

石灰和牡蛎粉对酸性镉污染农田粉葛增产降镉效应

林小兵, 张秋梅, 吴多基, 周利军, 武琳, 何绍浪, 黄欠如, 吴建富

引用本文:

林小兵, 张秋梅, 吴多基, 周利军, 武琳, 何绍浪, 黄欠如, 吴建富. 石灰和牡蛎粉对酸性镉污染农田粉葛增产降镉效应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1505–1513.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1243>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

木炭施用对镉污染土壤小白菜生长及镉吸收的影响

罗洋, 高晋, 罗绪强, 李仪

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1676–1682 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0042>

秸秆还田配施石灰对水稻镉吸收累积的影响

杨定清, 李霞, 周娅, 罗丽卉, 谢永红, 王棚, 李旭毅

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1150–1158 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1137>

褐煤基材料对石灰性土壤铅镉生物有效性的影响

丁满, 杨秋云, 化党领, 宋晓燕, 暴秀丽, 王代长, 刘世亮

农业环境科学学报. 2017, 36(4): 678–685 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1319>

外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响

王波, 张然然, 杨如意, 石晓菁, 苏楠楠, 朱濛, 咎树婷

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2710–2718 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0437>

不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响

彭华, 田发祥, 魏维, 周宇健, 官迪, 柳赛花, 纪雄辉

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1027–1033 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0288>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

林小兵, 张秋梅, 吴多基, 等. 石灰和牡蛎粉对酸性镉污染农田粉葛增产降镉效应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1505–1513.

LIN X B, ZHANG Q M, WU D J, et al. Effects of lime and oyster powder on increasing the yield of and reducing cadmium content in *Pueraria thomsonii* in acid cadmium-contaminated farmlands[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(7): 1505–1513.

石灰和牡蛎粉对酸性镉污染农田粉葛增产降镉效应

林小兵^{1,2}, 张秋梅³, 吴多基¹, 周利军², 武琳², 何绍浪², 黄欠如², 吴建富^{1*}

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2. 江西省红壤及种质资源研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西进贤 331717; 3. 江西省新余市农业科学研究中心, 江西 新余 338000)

摘要:为探究含钙物质对酸性镉污染农田粉葛生长及镉富集特征,以江西省新余市酸性镉污染土壤为研究对象,研究了施用石灰和牡蛎粉2种钙素材料对土壤化学性质、粉葛各部位镉含量及生物量的影响。结果表明,与对照相比,施钙(石灰、牡蛎粉)处理显著提高了土壤pH(0.85~0.87个单位),显著降低了土壤有效态镉含量(53.85%),施钙处理还降低了镉在粉葛体内富集。与对照相比,石灰处理粉葛总生物量、产量和收益分别增加了34.26%、38.20%和107.15%,块根和葛粉中镉含量分别降低了34.09%和15.38%。与对照相比,牡蛎粉处理粉葛总生物量、产量和收益分别增加了42.46%、38.07%和173.08%,块根和葛粉中镉含量分别降低了63.64%和69.23%,其中以牡蛎粉处理的增产降镉效果最佳。相关分析表明,粉葛生物量及产量与土壤pH呈显著正相关($P<0.05$),与土壤镉含量呈显著负相关($P<0.05$);粉葛各部位镉含量与土壤pH呈显著负相关($P<0.05$),与土壤中镉含量呈显著正相关($P<0.05$)。综上,在镉污染耕地上施用牡蛎粉($2\ 250\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)更有利于促进粉葛的生长,提高粉葛产量、品质及收益,同时还能有效降低镉在粉葛体内的富集,实现粉葛安全生产。

关键词: 镉污染土壤; 石灰; 牡蛎粉; 粉葛; 生物量; 食品安全

中图分类号: X53; R282.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)07-1505-09 doi:10.11654/jaes.2022-1243

Effects of lime and oyster powder on increasing the yield of and reducing cadmium content in *Pueraria thomsonii* in acid cadmium-contaminated farmlands

LIN Xiaobing^{1,2}, ZHANG Qiumei³, WU Duoqi¹, ZHOU Lijun², WU Lin², HE Shaolang², HUANG Qianru², WU Jianfu^{1*}

(1. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources, Jinxian 331717, China; 3. Agricultural Science Research Center of Xinyu City, Jiangxi Province, Xinyu 338000, China)

Abstract: This study aimed to determine the effects of calcium-containing substances on the growth and cadmium enrichment characteristics of *Pueraria thomsonii* in acid cadmium-contaminated farmlands. The acid cadmium-contaminated soil in Xinyu, Jiangxi Province, was utilized for field experiments. The effects of lime and oyster powder on soil physicochemical properties and *P. thomsonii* cadmium content and biomass were studied. The results showed that, compared with the control, calcium application significantly increased soil pH(0.85–0.87 units) and reduced the available cadmium content(53.85%). Treatment with calcium also effectively reduced cadmium

收稿日期: 2022-12-03 录用日期: 2023-04-10

作者简介: 林小兵(1992—),男,博士生,助理研究员,从事植物营养、土壤资源与环境生态研究。E-mail: linxiaobing14@mails.ucas.ac.cn

*通信作者: 吴建富 E-mail: wj16711@126.com

基金项目: 江西省自然科学基金项目(20212BAB215028); 江西省重大科技研发专项项目(20194ABC28010); 江西省现代农业产业技术体系建设专项(JXARS-16)

Project supported: The Jiangxi Provincial Natural Science Foundation(20212BAB215028); The Major Research and Development Program of Jiangxi, China(20194ABC28010); The Earmarked Fund for Jiangxi Agriculture Research System(JXARS-16)

accumulation in *P. thomsonii*. Compared with the control, lime treatment increased the biomass and yield of and income from *P. thomsonii* by 34.26%, 38.20%, and 107.15%, respectively; however, it decreased the cadmium content in tubers and arrowroot by 34.09% and 15.38%, respectively. Compared with the control, oyster powder treatment could increase the biomass and yield of and income from *P. thomsonii* by 42.46%, 38.07%, and 173.08%, respectively; the cadmium content in tubers and arrowroot decreased by 63.64% and 69.23%, respectively. Oyster powder treatment exerted the best effect on increasing the yield of and reducing cadmium content in *P. thomsonii*. The correlation showed that the biomass and yield of *P. thomsonii* were positively correlated with soil pH ($P < 0.05$) but negatively correlated with soil cadmium content ($P < 0.05$). The cadmium content in *P. thomsonii* tissues was significantly negatively correlated with soil pH ($P < 0.05$) but positively correlated with soil cadmium content ($P < 0.05$). Under cadmium pollution, the application of oyster powder ($2\ 250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) to *P. thomsonii* was beneficial in promoting its growth, improving its yield and quality, and generating considerable revenue. Additionally, oyster powder application successfully reduced cadmium enrichment and accomplished the safe planting of *P. thomsonii*.

Keywords: cadmium polluted soil; lime; oyster powder; *Pueraria thomsonii*; biomass; food safety

粉葛(*Pueraria thomsonii* Benth.)为豆科葛属多年生藤本植物^[1],是一种特色经济作物,素有“南葛北参”的美誉,且已被列入国家“药食两品”名录。粉葛作为一种重要的药食同源植物,富含葛根素、大豆苷、大豆苷元、染料木素等异黄酮类化合物^[2],具有防癌、抗癌、防治心血管病、解热、抗炎、美容等营养和药用价值^[3]。江西是粉葛种植主产区之一,种葛历史悠久,种植、加工技术成熟,2019年江西省粉葛人工种植面积已达超过 $2\ 000\ \text{hm}^2$ ^[4],适合粉葛种植的荒山荒地面积超 $6\ 000\ \text{hm}^2$ 。

由于工业生产、大气沉降、污水灌溉、农药及化肥不合理施用等导致土壤重金属污染日益严重^[5],全国土壤污染状况调查公报显示我国耕地重金属以镉超标最为突出。土壤镉不仅会对农作物的生长和品质产生影响,还能通过食物链在人体富集引起各种疾病^[6-7]。目前,镉超标现象已引发了如川芎、川党参等中药的安全性和出口问题^[8-9]。研究表明粉葛是典型的镉富集植物^[10],陆金等^[11]调查发现粉葛块根对土壤重金属镉的富集系数为4.37,转运系数为11.33,说明粉葛对土壤重金属镉具有较强富集性。针对江西省粉葛种植区中镉调查发现,粉葛块根中镉含量为 $0.002\sim 0.28\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,存在一定程度的镉超标现象^[12]。因此,如何有效、低成本地降低粉葛中的镉含量已经成为一个亟需解决的问题。

在镉污染土壤修复治理技术中,通过向土壤添加石灰类、矿物类、生物炭等钝化材料,从而提高土壤pH并钝化镉的活性是修复酸性镉污染土壤的有效措施^[13-14]。研究表明,向镉污染土壤添加外源钙如石灰、牡蛎粉等可以提高土壤pH和改善土壤理化性质,有效降低土壤镉的生物有效性和减少植物对镉的吸收,并增加农作物生物量和产量等^[15-17]。但是已有研

究主要是针对酸性镉污染水稻田修复,关于粉葛种植区的镉污染修复鲜有报道。南方镉污染水稻地区常用的土壤调理剂中,以石灰为原料的占33.33%,以牡蛎粉为原料的占23.33%,牡蛎粉和石灰已成为南方稻田调酸降镉的主要原料^[18]。因此,本研究基于酸性镉污染土壤的粉葛大田试验,研究了添加石灰和牡蛎粉对粉葛土壤中镉有效性、粉葛各部位镉含量及生物量的影响,并探讨影响粉葛富集镉的机理,以期对镉污染土壤修复、粉葛药用安全性和粉葛科学种植提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于江西省新余市渝水区珠珊镇埠下村附近($27^{\circ}46'36''\ \text{N}$, $114^{\circ}58'25''\ \text{E}$),属亚热带季风性湿润气候,雨热同期。供试土壤(0~20 cm)基本化学性质:土壤pH值4.93,有机质 $25.97\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量 $6.01\ \text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $220.56\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $13.43\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $108.26\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤总镉含量 $0.59\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效态镉含量 $0.38\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验设置3个处理:空白对照、石灰、牡蛎粉,每个处理重复3次,各处理采用随机区组设计,其中石灰施用量为 $1\ 500\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (依据石灰CaO含量,钙施用量约为 $860\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),牡蛎粉施用量为 $2\ 250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (依据牡蛎粉 CaCO_3 含量,钙施用量约为 $860\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。供试粉葛品种为“赣葛1号”,由江西省红壤研究所苗圃基地培育;石灰(生石灰)为矿物源钙素,由新余市田安农业公司提供,CaO含量为80%,pH为11.80;牡蛎粉为生物源钙素,由福建玛塔生态科技有限公司提供,原料为牡蛎壳, CaCO_3 含量为95%,pH为

9.58。粉葛种植采用传统的起垄种植方式,人工起垄,垄宽90 cm,垄高40 cm,沟宽60 cm,株距40 cm,试验小区面积约为1 333.34 m²,种植密度约为18 000株·hm⁻²。于2020年4月2日移栽,基肥施45%硫酸钾复合肥2 400 kg·hm⁻²,其他措施按粉葛高产栽培方法进行。

1.3 样品采集与分析

粉葛植株样品分别于2020年5月初(苗期)、7月初(膨大初期)、8月底(膨大期)和12月底(成熟期)这4个时期进行采集。采取“S”型布点采样,每个试验点采集长势相对一致的5株粉葛混合一个样,分别采集粉葛根部、茎秆和叶片。成熟期将粉葛根部细分为:块根和葛头(粉葛栽培后形成的结构),粉葛茎秆,细分为:主藤(种茎上直接着生的藤蔓)和侧枝(主藤上生长的藤蔓)和叶片等5个部位^[11],成熟期采集植株样品同时相应采取0~20 cm土壤样品。成熟期将取回来的粉葛块根一部分处理为葛粉和葛渣(将粉葛块根切碎、打浆、水洗沉淀后,经晒干或烘干所得的淀粉为葛粉,而生产葛粉过程中产生的副产物为葛渣),另一部分块根同其余粉葛植株部位进行烘干和称量,并用HNO₃-H₂O₂消解-电感耦合等离子体光谱仪测定粉葛各部位镉含量。土壤总镉含量采用HF-HNO₃-HClO₄法消解,土壤有效态镉含量用0.1 mol·L⁻¹-DTPA溶液浸提,均采用电感耦合等离子体光谱仪测定。土壤常规化学性质参照鲁如坤^[19]的方法测定,土壤pH测定采用电位法;有机质测定采用重铬酸钾容量法;阳离子交换量测定采用1 mol·L⁻¹乙酸铵交换法。

1.4 数据处理

通过R语言(R 4.2.2)统计软件对试验数据进行方差分析和相关性分析,采用R语言软件程序包ggplot2进行制图。镉的生物富集按下列公式计算^[20]:生物富集系数(BCF)=粉葛各部位镉含量(mg·kg⁻¹)/土壤总镉含量(mg·kg⁻¹)。镉积累量(移除量)=粉葛各部位镉含量×粉葛各部位生物量;粉葛种植成本约为2.25万元·hm⁻²,其中石灰成本约为3 750元·hm⁻²,牡蛎粉成本约为6 750元·hm⁻²;粉葛出粉率约为15%,本实验中各处理葛粉价格依据目前葛粉市场价和葛粉品质。

2 结果与分析

2.1 施钙对粉葛生物量和镉含量的影响

施钙对不同生育期粉葛生物量和镉含量的影响见表1,可以看出,施钙可以促进粉葛生长,与对照比,施用石灰粉葛苗期、膨大初期和膨大期粉葛根部分别增加了19.29%、16.47%和39.18%,茎秆分别增加了7.17%、34.86%和26.34%,叶片分别增加了13.69%、8.22%和40.31%;施用牡蛎粉粉葛苗期、膨大初期和膨大期粉葛根部分别增加了16.88%、17.34%和81.79%(*P*<0.05),茎秆分别增加了13.99%、59.84%和12.59%,叶片分别增加了9.20%、35.84%和25.20%。与对照比,施用石灰降低了粉葛根部(膨大期)、茎秆(膨大初期和膨大期)和叶片(膨大初期和膨大期)中镉含量(*P*<0.05);施用牡蛎粉降低了粉葛根部(膨大初期和膨大期)、茎秆(膨大初期和膨大期)和叶片(膨大初期和膨大期)中镉含量(*P*<0.05),其中牡

表1 施钙对不同生育期粉葛生物量和镉含量的影响

Table 1 Effects of calcium on the biomass and cadmium content of *P. thomsonii* under different growth periods

生育期 Growth period	处理 Treatment	生物量(干质量)Biomass/(g·株 ⁻¹)			镉含量Cadmium content/(mg·kg ⁻¹)		
		根部	茎秆	叶片	根部	茎秆	叶片
苗期	对照	6.22±0.93a	8.79±1.34a	9.57±1.35a	1.10±0.34a	0.99±0.41a	0.95±0.45a
	石灰	7.42±1.18a	9.42±1.94a	10.88±1.55a	0.93±0.23a	0.71±0.22a	0.81±0.33a
	牡蛎粉	7.27±0.77a	10.02±0.30a	10.45±0.95a	0.70±0.07a	0.55±0.13a	0.80±0.07a
膨大初期	对照	41.41±5.78a	78.94±15.59a	70.96±12.39a	2.66±0.95a	2.54±1.20a	1.38±0.73a
	石灰	48.23±9.32a	106.46±12.38a	76.79±14.48a	1.10±0.41ab	1.00±0.30b	0.44±0.11b
	牡蛎粉	48.59±8.70a	126.18±43.18a	96.39±20.91a	0.84±0.16b	0.68±0.09b	0.40±0.08b
膨大期	对照	112.03±15.62b	70.92±12.66a	22.70±8.40a	1.77±0.49a	1.79±0.12a	0.97±0.13a
	石灰	155.92±61.57ab	89.60±38.72a	31.85±24.46a	0.47±0.14b	0.79±0.35b	0.56±0.18b
	牡蛎粉	203.67±38.65a	79.85±6.22a	28.42±10.51a	0.33±0.12b	0.47±0.10b	0.49±0.11b

注:不同小写字母表示同一时期同一部位处理间差异显著(*P*<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences (*P*<0.05) between treatments in the same part of the same period. The same below.

蛭蚬粉处理对粉葛的降镉效果要优于石灰处理。

由表2可以看出,与对照比,成熟期石灰和蛭蚬粉处理的粉葛块根干质量分别增加了37.92%和37.79%,葛头干质量分别增加了36.21%和62.07%,主藤干质量分别增加了8.69%和0.28%,侧枝干质量分别增加了40.80%和102.34%,叶片干质量分别增加了17.07%和34.15%,粉葛植株总生物量分别增加了34.26%和42.46%。其中,蛭蚬粉处理的葛头干质量显著高于对照($P<0.05$),蛭蚬粉处理的粉葛植株总生物量也显著高于对照($P<0.05$),而石灰和蛭蚬粉处理间差异不显著($P>0.05$)。

从图1可知,施用石灰处理的葛渣、叶片中镉含量均显著低于对照,施用蛭蚬粉处理的葛渣、叶片、主藤、侧枝、葛头中镉含量均显著低于对照($P<0.05$),而石灰和蛭蚬粉处理间差异不显著($P>0.05$)。粉葛块根中镉含量大小表现为对照($0.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>石灰($0.29\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>蛭蚬粉($0.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。与对照比,石灰和蛭蚬粉处理的块根中镉含量分别降低了34.09%和63.64%,葛粉中镉含量分别降低了15.38%和69.23%,葛渣中镉含量分别降低了63.63%和67.05%,葛头中镉含量分别降低了33.33%和40.00%,主藤中镉含量分别降低了32.62%和

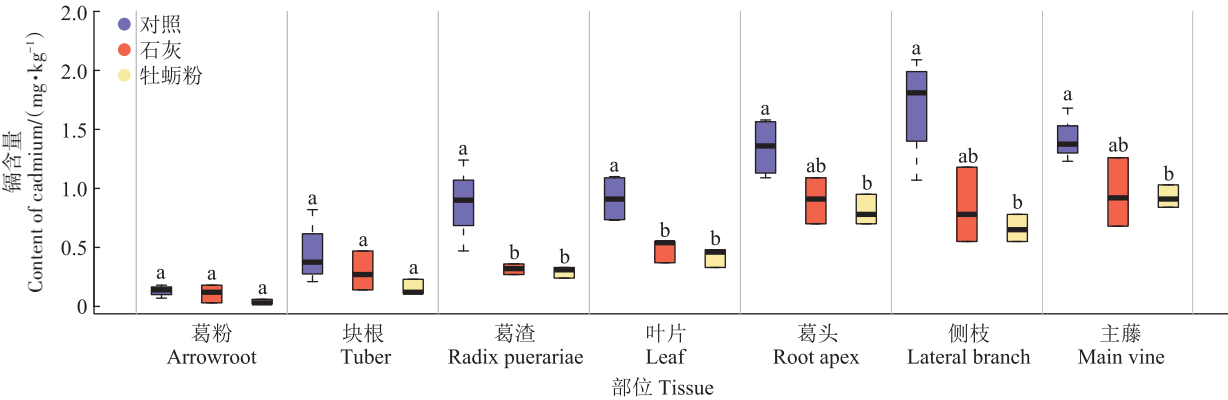
34.04%,侧枝中镉含量分别降低了50.59%和61.18%,叶片中镉含量分别降低了46.15%和53.85%。试验区粉葛块根中镉含量为 $0.11\sim 0.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过《食品安全国家标准:食物中污染物限量》GB 2762—2022中蔬菜及其制品中块根和块茎蔬菜标准限值($\leq 0.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但葛粉中镉含量为 $0.02\sim 0.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均未超过《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准》WM/T 2—2004中的标准限值($\leq 0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

由图2可以看出,各处理粉葛各部位生物量占比由大到小为:块根(66.97%~71.12%)>侧枝(11.49%~16.36%)>主藤(7.22%~10.32%)>葛头(5.22%~5.96%)>叶片(3.23%~3.71%)。各处理粉葛各部位镉含量的分布规律为:主藤(24.26%~31.21%)>侧枝(22.15%~29.26%)>葛头(23.26%~27.18%)>叶片(14.09%~15.65%)>块根(5.37%~8.36%)。粉葛各部位对镉的积累量由大到小为:块根(29.69%~44.99%)>侧枝(22.93%~31.26%)>主藤(16.42%~20.38%)>葛头(9.99%~14.41%)>叶片(4.16%~4.91%)。总体上,与对照相比,石灰处理增加了块根、葛头中镉积累量的比例,减少了主藤和侧枝中镉积累量的比例;蛭蚬粉处理则增加了葛头、主藤和侧枝中镉积累量的比例,

表2 施钙对成熟期粉葛各部位生物量(干质量)的影响($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 2 Effects of calcium on biomass of *P. thomsonii* tissues under mature stage($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理 Treatment	块根 Tuber	葛头 Root apex	主藤 Main vine	侧枝 Lateral branch	叶片 Leaf	总生物量 Total biomass
对照	$7.70\pm 0.85\text{a}$	$0.58\pm 0.04\text{b}$	$1.15\pm 0.14\text{a}$	$1.28\pm 0.10\text{a}$	$0.41\pm 0.09\text{a}$	$11.12\pm 0.95\text{b}$
石灰	$10.62\pm 0.23\text{a}$	$0.79\pm 0.08\text{ab}$	$1.25\pm 1.09\text{a}$	$1.79\pm 0.07\text{a}$	$0.48\pm 0.13\text{a}$	$14.93\pm 1.31\text{ab}$
蛭蚬粉	$10.61\pm 1.22\text{a}$	$0.94\pm 0.16\text{a}$	$1.15\pm 0.10\text{a}$	$2.59\pm 1.16\text{a}$	$0.55\pm 0.24\text{a}$	$15.84\pm 0.37\text{a}$



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$)

图1 施钙对成熟期粉葛各部位镉含量的影响

Figure 1 Effects of calcium on cadmium content in *P. thomsonii* tissues under mature stage

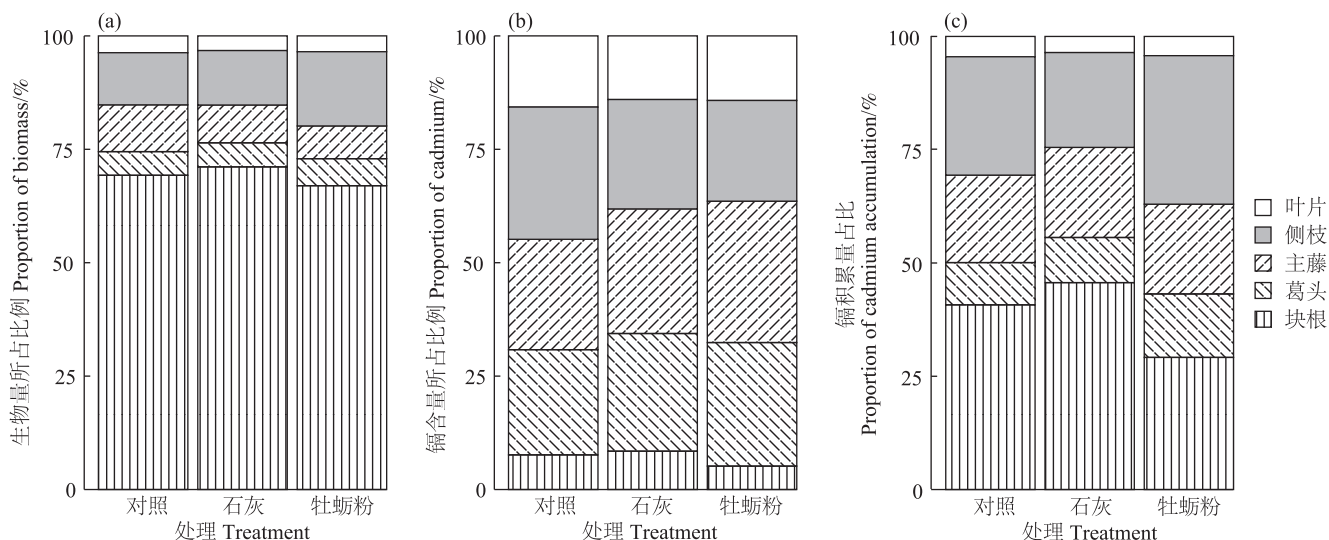


图2 成熟期粉葛各部位生物量、镉含量和镉积累量分配比例

Figure 2 Proportion of biomass, cadmium content and cadmium accumulation of *P. thomsonii* tissues under mature stage

降低了块根中镉积累量的比例。

2.2 施钙对粉葛镉生物富集系数的影响

由表3可以看出,添加石灰和牡蛎粉的处理粉葛各部位对土壤镉生物富集系数均低于对照,富集系数呈现出对照>石灰>牡蛎粉的趋势。粉葛各部位的富集系数大小为:侧枝>主藤>葛头>叶片>块根。除牡蛎粉处理的 $BCF_{\text{葛根/土壤}}$ 外,其他部位富集系数均大于1(1.02~3.56),说明粉葛对土壤重金属镉的吸收富集能力较强。

2.3 施钙对粉葛土壤pH和有效态镉的影响

表4所示,与对照比,施用石灰和牡蛎粉显著提高了土壤pH($P=0.01$),其中石灰处理的土壤pH上升

了0.87个单位(增幅为17.73%),牡蛎粉处理的土壤pH上升了0.85个单位(增幅为17.42%);与对照比,施用石灰和牡蛎粉显著降低了土壤有效态镉含量($P=0.002$),较对照比均下降了53.84%。

2.4 土壤环境因子与粉葛生物量及镉含量相关性分析

将土壤pH、有效态镉、总镉及粉葛各部位生物量等9个指标进行相关性分析,结果表明(表5),土壤pH与块根、葛头生物量及总生物量呈显著正相关($P<0.05$);土壤总镉与葛头质量及总生物量呈显著负相关($P<0.05$);土壤有效态镉与块根、葛头质量及总生物量呈显著负相关($P<0.05$)。对土壤pH、有效态镉、总镉及粉葛各部位中镉含量等10个指标进行相关性分析(表5),结果表明,土壤pH与葛渣、侧枝、叶片、葛头、主藤中镉含量呈显著负相关($P<0.05$);土壤总镉、有效态镉与块根、葛渣、侧枝、叶片、葛头、主藤中镉含量呈显著正相关($P<0.05$)。

2.5 粉葛对土壤重金属镉的移除量 and 经济效益

本试验结果表明(表6),石灰处理的粉葛对镉的年移除量为 $7.07 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,葛粉产量为 $2\,655.36 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,收益为 $15.93 \text{ 万元} \cdot \text{hm}^{-2}$,较对照相比,年移除量

表4 施钙对成熟期粉葛土壤pH和有效态镉的影响

Table 4 Effects of calcium on soil pH and available cadmium of *P. thomsonii* under mature stage

处理 Treatment	pH	土壤有效态镉 Soil available cadmium/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
对照	4.88±0.29b	0.26±0.04a
石灰	5.75±0.39a	0.12±0.04b
牡蛎粉	5.72±0.25a	0.12±0.03b

表3 施钙对成熟期粉葛各部位镉生物富集系数的影响

Table 3 Effects of calcium on cadmium bioconcentration factor of *P. thomsonii* tissues under mature stage

处理 Treatment	BCF _{块根/土壤}	BCF _{葛头/土壤}	BCF _{主藤/土壤}	BCF _{侧枝/土壤}	BCF _{叶片/土壤}
对照	1.06±0.39a	3.42±0.73a	3.56±0.33a	4.29±1.25a	2.32±0.57a
石灰	1.02±0.53a	3.32±0.99a	3.50±1.22a	3.07±1.22a	1.82±0.64a
牡蛎粉	0.57±0.11a	3.10±0.22a	3.52±0.83a	2.52±0.22a	1.63±0.29a

表 5 土壤环境因子与成熟期粉葛镉含量及生物量相关性分析

Table 5 Correlation analysis of soil environmental factors and cadmium content, biomass of *P. thomsonii* under mature stage

指标 Index	环境因子 Environmental factor	块根 Tuber	葛粉 Arrowroot	葛渣 Radix puerariae	葛头 Root apex	主藤 Main vine	侧枝 Lateral branch	叶片 Leaf	总生物量 Total biomass
生物量	pH	0.61*	—	—	0.60*	0.12	0.58	0.25	0.75*
	总镉	-0.56	—	—	-0.60*	-0.13	-0.13	-0.35	-0.68*
	有效态镉	-0.62*	—	—	-0.67*	-0.21	-0.54	-0.31	-0.77*
镉含量	pH	-0.50	-0.39	-0.68*	-0.75*	-0.65*	-0.68*	-0.74*	—
	总镉	0.88**	0.10	0.66*	0.76*	0.75*	0.74*	0.75*	—
	有效态镉	0.67*	0.19	0.82**	0.74*	0.70*	0.81**	0.80**	—

注:表中统计为双尾检验,其中—表示未比较,*表示两者间相关性显著($P<0.05$),**表示两者间相关性极显著($P<0.01$)。

Note: The statistics in the table are two-tailed tests. Among them, — means no comparison, * means significant correlation ($P<0.05$), ** means extremely significant correlation ($P<0.01$).

表 6 粉葛对土壤镉的移除量和经济效益

Table 6 Removal of soil cadmium and economic benefits of

P. thomsonii

处理 Treatment	单株年移除量 Annual removal of per plant/mg	年移除量 Annual removal/ ($\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$)	产量(鲜质量) Yield/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	收益 Income/ (万元 $\cdot\text{hm}^{-2}$)
对照	0.46	8.28	1 921.32	7.69
石灰	0.39	7.07	2 655.36	15.93
牡蛎粉	0.30	5.39	2 652.84	21.00

降低了 14.61%,但粉葛产量增加了 38.20%,收益增加了 107.15%。牡蛎粉处理的粉葛对镉的年移除量为 $5.39\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,葛粉产量为 $2\,652.84\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,收益为 $21.00\text{ 万元}\cdot\text{hm}^{-2}$,与对照相比,年移除量降低了 34.90%,但粉葛产量增加了 38.07%,收益增加了 173.08%。说明施用牡蛎粉比施用石灰更有利于提高粉葛生产的经济效益。

3 讨论

3.1 施钙对粉葛镉含量的影响

本试验中施石灰和牡蛎粉后粉葛各部位中镉含量降低了 15.38%~67.05%,并显著降低了粉葛地上部镉含量($P<0.05$),对镉生物富集系数呈现出对照>石灰>牡蛎粉的趋势。张德林等^[21]试验表明施用生石灰后,川芎药材中镉含量降低了 1.26%~39.05%,赵家印等^[22]研究发现碳酸钙、生石灰降低了芥蓝中镉含量 5.85%~28.70%,肖艳辉等^[23]试验发现添加 1% 石灰可使籽粒苋镉含量下降 90% 以上,以上都说明施钙材料可以有效降低植物对重金属镉的吸收和富集,与本研究结果类似。石灰和牡蛎粉主要成分为钙,不仅可以调节土壤酸碱度,改善微生物环境和理化性质,也为粉葛生长提供了丰富的钙元素。石灰和牡蛎粉中

的钙离子能够与镉离子竞争植物根系上的吸收位点^[24],从而降低粉葛对土壤镉的吸收;钙还可以通过改善光合作用,减轻植物氧化损伤,从而保护植物免受重金属镉胁迫^[25]。牡蛎粉还含有丰富的镁、钠、钡、锌、铁等中微量元素^[16-17],这些元素可以提高土壤保肥性能;其次牡蛎粉的多聚孔结构,会吸附土壤中游离的各种重金属元素,并降低土壤镉的生物有效性^[17],以上都是牡蛎粉对粉葛降镉提质效果优于石灰的重要原因。

本试验还发现,施用石灰和牡蛎粉后可以有效提高土壤 pH 和钝化土壤镉活性。土壤 pH 是影响作物吸收镉的最主要原因^[26],添加石灰类材料通过改变土壤镉的赋存形态,降低镉的有效性,从而抑制作物对镉吸收和富集^[27]。土壤有效态镉含量与作物镉含量存在显著的正相关关系^[28-29],可以通过降低土壤镉的活性来降低作物对镉的吸收,这与本研究结果相似。相关性还表明土壤 pH 与粉葛中镉含量呈显著负相关($P<0.05$);而土壤总镉、有效态镉与粉葛中镉含量呈显著正相关($P<0.05$),进一步说明石灰和牡蛎粉主要通过提升土壤 pH 来降低镉的活性,从而减少粉葛对镉的吸收和富集。施钙处理特别是牡蛎粉有效降低了镉在粉葛体内富集,降低了粉葛块根的食用风险。

3.2 施钙对粉葛生物量和产量的影响

钙素等外源物质对植物普遍具有促进生长,增强抗逆性的功能^[30],本试验中,施钙可以明显促进粉葛生长,添加石灰和牡蛎粉后粉葛总生物量增加了 34.26%~42.36%,粉葛产量增加了 38.07%~38.20%。试验施用的石灰和牡蛎粉,主要成分为钙元素,陈会鲜等^[31]研究发现钙能显著提高食用木薯产量和品质;在镉胁迫下,钙还可以显著促进南美蟛蜞菊^[32]、苧麻^[33]等生长,增加其生物量,与本试验结果类似。研

究发现施钙如生石灰、石灰石等可以增加土壤特定物种的相对丰度,提高作物对病原菌侵袭^[34];通过提升土壤酶活性和微生物的多样性,提高植物的光合作用,细胞分裂等^[35-36]。相关分析还发现提高土壤pH可以促进粉葛生长,增加粉葛生物量和产量,而土壤镉限制了粉葛生长,与粉葛生物量和产量呈显著负相关。粉葛生物量和产量的提高还可能是由于石灰和牡蛎粉提升了土壤pH,重金属镉的生物活性减弱,降低了重金属镉对粉葛生长的胁迫,有利于粉葛的生长。本试验还发现牡蛎粉处理的粉葛产量和生物量高于石灰处理,主要原因是牡蛎粉除了含有丰富的钙元素外,还含有甲壳素及多种中微量元素,如镁、钠、钡、锶、铜、锌、铁等^[16-17],这些离子在土壤中可被直接交换下来,供粉葛吸收利用。

3.3 粉葛安全生产

本试验中鲜食粉葛块根其重金属镉含量($0.11\sim 0.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)超过GB 2762—2017食品中镉限量标准($\leq 0.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),说明鲜食块根有一定重金属富集,长期食用镉污染地区粉葛块根存在潜在安全风险。而研究区葛粉中镉含量($0.02\sim 0.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)符合WM/T 2—2004食品安全标准($\leq 0.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)要求,说明在该污染条件下收获的葛粉安全。在制造葛粉过程中,将粉葛块根切碎、打浆、水洗沉淀后,经晒干或烘干所得的淀粉为葛粉,产生的副产物为葛渣,所以块根中更多的重金属镉保留在葛渣中。与对照相比,施用石灰块根中镉含量降低了34.09%,葛粉中镉含量降低了15.38%,产量增加了38.20%,收益增加了107.15%;施用牡蛎粉块根中镉含量降低了63.64%,葛粉中镉含量降低了69.23%,产量增加了38.20%,收益增加了173.08%。与石灰比,牡蛎粉成本增加一倍,但是粉葛经济收益明显高于石灰,在镉污染地区,施用牡蛎粉可以有效降低粉葛中镉含量和增加其经济收益,同时还可以有效移除土壤中重金属镉。与超富集植物相比,虽然粉葛对镉富集能力无法达到超富集植物的水平,但对重金属镉的年移除量达 $5.39\sim 8.28\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,表现出良好的修复镉污染土壤的潜力。针对粉葛植株含有大量重金属镉可能带来的二次污染,特别是葛渣的处理,可采用以下方式处理,例如送至专门化机构进行植物冶炼;秸秆回收利用制造纸板等产品;经过生物降解的葛渣肥料还田等^[10]。

施钙对粉葛中镉吸收与富集特征还受到土壤污染程度、施用量、钙素种类、粉葛品种等影响,今后结合室内外试验探讨钙在减轻粉葛重金属镉毒性方面

的作用,钙对粉葛品质的提升效果,以及粉葛体内的钙镉交互作用机制,并通过生理学、分子遗传学和基因学来进一步揭示粉葛对重金属镉富集的机制研究。综合其经济价值、食品安全、生物移除等挖掘粉葛为潜在的镉富集植物,且通过地上藤蔓不回田、土壤钝化提高土壤pH、土壤镉污染适宜范围内种植粉葛来发展粉葛种植,为粉葛安全利用和减轻农田土壤重金属镉污染提供参考依据。

4 结论

(1)施用石灰和牡蛎粉有效促进了粉葛的生长,显著增加了粉葛生物量和产量。

(2)施用石灰和牡蛎粉提高了土壤pH,降低了土壤镉的有效性,从而减少了镉在粉葛体内富集,其中牡蛎粉对粉葛降镉效果优于石灰。

(3)在中轻度镉污染条件下,施用牡蛎粉可以实现粉葛安全生产和经济效益双赢。

参考文献:

- [1] 王艳, 杨远宁, 王学礼, 等. 施用含硒有机肥对粉葛产量及硒吸收转运的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(2): 449-454. WANG Y, YANG Y N, WANG X L, et al. Effects of selenium-containing organic fertilizer on the yield and selenium absorption and transport of *Pueraria thomsonii* Benth[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(2): 449-454.
- [2] 朱卫丰, 李佳莉, 孟晓伟, 等. 葛属植物的化学成分及药理活性研究进展[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(6): 1311-1331. ZHU W F, LI J L, MENG X W, et al. Research advances in chemical constituents and pharmacological activities of *Pueraria* genus[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2021, 46(6): 1311-1331.
- [3] XU H, ZHAO M X, LIANG S H, et al. The effects of *Puerarin* on rat ventricular myocytes and the potential mechanism[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 35475.
- [4] 何绍浪, 张昆, 成艳红, 等. 江西省粉葛种植产业发展现状及对策[J]. 江西中医药, 2020, 51(12): 7-10. HE S L, ZHANG K, CHENG Y H, et al. Development status and countermeasures of *Pueraria thomsonii* planting industry in Jiangxi Province[J]. *Jiangxi Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2020, 51(12): 7-10.
- [5] HUANG Y, WANG L Y, WANG W J, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 3034-3042.
- [6] JIANG H H, CAI L M, WEN H H, et al. An integrated approach to quantifying ecological and human health risks from different sources of soil heavy metals[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 701: 134466.
- [7] CHEN X X, LIU Y M, ZHAO Q Y, et al. Health risk assessment associated with heavy metal accumulation in wheat after long-term phospho-

- rus fertilizer application[J]. *Environment Pollution*, 2020, 262:114348.
- [8] 莫让瑜, 孙年喜, 彭锐. 川党参土壤中重金属镉的积累特性研究[J]. 西南农业学报, 2014, 27(4):1607-1610. MO R Y, SUN N X, PENG R. Study on accumulating regularity of cadmium in *Codonopsis tangshen* Oliv[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27(4):1607-1610.
- [9] 周俊杰, 孙硕, 赵远, 等. 混合改良剂对镉污染土壤川芎镉积累及生长的影响[J]. 环境化学, 2021, 40(11):3608-3616. ZHOU J J, SUN S, ZHAO Y, et al. Effects of mixed amendments on the cadmium accumulation and growth of *Ligusticum chuanxiong* hort in cadmium-contaminated soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(11):3608-3616.
- [10] 林小兵, 武琳, 周利军, 等. 粉葛对农田土壤镉的富集特征[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(5):1626-1632. LIN X B, WU L, ZHOU L J, et al. Accumulation characteristics of cadmium in farmland soil by *Pueraria thomsonii*[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(5):1626-1632.
- [11] 陆金, 赵兴青, 黄健, 等. 铜陵狮子山矿区尾矿库及周边17种乡土植物重金属含量及富集特征[J]. 环境化学, 2019, 38(1):78-86. LU J, ZHAO X Q, HUANG J, et al. Heavy metal contents and enrichment characteristics of 17 species indigenous plants in the tailing surrounding in Shizishan, Tongling[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(1):78-86.
- [12] 林小兵, 周利军, 何绍浪, 等. 江西省葛种植区中重金属镉调查及其富集特征[J]. 土壤与作物, 2021, 10(3):344-354. LIN X B, ZHOU L J, HE S L, et al. Investigation and accumulation characteristics of cadmium in *Pueraria* planting area of Jiangxi Province[J]. *Soils and Crops*, 2021, 10(3):344-354.
- [13] XU D M, FU R B, WANG J X, et al. Chemical stabilization remediation for heavy metals in contaminated soils on the latest decade: available stabilizing materials and associated evaluation methods: a critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 321(1):128730.
- [14] 肖豪, 黄柏豪, 孙凯, 等. 应用灰色关联法分析石灰配施有机肥对镉污染土壤-植物系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(9):1966-1974. XIAO H, HUANG B H, SUN K, et al. Grey relational analysis for evaluating the effects of lime combined with organic fertilizer on a cadmium-contaminated soil-plant system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(9):1966-1974.
- [15] 张秋梅, 王惠明, 林小兵, 等. 不同土壤钝化剂对农田土壤中镉的钝化效果研究[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(3):703-710. ZHANG Q M, WANG H M, LIN X B, et al. Remediation effects of different passivators on cadmium passivation in polluted farmland[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, 43(3):703-710.
- [16] 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 等. 牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(11):5224-5233. ZHAO L F, HUANG P W, YANG C D, et al. Effects of oyster shell powder and lime on availability and forms of phosphorus and enzyme activity in acidic paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11):5224-5233.
- [17] 赵国梁. 牡蛎壳钝化剂的制备及其在重金属污染农田土壤修复中的应用[D]. 济南: 山东师范大学, 2022:77-80. ZHAO G L. Preparation of oyster shell passivator and its application in the remediation of heavy metal contaminated farmland soil[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2022:77-80.
- [18] 林小兵, 张秋梅, 武琳, 等. 南方镉污染水稻产区土壤调理剂、叶面阻控剂产品调查与分析[J]. 环境生态学, 2021, 3(9):57-64. LIN X B, ZHANG Q M, WU L, et al. Investigation and analysis of soil conditioner and foliar resistance control agent in rice growing area of cadmium pollution in South China[J]. *Environmental Ecology*, 2021, 3(9):57-64.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000. LU R K. Analytical methods of soil agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [20] 张杏锋, 吴萍, 冯健飞, 等. 超富集植物与能源植物间作对Cd、Pb、Zn累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7):1481-1491. ZHANG X F, WU P, FENG J F, et al. Effects of intercropping on Cd, Pb, and Zn accumulation using hyperaccumulators and energy plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7):1481-1491.
- [21] 张德林, 喻文, 王梅, 等. 生石灰类处理对川芎5种重金属含量及产量和品质的影响研究[J]. 天然产物研究与开发, 2021, 33(11):1925-1935. ZHANG D L, YU W, WANG M, et al. Improvement effects for the content of five heavy metals, the yield and quality of *Chuanxiong Rhizoma* via quicklime treatments[J]. *Natural Product Research and Development*, 2021, 33(11):1925-1935.
- [22] 赵家印, 杨欣悦, 席运官, 等. 2种钝化剂对土壤重金属Cu、Cd有效性及植物累积的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(13):308-313. ZHAO J Y, YANG X Y, XI Y G, et al. Effects of two remediation agents on copper and cadmium availability in soil and their accumulation in plants[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(13):308-313.
- [23] 肖艳辉, 李应文, 邹碧, 等. 钝化剂抑制南方污染农田籽粒苋吸收重金属的效应研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(4):825-833. XIAO Y H, LI Y W, ZOU B, et al. Reduction of heavy metal uptake by amaranth by 3 soil amendments in contaminated farmland of south China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(4):825-833.
- [24] GUO X F, WEI Z B, WU Q T, et al. Cadmium and zinc accumulation in maize grain as affected by cultivars and chemical fixation amendments[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(5):650-656.
- [25] 叶文玲, 吴凡, 方清, 等. 外源钙对镉胁迫下植物生长及耐镉机制研究[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(2):237-242. YE W L, WU F, FANG Q, et al. Study on plant growth and cadmium tolerance mechanism of exogenous calcium under cadmium stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2020, 47(2):237-242.
- [26] ERIKSSON J E. The influence of pH, soil type and time on adsorption and uptake by plants of Cd added to the soil[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1989, 48:317-335.
- [27] ZHAO X L, SAIGUSA M. Fractionation and solubility of cadmium in paddy soils amended with porous hydrated calcium silicate[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19(3):343-347.
- [28] KIM H S, SEO B H, OWENS G, et al. Phytoavailability-based threshold values for cadmium in soil for safer crop production[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 201:110866.

- [29] 王天宇, 陈睿, 施加春, 等. 镉污染耕地大豆安全生产模式的探究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1629–1635. WANG T Y, CHEN J, SHI J C, et al. Research on a safe production method for soybeans on cadmium-contaminated farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8): 1629–1635.
- [30] 史广宇, 余志强, 施维林. 植物修复土壤重金属污染中外源物质的影响机制和应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 655–666. SHI G Y, YU Z Q, SHI W L. Research progress on mechanism and application of exogenous substances in phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(3): 655–666.
- [31] 陈会鲜, 朱涵钰, 李恒锐, 等. 外源钙对食用木薯产量及其品质的影响研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7): 121–125. CHEN H X, ZHU H Y, LI H R, et al. Effects of exogenous calcium on the yield and quality of edible cassava[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(7): 121–125.
- [32] 施和平, 王云灵, 曾宝强, 等. 外源钙对镉胁迫下南美蟛蜞菊毛状根生长、抗氧化酶活性和镉吸收的缓解效应[J]. 生物工程学报, 2012, 28(6): 747–762. SHI H P, WANG Y L, ZENG B Q, et al. Antioxidative enzyme activities and cadmium absorption efficiency of *Wedelia trilobata* hairy roots under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2012, 28(6): 747–762.
- [33] 龚小敏, 刘云国, 黄丹莲, 等. 外源钙对镉胁迫下苧麻生长及生理代谢的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3866–3870. GONG X M, LIU Y G, HUANG D L, et al. Effects of exogenous calcium on plant growth and physiological metabolism of *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(7): 3866–3870.
- [34] 张玮, 洪艳云, 刘登望, 等. 施钙对酸性红壤花生根系内生细菌群落结构的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(1): 116–124. ZHANG W, HONG Y Y, LIU D W, et al. Effects of calcium application on the structural diversity of endophytic bacterial community in peanut roots under acidic red soil cultivation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1): 116–124.
- [35] 任露陆, 蔡宗平, 王固宁, 等. 不同钝化机制矿物对土壤重金属的钝化效果及微生物响应[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1470–1480. REN L L, CAI Z P, WANG G N, et al. Effects of minerals with different immobilization mechanisms on heavy metals availability and soil microbial response[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7): 1470–1480.
- [36] 谢文辉, 黄莉娟, 赵丽丽, 等. 钙盐胁迫对3份葛藤种质种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(7): 220–233. XIE W H, HUANG L J, ZHAO L L, et al. Effects of calcium salt stress on seed germination and seedling physiological characteristics of three *Pueraria lobata* germplasm lines[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(7): 220–233.

(责任编辑:叶飞)