

灌溉模式对植物修复镉污染土壤根区 微域和植物转运的影响

毕永辉^{1,2}, 乔冬梅¹, 李树宁²

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: [目的] 农田土壤镉(Cd)污染是当前威胁生态环境安全和农业可持续发展的重要隐患, 已成为全球性环境问题, 引起诸多学者的重点关注, 亟须对该领域的研究发展趋势进行综合分析。[方法] 基于CiteSpace文献计量学分析发文数量最多且集中的代表性研究时间段(2016—2025年), 收集到中英文文献共7 495篇。[结果] Cd污染是当前全球研究最深入、关注度最高的重金属污染类型, 植物修复技术是国内外应用最广泛的重金属污染土壤治理方法。但单一植物修复技术往往存在修复效率与适用范围受限等问题, 灌溉模式作为关键农艺调控手段, 通过调节土壤水分状况来介导重金属污染土壤的植物修复过程。在前人研究基础上, 综述植物修复机制与发展现状、灌溉模式对重金属污染土壤理化性质与生物学特性及对植物生物量与重金属吸收转运的影响。[结论] 分析不同灌溉模式对植物修复效果的影响, 并提出发展建议, 为优化灌溉模式与提升Cd污染土壤植物修复效率提供理论依据。

关键词: 镉污染; 灌溉模式; 土壤; 植物修复

中图分类号: X53; S154.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0416-13

Effects of Irrigation Regimes on Rhizosphere Microdomain and Plant Translocation in Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soils

Bi Yonghui^{1,2}, Qiao Dongmei¹, Li Shuning²

(1. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453002, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] Cadmium (Cd) contamination in farmland soils has become an important hidden danger threatening ecological and environmental security and the sustainable development of agriculture. As a global environmental issue, it has attracted extensive attention from scholars, making a comprehensive analysis of research trends in this field urgently needed. [Methods] Based on CiteSpace bibliometric analysis, this study focuses on the representative period with the largest and most concentrated number of publications (2016—2025), and collects a total of 7 495 Chinese and English articles. [Results] Cd contamination is currently the most intensively studied and widely concerned type of heavy metal contamination worldwide, and phytoremediation is the most widely applied method for remediating heavy metal-contaminated soils at home and abroad. However, single phytoremediation technologies are often limited by low remediation efficiency and narrow applicability. As a key agronomic regulation measure, irrigation regimes regulate the phytoremediation process of heavy metal-contaminated soils by regulating soil moisture status. Based on previous studies, this paper reviews phytoremediation mechanisms and research progress, as well as the effects of irrigation regimes on the physicochemical and biological properties of heavy metal-contaminated soils and on plant biomass and heavy metal uptake and

收稿日期: 2026-03-02

修回日期: 2026-04-06

录用日期: 2026-04-17

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-18

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(52579054)

第一作者: 毕永辉(2003—), 女, 硕士研究生, 主要从事水资源高效利用技术研究。E-mail: 2376304762@qq.com

通信作者: 乔冬梅(1978—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: qiaodongmei78@163.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

translocation. [Conclusion] The effects of different irrigation regimes on phytoremediation performance are analyzed, and corresponding development suggestions are proposed to provide a theoretical basis for optimizing irrigation regimes and improving the phytoremediation efficiency of Cd-contaminated soils.

Keywords: cadmium contamination; irrigation regimes; soil; phytoremediation

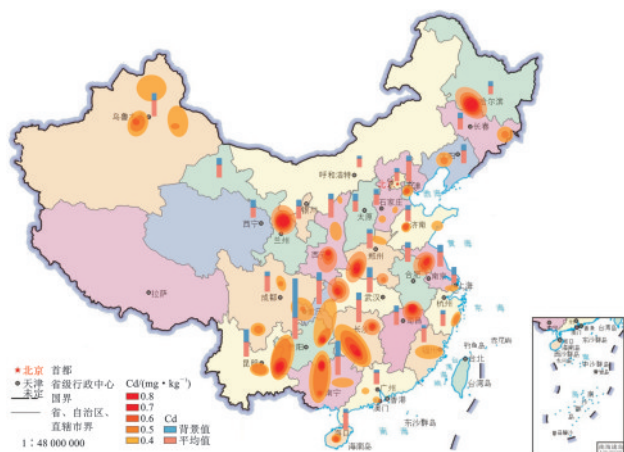
Received: 2026-03-02

Revised: 2026-04-06

Accepted: 2026-04-17

Online(www.cnki.net): 2026-08-18

土壤生态系统是人类生存发展的依托,亦是重金属污染物的重要汇^[1]。随着农业产业化、工业现代化持续推进,以及全球人口规模不断扩大,土壤污染问题日益严峻^[2]。《全国土壤污染状况调查公报》^[3]显示,我国耕地土壤重金属污染严重,其中Cd点位超标率高达7%,已成为威胁国家粮食安全、农业可持续发展和公众健康的重大隐患。从空间分布特征看,我国土壤Cd污染具有显著的聚集性和区域差异性,主要集中于华南、西南及长江中下游等地区,整体呈现南高北低、东多西少的特点,根据以往学者^[4-7]的研究结果,绘制了全国Cd污染土壤示意图(图1)。



注:地图来源于自然资源部,审图号GS(2019)1825,底图无修改。

图1 中国镉污染土壤主要分布区

Fig.1 Main distribution areas of cadmium-contaminated soils in China

土壤重金属污染具有积累性、隐蔽性及不可逆性等特点而难以根治。土壤中的重金属污染主要来源于污水灌溉、工业“三废”的排放、过量使用农药与化肥、矿山开采冶炼及工业与生活废弃物不当处置等因素^[8],其中因污水灌溉造成的重金属污染耕地面积约占总耕地面积的45%^[9]。因此,重金属污染修复对我国耕地和粮食安全至关重要,进而推动各类高效修复技术的快速发展^[10]。植物修复因其对大规模重金属污染土壤适用性强,可同步实现良好社会效益,符合生态修复可持续发展等优势,已成为目前治理重金属污染土壤应用最广泛的原位修复技术^[11]。土壤水分是调控重金属污染土壤植物修复过程的核心环境因子,土壤的理化性质、富集植物的生长代谢及重金属的迁移转化等受土壤水分影响显著,进而

直接反映于植物修复效率与效果^[12]。灌溉模式可通过协调灌水技术和灌溉制度,实现对土壤水分的科学调控与管理。因此,本文按照图2的研究脉络,对灌溉模式影响重金属污染土壤植物修复的根区微域和植物转运过程进行分析研究,以期对重金属污染土壤植物修复技术的完善与发展提供理论依据。

1 重金属污染土壤植物修复技术

基于中国知网(CNKI)与Web of Science核心合集(SCIE)数据库,采用文献计量学分析方法以污染修复为检索主题,系统分析现有研究成果、研究热点及发展趋势^[13]发现,近10a的研究发文数量最多且集中,具有代表性,因此针对近10a的文献进行研究(图2)。

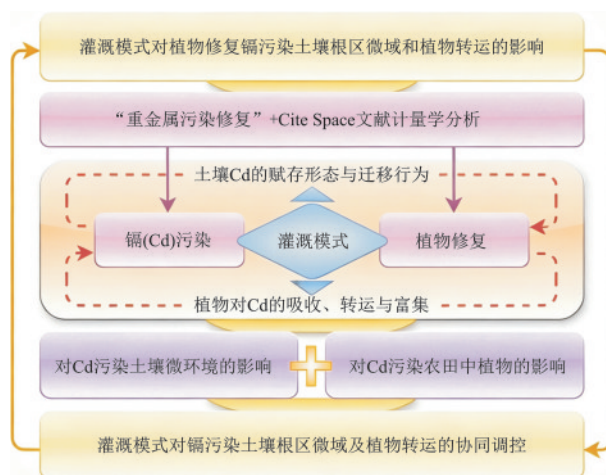


图2 研究脉络

Fig.2 Research framework

CNKI采用主题检索式:“(重金属污染修复)”,文献类型为学术期刊,时间跨度为2016—2025年,共获取有效期刊3 236篇,WOS采用主题检索式:“remediation of heavy metal contamination”,文献类型:“article” and “review article”,时间跨度为2016—2025年,共获取研究文章4 259篇,基于CiteSpace进行关键词共现分析。由图3和表1可知,Cd污染已成为全球范围内研究最为深入、关注度最高的重金属污染,而依托富集植物的植物修复技术(phytoremediation)则是目前国内外修复重金属污染土壤的最主要方式之一。结合对数似然比(log-likelihood ratio)关键词聚类结果,聚焦Cd污染与植物修复领域,当前中文研究热点主要集中在Cd污染

土壤的修复技术应用方面,其中植物修复是关键技术方向,研究重点围绕污染土壤的修复机制、修复效果与修复效率,探究钝化剂、生物炭在Cd污染土壤修复中的调控应用,以及不同植物品种Cd积累特性及Cd耐性的筛选研究。未来研究发展趋势可能以植物修复为核心,结合多种手段联合修复,强化Cd污染土壤修复实效与应用落地。当前英文研究热点则主要

集中在Cd污染防控与修复方面,重点围绕重金属离子的吸附作用、高效去除技术及土壤Cd污染治理展开,同时关注植物修复技术在Cd污染土壤中的应用,兼顾微生物群落对Cd污染响应的相关研究。未来可能强化Cd污染吸附机制、优化植物修复技术路径,结合生物炭等材料钝化、淋洗等辅助手段,推动Cd污染土壤修复向高效化、多元化方向发展。



图3 重金属污染修复研究的关键词共现与聚类知识图谱

Fig.3 Keyword co-occurrence and clustering knowledge map for heavy metal contamination remediation research

综上,国内外在Cd污染土壤修复领域已积累较多研究成果,并呈相对清晰的发展趋势,相关修复技术体系也随之发展完善。目前较成熟的修复技术主要包括物理修复、化学修复及生物修复等^[14]。综合对比修复成本、修复耗时、修复效果、修复前景等4个方面,物理修复见效快但成本高且适用性有限,化学修复经济性相对较好但存在二次污染风险,生物修复效果较好且环保可持续^[15]。生物修复主要包括动物修复技术、植物修复技术和微生物修复技术,是目前重金属污染治理中推广最多、应用最广泛的修复技术体系,能够通过生物自身的代谢或吸收机制实现重金属污染物的稳定、去除或转化^[11]。而相比于动物修复与微生物修复,植物修复可独立应用于大面积场地原位修复、管理简单成本低、具有灵活环境适配性以及恢复效果更持久稳定等显著优点,因此植物修复对重金属污染土壤治理具有广泛适用性与良好可操作性^[16],

其作用机制主要包括植物稳定、植物提取、植物挥发及根系过滤等^[17](图4)。

植物修复过程中,超富集植物长期在重金属胁迫下,演化形成高度专化性的重金属耐受、根际吸收、体内转运及细胞水平解毒与隔离机制,是其在重金属胁迫环境中稳定生存与高效富集的关键生理适应策略。全球范围内已系统鉴定的重金属超富集植物超过700种,其中Cd超富集植物有20种(主要包括菊科、十字花科和景天科等)^[18-19]。其中印度芥菜、伴矿景天等超富集植物适用于中重度污染土壤,修复效率较高,但普遍生物量小、生长慢,年提取总量有限^[20]。70%田间持水量处理下,伴矿景天对Cd的吸收能力与修复效率显著高于淹水灌溉^[21]。油菜、牛膝菊等高生物量富集植物则适用于轻度至中度污染土壤,凭借高生物量优点提取较多Cd总量^[22-23]。超富集植物对重金属存在一定的选择性,大多仅对某单一重金属具有较好的富集作用,而缺乏通用性富集植物^[24]。

表 1 2016—2025 年排名前 10 的高频关键词及集群
Table 1 Top 10 high-frequency keywords and clusters (2016—2025)

数据 库	排 序	关键词	总数	中介中 心性	群集 编号	大小	轮廓值
CNKI	0	重金属	957	0.14	#0	24	0.973
	1	土壤修复	519	0.01	#1	21	0.932
	2	土壤	495	0.24	#2	21	1.000
	3	植物修复	453	0.22	#3	20	1.000
	4	修复技术	317	0.06	#4	20	0.909
	5	土壤污染	274	0.04	#5	19	1.000
	6	修复	227	0.11	#6	19	0.936
	7	镉污染	192	0.07	#7	19	0.948
	8	生物修复	139	0.51	#8	17	0.961
WOS	9	生物炭	138	0.07	#9	16	1.000
	0	heavy metals	2 136	1.12	#0	26	1.000
	1	remediation	821	0.49	#1	26	0.886
	2	removal	693	0.16	#2	22	1.000
	3	cadmium	549	0.03	#3	20	0.987
	4	contamination	542	0.77	#4	20	0.988
	5	accumulation	493	0.99	#5	18	0.982
	6	adsorption	491	0.24	#6	17	0.964
	7	heavy metal	458	0	#7	17	0.941
	8	pollution	411	0.87	#8	16	0.968
	9	lead	388	0	#9	16	0.937

随着土壤污染情况愈来愈复杂,仅依靠超富集植物本身已经难以满足当前土壤重金属污染治理的需要,因此通过联合修复提升植物修复效率成为当前研究的重要方向。1)农艺措施:制定合理的土壤灌溉模式及施肥管理,通过调控植物生长发育、土壤的关键理化性质、改变重金属的赋存形态与生物有效性等,直接或间接地影响植物修复效率;2)化学强化:施加乙二胺四乙酸(EDTA)、乙酸、柠檬酸及腐殖酸等外源物质,营造相对酸性条件的土壤环境,能够活化重金属,促进重金属从土壤中溶解与释放,进而提升重金属的生物有效性^[25-27];3)微生物联合:接种重金属耐受型微生物,可上调特定关键酶功能基因的表达来维持或提升相关酶活性,从而增强对重金属的解毒和耐受能力以及减轻重金属对植物生长发育的抑制作用。接种根际促生菌(PGPR)可调节养分利用效率、促进植物生长及活化土壤中的重金属^[28];4)基因工程措施:使用精准基因编辑技术(CRISPR)改良天然超富集植物修复性能(耐受性、富集能力等)的局限性,如在拟南芥和烟草植物中,NAS1基因(编码酶NAS合成酶)表达的增强表现出对Cd更高的耐受性和吸收能力,编码金属硫蛋白基因的过表达可提高Cd的积累能力^[29]。

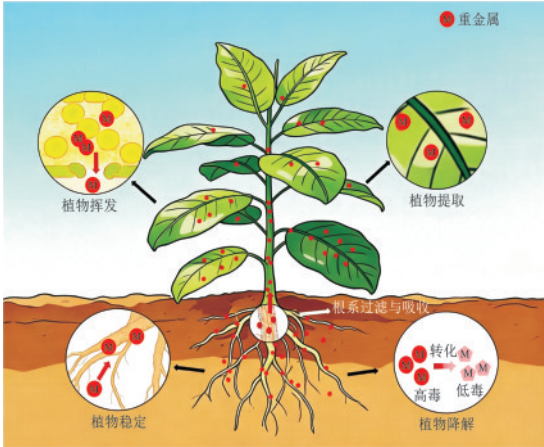


图 4 重金属植物修复技术机制
Fig.4 Mechanisms of heavy metal phytoremediation

2 灌溉模式对植物修复 Cd 污染土壤微环境的影响

2.1 灌溉模式对植物修复 Cd 污染土壤 pH、Eh 的影响
灌溉模式可通过调节土壤水分状况引起土壤 pH 与氧化还原电位(Eh)的改变,土壤 pH 和 Eh 是调控重金属溶解度与流动性的关键因素^[30]。灌溉模式主要通过调节土壤水分影响土壤通气性、微生物活性及有机质分解等,进而间接调节土壤 pH。而 pH 的变化影响重金属的吸附点位、吸附界面稳定性、赋存形态及配位性能等,其中重金属赋存形态是影响其生物有效性的最直接因素^[31]。在淹水条件下的酸性土壤中,土壤颗粒表面正电荷增加,各分子之间的静电排斥力增强,抑制 Cd²⁺的吸附,并促进其由碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态等形态向可交换态转化,且主要以可交换态形式存在^[32];Cd 可交换态浓度与 pH 呈显著负相关,而碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态和残渣态浓度与 pH 呈显著正相关^[33],铁锰氧化物的还原溶解及其形成的新铁锰氧化物对 Cd 的吸附作用是导致 Cd 活性降低的主要原因^[34]。在碱性土壤中,溶解性有机质的官能团可提供更多结合位点,同时去质子化作用明显,H⁺与 Cd²⁺的竞争减弱,使得 Cd²⁺更容易形成配位稳定的溶解性有机质(DOM)-Cd 络合物,在 OH⁻存在下,该络合物进一步与土壤中的阳离子(Ca²⁺、Mg²⁺、Fe³⁺等)结合,生成 DOM-Cd-氢氧化物复合沉淀被土壤吸附,大大降低 Cd 的迁移性^[35]。在酸性土壤中(pH 5.93),青苜蓿和籽粒苋的 Cd 提取总量最多(每盆分别为 1.03、0.92 mg),而伴矿景天更适宜在碱性土壤中(pH 7.43),地上部 Cd 的积累量高达 541.36 mg/kg^[36]。土壤 Eh 与水溶性 Cd 呈极显著正相关($p<0.01$),淹水条件使土壤 Eh 降低,促进反硝化反应、铁锰氧化物和硫酸盐还原等过程,Mn²⁺、Fe²⁺及无定形氧化铁含量增加,进而影响土壤中重金属的赋存形态^[37-39],水稻田干湿

交替处理相比于淹水处理有效态 Cd 浓度显著提高^[40]。Tudi 等^[41]研究发现,滴灌因水分缓慢入渗、通气条件较好,可维持相对较高的 Eh(氧化环境),有利于重金属的稳定。漫灌则因土壤迅速饱和、氧扩散受限而土壤通气性较差,从而土壤 Eh 骤降形成强还原环境,促进重金属的溶解。随着灌溉过程推进,二者 Eh 差异逐渐减小,但滴灌条件下 Eh 始终高于漫灌。但滴灌由于局部湿润土壤,可溶态重金属离子的纵向迁移更为明显^[42],且通常在远离滴灌管的土壤区域积聚^[43]。在加硫(S)处理中,短期厌氧环境(<48 h)能够促进铁锰氧化物的溶解,短暂释放 Cd²⁺,长期厌氧环境(<10 d)下,被还原成的 S²⁻先和 Fe²⁺形成 FeS/FeS₂延缓 Cd 的释放,再与 Cd²⁺形成难溶性的 CdS 沉淀^[44]。

2.2 灌溉模式对植物修复 Cd 污染土壤微生物及酶活性的影响

土壤微生物与酶活性对环境变化高度敏感,土壤酶活性中约 33.58% 的变异可通过环境因子解

释^[45-46]。土壤微生物群落对 Cd 含量高度敏感并呈显著负相关,不同微生物类群对 Cd 的耐受性虽存在差异,但 Cd 胁迫仍显著降低土壤微生物群落的物种多样性与丰富度^[47]。Zhang 等^[48]研究得出,Cd 胁迫可解释 17.5% 的细菌群落结构变化($p<0.05$),是影响细菌群落结构的重要因素。微生物通过激活耐 Cd 功能基因的表达,介导 Cd 的跨膜摄取与外排、胞内螯合与修复及胞外吸附与沉淀等过程,从而增强微生物对 Cd 胁迫的耐受性,相关机制主要由 ABC、RND、P 型 ATP 酶等跨膜转运蛋白家族共同参与^[49](表 2)。Cd 同时通过多重途径抑制土壤酶活性,包括竞争酶的活性位点、干扰酶与底物的结合、诱导酶蛋白空间构象及破坏酶结构稳定性等,进而影响酶的生物合成与功能表达,最终显著降低土壤酶活性^[50]。已知 Cd 可通过结合酶分子的关键官能团(—SH、—COOH、—C₃H₃N₂)或置换必需金属辅因子,进而破坏酶结构稳定性并抑制其活性^[51]。

表 2 微生物镉响应相关基因与功能酶
Table 2 Genes and functional enzymes related to microbial response to Cd

基因	蛋白/酶	调控机理	微生物	文献
<i>sox</i> 、 <i>sqr</i>	硫氧化酶	将硫化物氧化,生成 CdS 沉淀	硫氧化细菌	Wang 等 ^[57]
<i>capB</i>	capB 蛋白	增强对 Cd ²⁺ 的吸附能力,提高菌株 Cd 抗性	大肠杆菌 BL21(DE3)	Qin 等 ^[58]
<i>CzcD</i> 、 <i>mntH</i> 、 <i>fieF</i> 、 <i>zupT</i> 、 <i>tupC</i> 、 <i>znuC</i>	重金属转运蛋白,ABC 家族	编码多种耐 Cd 蛋白,调控 Cd 的结合与排出	贝莱斯芽孢杆菌 LZUR632	Jin 等 ^[59]
<i>CzcA</i> 、 <i>cnr</i>	CzcA 蛋白、cnr 蛋白(RND 家族)	主动将 Cd ²⁺ 泵出细胞,具有 Cd 抗性	贪铜菌属耐金属菌 CH34	Davidova 等 ^[60]
<i>CzcCBA</i>	CzcA、CzcB、CzcC 蛋白	主动将细胞内 Cd ²⁺ 排出胞外,具有 Cd 抗性	贪铜菌属、 铜绿假单胞菌	Nies ^[61]
<i>cadA</i> 、 <i>cadB</i> 、 <i>cadX</i>	P 型 ATP 酶	利用 ATP 水解能量,特异性将胞内 Cd ²⁺ 泵出	金黄色葡萄球菌	Abbas 等 ^[62]
<i>zntA</i>	P 型 ATP 酶	特异性识别并外排 Cd ²⁺ ,抵御 Cd 毒性	大肠杆菌、 金黄杆菌属	Wang 等 ^[63]
<i>OxyR</i>	OxyR 蛋白	调控 CAT 等基因表达清除 ROS,提高 Cd 耐受性	绿针假单胞菌 GP72	Xie 等 ^[64]
<i>ureABC</i> 、 <i>phoA</i>	脲酶、磷酸酶	促使 Cd ²⁺ 形成碳酸镉、羟基镉、磷酸镉沉淀	脲酶产生菌、 溶磷菌	陈瑞红等 ^[65]
<i>cadR</i>	cadR 蛋白(McrR/ArsR 家族)	特异性结合 Cd ²⁺ ,促进抗 Cd 基因的表达	铜绿假单胞菌	Chellaiah ^[66]

灌溉作为重要调控措施,可通过多种直接或间接途径影响土壤微生物群落与土壤酶。一方面,通过调节土壤含水量、pH、Eh 和通气性等关键理化性质重塑微生物生境;另一方面,影响重金属的赋存形态与生物有效性、植物与微生物之间的水分竞争关系,以及作为养分溶解、迁移与传输的介质。这些因素共同作用于微生物与酶的生理生化活动,进而影响微生物群落的结构特征、代谢水平、功能表达及酶活性^[52]。宋波等^[53]在畦灌条件下对向日葵种植土壤

的研究表明,土壤中的变形菌门、放线菌门、绿弯菌门和酸杆菌门构成主要优势类群,其丰度变化与土壤水分状况密切相关。其中,变形菌门包含多种具有重金属耐受性的革兰氏阴性细菌(如假单胞菌属、伯克霍尔德菌属和肠杆菌属等),通常携带 *Czc* 金属外排系统基因,利用依赖质子驱动力的 Cd²⁺外排机制维持细胞内稳态,从而增强对 Cd 胁迫的适应能力^[54];Islamzade 等^[55]研究提出,在 Cd 污染下,土壤含水量维持在田间持水量的 75% 时,微生物代谢活性

和土壤酶活性均处于相对最优水平;Dou 等^[56]的研究表明,滴灌通过改善根际水分分布与通气条件,可显著提升土壤脲酶、碱性磷酸酶和转化酶活性,且该促进效应在滴灌带邻近区域表现最为显著。

2.3 灌溉模式对植物修复过程中根系分泌物的影响

根系是连接植物与土壤、实现物质交换与能量传递的核心界面,根系分泌物在植物修复 Cd 污染土壤中起着重要的调节作用,有必要对其进行深入分析。根系分泌物按分子量大小可划分为高分子量与

低分子量两大类(表 3)。其中,高分子量分泌物主要包括多糖类物质、高分子黏胶及胞外酶,低分子量分泌物依赖根系细胞脂质膜的通透性被动扩散,以有机酸、可溶性糖、酚酸、氨基酸及无机化合物为主,在根系分泌物的释放量及代谢通量方面占据主导地位^[67-68]。低分子量分泌物的生物可利用性高,一方面作为重要碳源和能量来源被根际微生物所吸收利用;另一方面,在 Cd 污染土壤中可作为信号分子招募特定微生物通过趋化作用向根际聚集并定殖,进而促进 Cd 的活化^[69]。

表 3 根系分泌物的种类、组成与功能
Table 3 Classification, composition, and functions of plant root exudates

种类	组成	功能	文献
糖类	葡萄糖、果糖、麦芽糖、半乳糖、木糖、蔗糖、核糖及脱氧核糖、阿拉伯糖、甘露糖、鼠李糖、棉子糖、低聚糖、聚多糖等	根际关键信号传导物质,作为碳源与能源供根际微生物生长代谢	
有机酸	甲酸、苹果酸、乙酸、柠檬酸、草酸、酒石酸、乳酸、丙酸、丙二酸、丁酸、丁二酸、戊酸、戊二酸、羟基乙酸、富马酸、琥珀酸等	调节土壤 pH,促进养分与重金属的活化与释放	
氨基酸	谷氨酸、组氨酸、赖氨酸、亮氨酸、脯氨酸、天冬氨酸、丝氨酸、精氨酸、酪氨酸、甘氨酸、甲硫氨酸、丙氨酸、谷氨酰胺、苏氨酸等	调节土壤 pH、维持氮平衡,促进植物生长发育	王亚等 ^[67]
酚酸类	丁香酸、香草酸、肉桂酸、阿魏酸、香豆酸、咖啡酸、水杨酸、杏仁酸、原儿茶酸、藜芦酸等	调控根际微生物,产生化感效应,参与植物抗逆与防御	罗阳等 ^[68] 丁娜等 ^[76]
脂肪酸	亚油酸、亚麻酸、油酸、棕榈酸、软脂酸、硬脂酸等	具有一定信号功能,产生化感效应,响应环境胁迫	黄雨轩等 ^[77] 杨小容等 ^[78]
生长因子	生物素、烟酸、泛酸、胆碱、肌醇、硫胺素、尼克酸、对氨基苯甲酸、N-甲基烟酸、维生素等	促进微生物的生长与代谢活动,调控植物生长与抗逆性	
胞外酶	淀粉酶、转化酶、过氧化物酶、磷酸酶、脲酶、酚酶、DNA/RNA 酶、硝酸还原酶、硫酸酯酶等	催化土壤复杂有机物的分解转化与养分释放	

根系分泌物的种类、组成及释放量受多种生物与环境因素影响,包括植物物种差异、生长发育阶段、养分供应水平、污染物胁迫程度及根际理化条件与根际微生物群落等^[70]。重金属胁迫对植物根系生长与功能具有显著抑制作用,而植物可通过调节根系分泌物的组成与释放等生理适应机制,在一定程度上减轻重金属毒害效应^[71]。例如,东南景天在 Cd 胁迫下显著改变根系分泌物中癸酸、苯甲酸等脂肪酸,以及果糖、海藻糖等糖类的分泌量^[72]。灌溉模式也对根系分泌物产生影响,如轻度干湿交替灌溉能显著促进柠檬酸、草酸和酒石酸等有机酸的分泌,提高根系分泌物总有机酸量,并有效优化水稻根系的生理状态^[73-74]。适度水分胁迫可通过诱导植物的脯氨酸积累维持膨压与细胞膜稳定性,缓解重金属胁迫引起的脂质过氧化损伤^[75]。

3 灌溉模式对 Cd 污染农田中植物的影响

3.1 灌溉模式对 Cd 污染土壤中植物生物量的影响

植物生物量直接反映植物在重金属胁迫下的生长适应性,是评价植物重金属吸收潜力和植物修复效率的重要指标之一^[79]。灌溉模式通过土壤水分动态调控植物生理代谢和生长过程,影响植物生物量的形成

与积累,调节重金属的赋存形态与迁移行为,从而间接影响植物对重金属的吸收效率^[80]。采用适宜的灌溉模式供应水分能够显著提升植物光合作用,促进地上部和根系生物量的增加^[81-82]。同时增强根系活性,有利于提高养分循环效率并改善植物对重金属胁迫的耐受性,维持在污染条件下较高的生物量水平^[83]。Shanker 等^[84]研究表明,滴灌条件下,灌溉水量与蒸发蒸腾量比值(IW/CPE)为 0.6 时,能够显著提高印度芥菜的株高、干物质积累量、产量及水分利用效率;Liu 等^[85]研究表明,地表滴灌、地下滴灌、常规灌溉和交替行灌溉 4 种灌溉方式均显著促进辣椒根系发育,通过调控辣椒根系的生长活性及其在土壤剖面中的分布特征,显著影响 Cd 的吸收过程,并与土壤 Cd 含量的空间分异密切相关;张艳超等^[86]研究表明,不同灌溉方式对水稻根系和地上部生物量具有显著影响,低 Cd 胁迫下,干湿交替灌溉可显著促进水稻各生育期生物量积累,根系和地上部生物量较淹水灌溉分别提高 4.06%~5.77%和 6.73%~9.16%。相比湿润灌溉,淹水灌溉出现生物量的下降。虽然生物量的增加常伴随重金属吸收潜力的提升,但高生物量并不必然有高富集能力,还需结合根系吸收、富集系数及转运系数等综合评价。宋肖

琴等^[87]研究发现,在中度Cd污染水平下,全生育期淹水与湿润灌溉均可显著降低水稻叶片和籽粒中Cd的积累,其中淹水处理可抑制水稻Cd的根系吸收及其茎部向叶片的转运,进而降低Cd的转运与富集系数。

3.2 灌溉模式对植物吸收与转运Cd的影响

在Cd污染土壤中,植物根系吸收Cd是Cd在植物体内迁移转化与富集累积的前提环节,灌溉模式通过调节土壤水分影响Cd的生物有效性及根际环境,在植物吸收过程中发挥重要调控作用。重金属Cd在植物蒸腾作用和拉力驱动下,随水分吸收过程同步到达植物根部^[88]。在此过程中,植物根系根毛与根系形态特征(如根长、根表面积、根体积等)是影响植物吸收能力与效率的关键因素^[89]。其中根毛区

是吸收Cd²⁺最活跃的部位,承担大部分Cd的吸收,而发达的根系形态能够有效扩大根系与土壤的接触界面进而强化吸收过程^[90]。

植物根系吸收土壤Cd²⁺后,主要通过2种途径进行运输:1)质外体途径中,Cd²⁺沿细胞壁和胞间隙被动迁移,并被细胞壁官能团吸附固定,但在内皮层受凯氏带阻隔,需转入共质体后方可继续向中柱及木质部运输^[91-92]。2)共质体途径依赖跨膜转运蛋白介导,在Cd²⁺长距离运输和耐性形成中占主导地位,主要涉及Nramp、HMA、ZIP和ABC等转运蛋白^[93-94](表4)。进入细胞内的Cd²⁺可被螯合并隔离于液泡,或装载入木质部随蒸腾流向地上部^[75,95]。因此质外体途径与共质体途径(图5)共同决定植物对Cd的富集特征与修复效率。

表 4 与镉吸收、转运相关的基因家族
Table 4 Gene families related to Cd absorption and transport

家族	基因	表达位置	功能	文献
Nramp	<i>AtNramp3</i> 、 <i>MxNramp3</i>	液泡膜	液泡内金属离子的动态平衡调控	Zha等 ^[98] 、Li等 ^[98]
	<i>PcNramp1</i>	根表皮、皮层细胞质膜	介导Cd的吸收	Yu等 ^[100]
	<i>NtNramp1</i> 、 <i>OsNramp5</i>	根表皮、皮层细胞质膜	介导Cd的吸收	Kozak等 ^[101] 、Zhang等 ^[102]
HMA	<i>AtHMA2/4</i>	中柱鞘/木质部细胞质膜	介导Cd的木质部装载与长距离运输	Zhang等 ^[103]
	<i>OsHMA2</i>	根、茎维管束薄壁细胞质膜	介导Cd的木质部装载与再分配	Sterkeman等 ^[91]
	<i>SpHMA1</i> 、 <i>SpHMA2/3</i>	叶绿体外膜、液泡膜	从叶绿体输出Cd,缓解Cd对叶绿体的毒害;将Cd运输到液泡内隔离	熊娟等 ^[104]
ZIP	<i>AhZIP6</i>	根维管束细胞质膜	影响Cd的吸收积累、维管转运与再分配	Spielmann等 ^[105]
	<i>OsZIP6/7</i>	维管束细胞质膜	参与Cd的长距离运输,Cd的木质部装载	Zhang等 ^[106]
	<i>OsZIP9</i>	根表皮、皮层细胞质膜	介导根从外界吸收Cd	Tan等 ^[107]
ABC	<i>OsABCC9</i>	液泡膜	将Cd运输到液泡区室化隔离	Yang等 ^[108]
	<i>ABCCs</i>	液泡膜	将Cd运输到液泡区室化隔离	张星雨等 ^[109]
	<i>OsABCG36</i>	根表皮、皮层细胞质膜	参与Cd外排	Fu等 ^[110]

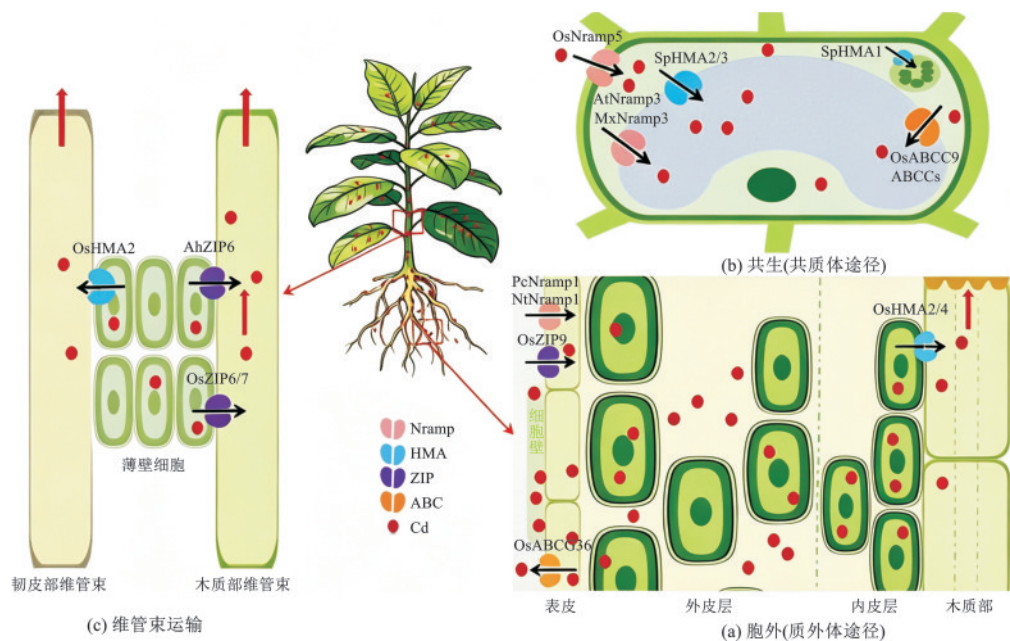


图 5 镉在植物中的吸收、转运机制
Fig.5 Absorption and transport mechanisms of Cd in plants
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

水分是影响植物吸收转运重金属过程的重要因子,陈江民等^[96]研究发现,持续淹水通过降低土壤有效Cd含量和下调根部细胞参与Cd吸收或转运的相关功能基因(*OsNramp1*和*OsLCD*基因)的相对表达量,显著降低水稻根部、地上部和稻米的Cd含量;Zhong等^[97]研究发现,非淹水处理与常规淹水处理相比,根部*OsNramp1*与*OsNramp5*表达显著上调,增强根部对Cd²⁺的吸收,与陈江民等^[96]研究结果相似。非淹水处理下,根部*CAL1*显著上调,促进Cd-*CAL1*配合物木质部装载向地上运输,但大部分Cd(44%~55%)被保留在茎中。

因此,灌溉模式通过调控土壤水分条件,介导Cd植物吸收与体内转运相关基因的表达,进而直接影响植物修复效率。

4 结论与展望

通过分析中英文研究热点发现,二者均重点关注植物修复Cd污染土壤但各有研究侧重,中文研究更偏向修复技术应用、调控措施与作物品种筛选,英文研究则更注重污染防控机理、去除技术与土壤微生态响应。灌溉模式通过调控土壤含水量时空分布,显著影响土壤理化性质与生物学特性。灌溉模式包括灌溉方式、灌溉水量、灌水次数与时间等方面,本质差异是土壤水分条件的不同。不同灌溉模式通过水分输入模式调控土壤理化性质,一方面调节重金属在土壤中的赋存形态;另一方面,影响植物根系分泌物组分、微生物群落与土壤酶活性,三者间的互作共同塑造植物根际微环境,进而影响根区重金属的生物有效性及植物吸收、转运及累积,最终影响植物修复效率与效果。合理的灌溉模式在一定程度上能够促进植物生长与生物量的积累,提升重金属吸收潜力,进而平衡或提高富集植物提取效率。因此,灌溉模式作为连接土壤微环境与植物生理过程的重要调控手段,在重金属污染土壤植物修复中具有不可忽视的作用。

灌溉模式在调控重金属污染土壤植物修复过程中发挥着重要作用,但相关研究仍存在一定不足:1)当前灌溉模式对植物修复技术的影响研究多侧重于单一修复技术的调节作用,在应对复杂污染情况、提升修复效率等方面存在明显局限,因此应关注农艺措施、化学强化、微生物联合及基因工程的交互效应研究,通过多技术协同提升植物修复效率与效果,实现Cd污染土壤治理与农业安全生产协同推进;2)未来还应重点研究不同灌溉模式下重金属污染土壤的微生态环境要素之间相互关系与重金属迁移转化的作用机制,阐明土壤-植物系统中重金属生物有效性的驱动路径,以及不同灌溉模式缓解富集植物对重金属胁迫

的生理生化调控机制,在富集植物对重金属的吸收、耐性与富集的基础上实现“耐逆生存-富集效率”的平衡,促进规模化植物修复技术应用的发展;3)应加强不同灌溉模式在重金属污染土壤田间尺度及长期定位试验的研究,通过构建物理模型、结构方程及数值模拟等手段定量评估不同灌溉模式下重金属的植物修复效率,实现对修复效果的精准预测,为污染耕地修复提供理论支撑与技术规范。

参考文献:

- [1] 吕昆,吴治陵,邓丽.土壤重金属污染修复技术的演进与研究进展[J].环境科学与技术,2025,48(增刊1):52-61. Lyu Kun, Wu Zhiling, Deng Li. Evolution and research progress of soil heavy metal pollution remediation technologies [J]. Environmental Science and Technology, 2025,48(S1):52-61.
- [2] Shah V, Daverey A. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil[J]. Environmental Technology and Innovation, 2020, 18:e100774.
- [3] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17) [2026-02-22]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>. Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National survey bulletin on soil pollution status in China [EB/OL]. (2014-04-17) [2026-02-22]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/W020140417558995804588.pdf>.
- [4] Duan Qiannan, Lee J, Liu Yansong, et al. Distribution of heavy metal pollution in surface soil samples in China: A graphical review [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2016, 97(3):303-309.
- [5] 陈文轩,李茜,王珍,等.中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J].环境科学,2020,41(6):2822-2833. Chen Wenxuan, Li Qian, Wang Zhen, et al. Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China [J]. Environmental Science, 2020, 41(6):2822-2833.
- [6] Li Zhuohong, He Wei, Cheng Mofan, et al. SinoLC-1: The first 1 m resolution national-scale land-cover map of China created with a deep learning framework and open-access data [J]. Earth System Science Data, 2023, 15(11):4749-4780.
- [7] Shi Yini, Feng Xianyang, Sun Zhongke, et al. Issues on microbial soil remediation: A case of Cd detoxification by *Bacillus* strains for alleviating heavy metal stress in crop plants [J]. Frontiers in Microbiology, 2025, 16:e1665354.
- [8] Gholizadeh M, Hu Xun. Removal of heavy metals from soil with biochar composite: A critical review of the mechanism [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(5):e105830.
- [9] 赵宇,艾雯妍,文思颖,等.微生物-植物联合修复镉砷污染农

- 田土壤技术与应用[J].生态毒理学报,2022,17(6):144-162.
- Zhao Yu, Ai Wenyan, Wen Siying, et al. Microbe-plant combined remediation of cadmium and arsenic contaminated agricultural soils: A review[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(6): 144-162.
- [10] Wan Yanan, Liu Jiang, Zhuang Zhong, et al. Heavy metals in agricultural soils: Sources, influencing factors, and remediation strategies[J]. Toxics, 2024, 12(1): e63.
- [11] Upadhyay S K, Chauhan P K, Rajput V D, et al. Advancement in bioremediation of heavy metals in sustainable way: A critical evaluation on current findings and future prospects[J]. Journal of Environmental Sciences, 2026, 163: 771-791.
- [12] 董馨岚, 白哲, 李铭红, 等. 铜铅胁迫下水分、温度和施肥对黑麦草富集能力的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7721-7732.
- Dong Xinlan, Bai Zhe, Li Minghong, et al. Effects of water, temperature and fertilization on accumulation ability of ryegrass under Cu and Pb stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7721-7732.
- [13] 王晓佳, 邹瑾, 曹兵, 等. 基于 CiteSpace 的植物根系分泌物研究现状和趋势[J]. 草业学报, 2022, 31(4): 189-199.
- Wang Xiaojia, Zou Jin, Cao Bing, et al. The knowledge domain and emerging trends in plant root exudates: A bibliometric analysis based on CiteSpace[J]. Acta Prata-culturae Sinica, 2022, 31(4): 189-199.
- [14] 熊健, 古增瑞, 格旦, 等. 农田土壤重金属 Cd 污染修复技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(10): 3969-3985.
- Xiong Jian, Gu Zengrui, Gedan, et al. Research progress on remediation technology of heavy metal Cd pollution in farmland soil[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(10): 3969-3985.
- [15] 田燕燕, 李亚娜. 重金属镉污染农田修复技术研究进展[J]. 现代化工, 2024, 44(9): 36-39.
- Tian Yanyan, Li Yana. Advances in remediation of cadmium polluted agricultural soil [J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(9): 36-39.
- [16] Islam M M, Saxena N, Sharma D. Phytoremediation as a green and sustainable prospective method for heavy metal contamination: A review [J]. RSC Sustainability, 2024, 2(5): 1269-1288.
- [17] 周柳婷, 储薇, 黄小云, 等. 植物修复重金属污染土壤机制研究进展[J]. 环境科学, 2026, 47(4): 2580-2594.
- Zhou Liuting, Chu Wei, Huang Xiaoyun, et al. Research progress on mechanisms of phytoremediation for heavy metal-contaminated soil[J]. Environmental Science, 2026, 47(4): 2580-2594.
- [18] 赵晓峰, 雷梅, 陈同斌. 中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2786-2798.
- Zhao Xiaofeng, Lei Mei, Chen Tongbin. Species, habitat characteristics, and screening suggestions of cadmium hyperaccumulators in China [J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2786-2798.
- [19] 陈伟, 蒋文艳, 杨玉霞, 等. 一种新发现的镉超积累植物: 钻叶紫菀 (*Aster subulatus* Michx.) [J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5592-5599.
- Chen Wei, Jiang Wenyan, Yang Yuxia, et al. A newly discovered cadmium hyperaccumulator: *Aster subulatus* Michx [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5592-5599.
- [20] 王玮琳, 刘清泉, 张永侠, 等. 不同种源马蔺幼苗对 Cd 耐受性及积累特性的差异分析[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(2): 57-63.
- Wang Weilin, Liu Qingquan, Zhang Yongxia, et al. Analysis on differences in tolerance and accumulation characteristics of Cd of *Iris lactea* var. *chinensis* seedlings from different provenances [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2019, 28(2): 57-63.
- [21] 崔立强, 吴龙华, 李娜, 等. 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响[J]. 土壤, 2009, 41(4): 572-576.
- Cui Liqiang, Wu Longhua, Li Na, et al. Effects of soil moisture on growth and uptake of heavy metals of sedum plumbizincicola [J]. Soils, 2009, 41(4): 572-576.
- [22] Wu Haoying, Wang Xiyuan, Gao Haifeng, et al. Alleviating Cd stress in sunflower (*Helianthus annuus*) through the sodium silicate application [J]. Sustainability, 2024, 16(5): e2037.
- [23] 刘明庆, 王佳琪, 席运官, 等. 云南松华坝流域 3 种本土野生植物镉富集特性比较与应用[J]. 环境工程学报, 2023, 17(7): 2296-2304.
- Liu Mingqing, Wang Jiaqi, Xi Yunguan, et al. Comparison and application of cadmium enrichment characteristics of threenative wild plants in Songhuaba basin, Yunnan Province [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(7): 2296-2304.
- [24] 李旭, 晁赢, 阎祥慧, 等. 植物修复技术治理农田土壤重金属污染的研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(12): 10-18.
- Li Xu, Chao Ying, Yan Xianghui, et al. Research progress of phytoremediation of heavy metal polluted farmland soil [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(12): 10-18.
- [25] 马欢欢, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 油葵种植条件下镉生物可利用性对柠檬酸诱导的响应研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 9-14.
- Ma Huanhuan, Qiao Dongmei, Qi Xuebin, et al. Bioavailability of cadmium to oil sunflower after addition of organic acids [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4): 9-14.
- [26] 陆红飞, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 外源有机酸对土壤 pH 值、酶活性和 Cd 迁移转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 542-553.
- Lu Hongfei, Qiao Dongmei, Qi Xuebin, et al. Effects of exogenous organic acids on soil pH, enzyme activity, and cadmium migration and transformation [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(3): 542-553.
- [27] 李乐乐, 李中阳, 吴大付, 等. 外源物质对镉胁迫下不同品种冬小麦苗期镉吸收特征的影响[J]. 灌溉排水学报,

- 2021,40(1):79-90.
- Li Lele, Li Zhongyang, Wu Dafu, et al. Cadmium accumulation in wheat of different varieties at seedling stage as impacted by addition of exogenous elements[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1):79-90.
- [28] 周益帆, 白寅霜, 岳童, 等. 植物根际促生菌促生特性研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50(2):644-666.
- Zhou Yifan, Bai Yinshuang, Yue Tong, et al. Research progress on the growth-promoting characteristics of plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Microbiology China, 2023, 50(2):644-666.
- [29] Basharat Z, Novo L A B, Yasmin A. Genome editing weeds CRISPR: What is in it for phytoremediation? [J]. Plants, 2018, 7(3):e51.
- [30] Wan Yanan, Huang Qingqing, Camara A Y, et al. Water management impacts on the solubility of Cd, Pb, As, and Cr and their uptake by rice in two contaminated paddy soils[J]. Chemosphere, 2019, 228:360-369.
- [31] 窦韦强, 安毅, 秦莉, 等. 土壤pH对镉形态影响的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(3):439-444.
- Dou Weiqiang, An Yi, Qin Li, et al. Advances in effects of soil pH on cadmium form [J]. Soils, 2020, 52(3):439-444.
- [32] 李娜, 夏瑜, 何绪文, 等. 基于 Tessier 法的土壤中不同形态镉的转化及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2021, 52(6):1505-1512.
- Li Na, Xia Yu, He Xuwen, et al. Research progress of Cd form transformation and the effective environmental factors in soil based on Tessier analysis [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(6):1505-1512.
- [33] 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 等. 土壤pH值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(6):79-83.
- Yang Xiumin, Ren Guangmeng, Li Lixin, et al. Effect of pH value on heavy metals form of soil and their relationship [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(6):79-83.
- [34] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 61(3):247-255.
- [35] 马嘉宝, 刘斯文, 王博, 等. 环境修复过程中溶解性有机质对镉环境行为影响研究进展[J]. 岩矿测试, 2025, 44(3):516-529.
- Ma Jiabao, Liu Siwen, Wang Bo, et al. Research progress on the effect of dissolved organic matter on the environmental behavior of cadmium in environmental remediation [J]. Rock and Mineral Analysis, 2025, 44(3):516-529.
- [36] Huang Rong, Dong Meiliang, Mao Peng, et al. Evaluation of phytoremediation potential of five Cd (hyper) accumulators in two Cd contaminated soils [J]. Science of the Total Environment, 2020, 721:e137581.
- [37] 朱丹妹, 刘岩, 张丽, 等. 不同类型土壤淹水对 pH、Eh、Fe 及有效态 Cd 含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8):1508-1517.
- Zhu Danmei, Liu Yan, Zhang Li, et al. Effects of pH, Eh, Fe, and flooded time on available-Cd content after flooding of different kinds of soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(8):1508-1517.
- [38] 毛凌晨, 叶华. 氧化还原电位对土壤中重金属环境行为的影响研究进展 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(10):1669-1676.
- Mao Lingchen, Ye Hua. Influence of redox potential on heavy metal behavior in soils: A review [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10):1669-1676.
- [39] 葛颖, 马进川, 邹平, 等. 水分管理对镉轻度污染农田水稻镉积累的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3):79-86.
- Ge Ying, Ma Jinchuan, Zou Ping, et al. Improving water management to reduce Cd accumulation in rice in lightly Cd-polluted paddy soils [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3):79-86.
- [40] 崔晓荧, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11):2177-2184.
- Cui Xiaoying, Qin Junhao, Li Huashou. Effect of different water management modes on rice (*Oryza sativa* L.) growth and heavy metal transport characteristics [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(11):2177-2184.
- [41] Tudi M, Yang Linsheng, Wang Li, et al. Simulating the effects of drip and flood irrigation on the leaching, migration, and redistribution of heavy metals in contaminated soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2025, 294:e118057.
- [42] 陈康, 王会全, 陈竞楠. 不同节水灌溉模式对白茶品质及茶园土壤重金属含量的影响 [J]. 中国农村水利水电, 2021(2):119-123.
- Chen Kang, Wang Huiquan, Chen Jingnan. Effects of different irrigation patterns on quality of white tea and content of heavy metals in tea garden soil [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(2):119-123.
- [43] Wei Binggan, Yu Jiangping, Dong Yunshe, et al. Effects of drip irrigation on migration and distribution of heavy metals in soil profile [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(4):3632-3640.
- [44] Wang Zhen, Liu Wenjing, Zhang Chuangchuang, et al. Mechanisms of S cooperating with Fe and Mn to regulate the conversion of Cd and Cu during soil redox process revealed by LDHs-DGT technology [J]. Science of the Total Environment, 2023, 867:e161431.
- [45] Yang Jingjing, Guan Pingting, Zhang Peng, et al. Stronger microbial nutrient limitations in subsoil along the precipitation gradient of agroecosystem: Insights from soil enzyme activity and stoichiometry [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11:e1137172.
- [46] Gan Xinhong, Liu Qian, Liang Xiaolong, et al. Microbial community shifts and functional constraints of dechloro-

- rinators in a legacy pharmaceutical-contaminated soil[J]. Soil Systems, 2025, 9(3): e65.
- [47] Xie Yan, Fan Jibiao, Zhu Weixi, et al. Effect of heavy metals pollution on soil microbial diversity and bermudagrass genetic variation [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: e755.
- [48] Zhang Chang, Nie Shuang, Liang Jie, et al. Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure [J]. Science of the Total Environment, 2016, 557/558: 785-790.
- [49] 王杏, 王革娇, 史凯祥. 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, 2023, 50(4): 1666-1680. Wang Xing, Wang Gejiao, Shi Kaixiang. Research progress in microbial detoxification of cadmium and bioremediation based on microorganism-plant interaction [J]. Microbiology China, 2023, 50(4): 1666-1680.
- [50] Tan Xiangping, Wang Ziquan, Lu Guannan, et al. Kinetics of soil dehydrogenase in response to exogenous Cd toxicity [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 329: 299-309.
- [51] Goncharuk E A, Zagorskina N V. Heavy metals, their phytotoxicity, and the role of phenolic antioxidants in plant stress responses with focus on cadmium: Review [J]. Molecules, 2023, 28(9): e3921.
- [52] Li Wenjing, Jiang Lamei, Zhang Yang, et al. Structure and driving factors of the soil microbial community associated with *Alhagi sparsifolia* in an arid desert [J]. PLoS One, 2021, 16(7): e0254065.
- [53] 宋波, 李文宝, 郭鑫, 等. 内蒙古河套灌区向日葵和玉米农田耕作层土壤细菌群落特征及构建影响因子[J]. 土壤通报, 2025, 56(1): 189-200. Song Bo, Li Wenbao, Guo Xin, et al. Soil bacterial community characteristics and construction influencing factors of sunflower and maize plough layer in Hetao irrigation district of Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(1): 189-200.
- [54] Joonu J. Heavy metal resistant CZC genes identification in *Bacillus cereus*, *Enterobacter asburiae* and *Pseudomonas aeruginosa* isolated from BHEL industry, Tamilnadu [J]. Journal of Microbiology Biotechnology, 2016, 5: 27-31.
- [55] Islamzade T, İslamzade R, Azizov R, et al. Impact of Cadmium-contaminated water and irrigation levels on microbiological properties of soils with different textures [J]. Eurasian Journal of Soil Science, 2025, 14(2): 107-115.
- [56] Dou Chaoyin, Lv Yuping, Sun Yidi, et al. Assessment of soil enzyme activities in plant root zone of saline soil reclaimed by drip irrigation with saline groundwater [J]. Agronomy, 2024, 14(7): e1416.
- [57] Wang Meng, Wang Lifu, Shi Huading, et al. Soil bacteria, genes, and metabolites stimulated during sulfur cycling and cadmium mobilization under sodium sulfate stress [J]. Environmental Research, 2021, 201: e111599.
- [58] Qin Weitong, Liu Xiaoqing, Yu Xiaoxia, et al. Identification of cadmium resistance and adsorption gene from *Escherichia coli* BL21 (DE3) [J]. RSC Advances, 2017, 7(81): 51460-51465.
- [59] Jin Jie, Wang Chao, Liu Ronggui, et al. Potential genetic characteristics of *Bacillus velezensis* LZUR632 enhance the resistance of *Achnatherum inebrians* to Cd stress by altering rhizosphere microbial community composition and functional genes [J]. Plant and Soil, 2025, 514(1): 1387-1404.
- [60] Davidova S, Milushev V, Satchanska G. The mechanisms of cadmium toxicity in living organisms [J]. Toxics, 2024, 12(12): e875.
- [61] Nies D H. Efflux-mediated heavy metal resistance in prokaryotes [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2003, 27(2/3): 313-339.
- [62] Abbas S Z, Rafatullah M, Hossain K, et al. A review on mechanism and future perspectives of cadmium-resistant bacteria [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 15(1): 243-262.
- [63] Wang Huimin, Wu Pingxiao, Liu Juan, et al. The regulatory mechanism of *Chryseobacterium* sp. resistance mediated by montmorillonite upon cadmium stress [J]. Chemosphere, 2020, 240: e124851.
- [64] Xie Kan, Peng Huasong, Hu Hongbo, et al. OxyR, an important oxidative stress regulator to phenazines production and hydrogen peroxide resistance in *Pseudomonas chlororaphis* GP72 [J]. Microbiological Research, 2013, 168(10): 646-653.
- [65] 陈瑞红, 秦永丽, 赖凤, 等. 不同类型微生物钝化固定镉污染的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(6): 87-93. Chen Ruihong, Qin Yongli, Lai Feng, et al. Research progress of different types of microorganisms passivation and fixation of cadmium contamination [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(6): 87-93.
- [66] Chellaiah E R. Cadmium (heavy metals) bioremediation by *Pseudomonas aeruginosa*: A minireview [J]. Applied Water Science, 2018, 8(6): e154.
- [67] 王亚, 冯发运, 葛静, 等. 植物根系分泌物对土壤污染修复的作用及影响机理[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 829-842. Wang Ya, Feng Fayun, Ge Jing, et al. Effects and mechanisms of plant root exudates on soil remediation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 829-842.
- [68] 罗阳, 陈原, 丁娜, 等. 植物根系分泌物组成、释放机制和收集技术研究进展[J]. 乡村科技, 2023, 14(1): 127-131. Luo Yang, Chen Yuan, Ding Na, et al. Research progress on composition, release mechanism and collection technology of plant root exudates [J]. Rural Science And Technology, 2023, 14(1): 127-131.
- [69] 莫思琪, 曹旖旎, 谭倩. 根系分泌物在重金属污染土壤生态修复中的作用机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2022,

- 41(2):382-392.
- Mo Siqi, Cao Yini, Tan Qian. Research progress on root exudates and their effects on ecological remediation of heavy metal contaminated soil [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(2):382-392.
- [70] 王雨茜, 陈莲, 张培珍, 等. 根系分泌物与根际微生物对土壤重金属污染的响应与修复作用[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5):19-27.
- Wang Yuhan, Chen Lian, Zhang Peizhen, et al. Response and remediation of root exudates and rhizosphere microorganisms to soil heavy metal pollution: A review[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(5):19-27.
- [71] 刘长风, 段士鑫, 张晓宇, 等. 植物根系分泌物在重金属胁迫下的响应研究进展[J]. 福建农业学报, 2021, 36(12):1506-1514.
- Liu Changfeng, Duan Shixin, Zhang Xiaoyu, et al. Research advances on plant root exudates in response to heavy metal stress[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2021, 36(12):1506-1514.
- [72] 罗庆, 孙丽娜, 胡筱敏. 镉超富集植物东南景天根系分泌物的代谢组学研究[J]. 分析化学, 2015, 43(1):7-12.
- Luo Qing, Sun Lina, Hu Xiaomin. Metabonomics study on root exudates of Cd hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2015, 43(1):7-12.
- [73] 徐国伟, 陆大克, 王贺正, 等. 施氮和干湿灌溉对水稻抽穗期根系分泌有机酸的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4):516-525.
- Xu Guowei, Lu Dake, Wang Hezheng, et al. Coupling effect of alternate wetting and drying irrigation and nitrogen rate on organic acid in rice root secretion at heading stage [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(4):516-525.
- [74] Gu Hanzhu, Wang Xian, Zhang Minhao, et al. The response of roots and the rhizosphere environment to integrative cultivation practices in paddy rice [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2024, 23(6):1879-1896.
- [75] Wieczorek J, Baran A, Bubak A. Mobility, bioaccumulation in plants, and risk assessment of metals in soils[J]. Science of the Total Environment, 2023, 882:e163574.
- [76] 丁娜, 林华, 张学洪, 等. 植物根系分泌物与根际微生物交互作用机制研究进展[J]. 土壤通报, 2022, 53(5):1212-1219.
- Ding Na, Lin Hua, Zhang Xuehong, et al. Interaction mechanism between root secretion and rhizosphere microorganisms: A review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(5):1212-1219.
- [77] 黄雨轩, 游欣, 张林平, 等. 根系分泌物提高土壤磷有效性研究概述[J]. 林业科学研究, 2024, 37(4):193-203.
- Huang Yuxuan, You Xin, Zhang Linping, et al. Root exudates improving soil phosphorus availability: A review [J]. Forest Research, 2024, 37(4):193-203.
- [78] 杨小容, 吴柳宗, 温绍福, 等. 植物根系分泌物与根际微生物修复土壤重金属污染机制的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(10):13-20.
- Yang Xiaorong, Wu Liuzong, Wen Shaofu, et al. Research progress on mechanism of plant root exudates and rhizosphere microorganisms in remediation of soil heavy metal pollution [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(10):13-20.
- [79] Ilinskiy A, Vinogradov D, Politaeva N, et al. Features of the phytoremediation by agricultural crops of heavy metal contaminated soils[J]. Agronomy, 2023, 13(1):e127.
- [80] 王亚丹, 乔冬梅, 陆红飞. 水分管理对重金属污染土壤植物修复效果的影响研究综述[J]. 土壤通报, 2022, 53(6):1499-1505.
- Wang Yadan, Qiao Dongmei, Lu Hongfei. Effects of water management on phytoremediation of heavy metal contaminated soils [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6):1499-1505.
- [81] Yu Jianfei, Zhang Yi, Wang Yutao, et al. Ecosystem photosynthesis depends on increased water availability to enhance carbon assimilation in semiarid desert steppe in northern China [J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 38:e02202.
- [82] Hao Yuefeng, Mao Jiafu, Bachmann C M, et al. Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: A review [J]. Climate and Atmospheric Science, 2025, 8:e16.
- [83] Sun Lingyun, Mo Jinling, Wang Zhenjiang, et al. Molecular mechanisms of root exudate-mediated remediation in soils co-contaminated with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Toxics, 2025, 13(12):e1044.
- [84] Shanker B O, Shivran A C, Dudwal B L, et al. Productivity and profitability of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) influenced by drip irrigation and micronutrient application methods [J]. Indian Journal of Ecology, 2022, 49(1):100-104.
- [85] Liu Yuan, Hu Chao, Li Baogui, et al. Subsurface drip irrigation reduces cadmium accumulation of pepper (*Cap-sicum annuum* L.) plants in upland soil [J]. Science of the Total Environment, 2021, 755:e142650.
- [86] 张艳超, 任艳芳, 林肖, 等. 不同灌溉方式对镉污染下水稻生长和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2):51-54.
- Zhang Yanchao, Ren Yanfang, Lin Xiao, et al. Effects of different irrigation methods on rice growth and yield under cadmium pollution [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(2):51-54.
- [87] 宋肖琴, 陈国安, 陈福明, 等. 不同水分管理措施对中度镉污染农田水稻吸收和积累镉的影响[J]. 农学学报, 2025, 15(6):42-49.
- Song Xiaoqin, Chen Guoan, Chen Fuming, et al. The effects of different water management measures on absorption and accumulation of cadmium by rice in moderately cadmium polluted farmland [J]. Journal of Agriculture, 2025, 15(6):42-49.

- [88] 张青青,江落雁,蒋成爱.4种重金属在鱼腥草中的分布特点及其影响因素[J].三峡生态环境监测,2023,8(3):78-87.
Zhang Qingqing, Jiang Luoyan, Jiang Cheng'ai. Distribution characteristics and influencing factors of four heavy metals in various organs of *Houttuynia cordata* [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2023,8(3):78-87.
- [89] 蒋凤林,雷雄彪,赵嘉暄,等.植物根毛生长发育过程及分子调控机制[J].作物杂志,2024(6):9-17.
Jiang Fenglin, Lei Xiongbiao, Zhao Jiaxuan, et al. Growth and development process and molecular regulation mechanism of plant root hair [J]. Crops, 2024(6):9-17.
- [90] 孙婕妤,刘艳秋,李佰林,等.植物对镉的耐性机制以及对镉污染土壤修复的研究进展[J].江苏农业科学,2018,46(7):12-19.
Sun Jieyu, Liu Yanqiu, Li Bailin, et al. Research progress on mechanism of plant tolerance to cadmium and remediation of cadmium contaminated soil [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(7):12-19.
- [91] Sterckeman T, Thomine S. Mechanisms of cadmium accumulation in plants [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2020,39(4):322-359.
- [92] 柯嘉雯,程张浩,高雪夷,等.镉污染下的植物响应:从吸收、转运到应答与缓解机制[J].植物生态学报,2026,50(4):814-832.
Ke Jiawen, Cheng Zhanghao, Gao Xueyi, et al. Plant responses to cadmium contamination: Mechanisms of uptake, transport, defense and detoxification [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2026,50(4):814-832.
- [93] Ai Hao, Wu Daxia, Li Chunli, et al. Advances in molecular mechanisms underlying cadmium uptake and translocation in rice [J]. Frontiers in Plant Science, 2022,13:e1003953.
- [94] Tao Jingyu, Lu Lingli. Advances in genes-encoding transporters for cadmium uptake, translocation, and accumulation in plants [J]. Toxics, 2022,10(8):e411.
- [95] He Chuntao, Wang Xuesong, Hu Xiaxin, et al. Phytochelatin-mediated cultivar-dependent Cd accumulations of *Lactuca sativa* and implication for Cd pollution-safe cultivars screening [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024,72(1):715-725.
- [96] 陈江民,杨永杰,黄奇娜,等.持续淹水对水稻镉吸收的影响及其调控机理[J].中国农业科学,2017,50(17):3300-3310.
Chen Jiangmin, Yang Yongjie, Huang Qina, et al. Effects of continuous flooding on cadmium absorption and its regulation mechanisms in rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017,50(17):3300-3310.
- [97] Zhong Songxiong, Li Xiaomin, Li Fangbai, et al. Cadmium uptake and transport processes in rice revealed by stable isotope fractionation and Cd-related gene expression [J]. Science of the Total Environment, 2022,806:e150633.
- [98] Zha Q, Xiao Z, Zhang X, et al. Cloning and functional analysis of MxNRAMP1 and MxNRAMP3, two genes related to high metal tolerance of *Malus xiaojinensis* [J]. South African Journal of Botany, 2016,102:75-80.
- [99] Li Jiyu, Wang Lihua, Zheng Lu, et al. A functional study identifying critical residues involving metal transport activity and selectivity in natural resistance-associated macrophage protein 3 in *Arabidopsis thaliana* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018,19(5):e1430.
- [100] Yu Wenjian, Deng Shurong, Chen Xin, et al. PcNRAMP1 enhances cadmium uptake and accumulation in *Populus × canescens* [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022,23(14):e7593.
- [101] Kozak K, Antosiewicz D M. Tobacco as an efficient metal accumulator [J]. BioMetals, 2023,36(2):351-370.
- [102] Zhang Wanyue, Guan Meiyan, Chen Mingxue, et al. Mutation of OsNRAMP5 reduces cadmium xylem and phloem transport in rice plants and its physiological mechanism [J]. Environmental Pollution, 2024,341:e122928.
- [103] Zhang Qianhui, Chen Yiqi, Li Zhenbang, et al. Defense guard: Strategies of plants in the fight against Cadmium stress [J]. Advanced Biotechnology, 2024,2(4):e44.
- [104] 熊娟,王依涵,陈畅,等.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,2022,41(3):441-454.
Xiong Juan, Wang Yihan, Chen Chang, et al. Research progress on the remediation of *Sedum plumbizincicola* in cadmium-contaminated farmland soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(3):441-454.
- [105] Spielmann J, Ahmadi H, Scheepers M, et al. The two copies of the zinc and cadmium ZIP6 transporter of *Arabidopsis halleri* have distinct effects on cadmium tolerance [J]. Plant, Cell and Environment, 2020,43(9):2143-2157.
- [106] Zhang Jialiang, Zhu Yanchun, Yu Lijuan, et al. Research advances in cadmium uptake, transport and resistance in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Cells, 2022,11(3):e569.
- [107] Tan Longtao, Qu Mengmeng, Zhu Yuxing, et al. ZINC TRANSPORTER5 and ZINC TRANSPORTER9 function synergistically in zinc/cadmium uptake [J]. Plant Physiology, 2020,183(3):1235-1249.
- [108] Yang Guangzhe, Fu Shan, Huang Jingjing, et al. The tonoplast-localized transporter OsABCC9 is involved in cadmium tolerance and accumulation in rice [J]. Plant Science, 2021,307:e110894.
- [109] 张星雨,叶志彪,张余洋.植物响应镉胁迫的生理与分子机制研究进展[J].植物生理学报,2021,57(7):1437-1450.
Zhang Xingyu, Ye Zhibiao, Zhang Yuyang. Advances in physiological and molecular mechanism of plant response to cadmium stress [J]. Plant Physiology Communications, 2021,57(7):1437-1450.
- [110] Fu Shan, Lu Youshe, Zhang Xiang, et al. The ABC transporter ABCG36 is required for cadmium tolerance in rice [J]. Journal of Experimental Botany, 2019,70(20):5909-5918.