氏阴性细菌*Citrobacer*通 过磷酸酶分泌大量的磷酸氢根离子在细胞表面与重 金属形成沉淀，富集重金属离子。微生物对重金属 的吸着和积累主要取决于不同配位体结合部位对金 属的选择性。Gadd等©I研究结果表明，许多微生 物，包括细菌、真菌和藻类可以生物积累和生物吸着 外部环境中的多种阳离子（表1）。

微生物对重金属积累和吸着的作用方式有以下 几种：（1）金属磷酸盐、金属硫化物沉淀；（2）细菌胞 外多聚体；（3）金属硫蛋白、植物螯合肽和其他金属 结合蛋白；（4）铁载体；（5）真菌来源物质对金属的去 除；（6）衍生、诱导或分泌的微生物产物与金属去除。

在国外，现阶段主要集中于利用含某目标重金 属的培养基，诱导具有重金属抗性的吸附菌株，通过 基因工程技术提取抗性基因，并对该基因进行序列 分析，获取遗传密码。也可利用微生物的代谢产物 吸附固定土壤中的重金属，微生物在其生长过程与 土壤环境因素相互作用时会释放出许多代谢产物， 如H?S及有机物等，这些代谢产物能与重金属发生 反应从而吸附固定重金属。

表1微生物对重金属的生物积累

Table 1 Bioaccumulation of heavy metals by microorganisms

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 元素 | 微生物 | 吸收量(干重，  质量分数％) |
| Cd | 细菌：蜡样芽抱杆菌***(Eacillus cereus)*** | 4~9 |
|  | 柠檬酸杆菌(Ci ***trobacter)*** | 40 |
|  | 芽抱杆菌***(Bacillus)*** | 21.4 |
|  | 酶菌：少根根酶***(Rhizopus arrhizus)*** | 3 |
| Pb | 细菌:柠檬酸杆菌***(CitrobacteF)*** | 34 〜40 |
|  | 芽抱杆菌***(Bacillus)*** | 60.1 |
|  | 酶菌：少根根酶***(Rhizopus arrhizus)*** | 10.4 |
| Cu | 细菌:动胶菌属***CAoogloea)*** | 34 |
|  | 铜绿假单苞菌***(Pseudomonas aeruginosa)*** | 30 |
|  | 芽苞杆菌***(Bacillus)*** |  |
|  | 酶菌：少根根酶***(Rhizopus arhizus)*** | 1.6 |
| Zn | 细菌：芽抱杆菌***(Bacillus)*** | 13.7 |
|  | 酵母：啤酒酵母(***Saccharomyces cerevisiae)*** | 0.5 |

**2.2**微生物对重金属的氧化-还原过程

微生物可通过直接的氧化作用或还原作用，改 变重金属的价态，金属价态的改变会影响到金属的 溶解性、移动性以及生态毒性⑺8] O

微牛物能氧化土壤中名种重金属元素9某些自 养细菌如硫-铁杆菌类(*Thiobacillus ferrobacillus )* 能氧化As3+、Cu+、Me/+和F『+等，假单抱杆菌 *{Pseudomonas*)能使 As3+、Fe?+ 和 Mn?+等发生氧 化，微生物的氧化作用能使这些重金属元素的活性 降低。硫还原细菌可通过两种途径将硫酸盐还原成 硫化物，一是在呼吸过程中硫酸盐作为电子受体被 还原，另一是在同化过程中利用硫酸盐合成氨基酸， 如胱氨酸和蛋氨酸，再通过脱硫作用使**S?—**分泌于 体外。S?—可以和重金属Cd?+形成沉淀，这一过程 在重金属污染治理方面有重要的意义。可溶的汞 (H『+)在环境中可以被好氧细菌还原为可挥发的 Hg°,并释放到空气中，可使用汞还原菌促使汞 (H『+)还原和挥发，以达到对汞污染土壤生物修复 的目的。就Cr元素而言，C』+毒性和水溶性都很 强，cF+毒性和水溶性都低，在土壤中移动性差。 所以通过还原作用可以使Cr的生态毒性及在土壤 中的移动性降低，达到污染治理的目的。青霉菌能 还原C』+为Cr3+,其还原是非诱导性的，但在 Hg2+>Cu2+>Co2 +«孑+和Ni?+离子的存在下，对 C』+还原有明显的抑制作用**0]**。在土壤中分布有 多种可以使銘酸盐和重銘酸盐还原的细菌，如产碱 菌属(*Alcaligenes* )、芽抱杆菌属、棒杆菌属 *(Corynebacterium* )、肠杆菌属、假单胞菌属和微球 菌属等，这些菌能将高毒性的Cr&+还 原为低毒性的cF+。

**2.3**微生物对重金属的溶解过程

微生物对重金属的溶解主要是通过各种代谢活 动直接或间接地进行。土壤微生物的代谢作用能产 生多种低分子量的有机酸，如甲酸、乙酸、丙酸和丁 酸等。Siegel等㈢报道，真菌可以通过分泌氨基 酸、有机酸以及其他代谢产物溶解重金属及含重金 属的矿物。花岗岩风化壳剖面都有微生物的存在， 可将风化壳中的微生物分离和培养，加速重金属元 素从风化壳中的释放。

Chanmugathas等㈤ 报道，在营养充分的条件 下，微生物可以促进Cd的溶解，从土壤中溶解出来 的Cd主要是和低分子量的有机酸结合一起。他们 通过不同碳源条件下微生物对重金属的溶解比较实 验，研究结果表明，以土壤有机质或土壤有机质加麦 秆及易被微生物利用的葡萄糖作为碳源时，经过一 段时间后，不灭菌处理的淋溶液中重金属离子的浓 度显著高于灭菌处理。这说明微生物通过其代谢活 动可促使土壤中重金属的溶解。他们的研究还表 明，微生物可促进土壤对重金属的固定，同时又能通 过其代谢活动及其产物促进重金属的溶解。

因此，土壤中的重金属通过微生物的代谢作用、 氧化-还原作用及对重金属的溶解作用，改变重金属 在土壤中的存在形态，有利于重金属的植物吸收，有 利于重金属在土壤中的生物吸附固定以及重金属毒 性降低。

**3**重金属污染土壤的微生物修复

重金属污染土壤的微生物修复是利用微生物的 生物活性对重金属的亲合吸附或转化为低毒产物， 从而降低重金属的污染程度。在长期受某种重金属 污染的土壤上，生存有很大数量的、能适应重金属污 染环境并能氧化或还原重金属的微生物类群。微生 物对重金属首先是吸收作用，由于专性微生物区系 能促进重金属参与微生物体组成，从而促进重金属 的微生物吸收，减少植物摄取。重金属污染土壤的 微生物修复主要包括两方面，即生物吸附和生物氧 化-还原。生物吸附是重金属被活的或死的生物体 所吸附的过程，而生物氧化是利用微生物改变重金 属离子的氧化-还原状态降低土壤环境中重金属含 量。Weon[29]研究表明，表面传送的金属绑定缩氨 酸细菌吸收剂的生物聚集作用，可以作为一种通用 的重金属污染的清除方法。Desjardin[30]在法国某 污染区土壤开展了微生物活性对銘化学形态的影响 研究。该区土壤Cr含量为4700 mg/kg,并有40% 的珞以可溶的六价乍各存在。经过研究发现，土壤在 30 °C饱和水含葡萄糖和营养物基质内培养后，其内 天然微生物的活性对将C』+还原成低迁移率的 CF+有显著的影响。从中分离出还原c』+的菌种 链霉菌属(*thermocarboxydus* ),当细菌细胞群集或 附着到悬浮固体颗粒上，*thermocarboxyd*%s还原 C』+为Cr3+,使Cr的活性及毒性降低。抗Hg细菌 如假单胞菌、大肠杆菌体内存在特殊的MMR酶系， 能将土壤中的甲基汞、乙基汞和硝基汞还原为元素 汞。日本有人利用此原理将富汞细菌收集起来，经 蒸发、活性碳吸附等方法除去Hg⑶]。微生物可使 还原态重金属氧化，如无色杆菌、假单胞菌能使亚方申 酸盐氧化为不申酸盐，从而降低As的毒性。在厌氧 条件下，微生物通过沉淀作用，利用产H2S细菌产 生的H?S与Cd?+结合生成CdS沉淀，可以降低Cd 的毒性。

除此而外，重金属污染土壤的微生物修复的另 一重要方面是菌根的作用。菌根是植物根系和真菌 形成的一种共生体，菌根与土壤的交互作用形成了 菌根际。对根际的研究结果表明，根际环境的改变 直接影响了重金属在土壤-植物系统中的迁移、转化 及生物有效性。微生物、菌根对重金属的生物有效 性的影响是多方面的[刑，利用菌根根际的作用可提 高生物修复的效率。菌根对于植物吸收Cu、Zn和 Pb等重金属有着调控的作用，这可能与菌根对重金 属的生物吸附和富集，或者由于菌根促进磷酸根离 子的吸收使其与重金属形成多聚磷酸盐在根部累积 有关。而目前在重金属污染土壤上运用遗传、工程 菌等高科技生物技术和手段，达到污染生物修复倍 受推崇。在重金属污染土壤上培育对重金属具有降 毒能力的微生物，有些微生物具有嗜重金属性，利用 特异微生物有效地吸收土壤中的重金属，使污染区 净化，以保证土壤生态健康和农业的可持续发展。

**4**结语

土壤重金属的活性及迁移归宿受土壤中一系列 化学特性的影响，如土壤pH、Eh、土壤胶体吸附和 沉淀溶解等因素的综合影响。微生物作为土壤中重 要胶体组分的物质，由于其数量多、表面活性强，因 此，微生物对重金属化学行为和生物有效性都会产 生深刻的影响。在土壤环境中，细菌与不同类型的 土壤胶体及重金属相互作用机制及对重金属形态和 生物有效性的影响有待于进一步研究。微生物对重 金属的溶解和氧化-还原主要决定于微生物的代谢 活动，因此，应深入开展对重金属的环境调控这方面 的研究工作。根际微生物，特别是菌根真菌对重金 属的吸收以及重金属从土壤向植物的转移有着重要 的影响，深入研究根际细菌、菌根真菌以及细菌与真 菌的相互作用与重金属在土壤-植物系统中迁移，对 降低土壤重金属的活性和有效性具有重要的意义， 同时应加强土壤重金属污染对微生物的毒理学研 究，以研究土壤重金属污染的毒理效应、生态风险评 价及其诊断指标的建立为切入点，建立土壤环境质 量指标体系，充分发挥土壤微生物净化功能，使微生 物修复在重金属污染土壤上发挥更大的作用。

参考文献

1. Ebbs S. D. , Lasat M. M. , Brady D. J. , et al. Phytoextra- tion of cadmium and zinc from a contaminated soil. J. Envi­ron. Qual., **1997,** 26： 1424 -1430
2. 周启星.污染土壤修复的技术再造与展望.环境污染治 理技术与设备，**2002,** 3(8)： 36〜40
3. 周启星，林海芳.污染土壤及地下水修复的PRB技术 及展望.环境污染治理技术与设备，**2001,** 2(5)：48-53
4. 周启星，宋玉芳.植物修复的技术内涵及展望.安全与 环境学报，**2001,** 1(3)： 48〜53
5. 许光辉，李振高.微生物生态学.南京：东南大学出版 社，**1991**
6. Robert M. , Berthelin J. Role of biological and biochemical

factors in soil minerals weathering. In： Huang P. M., Schnizer M. ed. Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. Madison： Soil Sci. Soc. Am. , Spe­cial Publication, **1986,** 17： 453 ~465

1. 孙铁玷，周启星，李培军.污染生态学.北京:科学出版 社，**2001**
2. 周启星，宋玉芳.污染土壤修复原理与方法.北京：科

学出版社**,2004**

1. Brookes P. C. Effects of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass. Journal of Soil Science, **1984,** 35： 341 〜346
2. Mcgrath S. P. , Chaudhri A. M. , Giller K. E. Long term effects of metals in sewage on soils, microorganisms, and plants. Journal of Industrial Microbiology, **1995,** 14： 94 〜101
3. Chander K. , Brookes P. C. Synthesis of microbial biomass from added glucose in metal-contaminated and non-contaminated soils following repeated fumigation. Soil Biol. Biochem. **, 1992,** 24：613 ~614
4. Fliepbach A. , Martens R. , Peber H. Soil microbial biomass and activity in soils treated with heavy metal con­taminated sewage sludge. Soil Biol. Biochem. , **1994,** 26： 1201 ~1205
5. 蒋先军，骆永明，赵其国.重金属污染生物修复机制 及研究进展.土壤，**2000,** 3： 130〜134
6. Kandeler E. , Kyftebegger G. , Schwarz S. Influence of

heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities. Biology and Fertility of Soils, **1997,** 23：

299 -306

1. Khan K. S. , Xie 乙 M. , Huang C. Y. Effects of cadmi­um, lead and zinc on size of microbial biomass red soil. Pedosphere, **199&** A8： 27 ~32
2. 周启星，黄国宏.环境生物地球化学及全球环境变化. 北京：科学出版社，**2001**
3. 周启星，任丽萍，孙铁聲亍，等.某铅锌矿开采区土壤镉 的污染及有关界面过程.土壤通报，**2002,** 33(4)： 300 〜302
4. Beveridge T. J. The response of cell walls of *Bacillus sub- tilis* to metals and electron microscopic strains. Can. J. Microbial. , **1978,** 24： 89 〜104
5. Beveridge T. J. , Koval S. F. Binding of metals to cell en­velopes of *Escherichia coli* K-12. Appl. Environ. Micro­biol. ,**1981,** 42(2)： 325 ~335
6. Langley S., Beveridge T. J. Effect of O chain-lipopolysaccharide chemistry on metal binding. Appl. Environ. Microbiol.**, 1999,** 65 (2)：489~498
7. Beveridge T. J. Role of cellular design in bacterial metal accumulation and mineralization. Annu. Rev. Microbiol., **1989,** 43： 147-171
8. Beveridge T. J. , Schultze-Lam S. Detection of anionic sites on bacterial walls, their ability to bind toxic heavy metals and form sedimentable flocs and their contribution to mineralization in natural freshwater environments. In： Allen H. E. , Huang C. P. , Bailey G. W. , eds. Metal speciation and contamination of soil. Boca Raton： CRG Press/Lewis Publisher, **1995 .** 183 ~205
9. Beveridge T. J. Mechanisms of the binding of metallic ions to bacterial walls and the possible impact on microbial ecology. Washington： American Society for Microbiolo­gy, **1984 .** 601 〜607
10. Macaskie L. E. , Dean A. C. R. , Cheethan A. K. , et al. Cadmium accumulation by a *Citrobacter* sp.: The chemi­cal nature of the accumulated metal precipitate and its lo­cation on the bacterial cells. J. Gen. Micro! , **1987,** 133： 539 -544
11. Gadd G. M. , Fry J. C. Microbial control of pollution. Cambridge, UK： Cambridge University Press, **1992.59 ~** 84
12. 王保军，杨惠芳.青霉菌对**C**』+还原的最佳条件和效 应.应用与环境生物学报，**1997,** 3(4)： 355 ~360
13. Siegel S. M. , Keller P. , Siegel B. Z. , et al. Metal specia­tion, separation and recovery. Proc. Intern. Symp. Chica­go： Kluwer Academic Publishers, **1986.** 77 ~94
14. Chanmugathas P. , Bollag J-M. Microbial role in immobi­lization and subsequent mobilization of cadmium in soil. Arch. Environ. Contamin. Toxical. , **198&** 17： 229 ~235
15. Weon B. Genetic engineering of *Escherichia coli* for en­hanced uptake and bioaccumulation of mercury. Appl. & Environ. Microbiol., **2001,** 67(11 )： 5335 ~5338
16. Desjardin V. Effect of microbial activity on the mobility of chromium in soils. Waste Manag., **2002,** 22 (2)： 195 ~ 200
17. 张均.污染环境微生物学.昆明：云南大学出版社， **1997**
18. 李红，张爱云.微生物在采矿工程环境保护中的作用. 国外金属矿选矿，**1998,** (4)： 41 ~42