

基于多目标重金属元素筛选低累积芸豆品种

秦冉, 龚思同, 娄飞, 马智黠, 何守阳, 何腾兵, 付天岭

引用本文:

秦冉, 龚思同, 娄飞, 等. 基于多目标重金属元素筛选低累积芸豆品种[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2704–2714.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0209>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同红麻品种的土壤重金属污染修复潜力对比研究

李文略, 金关荣, 骆霞虹, 安霞, 李苹芳, 朱关林, 陈常理

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2150–2158 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0381>

大宝山污灌区土壤-蔬菜系统重金属污染现状及其风险评价

曹春, 张松, 张鹏, 刘雨晨, 陈勋文, 王俊坚

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1521–1531 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0001>

不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性

邓婷, 吴家龙, 卢维盛, 官以战, 李贵杰, 张秋华, 俞方玉, 曾祖蕾

农业环境科学学报. 2019, 38(6): 1265–1271 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1291>

矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究

涂春艳, 陈婷婷, 廖长君, 曹斐姝, 张超兰, 周永信, 谢湔

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1713–1722 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1401>

黄河湿地小白河片区优势植物重金属的富集特征

高静湔, 杜方圆, 李卫平, 韩剑宏, 王晓云, 鲍交琦, 樊爱萍

农业环境科学学报. 2016, 35(11): 2180–2186 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0335>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

秦冉, 龚思同, 娄飞, 等. 基于多目标重金属元素筛选低累积芸豆品种[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2704–2714.

QIN R, GONG S T, LOU F, et al. Screening of kidney bean varieties with low heavy metal-accumulation ability based on multi-objective heavy metal elements[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12): 2704–2714.



开放科学 OSID

基于多目标重金属元素筛选低累积芸豆品种

秦冉¹, 龚思同¹, 娄飞¹, 马智黠², 何守阳¹, 何腾兵¹, 付天岭^{1*}

(1. 贵州大学(喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室、新农村发展研究院), 贵阳 550025; 2. 贵州威宁县山地特色农业科学研究院, 贵州 毕节 553100)

摘要:为筛选基于多目标重金属元素芸豆品种,保障芸豆生产输出潜力,以黔西北主栽的10个芸豆品种为研究对象,通过污染区田间微区试验,研究不同芸豆品种中Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni等典型有害重金属元素的污染特征和富集系数。结果显示:10个芸豆品种对8种典型有害重金属的吸收累积能力整体呈现 $Zn > Cu > Cd > Ni > Hg > Cr > As > Pb$ 的特征;芸豆对Zn、Cu元素的富集能力较强(富集系数0.2左右),对Cd的富集能力较弱(富集系数0.02~0.05),对Pb、As、Cr、Ni、Hg富集能力非常弱(富集系数不足0.01)。芸豆品种间对同一典型有害重金属元素的累积存在显著差异,按照芸豆中重金属含量进行聚类分析,可以把芸豆品种划分为较高值类、中间值类、较低值类3个类别,富集系数也可以相应地明显区分开来。其中,黑红芸豆、威芸一号、大红芸豆和红芸豆可作为Cd的低累积推荐品种;红芸豆、朱砂豆、圆花豆可作为Hg的低累积推荐品种;本地芸豆、黑芸豆、圆花豆、威芸一号和朱砂豆可作为As的低累积推荐品种;黑芸豆、奶花豆、本地芸豆和朱砂豆可作为Pb的低累积推荐品种;威芸一号和圆花豆可作为Cr的低累积推荐品种;朱砂豆可作为Cu的低累积推荐品种;黑芸豆、本地芸豆、大红芸豆、威芸一号、红芸豆和朱砂豆可作为Zn的低累积推荐品种;大红芸豆、威芸一号、黑红芸豆、红芸豆可作为Ni的低累积推荐品种。研究表明,10个芸豆品种均可以作为黔西北Cd污染区的推荐品种,但其体内重金属Cu、Zn超标风险须引起特别关注。

关键词:芸豆;重金属;富集系数;低累积品种;黔西北

中图分类号:X173;S643.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)12-2704-11 doi:10.11654/jaes.2021-0209

Screening of kidney bean varieties with low heavy metal-accumulation ability based on multi-objective heavy metal elements

QIN Ran¹, GONG Sitong¹, LOU Fei¹, MA Zhixia², HE Shouyang¹, HE Tengbing¹, FU Tianling^{1*}

(1. Guizhou University (Key Laboratory of Karst Environment and Geological Disaster Prevention and Control, Ministry of Education, New Rural Development Research Institute), Guiyang 550025, China; 2. Weining Mountain Characteristic Agricultural Science Research Institute, Bijie 553100, China)

Abstract: A plot experiment was performed in a polluted area to screen kidney bean varieties based on multi-objective heavy metal elements, and to ensure the production potential of kidney beans. In this paper, ten kidney bean varieties planted in northwest Guizhou were tested, and the pollution characteristics and enrichment factors of Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Zn, Ni were analyzed. The results showed that the kidney bean had a high enrichment capacity for Zn and Cu (enrichment factor was about 0.2), low enrichment capacity to Cd

收稿日期:2021-02-22 录用日期:2021-07-14

作者简介:秦冉(1995—),男,湖南永州人,硕士研究生,从事土壤重金属修复研究。E-mail:770523627@qq.com

*通信作者:付天岭 E-mail:yfhh31@126.com

基金项目:贵州省科技厅科技基础条件平台项目(黔科合平台人才[2019]5701号);国家自然科学基金委-贵州省人民政府喀斯特中心项目(U1612442)

Project supported: Science and Technology Basic Conditions Platform Project of Guizhou Science and Technology Department (QKH Platform Talent[2019] No. 5701); National Natural Science Foundation of China - Guizhou Provincial People's Government Karst Center Project (U1612442)

(enrichment factor was 0.02~0.05), and the lowest enrichment capacity for Pb, As, Cr, Ni, and Hg (enrichment factor was<0.01), presenting the characteristics of $Zn > Cu > Cd > Ni > Hg > Cr > As > Pb$. According to the cluster analysis of heavy metal content in kidney bean, kidney bean varieties could be divided into three categories by cluster analysis: high value category, middle value category and low value category, as could the bioaccumulation coefficients (BCFs). Among these, Black red kidney bean, Weiyun No.1, Big red kidney bean, and Red kidney bean could be used as low Cd-accumulation varieties; Red kidney bean, Cinnabar bean, and Round flower bean could be recommended as low Hg-accumulation varieties; Local kidney bean, Black kidney bean, Round flower bean, Weiyun No.1, and Cinnabar bean could be recommended as low As-accumulation varieties; Black kidney bean, Milk flower bean, Local kidney bean and Cinnabar bean could be recommended as low Pb-accumulation varieties; Weiyun No.1 and Round flower bean could be recommended as low Cr-accumulation varieties; Cinnabar bean could be recommended as a low Cu-accumulation variety; Black kidney bean, Local kidney bean, Dahong kidney bean, Weiyun No.1, Red kidney bean and Cinnabar bean could be recommended as low accumulation varieties of Zn; and Dahong kidney bean, Weiyun No.1, Black red kidney bean, and Red kidney bean could be recommended as low Ni-accumulation varieties. These results show that all the ten kidney bean varieties can be recommended for the remediation of Cd-contaminated areas in northwest Guizhou, but the risk of Cu and Zn exceeding the standard levels should be monitored closely.

Keywords: kidney bean; heavy metal; enrichment factor; low-accumulation variety; northwest Guizhou

我国农用地耕层土壤重金属污染愈发严峻^[1],以典型八大重金属元素Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni污染最为普遍^[2]。据统计,有16.1%土壤点位数据超标,且近2/5农用地土壤处于重金属污染状态^[3]。良好的土壤环境质量是粮食^[4]、油料^[5]、蔬菜^[6]等作物安全种植的基本保障;在中轻度污染土壤上,种植适宜的作物品种,也能有效管控农产品的质量安全。芸豆作为蝶形花科菜豆属的豆类蔬菜作物^[7],出口量占据食用豆类总产量的27.4%^[8],其质量安全问题对出口创汇和芸豆产业的发展具有重要影响。因此,在重金属临近《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)土壤污染风险筛选值或是超过污染风险管制值的耕地上,采取适宜品种类型和农艺措施来保障芸豆的安全生产就显得极为必要。

近年来,广大学者针对中轻度重金属污染土壤,从不同地域、不同条件等角度对耕地安全利用技术开展了较深入的研究^[9-10]。其中,农作物品种间替代种植是在重金属污染土壤上进行安全生产最有效的方法之一^[11]。严素定等^[12]通过测定黄石市6种大宗蔬菜重金属含量发现,四季豆处于警戒线污染水平。FONTENELE等^[13]研究发现不同豇豆品种(*Vigna unguiculata* L. Walp.) Pb富集能力存在差异。向娟等^[14]研究了Cd胁迫下12个豇豆品种的生长状况,利用豇豆品种间Cd敏感性不同筛选出FA黑黑-3-1-青荚、15279作为Cd低累积品种。然而,目前芸豆品种筛选研究主要集中于耐盐碱性^[15]、品质性状^[16]等,对重金属积累特性在芸豆品种间遗传多样性的研究较少。前人的研究发现,作物品种间对不同重金属富集有显著差异,但研究多是针对多个品种对单一重金属污染

元素的富集,而基于多目标重金属元素低累积芸豆品种筛选的研究尚未见报道。多目标重金属元素在芸豆体内含量特征及富集差异规律尚不清楚,不利于指导解决低累积芸豆品种推广的问题。因此,本研究选取黔西北部威宁县主栽10个芸豆品种为材料,针对污染风险较高的Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni 8种有害重金属元素,通过在威宁县芸豆产区开展田间小区试验,对比分析不同芸豆品种籽粒中重金属含量差异性和累积特征,并根据我国蔬菜中重金属污染限值评价重金属超标风险,以筛选出适宜区域生长的低累积芸豆品种,为当地芸豆安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

大田小区试验地点为贵州省威宁县小海镇的试验基地。该地区平均海拔2 200 m,气候属于亚热带季风性湿润气候,具有年降雨量大、无霜期长、日温差大等特点,适于马铃薯、荞麦及芸豆等作物生长。供试土壤pH为6.33,有机质(OM)含量为61.83 g·kg⁻¹,总氮含量为0.331 g·kg⁻¹,总磷含量为0.718 g·kg⁻¹,速效钾含量为0.196 g·kg⁻¹。供试土壤主要重金属含量见表1,以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)土壤风险筛选值为标准,典型有害重金属元素Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn和Ni的污染指数依次是4.05、0.13、0.37、0.56、0.60、0.79、0.65、0.51,以Cd污染程度最高,且超过贵州土壤背景值(0.248 mg·kg⁻¹)^[17],能较好地代表该供试土壤污染状况。

1.2 供试材料

供试芸豆为威宁县主推的10个芸豆品种,分别

表1 供试土壤主要重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 1 Main heavy metals contents in the tested soil(mg·kg⁻¹)

项目 Item	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
土壤含量 Content in soil	1.62	0.23	14.87	56.53	90.27	39.85	131.44	36.03
贵州土壤背景值 Background value of soil in Guizhou	0.248	0.3	15	35.2	90	32	99.5	40
土壤污染风险筛选值 Screening value of soil pollution risk	0.4	1.8	40	100	150	50	200	70

是圆花豆、朱砂豆、奶花豆、大红芸豆、紫芸豆、本地芸豆、白花芸豆、威芸一号、黑红芸豆、红芸豆,由贵州威宁县山地特色农业科学研究院提供。供试芸豆品种基本信息见表2,经济性状见表3。10个品种芸豆单株荚数、单株粒质量、百粒质量等经济性状存在较明显的差异,株高变幅25.8~133.8 cm,单株分枝数变幅1.4~4.2,单株荚数变幅4.8~11.8,单株粒质量变幅5.60~28.92 g,百粒质量变幅34.4~68.6 g,荚粒数变幅2.6~4.6,荚长变幅9.5~13.8 cm。10个芸豆品种间的单位面积产量达极显著或显著差异,产量范围在0.47~1.75 t·hm⁻²,平均产量为1.14 t·hm⁻²;10个品种产量顺序从大到小排序为红芸豆>朱砂豆>圆花豆>威芸一号>大红芸豆>黑芸豆>黑红芸豆>本地芸豆>白花芸豆>奶花豆。

1.3 试验设计

选择Cd污染农田开展芸豆品种试验,试验品种采用随机方式排列,每个品种的种植小区面积为15 m²(3 m×5 m),重复3次,穴播种植密度为33.5 cm×50 cm。田间管理及施肥措施与当地措施一致^[18]。于2020年4月23日播种,2020年6月3日人工中耕除草,每穴间苗2株,整个生育期无病虫害发生。2020年8月7日—8月20日完成收获。

1.4 样品采集及处理

芸豆成熟期,每个小区随机取5整株芸豆,豆荚按同一小区组成混合样,装入尼龙网袋,共30个样品。芸豆室内晾干并脱粒,使用不锈钢植物粉碎机粉碎,过40目筛后装入聚乙烯自封袋备用,整个小区收获、晾晒、脱粒、称质量计算小区产量。并对应采集小区的表层土壤(0~20 cm)样品30个,室内自然风干,四分法平分,过100目尼龙筛,样品袋密封保存。

芸豆样品采用HNO₃(5 mL)消解法,以石墨消解仪(YKM-36,长沙永乐康仪器设备有限公司)于120℃消解2 h。土壤样品采用HNO₃-HF-HClO(3:1:1)高压密闭法于180℃消解22 h后测定(HJ 766—2015)。土壤、植物样品分别采用空白、平行双样以及国家标准物质GBW10012(GSB-3)、(GSS-5)进行质控。土壤生物有效态Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni采用DTPA-CaCl₂浸提法进行提取^[19]。采用ICP-MS[X₂,赛默飞世尔科技(中国)有限公司]测定芸豆和土壤消解液、浸提液中Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni的浓度^[20];其中,有效态Ni、Hg未达到仪器检出限。

1.5 数据处理

芸豆对重金属富集能力使用富集系数进行评价^[21],其计算公式:富集系数=作物籽粒重金属含量

表2 芸豆品种植物学特性及生物学特性
Table 2 Botanical and biological characteristics of kidney bean varieties

品种 Variety	植物学特性 Botanical characteristics					生物学特性 Biological characteristics		
	生长习性 Growth habit	成熟荚色 Mature pod color	粒色 Grain color	花色 Flower color	粒型 Grain type	耐旱性 Drought tolerance	抗倒伏 Lodging resistance	抗病 Disease-resistant
圆花豆	蔓生	褐	红花	粉色	圆肾	耐	差	抗
朱砂豆	直立	褐	黑红	粉色	长肾	耐	抗	抗
奶花豆	直立	褐	花红	粉色	短肾	耐	抗	抗
大红芸豆	半蔓生	褐	黑红	红色	长肾	耐	中	抗
黑芸豆	蔓生	褐	紫红	红色	扁肾	耐	差	抗
本地芸豆	半蔓生	褐	红花	红色	扁肾	耐	中	抗
白花芸豆	直立	褐	白花	粉色	短肾	耐	抗	抗
威芸一号	直立	褐	红色	粉色	扁肾	耐	抗	抗
黑红芸豆	半蔓生	褐	黑红	粉色	长肾	耐	中	抗
红芸豆	半蔓生	褐	红色	粉色	长肾	耐	中	抗

表3 芸豆品种经济性状

Table 3 Economic characters of kidney bean varieties

品种 Variety	经济性状 Economic character							
	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	单株分枝数 Number of branches per plant	单株荚数 Pods per plant	单株粒质量 Grain weight per plant/g	百粒质量 Grain weight/g	荚粒数 Seed number per pod	荚长 Pod length/cm	株高 Plant height/ cm
奶花豆	0.47	2.0	5.0	7.32	49.2	4.0	9.6	29.0
白花芸豆	0.70	1.4	4.8	6.20	48.0	3.8	9.8	25.8
本地芸豆	0.85	1.6	6.8	12.12	51.0	4.2	12.5	79.8
黑红芸豆	1.00	3.2	6.6	5.60	48.0	3.4	9.5	74.6
黑芸豆	1.09	2.6	7.6	12.28	55.2	2.8	12.6	106.0
大红芸豆	1.20	2.6	7.4	8.40	49.4	3.0	12.1	61.2
威芸一号	1.21	1.4	5.4	9.30	34.4	2.6	11.8	27.2
圆花豆	1.33	3.4	11.6	28.92	68.6	4.0	11.7	133.8
朱砂豆	1.55	4.0	10.2	20.40	61.0	4.6	13.8	48.4
红芸豆	1.75	4.2	11.8	18.28	55.4	3.2	13.3	85.4

(mg·kg⁻¹)/土壤中重金属含量(mg·kg⁻¹)。采用SPSS 25.0进行芸豆富集系数均值两两比较的非参数检验、等方差图基分析、聚类分析以及相关分析,采用Origin 8.5做图。使用单因子污染指数法(P_i)和内梅罗综合污染指数法(P_z)^[22-23]评价芸豆的重金属超标情况;按照《绿色食品产地环境质量状况评价纲要(试行)》中土壤污染等级划分标准制定蔬菜质量分级标准进行芸豆的质量分级。其中,芸豆中Cd、Hg、As、Pb、Cr安全限值参考《食品中污染物限量》(GB 2762—2017),分别为0.1、0.1、0.5、0.2、0.5 mg·kg⁻¹,Cu安全限值参考联合国粮农组织及世界卫生组织推荐的标准值^[24],为10 mg·kg⁻¹,Ni的临界值以美国环保部规定Ni摄入参考剂量(RfD)0.02 mg·kg⁻¹为参考,成人体质量以60 kg估算,假设人群Ni的摄入都来源于蔬菜,推算Ni超标临界值为0.75 mg·kg⁻¹作为Ni评价标准。此外,暂未出台现行有关蔬菜中Zn限值的标准,故不做评价。

2 结果与分析

2.1 芸豆根际土壤重金属元素全量及有效性分析

如表4所示,10种芸豆品种根系土壤pH变幅为5.76~6.55,且没有显著差异。试验地土壤8种典型有害重金属元素Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni的平均含量分别为1.53、0.21、14.37、54.56、90.42、38.45、120.39、33.97 mg·kg⁻¹;同一品种小区间重金属含量存在一定的田间异质性,但各品种小区间平均重金属含量并没有显著性差异。按照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)风

险筛选值和管制值,仅Cd含量均值明显高于土壤Cd的风险筛选值(0.3 mg·kg⁻¹),且明显超过贵州省土壤Cd元素背景值。其他有害重金属均未超过国家土壤污染风险筛选值,接近或略高于贵州土壤背景值,整体为弱酸性的安全利用类Cd污染土壤。

由表5可见,土壤典型有害重金属Cd、As、Pb、Cr、Cu、Zn的有效态含量平均值分别占全量的63.2%、0.97%、11.7%、0.04%、4.39%、2.69%,Cd、Pb处于明显较高的活性水平。统计结果表明,品种间的土壤重金属有效态含量没有显著性差异。

2.2 芸豆品种的重金属元素含量及聚类分析

由图1可见,芸豆籽粒重金属含量除Cr、Hg、Ni外,Cd、As、Pb、Cu、Zn在不同芸豆品种之间均呈现显著性差异($P<0.05$),Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Ni在不同芸豆品种中含量极差分别达0.069、0.001、0.011、0.034、0.173、3.537、9.312、0.383 mg·kg⁻¹。参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中的重金属限量值和联合国粮农组织及世界卫生组织推荐的标准值,经单因子污染指数评价,仅有个别品种的Cu超过食品中污染物限量,Cd、As、Pb、Cr 4种典型有害重金属均未超标;通过内梅罗综合污染指数法进行综合污染指数评价,仅有奶花豆、黑红芸豆、圆花豆、白花芸豆等高富集品种接近或处于轻微污染水平,贡献率呈现Cu>Ni>Cd>Cr>Pb>As>Hg的规律,且以Cu为主要贡献者(表6)。

由系统聚类分析法—组间联接—平方Euclidean距离分析结果可见,将当地主栽的芸豆品种间典型有害重金属含量可分成第一类(较高值类)、第二类(中间

值类)、第三类(较低值类)(图1)。黑红芸豆、威芸一号、大红芸豆和红芸豆4个品种的Cd含量明显较低,属第三类(较低值类),可作为Cd的低累积推荐品种。本地芸豆、黑芸豆、圆花豆、威芸一号和朱砂豆5个品种的As含量明显较低,属第三类(较低值类),可作为As的低累积推荐品种。圆花豆、红芸豆、威芸一号、黑芸豆、奶花豆、本地芸豆和朱砂豆7个品种Pb含量属第三类(较低值类),特别是黑芸豆、奶花豆、本地芸豆和朱砂豆4个品种的Pb含量明显较低,可作为Pb的低累积推荐品种。威芸一号和圆花豆两个品种的Cr含量相对较低,属第三类(较低值类),可作为Cr的低累积推荐品种;朱砂豆Cu含量明显较低,属第三类(较低值类),可作为Cu的低累积推荐品种。黑芸豆、

本地芸豆、大红芸豆、威芸一号、红芸豆和朱砂豆6个品种的Zn含量相对较低,属第三类(较低值类),可作为Zn的低累积推荐品种。威芸一号、红芸豆、黑红芸豆、大红芸豆的Ni含量明显较低,属第三类(较低值类),可作为Ni的低累积推荐品种。

此外,当地主栽品种中,圆花豆属于Cd第一类(较高值类)品种,白花芸豆和大红芸豆属于As、Pb的第一类品种,奶花豆属于Cr、Zn的第一类品种,黑红芸豆、圆花豆和威芸一号属于Cu的第一类品种。该类芸豆品种中有较高的重金属富集量,应尽量避免在相应的污染土壤上种植。

2.3 不同品种芸豆重金属富集特征

10个芸豆品种对8种典型有害重金属的吸收累

表4 不同品种芸豆根际土壤pH及重金属元素含量(mg·kg⁻¹)
Table 4 pH and total amount of heavy metals in rhizosphere soil of different varieties of kidney bean(mg·kg⁻¹)

品种 Variety	pH	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
黑红芸豆	6.42±0.21a	1.65±0.23a	0.21±0.02a	13.89±0.41a	54.18±2.54a	84.47±7.30a	38.30±3.16a	125.53±9.79a	33.49±1.56a
本地芸豆	6.39±0.29a	1.47±0.43a	0.24±0.02a	14.84±1.05a	59.17±7.85a	92.47±4.28a	39.38±4.67a	124.18±14.44a	33.67±5.58a
威芸一号	6.33±0.25a	1.52±0.12a	0.21±0.03a	15.28±2.61a	55.72±3.86a	94.9±12.19a	39.97±3.61a	120.85±5.94a	35.07±2.82a
圆花豆	6.11±0.39a	1.54±0.16a	0.21±0.03a	14.29±2.19a	62.17±7.31a	84.81±5.74a	39.06±3.98a	134.97±19.85a	33.89±2.89a
奶花豆	6.33±0.30a	1.60±0.10a	0.24±0.02a	17.49±2.46a	50.52±3.52a	87.42±9.62a	35.89±3.57a	115.20±7.45a	34.05±2.47a
大红芸豆	6.55±0.26a	1.50±0.35a	0.21±0.02a	10.40±1.19a	52.41±1.25a	88.97±2.51a	37.47±1.36a	116.83±12.68a	34.97±1.24a
白花芸豆	5.76±0.23a	1.39±0.27a	0.20±0.02a	10.73±2.25a	54.36±6.55a	88.63±7.04a	38.25±2.32a	111.42±3.83a	33.70±3.19a
红芸豆	5.99±0.29a	1.53±0.26a	0.18±0.01a	15.92±0.73a	53.25±2.41a	87.35±7.35a	39.14±1.50a	119.14±6.93a	32.84±1.03a
黑芸豆	6.49±0.34a	1.60±0.07a	0.19±0.01a	16.38±3.17a	55.76±6.79a	94.67±9.92a	39.61±6.27a	121.28±14.68a	35.06±4.11a
朱砂豆	6.42±0.29a	1.51±0.03a	0.27±0.06a	14.51±5.46a	48.16±6.29a	100.53±6.59a	37.50±6.76a	116.55±10.96a	32.96±1.60a
贵州土壤背景值	—	0.248	0.3	15	35.2	90	32	99.5	40
土壤污染风险筛选值	—	0.3	1.8	40	100	150	50	200	70

注:表中数据为平均值±标准误,同一列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下同。
Note: The data in the table is represented as mean ± SD, and different small letters in the same column indicate significant differences (P < 0.05). The same below.

表5 不同品种芸豆根际土壤重金属元素有效态含量(mg·kg⁻¹)
Table 5 Available contents of heavy metal elements in rhizosphere soil of different varieties of kidney bean(mg·kg⁻¹)

品种 Variety	Cd	As	Pb	Cr	Cu	Zn
黑红芸豆	1.159±0.321a	0.168±0.057a	7.081±0.271a	0.046±0.012a	1.492±0.392a	3.027±0.454a
本地芸豆	0.850±0.188a	0.185±0.063a	6.706±0.408a	0.033±0.025a	1.400±0.198a	2.386±0.490a
威芸一号	0.943±0.284a	0.105±0.015a	5.800±0.677a	0.055±0.023a	1.484±0.205a	3.360±0.910a
圆花豆	1.047±0.162a	0.120±0.062a	6.806±0.476a	0.019±0.003a	1.540±0.244a	2.669±0.313a
奶花豆	1.093±0.070a	0.092±0.038a	7.280±0.517a	0.054±0.025a	1.424±0.184a	2.904±0.261a
大红芸豆	0.944±0.351a	0.142±0.019a	6.537±0.853a	0.066±0.050a	1.396±0.328a	3.645±1.160a
白花芸豆	0.728±0.125a	0.143±0.033a	5.829±1.794a	0.056±0.000a	1.473±0.194a	2.611±0.340a
红芸豆	0.918±0.116a	0.121±0.099a	6.665±0.969a	0.041±0.012a	1.585±0.056a	3.173±0.674a
黑芸豆	0.999±0.189a	0.178±0.019a	6.418±1.050a	0.059±0.024a	1.982±0.402a	3.131±0.829a
朱砂豆	0.999±0.189a	0.189±0.010a	5.974±1.318a	0.061±0.017a	1.874±0.174a	3.235±0.480a

表 6 芸豆重金属污染程度评价表

Table 6 The evaluation table of heavy metals pollution degree in kidney bean varieties

品种 Variety	P_i									P_z	污染等级 Class of pollution
	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	平均值 Average	最大值 Maximum		
圆花豆	0.98	0.01	0.02	0.07	0.37	1.00	0.73	0.57	1.00	1.01	轻微污染
朱砂豆	0.73	0.01	0.01	0.01	0.49	0.69	0.92	0.49	0.92	0.81	警戒线
奶花豆	0.64	0.01	0.02	0.04	0.71	0.92	0.82	0.59	0.92	1.13	轻微污染
大红芸豆	0.33	0.02	0.03	0.17	0.58	0.87	0.50	0.46	0.87	0.86	警戒线
黑芸豆	0.55	0.01	0.02	0.04	0.63	0.92	0.92	0.54	0.92	0.93	警戒线
本地芸豆	0.77	0.01	0.01	0.04	0.53	0.85	0.99	0.55	0.99	0.91	警戒线
白花芸豆	0.57	0.02	0.03	0.19	0.64	0.83	0.70	0.53	0.83	0.96	警戒线
威芸一号	0.40	0.02	0.01	0.05	0.44	0.97	0.50	0.44	0.97	0.84	警戒线
黑红芸豆	0.43	0.02	0.02	0.10	0.56	1.04	0.48	0.51	1.04	1.04	轻微污染
红芸豆	0.29	0.01	0.02	0.07	0.59	0.79	0.48	0.42	0.79	0.83	警戒线

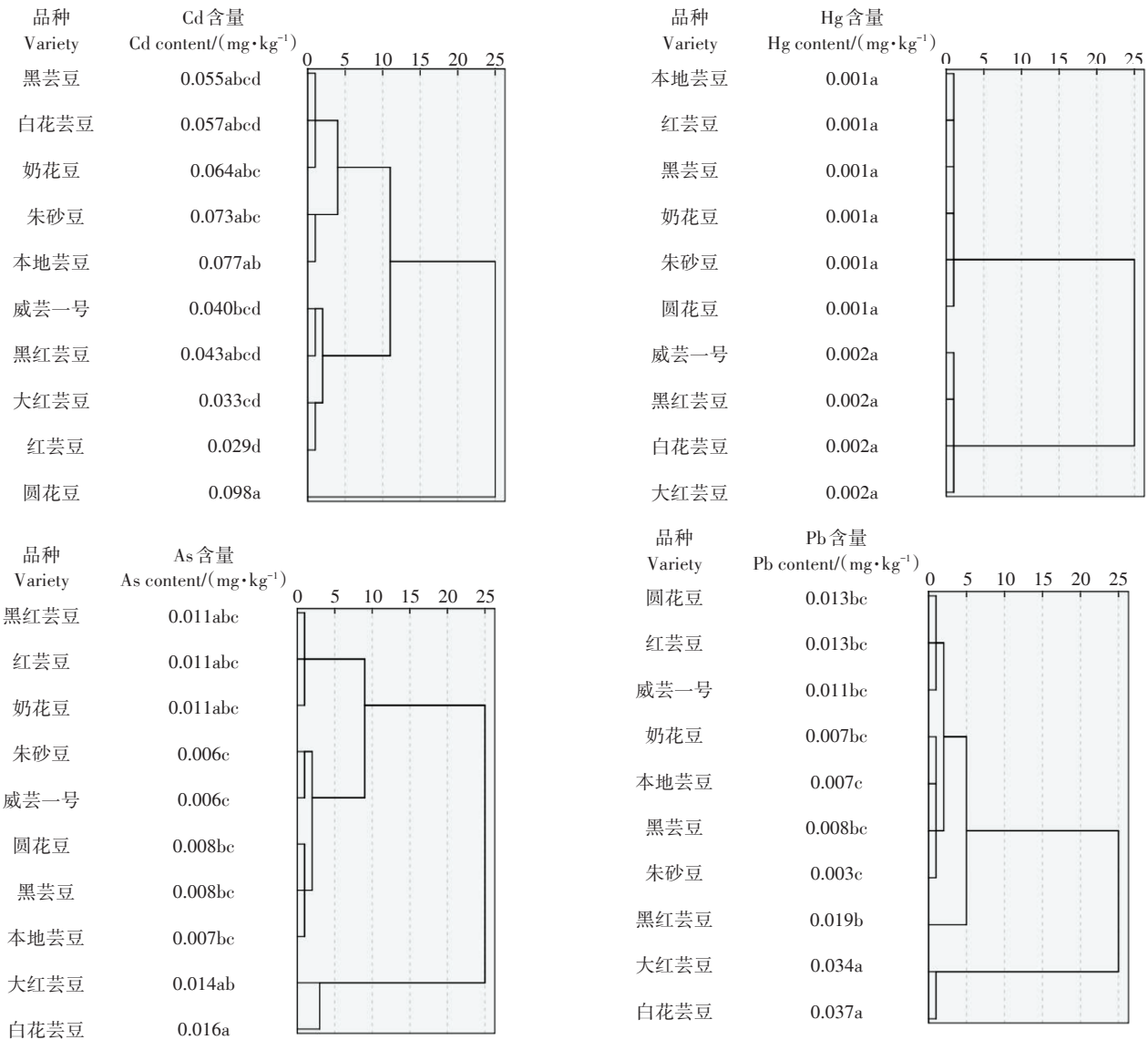
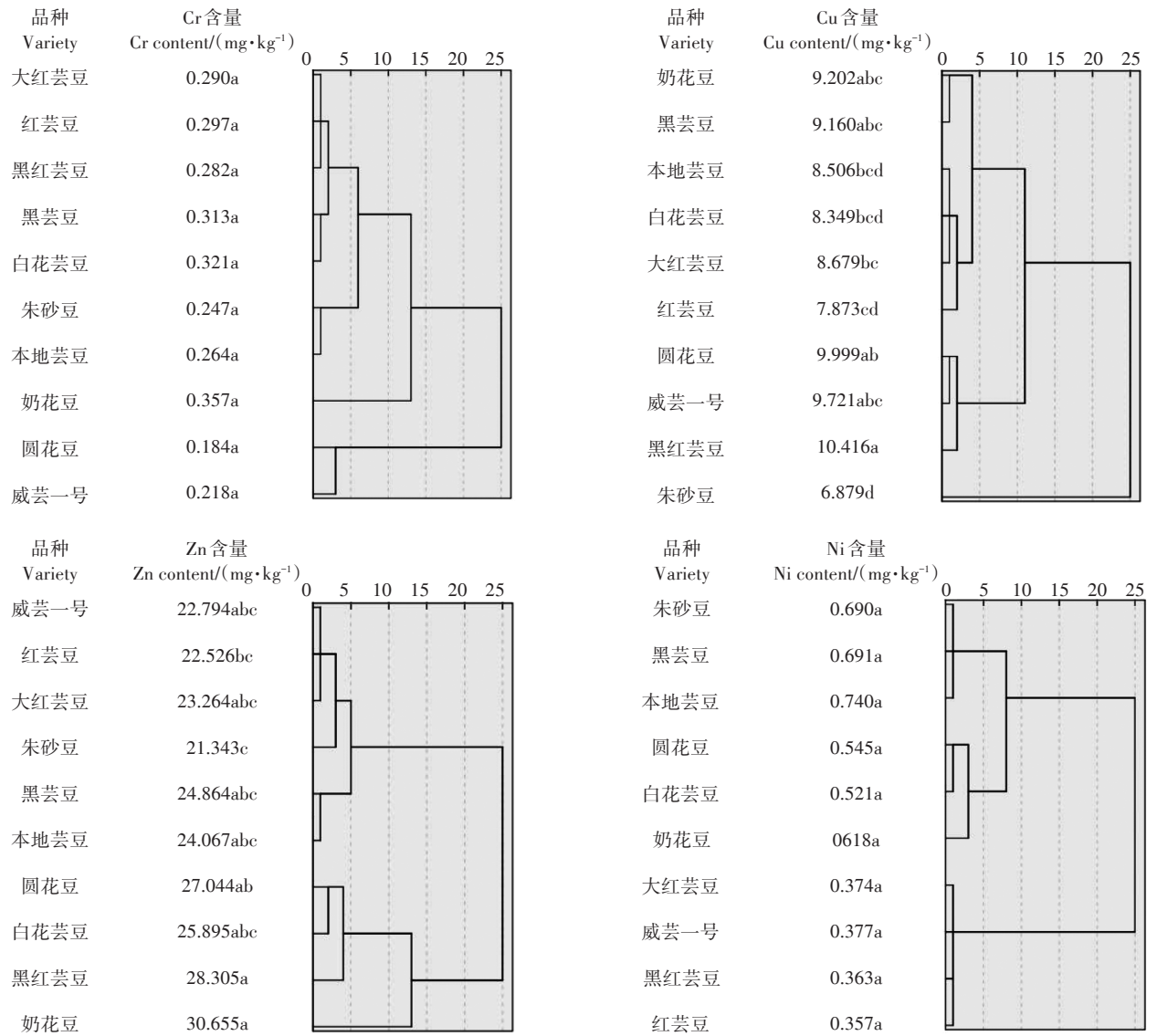


图 1 供试芸豆重金属含量聚类分析图

Figure 1 The cluster analysis of heavy metals contents in kidney bean varieties



图中重金属含量一列不同小写字母表示品种间差异显著(P<0.05)
Different lowercase letters indicate significant differences among varieties (P<0.05)

续图 1 供试芸豆重金属含量聚类分析图

Continued figure 1 The cluster analysis of heavy metals contents in kidney bean varieties

积能力,整体呈现Zn>Cu>Cd>Ni>Hg>Cr>As>Pb的特征(表7)。其中,芸豆对土壤中Zn、Cu元素的富集能力较强,富集系数可达0.2左右;对Cd的富集系数为0.02~0.05的水平;对Pb、As、Cr均处于非常低的富集水平,富集系数不足0.01。各重金属元素品种间富集系数呈现与芸豆含量聚类分析整体一致的结果,明显与芸豆含量的第一类(较高值类)、第二类(中间值类)、第三类(较低值类)分类结果一致。芸豆不同品种对土壤重金属有效态含量的富集系数与对土壤重金属全量的富集系数呈现整体一致的规律(表8),且对有效态重金属含量的富集系数明显较高,特别是对有效态Cu、Zn、Cr富集系数均大于1。

3 讨论

本研究中,同一试验地块上的10个芸豆品种经济学性状和产量有显著性差异,这是供试品种间基因型差异的结果。芸豆品种间对同一典型有害重金属元素的累积存在显著差异,可以按照芸豆中重金属含量分为第一类(较高值类)、第二类(中间值类)、第三类(较低值类)3个类别,相应的富集系数也具有明显差异,说明基因型对芸豆籽粒重金属含量有显著影响,这与薛涛等^[3]和付玉辉^[25]在不同水稻、蔬菜品种对重金属吸收研究方面的结论一致。有研究表明,品种间差异会导致根系释放分泌物速率、营养物质的吸

表7 不同品种芸豆对土壤Cd、As、Pb、Cr、Cu、Zn、Hg、Ni全量富集系数

Table 7 Total enrichment coefficients of Cd, As, Pb, Cr, Cu, Zn, Hg, Ni of different varieties of kidney bean

品种 Variety	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni
圆花豆	0.051±0.002a	0.006±0.001a	0.001±0.000a	0.000±0.000a	0.002±0.000a	0.259±0.044a	0.202±0.021bc	0.014±0.002a
朱砂豆	0.048±0.002a	0.003±0.001a	0.002±0.000a	0.000±0.000a	0.002±0.000a	0.164±0.017a	0.184±0.020bc	0.020±0.000a
奶花豆	0.046±0.007a	0.005±0.001a	0.001±0.000a	0.000±0.000a	0.005±0.001a	0.257±0.020a	0.265±0.031a	0.028±0.006a
大红芸豆	0.023±0.007a	0.009±0.001a	0.001±0.000a	0.001±0.000a	0.003±0.000a	0.232±0.014a	0.177±0.011c	0.012±0.002a
黑芸豆	0.034±0.006a	0.006±0.001a	0.000±0.000a	0.000±0.000a	0.004±0.000a	0.268±0.001a	0.206±0.018bc	0.020±0.002a
本地芸豆	0.048±0.006a	0.006±0.002a	0.001±0.000a	0.000±0.000a	0.003±0.000a	0.218±0.021a	0.195±0.020bc	0.022±0.005a
白花芸豆	0.040±0.015a	0.010±0.001a	0.005±0.006a	0.001±0.000a	0.002±0.002a	0.223±0.007a	0.228±0.001ab	0.016±0.003a
威芸一号	0.027±0.006a	0.007±0.001a	0.000±0.000a	0.000±0.000a	0.002±0.000a	0.248±0.039a	0.207±0.009bc	0.011±0.001a
黑红芸豆	0.020±0.002a	0.006±0.002a	0.001±0.001a	0.000±0.000a	0.003±0.000a	0.272±0.009a	0.230±0.017ab	0.011±0.001a
红芸豆	0.021±0.002a	0.005±0.001a	0.001±0.000a	0.000±0.000a	0.003±0.001a	0.184±0.006a	0.190±0.036bc	0.020±0.006a

表8 不同品种芸豆对土壤Cd、As、Pb、Cr、Cu、Zn有效态富集系数

Table 8 Enrichment coefficients of available fractions of Cd, As, Pb, Cr, Cu, Zn of different varieties of kidney bean

品种 Variety	Cd	As	Pb	Cr	Cu	Zn
圆花豆	0.093±0.006a	0.062±0.040a	0.024±0.038a	10.170±1.940a	6.589±1.160a	9.567±0.013a
朱砂豆	0.066±0.009a	0.038±0.006a	0.001±0.000a	6.420±2.115a	3.513±0.123a	6.590±0.878a
奶花豆	0.058±0.001a	0.104±0.014a	0.002±0.001a	8.306±1.129a	5.380±1.556a	8.881±1.094a
大红芸豆	0.038±0.016a	0.098±0.006a	0.002±0.001a	7.762±1.755a	4.906±0.711a	5.936±1.184a
黑芸豆	0.055±0.006a	0.040±0.002a	0.002±0.002a	6.509±1.609a	5.774±1.669a	7.776±1.894a
本地芸豆	0.074±0.010a	0.067±0.012a	0.000±0.000a	4.826±1.588a	4.962±0.613a	10.084±0.750a
白花芸豆	0.064±0.019a	0.438±0.491a	0.034±0.043a	3.629±2.998a	5.817±0.623a	10.420±1.461a
威芸一号	0.045±0.017a	0.061±0.012a	0.001±0.000a	3.838±0.434a	4.741±0.319a	6.860±0.594a
黑红芸豆	0.030±0.005a	0.082±0.012a	0.003±0.000a	3.192±0.482a	7.232±0.830a	8.326±1.052a
红芸豆	0.049±0.032a	0.084±0.067a	0.003±0.002a	8.268±1.821a	4.477±0.115a	6.858±1.317a

收和解吸、根际土壤重金属活化能力等的不同^[26-27],进而影响根系的富集能力。研究表明,根系分泌物能够改变重金属形态及土壤微生态环境,其中,根系分泌的有机酸、酚类物质等可与重金属发生螯合反应,限制重金属迁移转运^[28]。而根系也可通过质外体屏障来减少根部的泌氧,进而调节作物对重金属的耐性^[29],可能是籽粒重金属累积差异原因之一。另外,不同蔬菜品种各器官转运能力差异是影响体内重金属含量分配的重要因子,这种差异使得进一步筛选低累积型芸豆成为了可能^[30-31]。在实际生产中,植物体内重金属含量不仅取决于自身基因型和代谢机制,还受到实地土壤肥力和重金属污染状况等多个因子影响^[32]。有研究表明,土壤中施用有机肥不仅能提高土壤肥力,还能与重金属形成难溶性沉淀,降低其活动性和有效性^[33]。

10个芸豆品种对重金属富集差异较大,可能与品种的遗传特性、栽培措施和重金属类型等有关^[34]。

有研究表明,由于作物对重金属离子富集转运机制不同,品种间重金属含量和分布表现出巨大差异^[35]。冯爱焯等^[36]研究发现,不同水稻品种稻米对Cd、As、Pb、Cr累积存在显著的基因型差异;邹素敏等^[37]的研究表明,不同种蔬菜对Cd、Hg、Pb、Cr、As富集差异明显。本研究发现,重金属元素在芸豆体内整体呈现Zn>Cu>Cd>Ni>Hg>Cr>As>Pb的富集特征,芸豆对Zn、Cu富集能力更强,可能是施加的氮肥和磷肥促进植物籽粒部位吸收Zn、Cu^[38-39],但是芸豆对Cd、Pb、As、Cr、Ni、Hg不敏感,这与前人的研究结果相似^[40-41]。张彦威等^[42]通过对大豆品种进行筛选,发现野生大豆中重金属含量差异很大,其富集呈Cr>Pb>As>Cd>Hg的规律;赵秀芳等^[43]在对土壤-作物系统中金属的相互作用的研究中,发现小麦对重金属的富集能力从大到小依次为Zn>Cd>Cu>Ni>As>Pb,其从土壤环境中摄取重金属元素的能力是有限的。上述结果均与本研究结果不一致,可能是因为土壤的基本理化性质不同致

使蔬菜表现出不同的重金属富集特性^[44]。有研究表明,土壤的理化性质通过影响重金属在土壤中的存在形态而影响重金属的生物有效性^[45]。

本研究试验区存在土壤Cd污染问题,在此弱酸性安全利用类污染土壤上,供试芸豆籽粒中重金属含量均未超标,对Cd的富集系数仅为0.02~0.05。籽粒部位重金属含量均未超标,可能是因为重金属在根系表面和根系质外体中的移动性较差,且会在根系细胞内发生区隔化作用,阻碍了重金属的木质部装载^[46]。Cd超标率和富集系数明显低于湖南Cd污染区水稻^[47]、河南旱地Cd污染区的小麦^[48]、珠江三角洲Cd污染区的蔬菜等^[49]。因此,芸豆可以作为黔西北此类Cd污染区的推荐作物品种。值得注意的是,本研究中试验区土壤Zn、Cu元素含量均未超过土壤筛选值,但芸豆籽粒对Zn、Cu元素富集能力较强,特别是对土壤有效态Zn、Cu的富集系数明显大于1,全部芸豆品种籽粒的Zn含量和个别品种的Cu含量超过一定量时,存在较高的Zn、Cu污染风险,推断与豆科作物对Cu、Zn的需求有关系,Cu、Zn是作物体内必需的微量元素^[50]。目前对豆科植物Cu、Zn超标问题关注较少,区域内多数土壤Cu、Zn元素含量较为丰富,芸豆等豆科蔬菜的安全生产应当引起人们的注意。

4 结论

(1)芸豆品种间对同一典型有害重金属元素的累积存在显著差异,按照芸豆中重金属含量,通过聚类分析可区分为较高值类、中间值类、较低值类。

(2)10个芸豆品种对8种典型有害重金属富集整体呈现 $Zn > Cu > Cd > Ni > Hg > Cr > As > Pb$ 的特征,且对Cd、As、Pb、Cr、Hg、Ni富集能力较弱,研究中芸豆品种均可作为黔西北Cd污染区的推荐品种,但Cu、Zn超标风险需引起特别关注,其中奶花豆、黑红芸豆、圆花豆和威芸一号中有较高的Zn、Cu富集量,应尽量避免在相应的污染土壤上种植。

参考文献:

- [1] QU M K, CHEN J, HUANG B, et al. Exploring the spatially varying relationships between cadmium accumulations and the main influential factors in the rice-wheat rotation system in a large-scale area[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 736: 139565.
- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014. Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of national soil pollution survey[R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources, 2014.
- [3] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1818-1826. XUE T, LIAO X Y, WANG L Q, et al. Study on cadmium accumulation difference of different rice varieties in cadmium polluted farmland[J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 2019, 38(8): 1818-1826.
- [4] 刘娜. 重金属汞/镉低积累小麦品种筛选及根际微环境研究[D]. 济南: 山东大学, 2020. LIU N. Selection of wheat varieties with low accumulation of Hg / Cd and study on rhizosphere microenvironment[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [5] 王飞, 王建国, 刘登望, 等. 不同花生品种对稻田镉富集及转运的研究[J]. 中国油料作物学报, 2019, 41(4): 568-576. WANG F, WANG J G, LIU D W, et al. Study on cadmium accumulation and translocation in paddy fields by different peanut varieties[J]. *Acta Oilseed Crops Sinica*, 2019, 41(4): 568-576.
- [6] 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 等. 吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2936-2943. LI L F, ZHU C X, ZENG X B, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in greenhouse soils and vegetables in Siping, Jilin Province[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2936-2943.
- [7] 王何柱, 朱勇, 朱怡, 等. 基于主成分分析法的贵州芸豆品质评价[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 48-53. WANG H Z, ZHU Y, ZHU Y, et al. Quality evaluation of kidney bean in Guizhou Province based on principal component analysis[J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(3): 48-53.
- [8] 余莉, 葛平珍, 王昭礼, 等. 籽粒型芸豆品种主要农艺性状的主成分分析和聚类分析[J]. 农业科技通讯, 2019(6): 143-149. YU L, GE P Z, WANG Z L, et al. Principal component analysis and cluster analysis of main agronomic characters of seed type kidney bean[J]. *Agricultural Science and Technology Communication*, 2019(6): 143-149.
- [9] DING Q, WANG Y, ZHUANG D F. Comparison of the common spatial interpolation methods used to analyze potentially toxic elements surrounding mining regions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 212: 23-31.
- [10] GABRIEL C M, EVANISE S P, INGRID F S A, et al. Amending potential of organic and industrial by-products applied to heavy metal-rich mining soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 162: 581-590.
- [11] 陈彩艳, 唐文帮. 筛选和培育镉低积累水稻品种的进展和问题探讨[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6): 1044-1051. CHEN C Y, TANG W B. Progress and problems in screening and breeding rice varieties with low cadmium accumulation[J]. *Agricultural Modernization Research*, 2018, 39(6): 1044-1051.
- [12] 严素定, 万晓琼, 杨红军. 黄石市几种市售蔬菜的重金属污染分析[J]. 湖北师范学院学报(自然科学版), 2008, 28(4): 48-51. YAN S D, WAN X Q, YANG H J. Analysis on heavy metal pollution of vegetables in Huangshi[J]. *Journal of Hubei Normal University (Natural Science Edition)*, 2008, 28(4): 48-51.
- [13] FONTENELE N M, OTOCH M L, GOMES-ROCHETTE N F, et al. Effect of lead on physiological and antioxidant responses in two *Vigna unguiculata* cultivars differing in Pb-accumulation[J]. *Chemosphere*,

- 2017, 176:397-404.
- [14] 向娟, 潘绍坤, 吴传秀, 等. 不同豇豆材料的镉积累特性比较研究[J]. 河南农业科学, 2020, 49(4): 114-119. XIANG J, PAN S K, WU C X, et al. Comparative study on cadmium accumulation characteristics of different cowpea materials[J]. *Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(4): 114-119.
- [15] 李琳, 于崧, 蒋永超, 等. 芸豆苗期耐盐碱性鉴定及品种筛选研究[J]. 植物生理学报, 2016, 52(1): 62-72. LI L, YU S, JIANG Y C, et al. Identification of salt tolerance and variety selection of kidney bean[J]. *Acta Phytophysiology*, 2016, 52(1): 62-72.
- [16] 陈琴, 张朝明, 郭元元, 等. 广西沿海地区不同长豇豆品种性状评价及品种筛选[J]. 种子, 2020, 39(12): 146-150, 159. CHEN Q, ZHANG C M, GUO Y Y, et al. Evaluation and selection of different cowpea varieties in Guangxi coastal area[J]. *Seed*, 2020, 39(12): 146-150, 159.
- [17] 田茂苑. 贵州喀斯特地区不同水稻土镉污染风险格局划分[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019. TIAN M Y. Risk pattern of cadmium pollution in different paddy soils in Guizhou Karst area[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [18] 毛春, 程国尧, 朱树国, 等. 贵州高海拔地区芸豆品种比较试验[J]. 贵州农业科学, 2005, 33(3): 38-39. MAO C, CHENG G Y, ZHU S G, et al. Comparison of kidney bean varieties in high altitude areas of Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2005, 33(3): 38-39.
- [19] 王垚, 胡洋, 马友华, 等. 生物炭对镉污染土壤有效态镉及土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 979-985. WANG Y, HU Y, MA Y H, et al. Effects of biochar on available cadmium and soil enzyme activities in cadmium contaminated soil[J]. *Soil Bulletin*, 2020, 51(4): 979-985.
- [20] 李想, 龙振华, 朱彦彦, 等. 东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2239-2248. LI X, LONG Z H, ZHU Y Y, et al. Study on safe production division of cadmium and lead pollution in protected leafy vegetables in north-east China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2239-2248.
- [21] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1028-1033. CAI Q L, LIN D S, WANG G, et al. Difference analysis of cadmium accumulation and transport capacity in different types of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1028-1033.
- [22] 李杰, 祝凌, 全利红, 等. 蔬菜温室长期种植下土壤重金属累积风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2159-2165. LI J, ZHU L, TONG L H, et al. Risk assessment on accumulation of heavy metals in soil under long-term cultivation in vegetable greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2159-2165.
- [23] 涂春艳, 陈婷婷, 廖长君, 等. 矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1713-1722. TU C Y, CHEN T T, LIAO C J, et al. Pollution assessment and enrichment characteristics of heavy metals in agricultural vegetables in mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1713-1722.
- [24] FAO, WHO. Joint FAO/WHO food standards programme codex committee on contaminants in foods[R]. Rome: FAO, WHO, 2011.
- [25] 付玉辉. Cd、Pb低积累蔬菜品种筛选与修复技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016. FU Y H. Study on screening and remediation technology of low Cd and Pb accumulation vegetables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [26] HU L F, MCBRIDE M B, CHENG H, et al. Root-induced changes to cadmium speciation in the rhizosphere of two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes[J]. *Environmental Research*, 2011, 111(3): 356-361.
- [27] HE B Y, LING L, ZHANG L Y, et al. Cultivar-specific differences in heavy metal (Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn) concentrations in water spinach (*Ipomoea aquatic* 'Forsk.') grown on metal-contaminated soil[J]. *Plant and Soil*, 2015, 386(1/2): 251-262.
- [28] 刘玉民. 酸铝环境马尾松根系分泌物特性及其缓解铝毒的根际效应[D]. 重庆: 西南大学, 2018. LIU Y M. Root exudates characteristics of masson pine under aluminum acid environment and its rhizosphere effect on reducing aluminum toxicity[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [29] 谢换换, 叶志鸿. 湿地植物根形态结构和泌氧与盐和重金属吸收、积累、耐性关系的研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 864-875. XIE H H, YE Z H. Research progress on the relationship between root morphological structure and oxygen secretion of wetland plants and salt and heavy metal absorption, accumulation and tolerance[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 40(3): 864-875.
- [30] 杨寒雯, 刘秀明, 刘方, 等. 喀斯特高镉地质背景区水稻镉的富集、转运特征与机理[J]. 地球与环境, 2021, 49(1): 18-24. YANG H W, LIU X M, LIU F, et al. Characteristics and mechanism of cadmium accumulation and transport in rice in Karst high cadmium geological background area[J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(1): 18-24.
- [31] 任艳军, 任学军, 马建军, 等. Cd/Cr复合胁迫下不同品种蔬菜对Cd和Cr积累与转运的差异研究[J]. 核农学报, 2018, 32(5): 993-1002. REN Y J, REN X J, MA J J, et al. Study on the difference of Cd and Cr accumulation and transport in different vegetables under Cd/Cr complex stress[J]. *Acta Nucifera Sinica*, 2018, 32(5): 993-1002.
- [32] 豆长明, 徐德聪, 周晓铁, 等. 铜陵矿区周边土壤-蔬菜系统中重金属的转移特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 920-927. DOU C M, XU D C, ZHOU X T, et al. Transfer characteristics of heavy metals in soil vegetable system around Tongling mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5): 920-927.
- [33] 张蕾, 李洋, 张阳. 常用肥料对作物重金属积累的影响及其机理研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(2): 123-131. ZHANG L, LI Y, ZHANG Y. Effect of common fertilizers on heavy metal accumulation in crops and its mechanism[J]. *China Agricultural Science and Technology Guide*, 2020, 22(2): 123-131.
- [34] 强承魁, 秦越华, 曹丹, 等. 小麦富集重金属的品种差异及其潜在健康风险评估[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(11): 1489-1496. QIANG C K, QIN Y H, CAN D, et al. Difference of heavy metal accumulation in wheat varieties and its potential health risk assessment[J]. *Acta Tritici Sinica*, 2017, 37(11): 1489-1496.
- [35] 姚诗源, 郭光光, 周修佩, 等. 氮、磷肥对蓖麻吸收积累矿区土壤铜的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 1068-1076. YAO

- S Y, GUO G G, ZHOU X P, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on copper uptake and accumulation in castor soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24(4): 1068–1076.
- [36] 冯爱焯, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 988–1000. FENG A X, HE H Z, LI N, et al. Screening of rice varieties with low accumulation of heavy metals based on multi-objective elements and their absorption and transportation characteristics [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 988–1000.
- [37] 邹素敏, 杜瑞英, 文典, 等. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(4): 714–720. ZOU S M, DU R Y, WEN D, et al. Pollution assessment and enrichment characteristics of heavy metals in different vegetables[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 26(4): 714–720.
- [38] LIANG C, XIAO H, HU Z, et al. Uptake, transportation, and accumulation of C_{60} fullerene and heavy metal ions (Cd, Cu, and Pb) in rice plants grown in an agricultural soil[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 330–338.
- [39] 薛艳芳, 李宗新, 张慧, 等. 氮素供应对小麦锌吸收、转运和向籽粒累积影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36): 24–30. XUE Y F, LI Z X, ZHANG H, et al. Research progress on effects of nitrogen supply on absorption, transport and accumulation of zinc in wheat[J]. *Chinese Agronomic Bulletin*, 2015, 31(36): 24–30.
- [40] 余志, 陈凤, 张军方, 等. 锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 2086–2094. YU Z, CHEN F, ZHANG J F, et al. Pollution status and risk assessment of heavy metals in vegetable soil and vegetables in zinc smelting area[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(5): 2086–2094.
- [41] 高清, 李淑英, 顾优丽, 等. 杭州市和睦湿地农田蔬菜中Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni污染评价及富集特性研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2014, 13(4): 386–390. GAO Q, LI S Y, GU Y L, et al. Pollution assessment and enrichment characteristics of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr and Ni in vegetables from Heme wetland in Hangzhou[J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 13(4): 386–390.
- [42] 张彦威, 张军, 徐冉, 等. 籽粒有毒重金属低富集大豆品种筛选及与环境作用效应分析[J]. 大豆科学, 2019, 38(6): 839–846. ZHANG Y W, ZHANG J, XU R, et al. Screening of soybean varieties with low accumulation of toxic heavy metals in grain and analysis of their effects on environment[J]. *Soybean Science*, 2019, 38(6): 839–846.
- [43] 赵秀芳, 王艺璇, 张永帅, 等. 山东安丘地区土壤-小麦系统重金属等元素间的相互作用[J]. 现代地质, 2020, 34(5): 936–944. ZHAO X F, WANG Y X, ZHANG Y S, et al. Interaction between heavy metals and other elements in soil wheat system in Anqiu area of Shandong Province[J]. *Modern Geology*, 2020, 34(5): 936–944.
- [44] 荆旭慧, 李恋卿, 潘根兴. 不同环境下土壤作物系统中重金属元素迁移分配特点[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 812–817. JING X H, LI L Q, PAN G X. Characteristics of heavy metal migration and distribution in soil crop system under different environments[J]. *Ecological Environment*, 2007, 16(3): 812–817.
- [45] 王祖伟, 李宗梅, 王景刚, 等. 天津污灌区土壤重金属含量与理化性质对小麦吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1406–1410. WANG Z W, LI Z M, WANG J G, et al. Effects of soil heavy metal content and physicochemical properties on heavy metal uptake by wheat in Tianjin sewage irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1406–1410.
- [46] RICHAU K H, KOZHEVNIKOVA A D, SEREGIN I V, et al. Chelation by histidine inhibits the vacuolar sequestration of nickel in roots of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *New Phytologist*, 2009, 183(1): 106–116.
- [47] 陈基旺, 屠乃美, 易镇邪, 等. 湖南镉污染稻区再生稻发展需解决的重点问题[J]. 农学学报, 2020, 10(1): 32–36. CHEN J W, TU N M, YI Z X, et al. Key problems to be solved in the development of ratooning rice in cadmium polluted rice areas in Hunan[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 10(1): 32–36.
- [48] 沈凤斌. 含镉小麦再敲土壤污染警钟[J]. 生态经济, 2017, 33(9): 10–13. SHEN F B. Wheat containing cadmium strikes the alarm of soil pollution again[J]. *Ecological Economy*, 2017, 33(9): 10–13.
- [49] 黄勇, 郭庆荣, 任海, 等. 珠江三角洲典型地区蔬菜重金属污染现状研究——以中山市和东莞市为例[J]. 生态环境学报, 2005, 14(4): 559–561. HUANG Y, GUO Q R, REN H, et al. Status of heavy metal pollution in vegetables in typical areas of Pearl River Delta: A case study of Zhongshan City and Dongguan City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 14(4): 559–561.
- [50] 李富荣, 徐爱平, 吴志超, 等. 大湾区根茎类蔬菜-农田土壤系统中10种重金属吸收特性及其种植安全性研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6): 1251–1259. LI F R, XU A P, WU Z C, et al. Study on the absorption characteristics and planting safety of 10 heavy metals in the system of rhizome vegetables farmland soil in Dawan District[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 29(6): 1251–1259.