

doi: 10.12029/gc20240320002

杜俊, 鲁先科, 蔡奎, 闫丽娜, 栾文楼, 宋泽峰, 赵志瑞, 栾卓然, 阎秀兰, 杨潇. 2025. 土壤、植物中镉污染与治理技术研究现状与展望[J]. 中国地质, 52(1): 131-158.

Du Jun, Lu Xianke, Cai Kui, Yan Lina, Luan Wenlou, Song Zefeng, Zhao Zhirui, Luan Zhuoran, Yan Xiulan, Yang Xiao. 2025. Cadmium pollution in soil and plant system and its remediation technology: Status and prospects[J]. Geology in China, 52(1): 131-158(in Chinese with English abstract).

土壤、植物中镉污染与治理技术研究现状与展望

杜俊^{1,2}, 鲁先科¹, 蔡奎¹, 闫丽娜¹, 栾文楼¹, 宋泽峰¹, 赵志瑞¹, 栾卓然¹,
阎秀兰³, 杨潇³

(1. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北 石家庄 050031; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:【研究目的】土壤镉污染已经成为国内外关注的重要环境问题。本文聚焦土壤、植物中镉污染与治理技术的研究现状与发展方向, 试图为镉污染与治理技术的理论研究和生产实践提供帮助。【研究方法】通过查阅大量土壤、植物中镉污染与治理技术的相关文献, 对镉的危害、土壤镉污染现状、镉对植物的影响机制、镉在土壤-植物系统中的迁移转化机理以及土壤镉污染治理修复技术等进行了系统介绍和客观评述。【研究结果】中国土壤镉污染呈现出多元化发展的趋势, 耕地、林地、草地、园地以及未利用地都存在镉污染, 尤其耕地是镉污染的重灾区; 镉对植物生长发育、抗氧化酶活性、光合作用和呼吸作用均有显著影响; 镉从土壤向植物系统的迁移主要以镉离子和络合物形式, 与界面过程有关, 另外需要借助载体和通道实现; 土壤镉污染治理技术可以分为化学类和生物类, 主要包括生物炭、矿物材料、有机肥料、微生物、植物、动物以及联合修复技术。【结论】镉具有较大的危害性, 镉污染仍然是中国农田土壤面临的严重问题, 镉对植物的影响以及在土壤植物系统中的迁移转化涉及多个机制, 镉污染治理技术有其各自的原理和优势, 联合修复技术在农田土壤镉污染治理方面具有较好的发展前景。土壤、植物中镉污染与治理技术仍须在理论研究和技术研发上持续发力, 方能构建行之有效的镉污染防控技术体系, 以确保粮食的安全生产。

关键词: 土壤; 植物; 镉污染; 迁移转化; 治理修复技术; 农业地质调查工程

创新点: (1) 综述了中国土壤镉污染的现状及特点, 对镉污染防治具有一定帮助; (2) 阐述了镉污染对植物的影响, 总结了镉在土壤-植物系统中的迁移转化机理, 对研究土壤-植物系统中镉的环境归宿具有理论参考价值; (3) 系统介绍了土壤镉污染的治理修复技术, 并逐一进行了客观评述, 据此提出具有发展前景的治理技术和建议, 有助于提高土壤镉污染治理的水平。

中图分类号: X53; X173 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)01-0131-28

Cadmium pollution in soil and plant system and its remediation technology: Status and prospects

DU Jun^{1,2}, LU Xianke¹, CAI Kui¹, YAN Lina¹, LUAN Wenlou¹, SONG Zefeng¹,
ZHAO Zhirui¹, LUAN Zhuoran¹, YAN Xiulan³, YANG Xiao³

收稿日期: 2024-03-20; 改回日期: 2024-03-23

基金项目: 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U21A2023)资助。

作者简介: 杜俊, 男, 1983 年生, 工程师, 主要从事环境地球化学、实验地球化学相关教学与研究; E-mail: 250704106@qq.com。

通信作者: 栾文楼, 男, 1958 年生, 教授, 主要从事矿物学、环境地球化学研究; E-mail: 942118577@qq.com。

(1. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 3. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: This paper is the result of agricultural geological survey engineering.

[Objective] Cadmium pollution in soil has become an important environmental issue concerned both at home and abroad. This paper focuses on the research status and development direction of cadmium pollution in soil and plants and the remediation technology, and tries to provide help for the related theoretical research and production practice. **[Methods]** Based on consulting a large number of literature related to cadmium pollution in soil and plants and the remediation technology, the harm of cadmium, the current situation of cadmium pollution in soil, the influence mechanism of cadmium on plants, the mechanism of migration and transformation of cadmium from soil to the plant system and the remediation technology have been systematically introduced and objectively reviewed. **[Results]** Soil cadmium pollution in China shows a trend of diversified development, Cadmium pollution has been found in cultivated land, woodland, grassland, in both gardens and unused land, especially in cultivated land. Cadmium has a significant impact on plant growth and development, antioxidant enzyme activity, photosynthesis and respiration. The migration of cadmium from soil to plant systems is mainly in the form of cadmium ions and clathrate, related to the interface process, in virtue of the carrier and channel to achieve. The remediation technology can be divided into chemical and biological categories, mainly includes biochar, mineral materials, organic fertilizers, microorganisms, plants, animals and combined restoration technology. **[Conclusions]** Cadmium has great harmfulness and the cadmium pollution is still a serious problem for farmland soil in China. The effects on plants and migration and transformation of cadmium in soil plant systems involve multiple mechanisms. Kinds of the remediation technology for cadmium pollution in farmland soil has its own principles and advantages, and the joint remediation technology has a good development prospect. Continuous efforts in theoretical and practical research must be made on cadmium pollution in soil and plants and the remediation technology, to build an effective cadmium pollution prevention and control technology system to ensure the safe production of food.

Key words: soil; plants; cadmium pollution; migration and transformation; remediation technology; agricultural geological survey engineering

Highlights: (1) The current situation and characteristics of soil cadmium pollution in China was summarized, which contributes to the prevention and control of cadmium pollution. (2) The effect of cadmium pollution on plants was expounded, the mechanism of cadmium migration and transformation in soil-plant system was summarized, which has theoretical reference value for studying the environmental convergence of cadmium in soil-plant system. (3) The remediation technologies for soil Cd pollution were systematically sorted out, and suggestions for promising remediation technologies were put forward, hoping to improve the treatment level of soil Cd pollution in the future.

About the first author: DU Jun, male, born in 1983, engineer, mainly engaged in teaching and research on environmental geochemistry and experimental geochemistry; E-mail: 250704106@qq.com.

About the corresponding author: LUAN Wenlou, male, born in 1958, professor, mainly engaged in research on mineralogy and environmental geochemistry; E-mail: 942118577@qq.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China Regional Innovation and Development Joint Fund (No.U21A2023).

1 引 言

镉(Cd)是广泛存在于自然环境中的极具毒性的重金属元素,具有半衰期长、环境迁移性强、生物易吸收且不可逆的特点。环境中的镉会使土壤、水体遭受污染和损害,并对土壤和水体中的微生物和

动植物等造成严重危害(Clemens et al., 2013)。镉对土壤的危害主要体现在破坏土壤微生态和降低土壤质量。一方面,镉会影响土壤原著微生物的群落结构、数量、新陈代谢等(王杏等, 2023);另一方面,镉在土壤中的积累会改变土壤的组成、结构和功能,导致土壤质量退化,也会通过抑制植物根系

生长和光合作用,从而抑制农作物生长,导致农产品产量和质量降低(牟婷婷等, 2022; 黄柯依等, 2023)。相较于土壤,镉通过水体对生物的影响更为直接。当地表水镉含量超过 0.1 mg/L,就会轻度抑制水的自净作用,加重水质恶化(曹瑞芹等, 2024);达到一定浓度时(如淡水鱼类和甲壳类的生物毒性阈值 75.81 $\mu\text{g/L}$ 和 10.98 $\mu\text{g/L}$,孔祥臻等, 2011),水体生物会产生慢性中毒效应,生长被抑制,活动能力降低,诱发疾病甚至死亡,长期也会导致遗传突变或变异,进而产生物种多样性及生存方面的改变(熊捷迁等, 2021; 曹瑞芹等, 2024)。人类或动物如果摄入镉污染水,会有致癌等长期健康风险。镉不是植物生长所必需的元素,当植物体内镉浓度超过一定阈值(1.0 mg/kg),往往会通过阻碍植物根系生长、抑制水分和养分的吸收等引起一系列生理代谢紊乱,如蛋白质、糖和叶绿素的合成受阻,光合强度下降和酶活性改变等,使植物表现出叶色减退、植物矮化、物候期延迟等症状,最终导致作物品质下降和减产(李婧等, 2015; 王赛怡等, 2023),当镉含量达到 5~10 mg/g 时,甚至导致植物死亡(熊敏先等, 2021)。镉在人体内极易蓄积,对人体健康具有生殖发育毒性、神经毒性、致癌性等多种严重毒害性。镉侵入人体的主要途径是呼吸道和消化道。在人体内,镉主要蓄积在肾脏和骨骼组织中,造成肾脏功能损害,并增加癌症、畸形、肺功能不全、心血管疾病和骨质疏松等疾病的风险(曹瑞芹等, 2024)。国际癌症研究机构将镉列为 I 类致癌物(Joseph, 2009; 马娇阳等, 2021)。

镉污染已经严重威胁到生态系统的稳定和人类生命的安全,成为国内外普遍关注的环境问题。本文在查阅大量文献资料的基础上,系统地综述了国内土壤镉污染现状,镉污染对植物的影响机制,镉在土壤-植物系统中迁移转化的机理,土壤镉污染治理修复技术的研究进展,并在此基础上探讨了存在的问题,展望了未来镉污染治理技术的发展趋势,以期为土壤、植物镉污染与治理技术的理论研究和生产实践提供帮助。

2 土壤镉污染现状

近 20 年来,中国土壤镉污染呈现分布面积广、污染强度高的特点。2014 年环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显

示,土壤镉污染物点位超标率达 7.0%,位居各种无机/有机污染物之首。生态环境部发布的 2019—2021 年中国生态环境状况公报均提出重金属是影响农用地土壤环境质量的主要污染物,而镉是首要污染物。Wang et al.(2023a)收集了中国 2000—2021 年农业用地土壤镉含量数据,总结了中国农业用地土壤镉污染状况(图 1)。中国镉污染整体呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势,南方镉污染重于北方(李铨等, 2015; 刘红梅等, 2018)。土壤镉超标范围酸性土壤要大于碱性土壤,主要分布区域在西南、华南地区,尤其集中于工业化和城镇化发展密集的长江三角洲、珠江三角洲、成都平原等区域(骆永明和滕应, 2018; Wang et al., 2023a),以及长江流域,中南和西南喀斯特等高地地质背景镉污染地区(刘意章等, 2019; 秦冉等, 2021)。土壤镉污染处于轻度和中度污染程度的分别占 15.12%、10.98%,重度污染程度的占 15.16%(图 1)。

遭受镉污染的土地类型趋向多样化。由于工业“三废”的排放以及农药化肥的过度使用,城镇周边菜地的镉污染情况极其严重。刘伟等(2019)调查了北京市顺义区不同农业土地利用类型的镉含量,因为菜地利用率极高,常年摄入较多的化肥、农药导致镉的输入比其他土地利用类型更高,因而镉含量整体上呈现菜地>设施农业用地>果园>林地的趋势。田稳等(2022)调查了中国西南典型蔬菜种植区土壤中重金属的污染特征,镉平均含量不但超出了云南省土壤背景值,并且镉的生物可给性(35.31%)各类重金属中最高。卢维宏等(2022)对全国 8 个省的设施蔬菜产区土壤重金属的分析结果表明,随着栽培年限的延长,土壤中镉的全量和有效态浓度呈明显的累积趋势。茶园、果园等土壤镉污染情况也同样突出。董立宽和方斌(2017)、孙境蔚等(2020)的研究表明茶园土壤中镉的生物有效性、变异性比其他重金属更强,更容易发生迁移。唐结明等(2012)对广州市万亩果园重金属调查显示,镉污染是各类重金属污染中最为严重的。除农用地外,林地、草地以及未利用地也都存在不同程度的镉污染(李婧等, 2015)。依据污染程度,不同土地利用条件下镉的单因子污染指数,大致呈现菜地>果园>农田>林地>草地(张汪寿等, 2010)。

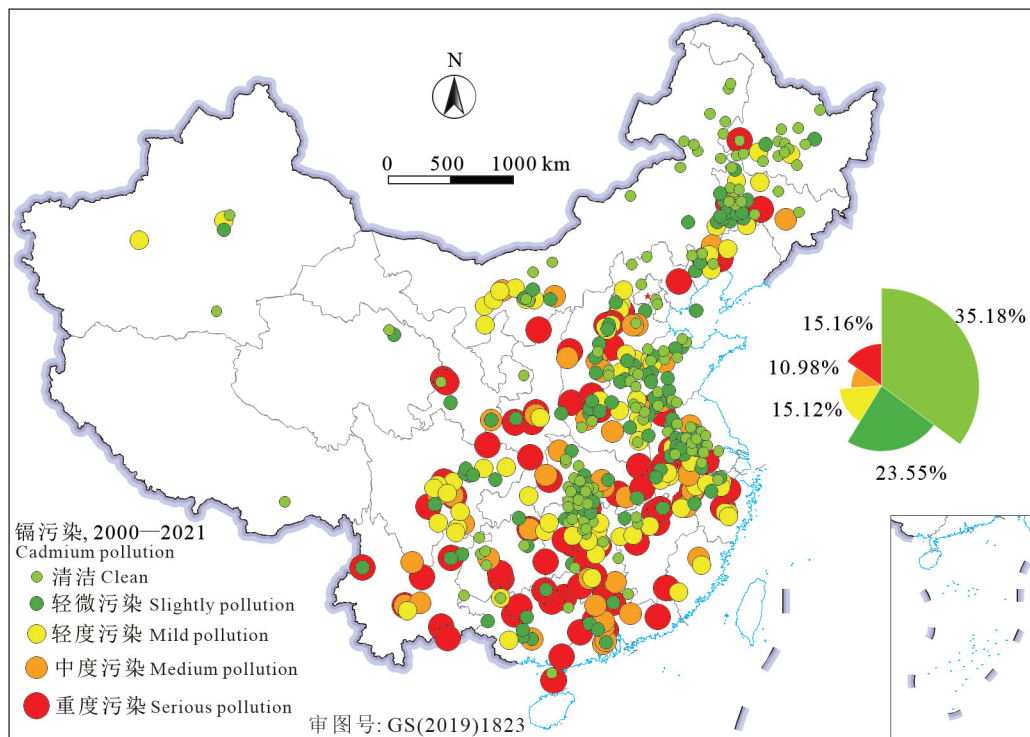


图1 中国农业用地土壤镉污染分布图(据 Wang et al., 2023a 修改)

Fig.1 Distribution of cadmium pollution in the soil in China (modified from Wang et al., 2023a)

镉污染趋向城镇化的势头明显。随着城市化与工业化的快速发展,沿河湖岸边生活污水、工业废水、有色金属冶炼的大量排放导致了镉在水体湿地和城市绿地的严重积累和污染。水体湿地,如珠江口滨海湿地镉平均含量 2.8 mg/kg(马玉等, 2011),洞庭湖湿地镉平均含量 3.7 mg/kg(董萌等, 2011),以及白洋淀湿地镉平均含量 9.97 mg/kg(韩娟等, 2016)。城市绿地,如上海滨江森林公园镉平均含量 0.323 mg/kg(周菁等, 2014),天津市中心城区绿地 0.33 mg/kg(王美艳等, 2020),哈尔滨市市区绿地土壤 0.725 mg/kg(卢德亮等, 2012),保定市城市森林绿地 0.610 mg/kg(赵卓亚等, 2009),均高于上述各地的土壤背景值。

3 镉对植物的影响

3.1 植物对镉的吸收

植物对镉的吸收相较其他重金属更容易(Wang et al., 2022a)。植物对镉的吸收依赖于土壤中镉的浓度和(或)有效态镉的浓度,并受有机物含量、pH、氧化还原电位(Eh)、温度、其他元素含量等影响。植物对镉的吸收还与运输营养元素(Mg、K、

Ca、Fe、Mn、Cu、Ni)的跨膜载体有关。

不同植物对镉的吸收、分配和积累效应不同。镉在同种植物的不同器官中积累也有一定差异。镉在禾本科植株体内的分布,一般是根>茎>叶>籽实。例如,镉在水稻各部位的含量大致表现为根系>茎叶>稻壳>糙米(唐非等, 2013);在小麦植株中的分布表现为根>茎>叶>麦麸>籽粒(Salah and Barrington, 2006)。在多数植物体内,镉主要集中在根部。如 Bezel et al.(1998)发现豆科植物在吸收镉后会将大部镉分保留在根部,只将极少量镉(约 2%)运送到地上部分,在结实阶段会略有增高(约 8%)。小麦对镉的吸收和分配主要由根部特性决定,不同品种之间其根部吸收镉的能力差异很大(Zhang et al., 2000)。双子叶植物一般将吸收的镉储存在生命活动旺盛的部位,因此叶和根部镉含量较高,而块根、果实、叶球等的镉含量最低。然而,镉超积累植物的地上部镉含量往往都会大于根部,如矿山生态型东南景天植株各部分镉含量的次序为:叶>茎>根(黄冬芬, 2008)。植物对镉的积累因种类不同而差异很大。根据植物体内积累镉的多少,可以将植物分为 3 类:低积累型、中积累型和高积累型,其中低

积累型如豆科植物,中积累型如禾本科、百合科及葫芦科植物等,高积累型如十字花科、茄科及菊科植物等(Arthur et al., 2000)。

3.2 镉对植物生长的影响

镉对植株生长发育具有一定剂量效应,即在一定浓度范围内,低浓度镉对某些植物生长有一定的刺激作用,当浓度升高,植物的生长发育则明显被抑制。于方明等(2012)认为叶片中镉的含量随生长时期的延长而增加,且低质量分数镉(<30 mg/kg)有利于水稻的生长。任继凯等(1982)研究发现,土壤镉浓度在 300 mg/kg 时,水稻在拔节期以前生长虽然受到阻碍,由于抗性逐渐产生,在抽穗期生长高度相近。过量的镉能够明显抑制叶片光合速率,当 Cd^{2+} 升高时,抑制程度增强(徐红霞等, 2005)。同时,镉可以破坏光合色素,抑制 RuBP 羧化酶活性,影响碳固定和 PS II 活力,诱导细胞膜脂过氧化作用(黄玉山等, 1997)。受镉污染的水稻和小麦在形态上均表现为根茎生长迟缓和叶片失绿、卷曲,叶片干重下降,苗鲜重降低,籽实产量受到严重影响(王琴儿等, 2007)。

种子是植物最先与土壤或水中镉接触的器官,种子萌发也是最早感知镉污染的阶段,受到生长环境中镉浓度的影响,一般来说,低镉浓度不影响或可促进种子萌发,高浓度镉对种子萌发有较强的抑制作用。镉胁迫可以抑制种子有氧呼吸,加上由于镉离子可能会阻碍氧分子向胚细胞内部的扩散,从而使胚根细胞缺氧,根生长受阻,出现只长弱芽、不长根的现象。施农农和陈志伟(1999)通过水培试验发现,镉胁迫会抑制淀粉酶(Amy)和酸性磷酸酯酶(Acp)活力,影响种子萌芽,当镉浓度达到 0.5 mmol/L,水稻种子萌芽受到抑制,当镉浓度达到 5 mmol/L,水稻种子完全失活致死。在萌芽期,不同品种的小麦种子对镉的响应存在较大差异, α 淀粉酶活性会随之降低(何俊瑜等, 2009)或呈现先升高后降低的变化趋势(汪瑾等, 2008)。随着镉浓度升高,种子发芽率、发芽势、芽生长逐渐降低,一般镉浓度大于 0.5 mmol/L 时严重抑制小麦种子萌发,幼根和幼芽的长度逐渐变短,芽重和根重明显下降,活力指数显著降低(张利红等, 2005)。Liu et al.(2007)发现,镉对小麦种子发芽的抑制明显弱于对小麦根伸长的抑制,但对不同品种小麦种子萌发和幼苗生长的

抑制程度也不同。闫华晓等(2007)发现,在低浓度下,镉对玉米种子萌发及幼苗生长具有激活效应,而在高浓度下,镉对幼苗根长具有极显著的抑制效应。另外也有不同观点,如刘文胜等(2010)发现,当浓度低于 2.0 mg/L 时,镉对两个玉米品种种子萌发均有一定的抑制作用。当浓度在 2.0~20.0 mg/L 时,镉可以促进两个玉米品种种子的萌发,提高其发芽势和发芽率;当浓度与 2.0~20.0 mg/L 时,镉浓度与玉米胚芽长度、胚根长度均成负相关。

植物根的生长会因镉而受阻,根系的长度、生物量、体积和根系活力都会受镉影响,将直接导致整个植物生长受到极大的影响。秦天才等(1997)水培试验发现,镉浓度超过 0.1 mg/L 时,小白菜侧根数目减少,根系生物量和体积下降,根系生长发育受阻。Wang et al.(2023b)试验发现,在低浓度镉(<5 mg/L)作用下,随镉浓度的升高,小麦根系的长度、生物量体积相应地升高;当高于相应镉浓度时,随着镉浓度的增加,小麦总根长、总根表面积和总根体积均呈下降趋势。超微结构研究表明,随着镉浓度胁迫的增加,小麦根尖细胞的变形更严重,且核膜下沉程度较大,导致镉对小麦根尖细胞的毒性作用增强。

3.3 镉对植物抗氧化酶活性的影响

植物抗氧化酶包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT),是植物适应多种逆境胁迫的重要酶类。通常酶活性高于某一阈值时,对植物起到较好的保护作用。在受到镉污染后,植物的 SOD、POD、CAT 三种酶活性会发生相应变化。在一定的镉浓度范围内,3 种酶活性得以维持或提高;镉浓度超过这个范围范时,3 种酶的活性下降,可能失去保护作用(洪仁远等, 1991)。有研究表明,当镉含量逐渐升高时,3 种酶的活性是先升高后下降。例如,镉胁迫对小麦抗氧化保护酶类的影响主要表现为在较低镉浓度时酶活性增加,但当细胞内的镉使这种防御体系达到饱和后,在细胞中游离的镉就会通过不同的途径干扰和破坏细胞的正常代谢过程,最终导致小麦生长异常直至死亡(贾夏等, 2011)。

然而,也有研究发现不同生长期的酶活性表现不同。闫华晓等(2007)发现镉对玉米幼苗 POD 具有激活效应,且随镉浓度的增加激活效应逐渐增

强。于方明等(2012)提出镉会引起水稻抗氧化酶的变化,特别是在分蘖期镉对 SOD、POD 和 CAT 活性的影响比在孕穗期和抽穗期更加显著。陈宏等(2000)研究发现,随着镉浓度的增加,小麦幼苗的叶片和根系中的 POD 活性明显升高, SOD 活性也有所提高。

3.4 镉对植物光合作用和呼吸作用的影响

镉能够抑制植物的光合作用(Anderson et al., 1997)。受镉胁迫后,植物主要表现为光合作用减弱,叶片气孔阻力增加,高浓度镉胁迫还会引起气孔关闭、叶片失绿、变薄、变白等(慈敦伟等, 2005)。植物(如玉米、大豆、黄瓜、小白菜、龙葵和苜蓿等)叶片中叶绿素含量,会随着镉浓度增加而有不同程度下降,以大豆最为敏感(秦天才等, 1997; 简敏菲等, 2015; 刘柿良等, 2015)。镉导致叶绿素含量下降的原因:一方面可能是镉抑制了叶绿素合成所需要的酶(Assche and Clijster, 1990);另一方面可能是镉通过拮抗作用,干扰植物对 Mn、Zn、Mg 等元素的吸收、迁移,阻断营养元素向叶部输送,降低叶绿素的合成能力(Anderson et al., 1997)。其他研究也发现,镉胁迫下植物体内形成超量的氧自由基,引起植物根系活力下降,叶绿素含量降低,进而直接影响植物的光合作用(王慧忠和何翠屏, 2002)。

镉胁迫也会影响与呼吸相关酶的活性,造成作物体内碳水化合物的代谢紊乱,从而影响呼吸作用(黄冬芬, 2008)。马丽娟等(2007)的试验表明镉胁迫可改变呼吸作用关键酶(如琥珀酸脱氢酶(SDH)、细胞色素氧化酶(COD)、苹果酸脱氢酶(MDH)、异柠檬酸脱氢酶(IDH)同工酶等)的活性或同工酶表达。在镉胁迫下随镉浓度升高,小麦幼苗的根和芽的呼吸速率呈先上升后下降的趋势。

3.5 植物对镉的耐性机制

植物为了避免或减轻来自镉的毒害,在生长发育过程中逐渐产生了耐性机制,主要包括限制镉的吸收和转运、区域化作用、螯合作用及保护酶活性的作用等(洪仁远等, 1991; 杨居荣和黄翌, 1994; Seregin et al., 2004)。镉到达植物根系后主要累积在根系的外部组织(如皮层细胞)中,由于内皮层凯氏带的阻挡,镉很难被运输到中柱及维管组织(Seregin et al., 2004)。植物通过限制对镉的吸收,能有效降低体内镉含量(邵云等, 2006)。杨居荣等

(1995)发现,镉在耐镉性强的小麦、玉米品种中的积累量较少,而在耐性较差的品种中积累量较多。镉在进入根后,首先被根细胞的细胞壁及碳水化合物固定而束缚于果胶位点处;镉进入液泡后,被限制在一个固定区域,不能在胞质溶胶中自由迁移。区域化作用在植物限制和排除镉污染中至关重要。植物细胞质和液泡内富含小分子物质(如谷胱甘肽(GSH)、草酸、组氨酸、柠檬酸盐、磷酸等),可以与镉形成螯合物或沉淀,避免镉与细胞器接触,从而降低或解除镉的毒性(杨居荣和黄翌, 1994)。

镉对不同种类植物的影响,在症状上存在较大差异(施农农和陈志伟, 1999; 闫华晓等, 2007)。如水稻、小麦根系和籽极易积累镉,但玉米则能够耐受一定水平的镉而没有任何中毒症状,并且可以在镉污染的土壤上种植。玉米的镉耐受性也显示出,植物对镉污染的也有相应的响应机制(安婷婷等, 2021)。

4 镉在土壤-植物系统中的迁移转化机理

4.1 镉在土壤中的种类及生物有效态

镉在土壤中主要与土壤固相结合,通常也会被快速释放到土壤溶液中,成为可供植物吸收的部分。在土壤溶液中,镉可以有多种阴离子($\text{Cd}(\text{HS})_4^{2-}$ 、 $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ 、 $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$ 、 CdCl_3^- 、 CdCl_4^{2-})和阳离子种类(CdHS^+ 、 CdOH^+ 、 CdHCO_3^+ 、 CdCl^+)。在土壤溶液中 55%~99% 的镉是自由离子的形式。另外,游离态的 Cd^{2+} 还会与可溶的腐殖质以及有机酸等分子结合形成阴离子配体(Ren et al., 2015)。CdS、 CdCO_3 及胶体吸附态镉等都是非水溶性镉。在土壤固相中,镉可以通过表面络合与土壤微粒如黏土矿物、有机物或铁锰氧化物结合,形成带电的络合物(Gu and Evans, 2008),并且这种结合是可逆的;镉也能够形成碳酸盐或磷酸盐沉淀。土壤溶液中游离水合离子态的镉浓度与溶解的镉络合物和吸附在土壤固相上的镉处于平衡状态(图 2, Sterckeman and Thomine, 2020)。

土壤中镉的生物有效态取决于镉在土壤中的化学种类和分布,通常包括了土壤中的水溶态镉和离子交换态镉。水溶态镉是植物吸收的直接来源,有效性最高;离子交换态镉所占比例大,活性也较高,对植物镉吸收起决定作用(陈媛, 2007)。土壤有

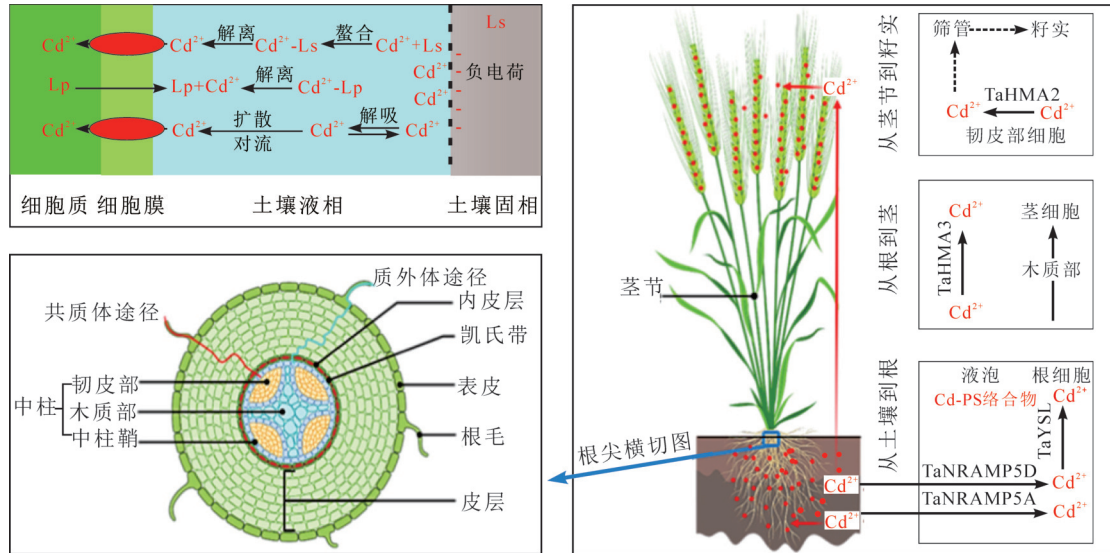


图 2 镉在土壤-植物系统中迁移转化示意图(Sterckeman and Thomine, 2020; Li et al., 2023b)

Fig.2 Schematic map of cadmium migration and transformation in a soil-plant system (after Sterckeman and Thomine, 2020; Li et al., 2023b)

效态镉与其他各形态镉处于动态平衡中。镉的种类、生物有效态以及在液相和固相中的配分很大程度上依赖土壤 pH, 镉的有效态含量与土壤 pH 呈负相关。研究表明当土壤 pH 介于 4.0~4.5 时, pH 降低 0.2 个单位, 有效态镉的含量会增加 3~5 倍。另外, 当 pH 降低时镉的解吸附也会显著增加, 而具有较高 pH 的土壤也会降低镉的生物有效性。植物吸收镉主要通过根与土壤孔隙水接触发生, 是镉在土壤固相和液体相之间配分的结果(Loganathan et al., 2012)。土壤中镉的化学形式和配分主要受沉淀/溶解、吸附/解吸附和 Cd-配体络合物生成反应控制, 这些动态过程又受氧化还原条件变化、离子交换容量、土壤 pH、土壤结构、生物和微生物条件、金属载荷、有机/无机配体、竞争性阳离子和温度的影响(Khan et al., 2021; Yuan et al., 2021)。

4.2 镉从土壤向植物系统的迁移

镉从土壤向植物系统的迁移需要通过根来完成, 它首先会被吸附在植物根上。研究表明被植物根吸附的镉主要是以 Cd^{2+} 的形式, 镉的络合物或螯合物对根吸收也有贡献(如 Cd-EDTA 、 CdCl_n^{2-n} 、 CdSO_4 等)(Liu et al., 2017; Dong et al., 2020; Sterckeman and Thomine, 2020)。植物根尖负责从土壤中接收 Cd^{2+} , 根尖成熟区的根毛是吸收 Cd^{2+} 最活跃的部位。 Cd^{2+} 从土壤进入植物根大致有 3 种方

式: (1) Cd^{2+} 会经由一些必需元素, 如 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mg^{2+} 等, 从根际土壤迁移至根细胞采用的离子交换通道, 从而进入植物细胞(Qin et al., 2020)。根际的高浓度 Cd^{2+} 会在根尖外围形成一个电化学梯度, 促进 Cd^{2+} 穿过离子通道后, 与载体蛋白结合通过共质体途径进入根的表皮层; (2) Cd^{2+} 与 H^+ 发生交换, 然后通过质外体途径进入根的表皮层。在根表皮细胞的细胞质膜中有大量碳酸, 碳酸通常会分解成 H^+ 和 HCO_3^- , 分解的 H^+ 与吸附在根表皮细胞表面的 Cd^{2+} 很容易交换, 从而使 Cd^{2+} 能够通过质外体途径进入根的表皮层; (3) Cd^{2+} 能够通过与小分子有机化合物形成螯合物的形式, 并在载体蛋白的帮助下进入到根的表皮层。植物根通常会分泌大量小分子化合物, 如甘露糖酸等, 可以通过与 Cd^{2+} 螯合的形式, 增加根际镉离子的生物有效性。 Cd^{2+} 在进入细胞质后, 部分 Cd^{2+} 会与植物肽螯合形成不具毒性的螯合物。镉在植物体内短距离运移主要有质外体和共质体两种途径(Li et al., 2023a), 前者是镉沿着植物细胞的细胞壁在细胞之间的空隙中活动, 后者是镉通过胞间连丝穿过细胞运移(图 2)。镉从土壤进入植物根细胞以及此后在植物体内的迁移往往需要借助载体蛋白实现。这些载体包括 ZIP 族(锌铁载体)、NRAMP 族(自然抗性相关的巨噬细胞蛋白)、YSL 族(黄条纹蛋白, 一种寡肽载体)

等(Lux et al., 2011)。迄今为止,镉的专属载体尚未被识别。根细胞吸收的镉在重新分布后,一部分继续向木质部迁移;另有一部分会通过植物螯合、液泡扣留、细胞壁扣留等滞留在根细胞中(Qi et al., 2020);还有一些镉被细胞排出,进入到细胞之间的空隙中(图 2)。

向木质部迁移的镉会进入到木质部汁液中。在木质部汁液中镉以自由离子或者以巯基(SH)、N 基或 O 基的络合物形式存在,也可以与含有巯基丙氨酸的分子结合,如谷胱甘肽、植物螯合肽、有机酸、氨基酸等。这些络合物以及游离态的 Cd^{2+} 在蒸腾作用的驱动下随木质部汁液一起流动,进入到植物的地上部分。在经历长距离迁移后,汁液中的矿物离子包括镉被从木质部导管中卸载,重新分布到叶片组织中。韧皮部负责将镉进一步分配给果实和种子。在韧皮部的汁液中,有大量的植物螯合肽和谷胱甘肽,可与镉形成络合物,同时也作为镉长距离迁移的载体(Chen et al., 2023)。研究表明镉在进入到果实和种子后可能主要以硫酸盐配合物的形式存在,如 Gu et al. (2020) 利用同步加速器技术揭示稻粒中镉主要以 Cd-硫酸盐配合物的形式存在(66%~92%),其余为 Cd-羧基化合物和 Cd-组氨酸。

镉在土壤-植物系统中的迁移转化是一个复杂而关键的过程,深入研究有助于揭示蕴含的机理和影响因素,指导镉污染治理技术的研发和受污染土壤的修复工作,如研发新型钝化材料、培育耐镉农作物品种(沈一尘等, 2023)等。然而,目前关于镉在土壤-植物系统中迁移转化的研究还存在不足,如土壤-植物根际涉及的各种微观界面(如水土界面、根土界面等)过程的研究尚不够深入(任静华等, 2023),特别是在加入各种土壤修复材料以后,重金属在各个界面的迁移转化行为和机制等。

5 镉污染土壤治理修复技术

目前,镉污染土壤(主要是农田)的治理修复技术大致可以分为物理类、化学类、生物类和联合修复技术(图 3)。物理类修复包括客土法、换土法、深耕翻土法,技术原理相对简单,修复效率相对较高,但修复成本也较高,适用范围有限。化学类和生物类技术原理复杂,适用条件苛刻,但选用适当可取得理想的修复效果,尤其适用于大面积、中低

污染程度的农田土壤修复(崔俊义等, 2017; 杨梦丽, 2019)。化学类修复技术是通过添加有机或无机钝化材料或其他有效化学试剂到土壤中,使土壤中的生物有效态镉含量降低,从而达到土壤修复的目的(宋玉婷和雷泞菲, 2018; 王宏鹏, 2020)。化学类修复技术包括生物炭修复、有机肥料修复、矿物材料修复等技术。生物类修复技术是通过利用超积累镉的植物从土壤中提取镉,或者利用微生物或动物使土壤中游离态的镉发生固化(稳定化),从而达到去除镉或固持镉的目的。生物类修复技术包括植物修复、微生物修复、动物修复等技术。化学类和生物类修复技术可以某一种单独,也可以两种或多种联合,用于镉污染土壤的修复。

5.1 生物炭修复技术

生物炭(Biochar)是将农业和森林的废弃物、藻类或其他垃圾(果皮、污泥、骨头)等在缺氧或厌氧条件下热解形成的稳定且高度芳香化的富碳、多孔生物质,表面含有丰富的碳官能团(如-COO(-COOH)和-O(-OH)等),同时具有较大的比表面积和阳离子交换量。生物炭具有很好的吸附镉及其他重金属的能力,还拥有优异的化学和生物学稳定性(宋小旺, 2020; 魏忠平等, 2020)。如图 4 所示,生物炭主要通过静电引力作用、物理吸附、离子交换、络合、沉淀作用对土壤镉进行吸附或钝化(图 5, 魏忠平等, 2020; 李晓晖等, 2022; Zhang et al., 2023),其中离子交换和表面络合是吸附重金属镉的主要机制。

试验表明生物炭对镉以及其他重金属都有较好的钝化效果(表 1),如邹佳慧等(2023)通过实验室土柱淋滤试验发现,添加 2% 生物炭可以使土壤淋出液中镉(II)降低 31.6%,每公顷青岛棕壤土施加 1.23~4.92 t 玉米秸秆生物炭,且在栽培前与基肥

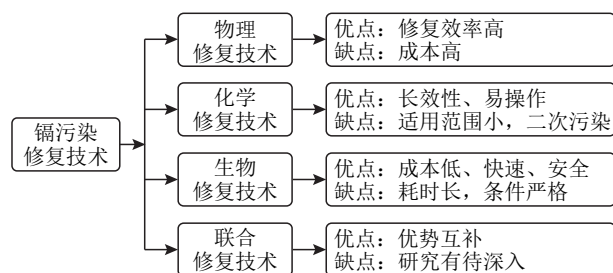


图 3 镉污染农田土壤修复技术
Fig.3 The remediation technology of Cadmium contaminated farmland soil

一起翻埋于 0~20 cm 的土壤耕层,可以对酸性棕壤中的重金属进行有效的吸附固定。宋小旺(2020)通过添加生物炭(1%)的土培试验显示,添加生物炭可以提升土壤 pH、CEC 和有机碳含量,有效降低土壤

中的有效态镉含量(90 天降低 15.5%),铁锰氧化态和残渣态镉含量上升。王期凯等(2015)通过田间试验证实,生物炭添加量分别为 5 t/hm²、10 t/hm² 时均可以显著降低土壤中的有效态镉含量,但当添加量

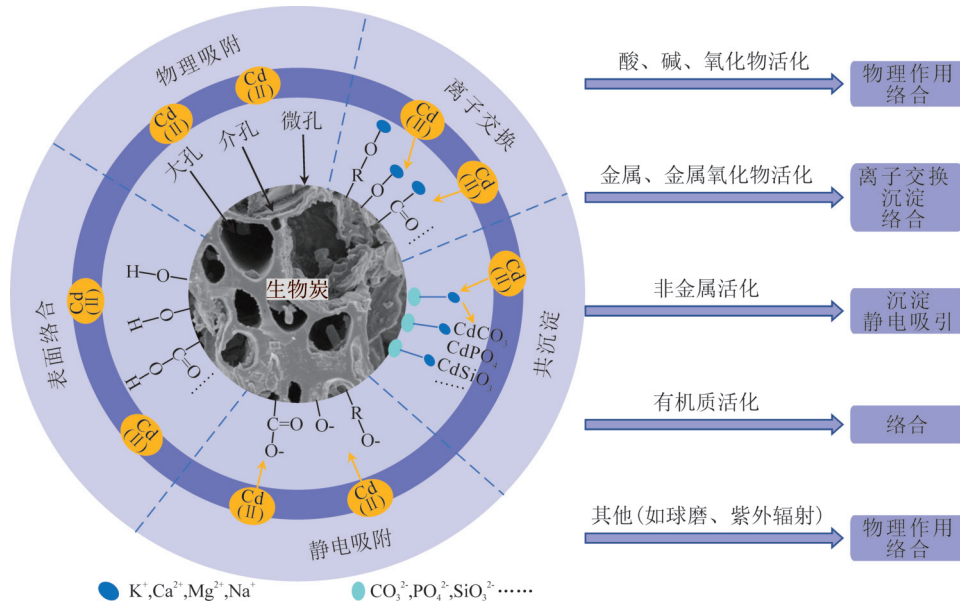


图 4 生物炭去除镉的机制及改性增强方法(据 Zhang et al., 2023)

Fig.4 Mechanism of cadmium removal by biochar and its modification and enhancement methods (after Zhang et al., 2023)

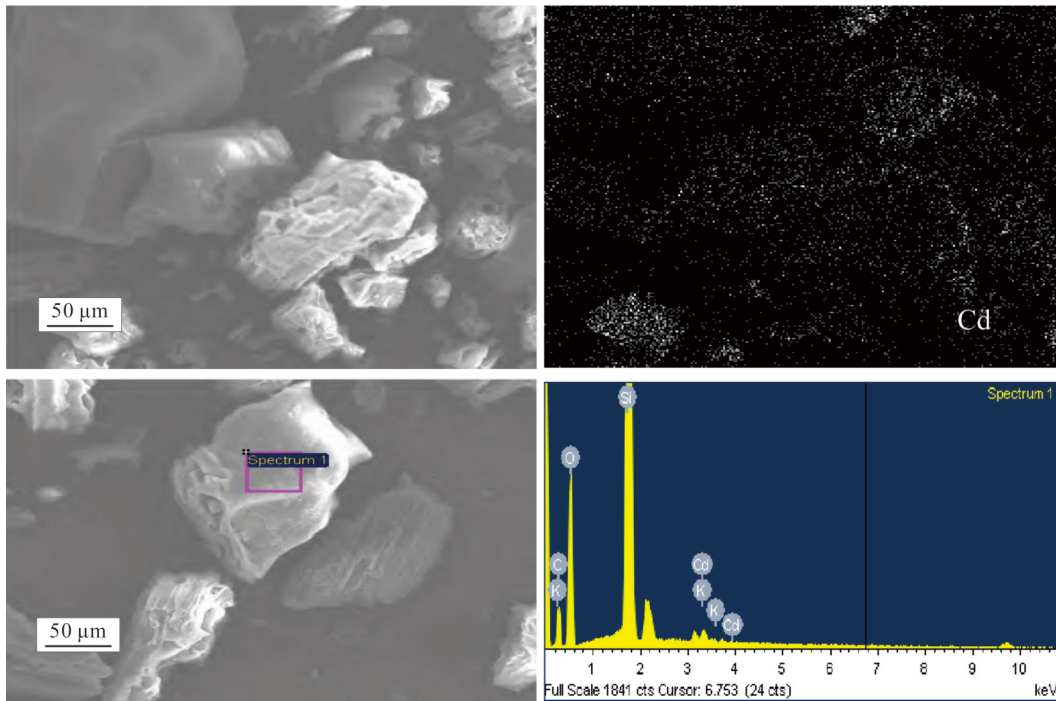


图 5 生物炭吸附镉的 SEM-EDS 图像(李晓晖等, 2022)

Fig.5 The images of SEM-EDS of biochar adsorbing cadmium (after Li Xiaohui et al., 2022)

表 1 生物炭修复技术实例

Table 1 Cases of biochar remediation technique

试验尺度	添加量	土壤有效态镉含量降低	作物类型	可食部位镉含量降低	文献来源
土柱淋滤	2%	31.6%	/	/	邹佳慧等, 2023
土培	1%	15.5%	/	/	宋小旺, 2020
土培	0.2%~0.6%	7.5%~13.1%	/	/	郭炳跃等, 2023
田间	0.2%~0.9%	10.4%~38.8%	油菜	31.0%~42.9%	王期凯等, 2015
盆栽	0.2~0.6%	13.3%~20.7%	水稻	64.6%~71.1%	程志龙等, 2023
盆栽	0.05%	19.8%	小白菜	46.5%	李晓晖等, 2022
土培*	1%	42.5%	/	/	宋小旺, 2020
土培*	0.2%~0.6%	16.3%~34.4%	/	/	郭炳跃等, 2023
盆栽*	0.2%~0.6%	38.7%~52.0%	水稻	50.0%~78.6%	程志龙等, 2023
盆栽*	0.05%	51.2%	小白菜	73.8%	李晓晖等, 2022

注: *施用改性生物炭材料。

增加到 20 t/hm² 时, 土壤有效态镉含量与对照组无显著性差异, 另外, 3 种添加水平下油麦菜的地上部、根部镉含量均显著下降。生物炭作为一种廉价易得、生态友好的吸附材料, 已成为镉污染农田土壤修复的重要选项之一。目前, 有大量研究通过碱改性、酸改性、盐改性及氧化剂改性负载生物炭, 使其功能更加多元化, 达到稳定钝化土壤重金属镉的效果。如宋小旺(2020)通过添加生物炭和铁锰氧化改性生物炭的对比试验发现, 在相同添加量条件下(1%), 铁锰氧化改性生物炭可以使土壤有效态镉降低 42.5%, 是未改性生物炭的 2.7 倍。

然而, 有研究发现生物炭进入土壤后, 随着时间的推移会逐渐老化, 主要表现为元素组成和孔隙结构的变化、表面官能团的变化和盐基离子的释放及氧化层的形成, 最终造成其物理化学性质会发生相应变化, 从而对镉的钝化效果产生不可忽视的影响(刘蕊等, 2020; 姜晶等, 2022; 张晓莹等, 2023)。

5.2 矿物材料修复技术

矿物材料修复技术主要是利用矿物材料的物理化学特性, 直接或间接地使土壤中的镉从有效态转化为难以被植物利用的形态(图 6), 如调节土壤 pH 值、表面吸附、离子交换、化学沉淀和官能团络合等(杨梦丽, 2019)。目前, 用于镉污染土壤修复的矿物材料主要有黏土矿物类、碳酸盐类、金属氧化物类、含磷类、含硫类等(表 2, 陈盾等, 2020; 闫淑兰等, 2020; 张群丽等, 2024)。

黏土矿物具有较大的比表面积、孔隙容积, 较强的吸附能力和阳离子交换能力, 能够通过吸附、离子交换、表面络合、共沉淀等机制钝化土壤镉(王林等, 2010; Xu et al., 2017; 杨妍萍, 2019)。黏土矿

物材料的优势在于资源储量大、成本低, 并且其本身属于土壤的组成矿物之一, 施用后对土壤扰动小, 不易产生二次污染。目前, 常用的黏土矿物主要包括蒙脱石(膨润土)、海泡石、凹凸棒石、伊利石、硅藻土和沸石等(朱奇宏等, 2009; 刘昭兵等, 2010; 任凌伟, 2017; 王宏鹏, 2020)。

碳酸盐类材料修复技术主要是通过提高土壤的 pH 值, 增加土壤中的负电荷, 改变土壤中的氧化还原电位和阳离子交换量, 使土壤中的 Cd²⁺以碳酸盐、聚合物、氢氧化物等形式沉积下, 从而达到钝化土壤镉的目的(闫淑兰等, 2020)。碳酸盐类修复材料主要有石灰、碳酸钙等。

金属氧化物类修复材料主要是利用自身较大的比表面积和更多的吸附位点与镉形成稳定的结构, 从而固化/稳定化镉。在较高 pH 下, 氧化铁表面羟基官能团脱质子化程度增强, 同时溶液 H⁺的竞争吸附减弱, 有利于吸附带正电荷的金属阳离子。铁氧化物对 Cd²⁺的吸附能力排序为针铁矿>磁铁矿>纤铁矿>赤铁矿(Komárek et al., 2018)。金属氧化物类修复材料主要包括锰氧化物、铁氧化物、铝氧化物等。铁氧化物具有较大技术优势, 与其他过渡金属氧化物相比, 毒性更小、更环保、自然储量高(铁是地壳中最丰富的过渡金属元素)且价格低廉, 适合商业应用(杨雄, 2022)。

含磷类修复材料主要是通过与重金属镉反应生成难溶的磷酸盐沉淀, 还有通过磷酸盐直接吸附镉, 或磷酸根阴离子诱导后间接吸附镉, 或生成非晶体物质等形(图 7), 从而达到钝化目的(丁淑芳等, 2012)。如羟基磷灰石钝化镉的机理之一是溶解的羟基磷灰石吸附镉后形成镉磷灰石; 之二是 Cd²⁺进

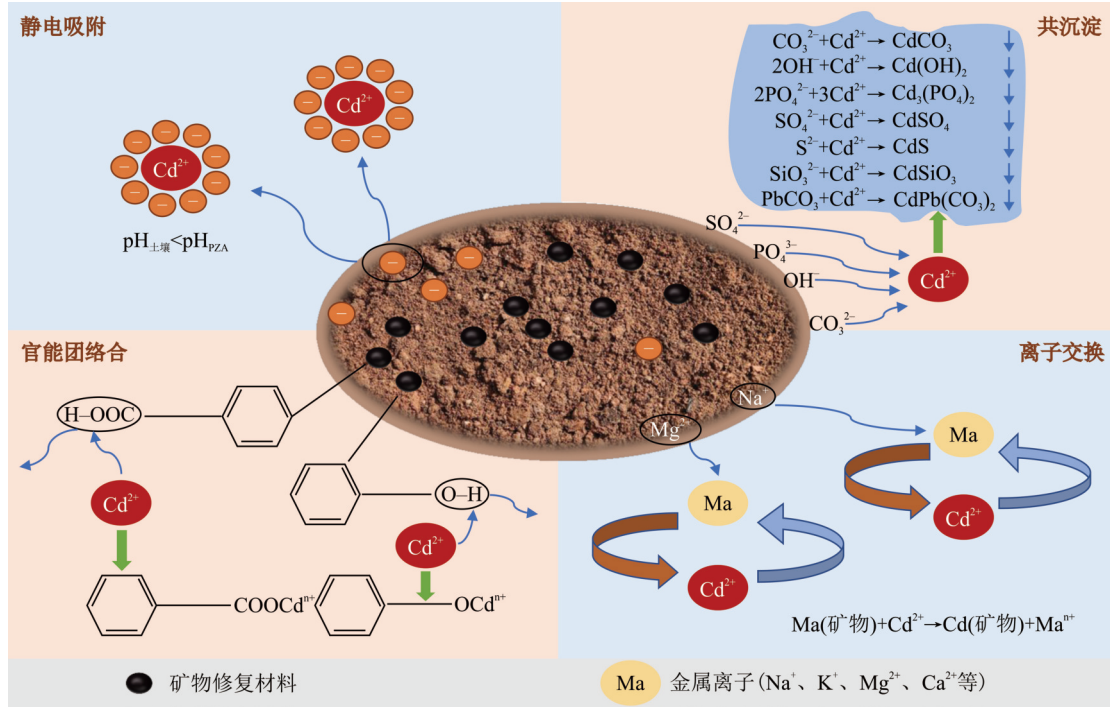


图 6 矿物材料修复技术原理
Fig.6 Principles of the remediation technology based on the mineral materials

表 2 矿物材料修复技术实例

Table 2 Cases of mineral material restoration techniques

矿物材料	试验尺度	添加量	土壤有效态镉含量降低	作物类型	可食部位镉含量降低	文献来源
海泡石	盆栽	3%~9%	0%~38.2%	油菜	1.8%~27.9%	王林等, 2010
海泡石	田间	0.5%~1%	12.5%~24.2%	水稻	18.9%~39.7%	朱奇宏等, 2009
沸石	田间	1%~2%	20.7%~27.0%	水稻	9.1%~47.3%	任凌伟, 2017
膨润土	盆栽	0.5%~5%	11.1%~42.5%	水稻	9.3%~13.0%	Sun et al., 2015
蒙脱石	盆栽	0.5%~2%	10.8%~16.9%	生菜	30.2%~41.4%	牛国梁, 2022
改性蒙脱石	盆栽	0.5%~2%	23.9%~36.1	生菜	57.0%~89.6%	牛国梁, 2022
改性蒙脱石	盆栽	0.5%	55.3%	水稻	43.6%	陈泽雄等, 2019
蛭石	盆栽	0.5%~2.5%	4.8%~25.0%	油菜	11.5%~56.8%	李剑睿和徐应明, 2022
改性伊利石	盆栽	0.1%~0.5%	21.9%~32.6%	菠菜	10.7%~41.1%	Huang et al., 2023
坡缕石	田间	0.3%~0.7%	11%~32%	水稻	23.0%~43.5%	Liang et al., 2014a
石灰	田间	0.025%~0.075%	9.9%~14.8%	水稻	16.8%~22.3%	朱奇宏等, 2009
石灰	田间	0.03%	9.51%	水稻	16.9%	杨梦丽, 2019
碳酸钙	盆栽	0.5%	10.61%	小麦	26.79%	陈盾等, 2020
硅酸钙	盆栽	0.5%	8.49%	小麦	18.75%	陈盾等, 2020
碳酸钙	盆栽	0.2%~0.6%	18.7%~24.0%	水稻	~77.3%	程志龙等, 2023
针铁矿	土培	0.1%	45%	/	/	侯秀和王祖伟, 2009
软锰矿	土培	0.1%	57%	/	/	侯秀和王祖伟, 2009
磷酸二氢钙	盆栽	0.5%	9.76%	小麦	32.14%	陈盾等, 2020
磷灰石	田间	1~2%	19.5%~26.5%	水稻	43.4%~77.5%	任凌伟, 2017
硫化钠	盆栽	0.5%	8.91%	小麦	/	陈盾等, 2020
硫酸锰	盆栽	0.017%~0.136%	6.7%~10%	水稻	26.7%~31.0%	顾明华等, 2020

人到羟基磷灰石晶格内部,生成大量镉磷灰石。含磷类修复材料主要包括了磷酸盐、磷矿粉和磷肥、磷灰石、骨粉等。

含硫类材料修复技术主要是通过与镉离子形成硫化物沉淀的形式钝化镉。钝化机制涉及不同的 pH 条件下产生 H₂S 或 OH⁻,进而与重金属镉离

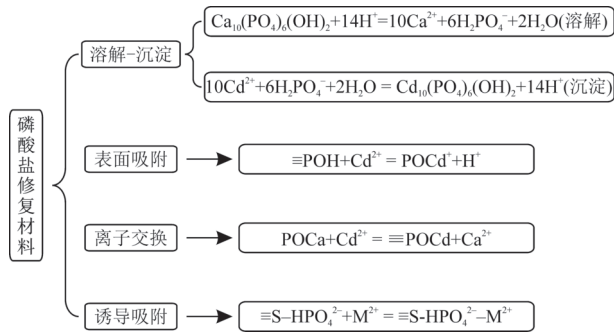


图7 磷酸盐材料修复技术原理(S为土壤, M为2价金属离子)
Fig.7 Principles of the remediation technology based on the phosphate material (S: soil, M: 2-valent metal ions)

子形成沉淀,从而降低重金属镉生物有效性。如水稻生育期淹水处理可使土壤中产生 H_2S , H_2S 与土壤中的 Cd^{2+} 产生 CdS 沉淀,降低了土壤中镉的生物有效性(刘昭兵等, 2010)。陈盾等(2020)认为硫化钠修复材料可解离出硫离子,通过硫化反应与土壤中重金属镉生成硫化物;此外,硫离子水解后生成的 OH^- 能与重金属镉结合生成氢氧化物沉淀。金属硫化物沉淀的溶解度往往比氢氧化物沉淀要低几个数量级,并且在酸性条件下也不易溶解(苏平, 2009)。含硫类修复材料主要包括硫化钙、硫化钠等。含硫类材料修复技术具有较高的 pH 适用范围,成本低、操作简便,但也存在硫化物沉淀颗粒小,易形成胶体,分离困难等问题。

5.3 有机肥料修复技术

有机肥料不仅可以为农作物生长提供丰富的有机质,而且可以在降低重金属(包括镉)有效态含量方面发挥重要作用。有研究表明有机肥施入土壤环境后,有机肥通过对土壤 pH 值、Eh 值等产生影响,从而改变镉的赋存形态(张晓绪, 2020)。有机

肥在施入土壤后,会通过生物化学作用分解,产物与土壤镉发生络合,使镉在固相—液相间重新分配,从而改变镉的赋存形态(史琼彬, 2016)。有机质官能团如羧基、醇羟基、烯醇羟基以及不同类型的羰基结构等,可以通过吸附、螯合、络合、配位、离子交换和凝结等多种作用方式,影响镉在土壤中的迁移转化(陕红, 2009; 鲁洪娟等, 2019)。研究表明有机肥料能有效降低土壤中的有效镉含量和作物可食部位中的镉含量(表3),如黄擎等(2014)发现配施有机肥可使土壤交换态镉降低 28.84%~36.33%,有机结合态镉增加 44.91%~68.31%。张亚丽等(2001)通过试验研究证实,施用有机肥料能显著降低农业土壤中有效态镉的含量,促使交换态镉向强有机结合态、铁锰氧化物态转化。然而,有机肥特别是生物有机肥,物料来源较广,其中可能含有一定的重金属,导致土壤负荷增加,为此我国发布了《生物有机肥》(NY884—2012)标准,规定了生物有机肥的技术指标及镉等 5 种重金属的限量要求,为有机肥料修复技术投入实用提供了重要参考。

5.4 微生物修复技术

微生物修复技术指在适宜环境下,利用污染土壤中的或培养的耐镉微生物,通过微生物吸附、胞外沉淀、微生物转化、微生物累积和外排作用等降低土壤中镉的活性(图8,徐良将等, 2011; 常海伟等, 2018)。微生物拥有三方面固镉优势:其一,可以吸附积累重金属,从而降低土壤中重金属的毒性;其二,可以改变根系微环境,从而抑制/促进植物对重金属的吸收,达到钝化镉的目的(田文钢等, 2020);其三,应用成本低,对土壤代谢活性及肥力的副作用小(李宏和江澜, 2009)。

表3 有机肥修复技术实例

Table 3 Cases of organic fertilizer repair technology

有机肥	试验尺度	添加量	土壤有效态镉含量降低	作物	可食部位镉含量降低	文献来源
腐殖酸	田间	0.45%	23.87%	空心菜	27.95%	王宏鹏, 2020
有机碳源	盆栽	0.03%	-2.4%	水稻	32.4%	周利强等, 2013
菜籽饼	盆栽	0.03%	-12.1%	水稻	75.1%	周利强等, 2013
猪粪	盆栽	0.03%	-5.6%	水稻	11.0%	周利强等, 2013
牛粪	盆栽	1~6 g C/kg土	20.2%~22.2%	水稻	0~39.3%	张晓绪, 2020
猪粪	盆栽	2.5g C/kg土	21.7%	水稻	81.0%	史琼彬, 2016
农家肥	盆栽	2.5g C/kg土	19.6%	水稻	55.6%	史琼彬, 2016
猪粪	盆栽	2%~5%	/	小麦	46.7%~49.1%	陕红, 2009
牛粪	土培	36%	28.84%~36.33%	/	/	黄擎等, 2014
猪粪	盆栽	1%~2%	10.4%~19.5%	水稻	52.8%~62.5%	张亚丽等, 2001

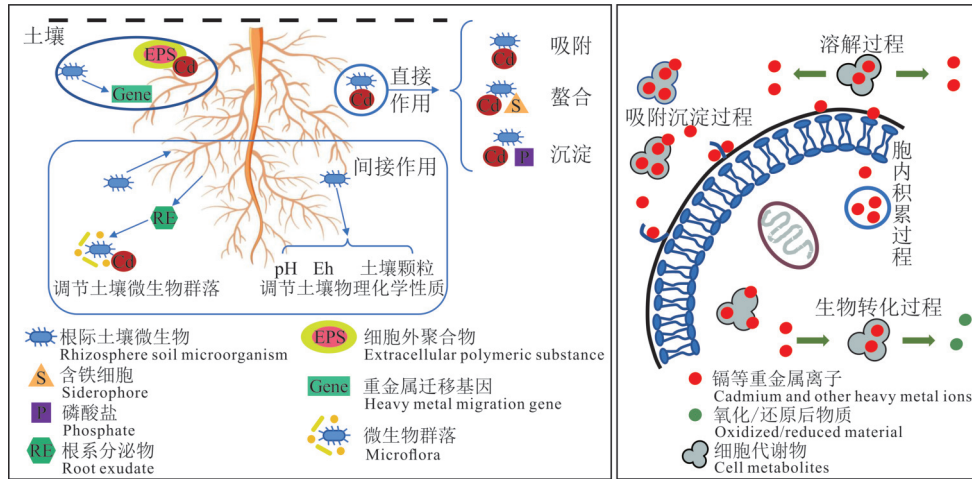


图 8 微生物修复技术原理(据常海伟等, 2018)

Fig.8 Principle of microbial remediation technology (after Chang Haiwei et al., 2018)

用于重金属(镉)污染土壤修复的微生物主要有细菌、真菌和藻类(表 4、表 5, 张涵等, 2023)。植物根际圈的真菌往往对重金属具有较好的耐受性, 并且生长迅速、抗逆性强、环境适应能力强, 故在重金属污染土壤修复领域中被广泛研究和应用(李霏等, 2022)。近年来研究较多的丛枝菌根真菌, 就是利用微生物治理土壤重金属污染的一个典型代表。陈保冬等(2019)通过试验提出丛枝菌根真菌能够通过菌丝体吸附固持相当于自身干物质质量 1.6%~

13.3% 的镉, 同时增强共生植物对重金属污染胁迫的抗性。丛枝菌根真菌可以从三个方面固定镉: 菌丝直接吸附镉、菌丝分泌物(如有机酸、球囊酶素等)间接钝化镉、菌丝与镉形成共生结构固持镉。根外菌丝具有较大的比表面积, 可以吸附镉。用于重金属(镉)污染土壤修复的细菌包括氧化亚铁硫杆菌、硫酸盐还原菌、恶臭假单胞菌、节杆菌及铜绿假单胞菌等。这些细菌或通过带电荷的菌体表面吸附重金属离子, 或在摄取必需营养元素时主动吸

表 4 具有固镉能力的微生物

Table 4 Microorganisms with cadmium-fixation capacity

类型	种属	名称	作用方式	土壤来源	耐受镉的浓度	文献来源
细菌	魏德曼芽孢杆菌	C2-Z	吸附	铁尾矿	500 mg/L	张璐, 2021
细菌	假单胞菌属	PM2	矿化	/	1000 mg/L	Prapagdee et al., 2012
细菌	铜绿假单胞菌	KKU2500-3	生成CdS	锌矿区	281 mg/L	Siripornadulsil and Siripornadulsil, 2013
细菌	绿脓杆菌	B237	吸附蓄积	锌矿区	16.9 mg/g	Limcharoensuk et al., 2015
细菌	赭杆菌	GDOS	吸附	农药污染土壤	83.3 mg/g	Khadinia et al., 2014
细菌	蜡样芽孢杆菌	RC-1	吸附	镉污染土壤	31.9 mg/g	Huang et al., 2013
细菌	枯草芽孢杆菌	KC6	吸附	黄铁矿区土壤	40 mg/L	Xie et al., 2021
细菌	伯克霍尔德菌属	Z-90	生物浸出	污泥	450 mg/g	Yang et al., 2016
真菌	黑曲霉属	B77	吸附	突变菌株	11 mg/g	Tsekova et al., 2010
藻类	褐藻		吸附内部扩散	海滩	7.8 mg/g	Cardoso et al., 2017

表 5 微生物修复技术实例

Table 5 Examples of microbial repair techniques

微生物类型	试验尺度	添加量	土壤有效态镉含量降低	作物	可食部位镉含量降低	文献来源
成团泛菌	盆栽	1.38*10 ⁹ CFU/g土	-11.2%	小白菜	-14.4%	张旭辉, 2019
Delftia菌	盆栽	5%菌剂	~6.0%	小白菜	~7.0%	石阳阳, 2020
芽孢杆菌	田间	3.0 t/hm ² 菌剂	8.59%	水稻	15.7%	胡青云等, 2021
芽孢杆菌	田间	0.07~0.4 t/hm ² 菌剂	≤8.64%	小麦	12.5%~33.2%	杨文昊, 2022
枯草芽孢杆菌	盆栽	50~200 ml/盆	12.7%~38.2%	小白菜	31.8%~44.6%	刘悦畅等, 2020
沼泽红假单胞菌	盆栽	50~200 ml/盆	20.2%~34.2%	小白菜	32.2%~40.9%	刘悦畅等, 2020

收重金属离子,将重金属富集在菌体表面或内部。如鞘氨醇单胞菌属,在最适条件下对 Cd^{2+} 的吸收率达到 94%(周赓等, 2016); 大肠埃希菌能分泌产生一种螯合 Cd^{2+} 的多肽,极大地增加 Cd^{2+} 在细菌胞内的累积(Bae et al., 2001)。微生物菌体可以将土壤中 Cd^{2+} 与金属硫蛋白结合形成多磷酸盐沉淀或难溶复合物,进而降低镉的活性(常海伟等, 2018)。

微生物在修复镉污染土壤时存在定植困难以及养分来源较少的局限,选择合适的载体促进微生物的定植与提供营养是非常重要的。比如多孔性、比表面积较大的生物炭(Xu et al., 2016),微生物不仅可以附着在生物质炭的孔隙内(Wang et al., 2015),同时利用生物质炭内部的微量元素供其繁殖。研究发现,相比游离微生物,生物质炭负载耐镉真菌具有富集浓度高、活性较好、稳定性较好、环境耐受性较强等优势(Haider, 2021)。

5.5 植物修复技术

植物修复技术主要是利用植物固定、植物过滤、植物提取、植物挥发、植物转化等作用从土壤中去镉(图 9),被广泛应用于重金属镉污染土壤修复领域(熊明月等, 2022; 周垂康等, 2023)。目前,学术界对于镉超富集植物的衡量标准一般是植物地上部镉含量超过 100 mg/kg,富集系数和转运系数大于 1,且能在重金属污染土壤中正常生长(张恒等, 2022)。被广泛研究和采用的镉超累积植物有蜈蚣草、野趾草、紫云英、香根草、铜草、龙葵、油菜、芥菜、东南景天、宝山堇菜、伴矿景天、杨树等。植物修复具有成本低、易操作、环境友好等特点,但也存在耗时长、(植物)后期无害化处置难等问题(熊娟等, 2022)。超富集植物可与农作物间作或轮作,并配施钝化剂、活化剂等,达到修复效果的同时实现农产品安全生产。

在众多的研究和应用示范中,植物修复技术显示了较好的修复效果(表 6)。汤叶涛等(2005)基于植物萃取作用,利用圆锥南芥对铅、锌、镉进行富集、积累,利用这种超积累植物从被污染的土壤中提取重金属,并富集在圆锥南芥的地上部,通过收割该植物将重金属移出土壤。熊愈辉等(2004)通过试验提出东南景天地上部分能富集 5677 mg/kg 的镉。沈建秀(2017)用刺槐-根瘤菌共生体系修复镉污染土壤,该体系可以减缓植物受到的胁迫。另有

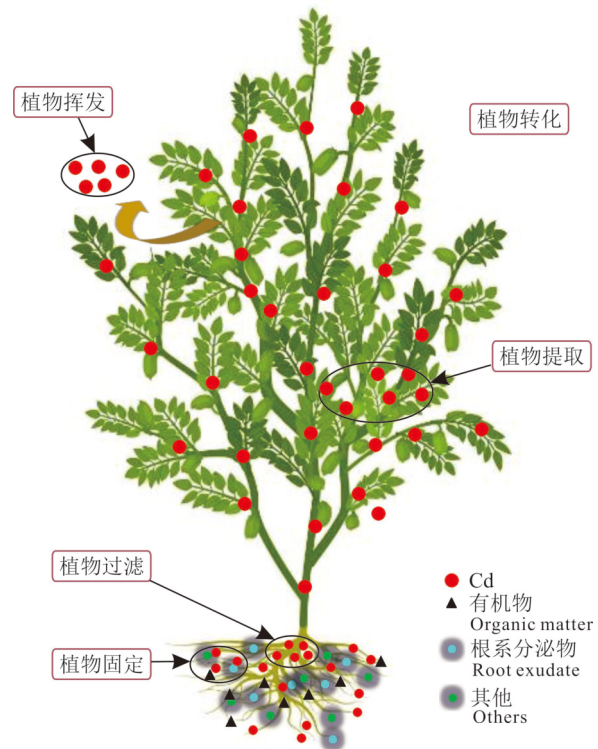


图 9 植物修复原理

Fig.9 Principle of phytoremediation

研究发现,种间作用机制导致不同的植物间套作都可影响两种作物对重金属镉的富集与转运,邢婷等(2022)发现玉豆套作系统,可在降低土壤镉含量的同时,降低玉/豆籽粒中镉含量,提升粮食质量与产量。熊娟等(2022)分别从伴矿景天对镉的吸收转运和富集机制、解毒机理、田间修复现状、修复效果强化措施和产后处理技术等 5 个方面综述了现阶段的主要研究成果,并进一步阐述了伴矿景天田间修复推广应用面临的问题和挑战,提出未来研究应集中探索伴矿景天的修复效率提升和实际推广应用。

5.6 动物修复技术

动物修复技术一般利用土壤动物及其肠道微生物在污染土壤的活动过程中降低或者消除土壤重金属(张园等, 2019; 黄卫等, 2022)。目前,研究比较多的是利用蚯蚓对土壤镉的富集能力来修复镉污染土壤(图 10, 表 7),如 Wang et al.(2018)对华南亚热带地区(湖南)重金属污染的土壤中存在的蚯蚓开展了重金属富集因子的研究,发现蚯蚓对镉的生物富集因子介于 10.6~18.8。Mostafaii et al.(2016)利用蚯蚓对镉污染土壤进行修复,在镉离子初始浓

度为 40 $\mu\text{g/g}$ 的情况下可以达到平均 36.5%~38.0% 的去除率;冯凤玲等(2006)研究显示,蚯蚓不仅能促进黑麦草将镉累积到其根部,还可提高菌根的侵袭率。土壤动物作为土壤生态系统重要的一部分,可以与其他修复技术联合使用,达到有效去除镉的目的,同时避免二次污染。然而,土壤动物修复技术

相对植物修复技术和微生物修复技术在理论和技術上的研究相对薄弱,有待引起重视。

5.7 联合修复技术

联合修复技术是指化学类修复技术和生物类修复技术的两种或多种联合使用,充分发挥各自的优势,达到更好钝化效果的技术。联合修复技术往

表 6 植物修复技术实例

Table 6 Example of phytoremediation techniques

超累积植物	试验尺度	土壤镉浓度/(mg/kg)	修复效果	文献来源
溪口花籽油菜	盆栽	0~40	地上部生物量、地上部吸镉量和对土壤的净化率均明显高于朱苍花籽油菜和参比超累积植物印度芥菜,吸收的 Cd 88%以上分布在地上部且有较强的耐镉毒能力	苏德纯和黄焕忠, 2002
甘蓝型油菜	盆栽	0~25	高镉土壤种植油菜,菜籽油中镉含量较对照提高了 3.9 倍,但仍国际标准范围内,不影响食用油安全	范占煌和张振乾, 2021
橡胶草	盆栽	0~3	橡胶草镉富集系数和转运系数在 1.20~1.50,具有部分镉超富集植物特征,地上部最大镉积累量为 9.832 $\mu\text{g/株}$,适合修复中低浓度镉污染土壤	张恒等, 2022
棉花、小白菜、龙葵	盆栽	0~10	三种植物的富集系数均大于 1,棉花、龙葵和小白菜分别适用于植物提取修复为 1 mg/kg、5 mg/kg 和 10 mg/kg 的镉污染石灰性土壤	陈丽丽等, 2022
鬼针草	盆栽	60	施加尿素、氯化铵、硝酸铵钙均能显著增加土壤中镉向鬼针草转移,鬼针草对土壤镉污染的净化率分别提高 14.39%、24.27%、141.55%	熊明月等, 2022
柳树-东南景天	盆栽	1.68	交流电场提高了植物对土壤镉吸收积累,但不同的电场频率对植物镉修复效率影响不同,50 Hz、300 Hz 交流电场下植物地上部分总镉积累量较对照分别显著增加 24.04%、21.24%。从这两种植物上看,50 Hz 交流电场更能提高柳树镉修复效率,300 Hz 交流电场更提高东南景天镉修复效率	周垂康等, 2023

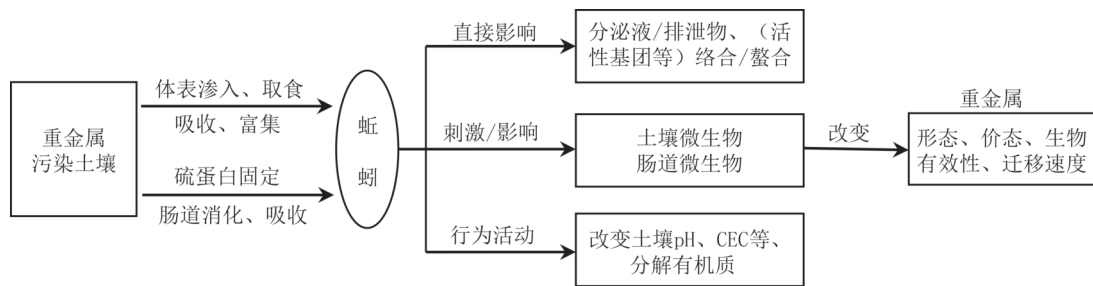


图 10 蚯蚓改变土壤重金属(镉)形态的机制(据张维兰等, 2022)

Fig.10 Mechanisms of earthworm changing the morphology of heavy metal (Cd) in soil (after Zhang Weilan et al., 2022)

表 7 动物修复技术实例

Table 7 Examples of animal restoration techniques

动物	试验尺度	添加量	土壤镉含量/(mg/kg)	修复效果	文献来源
蚯蚓	盆栽	30条/盆	0.04~0.08	初始镉分别为0.04 mg/kg、0.08 mg/kg时,土壤镉去除效率36.5%~38.0%、22.3%~28.3%。	Mostafaii et al., 2016
蚯蚓	盆栽	7克/盆	2.43	蚯蚓的镉含量 13.31~36.64 mg/kg,富集系数 5.64~15.52,蚯蚓对镉具有极强的富集能力。	陈敏妮等, 2023
蚯蚓	田间	1 kg/m ²	2.6	随着适应期的结束,蚯蚓对镉的富集量达到最高 20.1 mg/kg,随后开始下降,修复结束时蚓体镉含量 2.3 mg/kg,富集系数4.2~5.9。	田伟莉等, 2013

往能够做到同时兼顾低成本,无二次污染,环境扰动小,保持土壤健康等(李瑞美等,2002;荣兴民等,2008;王涌泉等,2014)。关注较多的联合修复技术有多种矿物材料的联合(表8)、矿物材料-有机材料的联合、矿物材料-微生物的联合、矿物材料-生物炭的联合、生物炭-微生物(或超富集植物)的联合、微生物-超积累植物的联合(表9)等。

近年来的土壤修复研究和实践越来越青睐联合修复技术,因为其拥有灵活性、高效性,另外其在稳定性、适用性和成本等方面也具有一定优势(Cuadros, 2017; Alexander et al., 2019; 陈保冬等, 2019)。李瑞美等(2002)采用无机钝化材料单施,多种无机钝化材料混施,无机+有机钝化材料混施修复镉污染农田,结果表明无机+有机混施(镁磷肥+猪粪)对抑制镉污染和提高作物产量效果显著。王涌泉等(2014)以无机材料作为钝化剂修复镉污染农田土壤,结果表明与单一矿物相比,钙基矿物、炭基肥和石灰石配施使土壤中有效态镉降低44.47%~86.53%,钝化修复效果显著。司马小峰等(2021)采用盆栽试验研究生物炭与超富集植物

联合修复的效果,结果表明生物炭添加比例为1%时,能显著提高超富集植物对镉的吸收(与单独植物修复相比,镉吸收提高了26.74%)。杨仙妮(2022)研究富含碳酸钙的蟹壳生物炭和拉恩氏菌液协同固持土壤镉的机制,提出生物炭既可以为菌类提供适宜的生存环境,也可以钝化镉。王期凯等(2015)采用生物炭和鸡粪联合修复镉污染土壤,通过田间试验证实生物炭(5 t/hm²、10 t/hm²、20 t/hm²)+发酵鸡粪(10 t/hm²)均可显著降低土壤有效态镉含量,对油麦菜可食部位Cd累积量降低幅度达46.7%~54.8%。

5.8 治理修复技术发展展望

实验室研究和农田土壤修复实践都表明:单一修复技术很难达到理想效果,特别是针对大面积、中低污染程度的农田土壤,联合修复技术在农田土壤镉污染修复方面具有较好的发展前景。联合修复技术与农艺调控措施结合可以在保证修复效果的基础上降低修复成本,有望成为未来农田土壤修复的首选。微生物修复技术是未来的发展趋势之一,但该技术也存在局限。以真菌为例,培养筛选

表8 矿物材料联合修复技术实例

Table 8 Examples of combined restoration techniques based on mineral materials

修复材料	试验尺度	添加量	土壤有效态镉含量降低	作物	可食部位镉含量降低	文献来源
石灰+海泡石	田间	0.025%~0.075%+0.5%~1%	19.3%~24.7%	水稻	32.4%~50.3%	朱奇宏等, 2009
膨润土+磷灰石	田间	1%+1%	36.0%	水稻	63.9%	任凌伟, 2017
沸石+磷灰石	田间	1%+1%	38.3%	水稻	83.0%	任凌伟, 2017
腐殖酸+沸石	田间	0.29%+0.22%	28.11%	空心菜	35.7%	王宏鹏, 2020

表9 微生物-植物联合修复技术实例

Table 9 Examples of microbe-plant combined remediation techniques

微生物	植物	土壤镉/(mg/kg)	修复作用机理	土壤镉含量降低效率	文献来源
荧光假单胞菌	东南景天	/	增加吲哚乙酸(IAA)分泌,降低脱落酸、油菜素内酯、茉莉酸等,诱导侧根形成	侧根数是空白的1.78倍,地下、地上镉浓度和积累量分别提高1.7倍、2.63倍和1.33倍和1.87倍	Wu et al., 2020
柑桔皮病菌、鹅膏菌、鲁氏乳杆菌	樟子松	/	微生物的生物吸附机制	镉根土比(R/S)由0.8提高至3	Krupa and Kozdrój, 2007
巨大芽孢杆菌	紫罗兰	100	提高土壤中可提取态镉含量	根、芽镉含量分别提高2.29倍和2.86倍	Liang et al., 2014b
巨大芽孢杆菌	芥菜、绒毛叶	80	溶解土壤磷,促进植物对磷的吸收,减轻镉对植物的胁迫	芥菜茎中积累39%镉,绒毛叶中积累68% Cd;芥菜生物量由0.087 g提高至0.448 g	Jeong et al., 2012
紫拟青霉	龙葵	50	抗性菌株与柠檬酸的协同作用以及增强植物的抗氧化防御能力	植物对Cd的吸收量提高30%	Gao et al., 2010
沙雷氏菌	羽扇豆	2.2	对镉具有耐性,且菌种细胞壁可大量吸附重金属	羽扇豆Cd地下-地上转运降低10%~50%,植物生物量提高10%~40%	El Aafi et al., 2012

的真菌与土著微生物存在竞争关系,耐镉真菌可能会因竞争失利而被淘汰(姜春晓,2009)。因此,如何让真菌与土著菌相互适应,是未来研究的一个重点方向。关于生物炭修复技术,目前缺乏对生物炭长效性的试验与研究工作。生物炭修复技术尚需关注生物炭老化作用对修复重金属镉污染土壤的长效性和稳定性。生物炭可以为微生物提供定殖场所,从而增加微生物的活性,强化其与土著菌竞争的优势,所以生物炭与微生物等联合可能是未来的一个发展方向。矿物类材料资源储量大、成本低,应用前景广阔。目前的研究多集中在黏土矿物改性及其吸附、钝化效果,对于改性黏土矿物材料在进入污染土壤后,与环境中的其他有机物、无机物、微生物等的相互作用机制缺乏研究。未来的研究可以关注矿物(或改性矿物)材料联合丛枝菌根真菌修复技术钝化土壤镉的效果和相关机制(Riaz et al., 2021; Wang et al., 2022b)。积极推动联合修复技术的研发与应用,是实现多重钝化-生态友好-高质高效的多维度钝化目标的最优途径。

6 结 论

(1)镉对土壤、植物、人类健康乃至整个生态系统有较大的危害,镉污染仍然是我国农用地土壤面临的重要环境问题,不可忽视。

(2)镉对植物生长、植物抗氧化酶活性、植物光合作用和呼吸作用有重要影响,植物也会通过各种机制对镉产生耐性。

(3)镉从土壤向植物系统的迁移涉及镉的价态和种类转化、微界面(如水/土界面和根/土界面)过程、通道(或途径)、载体蛋白等,是一个复杂而关键的过程,深入研究有助于揭示蕴含的机理和影响因素,指导镉污染治理技术的研发和受污染土壤的修复工作。

(4)各种化学类和生物类治理技术有其各自的原理和优势,联合修复技术在农田土壤镉污染治理方面具有较好的发展前景。针对我国南方存在的酸性镉污染农田土壤,采用碳酸盐类材料(生石灰)+农艺调控措施取得了较好的效果;然而,针对我国北方碱性农田土壤镉污染治理的成熟技术和配套产品仍然缺乏,尚需在理论研究和技术研发上加大投入,以确保我国粮食的安全生产。

References

- Alexander J A, Ahmad Zaini M A, Surajudeen A, Aliyu E N U, Omeiza A U. 2019. Surface modification of low-cost bentonite adsorbents—A review[J]. *Particulate Science and Technology*, 37(5): 538–549.
- Anderson J M, Park Y I, Chow W S. 1997. Photoinactivation and photoprotection of photosystem II in nature[J]. *Physiologia Plantarum*, 100(2): 214–223.
- An Tingting, Huang Di, Wang Hao, Zhang Yi, Chen Yinglong. 2021. Research advances in plant physiological and biochemical mechanisms in response to cadmium stress[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 56(3): 347–362 (in Chinese with English abstract).
- Arthur E, Crews H, Morgan C. 2000. Optimizing plant genetic strategies for minimizing environmental contamination in the food chain: Report[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2(1): 1–21.
- Assche F V, Clijster H. 1990. Effects of metal on enzyme activity in plants[J]. *Plant Cell Environment*, 13: 195–206.
- Bae W, Mehra R K, Mulchandani A, Chen W. 2001. Genetic engineering of *Escherichia coli* for enhanced uptake and bioaccumulation of mercury[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(11): 5335–5338.
- Bezel V S, Zhuikova T V, Pozolotina V N. 1998. The structure of dandelion cenopopulations and specific features of heavy metal accumulation[J]. *Russian Journal of Ecology*, 29(5): 331–337.
- Cao Ruiqin, Yang Zhongfang, Yu Tao. 2024. Research progress of stable isotopic geochemistry of cadmium and zinc and its harm and control in soil and other geological bodies[J]. *Geology in China*, 51(3): 833–864 (in Chinese with English abstract).
- Cardoso S L, Costa C S D, Nishikawa E, Silva M G C, Vieira M G A. 2017. Biosorption of toxic metals using the alginate extraction residue from the brown algae *Sargassum filipendula* as a natural ion-exchanger[J]. *Journal of Cleaner Production*, 165: 491–499.
- Chang Haiwei, Liu Daihuan, He Qianfeng. 2018. Advances in microbial redemption mechanism of heavy metal polluted farmland[J]. *Journal of Microbiology*, 38(2): 120–127 (in Chinese with English abstract).
- Chen Baodong, Yu Meng, Hao Zhipeng, Xie Wei, Zhang Shen. 2019. Research progress in arbuscular mycorrhizal technology[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(3): 1035–1046 (in Chinese with English abstract).
- Chen Dun, Wang Xiaobing, Wang Xiaoli, Feng Ke, Zhang Xumei. 2020. Screening of passivators for cadmium-contaminated red soil and their effects on soil remediation[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 36(1): 115–120 (in Chinese with English abstract).
- Chen G, Du R, Wang X. 2023. Genetic regulation mechanism of cadmium accumulation and its utilization in rice breeding[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1247): 1–18.

- Chen Hong, Xu Qiuman, Wang Wei. 2000. The effect of Cd^{2+} on the activity of protectase and cell membrane lipid peroxidation change of wheat seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali–Occidentalia Sinica*, 20(3): 399–403 (in Chinese with English abstract).
- Chen Lili, Lu Weidan, Li Junhua, Luo Tong, Sun Benben. 2022. Response of growth and enrichment characteristics of three plants under different concentrations of cadmium pollution[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 40(2): 172–179 (in Chinese with English abstract).
- Chen Minni, Nie Xiaoqi, Zhang Xingfeng, He Chuanqian, Gao Bo. 2023. Effects of earthworm, straw, and citric acid on the remediation of Zn, Pb, and Cd contaminated soil by *Solanum photeinocarpum* and *pterocypsel indica*[J]. *Environmental Science*, 44(3): 1714–1726 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuan. 2007. Development of study on cadmium and its chemical speciation in soil[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 14(7): 7–13 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zexiong, Zhu Huangrong, Zhou Zhijun, Zhao Qiuxiang. 2019. Effects of functionalized montmorillonite on rhizospheric enzyme activities in Cd contaminated soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 36(4): 528–533 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Zhilong, Wang Xiangxiang, Zhang Tiantian, Yang Ying, Zhou Yutong, Wu Liang, Zhang Feixiang. 2023. Effect of different amendments on Cd migration and accumulation in the soil–rice system[J]. *Environmental Science and Technology*, 46(2): 24–31 (in Chinese with English abstract).
- Ci Dunwei, Jiang Dong, Dai Tingbo. 2005. Effect of Cd toxicity on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of wheat seedling[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 25(5): 88–91 (in Chinese with English abstract).
- Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, Verbruggen N. 2013. Plant science: The key to preventing slow cadmium poisoning[J]. *Trends in Plant Science*, 18(2): 92–99.
- Cuadros J. 2017. Clay minerals interaction with microorganisms: A review[J]. *Clay Minerals*, 52(2): 235–261.
- Cui Junyi, Ma Youhua, Wang Chensisi, Chen Liangmei, Wu Linchun, Hu Hongxiang. 2017. Farmland soil cadmium pollution of in situ passivation remediation technology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 33(30): 79–83 (in Chinese with English abstract).
- Ding Shufang, Xie Zhengmiao, Wu Weihong, Zhou Rongbing, Chen Jianjun. 2012. Research progress on chemical remediation of heavy metal–contaminated soils using phosphorous–containing materials[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 40(35): 17093–17097 (in Chinese with English abstract).
- Dong G, Nkoh J A, Hong Z N, Dong Y, Lu H L, Yang J, Pan X Y, Xu R K. 2020. Phytotoxicity of Cu^{2+} and Cd^{2+} to the roots of four different wheat cultivars as related to charge properties and chemical forms of the metals on whole plant roots[J]. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 196: 1–9.
- Dong Likuan, Fang Bin. 2017. Analysis of spatial heterogeneity of soil heavy metals in tea plantation: Case study of high quality tea garden in Jiangsu and Zhejiang[J]. *Geographical Research*, 36(2): 391–404 (in Chinese with English abstract).
- Dong Meng, Zhao Yunlin, Ku Wenzhen, Tuo Ruirui, Dai Meibin, Yi Hecheng. 2011. Cadmium enrichment characteristics of eight dominant plant species in Dongting Lake wetland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 30(12): 2783–2789 (in Chinese with English abstract).
- EI Aafi N, Brhada F, Dary M, Maltouf A F, Pajuelo E. 2012. Rhizo stabilization of metals in soils using *Lupinus luteus* inoculated with the metal resistant rhizobacterium *Serratia sp.* MSMC541[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 14(3): 261–274.
- Fan Zhanhuang, Zhang Zhenqian. 2021. Brassica Napus L. in the remediation of cadmium contaminated soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 37(30): 72–76 (in Chinese with English abstract).
- Feng Fengling, Cheng Jiemin, Wang Dexia. 2006. Potential application of earthworm for the phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 37(4): 809–814 (in Chinese with English abstract).
- Gao Y, Miao C, Mao L, Zhou P, Jin Z G, Shi W J. 2010. Improvement of phytoextraction and antioxidative defense in *Solanum nigrum* L. under cadmium stress by application of cadmium–resistant strain and citric acid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 181: 771–777.
- Gu Minghua, Li Zhiming, Chen Hong, Lei Jung, Fang Yuan, Tang Cuirong, Shen Fangke. 2020. Effects of manganese application on the formation of manganese oxides and cadmium fixation in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 29(2): 360–368 (in Chinese with English abstract).
- Gu X, Evans L J. 2008. Surface complexation modelling of Cd(II), Cu(II), Ni(II), Pb(II) and Zn(II) adsorption onto kaolinite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(2): 267–276.
- Gu Y, Wang P, Zhang S, Dai J, Chen H P, Lombi E, Howard D L, Ent A V D, Zhao F J, Kopittke P M. 2020. Chemical speciation and distribution of cadmium in rice grain and implications for bioavailability to humans[J]. *Environmental Science & Technology*, 54(19): 12072–12080.
- Guo Bingyue, Yang Kunpeng, Zhang Jing, Dai Juncheng, Cheng Zhiyan, Zhang Yaping. 2023. Research on the remediation effect of manganese dioxide/amino–modified biochar on Pb and Cd composite contaminated soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 39(3): 422–428 (in Chinese with English abstract).
- Haider U F. 2021. Co–application of Biochar and Microbes (*Trichoderma Harzianum* L. and *Bacillus Subtilis* L.) Improves the Productivity of Cereal–legume Cropping System and Remediate Cadmium–contaminated Soil[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 1–153 (in English with Chinese abstract).
- Han Juan, Zhao Jinli, He Xueli. 2016. Characteristics of heavy metals enrichment in plant species growing in Baiyangdian[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 39(4): 31–36 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- He Junyu, Ren Yanfang, Ren Jianming, Chang Huiqing, Wang Yangyang. 2009. Effects of cadmium on seed germination of different wheat varieties[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 25(10): 235–240 (in Chinese with English abstract).
- Hong Renyuan, Yang Guangxiao, Liu Donghua, Pu Changguang. 1991. Effects of cadmium on the growth and physiological and biochemical reactions of wheat seedlings[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 49(15): 148–149 (in Chinese with English abstract).
- Hou Xiu, Wang Zuwei. 2009. Influence of Fe–Mn oxides in contaminated soil on bio-availability and effective form of Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 28(11): 2313–2317 (in Chinese with English abstract).
- Hu Qingyun, Tang Yougen, Zhang Zhiqiang, Luo yin, Zhang Xiaoyi, Xiao Huan, Ao Hejun. 2021. Effects of 4 types of remediation agents on reducing Cd contents in soil and rice on Cd-contaminated farmland[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, (3): 51–54 (in Chinese with English abstract).
- Huang Dongfen. 2008. Responses of Rice to Cadmium in Soil and Their Regulations[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 1–136 (in Chinese with English abstract).
- Huang F, Dang Z, Guo C L, Lu G N, Gu R R, Liu H J, Zhang H. 2013. Biosorption of Cd (II) by live and dead cells of *Bacillus cereus* RC-1 isolated from cadmium-contaminated soil[J]. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 107: 11–18.
- Huang H, Shi L, Chen R, Yuan J. 2023. Effect of modified illite on Cd immobilization and fertility enhancement of acidic soils[J]. *Sustainability*, 15(6): 1–20.
- Huang Keyi, Liu Yu, Ren Wenjing, He Xin, Zhang Zhen, Huang Yunpei, Jiang Xiaoting, Huang Gaoxiang. 2023. Effects of two different paddy soils on Cd uptake and dynamic accumulation characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 54(2): 432–440 (in Chinese with English abstract).
- Huang Qing, Liu Borui, Cai Huajie, Bao Liying. 2014. Effect of freeze-thaw cycles and organic fertilizer on the speciation of cadmium in black soils[J]. *Environmental Pollution and Control*, 36(12): 38–42 (in Chinese with English abstract).
- Huang Wei, Zhuang Ronghao, Liu Hui, Wang Zhiguo, Zhang Chun, Yu Peng. 2022. Recent advances of the current situation and remediation methods of Cadmium contamination in paddy soil[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 45(1): 49–56 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yushan, Luo Guanghua, Guan Qiwen. 1997. Peroxidation damage of oxygen free radicals induced by cadmium to plant[J]. *Acta Botanica Sinica*, 39(6): 522–526 (in English).
- Jeong S, Moon H S, Nam K, Kim J Y, Kim T S. 2012. Application of phosphate-solubilizing bacteria for enhancing bioavailability and phytoextraction of cadmium (Cd) from polluted soil[J]. *Chemosphere*, 88(2): 204–210.
- Jia Xia, Zhou Chunjuan, Dong Suiming. 2011. Progress of research on the effects of Cd²⁺ stress on wheat and the response of wheat to Cd²⁺ [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 31(4): 786–792 (in Chinese with English abstract).
- Jian Minfei, Yang Yeping, Yu Houping, Gong Qiulin, Chen Yongling. 2015. Influences of different cadmium concentration stress on chlorophyll and its photosynthetic fluorescence characteristics of ramie (*boehmeria nivea*)[J]. *Plant Physiology Journal*, 51(8): 1331–1338 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Chunxiao. 2009. Breeding of Cadmium-tolerant Strain and Its Application in Remediation of Cadmium-contaminated Soils with Bioaugmentation[D]. Tianjing: Nankai University, 1–162 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Jing, Deng Jingling, Sheng Guangyao. 2022. A review of biochar aging and its impact on the adsorption of heavy metals[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 31(10): 2089–2100 (in Chinese with English abstract).
- Joseph P. 2009. Mechanisms of cadmium carcinogenesis[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 238(3): 272–279.
- Khan I, Awan S A, Rizwan M, Ali S, Hassan M J, Brestic M, Zhang X Q, Huang LK. 2021. Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: A review[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 222: 1–15.
- Khadivinia E, Sharafi H, Hadi F, Zahiri H S, Modiri S, Tohidi A, Mousavi A, Salmanian A H, Noghabi K A. 2014. Cadmium biosorption by a glyphosate-degrading bacterium, a novel biosorbent isolated from pesticide-contaminated agricultural soils[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(6): 4304–4310.
- Komárek M, Antelo J, Králová M, Veselská V, Čihalová S, Chrástný V, Ettler V, Filip J, Yu Q, Fein JB, Koretsky C M. 2018. Revisiting models of Cd, Cu, Pb and Zn adsorption onto Fe (III) oxides[J]. *Chemical Geology*, 493: 189–198.
- Kong Xiangzhen, He Wei, Qin Ning, He Jishuang, Wang Yan, Ou Yanghuiling, Xu Fuli. 2011. Assessing acute ecological risks of heavy metals to freshwater organisms by species sensitivity distributions[J]. *China Environmental Science*, 31(9): 1555–1562 (in Chinese with English abstract).
- Krupa P, Kozdrój J. 2007. Ectomycorrhizal fungi and associated bacteria provide protection against heavy metals in inoculated pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 182(1): 83–90.
- Li Cheng, Li Fangbai, Wu Zhifeng, Cheng Jiong. 2015. Impacts of landscape patterns on heavy metal contamination of agricultural top soils in the Pearl River Delta, South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(4): 1137–1144 (in Chinese with English abstract).
- Li Fei, Li Shupeng, Liu Yuanwen, Guo Lili, Liu Ying, Yang Lewei. 2022. Soil bioremediation technologies: Bibliometric analysis, research status and progress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 53(5): 1237–1247 (in Chinese with English abstract).

- Li Hong, Jiang Lan. 2009. The Advances on Microorganism Remediation of Soil Polluted by Heavy Metals[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 37(7): 72–74 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianrui, Xu Yingming. 2022. Study on remediation of cadmium contaminated vegetable soil by vermiculite in Suburban Area[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 50(15): 59–62, 65 (in Chinese with English abstract).
- Li Jing, Zhou Yanwen, Chen Sen, Gao Xiaojie. 2015. Actualities, damage and management of soil cadmium pollution in China[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 21(24): 104–107 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruimei, Wang Guo, Fang Ling. 2002. Effects of complexation of calcium, magnesium, phosphate with organic manure on Cd, Pb uptake by crop[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 11(4): 348–351. (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaohui, Ai Xianbin, Li Liang, Wang Xiyang, Xin Zaijun, Sun Xiaoyan, 2022. Study on passivation effect of new modified rice husk biochar materials on cadmium contaminated soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 31(9): 1901–1908. (in Chinese with English abstract).
- Li G Y, Yan L J, Chen X M, Shiung L S, Jorg R, Qing Y, Yang Y F, Peng W X, Christian S. 2023a. Phytoremediation of cadmium from soil, air and water[J]. *Chemosphere*, 320: 138058.
- Li Y L, Rahman S U, Qiu Z X, Muhammad S S, Farrakh N M, Huang J Z, Sadiq N, Li L, Wang X J, Cheng H F. 2023b. Toxic effects of cadmium on the physiological and biochemical attributes of plants, and phytoremediation strategies: A review[J]. *Environmental Pollution*, 325: 121433.
- Liang X F, Han J, Xu Y M, Sun Y B, Wang L, Tan X. 2014a. In situ field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite[J]. *Geoderma*, 235–236: 9–18.
- Liang X, Chi-Quan H, Gang N, Tang G E, Chen X P, Lei Y R. 2014b. Growth and Cd accumulation of *orychopragmus violaceus* as affected by inoculation of Cd-tolerant bacterial strains[J]. *Pedosphere*, 24(3): 322–329.
- Limcharoensuk T, Sooksawat N, Sumarnrote A, Awutpet T, Kruatrachue M, Pokethitiyook P, Auesukaree C. 2015. Bioaccumulation and biosorption of Cd^{2+} and Zn^{2+} by bacteria isolated from a zinc mine in Thailand[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122: 322–330.
- Liu Hongmei, Yang Kai, Xiao Zhengwu. 2018. Research progress of soil cadmium pollution control and exogenous regulation[J]. *Crop Research*, 32(5): 449–453 (in Chinese with English abstract).
- Liu Rui, Luo Xuan, Li Song, Zhang Hui, Liu Xing. 2020. Biochar aging in soils and its influence on adsorption of heavy metals: A review[J]. *The Administration Technique of Environmental Monitoring*, 32(5): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shiliang, Yang Rongjie, Ma Mingdong, Jiang Pan, Zhao Yan. 2015. Effects of soil cadmium on growth and physiological characteristics of *solanum nigrum* L. plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 34(2): 240–247 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Gao Yunbing, Zhou Yanbing, Pan Yuchun, Dai Yanghua, Gao Bingbo, Yan Yueguan. 2019. Multi scale analysis of spatial variability of heavy metals in farmland soils: Case study of soil Cd in Shunyi District of Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 38(1): 87–94 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wensheng, Zhou Chan, Guo Panjiang, Li Shiyu, Yu Yang. 2010. Influence of heavy metal cadmium on maize seed germination and growth of embryo[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 49(4): 842–844 (in Chinese with English abstract).
- Liu X L, Zhang S Z, Shan X Q, Christie P. 2007. Combined toxicity of cadmium and arsenate to wheat seedlings and plant uptake and anti-oxidative enzyme responses to cadmium and arsenate co-contamination[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 68(2): 305–313.
- Liu Yizhang, Xiao Tangfu, Xiong Yan, Ning Zengping, Shuang Yan, Li Hang, Ma Liang, Chen Haiyan. 2019. Accumulation of heavy metals in agricultural soils and crops from an area with a high geochemical background of cadmium, southwestern China[J]. *Environmental Science*, 40(6): 2877–2884 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuechang, Li Baozhen, Wang Tao, Wang Lan. 2020. Study of two microbes combined to remediate fields soil cadmium pollution[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34(4): 364–369 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z D, Zhou Q, Hong ZN, Xu R K. 2017. Effects of surface charge and functional groups on the adsorption and binding forms of Cu and Cd on roots of *indica* and *japonica* rice cultivars[J]. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1–9.
- Liu Zhaobing, Ji Xionghui, Peng Hua, Shi Lihong, Li Hongshun. 2010. Effects and action mechanisms of different water management modes on rice Cd absorption and accumulation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(4): 908–914 (in Chinese with English abstract).
- Loganathan P, Vigneswaran S, Kandasamy J, Naidu R. 2012. Cadmium sorption and desorption in soils: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(5): 489–533.
- Lu Deliang, Qiao Lu, Chen Lixin, Hu Bin, Zhou Jianping, Wang Zhanchao, Wang Yan. 2012. Soil pollution characteristics by heavy metals and the plant enrichment in green space of urban areas of Harbin[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 48(8): 16–24 (in Chinese with English abstract).
- Lu Hongjuan, Zhou Delin, Ye Wenling, Fan Ting, Ma Youhua. 2019. Advances in application of bio-organic fertilizer in soil improvement and remediation of heavy metals pollution[J]. *Environmental Pollution and Prevention and Control*, 41(11): 1378–1383 (in Chinese with English abstract).

- Lu Weihong, Liu Juan, Zhang Naiming, Zhang Yujuan, Hao Kangwei, Ren Lijuan, Yu Chang, Hou Hong. 2022. Study on the accumulation of heavy metals and influencing factors in the soil of facility vegetable fields[J]. *China Environmental Science*, 42(6): 2744–2753 (in Chinese with English abstract).
- Luo Yongming, Teng Ying. 2018. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 33(2): 145–152 (in Chinese with English abstract).
- Lux A, Martinka M, Vaculik M, White P J. 2011. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review[J]. *Journal of Experimental Botany*, 62(1): 21–37.
- Ma Jiaoyang, Bao Xinchun, Wang Kun, Wang Chengchen, Cui Daolei, Zhang Mengyan, Xiang Ping. 2021. Human health risk assessment of cadmium in soils: Role of bioavailability and toxic effects[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 16(6): 120–132 (in Chinese with English abstract).
- Ma Lijuan, Shao Yun, Li Chunxi, Jiang Lina. 2007. Effects of Cd²⁺ stress on growth and respiration of wheat seedling[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 27(6): 1185–1190 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yu, Li Tuanjie, Wang Di, Peng Yanchao, Cai Yucan, Wang Aijun. 2011. Pollution and potential ecological risk of heavy metals in sediment of coastal wetland of the Pearl River Estuary[J]. *Tropical Geography*, 31(4): 353–356 (in Chinese with English abstract).
- Mostafaei G R, Aseman E, Asgharnia H, Akbari H, Iranshahi L, Sayyaf H. 2016. Efficiency of the earthworm *Eisenia fetida* under the effect of organic matter for bioremediation of soils contaminated with cadmium and chromium[J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 33: 827–834.
- Mu Tingting, Zhou Tong, Xu Jian, Gan Xinhong. 2022. Accumulation of cadmium and major controlling factors in soil-wheat system[J]. *Soil*, 54(3): 556–563 (in Chinese with English abstract).
- Niu Guoliang. 2022. Adsorption Characteristics of Cadmium by Organically Modified Clay Minerals and Its Immobilization Effect on Cadmium Contaminated Soil[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 1–75 (in Chinese with English abstract).
- Prapagdee B, Chumphonwong N, Khonsue N, Mongkolsuk S. 2012. Influence of cadmium resistant bacteria on promoting plant root elongation and increasing cadmium mobilization in contaminated soil[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 21(5): 1186–1191.
- Qi X, Tam N F Y, Li W. C, Ye Z H. 2020. The role of root apoplastic barriers in cadmium translocation and accumulation in cultivars of rice (*Oryza sativa* L.) with different Cd-accumulating characteristics[J]. *Environmental Pollution*, 264: 1–11.
- Qin Ran, Lou Fei, Dai Liangyu, Wang Hu, Zhou Kai, He Shouyang, He Tenbing, Fu Tianling. 2021. Screening of low-bioaccumulation rice varieties in cadmium contaminated paddy fields with high geological background[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 52(10): 2709–2716 (in Chinese with English abstract).
- Qin S Y, Liu H G, Nie Z J, Rengel Z, Gao W, Li C, Zhao P. 2020. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: A review[J]. *Pedosphere*, 30(2): 168–180.
- Qin Tiancai, Wu Yushu, Huang Qiaoyun, Hu Hongqing. 1997. Effects of cadmium lead single and combination pollution on the contents of ascorbic acid in *Brassica chinensis* L[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 16(3): 31–34 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jikai, Chen Qinglang, Chen Lingzhi, Han Rongzhuang, Yao Yiqun, Kong Fanzhi, Miao Yougui. 1982. The soil contaminated by cadmium and crop[J]. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 6(2): 131–141 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jinghua, Fan Jian, Sun Yu, Liao Qilin, Xu Weiwei, Liu Ling, Han Chao, Gu Xueyuan. 2023. Refined imaging of pH and O₂ across the passivated soil-root micro-interfaces[J]. *China Environmental Science*, 43(4): 1782–1790 (in Chinese with English abstract).
- Ren Lingwei. 2017. The Remediation of Heavy Metal Contaminated Farmland Soils by Typical Mineral Materials[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1–80 (in Chinese with English abstract).
- Ren Z L, Sivry Y, Dai J, Tharaud M, Cordier L, Benedetti M F. 2015. Multi-element stable isotopic dilution and multi-surface modelling to assess the speciation and reactivity of cadmium and copper in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 66(6): 973–982.
- Riaz M, Kamran M, Fang Y, Wang Q, Cao H, Yang G, Wang X. 2021. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 402: 123919.
- Rong Xingmin, Huang Qiaoyun, Chen Wenli, Liang Wei. 2008. Interaction mechanisms of soil minerals with microorganisms and their environmental significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(1): 376–387 (in Chinese with English abstract).
- Salah S A, Barrington S F. 2006. Effect of soil fertility and transpiration rate on young wheat plants (*Triticum aestivum*) Cd/Zn uptake and yield[J]. *Agricultural Water Management*, 82: 177–192.
- Seregin I V, Shpigun L K, Ivanov V B. 2004. Distribution and toxic effects of cadmium and lead on maize roots[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 51: 525–533.
- Shan Hong. 2009. Impact and Mechanism of Organic Amendments on Cadmium Bioavailability in Soils [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 1–103 (in Chinese with English abstract).
- Shao Yun, Feng Shuli, Li Chunxi, Jiang Lina, Hou Xiaoli, Lu Xuyang. 2006. Effects of Stress of Cd²⁺ on physiological activity of wheat seedling[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 34(5): 836–838 (in Chinese with English abstract).
- Shen Yichen, Tu Chen, Qiu Wei, Zhu Xia, Fan Wanyi, Cao Zhenyu, Zhu Xiaofang, Luo Yongming. 2023. Cadmium accumulation and pollution reduction potential of different rice varieties on cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 39(4): 547–555 (in Chinese with English abstract).
- Shen Jianxiu. 2017. Response of *Robinia pseudoacacia* to cadmium stress after inoculation with rhizobium[D]. Xi'an: Northwest A&F

- University of Science and Technology, 1–63 (in Chinese with English abstract).
- Shi Nongnong, Chen Zhiwei. 1999. Effects of cadmium (Cd) stress on the sprouting of rice and its hydrolase activities[J]. *Agro-environmental Protection*, 18(5): 213–216 (in Chinese with English abstract).
- Shi Qiongbin. 2016. Effects of Organic Materials on the Particulate Organic Matter and Pytoavailability of Cadmium within Purple Paddy Soil [D]. Chongqing: Southwest University, 1–56 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yangyang. 2020. Effects of Biochar Combined with Cd-tolerant Bacteria on Remediation of Cd-contaminated Soil and Safe Production of Cabbage[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 1–69 (in Chinese with English abstract).
- Sima Xiaofeng, Meng Yu, Wu Dongbiao, Yu Peng, Shen Xiancheng, Li Kun. 2021. Study on combined remediation of cadmium contaminated soil by biochar-hyperaccumulators[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 49(6): 80–84 (in Chinese with English abstract).
- Siripornadulsil S, Siripornadulsil W. 2013. Cadmium-tolerant bacteria reduce the uptake of cadmium in rice: Potential for microbial bioremediation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 94: 94–103.
- Song Xiaowang. 2020. Adsorption/Passivation of Cadmium by Fe–Mn Oxide-biochar [D]. Gaungzhou: Guangdong University of Technology, 1–74 (in Chinese with English abstract).
- Song Yuting, Lei Ningfei. 2018. China's cadmium pollution land status and restoration measures[J]. *Journal of Xichang University (Natural Science Edition)*, 32(3): 79–83 (in Chinese with English abstract).
- Sterckeman T, Thomine S. 2020. Mechanisms of cadmium accumulation in plants. critical reviews in plant[J]. *Sciences*, 39(4): 322–359.
- Su Dechun, Huang Huanzhong. 2002. The phytoremediation potential of oilseed rape (*B. juncea*) as a hyperaccumulator for cadmium contaminated soil[J]. *China Environmental Science*, 22(1): 48–51 (in Chinese with English abstract).
- Su Ping. 2009. An exploration into the sulphide precipitation method and its effect on metal sulphide removal[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, (4): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jingwei, Hu Gongren, Yu Ruilian, Cui Jiayong, Yan Yan, Zhang Yunfeng. 2020. Bioavailability of heavy metals in soil-tea plant system of Tieguanyin tea garden[J]. *Environmental Chemistry*, 39(10): 2765–2776 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y B Li Y, Xu Y M, Liang X F, Wang L. 2015. In situ stabilization remediation of cadmium (Cd) and lead (Pb) co-contaminated paddy soil using bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 105–106: 200–206.
- Tang Yetao, Qiu Rongliang, Zeng Xiaowen, Fang Xiaohang. 2005. A new found Pb/Zn/Cd hyperaccumulator-arabis *Paniculata* L.[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 44(4): 135–136 (in Chinese).
- Tang Fei, Lei Ming, Tang Zhen, Yang Renbin, Song Zhengguo, Tang Shirong, Peng Sha, Liao Haiyu. 2013. Accumulation characteristic and dynamic distribution of Cd in different genotypes of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 32(6): 1092–1098 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jieming, Yao Aijun, Liang Yeheng. 2012. Heavy metals pollution in the soil of Guangzhou Wanmu Orchard: Investigation and assessment[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 7(2): 27–35 (in Chinese with English abstract).
- Tian Weili, Liu Dan, Wu Jiasen, Wang Lijiang, Chen Kunbai. 2013. Application of animal and plant combination remediation technology in complex heavy metals contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 27(5): 188–192 (in Chinese with English abstract).
- Tian Wengang, Yao Jiabin, Jiang Shang, Liu Yong. 2020. Research progress of bioremediation technology in the treatment of heavy metal contaminated soil[J]. *Environment and Development*, 32(12): 34–35 (in Chinese with English abstract).
- Tian Wen, Zong Dapeng, Fang Chenggang, Wang Chengchen, Wang Jianmin, Xiang Ping. 2022. Health risk and toxic effect of heavy metals in soils from typical vegetable planting areas in southwest China[J]. *China Environmental Science*, 42(10): 4901–4908 (in Chinese with English abstract).
- Tsekova K, Todorova D, Dencheva V, Ganeva S. 2010. Biosorption of copper (II) and cadmium (II) from aqueous solutions by free and immobilized biomass of *Aspergillus niger*[J]. *Bioresource Technology*, 101(6): 1727–1731.
- Wang C C, Zhang Q C, Yan C A, Tang G Y, Zhang M Y, Bao Y B, Gu R H, Xiang P. 2023a. Heavy metal(loids) in agriculture soils, rice, and wheat across China: Status assessment and spatiotemporal analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 882: 163361.
- Wang F Y, Cheng P, Zhang S, Zhang S, Sun Y H. 2022b. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi and soil amendments to remediation of a heavy metal-contaminated soil using sweet sorghum[J]. *Pedosphere*, 32(6): 844–855.
- Wang Hongpeng. 2020. Study on In-situ Passivation Materials for Remediation of Calcareous Cadmium Contaminated Soil[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–85 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huizhong, He Cuiping. 2002. Effects of the heavy metals stress on root growth and vigour of turfgrass[J]. *Grassland of China*, 24(3): 55–58 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jin, Su Xianfa, Wang Dongchao, Wang Xuefeng, Zhu Guifen. 2008. The effect of copper, cadmium to growth and catalase and amylase of wheat[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science)*, 36(2): 92–94 (in Chinese with English abstract).
- Wang K, Qiao Y H, Zhang H Q, Yue S Z, Li H F, Ji X H, Liu L S. 2018. Bioaccumulation of heavy metals in earthworms from field contaminated soil in a subtropical area of China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148: 876–883.

- Wang L, Zou R, Cai J H, Liu G H, Jiang Y, Chai G Q, Qin S, Fan C W. 2023b. Effect of Cd toxicity on root morphology, ultrastructure, Cd uptake and accumulation of wheat under intercropping with *Solanum nigrum* L[J]. *Heliyon*, 9(6): 1–9.
- Wang Lin, Xu Yingming, Sun Yang, Liang Xuefeng, Qin Xu. 2010. Immobilization of cadmium contaminated soils using sepiolite and its compound materials[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 4(9): 2093–2098 (in Chinese with English abstract).
- Wang Meiyan, Liu Yang, Zhu Weichen, Rong Kaiyu, Yang Feiyu, Sun Bowen, Wang Fei. 2020. Distribution and present situation analysis of heavy metal pollution in green space soil of Tianjin Central Urban Areas[J]. *Environmental Science and Technology*, 43(4): 184–191 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qikai, Guo Fenjuan, Sun Guohong, Lin Dasong, Xu Yingming, Liu Jingru, Yu Shilei. 2015. Combined effects of biochar and fertilizer on cadmium contaminated soil remediation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 32(6): 583–589 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qin'er, Zeng Ying, Li Limei. 2007. Advances on the effect of cadmium damage on physiology and ecology of rice[J]. *Northern Rice*, (4): 12–16 (in Chinese with English abstract).
- Wang Saiyi, Wang Yijun, Zhao Yazhou, Hou Yanqi. 2023. Research advances in soil heavy metal pollution and its phytoremediation[J]. *Journal of Agriculture*, 13(2): 20–23 (in Chinese with English abstract).
- Wang S, Gao B, Zimmerman A R, Li Y, Ma L, Harris W. G, Migliaccio K W. 2015. Physicochemical and sorptive properties of biochars derived from woody and herbaceous biomass[J]. *Chemosphere*, 134: 257–262.
- Wang Xing, Wang Gejiao, Shi Kaixiang. 2023. Research progress in microbial detoxification of cadmium and bioremediation based on microorganism–plant interaction[J]. *Microbiology Bulletin*, 50(4): 1666–1680 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Xing W, Liang X, Xu Y, Wang Y, Huang Q, Li L. 2022a. Effects of exogenous additives on wheat Cd accumulation, soil Cd availability and physicochemical properties in Cd-contaminated agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 808: 152090.
- Wang Yongquan, Li Ye, Hu Jin, Zhao Jianbo, Jing Qi. 2014. Research on the remediation technology of Cd contaminated agricultural soil by composite regulating agent[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 36(5): 123–128 (in Chinese with English abstract).
- Wei Zhongping, Zhu Yongle, Zhao Chutong, Tang Jiayi, Gao Yingxu, Li Mengxue. 2020. Research advances on biochar adsorption mechanism for heavy metals and its application technology[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 51(3): 741–747 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y J, Ma L Y, Liu Q Z, Vestergård M, Topalovic O, Wang Q, Zhou Q Y, Huang L K, Yang X E, Feng Y. 2020. The plant-growth promoting bacteria promote cadmium uptake by inducing a hormonal crosstalk and lateral root formation in a hyperaccumulator plant *Sedum alfredii*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 395: 122661.
- Xie Y, He N, Wei M, Wen T Y, Wang X T, Liu H K, Zhong S Q, Xu H. 2021. Cadmium biosorption and mechanism investigation using a novel *Bacillus subtilis* KC6 isolated from pyrite mine[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 301: 145–152.
- Xing Ting. 2022. Characteristics of Cadmium Adsorption in Soil and Cadmium Accumulation in Crops in Belt Intercropping System of Maize–soybean[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 1–52 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Jieqian, Gong Xiaofeng, Jiang Liang, Li Haolin, Yuan Shaofen, Lin Yuan, Wu Li. 2021. Toxic effects of zinc and cadmium on the benthic organisms in sediments of Lake Poyang and verification of quality guideline[J]. *Journal of Lake Sciences*, 33(6): 1687–1700 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Juan, Wang Yihan, Chen Chang, Hou Jingtao, Xu Yun, Wang Mingxia, Tan Wenfeng. 2022. Research progress on the remediation of *Sedum plumbizincicola* in cadmium-contaminated farmland soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 41(3): 441–454 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Minxian, Wu Di, Xu Xiangning, Zheng Mingyang, Xing Tao. 2021. Advances in toxic effects of soil heavy metal cadmium on higher plants[J]. *Journal of Ecotoxicology*, 16(6): 133–149 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Mingyue, Guo Jiahang, Zhang Fuqiong, Han Fei, Liu Jianhong, Yang Yun, Zhong Hao, Huang Jingxin. 2022. Effects of different nitrogen fertilizers on remediation of soil cadmium pollution by *Bidens pilosa*[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 44(6): 1592–1600 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Yuhui, Yang Xiaoe, Ye Zhengqian, He Bing. 2004. Comparing the characteristics of growth response and accumulation of cadmium and lead by *Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, (6): 101–106 (in Chinese with English abstract).
- Xu Hongxia, Weng Xiaoyan, Mao Weihua, Yang Yong. 2005. Effects of cadmium stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and excitation energy distribution in leaves of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 19(4): 338–342 (in Chinese with English abstract).
- Xu Liangjiang, Zhang Mingli, Yang Hao. 2011. Effects of cadmium stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and excitation energy distribution in leaves of rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 39(6): 3419–3422 (in Chinese with English abstract).
- Xu P, Sun C X, Ye X Z, Xiao W D, Zhang Q, Wang Q. 2016. The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132: 94–100.
- Xu Y, Liang X F, Xu Y M, Qin X, Huang Q Q, Wang L, Sun Y B.

2017. Remediation of heavy metal-polluted agricultural soils using clay minerals: A review[J]. *Pedosphere*, 27(2): 193–204.
- Yan Huaxiao, Zhao Hui, Gao Dengzheng. 2007. Preliminary study of the effect of cadmium ions on maize seed germination and growth[J]. *Crops*, 23(5): 25–28 (in Chinese with English abstract).
- Yan Shulan, Zhao Xiuhong, Luo Qishi. 2020. Bibliometrics-based development trends of solidification/stabilization technology for the remediation of sites contaminated by heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 39(2): 229–238 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jurong, Huang Yi. 1994. Mechanism of heavy metal tolerance of plants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 15(6): 20–26 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jurong, He Jianqun, Zhang Guoxiang, Mao Xianqiang. 1995. Tolerance mechanism of crops to Cd pollution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 6(1): 87–91 (in Chinese with English abstract).
- Yang Mengli. 2019. Study on Passivation and Aftereffect of Cadmium Pollution in Farmland Soil[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 1–71 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenhao. 2022. Research on Remediation Effect of Compound Microbial Inoculum on Cadmium Contaminated Wheat Soil[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 1–57 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xianni. 2022. The Synergistic Effects of Calcite Enriched Biochar and Phosphorus Solubilizing Bacteria on Cadmium Immobilization in a Paddy Soil: The Role of Organic Acids and Organic Matters[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 1–103 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiong. 2022. Mechanisms of Heavy Metals Adsorption on Typical Iron and Manganese Oxides under Electrochemical Control and Its Application in Contaminated Soils Remediation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 1–191 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yanping. 2019. Study on Remediation and Influencing Factors of Mineral Materials in Soil Contamination by Heavy Metals[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–85 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z, Zhang Z, Chai L, Wang Y, Liu Y, Xiao R Y. 2016. Bioleaching remediation of heavy metal-contaminated soils using *Burkholderia* sp. Z-90[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 301: 145–152.
- Yu Fangming, Liu Kehui, Liu Hua, Deng Hua, Zhou Zhenming, Chen Zhaoshu, Li Shunming. 2012. Antioxidative responses to cadmium stress in the leaves of *Oryza saliva* L. in different growth period[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 21(1): 88–93 (in Chinese with English abstract).
- Yuan C, Li Q, Sun Z, Sun H. 2021. Effects of natural organic matter on cadmium mobility in paddy soil: A review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 104: 204–215.
- Zhang G, Fukami M, Sekimoto H. 2000. Genotypic differences in effects of cadmium on growth and nutrient compositions in wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 23(9): 1337–1350.
- Zhang Han, Li Huan, Su Changqing, Deng Xinhui. 2023. Research progress of microbial remediation of cadmium pollution[J]. *Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition)*, 45(3): 53–65 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Heng, Xiong Mingbiao, Wang Qianxin, Sun Bowen, Rao Yichi, Cheng Zhang, Xu Xiaoxun, Yang Zhanbiao, Xian Junren, Zhu Xuemei, Yang Shaoping, Yang Yuanxiang. 2022. Remediation potential of taraxacum kok-saghyz rodin on lead and cadmium contaminated farmland soil[J]. *Environmental Science*, 43(8): 4253–4261 (in Chinese with English abstract).
- Zhang K, Yi Y Q, Fang Z Q. 2023. Remediation of cadmium or arsenic contaminated water and soil by modified biochar: A review[J]. *Chemosphere*, 311: 136914.
- Zhang Lihong, Li Peijun, Li Xuemei, Meng Xuelian, Xu Chengbin. 2005. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 24(4): 458–460 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lu. 2021. Study on the Construction of Composite Microbial Agent and Its Remediation Effect on Pb and Cd Contaminated Soil from Iron Tailings[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 1–68 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qunli, Xie Haiyun, Chen Jialing, Song Zixin, Jin Yanling, Chen Haijun, Zeng Peng, Liu Dianwen. 2024. Research status of heavy metal contaminated soil remediation by solidification/stabilization technology[J]. *Environmental Protection Science*, 50(3): 96–102 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wangshou, Li Xiaoxiu, Huang Wenjiang, Li Jianhui, Ren Wanping, Gao Zhongling. 2010. Comprehensive assessment methodology of soil quality under different land use conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26(12): 311–318 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Weilan, Zhang Yue, Liu Ping, Duan Changqun, Liu Change. 2022. Research progress of earthworm in phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 45(8): 155–165 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoxu. 2020. Effect of Exogenous Organic Matter on Migration and Transformation of Heavy Metal Cadmium in Rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 1–97 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoying, Chen Su, Liu Ying, Feng Tianzheng, Zhao Lei. 2023. Research progress in biochar aging and its effect on the adsorption and fixation of heavy metals[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 40(4): 852–863 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xuhui. 2019. The Effect of Cadmium-Tolerant Microorganism Combined with Biochar on Cadmium Fractions of Soil and Cadmium Uptake by Plants[D]. Jiangsu: Nanjing Agricultural University, 1–88 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Yali, Shen Qirong, Jiang Yang. 2001. Effect of organic manure on the amelioration of Cd-polluted soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 38(2): 212–218 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuan, Xiao Zufei, Li Gang, Feng Jing, Shi Yongsong. 2019. Review and prospection of soil heavy metal remediation with combined earthworm-plant technology[J]. *Environmental Chemistry*, 38(11): 2510–2518 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhuoya, Wang Zhigang, Bi Yongguo, Li Yueqiao, Huang Qiuxian. 2009. The distributions and risk assessment of heavy metals in the soils from different urban greenland region of Baoding city[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 32(2): 16–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Chuikang, Mao Zhansheng, Fang Xianzhi, Zhao Keli, Ma Jialun, Liu Dan, Ye Zhengqian. 2023. Effect of AC electric field frequency on remediation of cadmium contaminated soil by willow-Sedum alfredii Hance mixed planting[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 17(9): 3046–3053 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Geng, Deng Chenggang, Cao Linyou, Chen Shuai, Tian Yun, Lu Xiangyang. 2016. Screening, identification and characterization of a cadmium resistant strain[J]. *Chemistry and Bioengineering*, 33(3): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jing, Wang Zhe, Gu Guolin, Han Yujie, Liu Chunjiang. 2014. Characteristics of the soil heavy metal cadmium in Shanghai Binjiang Forest Park[J]. *World Journal of Forestry*, (3): 28–33 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Liqiang, Yin Bin, Wu Longhua, Luo Yongming. 2013. Effects of different organic amendments on uptake of heavy metals in rice from contaminated soil[J]. *Soils*, 45(2): 227–232 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Qihong, Huang Daoyou, Liu Guosheng, Zhu Guangxu, Zhu Hanhua, Liu Shengping. 2009. Effects and mechanism of lime and sepiolite on remediation of Cd contaminated soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 23(1): 111–116 (in Chinese with English abstract).
- Zou Jiahui, Lin Qing, Shao Mingyan, Xu Shaohui. 2023. Leaching behavior of Cu, Cd, and Zn in combined pollution soil as affected by biochar[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 43(9): 333–345 (in Chinese with English abstract).
- 选及钝化效果[J]. *生态与农村环境学报*, 36(1): 115–120.
- 陈宏, 徐秋曼, 王葳. 2000. 镉对小麦幼苗脂质过氧化和保护酶活性的影响[J]. *西北植物学报*, 20(3): 399–403.
- 陈丽丽, 鲁伟丹, 李俊华, 罗彤, 孙奔奔. 2022. 三种植物生长与富集特性对镉污染土壤修复的响应[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 40(2): 172–179.
- 陈敏妮, 聂小奇, 张杏锋, 何川黔, 高波. 2023. 蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复锌铅镉污染土壤的影响[J]. *环境科学*, 44(3): 1714–1726.
- 陈媛. 2007. 土壤中镉及镉的赋存形态研究进展[J]. *广东微量元素科学*, 14(7): 7–13.
- 陈泽雄, 朱凰榕, 周志军, 赵秋香. 2019. 改性蒙脱石修复镉污染对水稻根际土壤酶活性的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 36(4): 528–533.
- 程志龙, 王翔翔, 杨英, 吴亮, 张田田, 周语桐, 章飞翔. 2023. 不同改良剂对土壤-水稻体系中 Cd 迁移积累的影响[J]. *环境科学与技术*, 46(2): 24–31.
- 慈敦伟, 姜东, 戴廷波. 2005. 镉毒害对小麦幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. *麦类作物学报*, 25(5): 88–91.
- 崔俊义, 马友华, 王陈丝丝, 陈亮妹, 吴林春, 胡宏祥. 2017. 农田土壤镉污染原位钝化修复技术的研究进展[J]. *中国农学通报*, 33(30): 79–83.
- 丁淑芳, 谢正苗, 吴卫红, 周溶冰, 陈建军. 2012. 含磷物质原位化学钝化重金属污染土壤的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 40(35): 17093–17097.
- 董立宽, 方斌. 2017. 茶园土壤重金属乡镇尺度下空间异质性分析——以江浙优质名茶种植园为例[J]. *地理研究*, 36(2): 391–404.
- 董萌, 赵运林, 库文珍, 虞瑞锐, 戴枚斌, 易合成. 2011. 洞庭湖湿地 8 种优势植物对镉的富集特征[J]. *生态学杂志*, 30(12): 2783–2789.
- 范占煌, 张振乾. 2021. 甘蓝型油菜在镉污染土壤修复中的应用研究[J]. *中国农学通报*, 37(30): 72–76.
- 冯凤玲, 成杰民, 王德霞. 2006. 蚯蚓在植物修复重金属污染土壤中的应用前景[J]. *土壤通报*, 37(4): 809–814.
- 顾明华, 李志明, 陈宏, 雷静, 方圆, 唐翠荣, 沈方科. 2020. 施锰对土壤锰氧化物形成及镉固定的影响[J]. *生态环境学报*, 29(2): 360–368.
- 郭炳跃, 杨鲲鹏, 张璟, 戴俊成, 程知言, 张亚平. 2023. 二氧化锰/氨基改性生物炭对铅、镉复合污染土壤的钝化修复研究[J]. *生态与农村环境学报*, 39(3): 422–428.
- Haider U F. 2021. 生物炭与微生物(哈茨木霉和枯草芽孢杆菌)复合施用可提高谷类豆科作物的生产力、修复土壤镉污染[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 1–153.
- 韩娟, 赵金莉, 贺学礼. 2016. 白洋淀植物重金属积累特性的研究[J]. *河北农业大学学报*, 39(4): 31–36.
- 何俊瑜, 任艳芳, 任明见, 常会庆, 王阳阳. 2009. 镉对不同小麦品种种子萌发的影响[J]. *中国农学通报*, 25(10): 235–240.
- 洪仁远, 杨广笑, 刘东华, 蒲长光. 1991. 镉对小麦幼苗的生长和生理生化反应的影响[J]. *华北农学报*, 6(3): 70–75.

附中文参考文献

- 安婷婷, 黄帝, 王浩, 张一, 陈应龙. 2021. 植物响应镉胁迫的生理生化机制研究进展[J]. *植物学报*, 56(3): 347–362.
- 曹瑞芹, 杨忠芳, 余涛. 2024. 镉锌稳定同位素地球化学及其在土壤等地质体中的危害与治理研究进展[J]. *中国地质*, 51(3): 833–864.
- 常海伟, 刘代欢, 贺前锋. 2018. 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*, 38(2): 120–127.
- 陈保冬, 于萌, 郝志鹏, 谢伟, 张莘. 2019. 丛枝菌根真菌应用技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 30(3): 1035–1046.
- 陈盾, 王小兵, 汪晓丽, 封克, 张绪美. 2020. 镉污染红壤的钝化剂筛

- 侯秀,王祖伟. 2009. 铁锰氧化物添加对土壤镉有效态及生物效应的影响[J]. *农业环境科学学报*, 28(11): 2313-2317.
- 胡青云,唐佑根,张志强,罗颖,张小毅,肖欢,敖和军. 2021. 4种修复剂对镉污染农田土壤及糙米的降镉效果[J]. *湖南农业科学*, (3): 51-54.
- 黄冬芬. 2008. 水稻对土壤重金属镉的响应及其调控[D]. 扬州: 扬州大学, 1-136.
- 黄柯依,刘玉,任雯婧,贺信,张臻,黄芸培,姜晓婷,黄高翔. 2023. 两种不同土壤对水稻镉吸收及其动态积累特征的影响[J]. *土壤通报*, 54(2): 432-440.
- 黄擎,刘博睿,蔡华杰,包丽颖. 2014. 冻融循环及有机肥配施对黑土中镉形态的影响[J]. *环境污染与防治*, 36(12): 38-42.
- 黄卫,庄荣浩,刘辉,王志国,张纯,喻鹏. 2022. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 45(1): 49-56.
- 黄玉山,罗广华,关荣文. 1997. 镉诱导植物的自由基过氧化损伤[J]. *植物学报*, 39(6): 522-526.
- 贾夏,周春娟,董岁明. 2011. 镉胁迫对小麦的影响及小麦对镉毒害响应的研究进展[J]. *麦类作物学报*, 31(4): 786-792.
- 简敏菲,杨叶萍,余厚平,龚秋林,陈勇玲. 2015. 不同浓度 Cd²⁺胁迫对苧麻叶绿素及其光合荧光特性的影响[J]. *植物生理学报*, 51(8): 1331-1338.
- 姜春晓. 2009. 高效抗重金属菌株的选育及其在生物修复镉污染土壤中的应用[D]. 天津: 南开大学, 1-162.
- 姜晶,邓精灵,盛光遥. 2022. 生物炭老化及其对重金属吸附影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 31(10): 2089-2100.
- 孔祥臻,何伟,秦宁,何珂霜,王雁,欧阳慧灵,徐福留. 2011. 重金属对淡水生物生态风险的物种敏感性分布评估[J]. *中国环境科学*, 31(9): 1555-1562.
- 李铨,李芳柏,吴志峰,程炯. 2015. 景观格局对农业表层土壤重金属污染的影响[J]. *应用生态学报*, 26(4): 1137-1144.
- 李霏,李书鹏,刘渊文,郭丽莉,刘颖,杨乐巍. 2022. 基于文献计量的土壤生物修复技术研究现状及进展分析[J]. *土壤通报*, 53(5): 1237-1247.
- 李宏,江澜. 2009. 土壤重金属污染的微生物修复研究进展[J]. *贵州农业科学*, 37(7): 72-74.
- 李剑睿,徐应明. 2022. 蛭石修复城郊镉污染菜地土壤研究[J]. *安徽农业科学*, 50(15): 59-62,65.
- 李婧,周艳文,陈森,高小杰. 2015. 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*, 21(24): 104-107.
- 李瑞美,王果,方玲. 2002. 钙镁磷肥与有机物料配施对作物铅吸收的控制效果[J]. *土壤与环境*, 11(4): 348-351.
- 李晓晖,艾仙斌,李亮,王玺洋,辛在军,孙小艳. 2022. 新型改性稻壳生物炭材料对镉污染土壤钝化效果的研究[J]. *生态环境学报*, 31(9): 1901-1908.
- 刘红梅,杨凯,肖正午. 2018. 土壤镉污染治理及外源调控研究进展[J]. *作物研究*, 32(5): 449-453.
- 刘蕊,罗璇,李松,张辉,刘兴. 2020. 生物炭在土壤中的老化及其吸附重金属的研究进展[J]. *环境监测管理与技术*, 32(5): 1-5.
- 刘柿良,杨容子,马明东,蒋潘,赵燕. 2015. 土壤镉胁迫对龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 幼苗生长及生理特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 34(2): 240-247.
- 刘伟,郜允兵,周艳兵,潘瑜春,戴华阳,高秉博,阎跃观. 2019. 农田土壤重金属空间变异多尺度分析——以北京顺义土壤 Cd 为例[J]. *农业环境科学学报*, 38(1): 87-94.
- 刘文胜,周婵,郭盘江,李世友,于洋. 2010. 镉对玉米种子萌发及胚生长的影响[J]. *湖北农业科学*, 49(4): 842-844.
- 刘意章,肖唐付,熊燕,宁增平,双燕,李航,马良,陈海燕. 2019. 西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征[J]. *环境科学*, 40(6): 2877-2884.
- 刘悦畅,李保珍,王涛,王兰. 2020. 2种菌联合修复农田土壤镉污染的研究[J]. *水土保持学报*, 34(4): 364-369.
- 刘昭兵,纪雄辉,彭华,石丽红,李洪顺. 2010. 水分管理模式对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. *应用生态学报*, 21(4): 908-914.
- 卢德亮,乔璐,陈立新,胡斌,周健平,王展超,王燕. 2012. 哈尔滨市城区绿地土壤重金属污染特征及植物富集[J]. *林业科学*, 48(8): 16-24.
- 鲁洪娟,周德林,叶文玲,樊霆,马友华. 2019. 生物有机肥在土壤改良和重金属污染修复中的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 41(11): 1378-1383.
- 卢维宏,刘娟,张乃明,张玉娟,郝康伟,任利娟,于畅,侯红. 2022. 设施菜地土壤重金属累积及影响因素研究[J]. *中国环境科学*, 42(6): 2744-2753.
- 骆永明,滕应. 2018. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. *中国科学院院刊*, 33(2): 145-152.
- 马娇阳,保欣晨,王坤,王成尘,崔道雷,张梦妍,向萍. 2021. 土壤镉污染的人体健康风险评估研究: 生物有效性与毒性效应[J]. *生态毒理学学报*, 16(6): 120-132.
- 马丽娟,邵云,李春喜,姜丽娜. 2007. Cd²⁺胁迫对小麦幼苗生长及呼吸作用的影响[J]. *西北植物学报*, 27(6): 1185-1190.
- 马玉,李团结,王迪,彭艳超,蔡钰灿,王爱军. 2011. 珠江口滨海湿地沉积物重金属污染现状及潜在生态危害[J]. *热带地理*, 31(4): 353-356.
- 牟婷婷,周通,徐建,甘信宏. 2022. 土壤-小麦体系的镉积累特征及影响因素[J]. *土壤*, 54(3): 556-563.
- 牛国梁. 2022. 有机改性粘土矿物吸附镉的特征及其对污染土壤镉的钝化效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 1-75.
- 秦冉,娄飞,代良羽,王虎,周凯,何守阳,何腾兵,付天岭. 2021. 地质高背景区镉污染稻田中低累积水稻品种筛选[J]. *南方农业学报*, 52(10): 2709-2716.
- 秦天才,吴玉树,黄巧云,胡红青. 1997. 镉铅单一和复合污染对小白菜抗坏血酸含量的影响[J]. *生态学杂志*, 16(3): 31-34.
- 任继凯,陈清朗,陈灵芝,韩荣庄,姚依群,孔凡志,缪有贵. 1982. 土壤镉污染与作物[J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 6(2): 131-141.
- 任静华,范健,孙宇,廖启林,许伟伟,刘玲,韩超,顾雪元. 2023. 钝化土壤根际 pH 值和 O₂ 精细变化特征研究[J]. *中国环境科学*, 43(4): 1782-1790.
- 任凌伟. 2017. 典型矿物材料钝化修复重金属污染农田土壤的作用及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1-80.

- 荣兴民, 黄巧云, 陈雯莉, 梁巍等. 2008. 土壤矿物与微生物相互作用的机理及其环境效应[J]. *生态学报*, 28(1): 376-387.
- 陕红. 2009. 有机物对土壤镉生物有效性的影响及机理[D]. 北京: 中国农业科学院, 1-103.
- 邵云, 冯淑利, 李春喜, 姜丽娜, 候小丽, 鲁旭阳. 2006. Cd²⁺胁迫对小麦幼苗生理活性的影响[J]. *安徽农业科学*, 34(5): 836-838.
- 沈一尘, 涂晨, 邱炜, 朱侠, 范婉仪, 曹振宇, 朱晓芳, 骆永明. 2023. 镉污染土壤上不同水稻品种的镉积累与减污潜力[J]. *生态与农村环境学报*, 39(4): 547-555.
- 沈建秀. 2017. 接种根瘤菌后刺槐对镉胁迫的响应[D]. 西安: 西北农林科技大学, 1-63.
- 施农农, 陈志伟. 1999. 镉胁迫下水稻种子的萌芽生长及体内水解酶的活性变化[J]. *农业环境保护*, 18(5): 213-216.
- 史琼彬. 2016. 有机物料对紫色水稻土颗粒有机质及镉生物有效性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 1-56.
- 石阳阳. 2020. 生物炭与 Cd 耐受菌复配对 Cd 污染土壤修复及小白菜安全生产的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 1-69.
- 司马小峰, 孟玉, 吴东彪, 于鹏, 沈贤城, 李莹. 2021. 生物炭-超富集植物联合修复镉污染土壤的研究[J]. *安徽农业科学*, 49(6): 80-84.
- 宋小旺. 2020. 铁锰氧化物生物炭吸附/钝化镉研究[D]. 广州: 广东工业大学, 1-74.
- 宋玉婷, 雷泞菲. 2018. 我国土壤镉污染的现状与修复措施[J]. *西昌学院学报(自然科学版)*, 32(3): 79-83.
- 苏德纯, 黄焕忠. 2002. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J]. *中国环境科学*, 22(1): 48-51.
- 苏平. 2009. 硫化物沉淀法及其对金属硫化物去除率的探讨[J]. *中国有色冶金*, (4): 6-10.
- 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 崔建勇, 颜妍, 张云峰. 2020. 铁观音茶园土壤-茶树体系中重金属的生物有效性[J]. *环境化学*, 39(10): 2765-2776.
- 汤叶涛, 仇荣亮, 曾晓雯, 方晓航. 2005. 一种新的多金属超富集植物-圆锥南芥 (*Arabispaniculata* L.)[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 44(4): 135-136.
- 唐非, 雷鸣, 唐贞, 杨仁斌, 宋正国, 唐世荣, 彭莎, 廖海玉. 2013. 不同水稻品种对镉的积累及其动态分布[J]. *农业环境科学学报*, 32(6): 1092-1098.
- 唐结明, 姚爱军, 梁业恒. 2012. 广州市万亩果园土壤重金属污染调查与评价[J]. *亚热带资源与环境学报*, 7(2): 27-35.
- 田伟莉, 柳丹, 吴家森, 王立江, 陈昆柏. 2013. 动植物联合修复技术在重金属复合污染土壤修复中的应用[J]. *水土保持学报*, 27(5): 188-192.
- 田文钢, 姚佳斌, 蒋尚, 刘勇. 2020. 生物修复技术处理重金属污染土壤的研究进展[J]. *环境与发展*, 32(12): 34-35.
- 田稳, 宗大鹏, 方成刚, 王成尘, 王健敏, 向萍. 2022. 西南典型菜地土壤重金属健康风险和毒性效应[J]. *中国环境科学*, 42(10): 4901-4908.
- 汪瑾, 苏现伐, 王东超, 王学锋, 朱桂芬. 2008. Cu、Cd 对小麦幼苗生长代谢及 2 种酶活性的影响[J]. *河南师范大学学报: 自然科学版*, 36(2): 92-94.
- 王宏鹏. 2020. 石灰性土壤镉污染原位钝化修复材料研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-85.
- 王慧忠, 何翠屏. 2002. 重金属离子胁迫对草坪草根系生长及其活力的影响[J]. *中国草地*, 24(3): 55-58.
- 王林, 徐应明, 孙扬, 梁学峰, 秦旭. 2010. 海泡石及其复配材料钝化修复镉污染土壤[J]. *环境工程学报*, 4(9): 2093-2098.
- 王美艳, 柳洋, 朱惟琛, 戎开雨, 杨菲宇, 孙文博, 王菲. 2020. 天津市中心城区绿地土壤重金属污染分布现状分析[J]. *环境科学与技术*, 43(4): 184-191.
- 王期凯, 郭文娟, 孙国红, 林大松, 徐应明, 刘静茹, 于士雷. 2015. 生物炭与肥料复配对土壤重金属镉污染钝化修复效应[J]. *农业资源与环境学报*, 32(6): 583-589.
- 王琴儿, 曾英, 李丽美. 2007. 镉毒害对水稻生理生态效应的研究进展[J]. *北方水稻*, (4): 12-16.
- 王赛怡, 王逸君, 赵亚洲, 侯燕琪. 2023. 土壤重金属污染及其植物修复研究进展[J]. *农学学报*, 13(2): 20-23.
- 王杏, 王草娟, 史凯祥. 2023. 微生物镉解毒机制及微生物-植物互作修复研究进展[J]. *微生物学通报*, 50(4): 1666-1680.
- 王涌泉, 李晔, 胡进, 赵建博, 景琪. 2014. 复合型调控剂修复镉污染农田土壤的研究[J]. *武汉理工大学学报*, 36(5): 123-128.
- 魏忠平, 朱永乐, 赵楚桐, 汤家喜, 高英旭, 李梦雪. 2020. 生物炭吸附重金属机理及其应用技术研究进展[J]. *土壤通报*, 51(3): 741-747.
- 邢婷. 2022. 玉米大豆带状套作体系中土壤镉吸附及作物镉积累的特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 1-52.
- 熊捷迁, 弓晓峰, 江良, 李昊霖, 袁少芬, 林媛, 吴莉. 2021. 鄱阳湖水体沉积物中 Zn、Cd 对底栖生物的毒性效应及基准验证[J]. *湖泊科学*, 33(6): 1687-1700.
- 熊娟, 王依涵, 陈畅, 侯静涛, 许运, 汪明霞, 谭文峰. 2022. 伴矿景天修复农田土壤镉污染的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 41(3): 441-454.
- 熊敏先, 吴迪, 许向宁, 郑明阳, 邢涛. 2021. 土壤重金属镉对高等植物的毒性效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 16(6): 133-149.
- 熊明月, 郭嘉航, 张福琼, 韩飞, 刘剑虹, 杨云, 钟浩, 黄晶晶. 2022. 不同氮肥对鬼针草修复土壤镉污染的效果研究[J]. *江西农业大学学报*, 44(6): 1592-1600.
- 熊愈辉, 杨肖娥, 叶正钱, 何冰. 2004. 东南景天对镉、铅的生长反应与积累特性比较[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, (6): 101-106.
- 徐红霞, 翁晓燕, 毛伟华, 杨勇. 2005. 镉胁迫对水稻光合、叶绿素荧光特性和能量分配的影响[J]. *中国水稻科学*, 19(4): 338-342.
- 徐良将, 张明礼, 杨浩. 2011. 土壤重金属污染修复方法的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 39(6): 3419-3422.
- 闫华晓, 赵辉, 高登征. 2007. 镉离子对玉米种子萌发和生长影响的初步研究[J]. *作物杂志*, 23(5): 25-28.
- 闫淑兰, 赵秀红, 罗启仕. 2020. 基于文献计量的重金属固化稳定化修复技术发展动态研究[J]. *农业环境科学学报*, 39(2): 229-238.
- 杨居荣, 黄翌. 1994. 植物对重金属的耐性机理[J]. *生态学杂志*, 15(6): 20-26.
- 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 毛显强. 1995. 农作物对 Cd 毒害的耐性机

- 理探讨[J]. *应用生态学报*, 6(1): 87-91.
- 杨梦丽. 2019. 农田土壤镉污染的钝化修复与后效研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 1-71.
- 杨文昊. 2022. 复合微生物菌剂对镉污染小麦土壤修复效应研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 1-57.
- 杨仙妮. 2022. 富碳酸钙生物炭与固磷菌协同固定水稻土镉的机制: 根系分泌物和外源有机质的作用[D]. 扬州: 扬州大学, 1-103.
- 杨雄. 2022. 电化学调控典型铁锰氧化物吸附重金属及其修复污染土壤机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 1-191.
- 杨妍萍. 2019. 重金属污染土壤的矿物材料修复效果及影响因素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-85.
- 于方明, 刘可慧, 刘华, 邓华, 周振明, 陈朝述, 李明顺. 2012. 镉污染对水稻不同生育期抗氧化系统的影响[J]. *生态环境学报*, 21(1): 88-93.
- 张涵, 李欢, 苏长青, 邓新辉. 2023. 微生物修复 Cd 污染研究进展[J]. *湘潭大学学报(自然科学版)*, 45(3): 53-65.
- 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥. 2022. 橡胶草(TKS)对铅镉污染农田土壤的修复潜力[J]. *环境科学*, 43(8): 4253-4261.
- 张利红, 李培军, 李雪梅, 孟雪莲, 徐成斌. 2005. 镉胁迫对小麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. *生态学杂志*, 24(4): 458-460.
- 张璐. 2021. 复合微生物菌剂的构建及其对铁尾矿铅镉污染土壤的修复效果研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 1-68.
- 张群丽, 谢海云, 陈家灵, 宋紫欣, 晋艳玲, 陈海君, 曾鹏, 刘殿文. 2024. 重金属污染土壤修复固化/稳定化技术研究现状及存在问题[J]. *环境保护科学*, 50(3): 96-102.
- 张汪寿, 李晓秀, 黄文江, 李建辉, 任万平, 高中灵. 2010. 不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 26(12): 311-318.
- 张维兰, 张悦, 刘萍, 段昌群, 刘嫦娥. 2022. 蚯蚓在植物修复重金属污染土壤中的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 45(8): 155-165.
- 张晓绪. 2020. 外源有机质对重金属镉在水稻中迁移转化的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 1-97.
- 张晓莹, 陈苏, 刘颖, 冯天朕, 晁雷. 2023. 生物炭老化及其对重金属吸附固定的影响研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 40(4): 852-863.
- 张旭辉. 2019. 耐镉微生物与生物质炭联合对土壤镉形态及植物镉吸收的影响研究[D]. 江苏: 南京农业大学, 1-88.
- 张亚丽, 沈其荣, 姜洋. 2001. 有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J]. *土壤学报*, 38(2): 212-218.
- 张园, 肖祖飞, 李刚, 冯菁, 史永松. 2019. 蚯蚓-植物联合修复土壤重金属技术研究: 回顾与展望[J]. *环境化学*, 38(11): 2510-2518.
- 赵卓亚, 王志刚, 毕拥国, 厉月桥, 黄秋烟. 2009. 保定市城市绿地土壤重金属分布及其风险评价[J]. *河北农业大学学报*, 32(2): 16-20.
- 周垂康, 毛詹晟, 方先芝, 赵科理, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱. 2023. 交流电场频率对柳树-东南景天混栽修复镉污染土壤的影响[J]. *环境工程学报*, 17(9): 3046-3053.
- 周赓, 邓成刚, 曹林友, 陈帅, 田云, 卢向阳. 2016. 一株耐镉细菌的筛选、鉴定与性质研究[J]. *化学与生物工程*, 33(3): 43-47.
- 周菁, 王哲, 顾国林, 韩玉洁, 刘春江. 2014. 上海滨江森林公园土壤镉元素含量分布特征[J]. *林业世界*, (3): 28-33.
- 周利强, 尹斌, 吴龙华, 骆永明. 2013. 有机物料对污染土壤上水稻重金属吸收的调控效应[J]. *土壤*, 45(2): 227-232.
- 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 朱光旭, 朱捍华, 刘胜平. 2009. 石灰和海泡石对镉污染土壤的修复效应与机理研究[J]. *水土保持学报*, 23(1): 111-116.
- 邹佳慧, 林青, 邵明艳, 徐绍辉. 2023. 生物炭影响下土壤中铜镉锌复合污染物的淋溶迁移[J]. *环境科学学报*, 43(9): 333-345.