

Research Progress of Bioremediation on Heavy Metal Contaminated Soil

Yanchun Gao¹, Qiang Liao^{2*}, Aiju Liu²

¹Zibo Agricultural Environment and Agricultural Products Quality Supervision and Inspection Center, Zibo Shandong

²Shandong University of Technology, Zibo Shandong

Email: *1322729974@qq.com

Received: Apr. 26th, 2017; accepted: May 10th, 2017; published: May 18th, 2017

Abstract

Bioremediation of soil heavy metals contamination, as one of the important means to control environmental pollution, is an integral part to establish the environmentally friendly society. This article firstly introduces the main sources of heavy metals in soil and the influence of heavy metals on soil fertility, soil microorganism and enzyme activity and human health. What's more, it also summarizes the bioremediation of heavy metals contaminated soil in detail, including phytoremediation, microbial remediation and their combined repair technology. Finally, this article proposes the lake of repairing technology at present stage and the future development in this field.

Keywords

Heavy Metal Pollution, Bioremediation, Phytoremediation, Micro-Remediation

重金属污染土壤的生物修复技术研究进展

高燕春¹, 廖强^{2*}, 刘爱菊²

¹淄博市农业环境暨农产品质量监督检测中心, 山东 淄博

²山东理工大学, 山东 淄博

Email: *1322729974@qq.com

收稿日期: 2017年4月26日; 录用日期: 2017年5月10日; 发布日期: 2017年5月18日

摘要

土壤重金属污染的生物修复作为治理环境污染的重要手段之一, 是建立环境友好型社会不可或缺的一部分*通讯作者。

分。本文首先介绍了土壤中重金属污染的主要来源以及重金属对土壤肥力、土壤微生物和酶活性及人类健康的影响；其次比较详细地综述了重金属污染土壤的生物修复技术，包括植物修复技术、微生物修复技术及二者联合修复等；最后提出了现阶段修复技术的不足，并对该领域今后的发展进行了展望。

关键词

重金属污染, 生物修复, 植物修复, 微生物修复

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

在整个自然界中，土壤生态系统在人类和动植物群体中扮演着不可或缺的角色，动植物的正常生长都依赖于土壤，人类的生存活动也都离不开土壤。土壤系统具有一定的自净能力，可以通过自身的物理、化学和生物作用，使进入系统的污染物质通过转化、减毒和消失使土壤系统重新回到平衡状态，也让土壤中的微生物恢复到原有的自然水平[1]。但世间万物总有一个度，所以土壤的自净能力也不是无限的，一旦土壤中进入了超过其耐受度的污染物，便会导致土壤的严重污染。这样，不仅动植物的生长会遭到阻碍，人类的生存也会受到严重的威胁。

中国是一个人口大国，总人口达到了世界的 1/5，但其耕地面积却只占了世界的 7%，且满足开垦条件的土地也严重不足；另一方面，改革开放 38 年以来，中国经济以惊人的速度飞速发展，致使我国土地资源环境日趋恶化，土地资源环境问题成为了 21 世纪亟待解决的问题之一。土壤重金属污染是指由于人类活动将重金属带入到土壤中，致使土壤中重金属含量明显高于背景含量，并可能造成现存或潜在的土壤质量退化、生态与环境恶化的现象[2]。为了缓解土壤重金属的污染问题，国内外专家通常采用传统的物理、化学修复方法，如排土填埋法、稀释法、淋洗法、物理分离法、稳定化及电化学法等，但由于传统方法存在一定的局限性，所以都没有达到很好的效果[3] [4]。近年来，专家开始运用生物方法来对重金属污染土壤进行修复，并取得了良好的效果。生物修复一般指通过利用特定的生物将土壤中的重金属吸收、转化、降解、富集、转移进而恢复土壤系统正常生态功能的过程[5]。与传统的修复方法相比，生物修复具有成本低廉、来源广泛、无二次污染等优点，尤其适用于低浓度重金属的去除，所以它以环境友好的特点成为了当代社会修复重金属污染土壤的重要方法[5]。

2. 土壤重金属污染的危害

2.1. 重金属污染对土壤肥力的影响

重金属在土壤中大量积累必然导致土壤性质发生变化，从而影响到土壤营养元素的供应和肥力特征。氮、磷、钾通常被称为植物生长发育必须的三要素，同时也是非常重要的肥力因子[2]。当土壤中这三种元素的含量达不到植物生长的要求时，植物就会出现生长缓慢或死亡等情况。重金属对土壤的污染经常会导致土壤中氮的吸收、磷的吸附、钾的形态发生改变，从而严重影响植物的生长[6]。

2.2. 重金属污染对土壤微生物和酶的影响

土壤微生物种类繁多，对土壤的形成发育、物质循环和肥力演变等均有重要作用。在正常的土壤环

境中，土壤中的微生物含量与有机碳之间存在稳定的比例，有利于作物的光合作用。但如果土壤受到重金属的污染，土壤微生物的生长和生化活性就会受到严重影响，土壤中的酶活性也会受到严重抑制[7]。可见，土壤中微生物和酶的数量与重金属污染有很大的关系。韩佳琪等人研究了重金属 Cd、Zn、Cu、Pb 复合污染对土壤微生物和酶活性的影响，结果表明，随着污染程度的增加，土壤有机质、有效 N、P、K 的含量亦越低，土壤酶活性和土壤微生物数量、微生物生物量 C 和 N 受到的抑制程度也增强[8]。

2.3. 重金属污染对人类健康的影响

生长在重金属污染土壤上的作物，其可食用部位的重金属含量较高，并通过食物链经消化道进入人体。除很少部分的重金属是人体所必需的以外，大部分重金属进入人体后都将对人类健康造成极大的威胁。例如：砷、汞、铅均能引起神经系统病变；镉能引发肾功能障碍和“痛痛病”等。虽然铬、铜、锌等是人体所必需的元素，但如果摄入量超过身体所需，同样也会造成疾病。又如：过量的铜会引起人体溶血、肝胆损坏等疾病；过量的铬会导致人体消化系统紊乱；过量的锌也会引起腹痛、呕吐等症状。由此可见，重金属和我们人类的生存和生活都有着密不可分的关系，有效控制环境中的重金属污染也是对我们人体健康负责的重要体现[2]。

3. 土壤重金属污染的生物修复

生物修复技术主要是利用生物的生命代谢活动来减少环境中对人体有毒有害物质的浓度或者使其转化为对环境完全无害的物质，因其较传统修复方法而言有更多的优点，故具有广阔的应用前景[9]。本文主要对生物修复技术中的植物修复、微生物修复以及二者的联合修复技术进行阐述。

3.1. 植物修复技术

植物修复主要是利用可超富集重金属的植物吸收、积累环境中的污染物，并降低其毒害的环保生物技术。主要包括植物提取，植物稳定或固化和植物挥发[10]。

3.1.1. 植物提取修复

植物提取的概念，是由 Chaney 在 1983 年首次提出来的，主要依靠超积累植物来进行[11]。超积累植物是指能够超量吸收和积累重金属的植物，因其具有富集重金属、污染地生长旺盛、富集质量分数界限不同等特点，一般只生长在矿山区、成矿作用带或者由富含某种或某些化学元素的岩石风化而成的地表土壤上[12]。据统计，目前世界范围内超积累植物的种类可达 700 多种，其中，部分研究成熟的超积累植物也被成功地应用于实践修复。早在上个世纪，我国就已经开展了利用耐重金属植物进行矿山尾矿地植被恢复的实验研究，确定了一些矿山尾矿地影响植物定居的主要因素，并建立了植被重建技术[13][14]。同样于 90 年代的美国，环境科学家 Chaney 等在明尼苏达州圣堡罗遭受 Cd 污染的土地上种植对 Cd 有富集作用的曼陀罗属植物，并在努力 3 年以后得到了很好的效果，最终给本已荒废无用的土地带去了生机[15]。

随着科学技术的不断发展，除了运用成功的超积累植物外，越来越多具有潜在修复能力的超积累植物也在用于实践修复的研究中看到了曙光。这些具有潜在修复能力的超积累植物不仅对某一种重金属具有富集作用，有的还能同时对两种及以上的重金属进行吸收、转化和富集。例如：在铜和钴的超积累植物中，有 12 种对两者都有超富集能力，但目前还并没有发现具有广谱重金属超积累特性的植物[4]。此外，林昕、高建培等人在研究油菜对镉、铅复合污染土壤修复潜力后发现，油菜能通过降低抗坏血酸含量和改变酶系活性来减轻镉和铅得复合污染对自身的毒害，并对其有一定的富集作用，可作为镉、铅复合污染土壤的高生物量修复植物[16]。况武、田伟莉、高全喜等人还对白三叶在铜、镉、铅复合污染土壤修复

上的应用进行了研究, 结果发现, 白三叶也能同时富集污染土壤中的铜、镉、铅, 且富集量可观。加之白三叶牧草的特性, 是一种修复效果好, 适用范围广的超富集植物[17]。

3.1.2. 植物稳定或固化修复

植物稳定或固化修复是指植物通过根系的吸附作用或产生根系分泌物, 使污染基质中金属的流动性降低, 生物可利用性下降, 从而减轻有毒金属对植物的毒性的修复方法[18]。在自然界中, 植物为了保证正常生长不断从土壤中汲取养分, 但与此同时, 生物有效性重金属也被植物通过根部直接吸收, 并产生根系分泌物来调控植物根际微环境。整个过程中重金属的有效性发生了改变, 同时还降低了溶解态化学污染物在土壤中的流动性, 将污染物稳定在污染土壤中, 防止污染物在土壤中迁移和扩散[19]。敖子强, 熊继海等人对植物稳定技术在金属矿山废弃地修复中的利用进行了研究, 结果发现, 植物稳定技术不仅能尽快在金属矿山废弃地上重建植被, 提高植被覆盖率, 减少水土流失, 还能将金属矿山废弃地的重金属稳定下来, 防止了重金属的迁移扩散带来更大范围的污染[20]。

对于进行固化修复的植物选择, 应该满足能忍耐高含量污染物、根系发达且为多年生植物的要求, 它们通过在根部的累积和沉淀或根系吸收重金属来增加对污染物的固定。例如: 瑞典学者 Wang 和 Greger 研究发现, 柳树的根部能积累大量的汞, 而且和其它植物如豌豆、小麦、苜蓿以及油菜等相比, 其叶面未有向大气释汞的现象。因此, 虽然柳树无法作为上述提取修复中理想的超积累植物, 但由于其生物量大、且根系发达, 可以被用于土壤中汞的稳定化修复[21]。

3.1.3. 植物挥发修复

植物挥发修复主要指利用植物将土壤中的重金属吸收到体内, 并在植物体内经过一系列反应转化为气态物质排放到大气中的修复方法。此方法虽然能够达到减轻土壤污染的目的, 但由于其只适用于具有挥发性的重金属, 所以应用的范围较小, 目前利用此方法研究最多的重金属元素主要有硒、汞和砷等[2]。Meagher R B 通过研究指出, 烟草能使毒性大的二价汞转化为气态汞; Banuelos G S 等也经过研究发现, 洋麻可以使土壤中 47% 的三价硒转化为甲基硒挥发去除[5]。因此, 对于具有挥发性的重金属, 利用植物的挥发修复还是可以达到很好的修复效果。

但在修复过程中, 由于重金属物质被转化为气态物质排放到大气中, 就可能又对大气造成二次污染。所以, 在使用植物挥发修复污染土壤时保持一个谨慎的态度是很有必要的。相比于前两种修复方法而言, 此方法的适用条件、应用范围都受到了一定的限制, 故对于重金属污染土壤的植物修复, 植物提取和固化是实际生产生活中更为常用的一种方法。

3.2. 微生物修复技术

微生物活动可以通过影响植物的根系分泌和吸收等过程, 来影响土壤对重金属的吸附和价态, 降低重金属的生物有效性, 进而达到修复污染土壤的效果[22]。微生物修复所遵循的原理主要包括生物吸附和生物氧化、还原两个方面的内容。所谓生物吸附, 是指土壤中的重金属被生物体吸附的过程, 而生物氧化、还原则是利用土壤微生物改变重金属离子的氧化、还原态来控制土壤中重金属的含量[23]。实际运用过程中主要是利用上述原理, 采用原位微生物修复和异位微生物修复两种方法来进行。与传统的修复方法相比, 微生物修复具备费用低廉、处理形式多样、二次污染问题小等优点, 具有广阔的应用前景。

3.2.1. 原位微生物修复

原位微生物修复不需将污染土壤搬离现场, 直接向污染土壤投放 N、P 等营养物质和供氧, 促进土壤中土著微生物或特异功能微生物的代谢活性, 降解污染物[24]。同时, 为了增强微生物的降解能力, 强

化处理效果，常采用生物通气、泵处理工艺等工程化措施来进行。

泵处理工艺简称 P/T 工艺，主要用于修复受污染的地下水和土壤，处理方法较为简单，费用较省，适用于受污染面积较大的区域；而生物通气工艺一般是在受污染的土壤中至少打两口井，安装鼓风机和真空泵，将新鲜空气强行通入再抽出。此工艺有助于通过真空或加压进行土壤曝气，使土壤中的气体成分发生变化，常用于被地下储油罐泄漏污染的土壤[2]。

3.2.2. 异位微生物修复

异位微生物修复是利用微生物手段异位治理各种土壤污染的一种方法，主要的工艺类型包括堆肥化处理、挖掘堆置处理等[25]。堆肥是有机废弃物资源化的产物，利用堆肥修复土壤的金属污染有着重大意义。堆肥可通过直接与金属产生氧化还原作用、沉淀作用、吸附作用或间接改变土壤理化性质如酸碱度，氧化还原电位等来降低土壤金属的生物有效性和移动性[26]。此工艺是自然界废物循环利用的又一种诠释，是经济有效处理和消纳城市固体废物的重要途径。挖掘堆置处理工艺主要为了防止污染物向地下水或邻近土壤扩散，所以将受污染的土壤经过挖掘、运输、处理后再运回原地。这种技术可以在土壤污染前期限制污染物的扩散和迁移，在极大减小受污染范围方面起到了很好的控制作用。

3.3. 植物-微生物联合修复技术

在重金属污染土壤的联合修复技术中，植物-微生物的联合可谓是最常见的组合，它将植物修复和微生物修复各自的优势进行组合应用，二者在实际生存生长中互利共生，相互促进。一方面，联合修复中的植物能为微生物提供充足的养分，使其能够旺盛生长；另一方面，微生物在生长的过程中通过自身的酶和其他分泌液来加强植物对土壤中重金属的修复效果。

此联合修复技术自提出以来便被给予高度重视，现阶段在国内外都是重金属修复中的热点技术，并且在经过科学家们的不断努力后也取得了不错的成就。杨卓、王占利、李博文等在研究了微生物对植物修复重金属污染土壤的促进效果后发现，巨大芽胞杆菌和胶质芽胞杆菌的混合微生物制剂不仅可以促进超富集植物的生长，增强超富集植物对土壤 Cd、Pb、Zn 的吸收，而且大幅度提高了植物的修复效率[27]。陈苏、陈宁、晁雷等研究了土霉素、镉复合污染土壤的植物-微生物联合修复，结果表明，土霉素降解菌有利于提高植物生物量，促进孔雀草、紫茉莉对镉吸收并提高紫茉莉对镉的富集系数[28]。植物-微生物联合修复法作为重金属污染土壤修复技术中环境友好型的代表是很具有发展前景的，但由于此法的难点是构建更好的修复组合，因此在努力运用于实际的同时还需要投入更多的时间、精力和成本使修复技术的内容更加丰富。

4. 结语

在环境污染日渐严重的现代社会，越来越多的人开始注意到形势的严峻性。经历了“水俣病”、“骨痛病”等重金属污染事件后，人们也将重金属污染作为一个重要的研究课题。重金属污染的生物修复技术可以说在控制和减少土壤重金属含量方面出了不少力，以其修复效果显著、费用低廉、二次污染小等优势在近年来迅速成为了土壤重金属污染修复中最受重视的修复方法之一，其中以植物修复和微生物修复应用最为广泛。而且，随着现代生物工程技术的发展，基因工程、酶工程和细胞工程等也逐渐被广泛应用，这也为重金属污染土壤的生物修复提供了一臂之力，在有效提高了生物修复效率的同时，还增加了方法的可行性和有效性。从长远来看，重金属污染土壤的生物修复技术是极具应用前景的，让目前受空气、水源、食物安全性所威胁的我們看到了环境友好的未来。

不过，当我们在对未来寄予厚望的同时也要立足现在。虽然生物修复的技术已经取得了不错的成就，但是要完全达到理想的修复效果还有很长的路要走。我国作为发展中国家，并且还处于也将长期

处于社会主义初级阶段,在科技方面的水平和国际相比还存在较大差距。例如:在植物修复技术中扮演重要角色的超积累植物,全世界范围内目前发现 700 多种,但其中由我国发现的还不到 10 种;还有现阶段联合修复技术中有效组合的构建数目还远不能满足目前重金属污染的修复要求等。因此,要进一步发展重金属污染土壤的生物修复技术,我们必须加快推进的步伐,包括修复材料的资源化、修复费用的低廉化及与国际之间的合作化等。相信通过大家的共同努力后,我国的生物修复技术一定会达到世界的领先水平。

基金项目

山东省自然科学基金(ZR2015DM010, ZR2014BL034)项目资助。

参考文献 (References)

- [1] 李飞宇. 土壤重金属污染的生物修复技术[J]. 环境科学与技术, 2011(S2): 148-151.
- [2] 陈怀满. 环境土壤学[J]. 地球科学进展, 1991, 6(2): 49-50.
- [3] Cunningham, S.D., Berti, W.R. and Huang, J.W. (1995) Phytoremediation of Contaminated Soils. *Trends in Biotechnology*, **13**, 393-397.
- [4] Khan, A.G., Kuek, C., Chaudhry, T.M., *et al.* (2000) Role of Plants, Mycorrhizae and Phytochelators in Heavy Metal Contaminated Land Remediation. *Chemosphere*, **41**, 197-207. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00412-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00412-9)
- [5] 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.
- [6] 曹洁. 浅析土壤重金属元素的来源、危害及化学修复[J]. 化学工程与装备, 2015(6): 208-210.
- [7] 向彬, 王彬, 徐卫红, 等. 重金属 Cd、Zn、Cu、Pb 对土壤微生物和酶的影响[J]. 氨基酸和生物资源, 2012(3): 4-8.
- [8] 韩桂琪, 王彬, 徐卫红, 等. 重金属 Cd、Zn、Cu、Pb 复合污染对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 238-242.
- [9] 肖春文, 罗秀云, 田云, 等. 重金属镉污染生物修复的研究进展[J]. 化学与生物工程, 2013, 30(8): 1-4.
- [10] 鲍桐, 廉梅花, 孙丽娜, 等. 重金属污染土壤植物修复研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 858-865.
- [11] Meers, E., Ruttens, A., Hopgood, M., *et al.* (2005) Potential of *Brassica rapa*, *Cannabis sativa*, *Helianthus annuus* and *Zea mays* for Phytoextraction of Heavy Metals from Calcareous Dredged Sediment Derived Soils. *Chemosphere*, **61**, 561-572.
- [12] 陈一萍. 重金属超积累植物的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2008(3): 20-24.
- [13] 束文圣, 蓝崇钰, 张志权. 凡口铅锌尾矿影响植物定居的主要因素分析[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 314-318.
- [14] 张志权, 蓝崇光. 铅锌矿尾矿场植被重建的生态学研究 I. 尾矿对种子萌发的影响[J]. 应用生态学报, 1994, 5(1): 52-56.
- [15] Chaney, R.L., Malik, M., Li, Y.M., *et al.* (1997) Phytoremediation of Soil Metals. *Current Opinion in Biotechnology*, **8**, 279-284. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(97\)80004-3](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(97)80004-3)
- [16] 林昕, 高建培. 油菜对镉、铅复合污染土壤修复潜力的研究[J]. 大理学院学报, 2010, 9(4): 76-80.
- [17] 况武, 田伟莉, 高全喜. 白三叶在铜、镉、铅符合污染土壤修复上的应用[J]. 能源工程, 2012(6): 53-56.
- [18] Lasat, M.M. (2002) Phytoextraction of Toxic Metals: A Review of Biological Mechanisms. *Journal of Environmental Quality*, **31**, 109-120. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1090>
- [19] Fung, K.F., Carr, H.P., Poon, B.H.T., *et al.* (2009) A Comparison of Aluminum Levels in Tea Products from Hong Kong Markets and in Varieties of Tea Plants from Hong Kong and India. *Chemosphere*, **75**, 955-962. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.01.003>
- [20] 敖子强, 熊继海, 王顺发, 等. 植物稳定技术在金属矿山废弃地修复中的研究[J]. 广东农业科学, 2011(20): 139-141.
- [21] 刘平, 仇广乐, 商立海. 汞污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(6): 933-937.
- [22] 李兆辉, 王光明, 徐云明, 等. 镉、汞、铅污染及其微生物修复研究进展[J]. 中国畜牧兽医, 2010, 37(9): 39-43.
- [23] 张彩丽. 微生物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015(16): 225-229.

- [24] 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, 39(4): 497-502.
- [25] 李建洲, 梅冬, 雷继雨. 微生物异位修复难降解有机污染土壤的组合工艺中试研究[J]. 环境科技, 2015, 28(5): 38-41.
- [26] 陈寒松, 刘丽娜, 黄巧云, 等. 堆肥修复土壤金属污染研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2008(6): 898-904.
- [27] 杨卓, 王占丽, 李博文, 等. 微生物对植物修复中金属污染土壤的促进效果[J]. 应用生态学报, 2009(8): 2025-2031.
- [28] 陈苏, 陈宁, 晁雷, 等. 土霉素、镉复合污染土壤的植物-微生物联合修复实验研究[J]. 生态环境学报, 2015(9): 1554-1559.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojs@hanspub.org