



范贝贝,陈玲,黄尚书,伍亮,黎鑫林,陈清. 矿物改良剂对酸性镉污染土壤中菠菜生长及镉累积的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(09): 175-185.
FAN Beibei, CHEN Ling, HUANG Shangshu, WU Liang, LI Xinlin, CHEN Qing. Effects of mineral amendments on spinach growth and cadmium accumulation in acidic Cd-contaminated soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(09): 175-185.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.16

矿物改良剂对酸性镉污染土壤中菠菜生长及镉累积的影响

范贝贝^{1,2} 陈玲¹ 黄尚书^{3*} 伍亮⁴ 黎鑫林⁴ 陈清²

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 211135;

2. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

3. 江西省红壤及种质资源研究所, 南昌 330096;

4. 江西省吉安市井冈山农业科技园管理委员会, 江西 吉安 343016)

摘要 为评估矿物改良剂对农田土壤酸度降低和植物生长的效果,解析改良剂阻控菠菜Cd累积的可能机制,采用白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)、煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥开展盆栽试验,探究3种改良剂对酸性Cd污染土壤中菠菜生长和Cd累积的影响。结果表明:施用10 g/kg矿物改良剂均能显著提高土壤pH 1.44~2.40个单位($P<0.05$),降低土壤交换性酸71.9%~82.8%、交换性 Al^{3+} 82.9%~100%,有效缓解土壤铝毒害。施用改良剂均能显著降低土壤Cd有效性28.5%~47.5%、富集系数68.8%~78.1%($P<0.05$),使菠菜植株Cd浓度降低68.4%~78.5%。除了改善土壤酸度和抑制Cd/Al毒性外,改良剂还能增加植株对Ca和Mg的累积。Pearson相关性和结构方程分析表明,土壤Cd有效性降低、植株Cd富集能力减弱和植株根系 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 与 Cd^{2+} 的竞争吸收作用是菠菜植株Cd浓度显著降低的重要原因。白云石、煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥使菠菜鲜重和干重分别增加4.02~20.0倍和3.32~11.6倍。其中,钙硅镁钾肥处理效果最好,使菠菜鲜重和干重分别提高20.0倍和11.6倍。综上,白云石、牡蛎壳粉和钙硅镁钾肥均能改良酸性Cd污染土壤,促进菠菜生长并抑制菠菜对Cd的累积,其中钙硅镁钾肥被推荐为优选材料。在农业实践上,建议采用富钙镁的碱性矿物改良剂修复酸性Cd污染土壤,提高作物产量,促进酸性土壤的可持续利用。

关键词 镉污染; 土壤酸化; 矿物改良剂; 菠菜; 污染修复

中图分类号 G350

文章编号 1007-4333(2025)09-0175-11

文献标志码 A

Effects of mineral amendments on spinach growth and cadmium accumulation in acidic Cd-contaminated soil

FAN Beibei^{1,2}, CHEN Ling¹, HUANG Shangshu^{3*}, WU Liang⁴, LI Xinlin⁴, CHEN Qing²

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Nanchang 330096, China;

4. Jinggangshan Agricultural Science and Technology Park Management Committee, Ji'an 343016, China)

Abstract To evaluate the effect of mineral amendments on reducing soil acidity and plant growth in farmland, and to analyze the possible mechanisms by which amendments inhibit Cd accumulation in spinach, pot experiments were conducted using dolomite(DM) calcined oyster shell(COS) and calcium-silicon-magnesium-potassium fertilizer(CSMP) to explore the effects of three amendments on spinach growth and Cd contamination

收稿日期: 2025-07-15

基金项目: 井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051261);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021TC117)

第一作者: 范贝贝(ORCID:0000-0002-1157-7863),助理工程师,主要从事土壤酸化改良与污染修复研究,E-mail: jiubeifan@issas.ac.cn

通讯作者: 黄尚书(ORCID:0000-0003-1779-9712),博士,副研究员,主要从事土壤酸化和结构改良研究,Email: hss1232005@163.com

in acidic Cd polluted soil. The results showed that the application of 10 g/kg mineral amendments significantly increased soil pH (1.44-2.40 units), decreased soil exchangeable acid (71.9%-82.8%) and exchangeable Al^{3+} (82.9%-100%), thus effectively alleviating Al toxicity. The application of amendments significantly reduced available Cd (28.5%-47.5%) and BCF (68.8%-78.1%), thus decreasing the plant Cd concentration by 68.4%-78.5%. Besides ameliorating soil acidity and inhibiting Cd/Al toxicities, mineral amendments all enhanced the Ca and Mg accumulation in spinach plants. Based on Pearson correlation analysis and structural equation modeling, the reduction of DTPA-Cd, the decrease of Cd uptake capacity by spinach (BCF) and the increased of ionic competition between $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ and Cd^{2+} in plant roots were the important reasons for inhibiting Cd accumulation in spinach. Furthermore, DM, COS, and CSMP significantly promoted the fresh and dry weight of spinach by 4.02 to 20.0 folds and 3.32 to 11.6 folds, respectively. Among these, the fresh and dry weight of spinach was more effective, increasing by 20.0 and 11.6 times in CSMP treatment, respectively. In summary, DM, COS and CSMP can effectively remediate acidic Cd polluted soil, promote growth, and inhibit Cd accumulation in spinach. Amend them, CSMP is given priority for recommendation. In agricultural practice, it is suggested to use alkaline mineral amendments rich in calcium and magnesium to remediate acidic Cd-contaminated soil, increase crop yields and promote the sustainable use of acidic soil.

Keywords Cd pollution; soil acidification; mineral amendments; spinach; pollution remediation

重金属镉(Cd)具有高流动性和植物易吸收的特点,一直被认为是一种极其有害的土壤污染物^[1-2]。镉在农业土壤中的高流动性和在植物根系中的快速积累是抑制植物生长和降低农业生产力的重要因素^[3-4]。由于矿山开采、金属冶炼、大气沉降和污水灌溉等人为活动的影响,农田土壤Cd污染加剧,具有污染范围广和面积大的特点,已经引起全社会的关注^[2,5-6]。田间研究证明,大部分蔬菜和粮食作物对Cd具有较强的累积作用,特别是水稻和叶菜^[7-9]。如饮食摄入占普通人群总Cd暴露量的90%^[9],食用叶菜类蔬菜和水稻占人体累积Cd总量的70%以上^[10]。因此,农田土壤Cd污染是一个亟待解决的关键问题。

作物对土壤Cd的吸收累积取决于Cd的生物有效性,与Cd有效性呈显著负相关^[9,11]。Luo等^[4]发现土壤DGT-Cd含量与糙米中Cd含量呈极显著相关($P<0.01$)。其中,土壤pH是一个控制土壤Cd生物有效性和流动性的核心因素^[11-12]。在中国亚热带酸性土壤(pH 4.7~6.7)中,土壤pH降低1个单位会导致土壤Cd有效性增加0.35~0.37倍^[13]。基于多地田间试验,稻田土壤平均pH从5.54增加到6.04时,稻米Cd含量和土壤Cd有效性占比分别平均降低35.3%和40%以上^[14]。此外,土壤pH也能影响土壤对Cd的吸附-解吸的过程,进而影响Cd的有效性^[12,15]。因此,土壤pH降低是加剧土壤Cd污染的直接原因。

我国酸性土壤面积约占全国陆地总面积的

22.7%,铝毒害是导致酸性土壤地区农作物减产的重要原因,影响农业的可持续发展^[16-17]。如过量施用化肥也加剧了农田土壤酸化,尤其是在土壤pH缓冲能力较低的热带和亚热带地区^[12,16]。当土壤 $\text{pH}<5.5$ 时,大量土壤固相中不同形态的惰性铝会溶解成游离态 Al^{3+} 释放进入土壤溶液,微摩尔 Al^{3+} 即可限制植物生长,导致农作物减产^[12,17]。我国南方地区土壤普遍存在酸化问题,部分亚热带地区土壤降低了1.5~2.0个单位,且大量亚热带稻田存在重金属Cd污染^[14,17]。目前,江西省 $\text{pH}<5.5$ 的耕地比例达到81.1%^[18]。

土壤pH的降低加剧了Cd的移动性和毒性。据预测,到2050年,氮肥投入每增加1%,土壤pH将平均下降1个单位,中国农作物相对产量将下降24%^[19]。然而,当土壤铝毒害与重金属胁迫相结合时,将加剧对作物生长的负面影响,从而降低农田生产力并增加食品安全问题。

施用碱性土壤改良剂是一种降低土壤酸度、Cd生物有效性及其在作物体内累积的有效途径^[11,20]。如生物炭和羟基磷灰石能有效地改善土壤酸化、降低土壤重金属有效性,并抑制作物对重金属的吸收^[11,21]。然而,由于生物炭和羟基磷灰石成本相对较高,限制其大规模应用。近年来,利用来源广泛的天然矿物和工农业废弃物修复酸性Cd污染土壤备受研究人员的关注^[21-22]。其中,白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)、牡蛎壳和硅酸盐材料等土壤改良剂展现出广泛的应用前景^[23-24]。冀建华等^[25]发现连

续4年施用硅钙钾镁肥可以显著增加0~30 cm土壤交换性 Ca^{2+} 、交换性 Mg^{2+} 和盐基饱和度,有效改善稻田酸化。Fan等^[26]发现施用30 g/kg的白云石可使土壤交换性酸、交换性 Al^{3+} 和DTPA-Cd分别降低80.0%、83.9%和28.6%。此外,富钙镁土壤改良剂释放的钙镁等离子也会对植物根系Cd吸收产生竞争作用,影响植株对Cd的富集累积。然而,这些研究大多没有评估这些改良剂对控制土壤Al和Cd毒性以及限制作物中Cd积累的影响,降低土壤酸度和作物Cd吸收的双重机制仍未得到充分探究。因此,本研究拟选用市场常见的白云石、牡蛎壳和钙硅镁钾肥作为酸性土壤改良剂,评估对比3种改良剂降低土壤酸度和Cd活性的效果,解析改良剂添加促进菠菜生长的途径和阻控菠菜Cd累积的可能机制,以期为酸性Cd污染农田修复和可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤及改良剂

试验土壤采用山东省烟台市某Cd污染农田0~20 cm的土壤(37°38' N, 120°31' E)^[26]。将采集的土壤在实验室自然风干,去除杂物,粉碎过筛(0.15 mm和2 mm),混匀备用。根据美国农业部(USDA)土壤分类,供试土壤的黏粒、粉粒和砂粒占比分别为0.50%、76.0%和23.5%,土壤田间持水量为20.4%。其中,土壤pH 4.86,土壤电导率248 $\mu\text{S}/\text{cm}$,土壤交换性酸1.25 cmol/kg,土壤交换性 Al^{3+} 0.52 cmol/kg,土壤有机质16.8 g/kg,碱解氮148 mg/kg,速效磷49.1 mg/kg,速效钾230 mg/kg,有效态Cd(DTPA-Cd)1.23 mg/kg,总Cd含量4.42 mg/kg。白云石($\text{CaO} \geq 25\%$, $\text{MgO} \geq 20\%$)、煅烧牡蛎壳($\text{CaO} \geq 50\%$)和钙硅镁钾肥($\text{CaO} \geq 40\%$, $\text{SiO}_2 \geq 20\%$, $\text{MgO} \geq 2\%$)分别购买自灵寿县泓耀矿产品加工厂、安徽亳州市诚善堂中药材批发公司和金正大生态工程集团股份有限公司,pH分别为10.2、10.1和10.7,质子消耗容量(PCC)分别为2.30、20.40和1.60 mol/kg。

土壤改良剂的质子消耗容量指将1.00 g土壤改良剂溶于15 mL水中,用0.1 mol/L H_2SO_4 滴定至pH=5.0,此时所消耗的酸量为质子消耗容量;氧化物组成(质量分数)采用X射线荧光光谱(氧化物模式)分析测定(XRF, Panalytical Axios,

Netherlands)^[26];土壤改良剂的pH采用酸度计测定,固液比为 $V(\text{水}):V(\text{改良剂})=5:1$ 。

1.2 盆栽试验

盆栽试验采用完全随机设计,每个处理重复3次,于2021年4~6月在中国农业大学烟台培养基地进行。盆栽试验共设4个处理:不添加任何材料的对照(CK)、10 g/kg白云石处理(DM)、10 g/kg煅烧牡蛎壳处理(COS)、10 g/kg钙硅镁钾肥处理(CSMP)。其中,菠菜种子(*Spinacia oleracea* L.)购买自哈里姆种子(天津)有限公司,为无霜叶菠菜,适温8~28℃,在中国大部分地区可春夏秋冬四季播种,丰产性好。在本试验中,采用基质育苗移栽。

将土壤改良剂按照10 g/kg的比例添加到供试土壤(2 mm)中,并在塑料薄膜上充分混匀,然后将1 000 g混合土壤样品装入到规格统一塑料育苗盆(口径×底径×盆高=15 cm×10 cm×14 cm)。土壤样品装填过程中不断振动育苗盆使土壤填充充实,在室温下静置培养7 d。在第8天,将育苗盆的土壤破碎、平整,将3株长势相同的菠菜苗(3片真叶)定植到育苗盆的表层土中。菠菜生长期间通过定期检查育苗盆土壤湿度并结合重量法确定浇水频率和浇水量,保持土壤田间持水量的60%左右,生长25 d后收获,于2021-06-01采集盆栽试验土壤样品并收获菠菜植株。

1.3 测定项目和方法

土壤pH采用酸度计测定(雷磁pH500型),水土体积比为 $V(\text{水}):V(\text{土})=2.5:1.0$;电导率值采用EC计测定(雷磁DDSJ-308A型),水土体积比 $V(\text{水}):V(\text{土})=5:1$;采用标准方法检测土壤有机质和速效养分。土壤有效态Cd采用DTPA溶液(pH=7.3, 0.1 mol/L TEA, 0.01 mol/L CaCl_2 , 0.005 mol/L DTPA)提取,浸提液的Cd含量采用火焰原子吸收分光光度法测定(PinAAcle900T, 美国铂金埃尔默)。

菠菜收获后,植物被分成地上部分和地下部分。植物样品在65℃条件下烘干至恒重。将植株地上部分和地下部分的干样充分混合、研磨,并通过0.15 mm的筛子,过筛的植物混合样用于植物金属元素含量分析。将充分混合的植物样品转移到消解管中,加入8 mL硝酸,采用微波消解仪(Mars Xpress, USA)消解,消解液的Cd、Ca、Mg和Al浓度

采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES, Avio 200, PerkinElmer, USA)测定^[26]。每个试验处理取3个平行样品进行指标分析,试验数据以3次重复的平均值±标准差表示。

菠菜重金属富集系数(BCF)计算公式如下:

$$BCF = Cd_{\text{plant}} / Cd_{\text{soil}} \quad \text{式(1)}$$

式中: Cd_{plant} 为菠菜植株Cd浓度, mg/kg; Cd_{soil} 为试验盆栽土壤中总Cd含量, mg/kg。

根系金属元素(HM)吸收能力计算公式如下:

$$HM = HM_{\text{plant}} / (DW_{\text{root}} \times 1000) \quad \text{式(2)}$$

式中: HM为金属元素(Cd、Ca、Mg和Al); HM_{plant} 为菠菜植株金属元素累积量, mg/株; DW_{root} 为菠菜植株地下部干重, g/盆。

1.4 数据处理

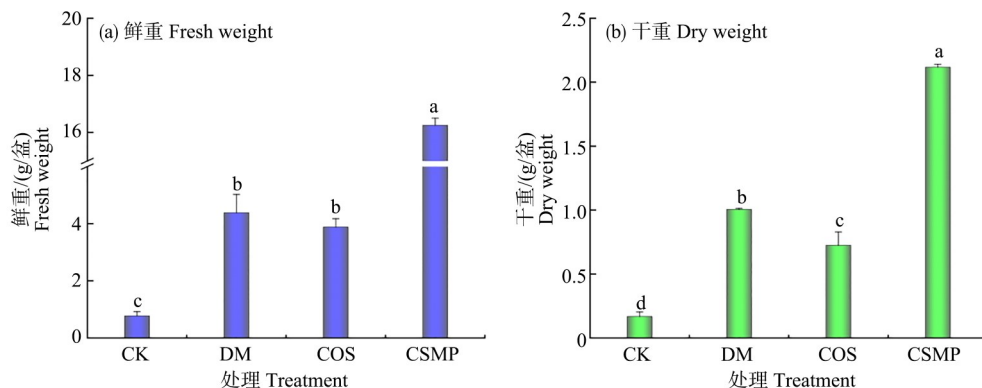
试验数据取3次重复的平均值和标准差,利用Excel 2016和Origin 2022进行数据分析和作图,利

用SPSS 22.0进行单因素方差分析,用Duncan法进行多重比较,显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。采用Pearson方法评价植株Cd浓度、植株根系元素吸收和土壤理化性质之间的相关性,采用结构方程模型(R语言Lavaan包)描述根系Ca、Mg和Al吸收对植株Cd富集的影响途径。

2 结果与分析

2.1 施用矿物改良剂对菠菜生长和镉吸收的影响

施用3种改良剂均能显著促进菠菜的生长,提高菠菜的生物量(图1)。与对照(CK)处理相比,白云石(DM)、煅烧牡蛎壳(COS)和钙硅镁钾肥(CSMP)使菠菜的鲜重分别增加4.66、4.02和20.0倍,干重分别增加4.99、3.32和11.6倍。其中,CSMP处理的促生效果最好,使菠菜的生物量(鲜重和干重)均增加11.6倍以上。



CK, 对照; DM, 白云石; COS, 煅烧牡蛎壳; CSMP, 钙硅镁钾肥。不同小写字母代表处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

CK, Control; DM, Dolomite; COS, Calcined oyster shell; CSMP, Calcium-silicon-magnesium-potassium fertilizer. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 土壤改良剂对菠菜生长的影响

Fig. 1 Effects of soil amendments on spinach growth

如图2所示,改良剂施用均显著降低了菠菜对Cd的累积。在DM、COS和CSMP处理中,植株Cd浓度分别降低78.5%、72.5%和68.4%,与对照存在显著差异($P < 0.05$,图2(a))。此外,植株Cd累积能力、BCF和 RAC_{Cd} 也分别降低76.6%~84.1%、68.8%~78.1%和47.0%~67.6%。其中,DM处理效果最好,使植株Cd累积能力、根系Cd累积能力和Cd生物富集系数分别降低84.1%、67.6%和78.1%,并显著降低植株Cd浓度78.5% ($P < 0.05$)。

2.2 施用矿物调理剂对植株铝、钙、镁和铝吸收的影响

在不同改良剂处理下,菠菜植株对Al、Ca和Mg的吸收表现出较大的差异(图3)。DM、COS和CSMP处理均促进了菠菜对Al的累积,使植株Al累积量和 RAC_{Al} 分别增加683%~748%和31.5%~321%(图3(b)和(c))。与对照相比,COS处理显著增加菠菜对Al的吸收,使 RAC_{Al} 和植株Al累积量分别增加321%和748%;仅CSMP处理使植株Al浓度降低47.1%。

此外,与对照相比,各处理均提高了钙和镁的

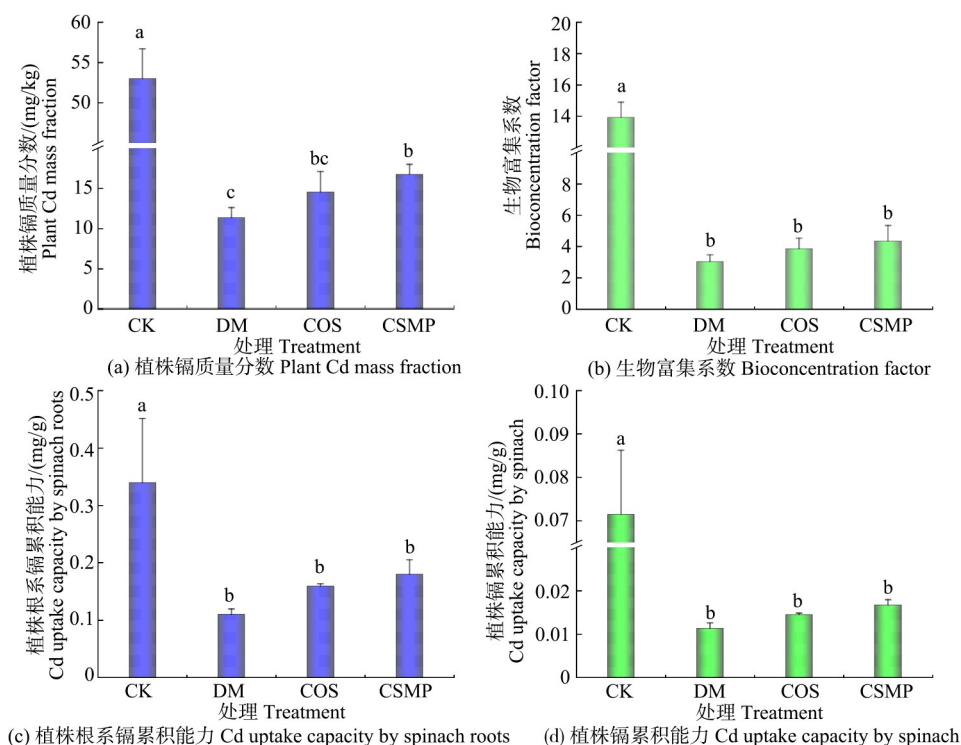


图 2 矿物改良剂对菠菜植株 Cd 累积能力的影响

Fig. 2 Effects of mineral amendments on Cd accumulation capacity of spinach plants

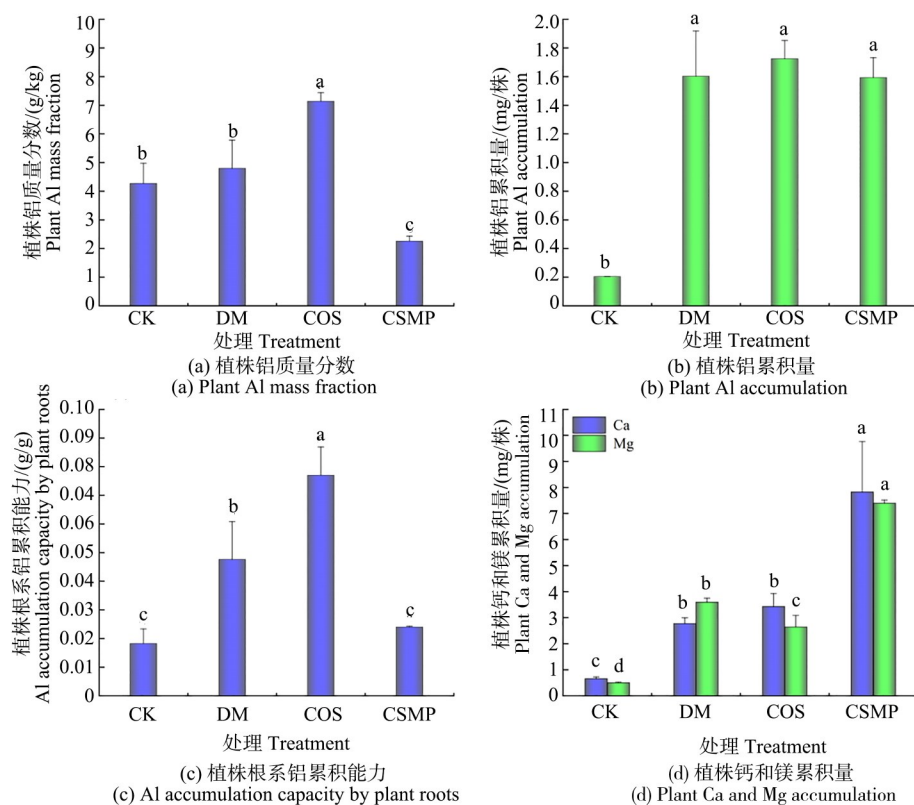


图 3 矿物改良剂对菠菜 Al、Ca 和 Mg 元素累积的影响

Fig. 3 Effects of mineral amendments on Al, Ca and Mg accumulation in spinach plants

吸收。DM、COS 和 CSMP 处理使植株 Ca 和 Mg 积累量分别增加了 3.22~10.9 倍和 4.28~13.8 倍(图 3(d))。其中,CSMP 处理也使菠菜植株 Ca 和 Mg 积累量分别增加 10.7 倍和 13.8 倍($P<0.05$)。

2.3 施用矿物调理剂对土壤理化性质和镉有效性的影响

施用改良剂均能显著提高土壤 pH,降低土壤交换性酸度(表 1)。与对照相比,DM、COS 和 CSMP 使土壤 pH 分别增加 1.44、2.40 和 1.63 个单位。随

着土壤 pH 的显著增加,DM、COS 和 SF 使土壤交换性酸、交换性 H^+ 和交换 Al^{3+} 分别降低 71.9%~82.8%、49.2%~77.8% 和 82.9%~100%。在降低交换性 Al^{3+} 方面,CSMP 处理的效果优于 DM 和 COS 处理。此外,虽然各处理间土壤有机质质量分数无显著差异,但 DM、COS 和 CSMP 使有机质质量分数分别增加了 17.1%、11.6% 和 22.5%。除 CSMP 处理显著降低土壤速效磷外,COS 处理使土壤速效磷质量分数增加 37.7%($P<0.05$)。

表 1 改良剂施用后镉污染土壤理化性质特征
Table 1 Characteristics of soil physicochemical properties after amending Cd-polluted soil with amendments

处理 Treatment	土壤 pH Soil pH	电导率/ ($\mu S/cm$) Electrical conductivity	有机质质量	速效磷质量	交换性酸/ ($cmol/kg$) Exchangeable acid	交换性 H^+ / ($cmol/kg$) Exchangeable H^+	交换性 Al^{3+} / ($cmol/kg$) Exchangeable Al^{3+}
			分数/ (g/kg) Organic matter mass fraction	分数/ (mg/kg) Available phosphorus mass fraction			
CK	4.62±0.00d	276.0±13.7b	12.8±2.4a	62.8±0.9b	1.06±0.10a	0.59±0.10a	0.47±0.10a
DM	6.05±0.00c	245.0±2.0b	15.1±0.2a	66.6±2.5b	0.30±0.00b	0.22±0.00c	0.08±0.00b
COS	7.01±0.00a	348.0±18.5a	14.4±0.7a	86.2±5.9a	0.18±0.10c	0.13±0.00d	0.05±0.00c
CSMP	6.25±0.10b	325.0±16.7a	15.8±1.3a	57.2±5.3b	0.30±0.00b	0.30±0.00b	0.00±0.00d

注: CK,对照; DM,白云石; COS,煅烧牡蛎壳; CSMP,钙硅镁钾肥。不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: CK, Control; DM, Dolomite; COS, Calcined oyster shell; CSMP, Alcium-silicon-magnesium-potassium fertilizer. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

施用改良剂均能降低土壤 Cd 的生物有效性(图 4)。与对照相比,DM、COS 和 CSMP 处理使土壤 DTPA-Cd 含量分别降低 28.6%、42.1% 和 47.5%。其中,COS 和 CSMP 处理的效果较好,降低率均>40.0%。

2.4 植株镉浓度与植株生物量、根系元素吸收能力和土壤理化性质的相关性

Person 相关性分析结果表明(图 5),植株 Cd 浓度与 BCF ($r^2=1.00$, $P<0.001$)、 RAC_{Cd} ($r^2=0.85$, $P<0.001$)、 $DTPA-Cd$ ($r^2=0.79$, $P<0.01$)呈显著正相关,与 RAC_{Ca} ($r^2=-0.765$, $P<0.05$)、 RAC_{Mg} ($r^2=-0.81$, $P<0.01$)、土壤 pH ($r^2=-0.89$, $P<0.001$)和有机质 ($r^2=-0.62$, $P<0.05$)呈负相关。其中,BCF 与 RAC_{Cd} 呈极显著正相关($P<0.001$),与 RAC_{Ca} 和 RAC_{Mg} 呈显著负相关($P<0.05$)。结构方程模型结果证明(图 6), RAC_{Ca} 和 RAC_{Mg} 直接或间接影响植株 Cd 浓度, RAC_{Al} 间接影响植株 Cd 浓度。其中 RAC_{Mg} 直接或间接影响植株 Cd 浓度的标准化路径系数分

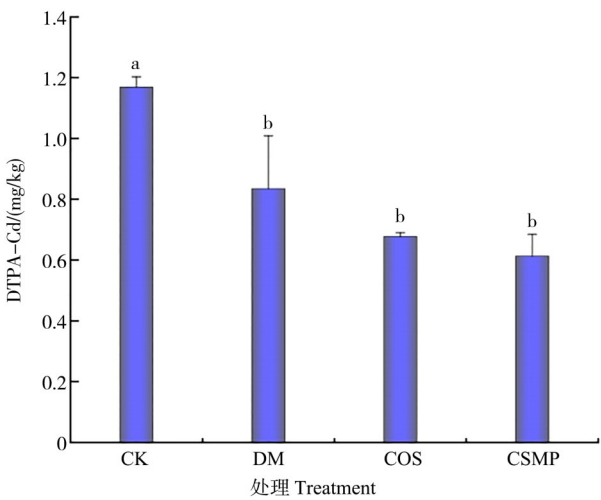
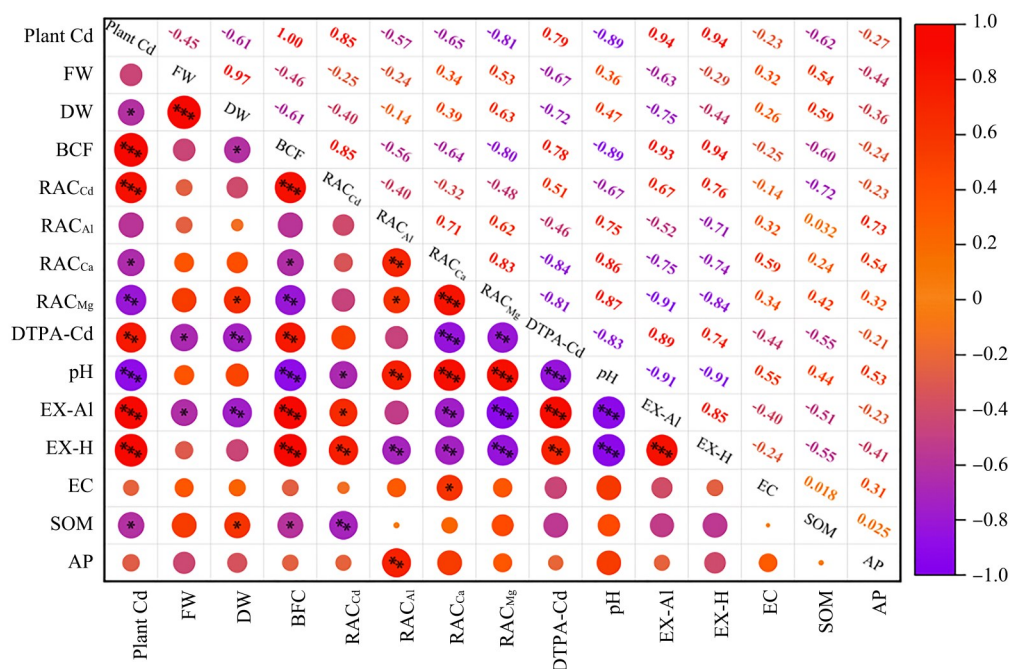


图 4 土壤改良剂施用后土壤 Cd 有效性的变化
Fig. 4 Changes of soil Cd availability after applying soil amendments

别为-0.67和-0.48,呈显著负相关($P<0.05$)。植株 Cd 浓度与 RAC_{Cd} 呈极显著正相关($P<0.001$)。

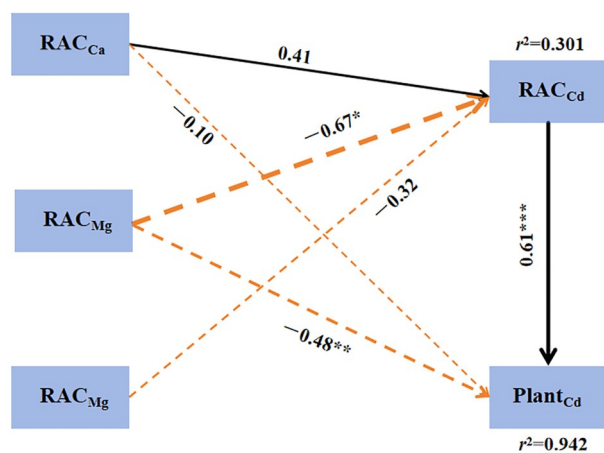


Plant Cd: 植株 Cd 浓度; RAC_{Cd} : 根系 Cd 累积能力; RAC_{Al} : 根系 Al 累积能力; RAC_{Ca} : 根系 Ca 累积能力; RAC_{Mg} : 根系 Mg 累积能力; EX-Al: 土壤交换性 Al^{3+} ; EX-H: 土壤交换性 H^+ 。*表示在 $P < 0.05$ 水平下的显著差异, **表示在 $P < 0.01$ 水平下的显著差异, ***表示在 $P < 0.001$ 水平下的显著差异。下同。

Plant Cd: Plant Cd concentration; RAC_{Cd} : Cd accumulation capacity by spinach roots; RAC_{Al} : Al accumulation capacity by spinach roots; RAC_{Ca} : Ca accumulation capacity by spinach roots; RAC_{Mg} : Mg accumulation capacity by spinach roots; EX-Al: Soil exchangeable Al^{3+} ; EX-H: Soil exchange H^+ . * indicates significant difference at the $P < 0.05$ level, ** indicates significant difference at the $P < 0.01$ level, *** indicates significant difference at the $P < 0.001$ level. The same below.

图 5 土壤理化性质、有效 Cd、菠菜根系金属吸收能力与植株 Cd 浓度的相关性

Fig. 5 Correlation between soil physical and chemical properties, available Cd, metal uptake capacity by spinach roots and plant Cd concentration



CFI=1.00, GFI=0.987, df=4.00, $P=0.675$, RMSEA=0.00

图 6 菠菜根系 Ca、Mg、Al、Cd 吸收能力与植株 Cd 浓度的结构方程模型

Fig. 6 Structural equation model of Ca, Mg, Al and Cd uptake capacity by spinach roots and plant Cd concentration

3 讨论与结论

3.1 土壤改良剂施用对土壤酸度和 Cd 生物有效性降低的影响

土壤酸化加剧了 Al 和 Cd 的毒性, 对植物生长和产量产生不利影响^[11,14]。如土壤 pH 从 5.4 降低到 4.7 时, 花生和芝麻的产量可降低 15% 左右^[16]。本研究发现, 施用白云石、煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥均能显著提高土壤 pH, 降低土壤交换性 Al^{3+} , 缓解土壤铝毒性。其中, 煅烧牡蛎壳的效果最优, 这可能与煅烧牡蛎壳具有较高的质子消耗容量 (20.4 mol/kg) 和化学组成有关 ($CaO \geq 50\%$)。与对照相比, 3 种改良剂均能使土壤交换性 Al^{3+} 降低 82.1% 以上, 有效缓解铝毒性, 钙硅镁钾肥的改良效果最好。这些改良剂 (白云石、煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥) 均为碱性材料, 具有较高的 pH (10), 水解产生的 OH^- 、 HCO_3^- 能与 H^+ 、 Al^{3+} 快速发生反应, 进

而提高土壤 pH^[23,25-26]。同时,改良剂释放的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等能与土壤表面的交换性酸发生离子交换,增加土壤盐基饱和度,进而降低土壤酸度^[11,23,25]。煅烧牡蛎壳在增加 pH 方面比白云石和钙硅镁钾肥更有优势,因为它含有的 CaO 能快速水解释放大量的 OH^- ,中和 H^+ 并显著降低土壤酸度^[26]。此外,土壤 pH 的显著增加通过促进 Al^{3+} (如 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$) 的水解和有机结合 Al 的形成,从而导致可交换 Al^{3+} 的急剧下降^[11]。钙硅镁钾肥水解释放的 SiO_3^{2-} 能与 Al^{3+} 反应生成羟基铝硅酸盐沉淀,降低土壤交换性 Al^{3+} 含量^[24,27]。

白云石、煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥施用到酸性土壤中也降低土壤 Cd 的生物有效性。施用土壤改良剂能显著提高土壤 pH,降低土壤胶体表面的正电荷密度,增强土壤胶体对 Cd 的静电吸附^[11-12,20]。同时, Cd^{2+} 也能与土壤中的 OH^- 、 HCO_3^- 和 PO_4^{3-} 形成稳定沉淀物,降低土壤 Cd^{2+} 的含量,进而降低 Cd 的有效性^[11,21,24]。由于改良剂基本特性的差异,煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥在固定 Cd 方面的表现优于白云石。相比于白云石,牡蛎壳具有多孔结构,对 Cd^{2+} 有良好的吸附能力^[11,28]。Lian 等^[28] 研究发现,900 °C 煅烧的牡蛎壳对 Cd^{2+} 吸附量达到 153.8 mg/kg,显著高于天然牡蛎壳粉对 Cd 的吸附量(14.5 mg/kg)。钙硅镁钾肥含有的 SiO_3^{2-} 能与弱酸溶解态 Cd 结合形成难溶性物质硅酸镉和偏硅酸镉,增强土壤 Cd 的固定^[11,24,26]。武成辉等^[24] 发现施用 5 g/kg 硅酸盐钝化剂能使土壤弱酸提取态 Cd 含量降低 42.9%,可还原态 Cd 含量增加 42.8%,进而降低小白菜地上部 Cd 含量(59.2%)。其中,硅酸盐钝化剂释放的 SiO_3^{2-} 与弱酸溶解态 Cd 形成难溶性物质 Si-Cd 复合物是重要的原因。

3.2 土壤改良剂促进菠菜生长和抑制菠菜镉累积可能的机制

在 Cd 污染的强酸性土壤中,植物生长受到 Cd 和 Al 毒性的严重抑制^[3,29-30]。本研究发现,施用白云石、煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥均提高土壤 pH,缓解土壤毒性 Al 和 Cd 对菠菜生长的毒害作用,促进菠菜生长。Fan 等^[26] 研究发现施用钙基矿物改进剂可使土壤交换性 Al^{3+} 和 DTPA-Cd 分别降低 83.9%~100% 和 28.6%~42.1%,进而使植物鲜生物量和干生物量积累分别提高 5.4~8.7 倍和 5.80~6.11 倍。此外,白云石、煅烧牡蛎壳和钙硅

镁钾肥对 Ca、Mg 的吸收也分别提高 3.22~10.9 倍和 4.28~13.8 倍,且菠菜鲜重增加 4.02~20.0 倍。这可能是菠菜对 Ca 和 Mg 的吸收累积缓解了土壤毒性 Cd/Al 对菠菜生长的不利影响。如外源补充 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 能与 Al^{3+} 竞争根表面的交换位点,降低 Al^{3+} 对根表面细胞膜的毒性,进而减轻 Al^{3+} 对根伸长的抑制作用^[31-32]。张芬琴等^[33] 发现,外源添加 Ca^{2+} 可明显缓解 Al^{3+} 处理下对植株根系伸长和干物质累积的抑制作用,提高植株的生物量。除根系离子竞争外,植物增强对 Mg 的累积有助于缓解铝毒害;拟南芥和水稻细胞中镁转运蛋白(*AtMGT1* 和 *OsMGT1*)的过量表达,显著提高了植株对 Al 的抗性^[34-35]。此外,Ca 和 Mg 还能抑制植物 Cd/Al 毒性下的氧化损伤,增强抗氧化防御能力,从而促进植物生长^[36-37]。Kong 等^[36] 证明 Mg^{2+} 能增强玉米根系编码超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶的基因活性与表达,缓解 Al^{3+} 诱导的植物根系氧化应激反应,最终促进玉米根系生长。外源钙(40~100 mg/L)可降低 Cd 胁迫下茶树丙二醛的含量,并提高根系活力和叶绿素含量^[38]。

施用富钙镁型土壤改良剂能有效增加土壤交换性 Ca^{2+} 和交换性 Mg^{2+} 的含量,促进植株对 Ca 和 Mg 的吸收累积^[26,39]。研究也发现, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 能竞争根系对 Cd^{2+} 的吸收,进而抑制作物对 Cd 的累积^[20,39-40]。在本研究中,白云石、煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥能增加菠菜的 RAC_{Ca} 、 RAC_{Mg} 和植株 Ca/Mg 积累,降低菠菜的 BCF 和 RAC_{Cd} ,从而降低植株 Cd 浓度。植株 Cd 浓度与 RAC_{Ca} ($r^2 = -0.65$, $P < 0.05$)、 RAC_{Mg} ($r^2 = -0.81$, $P < 0.01$) 呈极显著相关,且 BCF、 RAC_{Cd} 与 RAC_{Ca} 、 RAC_{Mg} 呈负相关。这说明菠菜根系对钙镁的吸收能力的增强有助于降低植株 Cd 累积。陈星旺^[40] 研究发现,Ca 能有效抑制辣椒幼苗对 Cd 的累积,外源添加 20 mmol/L Ca 可使辣椒根和地上部 Cd 含量分别降低 37.3% 和 7.9%。李娜等^[41] 发现,施用 360.4 mg/kg 氯化钙可使三七不同部位中 Cd 含量降低 17.5%~22.8%。添加 Mg 能提高植株 Mg 含量,降低西洋参根系 Cd 的转运和各部位 Cd 浓度^[42]。此外,结构方程模型(SEM)结果还表明, RAC_{Ca} 和 RAC_{Mg} 的增加有效地抑制了植株 Cd 的摄取,这也解释了白云石处理在减少菠菜植株 Cd 摄取方面的效果优于煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥处理。

土壤Cd的生物有效性是影响作物根系吸收Cd的主要因素。施用3种矿物改良剂也会增加土壤pH和SOM,促进土壤可利用态Cd向难利用态或残渣态转化,使DTPA-Cd降低29.6~47.5%。本研究中,植株Cd浓度与DTPA-Cd呈极显著的正相关($P<0.01$),表明Cd生物有效性降低抑制了菠菜Cd吸收。He等^[39]发现添加2.25 t/hm²凹凸棒土和牡蛎壳粉能有效降低土壤CaCl₂-Cd含量(40%~44%),使水稻籽粒Cd浓度(0.14~0.19 mg/kg)低于国家食品安全标准(0.2 mg/kg)。此外,Cd从土壤向植物的转移也是植物Cd积累的一个重要因素,植物Cd浓度与BCF、RAC_{Cd}呈正相关($P<0.001$)。矿物改良剂处理的BCF和RAC_{Cd}显著低于对照处理,说明菠菜从土壤中累积Cd的过程受到限制。以上结果表明白云石、煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥也能通过降低土壤有效态Cd和菠菜富集能力进而抑制菠菜对Cd的累积。

在酸性Cd污染农田土壤中,白云石、煅烧牡蛎壳和钙硅镁钾肥均能高效缓解土壤铝毒性,降低土壤有效态Cd含量,并抑制菠菜对Cd的累积。随着土壤DTPA-Cd和交换性Al³⁺含量的降低,3种改良剂显著促进了菠菜的生长。其中,白云石处理在降低菠菜植株Cd含量、BCF和RAC_{Cd}方面效果最好;钙硅镁钾肥降酸促生效果最好。以上3种材料可为降酸阻Cd复合型酸性土壤改良剂的研发提供优良的原料。

参考文献 References

- [1] Che S H, Wang J N, Zhou Y Q, Yue C C, Zhou X Y, Xu Y F, Tian S Q, Cao Z N, Wei X S, Li S Y, Yang X, Wu Z H, Wu L, Yang M Y. The adsorption and fixation of Cd and Pb by the microbial consortium weakened the toxic effect of heavy metal-contaminated soil on rice[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154684
- [2] Tang J Y, Zhang J C, Ren L H, Zhou Y Y, Gao J, Luo L, Yang Y, Peng Q H, Huang H L, Chen A W. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 242: 121-130
- [3] Hussain M U, Hussain S, Hafeez M B, Ahmed S, Hassan M U, Jabeen S, Yan M K, Wang Q Z. Comparative role of calcium oxide nanoparticles and calcium bulk fertilizer to alleviate cadmium toxicity by modulating oxidative stress, photosynthetic performance and antioxidant-defense genes expression in alfalfa[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 215: 109002
- [4] Luo H L, Du P, Shi J, Yang B, Liang T, Wang P P, Chen J, Zhang Y H, He Y, Jia X W, Duan G L, Li F S. DGT methodology is more sensitive than conventional extraction strategies in assessing amendment-induced soil cadmium availability to rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 760: 143949
- [5] Awan S A, Khan I, Rizwan M, Irshad M A, Wang X S, Zhang X Q, Huang L K. Reduction in the cadmium (Cd) accumulation and toxicity in pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) by regulating physio-biochemical and antioxidant defense system via soil and foliar application of melatonin[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 328: 121658
- [6] Xu K, Zheng L F, Chu K F, Xing C H, Shu J J, Fang K M, Ma S T, Fang Y, Yan J F, Cai M Z, Wu X L. Soil application of graphitic carbon nitride nanosheets alleviate cadmium toxicity by altering subcellular distribution, chemical forms of cadmium and improving nitrogen availability in soybean (*Glycine max* L.)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 368: 122204
- [7] Islam F, Khan M S S, Ahmed S, Ikram A U, Hannan F, Jan M, Sajid M, Shoaib A A Z, Liu S, Chen J. Dynamic interplay of silica-coated iron oxide nanocomposite on soil-plant system to mitigate Cd toxicity in rice[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 471: 143267
- [8] Huang L K, Wang Q, Zhou Q Y, Ma L Y, Wu Y J, Liu Q Z, Wang S, Feng Y. Cadmium uptake from soil and transport by leafy vegetables: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 264: 114677
- [9] Tian K, Xing Z, Liu G M, Wang H F, Jia M M, Hu W Y, Huang B. Cadmium phytoavailability under greenhouse vegetable production system measured by diffusive gradients in thin films (DGT) and its implications for the soil threshold[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 412-421
- [10] Bashir S, Ali U, Shaaban M, Gulshan A B, Iqbal J, Khan S, Husain A, Ahmed N, Mehmood S, Kamran M, Hu H Q. Role of sepiolite for cadmium (Cd) polluted soil restoration and spinach growth in wastewater irrigated agricultural soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 258: 110020
- [11] Fan B B, Ding S, Peng Y T, Yin J H, Liu Y L, Cui S H, Zhou X, Mu K G, Ru S H, Chen Q. Supplying amendments alleviates aluminum toxicity and regulates cadmium accumulation by spinach in strongly acidic soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324: 116340
- [12] 曹巧莲, 江家泉, 王学江, 范佳妍, 詹曜玮, 张立丹, 李峰, 孙少龙, 仇荣亮, 樊小林. 新型碱性肥料治酸改土降镉的效果和机理[J]. *土壤学报*, 2023, 60(1): 175-188
- [13] Cao Q Y, Jiang J Q, Wang X J, Fan J Y, Zhan Y W, Zhang L D, Li F, Sun S L, Qiu R L, Fan X L. A novel alkaline fertilizer and its function as well as mechanism to remediation soil acid and Cd pollution[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(1): 175-188 (in Chinese)
- [14] Rao Z X, Huang D Y, Zhu Q H, Liu S L, Luo Z C, Cao X L, Ren X F, Wang J Y, Wang S. Effects of amendments on the availability of Cd in contaminated paddy soil: A three-year field experiment[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2013, 11: 2009-2014
- [15] Zhu H H, Chen C, Xu C, Zhu Q H, Huang D Y. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 99-106
- [16] Del Castilho P, Chardon W J. Uptake of soil cadmium by three field crops and its prediction by a pH-dependent Freundlich sorption model[J]. *Plant and Soil*, 1995, 171(2): 263-266
- [17] 徐仁扣, 李九玉, 周世伟, 徐明岗, 沈仁芳. 我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 160-167
- [18] Xu R K, Li J Y, Zhou S W, Xu M G, Shen R F. Scientific issues and

- controlling strategies of soil acidification of croplands in China[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 160-167 (in Chinese)
- [17] 赵学强, 潘贤章, 马海艺, 董晓英, 车景, 王超, 时玉, 柳开楼, 沈仁芳. 中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J]. *土壤学报*, 2023, 60(5): 1248-1263
Zhao X Q, Pan X Z, Ma H Y, Dong X Y, Che J, Wang C, Shi Y, Liu K L, Shen R F. Scientific issues and strategies of acid soil use in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5): 1248-1263 (in Chinese)
- [18] Li H, Wu Y, Li J W, Han T F, Liu K L, Huang S S. Long-term oyster shell powder applications increase crop yields and control soil acidity and cadmium in red soil drylands[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1506733
- [19] Zhu Q C, Liu X J, Hao T X, Zeng M F, Shen J B, Zhang F S, De Vries W. Modeling soil acidification in typical Chinese cropping systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613-614: 1339-1348
- [20] Wang Y F, Ying Y Q, Lu S G. Si-Ca-K-Mg amendment reduces the phytoavailability and transfer of Cd from acidic soil to rice grain [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(26): 33248-33258
- [21] 占静, 文阳平, 王莹, 朱宏艳, 李世豪, 陈玉婷, 陈绪龙, 王永明, 商庆银. 牡蛎壳粉对稻田土壤酸化与镉污染的协同调控效应[J]. *江西农业大学学报*, 2023, 45(4): 787-794
Zhan J, Wen Y P, Wang Y, Zhu H Y, Li S H, Chen Y T, Chen X L, Wang Y M, Shang Q Y. Synergistic regulatory effects of oyster shell powder on soil acidification and cadmium pollution in paddy fields[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(4): 787-794 (in Chinese)
- [22] 姜文鹏, 郭传顺, 曲志超, 孙亚超, 刘军. 矿物材料在重金属污染土壤修复中的应用[J]. *冶金与材料*, 2023, 43(10): 46-48
Jiang W P, Guo C S, Qu Z C, Sun Y C, Liu J. Application of mineral materials in remediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Metallurgy and Materials*, 2023, 43(10): 46-48 (in Chinese)
- [23] 范贝贝, 彭宇涛, 潘成杰, 张邦喜, 丁帅, 刘艳丽, 慕康国, 陈清. 矿物调理剂对酸性土壤酸度降低和菠菜镉累积的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(5): 96-105
Fan B B, Peng Y T, Pan C J, Zhang B X, Ding S, Liu Y L, Mu K G, Chen Q. Effects of mineral amendments on acidic soil acidity reduction and spinach cadmium accumulation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(5): 96-105 (in Chinese)
- [24] 武成辉, 李亮, 晏波, 雷畅, 陈涛, 肖贤明. 新型硅酸盐钝化剂对镉污染土壤的钝化修复效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(10): 2007-2013
Wu C H, Li L, Yan B, Lei C, Chen T, Xiao X M. Remediation effects of a new type of silicate passivator on cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2007-2013 (in Chinese)
- [25] 冀建华, 李絮花, 刘秀梅, 侯红乾, 刘益仁, 王子君, 吕真真, 蓝贤瑾, 陈剑秋, 黄祥光. 硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸度的改良作用[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 895-906
Ji J H, Li X H, Liu X M, Hou H Q, Liu Y R, Wang Z J, Lü Z Z, Lan X J, Chen J Q, Huang X G. Effect of Si-Ca-K-Mg fertilizer remedying acid paddy soil in South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 895-906 (in Chinese)
- [26] Fan B B, Li X, Fu T H, Ding S, Zhou X, Chen Q, Peng Y T. Simultaneous realization of cadmium bioavailability reduction and spinach growth promotion in acidic soils with calcined oyster shells and dolomite[J]. *Soil Use and Management*, 2024, 40(1): e12979
- [27] Castro G S A, Crusciol C A C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation [J]. *Geoderma*, 2013, 195/196: 234-242
- [28] Lian W L, Li H Y, Yang J H, Joseph S, Bian R J, Liu X Y, Zheng J F, Drosos M, Zhang X H, Li L Q, Shan S D, Pan G X. Influence of pyrolysis temperature on the cadmium and lead removal behavior of biochar derived from oyster shell waste [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2021, 15: 100709
- [29] 沈宏, 严小龙. 铝对植物的毒害和植物抗铝毒机理及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2001, 32(6): 281-285
Shen H, Yan X L. Types of aluminum toxicity and plants resistance to aluminum toxicity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(6): 281-285 (in Chinese)
- [30] Chauhan D K, Yadav V, Vaculik M, Gassmann W, Pike S, Arif N, Singh V P, Deshmukh R, Sahi S, Tripathi D K. Aluminum toxicity and aluminum stress-induced physiological tolerance responses in higher plants[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2021, 41(5): 715-730
- [31] 来宏伟, 倪妮, 时仁勇, 董颖, 闫静, Nkoh Jackson Nkoh, 李九玉, 崔秀敏, 徐仁扣. 生物质炭和Ca(OH)₂缓解土壤酸化过程中植物铝毒性的模拟对比研究[J]. *土壤学报*, 2023, 60(4): 1017-1025
Lai H W, Ni N, Shi R Y, Dong Y, Yan J, Nkoh J N, Li J Y, Cui X M, Xu R K. Contrasting effects of biochar and Ca(OH)₂ on alleviating plant aluminum toxicity during soil acidification: A simulation study[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(4): 1017-1025 (in Chinese)
- [32] Watanabe T, Okada K. Interactive effects of Al, Ca and other cations on root elongation of rice cultivars under low pH[J]. *Annals of Botany*, 2005, 95(2): 379-385
- [33] 张芬琴, 沈振国. Al³⁺对小麦幼苗根系生长和膜保护酶活性的影响及Ca²⁺的缓解效应[J]. *西南农业学报*, 2000, 13(3): 22-27
Zhang F Q, Shen Z G. The effect of Al³⁺ on the growth and membrane protective enzymes activity of wheat seedling roots and the mitigative effect of Ca²⁺[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2000, 13(3): 22-27 (in Chinese)
- [34] 刘欢, 马明珠, 黄蕊, Shaikh Amjadsalam, 白蕊, 杨云洪, 刘轶飞, 韩晓日. 镁营养缓解植物铝毒机制的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(4): 810-818
Liu H, Ma M Z, Huang H, Amjadsalam S, Bai R, Yang Y H, Liu Y F, Han X R. Research progress on the mechanism of magnesium nutrition alleviating aluminum toxicity in plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(4): 810-818 (in Chinese)
- [35] Polak T B, Milačič R, Pihlar B, Mitrović B. The uptake and speciation of various Al species in the *Brassica Rapa pekinensis* [J]. *Phytochemistry*, 2001, 57(2): 189-198
- [36] Kong X Y, Peng Z P, Li D X, Ma W N, An R D, Khan D, Wang X X, Liu Y, Yang E, He Y Z, Wu L, Zhang B G, Rengel Z, Wang J M, Chen Q. Magnesium decreases aluminum accumulation and plays a role in protecting maize from aluminum-induced oxidative stress[J]. *Plant and Soil*, 2020, 457(1): 71-81
- [37] Pandey P, Srivastava R K, Dubey R S. Salicylic acid alleviates aluminum toxicity in rice seedlings better than magnesium and calcium by reducing aluminum uptake, suppressing oxidative damage and increasing antioxidative defense[J]. *Ecotoxicology*, 2013, 22(4): 656-670
- [38] 杨训. 钙对茶树吸收Cd的阻控及其机理[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018
Yang X. Control of calcium on Cd absorption and its mechanism in tea plants [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018 (in Chinese)

- [39] He L Z, Meng J, Wang Y, Tang X J, Liu X M, Tang C X, Ma L Q, Xu J M. Attapulgite and processed oyster shell powder effectively reduce cadmium accumulation in grains of rice growing in a contaminated acidic paddy field[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 209: 111840
- [40] 陈星旺. 钙、硒相互作用对辣椒蓄积镉的影响研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2024
- Chen X W. Effect of interaction between calcium and selenium on cadmium accumulation in pepper[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2024 (in Chinese)
- [41] 李娜, 李涛, 梅馨月, 阮明菊, 吴艳琼, 祖艳群. 2种外源钙对镉胁迫三七生理生化特性及其镉累积的影响[J]. *贵州农业科学*, 2019, 47(7): 131-137
- Li N, Li T, Mei X Y, Ruan M J, Wu Y Q, Zu Y Q. Effects of two exogenous calcium on physiological and biochemical characteristics and cadmium accumulation of panax notoginseng of cadmium stress [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2019, 47(7): 131-137 (in Chinese)
- [42] 钱佳奇, 吴晨, 阮音音, 吴虎平, 孙海, 邵财, 张亚玉. 提高供镁水平对西洋参幼苗镉胁迫缓解作用研究[J]. *特产研究*, 2021, 43(2): 39-45
- Qian J Q, Wu C, Ruan Y Y, Wu H P, Sun H, Shao C, Zhang Y Y. Study on cadmium stress of *Panax quinquefolium* seedling under increased magnesium level mitigation[J]. *Special Wild Economic Animal and Plant Research*, 2021, 43(2): 39-45 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 范贝贝, 硕士, 中国科学院南京土壤研究所助理工程师, 江西科技特派团余江粮油产业团成员, 主要从事土壤酸化改良、重金属污染控制和废弃物肥料资源化利用等。先后主持或参与中国农业大学研究生创新项目、国家大宗蔬菜产业技术体系岗位专家项目“设施土壤重金属污染控制”、内蒙古设施蔬菜生产关键技术研究与集成示范“设施蔬菜土壤保育技术研究集成示范”等科研项目5项。在 *Journal of Environmental Management*、*Soil Use and Management*、《中国农业大学学报》、《农业环境科学学报》等期刊发表文章20余篇, 以第一作者或通讯作者发表论文10篇, 授权专利4项, 参与《设施土壤改良与污染控制》专著编写。



通讯作者简介: 黄尚书, 博士, 江西省红壤及种质资源研究所副研究员, 江西省科技特派团庐山茶叶产业团长。长期从事耕地红壤结构改良、土壤污染防治和有机废弃物综合利用等方面技术与示范推广工作。主持国家重点研发计划子课题1项、井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目子课题1项、江西省重点研发计划项目2项, 参与国家自然科学基金等国家级项目4项; 以通讯和第一作者身份在 *European Journal of Soil Science*、*Agronomy* 等国内外主流期刊发表20多篇, 副主编专著1部, 授权专利6项, 获得软件著作权7项; 制定江西省地方标准3项, 登记江西省科学技术成果2项, 入选农业农村部主推技术1项、江西省农业主推技术4项; 获得省部级科技奖励3项、市厅级科技奖励3项。