

农田重金属污染植物 - 腐殖质修复研究进展

张兆鑫^{1,2,3,4,5}, 王娜^{1,2,3,4,5*}, 王雪^{1,2,3,4,5}

¹陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

²陕西省土地整治重点实验室, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

⁵陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

收稿日期: 2023年2月5日; 录用日期: 2023年3月3日; 发布日期: 2023年3月14日

摘要

农田重金属污染已成为困扰农田土壤健康的关键问题, 农田土壤重金属污染治理已成为科研、生产和人民生活密切相关的热点问题。本文通过系统梳理近年来国内常用的农田重金属污染修复技术及其实践经验, 并重点阐述了植物-腐殖质修复技术的实施原理、应用效果及未来展望, 为我国农田重金属污染控制工作的发展提供借鉴。发展原位肥力维持性绿色综合修复技术、降低农田重金属的生物有效性、保障农作物正常生长及收获, 是保障我国粮食安全的必备要素。

关键词

农田, 重金属污染, 控制技术, 植物-腐殖质

Research Progress in Remediation of Heavy Metals Contaminated Farmland by Plants-Humus

Zhaoxin Zhang^{1,2,3,4,5}, Na Wang^{1,2,3,4,5*}, Xue Wang^{1,2,3,4,5}

¹Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an Shaanxi

³Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, The Ministry of Natural Resources, Xi'an Shaanxi

⁴Shaanxi Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an Shaanxi

⁵Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

*通讯作者。

Abstract

Heavy metal pollution in farmland has become a key problem troubling the health of farmland soil, and the management of heavy metal pollution in farmland soil has become a hot issue closely related to scientific research, production, and people's life. In this paper, the common farmland heavy metal pollution remediation technologies and their practical experience in recent years are systematically sorted out, while the implementation principle, application effect, and future prospect of plants-humus remediation technology are highlighted, so as to provide references for the development of farmland heavy metal pollution control work in China. The development of in situ fertility maintenance green integrated remediation technology, reducing the biological effectiveness of heavy metals in farmland, and guaranteeing normal crop growth and harvest are essential elements to ensure food security in China.

Keywords

Farmland, Heavy Metal Pollution, Control Technology, Plant-Humus

Copyright © 2023 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

健康的农田土壤是实现联合国可持续发展目标(United Nations Sustainable Development Goals, UNSDGs)的基础。但是, 农田重金属污染已成为困扰农田土壤健康的关键问题。重金属作为土壤环境中一种具有潜在危害的污染物, 通常不能被微生物所降解, 且具有易积累、难挥发、毒性大和隐蔽性强等特点。与国外相比, 国内农田污染程度更为明显。环境保护部与国土资源部 2014 年联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国耕地土壤点位超标率高达 19.4%, 土壤总的超标率为 16.1%。镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)和铅(Pb)这 5 种无机污染物点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%和 1.5%。其中, Cd、Pb 因不能被生物降解、在土壤环境中具有持久性且对人体危害性较强, 尤其令人关注。

在土壤化学组成中重金属对土壤的理化性质影响最大, 当重金属大量累积时会导致土壤性质发生变化, 使土壤肥力下降, 造成农作物产量和质量下降。同时, 农田中重金属极易被农作物吸收, 阻碍农作物生长, 更为严重的会导致重金属在食物链中富集, 最终影响人类的健康。因此, 合理管控农田土壤重金属污染风险、保障粮食安全生产, 是目前研究与应用的 key 问题。我国政府一直高度重视农地土壤环境保护工作, 近期编制完成了相关指南[1], 农田土壤重金属污染治理已成为科研、生产和人民生活密切相关的热点问题。目前而言, 国内外针对重金属污染农田已开展大量研究。但是与国外相比, 由于国内重金属污染农田的修复成本高和二次污染等原因, 很多方法不适合与我国农田重金属污染修复。农田重金属污染土壤修复主要有物理修复、化学修复、生物修复和联合修复等多种技术, 而我国“人口多人均耕地少”的国情导致我国在农田重金属污染修复中应用边安全生产边修复的方式更为合理。本文通过对国内常用的农田重金属污染修复技术进行系统性梳理, 并重点阐述了植物-腐殖质联合修复技术的实施原理、应用效果及未来展望, 为我国农田重金属污染控制工作的发展提供借鉴。

2. 农田重金属污染常用修复技术

农田重金属污染土壤的修复技术多种多样,按照修复目的主要可以划分为两类。第一种是实现土壤中重金属的化学形态发生改变,打破重金属与土壤原有的结合方式,降低其在环境中的移动性与生物有效性,来达到降低污染风险的目的;第二种则以削减重金属总量为目的,利用植物、动物、微生物等的富集效应,实现土壤与重金属的分离,从而减少其在土壤中的总含量。

目前农田土壤中 Cd、Pb 等重金属污染的常规治理方法是改变金属赋存形态降低其生物毒性或通过超富集植物吸收转移从总量上减少土壤中 Cd、Pb 等重金属的含量[2]。在土壤重金属污染风险降低的修复技术中,主要通过引入修复/钝化剂的方法来使修复/钝化剂与土壤中的重金属发生各种反应促使重金属的形态发生转换从而达到降低重金属迁移性的效果。王林等[3]分析了海泡石与磷酸盐配合施用对铅污染土壤的修复效果,结果表明,施用 4%海泡石和 0.5%磷酸盐后, pH 值显著升高,可提取态 Pb 含量降低 47%,土壤内残渣态 Pb 提高 10%,该处理降低了 Pb 的生物有效性和迁移能力。由于生物炭对重金属的吸附固定作用,施加生物炭会通过 Cd、Pb 形成氢氧化物沉淀的方式实现对重金属的去除,降低农作物对重金属的吸收量。但是,目前针对生物炭等外源修复/钝化剂的研究多针对于盆栽试验,在更大尺度的田间验证还比较少,同时也面临生物炭较高的生产成本、存在潜在土壤污染风险等问题。

针对土壤重金属总量的修复技术,如物理换土法、化学电动修复法、土壤原位淋洗修复法等并不适用于农田重金属土壤修复,因此,目前多以具备超积累能力的植物修复为主。其中,修复植物的生物量及其对重金属的富集和转运能力是植物选择的最主要标准。其中,如黑麦草等草本植物由于其生物量大且生长周期短等特点,特别适宜于农田 Cd、Pb 等重金属污染修复。黑麦草与水稻轮作其生物量年均产量可达 1656.6 kg/km²,土壤 Cd 年均去除量大于 9.8 g/km²;在重金属 Cd、Zn 污染的农田中连续 3 年种植菊花,土壤中 Cd 和 Zn 的含量分别下降了 78.1%和 28.4% [4]。但是目前研究表明,受到植物自身生长周期等因素的制约,导致植物修复过程较其他方法更久,如何提升植物修复农田重金属污染的效率是亟待解决的关键问题。综合分析近年来两种方法研究进展发现,添加外源修复/钝化剂会增加土壤环境风险,且植物对重金属选择性强,尤其是适用于 Cd、Pb 复合污染土壤的修复/钝化剂和超积累植物少之又少。

3. 腐殖质 - 植物联合修复技术

综合农田重金属污染修复的常规技术,可以发现这些技术均存在一定的技术缺陷,如无法规模化生产、生产成本较高、成效效果慢等问题。基于此,近年来针对农田重金属污染技术进行了进一步的研究,如多种修复技术相结合的联合修复技术、强化修复技术等。其中,化学诱导 - 植物联合修复技术得到大力推广,多种化学诱导剂如腐殖质等得到了广泛应用。

腐殖质(HS)是自然界中动植物残骸经过复杂的物理、化学及生物等作用之后,所形成的具有不同分子量和大量含氧官能团的大分子有机质合成的非均质深色混合物,广泛分布在自然土壤、水体环境以及沉积物中。腐殖质具有极其复杂的结构,其表面含有丰富的活性基团,对金属离子具有较强的螯合与络合作用,对重金属的生物有效性具有较强的影响,尤其是腐殖质中含有的羧基、羟基、酚羟基、酮基及巯基等,与重金属离子的螯合作用极强,是一种环境友好型的土壤重金属修复剂。腐殖质中提取的胡敏素(HM)对铅污染土壤的修复效果良好,施用 1%、2% HM 钝化 30 d 后,可交换态 Pb 含量从 15.79% 分别降为 1.44%、1.22%。吴烈善等[5]分析比较了腐殖质单施、腐殖质与石灰配合施用、腐殖质与磷肥配合施用对 Pb、Cd、Cu、Zn 污染土壤的修复效果,单施 2%腐殖质对 Pb、Cu、Zn 钝化效率分别为 13.61%、11.18%、1.43%。目前研究较多的是利用 HS 中大分子胡敏素和胡敏酸(HA)钝化重金属,降低重金属的生物可利用性和迁移性,但需要注意的是 HS 中小分子富里酸(FA)可以增加重金属溶出率,促进植物生长[6]。HS 可以为植物生长提供养分,促进植物生长,提升植物对营养物的吸收能力,提高生物量,增加超富集

植物对重金属的吸收量。由于 HS 具备的亲水性和疏水性, 当其疏水性与亲水性的比值增大时, HS 的添加对植物根系发育的促进作用就更明显。研究表明, FA 能促进农作物对重金属的吸收, 同时还促进了重金属从农作物地下部分向地上部分进行迁移。

因此, 在化学强化植物修复中, 可以通过引入腐殖质, 一方面使农田重金属生物有效性降低, 一方面通过腐殖质提升植物根系对重金属吸收能力。针对污染程度不同的农田土壤, 可以考虑以添加不同组成的 HS 来进行修复, 如在重金属污染程度较低的农田土壤修复中, 可以利用 HM 和 HA 的钝化效果来降低重金属活性和减少农作物吸收量; 在采用植物修复时, 添加 FA 含量高的 HS 能有效促进重金属向植物迁移。在植物-腐殖质联合修复技术中, 由于植物选择的多样性, 如何将 HS 与植物特性相结合来确定最佳的工艺参数, 是提升修复成效的关键要素。

4. 结论

针对农田重金属污染常规修复技术, 现有研究在高效且低危害农田重金属污染钝化/修复剂研发、提升植物修复重金属污染效率等方面缺乏系统研究, 需在这些方面取得突破。虽然腐殖质-植物联合修复技术已被证明具备良好的应用前景, 但是最优工艺参数确定、长期应用效果评估等方面依然缺少研究结果进行佐证。总体而言, 发展原位肥力维持性绿色综合修复技术、保障农作物正常生长及收获, 为农田重金属污染土壤治理提供合理的科学依据和理论支撑, 是保障我国粮食安全的必备要素, 这也为轻中度重金属污染土壤持续进行提供了有效途径。

基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目 DJNY2023-31 和 DJNY2022-20。

参考文献

- [1] 农业农村部, 农业生态与资源保护总站. 农用地土壤污染责任认定技术指南(征求意见稿) [EB/OL]. http://www.reca.agri.cn/stxyypx/202112/t20211222_7795593.htm, 2021-12-23.
- [2] 马叶. 雄安涉重企业周边重金属污染农田整合诱导-植物修复技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东师范大学, 2021.
- [3] 王林, 徐应明, 孙国红, 等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 314-320.
- [4] Luo, F., Hu, X., Oh, K., *et al.* (2020) Using Profitable Chrysanthemums for Phytoremediation of Cd- and Zn-Contaminated Soils in the Suburb of Shanghai. *Journal of Soils Sediments*, **20**, 4011-4022. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02735-8>
- [5] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 309-313.
- [6] 胡梦凌, 曾和平, 董达诚, 等. 腐殖质改良植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(3): 273-280.