

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.20357

营养元素与螯合剂强化植物修复重金属污染土壤研究进展

吴仁杰, 陈银萍*, 曹雯婕, 李晓辉, 郑彦, 姚彩萍

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 植物修复技术具有安全、环保、经济、操作简单等独特优势, 符合未来重金属污染土壤修复技术的发展趋势, 因而应用前景广阔、发展潜力巨大。然而, 修复周期长、超富集植物生物量不足、修复效率低、修复范围有限等缺点限制了植物修复的大规模应用。因此, 如何增强植物修复效果逐渐成为一个土壤修复热点问题。螯合强化能显著增加土壤中有效态重金属的含量并提高其迁移转化能力。营养元素的施加则有利于维持植物在重金属胁迫下的生长。对螯合剂和营养元素(N、P、K)强化植物修复的作用方式和强化效果进行了总结, 深入分析了内在的作用机制以及影响因素, 探讨了强化技术目前存在的问题, 并对螯合剂与营养元素联合强化的可行性进行了展望。

关键词: 土壤重金属; 螯合剂; 营养元素; 植物修复

随着现代社会工业化、城镇化的急剧发展, 大量重金属通过各种人类活动迁移到土壤环境中并逐渐积累, 对农业生产和人类健康构成严重威胁^[1]。由于土壤重金属污染具有隐蔽性、滞后性、积累性、形态多样性、难以自然降解等特点, 一旦进入土壤就会持续地造成污染^[2-3]。据环境保护部和国土资源部2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 土壤污染超标地区占比达到16.1%, 其中重金属污染占全部超标类型的82.8%^[4]。土壤重金属污染形势已然十分严峻, 土壤重金属治理已经刻不容缓。

重金属污染土壤的修复与治理是现阶段研究的热点与难点之一。近几十年来, 随着科学技术的进步, 逐渐发展出多种各具特色的重金属污染土壤修复技术。传统理化方法修复速度较快, 但成本高, 且会造成土壤结构的破坏, 甚至增加土壤重金属浸出污染地下水的风险^[5]。植物修复作为一种新兴修复技术, 具有环保、安全、经济、环境扰动小等诸多优点, 符合重金属污染土壤修复技术发展趋势, 极具研究价值^[6]。然而, 较长的修复周期、较低的修复效率、较小的超富集植物生物量以及有限的修

复范围等诸多缺陷限制了植物修复技术的大规模应用^[7-8]。为进一步挖掘和释放植物修复技术的巨大潜力, 植物修复强化技术日渐引起相关研究者的关注。螯合强化技术是利用螯合剂与土壤重金属发生螯合作用, 使重金属从不溶态转变成可溶态, 形成水溶性的金属-螯合剂络合物, 从而提高植物对重金属的修复效率。营养强化则是通过施加N、P、K等营养元素以促进植物生长、调节土壤pH、缓解重金属胁迫, 进而增强植物对重金属的吸收。

本文将围绕螯合剂和营养元素2种强化措施, 从其作用机制、强化效果、影响因素及存在的问题等方面进行综述, 并对二者联合作用的可行性进行探讨, 以期为该领域的研究者提供参考。

1 螯合诱导植物修复技术

向重金属污染土壤添加螯合剂以增强植物修复效果的技术称为螯合诱导植物修复技术。当前植物修复中常用的螯合剂主要可分为2类(表1), 一类是EDTA(乙二胺四乙酸)、EDDS(乙二胺二琥珀酸)和NTA(氨基三乙酸)等多羧基氨基酸螯合剂; 另一类是草酸、酒石酸、柠檬酸和苹果酸等天然低分子有机酸^[9]。

1.1 多羧基氨基酸

多羧基氨基酸类螯合剂施入土壤后, 自身含有的配位体能与土壤溶液中的重金属离子结合形成金属螯合物, 打破重金属污染物在土壤液相和固相之

收稿日期: 2020-06-22; 录用日期: 2020-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560161; 31260089; 31640012)。

作者简介: 吴仁杰(1995-), 男, 山西武乡人, 硕士研究生, 研究方向为植物修复重金属污染土壤。E-mail: zhizhuoyuren@163.com。

通讯作者: 陈银萍, E-mail: yinpch@mail.lzjtu.cn。

间的分配平衡, 促进土壤颗粒表面重金属离子的解吸附能力, 增加水溶性重金属的浓度^[10-11]。

表 1 植物修复中常用的多羧基氨基酸螯合剂和天然低分子有机酸

类别	名称	化学式
多羧基氨基 酸螯合剂	乙二胺四乙酸 (EDTA)	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈
	乙二胺二琥珀酸 (EDDS)	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈
	氨基三乙酸 (NTA)	C ₆ H ₉ NO ₆
	乙二醇二乙醚二胺四乙酸 (EGTA)	C ₁₄ H ₂₄ N ₂ O ₁₀
	二乙基三胺五乙酸 (DTPA)	C ₁₄ H ₂₃ N ₃ O ₁₀
天然低分子 有机酸	乙二酸 (草酸)	C ₂ H ₂ O ₄
	2- 羟基丁二酸 (苹果酸)	C ₄ H ₆ O ₅
	3- 羟基 -1, 3, 5- 戊三酸 (柠檬酸)	C ₆ H ₈ O ₇
	2, 3- 二羟基丁二酸 (酒石酸)	C ₄ H ₆ O ₆
	丁二酸 (琥珀酸)	C ₄ H ₆ O ₄

EDTA 能显著提高土壤中重金属的溶解度, 增强植物修复效率, 是强化植物修复常用的螯合剂之一。韩甘等^[12]发现, EDTA 使油葵 (*Helianthus annuus*) 根际土壤中 Cd 含量降低了 25%, 油葵植株中 Cd 积累量却较对照增加了 41.6%, 同时未对植株生长产生抑制, 这表明 EDTA 不仅能增强根际土壤 Cd 的生物可利用性, 还能充分促进植物对 Cd 的吸收。Li 等^[13]研究结果表明, 随着 EDTA 施加浓度的提高, 土壤中 Cu、Zn、Ni、Cd、Pb 浓度均有降低, 黑麦草 (*Lolium perenne*) 地上部和地下部中 Cu、Zn、Ni、Cd、Pb 浓度均有明显增加, 这是由于 EDTA 可以促进土壤对重金属离子的解吸能力并能同重金属离子结合为溶解度和迁移性更强的络合物, 不仅有利于土壤重金属向可交换态的转变, 也利于植物对重金属的吸收。EDTA 也可以通过降低土壤 pH 来改变重金属赋存形态, 但相比于络合作用, EDTA 通过调节 pH 对重金属形态的影响则小得多。Chigbo 等^[14]发现添加适当浓度的 EDTA 使玉米 (*Zea mays*) 芽中的 Cu 积累量达到 53.8 mg/kg, 是未施加 EDTA 组积累量的 3 倍, 同时 EDTA 使大量由土壤颗粒固定的 Cu 释放到土壤溶液中, 一定程度上增强了 Cu 胁迫, 大量 Cu²⁺ 进入玉米体内超过其耐受能力反而又对植物生长表现出明显的毒害作用。Tananonchai 等^[15]发现, EDTA 能显著增强侏儒草对 Cd 的积累与吸收, 这是因为 EDTA 与 Cd 形成中性络合物之后能更容易地穿过侏儒草的木质素层, 从而大量在其内皮层积累; 而在未添

加 EDTA 的处理组中, 由于木质素和软木脂的存在导致 Cd 无法向内皮层转移, 因而表现出相反的积累趋势。

EDDS 是 EDTA 的结构异构体, 不仅具有极强的螯合能力, 还能在 5 ~ 8 d 内于各种环境介质中完全降解, 其降解产物无害, 对环境影响较小^[16]。因此, EDDS 在强化植物修复方面更受研究者青睐。Attinti 等^[17]研究显示, EDDS 能够有效活化土壤中的 Pb 并促进香根草 (*Chrysopogon zizanioides*) 对 Pb 的积累和转运。适当浓度的 EDDS 还能促进植物生长, 杨波等^[18]研究结果表明, 低浓度 (0.5 mmol/L) EDDS 使三叶鬼针草 (*Bidens pilosa*) 株高增加 19.03%、根长增加 13.10%、地上部和地下部鲜重均增加超过 50%, 这与王天顺等^[19]研究结果类似。Zhang 等^[20]通过盆栽试验同样发现 EDDS 不仅显著提高了 2 种蓖麻 (*Ricinus communis*) 的 Cd、Pb 富集量, 生物量也分别较对照增加了 28.8% 和 59.4%。EDDS 对植物生物量的促进作用可能与其降解产物和降解途径有关。有研究表明, EDDS 在土壤中将首先降解为 N-(2- 氨基乙基) 天冬氨酸, 再降解为乙二胺, 最终彻底降解为 CO₂ 和 NH₄⁺-N, NH₄⁺-N 又很容易通过硝化途径转化为 NO₃⁻-N, 进而为植物在胁迫下的生长提供了部分养分^[21]。

1.2 天然低分子有机酸

天然低分子有机酸是植物体内的重要代谢物, 能促进土壤重金属离子解吸附, 提高生物利用性^[22]。Chen 等^[23]研究显示, 在重金属污染土壤中种植毛竹 (*Phyllostachys pubescens*) 后, 土壤中水溶态重金属含量出现不同程度的增加, 这是由于其根系分泌的多种有机酸可以解吸被土壤固定的重金属并能同重金属离子形成可溶性配合物。有研究表明, 加入外源草酸、柠檬酸可提高土壤有效态 U 的含量并增强芥菜 (*Brassica juncea*) 对 U 的转运与富集, 且柠檬酸效果优于草酸^[24]。赖彩秀等^[25]发现, 添加一定浓度的苹果酸和草酸能活化土壤中的 Cd 和 Zn, 并促进小飞扬草 (*Euphorbia thymifolia*) 和三叶鬼针草的吸收和积累效果, 且苹果酸总体效果略微强于草酸。薛博晗等^[26]通过盆栽试验发现, 对于受高浓度 (50 mg/kg) Cd 胁迫下的披碱草 (*Elymus dahuricus*), 苹果酸、柠檬酸和草酸可以不同程度地增加其株高和根长, 减轻 Cd 对植物的生理毒害, 积极促进 Cd 的吸收和转运, 其中草酸促进效果最佳。Hu 等^[27]的研究结果

显示, 相同浓度的柠檬酸比 EDDS 更能促进博落回 (*Macleaya cordata*) 对 U 的吸收与积累。以上研究结果表明, 不同的低分子有机酸在活化重金属和促进植物吸收富集方面表现不尽相同, 这主要取决于试验条件和有机酸本身的性质。

研究表明, 施加柠檬酸有利于土壤重金属由铁锰氧化态转化为可交换态和碳酸盐结合态, 增强了土壤重金属的生物可利用性^[28]。此外, 柠檬酸为三羧酸类化合物, 不仅可以释放更多 H^+ 以降低土壤 pH, 还能提供更多的重金属结合位点, 因而具有更出色的强化效果。而草酸与苹果酸虽然同为二元羧酸, 但是游离的草酸会优先同 Ca^{2+} 结合而导致土壤中草酸的有效含量下降, 因此草酸整体强化效果在一定程度上弱于苹果酸^[29]。天然低分子有机酸的结构与其作用能力有密切联系。许多低分子有机酸化合物具有成对的 OH/COOH 依附于相邻两个 C 原子上或者两个 COOH 直接相连的特殊结构, 这种特殊结构可与重金属离子形成稳定、低毒且易于移动的五元或六元环状重金属-有机酸复合物, 不仅避免了重金属离子对植物产生直接胁迫, 还能促进植物对重金属的积累^[13, 30]。综上可知, 低分子有机酸的质子酸效应和有机酸阴离子络合效应是其提高土壤重金属生物可利用性、促进植物吸收与富集的直接途径。另外, 低分子有机酸还能通过缓解氧化应激、提升相关抗氧化酶活性与基因表达、调节光合色素的合成与分解以及促进植物对营养元素的吸收等多种间接方式进一步体现其在植物修复中的强化作用^[31-34]。

2 营养元素强化植物修复

氮肥、磷肥、钾肥是目前使用最为广泛的肥料。施肥可以提高植物生物量和品质, 促进植物生长和重金属积累; 另一方面, 施肥还可以增加土壤肥力, 改变土壤 pH 和某些理化性质, 进而影响土壤中重金属的生物有效性^[35]。

2.1 氮肥

植物的生物量是衡量其植物修复潜力的重要指标^[36]。N 作为植物必需的大量营养元素之一, 适量施入能够有效促进植物生长发育, 提高植物生物量和品质, 有助于植物体蛋白质的合成并减缓重金属胁迫诱导产生的氧化损伤^[37-38]。氮肥的施加对植物积累和转运重金属有一定影响。曹柳等^[39]研究发现施 N 对 3 种向日葵 (*Helianthus annuus*) 生

物量均有明显的促进作用, 并显著提高了 3 种向日葵的 Cd 积累量。不同植物对 N 素的需求也不相同。相关研究结果表明 NO_3^- 和 Cr^{6+} 之间存在竞争吸收的关系, 缺 N 培养条件下李氏禾 (*Leersia hexandra*) 的 Cr^{6+} 吸收速率较 5 mmol/L NO_3^- 培养条件高出 43.4%^[40]。不同形态氮肥对植物吸收积累重金属的影响主要是通过改变土壤 pH 实现的。铵态氮肥多为生理酸性氮肥, 施入土壤后解离成 NH_4^+ 和对应的酸根离子。土壤胶体上的 H^+ 可与 NH_4^+ 发生交换反应而得到释放, 植物在吸收 NH_4^+ 后为保持根系阴阳离子吸收平衡也会释放 H^+ , 而 NH_4^+ 在土壤中的硝化作用同样会释放 H^+ ^[41-42]。大量未被吸收的酸根离子与 H^+ 结合而导致 pH 降低, 增加了重金属离子的生物利用度, 促进了植物的富集。而当植物吸收硝态氮肥中 NO_3^- 时, 则会分泌 OH^- 或者 HCO_3^- 而造成根际土壤 pH 升高, 使土壤有效态重金属含量降低^[43]。Liu 等^[44]的研究却显示, 硝态氮肥降低了根际土壤和非根际土壤 pH, 增加了土壤有效态 Cd 含量, 这可能与试验植物、供试土壤本身性质有关。

尽管施加硝态氮肥通常降低了土壤有效态重金属含量, 却未必会抑制植物对重金属的积累。张存款等^[45]的研究就发现施加 $Ca(NO_3)_2$ 显著提高了李氏禾根茎中 Cu 的积累量。这可能是由于 NO_3^- 可通过根系吸收和木质部的装载, 最终在叶片中对植物产生刺激作用, 从而促进植物对 Cd 的积累^[46]。

尿素 [$CO(NH_2)_2$] 是目前含 N 量最高的氮肥, 能为植物生长提供大量营养, 还能促进植物对重金属的富集。施娴等^[47]研究表明, 适度施加尿素有利于小麦在 As、Cd、Pb 复合胁迫下的生长并促进小麦对重金属的吸收。王凤花等^[48]发现, 施加尿素能显著增加土壤中的有效态 Cd 含量, 促进小白菜 (*Brassic chinensis*) 对 Cd 的积累和转运。这是由于尿素施入土壤后水解转化为 NH_4^+ 和 CO_2 , 降低了土壤 pH 并增加了重金属离子的生物可利用性^[41-42]。

2.2 磷肥

P 是植物必需的大量元素之一, 施 P 能增强植物对 N、K 的吸收, 促进植物光合作用, 保证植物的正常发育, 利于植物生物量的积累^[49-50]。

磷肥除供给植物营养外, 还能改变土壤重金属离子分布以及植物对重金属的吸收^[51]。王朋超等^[52]的盆栽试验表明, 生理酸性肥料普钙 [主要成分为 $Ca(H_2PO_4)_2$] 和碱性肥料钙镁磷肥均能提高

酸性红壤中油菜生物量并显著降低油菜对 Cd 的积累,同时还能不同程度地降低酸性土壤中有效态 Cd 的含量;随着碱性肥料钙镁磷肥施入水平的增加,土壤 pH 随之升高,土壤有效态 Cd 含量反而出现反弹升高的趋势,但仍然低于对照组含量。何其辉等^[53]也发现,酸性土壤中施入 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 使重金属有效态含量降低且抑制水稻幼苗对 Cd 的积累,在碱性土壤中有效态含量反而增加并促进积累。Grifoni 等^[54]的研究结果显示,施加 KH_2PO_4 未能提高高浓度 As 胁迫下印度芥菜的生物量,但显著增加了植物根茎中的 As 积累量。Wu 等^[55]发现 P 素和 Cr^{6+} 之间还存在协同作用,添加 P 素增强了李氏禾对 Cr^{6+} 的吸收并促进 Cr^{6+} 由根部向地上部分的转运。

磷肥在土壤中与重金属离子的作用方式存在明显的多样性与复杂性,其作用机制主要包括难溶磷酸盐的直接表面吸附、诱导增强土壤的吸附作用、 PO_4^{3-} 与重金属离子发生沉淀作用等^[52, 56]。也有研究表明磷肥中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 同重金属离子在土壤吸附位点与植物根系表面吸收位点存在竞争效应^[57-58]。此外,不同种类磷肥成分不同,影响土壤酸碱度的能力不同,施入土壤后会使得局部土壤酸化或碱化,影响重金属离子在土壤中的活性,进而导致植物对重金属离子的吸收产生差异^[59]。由此看出,磷肥在土壤中的化学行为始终没有明确的作用规律,其作用效果也往往受磷肥成分、土壤性质、重金属离子种类和植物自身特性等多种因素的影响。

2.3 钾肥

钾肥在农业生产中被广泛应用于提高作物产量和改善品质^[60]。在重金属污染的土壤中,添加适当浓度的钾肥大多能提高植物生物量。潘杰等^[61]发现受 Pb 胁迫的延胡索 (*Corydalis yanhusuo*) 幼苗株高随 K_2SO_4 施加水平的增加而呈现先增加后降低的趋势,这与前人研究结果类似^[62]。王小晶等^[63]的研究表明,在低 Pb 污染土壤 (50 mg/kg) 中施 K 能显著降低白菜 (*Brassica pekinensis*) 对 Pb 的吸收;高浓度 Pb 污染条件下 (200 mg/kg),白菜中 Pb 含量则随施 K 水平增加而增加。研究人员关于钾肥对植物、重金属离子的影响并没有达成一致。袁婷等^[64]在低 Cd 污染水平下得到了与王小晶等^[63]类似的结论,但高 Cd 污染水平下施加 K_2SO_4 、 K_2CO_3 、 KNO_3 和 KH_2PO_4 均抑制了白菜对

Cd 的吸收。Komínková 等^[65]发现在 2 种 Cs 浓度下,马蹄莲 (*Calla palustris*) 对 Cs 的吸收量均与施 K 水平呈负相关。这是因为不同钾肥对土壤中重金属有不同的活化效果。大量研究发现, KCl 对土壤重金属的活化效果强于 K_2SO_4 ^[66-68]。Norvell 等^[69]认为土壤中 Cl^- 浓度高于 10 mmol/L 时就能与 Cd^{2+} 发生显著的络合反应。当施用 KCl 后, Cl^- 能与土壤中 Cd^{2+} 结合成 CdCl^+ 、 CdCl_2 、 CdCl_3^- 、 CdCl_4^{2-} 等相对稳定的络合物,提高了 Cd^{2+} 的生物有效性和迁移性^[70]。而土壤对低质量浓度的 SO_4^{2-} 表现为专性吸附,增加了土壤颗粒表面的净负电荷,导致土壤对重金属离子吸附作用增强,生物可利用性降低^[71]。然而,晏哲等^[72]却发现,施入 K_2SO_4 降低了土壤 pH,进而提高了土壤中 Cd 的有效态含量。王林等^[73]的研究结果显示, KCl 的施入能显著提高土壤 pH,同时有效态 Cd 含量随 KCl 施入量增加而增加。这表明钾肥在土壤中的作用机制同样存在与磷肥相似的多样性与复杂性,且不同试验条件下的作用效果也有较大差别。

3 植物修复强化效果的影响因素

3.1 螯合剂种类与浓度

螯合剂种类与添加浓度的不同往往导致强化效果的明显差异,还可能对植物生长产生不利影响。研究人员用相同浓度梯度的 EDDS、草酸、柠檬酸对受 Cd 胁迫下的芥菜进行处理,发现 3 种高浓度螯合剂均会降低芥菜生物量,其中 EDDS 表现出明显的毒害作用,但该处理下单株芥菜 Cd 积累量最高,可达其他处理组的 3 倍以上^[24]。王雨涵等^[74]通过盆栽试验发现,当加入 4 mmol/kg EDTA 时,翅碱蓬 (*Suaeda salsa*) 和景天三七 (*Sedum aizoon*) 对 Cd 和 Pb 的积累转运效果均有显著提升;当 EDTA 浓度增加到 8 mmol/kg 时,植物地上部分 Cd、Pb 含量不再显著增加。Zhang 等^[75]同样发现高浓度 (10 mmol/kg) EDTA 显著抑制了毛竹对 Cd 的吸收与转运,同时使毛竹根系和地上部分生物量分别下降 44.6% 和 24.8%。不同螯合剂的作用机理和作用程度都有所不同,对植物存在明显的“剂量效应”。当施加浓度过高时,释放出大量可自由移动的重金属离子,在一定范围内反而加重了重金属胁迫作用。此外,部分螯合剂本身对植物也存在毒害作用。

3.2 营养元素种类与浓度

不同类型肥料的化学成分不同,对植物修复的

强化效果也不同。焦鹏等^[76]研究了N、P、K肥对玉米幼苗吸收和积累重金属的影响,结果显示NH₄Cl显著提高了土壤中Pb、Cd有效态含量,玉米地上部生物量以及Pb、Cd的积累量;高浓度KCl显著提高了生物量但不利于对重金属的积累;Na₂HPO₄处理后的玉米幼苗生物量不仅低于对照,且会抑制对Pb的吸收。张圆圆等^[77]发现N水平为2.5 mmol/L时东南景天(*Sedum alfredii*)的生物量达到最高,此后增加N水平反而抑制植物生长。Wang等^[78]用盆栽试验研究(NH₄)₂HPO₄对吊兰(*Chlorophytum comosum*)修复Cd污染土壤的影响,结果表明施加水平不超过200 mg/kg时,可以提高土壤中可交换态Cd含量并促进残渣态转变为可交换态;随着施加水平的提高,土壤中Cd生物可利用性降低,吊兰对Cd的转运受到抑制。不同营养元素的作用机制有着明显的差异,即使是包含同种元素的不同肥料,作用效果都没有绝对的一致性。这不仅取决于其中包含的营养元素,也与其他离子的作用效果有关。

3.3 土壤条件

土壤的理化性质直接影响植物的生长与重金属的赋存形态,进而对植物修复效果产生影响。刘秋辛等^[79]研究发现适当的土壤含水量不仅利于蜈蚣草(*Pteris vittata*)的生长,还有利于地上部分通过H₃AsO₄还原酶将As(V)还原为As(III),较高的土壤水分还能降低土壤氧化还原电位,导致As(V)还原为As(III),进一步促进蜈蚣草对As(III)的吸收。李清飞等^[80]研究了土壤酸碱度对麻疯树(*Jatropha curcas*)吸收重金属的影响,发现在酸性重金属复合污染土壤中植物生长明显受到抑制,但体内重金属积累量较高;随着石灰石投入量的增加,土壤pH升高,土壤有效态重金属含量和植物积累量逐渐降低。Willscher等^[81]的研究结果却表明,随着土壤pH由6降低至4,菊芋(*Helianthus tuberosus*)芽和块茎中的Cd积累量显著升高。土壤有机质含量也能对重金属形态和植物生长产生影响。刘叶等^[82]研究发现,随着有机肥施入量的增加,红苋菜(*Amaranthus hybridus*)生物量随之增加,土壤中有效态Cr含量随之下降,且Cr污染程度越高,有效态含量降低越显著。Yao等^[83]利用南荻(*Miscanthus sacchariflorus*)修复重金属污染的洞庭湖湿地研究发现,植株体内的Cu浓度与土壤有机质含量呈正相关。土壤有机质不仅可以为植物生长

提供C源,也能对土壤重金属形态产生影响。在土壤有机质作用下,重金属赋存形态发生转变,可交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化态含量下降,有机物结合态和残渣态等不易吸收的形态含量升高,有利于减缓植物所受的胁迫并在一定程度上促进植物生长以及对剩余重金属的吸收富集。

3.4 植物种类

不同植物对重金属吸收富集能力差异显著。陈威等^[84]研究表明,单作模式下向日葵地上部U富集量最高,竹柳(*Salicaceae*)地下部富集量最高,二者总U富集量相当且均显著高于博落回。周旭丹等^[85]发现芥菜和油菜主要将Cd富集于根部,但芥菜的富集能力强于油菜。同属植物的不同品种之间也存在类似的差异。焦玉宇等^[86]研究了不同品种向日葵对Cd的吸收富集效果,结果显示G23品种地上部Cd积累量仅为4.17 g/hm²,Y3品种最高,可达114.20 g/hm²,Y3、G24、G3地上部积累量均超过100.00 g/hm²。Yu等^[87]研究发现,同为苋属的5种植物在修复Cd污染土壤时各器官中Cd积累量差异显著。郭媛等^[88]以3个黄麻(*Corchorus capsularis*)品种为研究对象,研究发现连红黄麻地上部和地下部Cd积累量为3个品种中最高,且不同品种植株部分器官中的Cd富集量存在显著差异。

3.5 添加方式

卫泽斌等^[89]研究发现混合螯合剂(n柠檬酸:nEDTA:nKCl=10:2:3)施加在土壤表面可以提高东南景天(*Sedum alfredii*)对Zn、Cd、Pb的积累量,而混合螯合剂淋洗土壤后则会降低植物对重金属的富集,并且淋洗次数越多,重金属富集效果越差,这是因为当螯合剂施加在土壤表面时,螯合剂与重金属有较长的接触时间,可以最大程度地活化土壤重金属;而淋洗时螯合剂同重金属离子接触时间较短,大量重金属被冲刷出土壤,导致土壤中重金属含量下降,最终导致植物富集效果降低。曹志远等^[90]探究了EDTA和NTA不同施用方式对花卉植物修复Pb污染土壤的效果,结果表明收获前2周一次性加入比收获前1周一次性加入更能促进紫茉莉(*Mirabilis jalapathan*)和百日草(*Zinnia elegans*)对Pb的积累;2种螯合剂分次添加则利于Pb向地上部分转运。Hu等^[27]研究结果同样表明,在施加总量相同的条件下,柠檬酸、EDDS、草酸分次添加比单次施加更能促进博落回对U的积累。相同剂量条件下,螯合剂的分次添加可能会

促进土壤颗粒对重金属离子的再次解吸及螯合剂同重金属离子的再螯合过程, 进而增加了土壤溶液中重金属离子的总量。分次添加还能使螯合剂同土壤颗粒位点接触更充分, 重金属的释放与螯合更加彻底。此外, 分次添加减弱了被释放重金属和螯合剂本身对植物的胁迫, 更有助于植物的生长。

4 存在的问题

尽管添加螯合剂和肥料能活化土壤中重金属离子, 增强生物利用度, 但在使用过程也存在一定弊端。肥料或螯合剂的施入量过高不仅会对植物造成严重的毒害作用, 还存在较高的环境风险。

刘潮等^[91]的研究结果表明, 适当浓度的 N 能缓解 Cd 对紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophorum*) 的毒害, 提高 Cd 胁迫下紫茎泽兰的生物量, 并促进 Cd 的吸收转运; 当 N 水平过高时反而抑制紫茎泽兰生长和 Cd 的积累。此外, 各种化肥中不同程度的含有多种重金属。我国每年进口的大量磷肥中 Cd、Zn 含量远远超过氮肥和钾肥, 直接导致大量重金属被排入农田^[92]。Atafar 等^[93]的研究也表明大量施加化肥会导致土壤中重金属含量增高。长期施用化肥还容易导致土壤酸化、板结, 土壤肥力降低并促使土壤中已固定重金属离子的再次释放^[94-95]。

王静雯等^[96]研究发现, 添加 4 mmol/kg 的 EDTA 使鱼腥草 (*Houttuynia cordata*) 部分叶片出现黄化和黑色斑点, 并且抑制了鱼腥草对 Pb、Zn、Cu 的积累以及向地上部的转运; 浓度增加到 8 mmol/kg 时, 基本无收成。而且诸如 EDTA 等螯合剂生物降解性差, 在土壤中停留时间更长, 加之被活化的重金属离子又获得了较强的迁移性, 可扩散至未污染环境造成新的污染, 进一步增加了施用螯合剂所带来的环境风险^[97]。

施加螯合剂除了要面临潜在的环境风险, 较高的成本也是限制螯合剂大规模推广使用的重要因素^[98]。可生物降解的螯合剂虽然对环境扰动较小, 但是过快的生物降解速度导致必须持续不断地添加才能维持良好的螯合效果^[99]。因此, 添加螯合剂的同时配施其他物质或辅以农艺措施等手段以期强化植物修复效果成为又一研究热点。鲍根莲等^[100]将 EDTA 分别与 2 种生物表面活性剂联合施加显著提高了无柄小叶榕 (*Ficus concinna* var) 对 Cu、Cd 的积累。Ju 等^[101]发现, EDDS、植物促生菌以及根瘤菌的联合施用将紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)

的总 Cu 提取率较对照提升了 1.2 倍。Li 等^[8]发现, 植物激素 DA-6 (己酸二乙氨基乙酯) 和 6-BA (6-苄基氨基嘌呤) 能减缓 EDDS 对红苋菜生长的不利影响, 并对 Cd 的吸收转运具有协同效应。石旻飞^[102]用 EDTA 与阴离子型表面活性剂 SLS (十二烷基硫酸钠) 处理龙葵, 结果显示二者联合作用可提高酸溶态 Cd 含量, 促进龙葵对 Cd 的吸收。然而 N、P、K 肥作为施入土壤最频繁的物质与螯合剂联合强化植物修复的研究却并不多见, 内在的联合作用机制也尚不清楚。

5 展望

许多研究者经过长期研究已经证实单一辅以螯合剂或营养元素均能对植物修复起到强化作用。但添加螯合剂不仅对植物本身有毒害作用, 活化的重金属离子还容易迁移到其他环境介质中引发二次污染, 一些不易降解的螯合剂能在土壤中长期存在并且持续地造成危害。营养元素的长期施加则更多导致土壤酸化、板结以及重金属离子的再次释放。这些环境风险都在一定程度上限制了强化技术的大规模应用。

将土壤重金属转移到植物体内是植物修复技术的根本目的。在重金属污染土壤中, 超富集植物有较好的重金属耐性以及富集效果, 但其大多只能吸收单一种类的重金属且植株生物量普遍偏低, 导致在重金属复合污染中无法达到较高的吸收总量而影响了修复效果。因此, 筛选性状优良的超富集植物也是国内外植物修复研究者面临的共同难题。

通过基因手段以及植物培育技术可以定向改变超富集植物的生长特性与重金属吸收特性, 然而培育过程投入高且后续试验周期长, 无法满足当下的实际应用需求。因此, 不少研究者不再追求单株超富集植物的高富集浓度, 而将目光转向生物量较大、有一定重金属耐性且种植技术成熟的普通植物, 以期通过提升吸收总量来达到较好的修复效果。修复后的植物中含有大量重金属, 处置不当则会成为新的污染源。因此, 修复后植物的妥善处置也是研究难点问题。

添加外源物质投入较低、见效更快, 是植物修复研究中常用的强化手段。许多研究者经过长期研究证实单一辅以螯合剂或营养元素对植物修复均能起到强化作用, 但螯合剂与营养元素联合施用以期提高植物修复效果的研究还尚未被报道, 其中的内

在作用机制也鲜有研究涉及。未来对螯合剂-营养元素联合强化植物修复土壤重金属的研究重点应该集中在以下几个方面:具有优良性状植物的筛选与培育;螯合剂与营养元素种类、浓度以及添加方式的选择;植物体内重金属富集、转运以及解毒机制的探究;螯合剂、营养元素、植物以及重金属污染土壤之间相互作用机制的探索等。此外,降低强化过程中的潜在环境风险、修复后植物的妥善处置以及污染土壤肥力的恢复等问题都有待进一步解决。

参考文献:

- [1] Li Z, Ma Z, Van Der Kuijp T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468: 843-853.
- [2] 李栋, 孙午阳, 谷庆宝, 等. 植物修复及重金属在植物体内形态分析综述 [J]. *环境污染与防治*, 2017, 39 (11): 1256-1263.
- [3] Alqadami A A, Khan M A, Otero M, et al. A magnetic nanocomposite produced from camel bones for an efficient adsorption of toxic metals from water [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 293-304.
- [4] 刘伟, 张永波, 贾亚敏. 重金属污染农田植物修复及强化措施研究进展 [J]. *环境工程*, 2019, 37 (5): 29-33, 44.
- [5] Liu L, Wang S, Guo X, et al. Comparison of the effects of different maturity composts on soil nutrient, plant growth and heavy metal mobility in the contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250: 109525.
- [6] Dixit R, Wasiullah, Malaviya D, et al. Bioremediation of heavy metals from soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes [J]. *Sustainability*, 2015, 7 (2): 2189-2212.
- [7] Rizwan M, Ali S, Zia ur Rehman M, et al. Cadmium phytoremediation potential of *Brassica* crop species: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631-632: 1175-1191.
- [8] Li Z, Zhang R, Zhang H. Effects of plant growth regulators (DA-6 and 6-BA) and EDOS chelator on phytoextraction and detoxification of cadmium by *Amaranthus hybridus* Linn [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20 (11): 1121-1128.
- [9] Wang K, Liu Y, Song Z, et al. Effects of biodegradable chelator combination on potentially toxic metals leaching efficiency in agricultural soils [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 182: 109399.
- [10] Evangelou M W H, Ebel M, Schaeffer A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil: effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents [J]. *Chemosphere*, 2007, 68 (6): 989-1003.
- [11] Tandy S, Bossart K, Mueller R, et al. Extraction of heavy metals from soils using biodegradable chelating agents [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38 (3): 937-944.
- [12] 韩甘, 黄益宗, 魏祥东, 等. 螯合剂对油葵修复镉砷复合污染土壤的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38 (8): 1891-1900.
- [13] Li F, Qiu Y, Xu X, et al. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals from sludge soil by Italian ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 191: 110185.
- [14] Chigbo C, Batty L. Chelate-assisted phytoremediation of Cu-Pyrene-contaminated soil using *Z. mays* [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2015, 226 (3): 74.
- [15] Tananonchai A, Sampanpanish P. The influence of EDTA on the accumulation, movement, and distribution of cadmium in dwarf elephant grass [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2019, 17, 100555.
- [16] 刘芸芸, 崔爽, 张倩茹, 等. 可降解氨基酸型螯合剂在重金属污染土壤修复中的应用研究进展 [J]. *山东农业科学*, 2015, 47 (5): 136-140.
- [17] Attinti R, Barrett K R, Datta R, et al. Ethylenediaminedisuccinic acid (EDOS) enhances phytoextraction of lead by vetiver grass from contaminated residential soils in a panel study in the field [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 524-533.
- [18] 杨波, 陈银萍, 柯昀琪, 等. EDOS 对 Cd 胁迫下三叶鬼针草生长和抗氧化酶系统及 Cd 积累的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (5): 875-882.
- [19] 王天顺, 陈伟, 蒋文艳, 等. 螯合剂对鬼针草 Cd、Zn、Pb 和 Cu 吸收累积的影响 [J]. *西南农业学报*, 2019, 32 (8): 1932-1937.
- [20] Zhang H, Guo Q, Yang J, et al. Comparison of chelates for enhancing *Ricinus communis* L. phytoremediation of Cd and Pb contaminated soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 133: 57-62.
- [21] Fang L, Wang M, Cai L, et al. Deciphering biodegradable chelant-enhanced phytoremediation through microbes and nitrogen transformation in contaminated soils [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24 (17): 14627-14636.
- [22] Do Nascimento C W A, Amarasiriwardena D, Xing B. Comparison of natural organic acids and synthetic chelates at enhancing phytoextraction of metals from a multi-metal contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 2005, 140 (1): 114-123.
- [23] Chen J, Shafi M, Wang Y, et al. Organic acid compounds in root exudation of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its bioactivity as affected by heavy metals [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23 (20): 20977-20984.
- [24] 陈立, 王丹, 龙婵, 等. 三种螯合剂对芥菜修复铊镉复合污染土壤的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (8):

- 1690-1697.
- [25] 赖彩秀, 潘伟斌, 张太平, 等. 苹果酸和草酸对两种植物吸收土壤中 Cd、Zn 的影响 [J]. 生态科学, 2016, 35 (4): 31-37.
- [26] 薛博晗, 李娜, 宋桂龙, 等. 外源柠檬酸、苹果酸和草酸对披碱草镉耐受及富集的影响 [J]. 草业学报, 2018, 27 (6): 128-136.
- [27] Hu N, Lang T, Ding D, et al. Enhancement of repeated applications of chelates on phytoremediation of uranium contaminated soil by *Macleaya cordata* [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2019, 199: 58-65.
- [28] 刘婕, 朱宇恩, 刘娜, 等. EDTA 和柠檬酸对反枝苋 (*Amaranthus retroflexus* L.) Cu 迁移富集影响研究 [J]. 生态环境学报, 2015, 24 (8): 1399-1405.
- [29] 陈红纯, 吴科君, 李瑞, 等. 外源有机酸对镉胁迫下秋华柳镉积累特征的影响 [J]. 生态学报, 2019, 39 (12): 4510-4518.
- [30] 傅晓萍, 豆长明, 胡少平, 等. 有机酸在植物对重金属耐性和解毒机制中的作用 [J]. 植物生态学报, 2010, 34 (11): 1354-1358.
- [31] Najeeb U, Xu L, Ali S, et al. Citric acid enhances the phytoextraction of manganese and plant growth by alleviating the ultrastructural damages in *Juncus effusus* L. [J] Journal of Hazardous Materials, 2009, 170 (2/3): 1156-1163.
- [32] Guo H P, Chen H M, Hong C T, et al. Exogenous malic acid alleviates cadmium toxicity in *Miscanthus sacchariflorus* through enhancing photosynthetic capacity and restraining ROS accumulation [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 141: 119-128.
- [33] Kaur R, Yadav P, Sharma A, et al. Castasterone and citric acid treatment restores photosynthetic attributes in *Brassica juncea* L. under Cd (II) toxicity [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 145: 466-475.
- [34] Adem O, Veli U. Effects of low-molecular-mass organic acids on P nutrition and some plant properties of *Hordeum vulgare* [J]. Journal of Plant Nutrition, 2018, 41 (11): 1482-1490.
- [35] 冯子龙, 卢信, 张娜, 等. 农艺强化措施用于植物修复重金属污染土壤的研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (2): 14-20.
- [36] 杨启良, 武振中, 陈金陵, 等. 植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望 [J]. 生态环境学报, 2015, 24 (6): 1075-1084.
- [37] 李朝苏, 汤永禄, 吴春, 等. 施氮量对四川盆地小麦生长及灌浆的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (4): 873-883.
- [38] Sarwar N, Saifullah U, Malhi S S, et al. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90 (6): 925-937.
- [39] 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 等. 施肥对向日葵吸收积累 Cd 的影响 [J]. 环境科学, 2018, 39 (11): 5189-5197.
- [40] 伍婵翠, 刘杰, 梁英, 等. 氮、磷、硫对铬超富集植物李氏禾吸收 Cr (VI) 的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (14): 316-320.
- [41] 李子涵, 肖智华, 沈榕, 等. 不同生理性质氮肥对油菜吸收积累镉的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (14): 82-86.
- [42] 罗少辉, 王秀英, 吴浩, 等. 高寒地区刺儿菜对重金属镉污染土壤修复效果研究 [J]. 环境污染与防治, 2018, 40 (1): 40-43.
- [43] 易蔓, 韦慧琴, 胡梦坤, 等. 氮素形态对烟草根际镉的有效性及其吸收的影响 [J]. 环境工程学报, 2016, 10 (2): 941-947.
- [44] Liu W, Zhang C, Hu P, et al. Influence of nitrogen form on the phytoextraction of cadmium by a newly discovered hyperaccumulator *Carpobrotus rossii* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (2): 1246-1253.
- [45] 张存款, 林华, 满向甜, 等. 氮肥形态对李氏禾富集铜的影响及生理响应 [J]. 生态环境学报, 2017, 26 (9): 1599-1604.
- [46] Hu P, Yin Y, Ishikawa S, et al. Nitrate facilitates cadmium uptake, transport and accumulation in the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20 (9): 6306-6316.
- [47] 施娟, 刘艳红, 张德刚, 等. 施氮水平对小麦幼苗吸收和富集重金属的影响 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (21): 63-65.
- [48] 王凤花, 任超, 李新燕, 等. 三种肥料对镉污染土壤中小白菜吸收镉的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2016 (1): 124-128.
- [49] 郭丰辉, 侯向阳, 丁勇, 等. 羊草形态及生物量分配可塑性对土壤供磷能力的响应研究 [J]. 草业学报, 2016, 25 (12): 53-62.
- [50] 吴浩, 刘文辉, 贾志锋, 等. 青引 1 号燕麦生物量积累及其分配对磷肥的响应 [J]. 中国草地学报, 2018, 40 (6): 18-25.
- [51] Gao X, Flaten D N, Tenuta M, et al. Soil solution dynamics and plant uptake of cadmium and zinc by durum wheat following phosphate fertilization [J]. Plant and Soil, 2010, 338 (1-2): 423-434.
- [52] 王朋超, 孙约兵, 徐应明, 等. 施用磷肥对南方酸性红壤镉生物有效性及土壤酶活性影响 [J]. 环境化学, 2016, 35 (1): 150-158.
- [53] 何其辉, 谭长银, 曹雪莹, 等. 肥料对土壤重金属有效态及水稻幼苗重金属积累的影响 [J]. 环境科学研究, 2018, 31 (5): 942-951.
- [54] Grifoni M, Schiavon M, Pezzarossa B, et al. Effects of phosphate and thiosulphate on arsenic accumulation in the species *Brassica juncea* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22 (4): 2423-2433.

- [55] Wu C, Liu J, Zhang X, et al. Phosphorus enhances Cr (VI) uptake and accumulation in *Leersia hexandra Swartz* [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, 101 (6): 738-743.
- [56] Raicevic S, Kaludjerovic-Radoicic T, Zouboulis A I. In situ stabilization of toxic metals in polluted soils using phosphates: theoretical prediction and experimental verification [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 117 (1): 41-53.
- [57] 陈青云, 张晶, 谭启玲, 等. 4种磷肥对土壤-叶菜类蔬菜系统中镉生物有效性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32 (1): 78-82.
- [58] Davies R C, Neuburger A, Wilson B M. The dependence of lysozyme activity on pH and ionic strength [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) -Enzymology, 1969, 178 (2): 294-305.
- [59] 邹茸, 王秀斌, 霍文敏, 等. 不同磷肥品种对苋菜镉累积的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018 (1): 37-42.
- [60] 金珂旭, 王正银, 樊驰, 等. 不同钾肥对甘蓝产量、品质和营养元素形态的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51 (6): 1369-1377.
- [61] 潘杰, 周经国, 刘雷, 等. 钾肥对铅胁迫延胡索幼苗生长及药用品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (4): 149-152.
- [62] 王艳红, 李盟军, 艾绍英, 等. 钾肥对土壤-辣椒体系中铅生物有效性的影响[J]. 环境科学与管理, 2009, 34 (3): 151-155.
- [63] 王小晶, 陈怡, 唐静, 等. 钾肥对铅污染土壤白菜生长及品质的效应[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32 (2): 315-319.
- [64] 袁婷, 樊驰, 王正银, 等. 钾肥对镉污染土壤中白菜生长与镉含量及保护酶活性的影响[J]. 安全与环境学报, 2016, 16 (3): 383-390.
- [65] Komínková D, Berchová-Bímová K, Součková L. Influence of potassium concentration gradient on stable caesium uptake by *Calla palustris* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 165: 582-588.
- [66] 王艳红, 李盟军, 艾绍英, 等. 镉胁迫下2种钾肥对油菜品质及土壤的影响[J]. 华南农业大学学报, 2012, 33 (3): 316-320.
- [67] 景若瑶, 崔二苹, 樊向阳, 等. 不同钾肥对再生水灌溉条件下土壤-作物系统Cd的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33 (1): 328-333, 339.
- [68] Zahedifar M, Moosavi A A, Zarei Z, et al. Heavy metals content and distribution in basil (*Ocimum basilicum* L.) as influenced by cadmium and different potassium sources [J]. International Journal of Phytoremediation, 2019, 21 (5): 435-447.
- [69] Norvell W A, Wu J, Hopkins D G, et al. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64 (6): 2162.
- [70] Sun Y, Li Y, Xu Y, et al. In situ stabilization remediation of cadmium (Cd) and lead (Pb) co-contaminated paddy soil using bentonite [J]. Applied Clay Science, 2015, 105: 200-206.
- [71] 孙国红, 王鹏超, 徐应明, 等. 施用钾肥对稻田土壤镉污染钝化修复效应影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38 (5): 38-45.
- [72] 晏哲, 高志强, 罗真华, 等. 不同钾肥对几种烟草吸收累积土壤镉的影响[J]. 环境化学, 2016, 35 (9): 1913-1920.
- [73] 王林, 周启星, 孙约兵. 氮肥和钾肥强化龙葵修复镉污染土壤[J]. 中国环境科学, 2008 (10): 915-920.
- [74] 王雨涵, 陈冬月, 江志勇, 等. EDTA强化盐生植物修复Pb、Cd和盐渍化复合污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (9): 1866-1874.
- [75] Zhang X, Zhong B, Shafi M, et al. Effect of EDTA and citric acid on absorption of heavy metals and growth of Moso bamboo [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25 (19): 18846-18852.
- [76] 焦鹏, 高建培, 王宏斌, 等. N、P、K肥对玉米幼苗吸收和积累重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (6): 1094-1102.
- [77] 张圆圆, 窦春英, 姚芳, 等. 氮素营养对重金属超积累植物东南景天吸收积累镉和铅的影响[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27 (6): 831-838.
- [78] Wang Y, Zhu C, Yang H, et al. Phosphate fertilizer affected rhizospheric soils: speciation of cadmium and phytoremediation by *Chlorophytum comosum* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24 (4): 3934-3939.
- [79] 刘秋辛, 阎秀兰, 廖晓勇, 等. 不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响[J]. 环境科学, 2015, 36 (8): 3056-3061.
- [80] 李清飞, 仇荣亮, 石宁, 等. 矿山强酸性多金属污染土壤修复及麻疯树植物复垦条件研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29 (8): 1733-1739.
- [81] Willscher S, Jablonski L, Fona Z, et al. Phytoremediation experiments with *Helianthus tuberosus* under different pH and heavy metal soil concentrations [J]. Hydrometallurgy, 2017, 168: 153-158.
- [82] 刘叶, 郭良珍, 杨杰文, 等. 有机肥缓解红苋菜六价铬毒害效应研究[J]. 西北农业学报, 2019, 28 (5): 789-795.
- [83] Yao X, Niu Y, Li Y, et al. Heavy metal bioaccumulation by *Miscanthus sacchariflorus* and its potential for removing metals from the Dongting Lake wetlands, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25 (20): 20003-20011.
- [84] 陈威, 胡南, 陈可, 等. 博落回和竹柳间作修复铀污染土壤的研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52 (10): 1748-1755.
- [85] 周旭丹, 赵春莉, 孙晓刚, 等. 芥菜和油菜对镉污染土壤的修复效应研究[J]. 北方园艺, 2015 (6): 167-172.

- [86] 焦玉宇, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 不同向日葵品种对镉积累差异性的田间研究 [J]. 作物杂志, 2018 (6): 89-95.
- [87] Yu G, Liu J, Long Y, et al. Phytoextraction of cadmium-contaminated soils: comparison of plant species and low molecular weight organic acids [J]. International Journal of Phytoremediation, 2019, 22 (8): 1-9.
- [88] 郭媛, 邱财生, 龙松华, 等. 不同黄麻品种对重金属污染农田镉的富集和转移效率研究 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (8): 1929-1935.
- [89] 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 等. 混合螯合剂的不同施加方式对重金属污染土壤套种修复效果的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2016, 37 (1): 29-34.
- [90] 曹志远, 王开爽, 谢修鸿, 等. 螯合剂不同施用方式下花卉植物修复铅污染土壤的效果 [J]. 水土保持学报, 2014, 28 (5): 286-290.
- [91] 刘潮, 宋培兵, 张亚萍, 等. 不同氮素水平对重金属胁迫下紫荇兰生长及重金属吸收的影响 [J]. 热带作物学报, 2018, 39 (2): 217-223.
- [92] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (2): 466-480.
- [93] Atafar Z, Mesdaghinia A, Nouri J, et al. Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2010, 160 (1-4): 83-89.
- [94] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策 [J]. 生态环境, 2004 (4): 656-660.
- [95] Hue N V. Alleviating soil acidity with crop residues [J]. Soil Science, 2011, 176 (10): 543-549.
- [96] 王静雯, 伍钧, 郑秋月, 等. EDTA 对鱼腥草修复铅锌矿区重金属复合污染土壤的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27 (6): 62-66, 72.
- [97] 吴雅倩, 白利勇, 黄明丽, 等. EDTA 及其结构异构体在环境中的应用综述 [J]. 环境工程, 2019, 37 (8): 159-163, 147.
- [98] 陈胜鲁. 绿色螯合剂 EDDS 在环境污染治理中的应用 [J]. 化工管理, 2015 (25): 122.
- [99] 唐浩, 王敏, 刘钊钊, 等. APCAs 在重金属污染土壤修复中的应用综述 [J]. 上海交通大学学报 (农业科学版), 2013, 31 (2): 44-52.
- [100] 鲍根莲, 邓欢欢, 李少君, 等. 生物表面活性剂和化学螯合剂强化无柄小叶榕修复 Cd、Cu 重金属污染盐碱地 [J]. 环境化学, 2019, 38 (7): 1497-1506.
- [101] Ju W, Liu L, Jin X, et al. Co-inoculation effect of plant-growth-promoting rhizobacteria and rhizobium on EDDS assisted phytoremediation of Cu contaminated soils [J]. Chemosphere, 2020, 254, 126724.
- [102] 石旻飞. 螯合剂与表面活性剂强化龙葵修复 Cd 污染土壤研究 [J]. 福建茶叶, 2019, 41 (2): 163-164.

Research advances in phytoremediation of heavy metal contaminated soil strengthened by chelating agents and nutrient elements

WU Ren-jie, CHEN Yin-ping^{*}, CAO Wen-jie, LI Xiao-hui, ZHENG Yan, YAO Cai-ping (School of Environmental & Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070)

Abstract: Phytoremediation technology is in line with the development trend of heavy metal contaminated soil remediation technology due to its advantages, such as safety, environmental friendliness, low cost and simple operation. Therefore, it has broad application prospect and huge development potential. Whereas, some disadvantages (longer repair cycle, insufficient super-enriched plant biomass, lower remediation efficiency, limited repair area) prevent it from being applied on a large scale. Hence, how to enhance the effect of phytoremediation has become a hot issue in soil remediation. Chelating agents have the ability to significantly increase the content of available heavy metals in soil and improve their migration and transformation capacity. The application of nutrient elements is beneficial to the growth of plants under heavy metal stress. In this article, we first summarized the ways and effects of chelating agents and nutrient elements (N, P, K) in strengthening phytoremediation. Then we analyzed the internal strengthening mechanisms and influencing factors as well as the shortcomings of phytoremediation strengthening techniques. Finally we prospected the feasibility of chelating agents combined with nutrient elements to enhance phytoremediation.

Key words: soil heavy metal; chelating agents; nutrient elements; phytoremediation