

螯合剂强化植物修复对重金属污染土壤的修复研究进展

王 湛

陕西省土地工程建设集团有限责任公司延安分公司, 陕西 西安
Email: 454328059@qq.com

收稿日期: 2020年8月28日; 录用日期: 2020年9月17日; 发布日期: 2020年9月24日

摘 要

植物修复重金属污染土壤作为一种绿色修复技术, 成为国内外土壤修复关注的焦点。然而, 目前研究的超累积植物其往往表现为植株矮小、生物量低、生长缓慢等, 严重阻碍了植物修复技术在重金属污染土壤的推广应用。因此, 利用生物诱导剂强化植物修复重金属污染土壤成为了有效可行的替代方法。本文综述了螯合剂的种类及效应、螯合剂在诱导植物修复土壤重金属污染的应用及影响螯合剂对重金属的活化效率的主要因素, 同时对螯合剂在强化植物修复重金属污染土壤方面做了展望, 以期螯合剂强化植物修复技术推广应用提供理论支撑。

关键词

螯合剂, 重金属, 植物修复

Advances in Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils by Chelating Agents

Zhan Wang

Yan'an Branch of Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi
Email: 454328059@qq.com

Received: Aug. 28th, 2020; accepted: Sep. 17th, 2020; published: Sep. 24th, 2020

Abstract

Phytoremediation of heavy metal contaminated soil, as a green remediation technology, has be-

come the focus of soil remediation at home and abroad. However, the hyper-accumulative plants studied at present are usually characterized by short plants, low biomass and slow growth, which seriously hinders the popularization and application of phytoremediation technology in heavy metal contaminated soil. Therefore, the use of biological inducers to strengthen phytoremediation of heavy metal contaminated soil has become an effective and feasible alternative method. In this paper, the types and effects of chelating agents, the application of chelating agents in inducing phytoremediation of heavy metal contaminated soil and the main factors affecting the activation efficiency of chelating agents on heavy metal contaminated soil were reviewed. At the same time, the prospect of chelating agents in strengthening phytoremediation of heavy metal contaminated soil was made, in order to provide theoretical support for the popularization and application of chelating agent enhanced phytoremediation technology.

Keywords

Chelating Agent, Heavy Metal, Phytoremediation

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

土壤是生态环境的重要组成部分，也是植物生长所需水分和养分的重要来源。伴随着经济社会的不断发展，工业污染、矿产开发、农业生产等活动导致土壤重金属污染日益加剧，对植物生长和质量也产生了极大的危害。目前全世界平均每年排入土壤中的重金属大约为元素 Hg 1.5 万 t，元素 Cu 340 万 t，元素 Pb 500 万 t，元素 Mn 1500 万 t，元素 Ni 100 万 t。土壤重金属污染具有污染范围广、持续时间长、污染物隐蔽、无法被生物降解的特点，并可以通过食物链在生物体内不断富集，最终在人体内蓄积而危害人类健康。研究发现，暴露在含 Cd 环境中的人患肾功能不全等疾病的可能性增加，而且骨折的风险也很高[1]。在怀孕期间长期接触 Pb 可能会导致胎儿神经系统发育紊乱，因为 Pb 可以迅速从孕妇的骨骼转移到胎儿身上，并且影响胎儿的一生[2] [3]；除此之外，Pb 还对人体多个器官产生威胁，包括心血管系统[4]、肾功能系统[5]和肝脏系统[6]。因此，重金属污染日益引起人们的关注，重金属污染土壤修复则成为国际上的研究难点和热点。

近年来，广大学者对于土壤重金属的修复方法展开了一系列研究，主要分为物理修复、化学修复、生物修复技术。螯合剂修复技术是近年来新发展起来的严重修复技术，其主要原理是人工往土壤中添加例如 EDTA、EDDS 等螯合剂将土壤中被固定的重金属释放至土壤溶液，然后在通过植物的吸收或富集降低土壤中的重金属[7]，因此，螯合剂被广泛应用于植物对土壤中重金属的提取修复。

2. 螯合剂种类及效应

重金属污染土壤中常用的螯合剂大致有两类：氨基多羧酸类螯合剂和小分子有机酸类螯合剂。常见的氨基多羧酸类螯合剂有 EDTA (乙二胺四乙酸二钠)，DTPA (二乙三胺五三乙酸)，EDDS (乙二胺二琥珀酸)，NTA (二乙基三乙酸)等，这类螯合剂对重金属的活化能力较强，被广泛应用于重金属污染修复中；常见的小分子有机酸类螯合剂主要有草酸、柠檬酸、苹果酸、酒石酸等，这类螯合剂通常是与重金属离子形成络合物增加金属离子的迁移。两者相比起来小分子有机酸类螯合剂对土壤重金属的活化作用较弱，叶朝军等[8]的研究表明，EDTA 施加能够促进毛竹对锌，铜和镉的吸收，施加 3.0 mmol·kg EDTA 对表层

土壤中铜、锌和镉的活化作用最强，而有机酸处理对毛竹吸收重金属促进作用较小。研究表明[9]在相同浓度下 EDTA、DTPA、NTA、柠檬酸对 Cd 的提取效率大小依次为 EDTA > DTPA > NTA > 柠檬酸。螯合剂的作用机制如图 1 [10]。

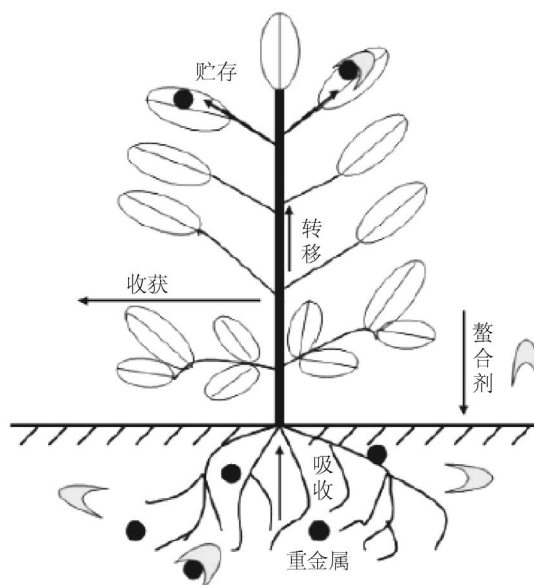


Figure 1. Mechanism of action of chelating agents
图 1. 螯合剂的作用机制

3. 螯合剂强化植物修复重金属应用

螯合剂的种类、浓度不同促进植物富集、吸收重金属的能力就不同。有研究表明[11]天然植物螯合剂对 Pb, Cd 的活化能力明显低于 EDTA, 但对 Zn 的活化能力强; 卫泽斌等[12]研究了可生物降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸(GLDA)不同用量或者与乙二胺四乙酸(EDTA)、柠檬酸复配使用对超富集植物东南景天吸收土壤重金属 Cd、Zn 和 Pb 的影响, 研究表明当谷氨酸 N,N-二乙酸用量为 $2.5 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时东南景天对 Cd 和 Zn 的提取量最高, 当三种螯合剂复配时, 其促进东南景天对重金属的提取能力不明显。佟秀春等[13]的研究表明, 当土壤中镉投加浓度为 $60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铅投加浓度为 $1800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, EDDS:EL 比例为 1:1, 接种 ZC 或 Z11, 龙葵对镉的吸收量最大; 土壤中镉投加浓度为 $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铅投加浓度为 $1800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, EDDS:EL 比例为 1:0, 接种 ZC 龙葵对铅的吸收效果最好。袁江等[14]采用盆栽实验研究可生物降解螯合剂和植物激素单施或复配对龙葵修复重金属的影响, 研究显示, 当可生物降解螯合剂 GLDA 浓度为 $3 \text{ mmol}/\text{kg}$ 时能够明显提高龙葵对重金属 Cu、Cd、Zn 的提取。张譞等[15]研究了 EDTA- Na_2 、DTPA 和酒石酸三种螯合剂对土壤中 Cd、Zn 形态的影响, 研究表明 EDTA- Na_2 在 $1.25 \text{ mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的时候对 Cd 和 Zn 活化效果最好, EDTA- Na_2 、DTPA 和酒石酸添加后, 土壤中 Cd、Zn 的酸可提取态明显提高, 可还原态和可氧化态含量降低, 残渣态没有明显变化。陈雨等[16]通过盆栽试验表明, EDTA 浓度为 $3 \text{ mmol}/\text{kg}$, 对土壤总 Cd 去除率高达 74.57%, 且 EDTA 诱导下土壤蔗糖酶和脲酶活性均显著提高。

4. 影响螯合剂对重金属的活化效率的主要因素

4.1. 金属种类影响

重金属种类的不同螯合剂的活化效果也不同。有研究表明施用 EDTA 处理使根际土壤 Cd 含量比 CK

处理降低 25.0%，施用 EDTA 处理使根际土壤 As 含量分别降低 14.3% [17]。Luo 等[18]研究发现，在土壤中添加 5 mmol/kg 的 EDTA 两天后，土壤中可溶性的 Cu、Zn、Cd 和 Pb 的浓度分别比对照增加了 102 倍、496 倍、5 倍和 114 倍，对 Pb 的增溶效果最好。王红新等[19]采用盆栽实验，研究螯合剂对蓖麻的生长及重金属铅锌的积累的影响，研究发现添加乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA-Na₂)和氨三乙酸(NTA)能显著提高蓖麻对 Pb、Zn 的积累能力，其中对 Pb 的积累能力大于 Zn，且添加螯合剂明显促进了 Pb、Zn 从根部向地上部的转移。熊国焕等[20]利用土培试验研究乙二胺二琥珀酸(EDDS)，氨三乙酸(NTA)和乙二胺四乙酸(EDTA)对大叶井口边草吸收 Pb、Cd 和 As 的影响，研究表明 EDTA 处理能极显著提高土壤 Pb、Cd 有效态浓度，进而促进大叶井口边草对 Pb 的吸收，但未促进大井口边草地上部对 Cd 吸收。

4.2. 植物种类影响

螯合剂诱导植物累积及转移或吸收土壤中重金属，由于植物种类的不同，其对重金属的活化效果也有很大差异。魏岚等[21]研究了螯合剂 EDDS 和 EDTA 对苏丹草，玉米，大豆，茼蒿，青菜吸收土壤重金属的影响，研究显示在 5 种植物中，EDDS 对茼蒿 Cu 含量和积累量的促进作用最大。EDDS 处理下茼蒿地上部 Cu 含量和积累量分别达到 973 mg·kg⁻¹ 和每盆 909 μg。

4.3. 螯合剂的浓度

螯合剂用量和浓度对重金属的活化也有很大程度的影响。苹果酸、草酸、柠檬酸等在较低浓度时对重金属的活化效果较弱，但也并不是浓度越高其活化能力越强。沈斌等[22]通过田间试验表明，柠檬酸添加浓度为 1 mmol/kg 时能显著促进鱼腥草生物量的提高，且在该浓度下柠檬酸显著促进鱼腥草 Pb、Zn、Cd、Cu 吸收，在其他浓度下柠檬酸对鱼腥草生长起抑制作用，对促进鱼腥草吸收 Pb、Zn、Cd、Cu 的吸收不明显。金属与螯合剂的比例、对促进植物吸收重金属的效率也不同；亦有研究表明[23]，10 mmol/kg 的 EDTA 和 EDDS 对大白菜吸收铅的效果最好，大白菜叶片中铅的浓度比对照分别增加了 94 和 102 倍。

5. 结论

土壤重金属污染一直是国内外研究的热点，污染土壤修复需要多层面、多角度的技术深化，和技术创新，螯合剂强化植物修复土壤重金属污染具有很好的应用前景，其修复后能够恢复土壤健康，修复后的土壤能够持续利用，对人体健康及生态环境不会造成危害。由于重金属的种类、螯合剂的种类、植物类别及螯合剂浓度不同，其修复效果也不尽相同。因此，在后续的研究中应有针对性的研发螯合剂，新的螯合剂诱导植物吸附重金属应不分重金属的类别及植物种类，且不会对环境造成二次污染。

基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2020-21)。

参考文献

- [1] Järup, L. (2003) Hazards of Heavy Metal Contamination. *British Medical Bulletin*, **68**, 167-182. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldg032>
- [2] Gulson, B.L., Jameson, C.W., Mahaffey, K.R., Mizon, K.J., Korsch, M.J. and Vimpani, G. (1997) Pregnancy Increases Mobilization of Lead from Maternal Skeleton. *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, **130**, 51-62. [https://doi.org/10.1016/S0022-2143\(97\)90058-5](https://doi.org/10.1016/S0022-2143(97)90058-5)
- [3] Hu, H., Tellez-Rojo, M.M., Bellinger, D., et al. (2006) Fetal Lead Exposure at Each Stage of Pregnancy as a Predictor of Infant Mental Development. *Environmental Health Perspectives*, **114**, 1730-1735. <https://doi.org/10.1289/ehp.9067>
- [4] Lanphear, B.P., Rauch, S., Auinger, P., Allen, R.W. and Hornung R.W. (2018) Low-Level Lead Exposure and Mortality in US Adults: A Population-Based Cohort Study. *The Lancet Public Health*, **3**, e177-e184.

- [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(18\)30025-2](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(18)30025-2)
- [5] Harari, F., Sallsten, G., Christensson, A., *et al.* (2018) Blood Lead Levels and Decreased Kidney Function in a Population-Based Cohort. *American Journal of Kidney Diseases*, **72**, 381-389. <https://doi.org/10.1053/j.ajkd.2018.02.358>
- [6] Can, S., Bagci, C., Ozaslan, M., *et al.* (2008) Occupational Lead Exposure Effect on Liver Functions and Biochemical Parameters. *Acta Physiologica Hungarica*, **95**, 395-403. <https://doi.org/10.1556/APhysiol.95.2008.4.6>
- [7] Vassil, A.D., Kapulnik, Y., Raskin, I.I. and Salt, D.E. (1998) The Role of EDTA in Lead Transport and Accumulation by Indian Mustard. *Plant Physiology*, **117**, 447-453. <https://doi.org/10.1104/pp.117.2.447>
- [8] 叶朝军, 吴家胜, 钟斌, 等. EDTA 和有机酸对毛竹修复重金属污染土壤的强化作用[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(3): 48-56.
- [9] 陈晓婷, 王欣, 陈新. 几种螯合剂对污染土壤的重金属提取效率的研究[J]. 江苏环境科技, 2005, 18(2): 9-10+13.
- [10] 胡亚虎, 魏树和, 周启星, 等. 螯合剂在重金属污染土壤植物修复中的应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(11): 2055-2063.
- [11] 周建利, 郭晓方, 吴启堂, 等. 活化土壤重金属天然植物螯合剂的筛选[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1390-1396.
- [12] 卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1864-1869.
- [13] 佟秀春, 王旭梅, 王红旗, 等. 可降解螯合剂及微生物强化植物吸收重金属的研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(8): 101-107.
- [14] 袁江, 李晔, 许剑臣, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 和植物激素共同诱导植物修复重金属污染土壤研究[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(2): 82-86.
- [15] 张譞, 李晔, 胡进, 等. 三种螯合剂对土壤重金属 Cd 和 Zn 形态变化的研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(21): 6184-6188.
- [16] 陈雨, 祝方. 螯合剂-油菜联合修复对镉污染土壤酶活性的影响[J]. 工业安全与环保, 2015, 41(5): 75-78.
- [17] 韩廿, 黄益宗, 魏祥东, 等. 螯合剂对油葵修复镉砷复合污染土壤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1891-1900.
- [18] Luo, C.L., Shen, Z.G., Lou, L.Q. and Li, X.D. (2006) EDDS and EDTA-Enhanced Phytoextraction of Metals from Artificially Contaminated Soil and Residual Effects of Chelant Compounds. *Environmental Pollution*, **144**, 862-871. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.02.012>
- [19] 王红新, 郭绍义, 胡锋, 等. 螯合剂对铅锌尾矿改良基质上蓖麻幼苗生长和铅锌积累的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 491-498.
- [20] 熊国焕, 潘义宏, 何艳明, 等. 螯合剂对大叶井口边草 Pb,Cd,As 吸收性影响研究[J]. 土壤, 2012, 44(2): 282-289.
- [21] 魏岚, 陈亚华, 钱猛, 等. 可降解螯合剂 EDDS 诱导植物修复重金属污染土壤的潜力[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(2): 33-38.
- [22] 沈斌, 伍钧, 孟晓霞, 等. 柠檬酸对鱼腥草吸收累积铅锌矿区土壤中重金属的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 320-324.
- [23] Greman, H., Vodnik, D., Velikonja-Bolta, S. and Leštan, D. (2003) Ethylenediamine Disuccinate as a New Chelate for Environmentally Safe Enhanced Lead Phytoextraction. *Journal of environmental Quality*, **32**, 500-506. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.5000>