

农田土壤Cd污染修复技术及效果评价

王 健^{1,2,3,4}

¹陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安

²陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安

³自然资源部退化及未利用土地整治重点实验室, 陕西 西安

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安

收稿日期: 2021年10月13日; 录用日期: 2021年11月15日; 发布日期: 2021年11月22日

摘 要

镉(Cd)作为自然环境中生物毒性最大的元素之一,能够通过食物链的生物富集作用进入人体,引发癌症、基因病变等,影响人体健康。近年来Cd污染修复技术备受关注,农田土壤Cd污染的修复技术及修复效果评价对保障食品安全和促进经济社会发展具有重要意义。本文论述了多种修复技术的作用机制,重点阐释了植物-微生物的协同修复机制,总结了目前发现对Cd具有富集作用的植物和微生物种类,并讨论了未来修复领域的研究方向和研究重点。

关键词

农田土壤, Cd, 植物, 微生物, 土壤修复

Remediation Technology and Effect Evaluation of Cd Pollution in Farmland Soil

Jian Wang^{1,2,3,4}

¹Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

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

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

Received: Oct. 13th, 2021; accepted: Nov. 15th, 2021; published: Nov. 22nd, 2021

Abstract

As one of the most biologically toxic elements in the natural environment, cadmium (Cd) can enter the human body through the bioaccumulation of the food chain, causing cancer, genetic disease, etc., and affecting human health. In recent years, Cd pollution remediation technology has attracted much attention. The remediation technology and evaluation of the remediation effect of Cd pollution in farmland soil are of great significance for ensuring food safety and promoting economic and social development. This article discusses the mechanism of multiple repair technologies, focuses on the plant-microbe collaborative repair mechanism, summarizes the types of plants and microorganisms that are currently found to be Cd-enriched, and discusses future research directions and research priorities in the field of repair.

Keywords

Farmland Soil, Cd, Plant, Microorganism, Soil Remediation

Copyright © 2021 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

土壤是人类赖以生存和发展的资源基础,对农产品质量和人类社会发展起着重要作用。随着工业化的飞速发展,出现了大气和水源污染现象,加之施肥过量等人为因素[1],导致农田土壤 Cd 污染日益严重。2014 年环境保护部联合国土资源部对我国土壤污染状况开展调查,公布的结果显示,我国耕地土壤的点位超标率达到 19.4%,主要为无机型污染物,其中 Cd 污染点位的超标率占 7.0%,是超标率最高的重金属[2][3]。截至目前,国内外学者对农田土壤 Cd 污染修复进行了大量试验研究,提出了多种修复方法和技术,包括原位钝化法、化学淋洗法、电动修复法等,但传统修复方法因其成本高、易产生二次污染、操作复杂、易对土壤结构和养分造成破坏等缺点,不适用于污染范围较大的农田土壤 Cd 污染修复[4]。植物-微生物协同修复技术是目前广泛推广的新型修复技术,具有成本较低、不产生二次污染、易于操作的优点,具有广阔的应用前景。

2. 农田土壤 Cd 来源及污染现状

农田土壤 Cd 污染具有较高的生态毒性,被认为是农田土壤污染中最严重的环境问题之一。我国农田土壤 Cd 污染主要有下列 4 种来源。

2.1. 大气沉降

研究发现大气沉降是农田土壤 Cd 污染的主要来源之一,工业厂区废气和汽车尾气排放是大气沉降的重要来源。吸附在空气悬浮颗粒物上的 Cd,通过大气干湿沉降进入土壤中,在土壤中不断积累富集。这一过程是土壤中 Cd 外源性输入的主要途径,是农田土壤 Cd 的重要外部来源[5]。程珂[6]等人在天津市城郊开展试验研究,结果表明大气沉降及土壤扬尘对蔬菜中的 Cd 含量贡献率高达 33.7%,冬季时大气沉降对土壤 Cd 含量累积的贡献率呈增大趋势。

2.2. 污水灌溉

我国是农业大国, 农业灌溉用水量较大, 为缓解农业用水短缺的问题, 污水灌溉被广泛应用到农业生产中。污水灌溉主要来源于居民生活和工业生产废水, 地表和地下污水灌溉也是造成重金属进入农田土壤的主要来源。近年来采用污水灌溉造成了一系列污染问题, 例如采用工业废水灌溉农用地。工业废水中含有大量的重金属和有机污染物, 对农田土壤产生了较大危害。辛术贞[7]等人调查表明, 我国有 90% 的农田灌溉污水重金属含量超过国家农田污水灌溉水质标准, 其中重金属 Cd 和 Hg 超标最严重。近年来, 农田灌溉污水中的汞含量得到有效控制, 含量逐年降低, 但污水中的 Cd 含量仍较高, 导致农田土壤 Cd 污染。

2.3. 施肥过量

当农田土壤中 Cd 大量输入, 难以向地上和地下迁移转化时, Cd 就会在农田土壤中大量积累。农田土壤中 Cd 的输出方式主要有两个方面, 一方面土壤中的 Cd 以淋溶方式渗入地表水或地下水, 另一方面通过农作物吸收转化输出, 这两种方式都会造成一定程度的生态环境污染, 因此减少农田土壤中 Cd 的输入十分必要。肥料在农业生产过程中广泛使用, 肥料中普遍含有各种重金属元素, 尤其重金属 Cd 含量较高, 会随着耕作时间的延长而不断积累。江南[8]等人研究表明, 典型北方菜田常用肥料中, 重金属 Cd 的综合污染指数达到了 0.53, 存在一定的污染风险。农业生产中过量施用肥料, 会导致重金属在农田土壤中不断积累富集, 长此以往极易导致土壤中重金属含量超标, 威胁农产品质量和人体健康。

2.4. 施用禽畜粪肥

禽畜粪便含多种营养元素及大量有机质, 农业生产中人们常将禽畜粪便作为有机肥料施加到农田土壤中。禽畜进食含有微量重金属的饲料后, 微量重金属通过禽畜体内生理代谢, 转化到禽畜粪便中, 其中的重金属含量往往超出土壤重金属背景值数倍。王玉婷[9]等人通过调查宁波地区不同规模养猪场发现, 不同规模养猪场的猪粪中均含有重金属 Cd。倪润祥[10]等研究显示, 猪粪中的重金属 Cd 含量明显高于其他禽畜粪便。李松岩[11]研究发现, 长期施用含 Cd 的粪肥, 会导致重金属 Cd 在土壤中不断累积, 危害农产品质量安全。选用禽畜粪便制作粪肥施用到农田土壤中时, 应选择重金属含量较低的禽畜粪便类型, 降低农田土壤中重金属的外源输入量。

3. 常见修复技术

3.1. 原位钝化法

原位钝化法是应用较广泛且易于操作的一种修复技术, 该技术通过改变重金属 Cd 的存在形态, 达到降低浓度的管控效果, 此方法并未从根本上除去农田土壤中的 Cd, 需长期跟踪监测土壤环境风险。农田土壤修复过程中常用的钝化剂主要有 3 类: 有机类(农家肥、蚕沙、草炭、鱼骨粉、虾壳生物炭、秸秆等)、无机类(膨润土、褐煤、石灰、粉煤灰、金属氧化物、赤泥陶粒、磷矿粉等)、无机-有机混合类(堆肥、污泥等) [12] [13] [14]。各种钝化剂的钝化作用机制不同, 在实际修复过程中, 应结合农田土壤类型、受污染状况及修复条件综合选择适宜的钝化剂修复 Cd 污染。

3.2. 化学淋洗法

化学淋洗法可以将农田土壤中的重金属 Cd 转移到淋洗剂中, 使土壤中的 Cd 污染得以根除, 保障农业生产的安全性, 被广泛应用到农田土壤修复工程中。目前常用的淋洗剂包括清水、草酸、柠檬酸、乙二胺四乙酸二钠(ethylene diamine tetra acetic acid disodium salt, Na₂EDTA)等。Na₂EDTA 是一种有六个配位原子的螯合剂, 能与金属离子配合生成多个五元环的螯合物, 与重金属 Cd 具有较好的络合能力, 解

吸农田土壤中的重金属 Cd [15]。Na₂EDTA 适用范围广、修复效果稳定，是较为理想的淋洗剂[16]。

3.3. 植物 - 微生物协同修复

植物 - 微生物协同修复是一种绿色环保可持续的修复技术，已成为国内外研究的热点[17]。在自然条件下，植物和土壤微生物存在共生关系，植物的生长能够为土壤微生物提供良好的生存环境和多种生长所需的营养元素。这项修复技术通过组合不同种类的植物和微生物，发挥二者的修复优势，直接或间接地吸收转化农田土壤中的重金属 Cd。修复过程中对土壤环境产生的二次影响较小，但也存在不足之处，例如微生物对重金属 Cd 的耐受能力有限[18]，在 Cd 浓度较高的农田土壤中繁育较困难；植物生长过程中对农田土壤中重金属的吸收转化周期较长，生物量小，吸收富集总量有限，修复效果具有不确定性，不适用于短期快速修复工程。

在植物 - 微生物协同修复农田土壤 Cd 污染的过程中，植物可以直接或者间接地吸收大量土壤中的 Cd，降低农田土壤 Cd 浓度，也可以利用其根系分泌物钝化农田土壤中的 Cd，降低 Cd 的生物毒性。目前研究发现的 Cd 超富集植物主要有籽粒苋、龙葵、藿香蓟、商陆、东南景天、中华景天、紫茉莉、鬼针草、宝山堇菜[19] [20]等。植物对土壤中 Cd 的作用机制主要有以下 2 个方面。

3.3.1. 根系分泌物改变土壤理化性质

植物的生长代谢过程中会分泌一些糖类、蛋白质、有机酸等物质，改善根系土壤环境，例如改变根系土壤氧化还原电位及 pH 值，以络合土壤中部分重金属 Cd，降低其生物活性。徐爱春[21]等人研究表明，pH 值是影响土壤 Cd 迁移转化的主要因素，偏碱性土壤环境中结合态 Cd 含量增加，偏酸性土壤环境中游离态 Cd 含量增加。

3.3.2. 植物细胞壁沉淀作用、区隔化作用吸收迁移 Cd

植物细胞壁是土壤 Cd 进入植物体的一道防线，一方面细胞壁含有大量的多糖和蛋白质，且含有羟基、羧基、醛基等配位基团，与 Cd 配位结合后在细胞内形成沉淀而固定到植物体内；另一方面结合态、游离态 Cd 可以转运到植物体液泡或其他部位，避免损伤植物体内重要的组织[22]。

土壤微生物的修复机制主要有溶解作用、吸附沉淀作用和转化作用[23]，通过这些作用机制来影响 Cd 在农田土壤中的迁移转化过程，缓解其生物毒性。微生物分解植物根系分泌物或土壤有机物及微生物代谢产生的有机酸或酶类物质，可以使重金属 Cd 直接或间接溶解[24]；微生物可以在吸收土壤营养元素时吸收部分 Cd，存储于细胞中[25]；也可以通过其代谢产物吸附沉淀 Cd [26]；微生物通过氧化还原、甲基化作用转化 Cd 形态，降低其生物毒性。

4. 展望

目前已有的土壤 Cd 污染修复技术中，植物 - 微生物协同修复技术具有无二次污染且破坏性较小等优势，是国内外研究土壤 Cd 污染修复的热点。结合实际修复过程，建议未来可以对下列几方面进行深入探索：1) 加强对农田土壤 Cd 污染来源的鉴别及影响因子研究，形成不同类型的农田土壤 Cd 生物有效性调控技术体系；2) 借助杂交育种和基因工程等技术方法筛选适合 Cd 污染土壤的超富集植物；3) 多种修复技术联合应用，结合耕作模式、农作物种类、田间管理措施等探索最优的联合修复机制，指导农业生产。

基金项目

陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2020-13, DJNY2021-25, DJNY2021-26, DJNY2021-34), 陕西地建 - 西安交大土地工程与人居环境技术创新中心开放基金(2021WHZ0087)。

参考文献

- [1] 杨寒雯, 刘方, 刘秀明, 等. 农田土壤镉污染修复技术研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2020, 39(2): 58-63.
- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2014.
- [3] 李婧, 周艳文, 陈森, 等. 我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(24): 104-107.
- [4] Li, X.M., Peng, W.H., Jia, Y.Y., *et al.* (2017) Removal of Cadmium and Zinc from Contaminated Wastewater Using *Rhodobacter sphaeroides*. *Water Science & Technology*, **75**, 2489-2498. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.608>
- [5] Pan, Y. and Wang, Y.S. (2015) Atmospheric Wet and Dry Deposition of Trace Elements at 10 Sites in Northern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14**, 951-972. <https://doi.org/10.5194/acp-15-951-2015>
- [6] 程珂, 杨新萍, 赵方杰, 等. 大气沉降及土壤扬尘对天津城郊蔬菜重金属含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 1837-1845.
- [7] 辛术贞, 李花粉, 苏德纯. 我国污灌污水中重金属含量特征及年代变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2271-2278.
- [8] 江南, 平令文, 季晓慧, 等. 典型北方菜田常用肥料中重金属含量分析及污染风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 521-529.
- [9] 王玉婷, 吕梦园, 韩新燕. 宁波地区不同规模猪场粪便中重金属含量分析[J]. 家畜生态学报, 2016, 166(3): 55-58.
- [10] 倪润祥. 中国农田土壤重金属输入输出平衡和风险评价研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [11] 李松岩. 猪饲料中高剂量的铜锌对环境的影响及其控制[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [12] 徐蒙蒙, 涂春艳, 黄河, 等. 淹水条件下蚕沙复配材料对酸性水稻土中镉铅钝化的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(4): 1182-1189.
- [13] 陶玲, 管天成, 刘瑞珍, 等. 热改性坡缕石对土壤 Cd 污染的钝化修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 782-790.
- [14] 张静静, 赵永芹, 王菲菲, 等. 膨润土、褐煤及其混合添加对铅污染土壤钝化修复效应研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 395-402.
- [15] 李玉双, 胡晓钧, 孙铁珩, 等. 污染土壤淋洗修复技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(3): 596-602.
- [16] 姚振楠, 钮恺之, 李明, 等. 化学淋洗法修复土壤中 Cd、Pb、As 的工程研究[J]. 广东化工, 2021, 48(12): 154-156.
- [17] 卢晋晶, 郗春花, 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.
- [18] 卢楠. 丛枝菌根真菌-玉米联合修复 Cd、Pb 复合污染土壤技术应用探讨[J]. 南方农业, 2020, 14(10): 37-40.
- [19] 韩少华, 黄沈发, 唐浩, 等. 3 种植物对 Cd 污染农田土壤的修复效果比较试验研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(12): 22-25, 30.
- [20] 宋波, 张云霞, 田美玲, 等. 应用籽粒苋修复镉污染农田土壤的潜力[J]. 环境工程学报, 2019, 13(7): 1711-1719.
- [21] 徐爱春, 陈益泰. 镉污染土壤根际环境的调节与植物修复研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2007(2): 1-6.
- [22] 梅娟, 李华, 郭翠花. Cd 超富集植物修复污染土壤的研究进展[J]. 能源与节能, 2013(2): 80-82.
- [23] 常海伟, 刘代欢, 贺前锋. 重金属污染农田微生物修复机理研究进展[J]. 微生物学杂志, 2018, 38(2): 120-127.
- [24] 郭学军, 黄巧云, 赵振华, 等. 微生物对土壤环境中重金属活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 105-110.
- [25] 樊霆. 真菌对重金属的抗性机制和富集特性研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [26] 刘磊, 宋文成. 微生物吸附重金属离子机理研究进展[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(5): 15-17.