

不同活化剂强化超富集植物鬼针草吸收 Cd 的比较分析

郭嘉航^{1,2}, 李亚兰², 杨云^{1,2,3}, 彭语欣², 高紫云^{1,2}, 孙世中^{1,2}, 黄晶心^{1,2*}

(1. 云南师范大学高原特色中药材种植土壤质量演变退化与修复云南省野外科学观测研究站, 昆明 650500;

2. 云南师范大学云南省农村能源工程重点实验室, 昆明 650500; 3. 文山州农业科学院, 文山 663099)

摘要: 为探究不同活化剂强化超富集植物吸收土壤中镉 (Cd) 的效果, 选用 4 种高效活化剂 N-双谷氨酸二乙酸四钠 (GLDA)、聚天冬氨酸 (PASP)、羟基乙二膦酸 (HEDP) 和十二烷基苯磺酸钠 (LAS-30), 施用量为土壤质量的 0.3%, 以 Cd 的超富集植物鬼针草为模式种, 在气候箱中控制单一环境变量, 通过盆栽试验在相同 Cd 污染土壤浓度下进行对比探究。结果表明, 4 种活化剂均能影响土壤的理化性质, 使土壤的电导率 (EC) 升高, 硝态氮含量降低; HEDP、PASP 和 GLDA 这 3 种活化剂处理能显著提高鬼针草生物量、株高与叶片叶绿素含量 ($P < 0.05$), 促进鬼针草对 Cd 的吸收及对土壤的净化率。其中, HEDP、PASP 和 GLDA 处理与对照组相比地上部分生物量分别提升了 77.7%、97.3% 和 25.6%; PASP 处理对鬼针草茎的 Cd 积累促进效果最好, GLDA 处理对根、叶和花果的 Cd 积累促进效果最好。相比于对照组的净化率 2.46%, PASP、GLDA 和 HEDP 处理单株鬼针草对土壤净化率分别为 4.85%、4.37% 和 3.08%。综上, Cd 污染土壤中施加活化剂 (GLDA、PASP 与 HEDP) 能通过影响土壤的理化性质, 使鬼针草叶绿素含量、株高、生物量增加, 增强鬼针草对 Cd 的富集, 使鬼针草对土壤中 Cd 的净化效率提升, 效果最好的为 PASP 处理。结果可为活化剂在矿区、抛荒地等严重 Cd 污染土壤的植物修复领域的应用提供了重要的理论参考。

关键词: 镉; 鬼针草; 活化剂; 超富集植物; 强化; 吸收

中图分类号: Q948.12; X53

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)03-0483-08

Comparative analysis of different activators for enhancing Cd absorption from the contaminated soil by hyperaccumulator *Bidens pilosa*

GUO Jiahang^{1,2}, LI Yalan², YANG Yun^{1,2,3}, PENG Yuxin², GAO Ziyun^{1,2}, SUN Shizhong^{1,2}, HUANG Jingxin^{1,2}

(1. Yunnan Provincial Field Observation and Research Station of Soil Degradation and Restoration for Cultivating Plateau Traditional Chinese Medicinal Plants, Yunnan Normal University, Kunming 650500; 2. Yunnan Provincial Renewable Energy Engineering Key Laboratory, Kunming 650500; 3. Wenshan Academy of Agricultural Sciences, Wenshan 663099)

Abstract: In order to explore the effects of different activators on the absorption of cadmium (Cd) by hyperaccumulating plants in soil, taken *Bidens pilosa* as the model species, four high-efficiency activators, tetrasodium *n*-glutamic acid diacetate (GLDA), polyaspartic acid (PASP), hydroxyethylidene diphosphonic acid (HEDP) and sodium dodecylbenzene sulfonate (LAS-30), were selected for comparative study through greenhouse pot experiments. The results showed that the four activators could affect the physical and chemical properties of the tested soil, increased the electrical conductivity (EC) and reduced the content of nitrate nitrogen; HEDP, PASP and GLDA could significantly increase the biomass, plant height and leaf chlorophyll content of *B. pilosa* ($P < 0.05$) and promote the absorption of Cd by *B. pilosa* and the purification rate of the soil. Compared with the control group, the aboveground biomass of HEDP, PASP and GLDA increased by 77.7%, 97.3% and 25.6%, respectively; PASP treatment had the best effect on promoting Cd accumulation in the stem of *B. pilosa*, and GLDA treatment had the best effect on promoting Cd accumulation in the root, leaves, flowers and fruits. Compared with the control group, the purification rates of PASP, GLDA and HEDP were 4.85%, 4.37% and 3.08%, respectively. In conclusion, the application of activators (GLDA, PASP and HEDP) in Cd contaminated soil could increase the chlorophyll content, plant height and biomass of *B. pilosa* by affecting the physical and chemical properties of the soil, enhance the enrichment of *B. pilosa* on Cd,

收稿日期: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (31800443), 云南省教育厅基金项目 (2018JS144), 云南师范大学博士启动基金项目 (2017ZB021) 和云南省大学生创新训练项目 (202110681058) 共同资助。

作者简介: 郭嘉航, 硕士研究生。E-mail: 15034672973@163.com

* 通信作者: 黄晶心, 博士, 副教授。E-mail: huangjingxin17@163.com

and improve the purification efficiency of *B. pilosa* on Cd in the soil, and the best effect was treated with PASP. The result can provide an important theoretical reference for the application of phytoremediation in the field of Cd contaminated soil, such as mining areas and abandoned land.

Key words: cadmium; *Bidens pilosa*; activator; hyperaccumulator; strengthen; absorption

土壤重金属污染是当今社会面临的巨大难题,其中镉(Cd)污染最为普遍也最为严重^[1]。有研究报道,云南省某铅锌矿区周边土壤的Cd的含量可达 $46.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远高于全国土壤背景值^[2]。根据调查,由于污染面源较广,工程修复经济损耗过大,这些土地一直处于抛荒地、废弃用地状态,如何高效生态地解决这种问题已经刻不容缓。目前对Cd污染土壤的治理方法主要有物理修复、化学修复及植物修复,而植物修复对环境的扰动最小,无二次污染,经济简易,是土壤重金属污染修复的热门方案^[3-4]。

重金属污染土壤中施加活化剂能通过萃取等方式使土壤中的重金属离子活化,提升植物修复土壤重金属污染的效率^[5-6]。经查阅相关文献,N-双谷氨酸二乙酸四钠(GLDA)、聚天冬氨酸(PASP)、羟基乙叉二膦酸(HEDP)和十二烷基苯磺酸钠(LAS-30)是活化剂中对植物损伤小、对土壤中重金属提取能力强且降解产物生态友好的4种活化剂^[5,7-9]。如PASP对重金属Zn和Cd均具有较好的提取效果,提取率超过50%^[10],应用于植物后,能有效促进植物的生长^[11]。重金属污染土壤中施加GLDA能增强东南景天(*Sedum alfredii*)提取Cd、Zn的能力,且提取效果比EDTA更强^[12]。吴青等^[13]通过研究也证明,GLDA对污泥中Cd和Ni的去除效果较好。HEDP不仅能活化土壤中的重金属^[14],且降解物中含有氮,具有营养植物的作用^[15]。有关研究表明,低浓度的LAS能缓解Cd对黄豆(*Glycine max*)的毒害,促进其生长发育,使其生物量和富集重金属的量增加^[16]。综上,向重金属污染土壤中添加PASP、HEDP、GLDA和LAS这4种活化剂能增强土壤中重金属的溶解性,促进植物的生长,提升植物对重金属污染土壤的修复效率,具有治理效果好、稳定等特点,但在施加同等质量情况下,哪种活化剂产生的效果最好、最为经济、快捷还需进一步探究。

为解决上述问题,采用温室盆栽试验,选用Cd的超富集植物鬼针草(*Bidens pilosa*)作为模式种。鬼针草为菊科植物,具有生物量大、生长周期短、适应性广、耐性高等特点,不仅是Cd的超富集植物,对铅也有高吸收性,还是砷的排异植物,具有综合修复重金属污染的能力^[17-19]。经调查,在高浓度矿区土壤污染区域只有几种植物可以正常存活,鬼针草是其中1种,这也是本次选取鬼针草作为模

式种的原因。试验通过对比分析施加等量活化剂的情况下对植物产生的效应及植物从土壤中提取重金属的量,探究施加4种活化剂对超富集植物吸收Cd的效果,为土壤重金属污染修复提供理论支撑,也为活化剂在植物修复土壤重金属污染方面的技术提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 土壤材料 试验土壤采集于云南昆明呈贡区Cd污染区域,土壤类型为黄棕壤。采用五点取样法采集栽培土壤样品,土壤在使用之前仔细去除杂物,过5目筛,土壤经测定铵态氮含量为 $3.242 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮含量为 $12.367 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH为7.23,电导率为 $4.4 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$,土壤中Cd含量为 $3.059 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.1.2 试验试剂 选用GLDA、PASP、HEDP和LAS-30为试验材料,试剂选购于山东优索化工科技有限公司。GLDA是新型的绿色可降解螯合剂,具有适用pH范围广、耐高温、螯合能力强且无生态毒性的特点。PASP是新型绿色处理剂,具有无磷、无毒、无公害和可完全生物降解特性,对离子有较强的螯合能力,在农业上可作为养分吸收增强剂,促进农作物的生产。HEDP在高pH下稳定,不易水解,对土壤中重金属具有较强的活化作用。LAS-30(十二烷基苯磺酸钠)是常用的阴离子表面活性剂,低浓度施加能促进植物的生长^[10,16,20-21]。

1.2 方法

取上述土壤混匀后分装于25个上口径11cm、高10cm的花盆中,每盆装土500g,试验共设置5个处理组,包括对照组(CK)、GLDA处理组、PASP处理组、HEDP处理组和LAS-30处理组,每个处理设置5个重复。

将土壤装于花盆后,向每个花盆添加 CdCl_2 溶液,添加的Cd浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,待土壤稳定后向花盆中种入鬼针草种子,每盆放置15粒种子,待长出苗后,每盆挑选4株留下,期间花盆放置于人工气候箱中,温度设置为白天 25°C ,夜晚 18°C ,光照强度为 8000 lx ,保证每天10h光照和14h的黑暗处理。待每个花盆中鬼针草幼苗生长至 $6\sim 7 \text{ cm}$,开始测量株高和叶绿素含量。

鬼针草生长至开花期(第120天)以溶液形式

向土壤中加入活化剂^[20], 施加活化剂的量为 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以淋洗方式分 6 次每天加入, 施加的总量为土壤质量的 0.3%^[22], 加入后定期测量株高, 叶片叶绿素含量等指标。测量分为 5 个测量周期(前期分生长期与繁殖期相互对照, 后期以加入活化剂后鬼针草一周内的株高变化是否超过 3 cm 为基准, 若 1 周内鬼针草株高普遍生长大于 3 cm, 则默认出现变化; 若 1 周内鬼针草株高生长普遍小于 3 cm, 则默认未出现显著变化, 继续等待, 直至鬼针草出现显著变化。T1, 第 90 天, 生长期, 未开花; T2, 第 120 天, 进入繁殖期, 与生长期作对比; T3, 第 127 天, 刚完成活化剂的加入; T4, 第 134 天, 加入活化剂 1 周; T5, 第 148 天, 加入活化剂 3 周, 鬼针草产生大量种子。

1.3 分析测定方法

1.3.1 土壤理化指标 土壤经晾晒烘干后过 100 目筛, 称取 10 g 置于 50 mL 锥形瓶, 加入 25 mL 去离子水, 震荡 2 h 充分混匀, 静置后由土壤多参数速测仪 (COMBI 5000, Germany) 测定土壤 pH 与电导率 (EC) 值;

硝态氮与铵态氮含量根据标准 LY/T 1228—2015, 用流动分析仪 (AA3, Seal Analytical, Ltd. Germany) 进行测定;

土壤中 Cd 含量采用 7:2 的硝酸、氢氟酸进行微波消解, 消解完成后赶酸, 再用 3% 的稀硝酸将剩余液体定容至 25 mL, 过滤后用 AA-7000 火焰法原子吸收仪测定溶液 Cd 浓度;

植物中 Cd 含量采用 5:2 硝酸、过氧化氢进行微波消解, 消解完成后赶酸, 再用 3% 的稀硝酸将剩余液体定容至 25 mL, 过滤后用 AA-7000 火焰法原子吸收仪测定溶液 Cd 浓度。

1.3.2 生长指标的测定及植物的处理 叶片叶绿素含量的测定采用叶绿素仪 (SPAD-502, 北京海天友

诚科技有限公司)。

收获方法: 于收获前两天浇水, 保持盆栽土壤湿润, 保证收获鬼针草根系的完整性。收获前先测量株高(卷尺测量)、茎基直径(游标卡尺测量)和叶绿素含量。将整株鬼针草取出后, 称取生物量, 将根系剪下, 测量根长, 各组织经烘箱 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青处理, 再将其置于 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重, 烘干后测量干重。

1.3.3 数据与分析 采用 SPSS19.0 软件对试验数据进行单因素方差分析、显著性分析和相关性分析, 利用 Excel 作图。3 个参数根据以下公式^[22-23]计算。

$$\text{植物地上(地下)部分富集系数} = \frac{\text{植物地上(地下)部分 Cd 含量}}{\text{土壤 Cd 含量}} \quad (1)$$

$$\text{净化率} = \frac{\text{植物地上部分吸收 Cd 的量}}{\text{土壤中 Cd 量}} \quad (2)$$

$$\text{转运比值} = \frac{\text{植物地上部分吸收 Cd 的量}}{\text{植物地下部分吸收 Cd 的量}} \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 不同活化剂处理对土壤理化指标的影响

对添加活化剂的土壤进行理化指标测定结果(表 1)进行分析, 发现施加 4 种活化剂后土壤的电导率 (EC) 显著升高 ($P < 0.05$), 与对照组相比, GLDA、PASP、HEDP 和 LAS-30 处理电导率分别升高了 13.0%、22.4%、21.3% 和 27.1%。与对照组相比, HEDP 处理土壤的 pH 显著降低, LAS-30 处理的 pH 显著升高 ($P < 0.05$), GLDA 与 PASP 处理的土壤 pH 未发生显著性变化, 说明不同活化剂会对土壤 pH 造成不同的影响。与对照组相比, LAS-30 处理的土壤铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 含量显著升高 ($P < 0.05$), 其余处理组无显著性变化。施加活化剂后, 各处理组的硝态氮含量降低, 但无显著性变化, 说明施加这 4 种活化剂对土壤硝态氮的影响不大。

表 1 不同处理下土壤的理化指标

Table 1 Physical and chemical indexes of soils under different treatments

处理	pH	电导率/ ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	铵态氮含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	硝态氮含量/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	7.81 ± 0.23^b	4.47 ± 0.01^d	1.49 ± 0.52^b	4.55 ± 0.36^a
GLDA	7.95 ± 0.15^b	5.05 ± 0.01^c	2.38 ± 0.68^b	3.06 ± 1.04^a
PASP	8.01 ± 0.16^b	5.47 ± 0.02^b	3.19 ± 0.28^{ab}	3.88 ± 0.70^a
HEDP	7.02 ± 0.09^c	5.42 ± 0.02^b	1.43 ± 0.16^b	2.56 ± 0.02^a
LAS-30	8.23 ± 0.28^a	5.68 ± 0.02^a	5.18 ± 1.30^a	2.82 ± 0.24^a

注: 同列数据后的不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异有统计学意义; $n = 5$, 下同。

2.2 不同活化剂处理对鬼针草株高的影响

通过对鬼针草 5 个周期株高的测量, 结果表明

未添加活化剂时 (T1—T2), 鬼针草生长迅速, 且株高相差不大, 说明试验控制变量达到应有的效果,

可进行下一步试验操作。鬼针草生长至开花期(T2)时,开始向土壤中加入活化剂(T2—T3),此时鬼针草生长均变缓慢,LAS-30处理组出现致死现象,到T3时完全枯萎,说明LAS-30对鬼针草有一定的毒害作用;相比于对照组,施加GLDA、PASP和HEDP处理的鬼针草株高均显著升高($P < 0.05$),分别增加了6.5%、5.6%和14.1%,说明施加这3种活化剂能促进鬼针草的生长。加入活化剂后(T3—T5),鬼针草株高的变化趋势相同,其中,对鬼针草株高促进效果最佳的HEDP处理,说明活化剂加入后并不会随着时间的延长对鬼针草株高的生长产生不同的效果。

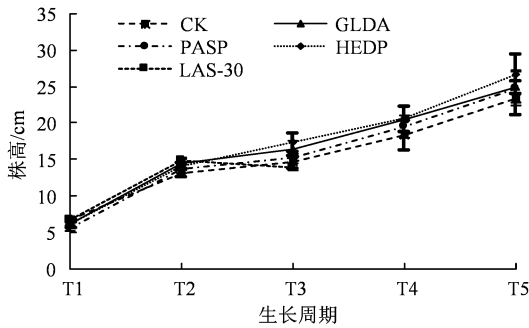


图1 不同活化剂处理下鬼针草的株高变化

Figure 1 Changes of plant height of *B. pilosa* with application of different activators

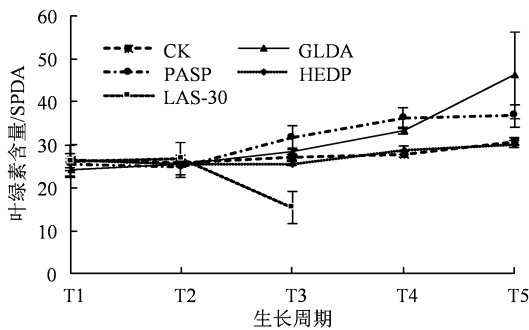


图2 不同活化剂处理下鬼针草叶片的叶绿素含量变化

Figure 2 Changes of chlorophyll content in leaves of *B. pilosa* with application of different activators

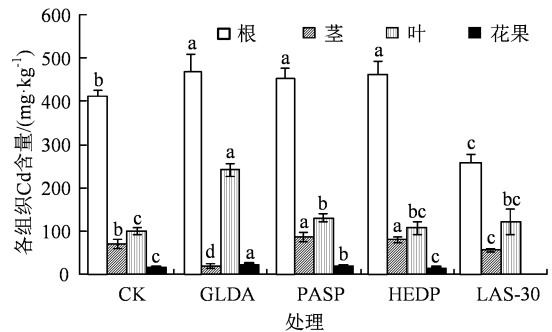
2.3 不同活化剂处理对鬼针草叶绿素含量的影响

由图2可知,土壤中未添加活化剂(T1—T2)时,鬼针草叶片叶绿素含量无显著性差异。开花期(T2)加入活化剂后,施加GLDA与PASP处理的鬼针草叶片叶绿素含量均显著高于对照组($P < 0.05$),说明这2种活化剂的添加能促进鬼针草叶片叶绿素的合成,其中,施加GLDA处理随时间的延长,促进效果会逐渐增加,PASP则逐渐趋于平缓;施加HEDP处理的鬼针草叶片的叶绿素含量与对照组无显著性差异,施加LAS-30处理的鬼针草叶片叶绿素显著降低($P < 0.05$),说明LAS-30对鬼针

草叶片叶绿素的合成存在抑制作用。

2.4 不同活化剂处理对鬼针草各部位重金属Cd含量的影响

由图3可知,与对照组相比,施加活化剂GLDA、HEDP和PASP后,鬼针草根部富集Cd的量显著升高($P < 0.05$),是对照组的1.15倍、1.12倍和1.09倍。茎对Cd的富集PASP处理最高,HEDP处理次之,均高于对照组,GLDA处理茎部对Cd的富集量最低。与对照组相比,GLDA、PASP、HEDP和LAS-30处理鬼针草叶片对Cd的富集均高于对照组,是对照组的2.41倍、1.30倍、1.06倍和1.22倍。GLDA处理鬼针草花果对Cd的富集最高,是对照组的1.58倍。综上,4种活化剂对鬼针草各部位富集Cd的量有不同的影响,其中,PASP与HEDP处理鬼针草各部位富集重金属的量均高于对照组,说明PASP与HEDP处理能提高Cd污染土壤中鬼针草对Cd的富集。



不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平上差异有统计学意义。下同。

图3 不同处理下鬼针草各部位Cd的含量

Figure 3 Cadmium contents in different parts of *B. pilosa* under different treatments

2.5 不同活化剂处理对鬼针草各部位生物量与吸收重金属量的影响

由图4(a)可知,与对照组相比,GLDA、PASP和HEDP处理鬼针草的地上与地下生物量干重均升高,地上部分分别提升了16.7%、56.5%和16.1%,地下部分分别提升了10.4%、43.7%和12.7%,说明在Cd污染土壤中施加GLDA、PASP和HEDP对鬼针草生物量的提升具有促进作用。由图4(b)可知,GLDA、PASP和HEDP处理鬼针草地上与地下部分吸收重金属Cd的量均升高,与对照组相比,地上部分分别提升了77.7%、97.3%和25.6%,地下部分分别提升了25.9%、56.4%和25.7%,说明Cd污染土壤中施加GLDA、PASP和HEDP能促进鬼针草对Cd的吸收。

2.6 不同活化剂处理对鬼针草干重与各部位吸收 Cd 含量的分配

由图 5 (a) 可知, LAS-30 处理鬼针草地下部分生物量干重的分配比例最高, 与其他处理存在显著性差异 ($P < 0.05$), 地上部分生物量干重的分配比例 LAS-30 处理最低, 显著低于其他处理组 ($P <$

0.05)。由图 5 (b) 可以看出, 对照组与 HEDP 处理的鬼针草地下部分吸收 Cd 的量分配比例显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), GLDA、PASP 和 LAS-30 处理鬼针草地上部分吸收 Cd 的量分配比例显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 说明这 3 种活化剂的添加能促进鬼针草地上部 Cd 的富集。

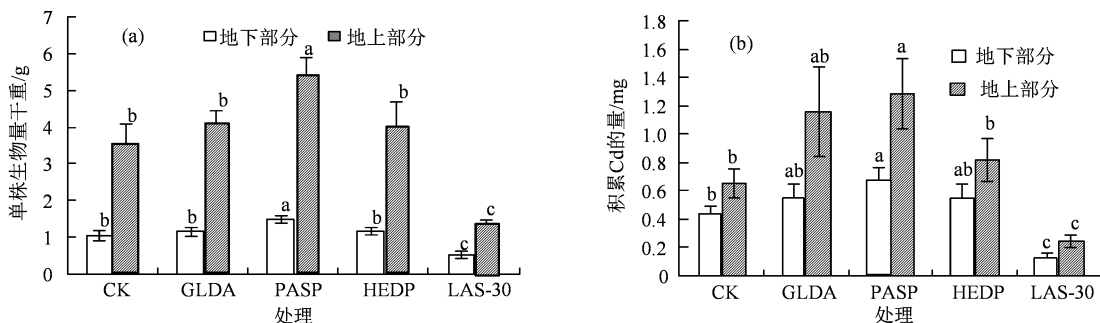


图 4 不同处理对鬼针草地上与地下部分生物量和吸收 Cd 含量的影响

Figure 4 Effects of different treatments on biomass and Cd uptake of aboveground and underground parts of *B. pilosa*

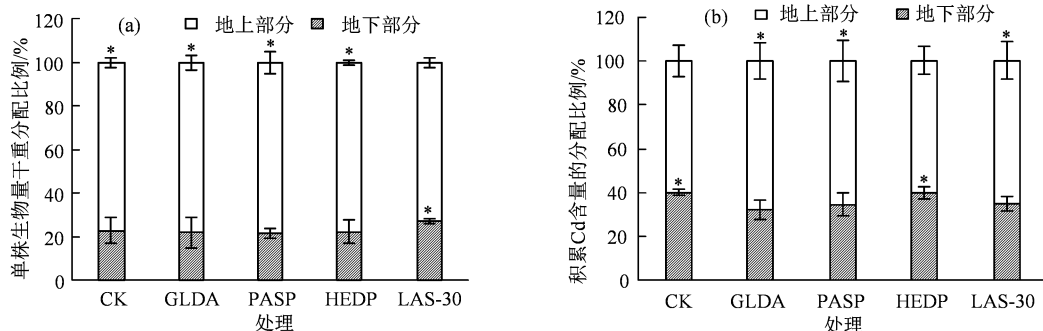


图 5 不同处理下鬼针草干重与各部位吸收 Cd 含量的分配比例

Figure 5 The proportion of dry weight and the amount of Cd absorbed by different parts in different treatments

表 2 不同活化剂处理下鬼针草对 Cd 的富集系数、转运比值与土壤净化率

Table 2 Enrichment coefficients, transport coefficients to Cd and soil purification rates of *B. pilosa* with application of different activators

处理	富集系数		转运比值	净化率/%
	地上部分	地下部分		
CK	3.50 ± 1.24 ^{bc}	7.86 ± 0.17 ^b	1.49 ± 0.14 ^b	2.46 ± 0.21 ^c
GLDA	5.33 ± 0.73 ^a	8.96 ± 0.43 ^a	2.11 ± 0.23 ^a	4.37 ± 0.42 ^{ab}
PASP	4.41 ± 0.68 ^b	8.56 ± 0.67 ^a	1.88 ± 0.31 ^a	4.85 ± 0.62 ^a
HEDP	3.78 ± 0.76 ^{bc}	8.77 ± 0.51 ^a	1.49 ± 0.09 ^b	3.08 ± 0.19 ^b
LAS-30	3.36 ± 0.34 ^c	4.87 ± 0.24 ^c	1.87 ± 0.16 ^a	0.92 ± 0.12 ^d

2.7 不同活化剂处理对鬼针草富集系数、转运比值和净化率的影响

由表 2 可知, 不同处理组鬼针草的富集系数均为地下部分大于地上部分, GLDA、PASP 和 HEDP 处理鬼针草的地上与地下部分富集系数均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 说明向 Cd 污染土壤中施加 GLDA、PASP 和 HEDP 能促进鬼针草对土壤中 Cd 的富集。鬼针草的转运比值 GLDA 处理最高, 对照组与 HEDP 处理最低, 说明施加 GLDA 与 PASP 能促进鬼针草地下部分 Cd 向地上部分的转运, 转运效果最好的为 GLDA 处理。由鬼针草对土壤的净化

率, 施加 GLDA、PASP 和 HEDP 处理对 Cd 污染土壤的净化率均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 效果最好的为 PASP 处理, 3 种活化剂对土壤的净化率分别为对照组的 1.57 倍、1.81 倍和 1.26 倍, 说明 Cd 污染土壤中施加 GLDA、HEDP 与 PASP 能促进鬼针草对 Cd 污染土壤的净化。

3 讨论

3.1 施用 4 种活化剂能改善土壤营养状况

土壤中施加不同活化剂会对土壤的理化指标产生不同的影响。施加 4 种活化剂后土壤的电导率均

显著升高 ($P < 0.05$) (表 1), 这可能是由于活化剂活化土壤中重金属离子和其他矿物质离子, 使土壤中可吸收态重金属离子和其他矿物质离子含量增多, 导致土壤的电导率升高^[24-25]。施加 GLDA、PASP 与 LAS-30 后土壤 pH 值升高, 施加 HEDP 后土壤 pH 值降低 ($P < 0.05$), 一方面这可能与活化剂本身性质有关, GLDA、PASP 和 LAS-30 是碱性活化剂, pH 均大于 8, 施加后使土壤偏碱性, HEDP 是一种酸性活化剂, 施加后使土壤的 pH 降低; 另一方面可能与植物根系分泌物有关。有研究表明, 植物根系分泌物能使植物根际土壤 pH 发生变化^[26], 这能进一步促进植物对重金属的吸收。本研究中, 与对照组相比, 施加 GLDA、PASP 及 LAS-30 后土壤中的铵态氮含量升高 (表 1), 说明施加这 3 种活化剂能活化土壤中的 N 含量, 使植物可利用的 N 营养物质增多。有关研究还表明, PASP 含有丰富的酰胺键及羧基等极性基团, 可作为土壤的保水剂, 同时还能抑制土壤中铵态氮氮肥的挥发, 促进土壤中微量元素的溶解, 产生更多有利于土壤生物生存的元素, 使土壤肥力得到改善^[27], 这对活化剂在植物修复土壤重金属污染领域的运用提供了理论参考。

3.2 施加活化剂能促进植物的生长及生物量的增加, 改善植物生长状况

植物对 Cd 无专一吸收通道, 它可能是经 Fe、Zn 或 Ca 通道进入根细胞^[28], Cd 进入植物细胞后, 会抑制植物叶片叶绿素等的合成, 破坏植物叶片的结构, 对植物的光合生理造成严重影响^[29-31]。在本研究中, 施加活化剂后, 鬼针草叶片的叶绿素含量发生显著变化, GLDA 与 PASP 处理的鬼针草叶片叶绿素含量显著高于对照组 ($P < 0.05$), 施加 HEDP 处理的鬼针草叶片的叶绿素含量与对照组无显著性差异, 一方面可能是因为 GLDA 和 PASP 降解产生营养物质, 使得鬼针草获取的营养物质增加, 能合成更多的叶绿素; 另一方面可能是施加这两种活化剂后活化了土壤中的营养物质, 使得鬼针草能从土壤中获得更多的养分抵抗 Cd 胁迫, 使得叶绿素合成增加^[32-33]。施加 LAS-30 处理组的鬼针草出现致死现象, 使生物量与吸收 Cd 的含量下降, 这可能与施加活化剂的浓度有关。陈玉成等^[34]的研究中表明, LAS-30 对土壤中重金属阳离子具有增溶增流作用, 能促进植物对重金属的吸收, 但浓度过高会破坏植物细胞活性, 对植物产生负面效应, 导致植物死亡, 这也与刘红玉等^[35]使用 LAS 处理蚕豆根尖的研究结果一致: 施用 LAS 后, 蚕豆根尖透明度增加, 细胞内 Cd 含量增加, 导致蚕豆生长受到阻碍。本

研究中, 施加 PASP 不仅使鬼针草株高、叶绿素含量、茎基直径、生物量等升高, 也使得鬼针草对 Cd 的富集效果提升, 这与张鑫等^[36]的盆栽试验研究结果一致。这是因为 PASP 是由 C、H、O 和 N 等 4 种元素组成的氨基酸聚合物, 生物降解性好, 对生物无毒性, 既可作为肥料增效剂, 还对金属离子具有螯合作用, 也可富集氮、磷、钾及微量元素供给植物, 使植物更有效地利用肥料, 提高植物的产量和品质^[10, 37]。HEDP 与 GLDA 修复 Cd 污染土壤的研究在国内研究较少, 试验表明这两种活化剂作为新型螯合剂, 经济适宜的同时, 可提高鬼针草生物量和对 Cd 的提取率, 达到对 Cd 污染土壤的修复效果^[25, 33, 38]。

3.3 施加 4 种活化剂能增强鬼针草对 Cd 污染土壤的修复效果

施加活化剂能促进植物对土壤中 Cd 的吸收效率, 提升土壤的净化率。在本研究中, 与对照组相比, GLDA、HEDP 和 PASP 活化剂添加到 Cd 污染土壤中后, 鬼针草吸收土壤中 Cd 的量均显著增加, 土壤的净化率提高。研究表明, GLDA、PASP、HEDP 等活化剂具有分子、原子或离子化合物提供配位电子对, 能够与具有空轨道的金属离子结合成为配位键, 使土壤中 Cd 的生物有效性提高, LAS-30 与土壤接触后, 能与重金属离子经过交换或络合反应, 使难溶态的 Cd 从土壤中释放出来^[22, 39-40], 因此土壤中可吸收态的 Cd 离子增多, 植物对 Cd 的吸收量增加。植物对 Cd 的转运比值反映了植物将 Cd 从地下部分转移到地上部分的能力, 本研究中, 施加 4 种活化剂后鬼针草的转运比值均升高, 说明施加这 4 种活化剂能促进植物对土壤中 Cd 的转移, 提升土壤的净化率。本研究还表明, 不同的活化剂对鬼针草各部位吸收 Cd 的效果不同, PASP 处理对鬼针草茎的 Cd 积累促进效果最好, GLDA 处理对根、叶和花果的 Cd 积累促进效果最好, 这可能与不同的活化剂降解产生不同的养分或对土壤活化养分的种类不同有关, 使鬼针草各部位富集 Cd 的量存在较大的差距。施用活化剂后单株鬼针草对土壤的净化率均升高。一方面这与鬼针草生物量增加, 使鬼针草从土壤中吸收 Cd 离子也增多有关, 另一方面可能与活化剂活化了土壤中的 Cd, 使植物能从土壤中吸收更多 Cd 离子, 最终使土壤的净化率提升^[32, 38]; 其中, 对净化率提升作用最强的为 PASP 处理, 与对照组相比, 其净化率提升了 1.7 倍。对 4 种活化剂的净化效果分析, 发现 PASP 不仅能改善土壤养分状况, 且对土壤净化效果的促进作用明显, 具备了修复 Cd 污染土壤潜力, 但目前鲜少有人将之运

用于土壤重金属修复领域。本研究为 PASP 在重金属土壤污染修复领域的运用提供了重要理论参考。

4 结论

本研究选用 4 种新型活化剂为研究对象, 通过对 4 种活化剂的应用效果对比分析, 活化剂的施加能通过影响土壤的理化性质, 使鬼针草生物量增加, 富集土壤中更多的 Cd, 提升土壤的净化率。其中, HEDP、PASP 和 GLDA 处理相比于对照组, 地上部分生物量分别提升了 77.7%、97.3%和 25.6%; 相比于对照组的净化率 2.46%, PASP、GLDA 和 HEDP 处理对土壤净化率分别为 4.85%、4.37%和 3.08%。综上, Cd 污染土壤中施加活化剂能通过改善土壤养分状况, 使鬼针草叶绿素含量、株高和生物量增加, 增强鬼针草对 Cd 的富集, 使鬼针草对土壤中 Cd 的净化效率提升, 效果最好的为 PASP 处理。结果可为活化剂在矿区、抛荒地等严重 Cd 污染土壤的植物修复领域的应用提供了重要的理论参考。

参考文献:

- [1] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [2] 邹小冷, 祖艳群, 李元, 等. 云南某铅锌矿区周边农田土壤 Cd、Pb 分布特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2143-2148.
- [3] PECO J D, HIGUERAS P, CAMPOS J A, et al. Abandoned mine lands reclamation by plant remediation technologies[J]. Sustainability, 2021, 13(12): 6555.
- [4] ASAD S A, FAROOQ M, AFZAL A, et al. Integrated phytochemical heavy metal remediation strategies for a sustainable clean environment-A review[J]. Chemosphere, 2019, 217: 925-941.
- [5] 龙珍, 徐海涛, 张亚平, 等. 活化剂联合植物移除污染土壤重金属的研究进展[J]. 环境工程, 2016, 34(10): 172-176, 152.
- [6] 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.
- [7] THINH N V, OSANAI Y, ADACHI T, et al. Removal of lead and other toxic metals in heavily contaminated soil using biodegradable chelators: GLDA, citric acid and ascorbic acid[J]. Chemosphere, 2021, 263: 127912.
- [8] HAN R, DAI H P, SKUZA L, et al. Comparative study on different organic acids for promoting *Solanum nigrum* L. hyperaccumulation of Cd and Pb from the contaminated soil[J]. Chemosphere, 2021, 278: 130446.
- [9] WANG G Y, PAN X M, ZHANG S R, et al. Remediation of heavy metal contaminated soil by biodegradable Chelator-induced washing: Efficiencies and mechanisms[J]. Environ Res, 2020, 186: 109554.
- [10] 方一丰, 郑余阳, 唐娜, 等. 生物可降解络合剂聚天冬氨酸治理土壤重金属污染[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 237-240.
- [11] HE X M, ZHANG J, REN Y N, et al. Polyaspartate and liquid amino acid fertilizer are appropriate alternatives for promoting the phytoextraction of cadmium and lead in *Solanum nigrum* L.[J]. Chemosphere, 2019, 237: 124483.
- [12] 卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1864-1869.
- [13] 吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 等. 生物可降解螯合剂谷氨酸 N, N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1733-1738.
- [14] LI F Z, ZHANG Y P, HAO S F, et al. Leaching behaviour and enhanced phytoextraction of additives for cadmium-contaminated soil by *Pennisetum* sp.[J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2020, 104(5): 658-667.
- [15] 许伟伟, 滕玉婷, 任静华, 等. 不同活化剂对镉、铅单一及复合污染土壤的修复效果影响[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(8): 882-886, 890.
- [16] 张永, 廖柏寒, 曾敏, 等. 表面活性剂 LAS 与重金属 Cd 复合污染对黄豆生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1070-1072.
- [17] DOU X K, DAI H P, SKUZA L, et al. *Bidens pilosa* L. hyperaccumulating Cd with different species in soil and the role of EDTA on the hyperaccumulation[J]. Environ Sci Pollut Res, 2019, 26(25): 25668-25675.
- [18] DAI H P, WEI S H, SKUZA L, et al. Phytoremediation of two ecotypes cadmium hyperaccumulator *Bidens pilosa* L. sourced from clean soils[J]. Chemosphere, 2021, 273: 129652.
- [19] ZHANG X Y, GU P X, LIU X Y, et al. Effect of crop straw biochars on the remediation of Cd-contaminated farmland soil by hyperaccumulator *Bidens pilosa* L. [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2021, 219: 112332.
- [20] 卫泽斌, 吴启堂, 龙新宪, 等. 可生物降解螯合剂 GLDA 和磷素活化剂促进东南景天提取土壤重金属的潜力[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1402-1404.
- [21] 许伟伟, 李方洲, 任静华, 等. 活化剂与植物联合修复 Cd 污染土壤的田间研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(7): 126-130.
- [22] 倪幸, 李雅倩, 白珊, 等. 活化剂联合柳树对重金属 Cd 污染土壤的修复效果研究[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 365-371.
- [23] 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.
- [24] ZHANG H H, XU Z S, GUO K W, et al. Toxic effects of heavy metal Cd and Zn on chlorophyll, carotenoid metabolism and photosynthetic function in tobacco leaves revealed by physiological and proteomics analysis[J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2020, 202: 110856.
- [25] 王正, 孙兆军, SAMEH M, 等. 胺鲜酯与螯合剂 GLDA 联合强化柳枝稷吸收积累镉效果[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5589-5599.
- [26] 杨富玲, 石杨, 李斌, 等. 植物根系分泌物在污染及沙化土壤修复中的应用现状与前景[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2623-2632.
- [27] 曹丹, 王世震, 韩梅. 绿色环保肥料增效剂聚天冬氨酸对杨树幼苗生长的影响[J]. 植物研究, 2021, 41(5): 712-720.
- [28] PERFUS-BARBECH L, LEONHARDT N, VAVASSEUR

- A, et al. Heavy metal toxicity: cadmium permeates through calcium channels and disturbs the plant water status[J]. *Plant J*, 2002, 32(4): 539-548.
- [29] 安婷婷, 黄帝, 王浩, 等. 植物响应镉胁迫的生理生化机制研究进展[J]. *植物学报*, 2021, 56(3): 347-362.
- [30] NIEKERK L A, CARELSE M F, BAKARE O O, et al. The relationship between cadmium toxicity and the modulation of epigenetic traits in plants[J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(13): 7046.
- [31] 林欣颖, 谭祎, 历红波. 稻米镉积累的影响因素与阻控措施[J]. *环境化学*, 2020, 39(6): 1530-1543.
- [32] HE X M, ZHANG J, REN Y N, et al. Polyaspartate and liquid amino acid fertilizer are appropriate alternatives for promoting the phytoextraction of cadmium and lead in *Solanum nigrum* L.[J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124483.
- [33] THINH N V, OSANAI Y, ADACHI T, et al. Removal of lead and other toxic metals in heavily contaminated soil using biodegradable chelators: GLDA, citric acid and ascorbic acid[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 127912.
- [34] 陈玉成, 董姗姗, 熊治廷. 表面活性剂与 EDTA 对雪菜吸收镉的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(6): 651-656.
- [35] 刘红玉, 廖柏寒, 鲁双庆. 表面活性剂、酸雨和 Cd²⁺复合污染对蚕豆根细胞核的毒性[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(3): 493-496.
- [36] 张鑫, 史璐皎, 刘晓云, 等. 聚天冬氨酸强化植物修复重金属污染土壤的研究[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(29): 151-156.
- [37] LIU X Y, MAO Y, ZHANG X Y, et al. Effects of PASP/NTA and TS on the phytoremediation of Pyrene-nickel contaminated soil by *Bidens pilosa* L. [J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124502.
- [38] HAN R, DAI H P, SKUZA L, et al. Comparative study on different organic acids for promoting *Solanum nigrum* L. hyperaccumulation of Cd and Pb from the contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2021, 278: 130446.
- [39] 林晓燕, 熊云武, 彭文字, 等. 组配活化剂及其添加量对杉木提取 Mn 的影响[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(S1): 53-57.
- [40] 赛可. 活化剂强化植物修复镉污染土壤的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.

安徽农业大学揭示山茶属植物系统发育关系及其特征性次生代谢物的演化规律

国际植物学经典期刊《植物杂志》(The Plant Journal) 在线发表了我校茶树生物学与资源利用国家重点实验室夏恩华教授团队题为《比较转录组学研究揭示 116 种山茶属植物系统发育关系及其次生代谢物演化规律》(Comparative transcriptomic analysis unveils the deep phylogeny and secondary metabolite evolution of 116 Camelliaplants) 的研究论文, 系统揭示了山茶属植物系统发育关系及其特征性次生代谢物的演化规律。

山茶属是山茶科中包含物种数最多, 也最具经济价值的一个属。山茶属植物野生资源丰富, 其蕴含丰富多样的茶叶品质形成密切相关的特征性次生代谢物和优异基因资源是培育优质、高抗、多元化茶树新品种的重要物质基础。然而, 该属植物频繁的杂交与多倍化, 加之缺乏适用于进化分析的基因片段, 致使其系统发育关系及特征性次生代谢物的演化规律尚未获得清晰的认识, 阻碍了该属植物的高效开发与利用。

为此, 本研究通过广泛收集 116 种山茶属植物材料, 构建了包含 89,394 个基因家族的山茶属植物泛转录组, 并基于从中筛选获得的 405 个高质量低拷贝直系同源核心基因, 深入解析了山茶属植物的系统发育关系。结果表明, 山茶属可划分为 7 个主要系统分支, 茶组为单系, 金花茶组为山茶属的基部类群, 红山茶组分支与油茶组分支亲缘关系较近, 其属下各组的系统发育关系支持茶组与秃茶组、油茶组与短柱茶组、瘤果茶组与半宿萼茶组、毛蕊茶组与连蕊茶组的合并处理。研究结果进一步支持了最新《中国植物志》对广东秃茶、丹寨秃茶、重庆山茶等物种的修订。

通过测定 116 种山茶属植物的儿茶素类化合物、茶氨酸和咖啡碱的含量, 进一步探究了山茶属植物特征性次生代谢物的演化规律。研究发现, 山茶属植物特征性次生代谢物含量丰富、类型多样。相比非茶组植物, 茶组植物倾向于积累高含量的儿茶素类化合物、咖啡碱和茶氨酸等与茶叶品质形成密切相关的特征性次生代谢物。对次生代谢通路关键基因的表达模式进一步分析发现, 许多诸如 UGT84A、F3'5'H、SCPL1A、GDH、TCS、IMPDA 等关键基因在茶组植物中显著高表达, 且其在茶组植物中的表达模式与次生代谢产物的积累模式显著正相关。为方便研究者快速检索获得的山茶属植物转录组数据, 论文还在课题组前期构建茶树基因组数据库的基础上 (Xia et al., 2019, *Plant Biotechnol. J.*), 进一步完善和更新了山茶属植物转录组数据库 (CTD: <http://tpia.teaplant.org/transcriptome.html>)。该数据库的开放运行, 不仅有助于推动茶树及其近缘植物功能基因组学、进化生物学和次生代谢等研究, 而且将进一步推进茶学基础研究领域的国际交流与合作。