

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.09.006

柴冠群, 王丽, 刘桂华, 等. 基于多目标重金属元素低积累大豆品种筛选 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(9): 57-66.

基于多目标重金属元素低积累大豆品种筛选

柴冠群¹, 王丽¹, 刘桂华¹, 蒋亚¹,
秦松¹, 范成五¹, 田小松²

1. 贵州省农业科学院 土壤肥料研究所, 贵阳 550006; 2. 重庆工程职业技术学院 资源与安全学院, 重庆 江津 402260

摘要: 为筛选适宜黔西北地区多目标重金属元素低积累的大豆品种, 明确不同品种大豆籽粒重金属积累能力的差异及基因型与环境的作用效应, 以黔西北主栽的 9 个大豆品种为研究对象, 在 L, Y 两地不同土壤环境种植, 测定各品种大豆籽粒产量与镉(Cd)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)的质量分数. 结果表明: 环境效应对大豆籽粒产量影响不显著, 在 L, Y 两地不同环境种植同一大豆品种, 其产量稳定性较好; 大豆籽粒 Cd, As, Pb, Cr 质量分数均受基因型、环境及基因型与环境互作的极显著影响; 大豆籽粒对重金属的富集系数从大到小依次为: Cd, As, Pb, Cr, 9 个品种大豆籽粒重金属质量分数均为安全水平; 根据大豆不同品种对同一重金属元素的积累差异, 可筛选出重金属低积累品种, ‘理想 M-7’在不同环境下具有稳定性, 为 Cd, As, Pb, Cr 复合低积累大豆品种, 且其产量可达 2 768.1~2 911.9 kg/hm². 因此, 9 个大豆品种均可作为黔西北 Cd 污染区的推荐品种, 其中, ‘理想 M-7’可作为 Cd, As, Pb, Cr 复合低积累大豆品种推荐.

关键词: 大豆; 基因型; 环境效应; 黔西北; 重金属

中图分类号: S565.1; X53 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2023)09-0057-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Screening of Soybean Varieties with Low Accumulation of Heavy Metals Based on Multi-Object Elements

CHAI Guanqun¹, WANG Li¹, LIU Guihua¹, JIANG Ya¹,
QIN Song¹, FAN Chengwu¹, TIAN Xiaosong²

1. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China;

2. School of Resources and Security, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Jiangjin Chongqing 402260, China

Abstract: In order to screen soybean varieties of low accumulation of multi-target heavy metal elements for Northwest Guizhou, and to clarify the differences in heavy metal accumulation ability of different soybean varieties and the effects of genotype and environment, 9 soybean varieties mainly planted in Northwest

收稿日期: 2022-11-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800602).

作者简介: 柴冠群, 硕士, 助理研究员, 主要从事农产品产地重金属污染防控研究.

通信作者: 范成五, 研究员.

Guizhou were used as research objects, and planted in different environments of L location and Y location. The grain yield and contents of cadmium (Cd), arsenic (As), lead (Pb) and chromium (Cr) of each variety were determined. The results showed that the effect of environment on soybean grain yield was not significant. The yield of same soybean variety was stable in different environments of L location and Y location. The contents of Cd, As, Pb and Cr in soybean seeds were significantly affected by genotype, environment and the interaction between genotype and environment. The bioconcentration factor of heavy metals in soybean seeds inducing as Cd, As, Pb, Cr. The heavy metal content of soybean seeds of 9 varieties was at the safe level. The low accumulation of heavy metals varieties can be screened out according to the differences of the same heavy metal element content among soybean varieties. Soybean variety 'Lixiang M-7' had stability in different environments, and was a low accumulation compound of Cd, As, Pb and Cr soybean variety. Its yield was 2 768.1—2 911.9 kg/hm², and not significantly different from that of high-yield soybean varieties. Therefore, the 9 soybean varieties can be used as recommended varieties in the Cd polluted area of Northwest Guizhou, among which, the soybean variety 'Lixiang M-7' was preferred to achieve safe production for heavy metals based on multi-object elements (Cd, As, Pb, Cr) in soybean.

Key words: soybean; genotype; environment variation; Northwest Guizhou; heavy metal

大豆(*Glycine max* L. Merr.)是中国重要的油料作物和高蛋白农产品,在我国人体膳食结构中具有不可替代性^[1-3]。农业农村部《“十四五”全国种植业发展规划》指出,为缓解大豆“卡脖子”风险,我国需多途径扩种大豆,至2025年大豆种植面积达10⁷ hm²,产量达2.3×10⁷ t^[4]。随着工农业的快速发展,近年耕地土壤重金属污染问题凸显,我国受到镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)等重金属污染的耕地面积约2×10⁷ hm²,每年约有1.2×10⁷ t的粮食受到重金属污染^[5]。耕地重金属污染不仅会导致作物营养亏缺、生长发育受阻、产量降低,而且影响农产品质量安全,并通过食物链威胁人体健康^[6]。在重金属污染的耕地上种植大豆势必增加其重金属污染风险,尤其在耕地资源紧缺且重金属含量高地质背景的贵州^[7]。因此,亟需开展重金属污染耕地大豆安全生产技术研究。

作物对土壤重金属吸收和积累的基因型差异为重金属低积累型作物品种的选育提供了可能性。种植重金属低积累作物品种由于成本低廉、操作简便、农户接受意愿强等特点,被广泛用于解决重金属污染耕地上的食品安全问题。前人在水稻^[8]、小麦^[9]、玉米^[10]等重金属低积累作物品种培育方面开展了大量研究。目前,大豆重金属积累基因型差异也有相关报道。Zhao等^[6]研究指出,大豆对重金属的富集能力从高到低依次为: Cd, As, Pb; 焦位雄等^[11]也发现,大豆对不同重金属元素富集能力存在差异,从高到低依次为: Cd, Hg, Pb; 赵云云等^[12]通过盆栽试验从11个大豆品种中筛选出了‘华夏3号’与‘桂M32’为Cd低积累型大豆品种; 智杨^[13]通过盆栽试验从25个大豆品种中筛选出了‘铁丰31号’为Cd, Pb同步低积累型大豆品种; 张彦威等^[2]通过在济南和滨州对120个大豆品种开展连续2年的田间小区试验,初步筛选出了适宜当地Cd, Hg, As, Pb, Cr污染耕地安全种植的大豆品种。有研究表明,不同的作物品种拥有各自的生态适栽区域,这使许多重金属低积累品种具有较强的地域性^[14]。因此,为保障大豆扩种和安全生产,有必要开展特定区域重金属低积累型大豆品种筛选。

大豆具备耐贫瘠和生物固氮等特性,常作为矿区复耕的重要经济作物^[15]。黔西北以旱地为主,大豆是其主要种植作物之一。黔西北地区矿产资源丰富,其耕地土壤主要受Cd, Pb, Cr, As污染,且在贵州省污染面积较大,存在一定面积的Cd, Pb, Cr, As复合污染耕地^[16],而当地大豆对重金属富集特征的相关研究较少。研究证实,除受基因差异影响外,作物积累重金属的差异还受地域环境因素的制约,例如区域气候、土壤类型与土壤重金属污染特征等^[17],前人筛选的大豆重金属低积累品种可能不适宜黔西北地区种植。迄今黔西北鲜有开展多目标重金属低积累大豆品种筛选研究,不利于指导解决大豆扩种与安全生产的问题。为此,本研究选取黔西北地区主推的9个大豆品种,在黔西北L, Y两地开展田间小区试验,比较不同大豆品种籽粒对黔西北地区潜在风险较大的重金属元素(Cd, As, Pb, Cr)的积累差异,研究大豆重金属质量分数的基因型和环境效应,筛选多目标元素重金属低积累大豆品种,为保障重金属污染耕地的大豆扩

种和安全生产提供支撑.

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地位于黔西北 L 地与 Y 地, 其土壤类型均为碳酸盐岩发育的黄壤. 2 个试验地土壤养分质量分数与重金属质量分数分别如表 1 与表 2 所示. 根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)^[18], L 地为受 Cd, Cr 复合污染的安全利用类耕地, 其土壤 Cd, Cr 质量分数分别是文献[18]中对应元素筛选值的 7.67 倍与 1.31 倍; Y 地为受 Cd 污染的安全利用类耕地, 其土壤 Cd 质量分数是文献[18]中对应元素筛选值的 2.47 倍.

表 1 供试土壤养分质量分数

试验地点	pH 值	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
L	6.38	38.68	1.67	1.95	11.66	168.68	78.26	216.75
Y	6.05	39.11	1.76	2.07	11.64	165.45	76.39	223.54

表 2 供试土壤重金属质量分数

试验地点	Cd/(mg · kg ⁻¹)	As/(mg · kg ⁻¹)	Pb/(mg · kg ⁻¹)	Cr/(mg · kg ⁻¹)
L	2.30±0.12	25.00±0.61	38.53±2.09	262±4.88
Y	0.74±0.06	5.78±0.53	27.13±1.01	80.70±2.36

供试大豆为研究区主推的 9 个大豆品种, 分别为‘本地种’‘理想 M-7’‘黔豆 5 号’‘黔豆 7 号’‘黔豆 8 号’‘黔豆 10 号’‘黔豆 12 号’‘黔豆 13 号’与‘黔豆 14 号’, ‘本地种’与‘理想 M-7’种子由毕节市农科所提供, 其余 7 个品种种子由贵州省油料作物研究所提供.

1.2 试验设计

在 L 地与 Y 地的试验基地, 于 2021 年 5—9 月通过田间小区试验开展 Cd, As, Pb, Cr 元素低积累大豆品种筛选研究. 以大豆品种为区分, 设置 9 个处理, 3 次重复, 共 27 个小区, 每个小区面积 12 m², 随机区组排列. 大豆种植规格为行距 0.3 m, 株距 0.1m, 每小区 10 行, 每行 40 窝, 每窝播种 5 粒大豆种子, 大豆第 1 片复叶长出后间苗, 每穴保留 3 株长势相近的植株. 大豆播种前一次性施入 450 kg/hm² 大豆控释肥(N : P₂O₅ : K₂O=10 : 15 : 12), L 地与 Y 地施用量一致, 供试肥料购自山东茂施生态肥料有限公司.

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集与制备

大豆收获时, 采用“梅花形”取样法分别采集 L 地与 Y 地各小区大豆籽粒样品与土壤样品, 同时称量各小区大豆产量. 大豆籽粒带回试验室后, 用蒸馏水将其清洗干净, 吸水纸擦干, 置于鼓风干燥箱中, 105 °C 杀青 30 min, 65 °C 烘干至恒质量, 使用球磨仪研磨过 0.15 mm 尼龙筛备用. 土壤样品风干后, 用玛瑙研钵研磨, 分别过 2, 0.15 mm 尼龙筛备用.

1.3.2 土壤 pH 值与重金属测定

以 1 : 2.5 土水质量比混合土壤与蒸馏水, 用磁力搅拌器搅拌 60 s, 用 PHS-3E 型酸度计测定土壤 pH 值^[19]. 土壤样品采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消解, 使用 Elan 9 000 型电感耦合等离子体质谱仪测定土壤重金属 Cd, Pb, Cr 质量分数; 土壤样品采用王水消解, 使用 LC-AFS 9 700 型原子荧光仪测定土壤 As 质量分数^[20]. 试验过程中采用土壤标样(GBW07405)进行质控, 其回收率为 93.6%~102.3%, 全程做空白试验.

1.3.3 大豆籽粒重金属测定

参照文献[21]中的方法, 大豆籽粒样品采用压力罐法消解后, 用 Elan 9 000 型电感耦合等离子体质谱

仪测定其 Cd, As, Pb, Cr 质量分数. 试验过程中采用黄豆标准物质(GBW10013)进行质控, 其回收率为 98.7%~100.6%, 全程做空白试验.

1.4 数据分析

1.4.1 籽粒重金属富集系数

作物重金属富集系数(Biocon Centration Factor, BCF)常被用来分析重金属在土壤-作物系统中的积累水平^[22], 为表征不同种质资源大豆籽粒对各重金属元素的吸收特征, 计算了不同品种大豆籽粒对 Cd, As, Pb, Cr 的籽粒富集系数, 公式如下:

$$BCF_i = \frac{C_i}{T_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: BCF_i 为大豆籽粒对重金属 i 的富集系数; C_i 为大豆籽粒中重金属 i 的测定值(mg/kg); T_i 为土壤重金属 i 的测定值(mg/kg).

1.4.2 大豆籽粒重金属安全性评价

本研究根据文献^[23]中粮食 Cd, As, Pb, Cr 限值, 采用单因子污染指数法(P_i)和内梅罗综合污染指数法(P_z)评价 L 地与 Y 地试验大豆籽粒的 Cd, As, Pb, Cr 安全性^[24-25], 公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

$$P_z = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中: P_i 为单因子污染指数; C_i 为大豆籽粒中重金属 i 的测定值(mg/kg); S_i 为大豆籽粒中重金属 i 的限值, 大豆籽粒 Cd, As, Pb, Cr 限值分别为 0.2, 0.5, 0.8, 1.0 mg/kg^[23]; P_z 为综合污染指数; $P_{i\max}$ 为最大单项污染指数; $P_{i\text{ave}}$ 为平均单项污染指数. 参照文献^[10]对大豆籽粒重金属综合污染风险的研究进行划分, 划分标准如表 3 所示.

表 3 作物重金属污染风险划分

级别	P_z	污染风险
1	$P_z < 0.7$	作物对重金属综合积累能力低, 污染风险为安全水平.
2	$0.7 \leq P_z < 1$	作物对重金属综合积累能力较低, 污染风险为重金属潜在污染.
3	$1 \leq P_z < 2$	作物对重金属综合积累能力中等, 污染风险为重金属轻度污染.
4	$2 \leq P_z < 3$	作物对重金属综合积累能力较强, 污染风险为重金属中度污染.
5	$P_z \geq 3$	作物对重金属综合积累能力强, 污染风险为重金属重度污染.

试验数据采用 Excel 2010 软件进行整理与统计, 应用 IBM SPSS Statistics 22.0 软件进行方差分析和聚类分析, 使用 Sigmaplot 14.0 软件作图.

2 结果与分析

2.1 大豆籽粒产量

如图 1 可知, 同一地点, 不同品种大豆籽粒产量存在差异; L 地大豆产量变幅为 1 547.7~3 080.4 kg/hm², ‘本地种’籽粒产量最高, ‘黔豆 12 号’籽粒产量最低, 两者差异有统计学意义($p < 0.05$); Y 地大豆产量变幅为 1 800.9~2 957.0 kg/hm², ‘黔豆 10 号’籽粒产量最高, ‘黔豆 12 号’籽粒产量最低, 两者差异有统计学意义($p < 0.05$). 对不同大豆品种、不同试验地点的大豆籽粒产量进行双因素方差分析发现, 修正模型的 F 值为 6.53, $p < 0.01$, 差异极有统计学意义, 说明该模型具有统计学意义. 品种、品种×地点的 F 值分别为 8.81, 4.96, 均达极有统计学意义水平($p < 0.01$), 地点的 F 值为 0.84, $p > 0.05$, 说明基因型与试验环境间的相互作用均会对籽粒产量产生显著影响, 试验环境对籽粒产量无显著影响.

2.2 不同处理土壤 pH 值与重金属质量分数特征

如表 4 所示, 在 L 地与 Y 地, 土壤 pH 值变幅分别为 6.08~6.42, 5.76~6.12; 同一地点不同处理土壤 pH 值差异无统计学意义. L 地土壤 Cd, As, Pb, Cr 平均质量分数分别为 2.30, 25.00, 38.46, 261.97 mg/kg, Y 地土壤 Cd, As, Pb, Cr 平均质量分数分别为 0.74, 5.78, 27.14, 80.88 mg/kg, L 地土壤 Cd, As, Pb, Cr 平均质量分数分别是 Y 地的 3.11, 4.33, 1.42, 3.24 倍. L 地不同处理土壤 Cd, As, Pb, Cr 质量分数差异均无统计学意义, Y 地与 L 地表现一致, 说明 L, Y 两个试验地块土壤重金属田间异质性均较低, 适宜做田间小区试验. 通过独立样本 *t* 检验可知, L, Y 两地土壤 pH 值、Cd, As, Pb, Cr 质量分数差异有统计学意义. L 地土壤 Cd, As, Pb, Cr 平均质量分数分别是《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)^[18] 对应元素风险筛选值的 7.68, 0.63, 0.43, 1.75 倍; Y 地土壤 Cd, As, Pb, Cr 平均质量分数分别是对应元素风险筛选值的 2.47, 0.14, 0.30, 0.54 倍. L 地土壤 Cd, As, Pb, Cr 平均质量分数分别是贵州对应元素背景值的 5.76, 1.85, 1.15, 2.65 倍; Y 地土壤 Cd, As, Pb, Cr 平均质量分数分别是贵州对应元素背景值的 1.85, 0.43, 0.81, 0.82 倍. 综上, L, Y 两个试验地块土壤同一重金属元素质量分数差异有统计学意义, 适宜作为多目标重金属元素(Cd, As, Pb, Cr)胁迫试验田.

表 4 不同处理土壤 pH 值及重金属质量分数特征

品种	pH 值		Cd/(mg·kg ⁻¹)		As/(mg·kg ⁻¹)		Pb/(mg·kg ⁻¹)		Cr/(mg·kg ⁻¹)	
	L	Y	L	Y	L	Y	L	Y	L	Y
本地种	6.28±0.12a	6.11±0.09a	2.27±0.21a	0.69±0.09a	24.98±1.11a	6.37±0.42a	39.68±1.38a	28.23±1.22a	258.36±6.58a	82.16±1.82a
‘黔豆 5 号’	6.37±0.10a	5.76±0.16a	2.24±0.17a	0.68±0.05a	24.86±1.21a	6.28±0.53a	35.89±3.43a	28.16±0.98a	256.29±5.37a	77.45±2.81a
‘黔豆 7 号’	6.41±0.21a	6.07±0.08a	2.35±0.29a	0.75±0.10a	25.64±1.18a	5.12±0.86a	42.39±3.95a	27.26±1.78a	268.37±6.18a	81.28±2.18a
‘黔豆 8 号’	6.27±0.16a	5.98±0.13a	2.11±0.21a	0.79±0.11a	25.76±1.09a	5.68±0.63a	37.28±3.69a	26.45±2.21a	270.12±7.78a	79.26±2.76a
‘黔豆 10 号’	6.28±0.09a	6.04±0.16a	2.45±0.18a	0.76±0.08a	23.89±1.12a	5.48±0.53a	36.56±2.98a	25.18±2.31a	259.89±8.76a	83.12±2.73a
‘黔豆 12 号’	6.34±0.14a	5.89±0.18a	2.36±0.13a	0.81±0.11a	24.87±1.08a	6.59±0.62a	38.75±1.76a	29.16±2.72a	256.47±9.23a	82.14±2.81a
‘黔豆 13 号’	6.08±0.16a	6.12±0.19a	2.33±0.09a	0.68±0.06a	24.76±1.13a	5.89±0.34a	40.21±2.46a	25.31±2.16a	263.15±6.27a	78.24±2.89a
‘黔豆 14 号’	6.42±0.24a	6.03±0.12a	2.29±0.21a	0.74±0.09a	24.59±1.15a	5.41±0.53a	36.12±3.28a	27.67±2.23a	263.45±6.32a	83.56±3.79a
‘理想 M-7’	6.35±0.15a	6.05±0.14a	2.34±0.14a	0.76±0.07a	25.68±0.85a	5.23±0.61a	39.24±2.39a	26.87±1.96a	261.63±7.28a	80.72±2.16a
均值	6.31A	6.01B	2.30A	0.74B	25.00A	5.78B	38.46A	27.14B	261.97A	80.88B
土壤重金属 污染风险 筛选值 ^[18]	—		0.3		40		90		150	
贵州土壤重 金属背景值 ^[7]	—		0.4		13.48		33.57		98.98	

同列不同小写字母表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$). 同行不同大写字母表示处理间差异有统计学意义($p < 0.05$). 下同.

2.3 大豆籽粒重金属质量分数特征与安全性评价

2.3.1 大豆籽粒重金属质量分数特征

如图 2 所示, 就 Cd 而言, 同一地点不同品种大豆籽粒 Cd 质量分数存在较大差异; 在 L 地, 不同大

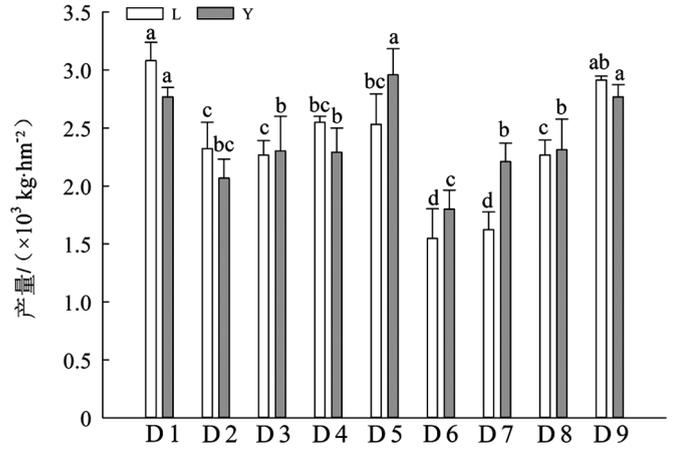


图 1 不同大豆品种产量差异

豆品种籽粒 Cd 质量分数变幅为 0.059~0.168 mg/kg, ‘黔豆 13 号’籽粒 Cd 质量分数最高, ‘理想 M-7’籽粒 Cd 质量分数最低, 两者相差 1.85 倍. 在 Y 地, 不同大豆品种籽粒 Cd 质量分数变幅为 0.068~0.156 mg/kg, ‘黔豆 13 号’籽粒 Cd 质量分数最高, ‘理想 M-7’籽粒 Cd 质量分数最低, 两者相差 1.29 倍, 两地不同品种大豆籽粒 Cd 质量分数变化趋势一致; 就 As 而言, 在 L 地, 不同大豆品种籽粒 As 质量分数变幅为 0.019~0.213 mg/kg, ‘黔豆 5 号’籽粒 As 质量分数最高, ‘理想 M-7’籽粒 As 质量分数最低, 两者相差 10.21 倍. 在 Y 地, 不同大豆品种籽粒 As 质量分数变幅为 0.006~0.012 mg/kg, ‘黔豆 5 号’籽粒 As 质量分数最高, ‘黔豆 7 号’‘黔豆 12 号’与‘理想 M-7’籽粒 As 质量分数均为 0.006 mg/kg; 就 Pb 而言, 在 L 地, 不同大豆品种籽粒 Pb 质量分数变幅为 0.020~0.193 mg/kg, ‘黔豆 5 号’籽粒 Pb 质量分数最高, ‘理想 M-7’籽粒 Pb 质量分数最低, 两者相差 8.65 倍. 在 Y 地, 不同大豆品种籽粒 Pb 质量分数变幅为 0.010~0.023 mg/kg, ‘黔豆 5 号’籽粒 Pb 质量分数最高, ‘黔豆 12 号’‘黔豆 13 号’‘黔豆 14 号’籽粒 Pb 质量分数均为 0.010 mg/kg; 就 Cr 而言, 在 L 地, 不同大豆品种籽粒 Cr 质量分数变幅为 0.100~0.697 mg/kg, ‘黔豆 5 号’籽粒 Cr 质量分数最高, ‘黔豆 7 号’籽粒 Cr 质量分数最低, 两者相差 5.97 倍. Y 地不同大豆品种籽粒 Cr 质量分数变化趋势与 L 地表现一致.

对不同大豆品种、不同试验地点下的籽粒 Cd, As, Pb, Cr 质量分数分别进行方差分析(图 2), 大豆籽粒 Cd, As, Pb, Cr 质量分数在品种间、地点间、品种与地点的相互作用条件下差异均极有统计学意义. 说明大豆籽粒 Cd, As, Pb, Cr 质量分数均受基因型、环境及基因型与环境互作的极显著影响. 因此, 筛选稳定型重金属低积累作物品种时, 应在特定重金属污染环境条件下进行基因型选择.

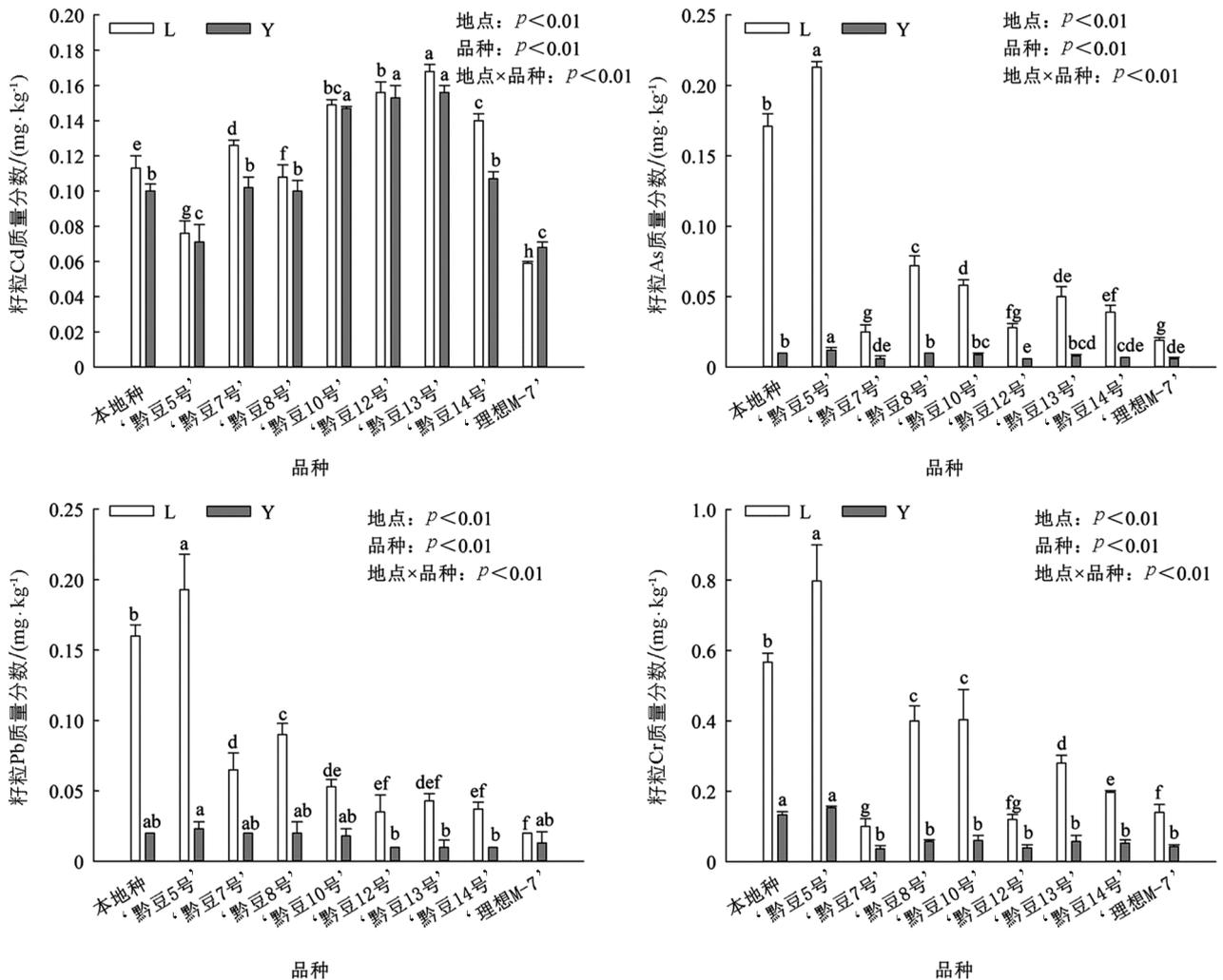


图 2 不同大豆品种籽粒重金属质量分数差异

2.3.2 大豆籽粒重金属安全性评价

如表 5 所示, 在 L 地与 Y 地, P_z 变幅分别为 0.24~0.67, 0.26~0.59, 两地均表现为‘黔豆 13 号’ P_z 最高, ‘理想 M-7’最低. 整体上, 大豆籽粒 Cd 与 Cr 单因子污染指数较高, 在 L 地与 Y 地, 9 个大豆品种籽粒 Cd, As, Pb, Cr 质量分数均为安全水平.

表 5 不同品种大豆籽粒重金属安全性评价

品种	P_{Cd}		P_{As}		P_{Pb}		P_{Cr}		P_z		污染水平	
	L	Y	L	Y	L	Y	L	Y	L	Y	L	Y
本地种	0.56	0.50	0.34	0.02	0.20	0.02	0.57	0.13	0.58	0.39	安全	安全
‘黔豆 5 号’	0.38	0.35	0.43	0.02	0.24	0.03	0.69	0.15	0.66	0.29	安全	安全
‘黔豆 7 号’	0.63	0.51	0.05	0.01	0.08	0.02	0.10	0.04	0.49	0.39	安全	安全
‘黔豆 8 号’	0.54	0.50	0.14	0.02	0.11	0.02	0.40	0.06	0.48	0.38	安全	安全
‘黔豆 10 号’	0.74	0.73	0.12	0.02	0.07	0.02	0.40	0.06	0.62	0.56	安全	安全
‘黔豆 12 号’	0.78	0.76	0.06	0.01	0.04	0.01	0.12	0.04	0.61	0.58	安全	安全
‘黔豆 13 号’	0.84	0.78	0.10	0.02	0.05	0.01	0.28	0.06	0.67	0.59	安全	安全
‘黔豆 14 号’	0.70	0.53	0.08	0.01	0.05	0.01	0.20	0.05	0.56	0.41	安全	安全
‘理想 M-7’	0.29	0.34	0.04	0.01	0.02	0.02	0.14	0.04	0.24	0.26	安全	安全

2.4 大豆籽粒重金属富集特征

如表 6 所示, 9 个大豆品种籽粒对各重金属元素的平均富集系数整体上从大到小依次为: BCF_{Cd} (10.47%), BCF_{As} (0.22%), BCF_{Pb} (0.12%), BCF_{Cr} (0.11%), 说明大豆籽粒对 Cd 的富集能力较强, 对 Cr 的富集能力较弱. 就 Cd 而言, L, Y 两地不同品种籽粒对 Cd 的富集系数变化趋势一致, 均表现为‘黔豆 13 号’最高, ‘理想 M-7’最低. L, Y 两地不同品种籽粒对 As 的富集系数均表现为‘黔豆 5 号’最高, ‘理想 M-7’最低; L, Y 两地不同品种籽粒对 Pb 的富集系数均表现为‘黔豆 5 号’最高; L, Y 两地不同品种籽粒对 Cr 的富集系数均表现为‘黔豆 5 号’最高, ‘理想 M-7’最低. 说明‘理想 M-7’籽粒对土壤 Cd, As, Pb, Cr 富集能力较强.

表 6 不同品种大豆籽粒重金属富集系数差异

品种	$BCF_{Cd}/\%$		$BCF_{As}/\%$		$BCF_{Pb}/\%$		$BCF_{Cr}/\%$	
	L	Y	L	Y	L	Y	L	Y
本地种	4.91±0.30e	13.59±0.58b	0.68±0.04b	0.17±0.02b	0.41±0.02b	0.05±0.01ab	0.22±0.01b	0.16±0.01b
‘黔豆 5 号’	3.32±0.28f	9.65±1.39c	0.85±0.02a	0.21±0.01a	0.50±0.06a	0.06±0.01a	0.38±0.04a	0.19±0.01a
‘黔豆 7 号’	5.47±0.13d	13.90±0.83b	0.10±0.02g	0.10±0.03d	0.17±0.03d	0.05±0.02ab	0.05±0.01e	0.05±0.01c
‘黔豆 8 号’	4.69±0.30e	13.54±0.82b	0.29±0.03c	0.17±0.01b	0.23±0.02c	0.05±0.02ab	0.15±0.02c	0.07±0.01c
‘黔豆 10 号’	6.49±0.13bc	19.93±0.13a	0.23±0.02d	0.16±0.01b	0.14±0.01d	0.05±0.01ab	0.15±0.03c	0.07±0.02c
‘黔豆 12 号’	6.78±0.24b	20.74±0.99a	0.11±0.01fg	0.10±0.01d	0.09±0.03ef	0.03±0.01b	0.05±0.01e	0.05±0.01c
‘黔豆 13 号’	11.68±0.17a	21.20±0.59a	0.20±0.03de	0.14±0.01bc	0.11±0.01de	0.03±0.01b	0.11±0.01d	0.07±0.02c
‘黔豆 14 号’	6.10±0.16c	14.58±0.50b	0.16±0.02ef	0.12±0.01cd	0.09±0.01ef	0.03±0.01b	0.07±0.01de	0.07±0.01c
‘理想 M-7’	2.55±0.04g	9.28±0.45c	0.07±0.01g	0.10±0.01d	0.05±0.01f	0.03±0.01b	0.04±0.01e	0.04±0.01c

2.5 聚类分析

虽然在 L, Y 两地试验地块种植的 9 个大豆品种籽粒 Cd, As, Pb, Cr 质量分数均为安全水平(表 5), 但是为筛选出对土壤 Cd, As, Pb, Cr 均具有低积累能力的大豆籽粒品种, 本研究采用系统聚类分析法-组间连接-平方 Euclidean 距离分析方法对 L, Y 两地种植的 9 个大豆品种籽粒重金属质量分数进行分析, 将其分成高质量分数、中间质量分数与低质量分数 3 类, 分析结果如图 3 所示. ‘黔豆 5 号’与‘理想 M-7’可作为籽粒 Cd 低质量分数大豆推荐品种, 在两地表现较稳定; ‘黔豆 7 号’‘黔豆 10 号’‘黔豆 12 号’‘黔豆 13 号’‘黔豆 14 号’与‘理想 M-7’可作为 As 低质量分数大豆推荐品种, 在两地表现较稳定; ‘黔豆 12 号’

‘黔豆 13 号’‘黔豆 14 号’与‘理想 M-7’可作为 Pb 低质量分数大豆推荐品种,在两地表现较稳定;‘黔豆 7 号’‘黔豆 12 号’‘黔豆 14 号’与‘理想 M-7’可作为 Cr 低质量分数大豆推荐品种,在两地表现较稳定. 综上,在 L, Y 两地,‘理想 M-7’可作为多目标重金属元素(Cd, As, Pb, Cr)复合低质量分数大豆推荐品种.

□ 低质量分数 □ 中质量分数 □ 高质量分数



图 3 不同品种大豆籽粒重金属质量分数聚类分析

3 讨论

大豆是我国重要的粮食作物和经济作物,近年来我国大豆的消费量和进口量与日俱增,已成为世界最大的大豆进口国和消费国,年进口量约占全球出口量的 60%^[26-27]. 在新形势下,通过相关技术保障大豆扩种和安全生产,对深入推进我国大豆振兴计划具有重要意义^[28]. 作物产量表现主要受 3 个方面因素的影响,首先是不同品种因素形成的基因型效应,其次是不同地点因素形成的环境效应,再次是基因型与环境的互作效应^[10, 29]. 本研究中,不同大豆品种及大豆品种与试验环境间的相互作用均会对籽粒产量产生显著影响,而本试验中不同试验环境对大豆籽粒产量无显著影响. 说明本研究中 9 个大豆试验品种在黔西北地区产量稳定性较好,大豆产量差异主要受基因型及基因型与环境互作效应的影响,这为黔西北筛选稳产、重金属低积累大豆品种提供了可能. 据前人报道,大豆易受重金属污染,Cd 是大豆重金属污染中最重要的来源,如美国调查报告显示,大豆 Cd 积累浓度远高于其他主要农作物^[30],我国也有报道,南方地区生产的大豆受重金属污染样品占比较高,受 Cd, Pb, As 污染样品占比分别为 86.67%, 40.00%, 66.67%^[6];此外,阳小凤等^[15]在 Cd 污染耕地上开展的不同大豆品种 Cd 吸收差异研究中发现,62 个大豆品种中仅 1 个大豆品种籽粒 Cd 质量分数低于国标限值(0.2 mg/kg)^[23]. 本研究中,试验地土壤均为重金属污染土壤,而大豆籽粒重金属(Cd, As, Pb, Cr)质量分数均远低于国标限值^[23]且为安全水平,这可能与碳酸盐岩发育土壤重金属主要以残渣态为主,生物活性组分较低有关^[31]. 刘鸿雁等^[32]也指出碳酸盐岩发育土壤中 CaO 质量分数较高,具有一定的酸碱缓冲能力,即便土壤重金属质量分数较高,但生物活性较低,仍能够保证农产品的安全生产. 此外,本研究中同一地点不同品种大豆籽粒重金属质量分数差异较大,且通过聚类分析将本研究中大豆品种按籽粒重金属质量分数分为 3 种类型,说明基因型对大豆籽粒重金属质量分数有显著影响. 有研究表明,根系分泌的酚类、有机酸等物质能够促进或抑制作物吸收重金属^[33],而不同品种根系分泌物成分或释放速率存在差异^[34];也有研究认为作物不同品种地下部分转运重金属至籽粒的能力存在差异^[10],这可能是不同品种大豆籽粒 Cd, As, Pb, Cr 积累出现差异的原因之一.

筛选低重金属积累大豆品种对其安全生产具有十分重要的意义. 前人多是基于单一重金属、单一试验

环境等条件开展大豆重金属低积累品种筛选的研究^[2, 12-13],张彦威等^[2]虽然在济南和滨州两地开展了不同品种大豆籽粒 Cd, Hg, As, Pb, Cr 质量分数差异的研究,但重点是围绕单一重金属低积累品种的筛选,本研究中筛选出了能够同时满足籽粒 Cd, As, Pb, Cr 低积累的大豆品种(‘理想 M-7’),而且‘理想 M-7’在 L, Y 两地籽粒产量稳定,其产量均与最高产量品种差异无统计学意义,达 2 768.1~2 911.9 kg/hm²。同时,本研究与张彦威等^[2]的研究结论一致,即大豆籽粒 Cd, As, Pb, Cr 质量分数均受基因型、环境及基因型与环境互作的极显著影响。因此,为实现黔西北地区大豆多目标重金属安全生产,优先推荐种植‘理想 M-7’大豆品种。

4 结论

大豆籽粒 Cd, As, Pb, Cr 质量分数均受基因型、环境及基因型与环境互作效应的极显著影响。在黔西北 Cd 污染耕地种植 9 个试验品种均能实现重金属 Cd, As, Pb, Cr 安全生产,其中,‘理想 M-7’可作为 Cd, As, Pb, Cr 复合低质量分数大豆品种推荐。

参考文献:

- [1] 何艳,黄晓伟,程中一,等.新形势下大豆产地土壤环境保护与功能提升的研发建议[J].土壤学报,2021,58(2):269-280.
- [2] 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.
- [3] ZHANG S, SONG J, WU L H, et al. Worldwide Cadmium Accumulation in Soybean Grains and Feasibility of Food Production on Contaminated Calcareous Soils [J]. Environmental Pollution, 2021, 269: 116153.
- [4] 农业农村部.“十四五”全国种植业发展规划 [EB/OL]. (2022-04-01) [2022-10-13]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2022/202202/202204/t20220401_6395092.htm.
- [5] 刁杰.我国农田土壤重金属污染现状、危害及风险评价研究[J].江西化工,2021,37(6):27-29.
- [6] ZHAO Y Y, FANG X L, MU Y H, et al. Metal Pollution (Cd, Pb, Zn, and As) in Agricultural Soils and Soybean, *Glycine max*, in Southern China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2014, 92(4): 427-432.
- [7] 蔡大为,李龙波,蒋国才,等.贵州耕地主要元素地球化学背景值统计与分析[J].贵州地质,2020,37(3):233-239.
- [8] HU Y A, CHENG H F, TAO S. The Challenges and Solutions for Cadmium-Contaminated Rice in China: A Critical Review [J]. Environment International, 2016, 92: 515-532.
- [9] LIU N, HUANG X M, SUN L M, et al. Screening Stably Low Cadmium and Moderately High Micronutrients Wheat Cultivars under Three Different Agricultural Environments of China [J]. Chemosphere, 2020, 241: 125065.
- [10] 柴冠群,周礼兴,王丽,等.镉污染耕地玉米重金属安全品种筛选[J].河南农业科学,2022,51(10):74-85.
- [11] 焦位雄,杨虎德,冯丹妮,等. Cd, Hg, Pb 胁迫下不同作物可食部分重金属含量及累积特征研究[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1726-1733.
- [12] 赵云云,钟彩霞,方小龙,等.华南地区夏播大豆品种镉耐性及籽粒镉积累的差异[J].大豆科学,2013,32(3):336-340.
- [13] 智杨.大豆品种间镉铅低积累性与品质差异性的评估与相关性[D].沈阳:东北大学,2015.
- [14] 陈小华,沈根祥,白玉杰,等.不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低积累品种筛选[J].环境科学,2019,40(10):4647-4653.
- [15] 阳小凤,马淑梅,黄山,等.农田镉污染对大豆镉吸收特性及其产量的影响[J].作物研究,2017,31(6):668-672.
- [16] 冯济舟.贵州省地球化学图集[M].北京:地质出版社,2008:31-35.
- [17] 柴冠群,周礼兴,王丽,等.不同品种马铃薯块茎 Cd 吸收特征及食用安全性评价[J].河南农业科学,2023,52(3):73-81.
- [18] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB 15618-2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

- [19] 周嵘, 徐宸, 冉茂, 等. 重庆市万州植烟区土壤养分现状及施肥区划 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 82-92.
- [20] 安雨丽, 李顺晋, 张育文, 等. 有机肥施用年限对菜地重金属累积迁移的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(9): 41-51.
- [21] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准食品中多元素的测定: GB 5009.268-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] DING C F, ZHANG T L, WANG X X, et al. Prediction Model for Cadmium Transfer from Soil to Carrot (*Daucus carota* L.) and Its Application to Derive Soil Thresholds for Food Safety [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(43): 10273-10282.
- [23] 中华人民共和国农业农村部. 粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量: NY 861-2004 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [24] 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 等. 镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 [J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5545-5553.
- [25] 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.
- [26] 张彩霞, 付桢. 国际背景下中国大豆的生产困境分析与对策 [J]. 河北经贸大学学报(综合版), 2020, 20(4): 73-78.
- [27] WU F, GENG Y, ZHANG Y Q, et al. Assessing Sustainability of Soybean Supply in China: Evidence from Provincial Production and Trade Data [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 119006.
- [28] 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, 1614.
- [29] 孙宪印, 米勇, 王超, 等. 基因型和环境及其互作效应对旱肥地小麦产量性状的影响 [J]. 分子植物育种, 2021, 19(17): 5899-5908.
- [30] WOLNIK K A, FRICKE F L, CAPAR S G, et al. Elements in Major Raw Agricultural Crops in the United States. 1. Cadmium and Lead in Lettuce, Peanuts, Potatoes, Soybeans, Sweet Corn, and Wheat [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1983, 31(6): 1240-1244.
- [31] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 [J]. 环境科学, 2020, 41(1): 449-459.
- [32] 刘鸿雁, 涂宇, 顾小凤, 等. 地球化学高背景农田土壤重金属镉的累积效应及环境影响 [J]. 山地农业生物学报, 2018, 37(5): 1-6.
- [33] XIN J L, HUANG B F, DAI H W, et al. Roles of Rhizosphere and Root-Derived Organic Acids in Cd Accumulation by Two Hot Pepper Cultivars [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(8): 6254-6261.
- [34] HE B Y, YU D P, CHEN Y, et al. Use of Low-Calcium Cultivars to Reduce Cadmium Uptake and Accumulation in Edible Amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) [J]. Chemosphere, 2017, 171: 588-594.

责任编辑 包颖

崔玉洁