

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.06.019

董蓓, 周嘉文, 詹娟, 等. 酸性土壤上伴矿景天铝毒的缓解技术研究. 土壤, 2022, 54(6): 1240–1246.

酸性土壤上伴矿景天铝毒的缓解技术研究^①

董蓓¹, 周嘉文^{2*}, 詹娟², 程新峰¹, 周通², 王雨阳², 周守标¹, 吴龙华²

(1 安徽师范大学生态与环境学院, 安徽芜湖 241002; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 为缓解酸性土壤上铝(Al)毒对重金属污染超积累植物生长及重金属吸收的抑制作用, 利用水培和盆栽试验比较了不同措施对镉(Cd)超积累植物伴矿景天的 Al 胁迫缓解作用。结果发现: ①在水培条件下, 锌添加促进了 Al 胁迫下伴矿景天根表 Cd²⁺ 吸收速率, 而添加氯化钙或柠檬酸没有显著的作用; ②在盆栽试验条件下, 添加石灰处理显著提高了土壤 pH, 促进了伴矿景天生长和地上部对 Cd 的吸收, 但添加生物质炭或柠檬酸没有显著缓解 Al 毒对伴矿景天生长和 Cd 吸收的抑制, 添加柠檬酸反而加剧了土壤酸化, 提高了土壤 Al 的活性; ③在伴矿景天与荞麦间作条件下, 其一定程度上降低了土壤的 Al 活性, 在合适的种植密度下并未显著影响伴矿景天单株地上部 Cd 吸收量。综上, 酸性土壤上耐 Al 作物与修复植物间作结合添加改良剂调控 Al 毒, 能够不显著降低土壤 Cd 的有效性和修复植物的 Cd 吸收, 进而实现污染土壤的边生产边修复。

关键词: 铝毒; 伴矿景天; 石灰; 生物质炭; 荞麦间作

中图分类号: X53 文献标志码: A

Alleviating Aluminum Toxicity to Cadmium Hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in Acid Soils

DONG Bei¹, ZHOU Jiawen^{2*}, ZHAN Juan², CHENG Xinfeng¹, ZHOU Tong², WANG Yuyang², ZHOU Shoubiao¹, WU Longhua²
(1 School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China; 2 CAS Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: To alleviate aluminum (Al) toxicity to the normal growth and efficient metal removal by hyperaccumulators in acid soils, the efficiencies of different strategies to relieve Al stress on cadmium (Cd) hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* were compared. The results show that in the hydroponic experiment, Zn addition significantly enhances root Cd²⁺ uptake rate by *S. plumbizincicola* under Al stress while adding CaCl₂ or citric acid to solution has no significant effect on root Cd²⁺ uptake. In the pot experiment, adding lime significantly increases soil pH, and enhances the growth and shoot Cd uptake of the hyperaccumulating plant. However, adding rice or maize biochars, or citric acid in soil does not significantly alleviate the inhibition of plant growth and Cd uptake raised by Al stress. In contrast, adding citric acid aggravates soil acidification. Agricultural strategy of intercropping with *S. plumbizincicola* and buckwheat was also used to alleviate Al stress, which decreases soil Al activity to some extent and does not significantly affect shoot Cd uptake per plant by *S. plumbizincicola* with appropriate planting density. Above all, using a combined strategy of intercropping with the hyperaccumulator and Al-tolerant crop with the application of soil amendment to alleviate Al toxicity will not significantly decrease soil Cd availability and plant Cd uptake, thus can realize remediation and crop production simultaneously in Al-stressed soils.

Key words: Aluminum toxicity; *Sedum plumbizincicola*; Lime; Biochar; Intercropping with buckwheat

近 20 年来, 工业废弃物的不合理排放以及农业生产中化肥农药的大量使用导致我国耕地土壤重金属污染严重, 以镉(Cd)污染程度最高、污染面积最广。我国南方由于工业发达、采矿冶炼活动密集, 区域土

壤 Cd 污染问题尤为严重。“有色金属之乡”湖南省某矿区周边的农田土壤 Cd 含量超标达数十倍^[1]。Cd 污染农田土壤的修复对于保障土壤环境质量和粮食安全具有重要意义。超积累植物吸取修复技术具有绿

①基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41991334)资助。

* 通讯作者(jwzhou@issas.ac.cn)

作者简介: 董蓓(1992—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染与修复研究。E-mail: d3664234@163.com

色、经济、不破坏土壤生态结构等优点,如伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)地上部对Cd具有超强积累能力,在大面积去除污染农田中过量Cd方面具有良好的推广与应用前景^[2]。研究表明,伴矿景天适宜修复全Cd含量不超过5 mg/kg的酸性土壤^[3]。

我国Cd污染问题严重的南方红壤地区,同时是酸性土壤的主要分布区域,存在诸多影响植物生长的障碍因子,其中,铝(Al)毒是抑制作物生长的重要因子^[4],特别是在pH<5的土壤中。调查数据显示,浙江省红壤地区交换态Al平均含量达1.56 cmol/kg^[5],而普通作物生长在交换态Al含量>0.67 cmol/kg的土壤上就可能出现Al毒症状^[6-7]。本课题组前期研究发现,过量Al显著抑制了伴矿景天生长和根表Cd²⁺吸收速率,进而降低了地上部Cd积累量^[8]。如何采用有效措施缓解酸性土壤Al毒害作用,是保障超积累植物在酸性土壤上正常生长和Cd高效去除的关键。

酸性土壤的改良通常以提高土壤pH为主。施用石灰是简单有效的传统方法之一,但存在运输成本较高,易造成土壤板结、返酸等问题,且重金属钝化不利于植物吸收去除^[9-10]。有机酸能络合土壤中游离的Al³⁺,降低Al毒性,从而有效缓解Al毒对作物生长发育的抑制作用^[11-12]。近年来,一些新型的酸性土壤改良剂如工业副产品、生物质炭等不断出现,均展现出较好的改良效果^[13-15]。生物质炭因其独特的理化性质(碱性、吸附性能好、养分丰富等)和环境生态功能(保水、保肥、固碳等)逐渐被广泛应用于酸性土壤的改良^[9,16]。钱林波^[17]研究发现,酸性土壤上添加水稻秸秆生物质炭可通过吸附作用改变Al形态以显著降低土壤交换性Al,减少Al向植物体内的迁移。此外,农艺措施如超积累植物与农作物间(套)作也常被用来联合修复污染土壤,以实现边生产边修复的目的。荞麦(*Fagopyrum esculentum* Moench)作为一种典型的耐铝作物,其根系能分泌有机物质(如麦根酸类物质)络合Al从而降低其有效性^[18]。荞麦和伴矿景天间作是否能有效缓解酸性土壤Al毒?值得深入研究。因此,本论文拟采用不同缓解措施(添加有机酸、石灰、生物质炭以及Al耐性植物与伴矿景天间作),比较Al胁迫下伴矿景天在短期水培和长期土培条件下Cd吸收的变化,以期探索能维持伴矿景天正常生长和植物高效吸收Cd的Al毒缓解措施。

1 材料与方法

1.1 铝毒缓解试剂的短期水培试验

伴矿景天材料为中国科学院植物研究所提供的组培苗,将其修剪整齐后先用自来水培养一周,再用

pH 5.80的1/4 Hoagland营养液继续培养一周。植物生长条件为自然光照,温度为25℃(白天)/15℃(夜晚)。待伴矿景天生根后,挑选长势良好、大小一致的苗,用于铝毒缓解的水培试验。

每个处理挑选8株大小基本一致的伴矿景天苗转移至装有0.8 L 1/4 Hoagland营养液的塑料容器中,营养液Cd浓度设置为50 μmol/L,添加形式为CdCl₂。添加不同试剂(2 mmol/L CaCl₂、200 μmol/L 柠檬酸、50和500 μmol/L ZnCl₂),测定伴矿景天根表Cd²⁺的流速变化。考虑到添加CaCl₂或ZnCl₂后,溶液离子强度发生变化或者Cl⁻可能影响伴矿景天Cd吸收,设置添加4 mmol/L NaCl试剂的处理。前期预试验结果发现,pH 5.00、Al 200 μmol/L处理下伴矿景天根表Cd²⁺流速与不添加Al的对照处理相比无显著变化,因此在整个试验期间选择了更低的溶液pH(4.00)。为考察不同试剂添加后Al毒胁迫的缓解效果,其中CaCl₂、柠檬酸、NaCl试剂处理组设置为:①不加Al+不加试剂;②不加Al+添加试剂(CaCl₂、柠檬酸、NaCl);③200 μmol/L Al+不添加试剂;④200 μmol/L Al+添加试剂(CaCl₂、柠檬酸、NaCl),而ZnCl₂试剂处理组设置为:①不加Al+加不同含量ZnCl₂(50和500 μmol/L);②200 μmol/L Al+添加不同含量ZnCl₂(50和500 μmol/L)。使用Cd选择性微电极结合扫描离子选择性电极(BIO-001A, Younger)测定处理48 h后伴矿景天根表Cd²⁺流速。根表Cd²⁺流速的具体测定方法见Li等^[19]的论文,简述如下:处理48 h后,挑选每棵伴矿景天植株的一条主根,用硬币固定在皮氏培养皿中央,平衡30 min,培养皿中装有40 ml测试溶液(50 μmol/L CdCl₂, 0.1 mmol/L CaCl₂、MgCl₂和KCl以及1 mmol/L NaCl, pH 4.00),然后在伴矿景天根表吸收Cd²⁺速率最大的地方记录Cd²⁺净流数据3 min,取平均值。每组处理有效测量总数至少为8。

1.2 添加不同铝毒改良试剂的土培试验

供试土壤为采自江西省贵溪市的红壤,系统分类名称为湿润铁铝土,成土母质为红砂岩性的河流冲积物。土壤pH为3.84,阳离子交换量(CEC)为6.28 cmol/kg,有机碳含量(SOC)为3.87 g/kg,全Cd含量为27.9 mg/kg,交换态Al含量为2.41 cmol/kg。改良材料为生石灰、柠檬酸、生物质炭(水稻秸秆炭pH 7.32,玉米秸秆炭pH 8.90)。将改良剂加入土壤中预培养一周后用于盆栽试验。试验共5个处理,分别为:不施用改良材料的对照、施用生石灰(5 g/kg)、施用柠檬酸(4.63 g/kg,与土壤交换态Al含量摩尔比

1 : 1)、施用 2%(m/m)水稻秸秆生物质炭和施用 2%(m/m)玉米秸秆生物质炭, 生物质炭过 60 目筛后施入土壤混匀, 每个处理 4 次重复。每盆装 1.5 kg(烘干基)土壤, 扦插伴矿景天枝条 4 株(植株苗采自广东仁化试验基地)。伴矿景天生长期间保持自然光照, 温度 20~25 °C(白天)和 10~15 °C(夜晚), 土壤含水量维持约 70% 田间持水量。种植伴矿景天苗后 2 周左右追肥一次, 施肥量 N 100 mg/kg(以尿素形式), P 50 mg/kg(以 KH_2PO_4 形式)。伴矿景天培养约 240 d 后, 收获植株地上部, 分析重金属含量。

1.3 铝毒缓解农艺措施: 伴矿景天与荞麦间作

供试土壤为浙江省杭州市郊区某铅锌矿区表层污染土壤(0~20 cm), 土壤类型为湿润富铁土, 土壤 pH 为 4.89, SOC 含量为 26.7 g/kg, 全 Cd 含量为 3.24 mg/kg, 交换态 Al 含量为 0.83 cmol/kg(添加 AlCl_3 并老化两周后测得)。伴矿景天扦插苗采自广东省仁化试验基地, 荞麦品种为江西荞麦(*Fagopyrum esculentum* Moench. cv Jiangxi, 耐 Al 型)。试验设置 4 个处理: 伴矿景天单作(JT, 6 株)、荞麦单作(QM, 6 株)、伴矿景天与荞麦 1 : 1 间作(J+Q1, 3 株伴矿景天+3 株荞麦)和伴矿景天与荞麦 2 : 1 间作(J+Q2, 4 株伴矿景天+2 株荞麦), 每个处理重复 4 次。每盆装土 2.5 kg, 试验管理同 1.2 土培试验。

1.4 土壤和植物样品分析

土壤样品(约 0.100 0 g)加入 5 ml 浓 HNO_3 和 5 ml HCl , 植物样品(约 0.200 0 g)加入 6 ml 浓 HNO_3 和 2 ml H_2O_2 , 然后 105 °C 高压消解 7 h。消解液中的 Cd 用火焰或石墨炉原子吸收分光光度法测定, Al 用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-AES)测定。土壤交换 Al 采用 1 mol/L KCl 提取(土水质量比 1 : 10), NaOH 滴定法测定。土壤有效 Cd 采用 0.01 mol/L CaCl_2 提取(土水质量比 1 : 10), ICP-AES 测定。采用抖根法取试验 1.3 的根际土壤, 水提后用碳氮分析仪(Multi N/C 3100)测定溶解性有机碳(DOC)。

1.5 数据处理与统计分析

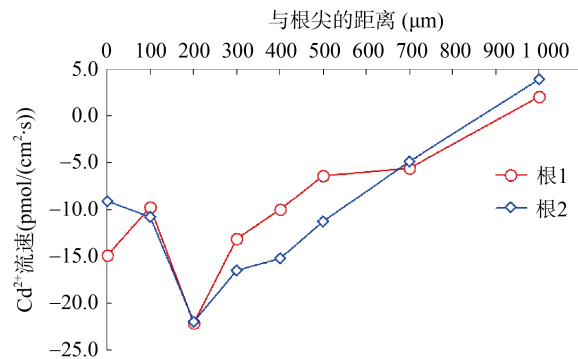
所有数据采用 Microsoft Excel 13 和 SPSS 21.0 进行处理、统计分析和制图, 不同处理间均值比较通过单因素方差分析(ANOVA)实现, 差异显著性检测采用最小显著差异法(LSD), 显著性水平设置为 5%。

2 结果与分析

2.1 水培条件下不同试剂对伴矿景天根表镉离子流速的影响

如图 1 所示, 在距离根尖 200 μm 处伴矿景天根

表 Cd^{2+} 吸收速率达最大值, 之后随着与根尖距离的增大, Cd^{2+} 的吸收速率逐渐减小, 甚至在 1 000 μm 处开始出现外排。因此, 在比较 Al 胁迫条件下不同试剂添加对伴矿景天根表 Cd^{2+} 流速的影响时, 选择测定距根尖 200 μm 处的 Cd^{2+} 流速。



(流速数值为负值表示吸收, 正值表示外排; 下同)

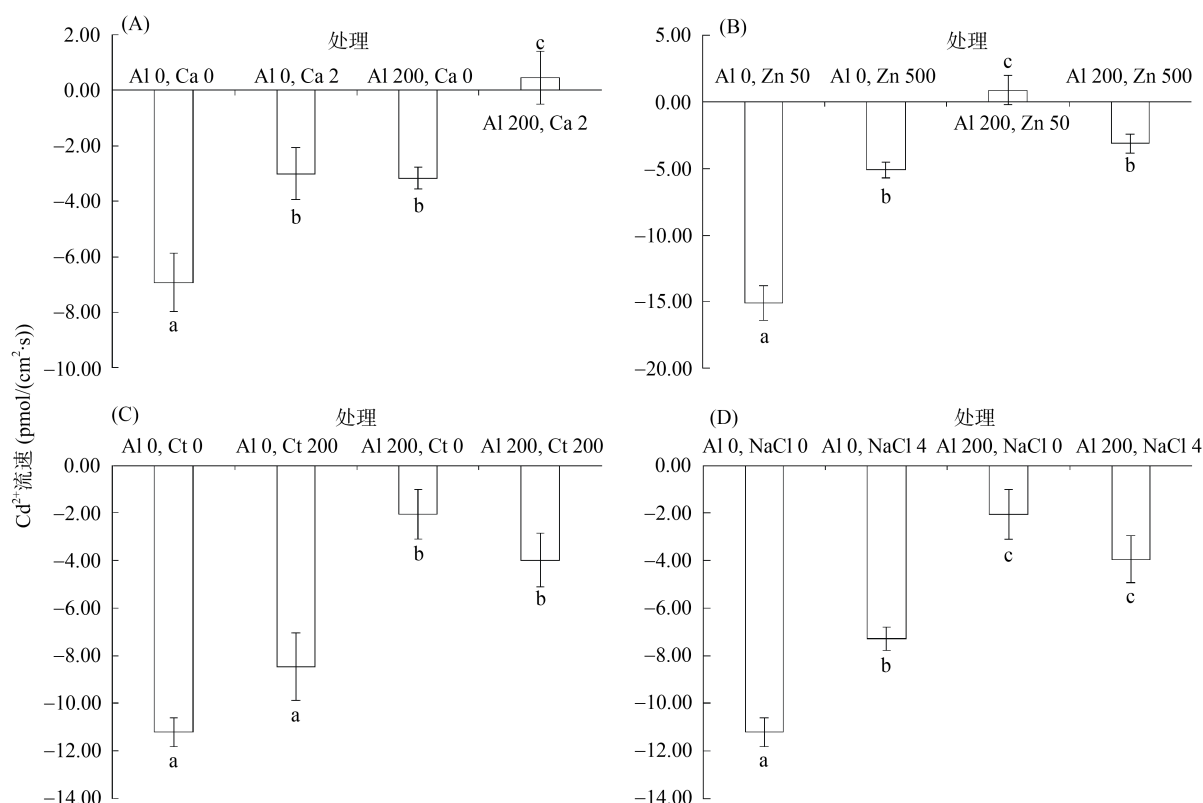
图 1 伴矿景天根尖不同距离处 Cd^{2+} 流速变化

Fig. 1 Cd^{2+} fluxes across root surface at different distances from root tips of *Sedum plumbizincicola*

与不添加 Al 处理相比, 添加 Al 显著抑制伴矿景天根表 Cd^{2+} 吸收速率(图 2)。如, 与不加 Al + 不加试剂的对照处理相比, 200 $\mu\text{mol/L}$ Al + 不加试剂的处理 48 h 使根表 Cd^{2+} 的吸收速率降低了 38.8%~81.6%。与对照处理(Al0, Ca0)相比, 加入 2 mmol/L 的 CaCl_2 显著抑制了 Cd^{2+} 的吸收, 甚至在 Al 胁迫情况下加入 CaCl_2 伴矿景天根系 Cd^{2+} 流由吸收变为外排(图 2A)。在不加 Al 处理下, 高 Zn(500 $\mu\text{mol/L}$)处理与低 Zn(50 $\mu\text{mol/L}$)处理相比其导致 Cd^{2+} 吸收速率下降, 但是在 Al 胁迫下高 Zn 处理下根表 Cd^{2+} 吸收速率比低 Zn 处理高(图 2B)。无论 Al 添加与否, 加入柠檬酸并未显著改变 Cd^{2+} 吸收速率(图 2C)。在不添加 Al 情况下, 加入 NaCl 时根表 Cd^{2+} 吸收速率下降, 可能是 Na^+ 与 Cd^{2+} 存在竞争或者 Cl^- 有抑制作用, 但是在 Al 胁迫下加入 NaCl 后根表 Cd^{2+} 吸收速率有所上升, 可以排除 Cl^- 的抑制作用(图 2D)。

2.2 土培条件下不同改良剂对伴矿景天生长和镉吸收的影响

与对照相比, 添加生物质炭的两个处理土壤 pH 略有升高, 而添加石灰则大幅提高了土壤 pH, pH 上升约 2 个单位(表 1); 相反, 添加柠檬酸处理加剧了土壤酸化。添加石灰使土壤 Al 活性与 Cd 有效性大大降低, 而添加柠檬酸使土壤交换 Al 含量提高约 1 倍, 添加生物质炭的两个处理则小幅度降低了土壤交换 Al 和有效 Cd 含量。



(图中误差线为标准误, $n = 8$ 。Al 200 表示 200 $\mu\text{mol/L}$ AlCl_3 ; Ca 2 表示 2 mmol/L CaCl_2 ; Zn 50 表示 50 $\mu\text{mol/L}$ ZnCl_2 ; Zn 500 表示 500 $\mu\text{mol/L}$ ZnCl_2 ; Ct 200 表示 200 $\mu\text{mol/L}$ 柠檬酸; NaCl 4 表示 4 mmol/L NaCl 。不同的小写字母表示不同处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著; 下同)

图 2 短期水培试验下添加不同试剂伴矿景天根尖 Cd^{2+} 的流速

Fig. 2 Cd^{2+} fluxes across root surface after addition of different chemical reagents in short-term hydroponic experiment

表 1 添加不同改良材料土壤 pH、交换 Al 和有效 Cd 含量变化

Table 1 Soil pH, exchangeable Al and available Cd concentrations after addition of different amendments in soils

处理	pH	交换 Al (cmol/kg)	有效 Cd (mg/kg)
对照	3.84 ± 0.01 d	7.23 ± 0.92 b	21.4 ± 0.6 a
石灰	5.87 ± 0.05 a	ND	7.70 ± 0.22 c
柠檬酸	3.51 ± 0.01 e	14.4 ± 0.2 a	20.6 ± 1.4 a
水稻秸秆生物质炭	3.95 ± 0.00 c	5.76 ± 0.51 b	18.6 ± 1.3 ab
玉米秸秆生物质炭	4.34 ± 0.00 b	5.83 ± 0.31 b	17.4 ± 0.7 b

注：表中数据为平均值±标准误($n=4$)；ND 表示未测出；同列不同小写字母表示不同处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著。

如表 2 所示，对照处理土壤 Al 毒害严重，种植的伴矿景天几乎停滞生长(刚种植时种苗生物量为 0.18 g/株)，而添加柠檬酸并未改善 Al 毒害症状，伴矿景天生长和地上部 Cd 吸收状况甚至更差。添加生物质炭的两个处理一定程度上缓解了铝毒，伴矿景天地上部生物量和 Cd 吸收量有所增加，其中玉米秸秆生物质炭的效果稍优于水稻秸秆生物质炭。施用生石灰的改良效果最好，伴矿景天生长正常，地上部 Cd 吸收量约为对照处理的 50 倍。

表 2 盆栽试验添加不同改良材料对伴矿景天生长和镉吸收的影响

Table 2 Shoot biomass, Cd concentrations and uptake of *Sedum plumbizincicola* under the treatments of different amendments in soils

处理	生物量 (g/盆 DW)	Cd 含量 (mg/kg)	Cd 吸收量 (mg/盆)
对照	0.31 ± 0.04 c	325 ± 39 bc	0.11 ± 0.02 b
石灰	5.53 ± 0.32 a	1 031 ± 80 a	5.67 ± 0.44 a
柠檬酸	0.33 ± 0.05 c	231 ± 51 c	0.08 ± 0.03 b
水稻秸秆生物质炭	0.65 ± 0.12 b	348 ± 74 bc	0.25 ± 0.10 b
玉米秸秆生物质炭	0.80 ± 0.03 b	478 ± 61 b	0.38 ± 0.08 b

2.3 伴矿景天与荞麦间作对铝毒的缓解效果

单一种植伴矿景天的土壤 pH 最低，而种植荞麦一定程度上提高了土壤 pH(表 3)。与单一种植伴矿景天处理相比，单一种植荞麦处理下土壤 pH 提高了 0.14 个单位。不同种植措施下土壤交换 Al 含量的变化趋势与土壤 pH 恰好相反，种植荞麦处理(包括荞麦单作与 2 个间作处理)都一定程度上降低土壤交换 Al 含量。值得注意的是，种植荞麦虽然提高了土壤 pH，却未显著影响土壤 Cd 的有效性。此外，各处理间根际土壤的 DOC 含量变化不一，种植荞麦并未增加根际土壤的 DOC 含量。

表 3 不同种植方式对土壤性质的影响
Table 3 Effects of different intercropping strategies on soil properties

处理	pH	交换 Al (cmol/kg)	有效 Cd (mg/kg)	DOC (mg/kg)
JT	4.20 ± 0.02 b	41.3 ± 1.0 a	1.09 ± 0.06 a	124 ± 8 ab
QM	4.34 ± 0.05 a	35.3 ± 1.3 b	1.11 ± 0.02 a	111 ± 5 b
J+Q1	4.28 ± 0.02 ab	38.3 ± 1.3 ab	1.05 ± 0.02 a	119 ± 5 ab
J+Q2	4.32 ± 0.02 a	36.7 ± 1.3 ab	1.08 ± 0.07 a	136 ± 10 a

注: JT 表示伴矿景天单作, QM 表示荞麦单作, J+Q1 表示伴矿景天与荞麦间作密度 1:1, J+Q2 表示伴矿景天与荞麦间作密度 2:1; 下同。

表 4 列出了不同种植措施对植物生长和金属吸

表 4 不同种植方式对伴矿景天生长和金属含量与吸收量的影响
Table 4 Shoot biomass, metal concentrations and uptakes of *Sedum plumbizincicola* under intercropping strategies

供试植物	处理	单株生物量 (g/株)	地上部 Al 含量 (mg/kg)	地上部 Cd 含量 (mg/kg)	Al 吸收量 (μg/株)	Cd 吸收量 (μg/株)	Cd 总吸收量 (μg/盆)
伴矿景天	JT	0.46 ± 0.04 a	207 ± 6 b	157 ± 12 b	94.4 ± 9.9 b	70.5 ± 4.2 a	423 ± 25 a
	J+Q1	0.23 ± 0.02 b	334 ± 29 a	191 ± 6 a	76.1 ± 7.3 b	44.2 ± 5.4 b	133 ± 16 c
	J+Q2	0.39 ± 0.03 ab	364 ± 27 a	187 ± 1 ab	140 ± 0 a	72.3 ± 6.8 a	289 ± 19 b
荞麦	QM	0.51 ± 0.07 b	816 ± 42 a	31.9 ± 0.2 a	407 ± 44 b	16.1 ± 2.0 a	96.0 ± 11.8 a
	J+Q1	0.75 ± 0.02 a	633 ± 17 b	18.2 ± 1.6 b	477 ± 25 b	13.7 ± 1.6 a	41.2 ± 4.8 b
	J+Q2	0.80 ± 0.03 a	801 ± 50 a	15.3 ± 0.3 b	640 ± 58 a	12.2 ± 0.6 a	24.4 ± 1.2 c

植物总 Cd 吸收量指的是荞麦和伴矿景天所有植株叠加的 Cd 吸收量(图 3)。由于荞麦单株 Cd 吸收量远低于伴矿景天, 伴矿景天单作处理植物总 Cd 吸收量显著高于其他间作处理。但值得注意的是, 当荞麦与伴矿景天以 1:2 间作时, 植物总 Cd 吸收量与伴矿景天单作相比下降幅度并不是很大。

3 讨论

酸性土壤中高活性 Al 显著影响超积累植物生长和重金属吸收去除。本研究中, 与不添加 Al 的对照处理相比, Al 胁迫下伴矿景天根表 Cd²⁺ 吸收速率受到显著抑制。前人研究发现, 正常生长的植物其叶片中 Al 含量一般不超过 200 mg/kg^[20-21], 而本课题组之前的水培试验发现, 伴矿景天叶片 Al 含量在 100 mg/kg 左右就会出现 Al 毒症状^[8], 表明伴矿景天可能比普通作物对 Al 更为敏感。在本试验 1.3 中, 无论是单作还是间作, 伴矿景天地上部 Al 含量均超过 200 mg/kg, 这说明修复植物可能遭受了 Al 毒害; 试验中伴矿景天单株生物量平均值为 0.36 g, 而本课题组之前在未添加 Al 的相同土壤上盆栽试验获得的单株生物量为 2.54 g, 这进一步说明伴矿景天在供试土壤上受到了严重的 Al 毒害, 生长明显被抑制。

收的影响。可以看出, 与单作相比, 伴矿景天与荞麦间作情况下单株生物量降低, 其中, 与 JT 处理相比, J+Q1 处理下伴矿景天单株生物量显著降低了 50%, 可能与荞麦植株体型较大遮阴有关。相反, 间作处理中荞麦单株生物量与单作相比显著增加。从地上部金属含量看, 伴矿景天地上部 Cd 含量显著高于荞麦, 而荞麦 Al 含量显著高于伴矿景天。间作时, 伴矿景天地上部 Al 含量较单作有所上升而 Cd 总吸收量降低。但比较伴矿景天单株 Cd 吸收量, J+Q2 处理与单作相比并无显著降低。从伴矿景天单株 Al 吸收量看, J+Q1 处理伴矿景天对 Al 的吸收有所下降, 而 J+Q2 处理反而有所上升。

由于伴矿景天对 Al 的敏感性, 实际修复过程中酸性土壤 Al 毒的缓解问题应格外引起重视。常用的 Al 毒缓解方式可分为两类: ①提高土壤 pH, 降低 Al 活性, 如施用石灰; ②改变土壤 Al 形态, 降低其毒性, 如添加有机酸。本试验 1.2 中, 施用石灰缓解铝毒的效果最好, 不仅缓解了伴矿景天的生长抑制, 还显著提高了伴矿景天地上部 Cd 含量(表 2)。一方面, 施用石灰可以中和土壤酸度, 降低 Al 活性, 促

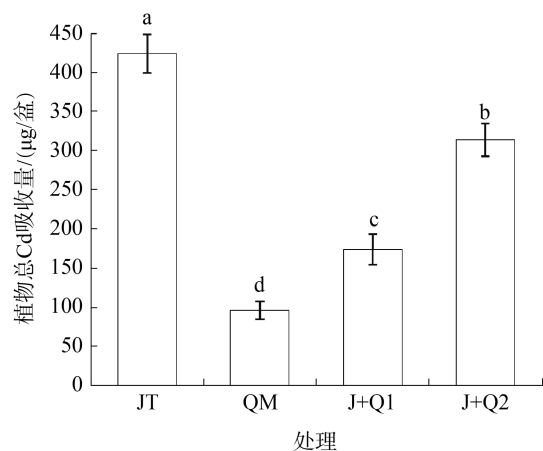


图 3 伴矿景天与荞麦间作盆栽试验下不同种植处理植物总 Cd 吸收量

Fig. 3 Plant total Cd uptake under different intercropping strategies

进植物生长^[22]；另一方面，石灰中的钙(Ca)可能通过离子竞争作用抑制根系 Al 的吸收。李其星^[23]发现，2 mmol/L CaCl₂ 处理的黑麦草(*Lolium perenne* L.)根尖 Al 的含量与对照相比减少了 68.0%；Chen 等^[24]发现，Al 胁迫下加入 5 mmol/L CaCl₂ 显著降低了拟南芥体内 Al 含量，增大了其叶面积。但是本研究水培体系中，添加 CaCl₂ 短期(48 h)并未缓解 Al 胁迫对根表 Cd²⁺ 吸收速率的抑制，相反根尖 Cd²⁺ 流向由吸收变为外排。这也间接说明石灰对 Al 的缓解作用主要体现在提高土壤 pH 而不是 Ca 的作用。Ca 与 Cd 存在竞争吸收，高浓度 Ca²⁺ 或者 Ca²⁺ 通道阻滞剂处理会显著抑制伴矿景天根系 Cd 的吸收和转运^[19]。因此，施用石灰缓解 Al 毒时需注意石灰用量，充分考虑 Ca 与 Cd 竞争吸收以及 pH 提高对 Cd 钝化效应的影响，将土壤调至合适 pH(pH 5.0 ~ 5.5)。与石灰作用相似，添加生物质炭也能提高土壤 pH 降低 Al 活性。此外，生物质炭还可以通过吸附作用固定土壤中的活性 Al。在试验 1.2 中，添加生物质炭显著提高了土壤 pH，降低了交换 Al 含量(表 1)，同时对土壤 Cd 的有效性降低幅度不大，一定程度上促进了伴矿景天生长与 Cd 吸收。但与石灰处理相比，其缓解 Al 毒、促进伴矿景天 Cd 吸收的效果并不理想，同时考虑土壤改良的成本，生物质炭(本研究用量为 2%)的选择需要谨慎。

土壤中添加有机酸如柠檬酸、草酸等能够与游离态 Al 形成络合物，降低 Al 的活性，从而缓解 Al 毒对植物生长的抑制作用。与诸多研究结果^[25-26]不一致的是，本研究水培或者土培条件下添加柠檬酸对 Al 毒的缓解效果都不明显，甚至造成了土壤的进一步酸化，这可能与柠檬酸的用量和柠檬酸形态有关。有研究指出，低浓度有机酸对铝毒有较好的缓解作用，高浓度反而不利于植物生长^[27-28]。Priyambada 和 Proklamasiningsih^[25]发现柠檬酸与土壤交换 Al 的摩尔比为 1 : 1，苹果酸和乳酸与交换 Al 的摩尔比为 1 : 2 时改良效果较好。此外，柠檬酸是微生物的碳源，易被矿化，所以柠檬酸的施用时间和施用方式(拌土或者土表喷施)也是影响改良效果的重要因素。

耐 Al 作物根系能够分泌有机酸等多种化合物，降低根际土壤 Al 的活性以及 Al 向植物体内的转移。因此，超积累植物与耐 Al 作物间(套)作是一种经济生态的缓解修复植物 Al 毒胁迫的方式，有助于实现生产资源的充分利用，达到边生产边修复的目的。本试验 1.3 的结果表明，伴矿景天与荞麦间作提高了土壤 pH，也一定程度上降低了土壤交换态 Al 含量，说

明间作荞麦能够降低土壤 Al 的活性。通过分析根际土壤 DOC，其含量在种植荞麦的情况下与种植伴矿景天相比并未升高。推测伴矿景天作为超积累植物，为促进土壤固相重金属的释放，同样具有很强的根系分泌活性。但两种植物根系分泌物组成和功能可能存在很大差异以实现金属活性不同的影响，这需要进一步分析明确。间作荞麦降低了伴矿景天的单株生物量，间作荞麦不利于伴矿景天生长的原因一方面可能是荞麦根系发达，与伴矿景天竞争有效养分，另一方面是荞麦植株体型较大遮挡部分光照使伴矿景天生物量降低。但间作条件下，J+Q2 处理伴矿景天单株地上部 Cd 吸收量与对照相比并未降低，表明在适宜的间作种植密度下伴矿景天的 Cd 吸收不会因间作荞麦影响伴矿景天生长而降低。因此，控制间作种植密度以及采用合适措施促进伴矿景天生长是缓解 Al 毒症状和维持植物高效 Cd 吸收的关键。

值得注意的是，在本试验 1.1 中发现，Al 胁迫下加入高浓度的 Zn 能够促进根表 Cd²⁺ 的吸收，表明 Zn 在缓解伴矿景天 Al 毒对 Cd 的吸收抑制方面发挥着一定的作用。Zn 是抗氧化酶 Cu/Zn-SOD 的重要组成部分，供应更多的 Zn 可能有助于提高植物抗氧化酶体系的活性，有效清除 Al 胁迫下产生的氧自由基^[29]，但是具体的机制需要进一步探究。

4 结论

在土培条件下，添加生物质炭一定程度上能提高土壤 pH 和促进伴矿景天生长，但成本较高；水培或者土培条件下，添加柠檬酸均未缓解土壤 Al 毒，反而使土壤进一步酸化，需要谨慎考虑。短期培养过程中营养液中提高 Zn 浓度，能够提高 Al 胁迫下根表 Cd²⁺ 的吸收速率；而土壤中添加石灰显著提高了土壤 pH，从而显著提高了伴矿景天的生物量和地上部 Cd 含量。间作耐 Al 作物荞麦的农艺措施一定程度上能提高土壤 pH，降低交换 Al 含量，在适宜的间作种植密度下并不会影响伴矿景天单株 Cd 的吸收量，具有实现边生产边修复的前景。

参考文献：

- [1] Lei M, Tie B Q, Song Z G, et al. Heavy metal pollution and potential health risk assessment of white rice around mine areas in Hunan Province, China[J]. Food Security, 2015, 7(1): 45-54.
- [2] 胡鹏杰, 李柱, 钟道旭, 等. 我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 577-584.
- [3] Wu L H, Zhou J W, Zhou T, et al. Estimating cadmium

- availability to the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in a wide range of soil types using a piecewise function[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 1342–1350.
- [4] Singh S, Tripathi D K, Singh S, et al. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 137: 177–193.
- [5] Wilson J, He Z L, Yang X E. The red soils of China: Their nature, management and utilization[M]. New York, NY, Springer Science + Business Media, 2004.
- [6] Valle S R, Pinochet D, Calderini D F. Uptake and use efficiency of N, P, K, Ca and Al by Al-sensitive and Al-tolerant cultivars of wheat under a wide range of soil Al concentrations[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(3): 392–400.
- [7] 吴道铭, 傅友强, 于智卫, 等. 我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治[J]. *土壤*, 2013, 45(4): 577–584.
- [8] Zhou J W, Li Z, Zhou T, et al. Aluminum toxicity decreases the phytoextraction capability by cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in acid soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134591.
- [9] 董颖. 不同地区油菜秸秆生物质炭改良红壤酸度的差异性研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2018.
- [10] 沈仁芳, 赵学强. 酸性土壤可持续利用[J]. *农学学报*, 2019, 9(3): 16–20.
- [11] Vondráčková S, Száková J, Drábek O, et al. Aluminium uptake and translocation in Al hyperaccumulator *Rumex obtusifolius* is affected by low-molecular-weight organic acids content and soil pH[J]. *PLoS One*, 2015, 10(4): e0123351.
- [12] Osmolovskaya N, Dung D V, Kuchaeva L. The role of organic acids in heavy metal tolerance in plants[J]. *Biological Communications*, 2018, 63(1): 9–16.
- [13] 魏岚, 杨少海, 邹献中, 等. 不同土壤调理剂对酸性土壤的改良效果[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 36(1): 77–81.
- [14] Li J Y, Wang N, Xu R K, et al. Potential of industrial byproducts in ameliorating acidity and aluminum toxicity of soils under tea plantation[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(5): 645–654.
- [15] Yalcin G, Vardar F. The alleviating effects of salicylic acid application against aluminium toxicity in barley (*Hordeum vulgare*) roots[J]. *Biologia*, 2016, 71(12): 1338–1344.
- [16] 虞璐. 生物质炭对酸化土壤的改良效应及其对土壤硝化作用的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [17] 钱林波. 生物碳对酸性土壤中有毒金属植物毒性缓解及阻控机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [18] Ma J F. Role of organic acids in detoxification of aluminum in higher plants[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2000, 41(4): 383–390.
- [19] Li L Z, Tu C, Wu L H, et al. Pathways of root uptake and membrane transport of Cd^{2+} in the zinc/cadmium hyperaccumulating plant *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2017, 36(4): 1038–1046.
- [20] Chen R F, Shen R F, Gu P, et al. Investigation of aluminum-tolerant species in acid soils of South China[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, 39(9/10): 1493–1506.
- [21] Silva S, Santos C, Matos M, et al. Al toxicity mechanism in tolerant and sensitive rye genotypes[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 75: 89–97.
- [22] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(9): 206–213.
- [23] 李其星. 钙对黑麦铝毒的解毒机制研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [24] Chen J, Duan R X, Hu W J, et al. Unravelling calcium-alleviated aluminium toxicity in *Arabidopsis thaliana*: Insights into regulatory mechanisms using proteomics[J]. *Journal of Proteomics*, 2019, 199: 15–30.
- [25] Prijambada I D, Proklamasingih E. Effect of organic acids amendment on the growth and yield of soybean (*Glycine max*) in Ultisol[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2010, 12(4): 566–570.
- [26] 周文颖. 铝胁迫下马尾松幼苗根系分泌特性及有机酸对铝毒的缓解生理机制[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [27] 金婷婷, 刘鹏, 徐根娣, 等. 外源有机酸对铝毒胁迫下大豆根系形态的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2006, 28(3): 302–308.
- [28] 孙远秀, 邱爽, 张伟伟, 等. 柠檬酸对西瓜幼苗铝毒害的缓解作用[J]. *核农学报*, 2016, 30(10): 2072–2079.
- [29] Pontigo S, Godoy K, Jiménez H, et al. Silicon-mediated alleviation of aluminum toxicity by modulation of Al/Si uptake and antioxidant performance in ryegrass plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 642.