



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

张彦威¹, 张 军², 徐 冉¹, 李 伟¹, 张礼凤¹, 刘 薇¹, 王彩洁¹, 林延慧¹

(1. 山东省农业科学院 作物研究所, 山东 济南 250100; 2. 滨州职业学院, 山东 滨州 256603)

摘 要:作物对重金属的吸收和积累具有显著的品种间差异,为明确不同大豆品种重金属积累能力的差异及基因型与环境的作用效应,并筛选有毒重金属低富集的大豆品种,本研究收集 120 份大豆种质,连续 2 年在济南和滨州两地不同环境种植,测定各品种大豆籽粒中铅(Pb)、铬(Cr)、砷(As)、镉(Cd)和汞(Hg)的含量。结果表明:大豆籽粒不同重金属含量存在很大差异,总体表现为 $Cr > Pb > As > Cd > Hg$;各重金属元素在不同大豆品种籽粒中的含量均存在很大差异,对不同元素具有高或低积累特性品种的积累能力在不同环境下具有稳定性。基因型、环境及基因型与环境互作对大豆籽粒 Pb、Cr、As、Cd、Hg 含量均具有极显著影响,且大豆籽粒 Pb 含量与产量显著负相关。

关键词:大豆;籽粒;重金属;基因型;环境效应

Screening of Low Enriched Soybean Varieties with Toxic Heavy Metals and the Interaction with the Environment

ZHANG Yan-wei¹, ZHANG Jun², XU Ran¹, LI Wei¹, ZHANG Li-feng¹, LIU Wei¹, WANG Cai-jie¹, LIN Yan-hui¹

(1. Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2. Binzhou Vocational College, Binzhou 256603, China)

Abstract: The heavy metal accumulation in crops varies with genotypes. In order to define the difference of heavy metal accumulation ability among different soybeans and analyze the mutual effects with environment, 120 soybean germplasms were planted in Jinan and Binzhou in two years, respectively. Pb, Cr, As, Cd and Hg content in soybean seeds were analyzed by inductively coupled plasmas mass spectrometry (ICP-MS). Results showed that the heavy metals content in soybean seeds were significantly different due to the elements, which were considered as $Cr > Pb > As > Cd > Hg$. Moreover, the heavy metal accumulation in seeds of different soybean cultivars varied significantly, and the accumulation capacity of varieties with high or low accumulation of different elements was stable under different environments. Genotype, environment and the interaction between genotype and environment showed significant effects on the accumulation of Pb, Cr, As, Cd and Hg in soybean seeds. Significant negative correlation was found between Pb content in soybean seeds and soybean yield.

Keywords: Soybean; Seed; Heavy metal; Genotype; Environment variation

随着社会和经济的快速发展,人类活动对土壤重金属污染的贡献越来越大^[1-3],土壤重金属污染已经成为世界范围内的严重环境问题^[4]。目前我国耕地重金属污染的面积占耕地总量的 1/6 左右,其中 Cd 元素是当前我国耕地土壤重金属污染的最主要元素^[5]。2011 年,《重金属污染综合防治“十二五”规划》获得国务院正式批复,防治规划力求控制包括铅(Pb)、汞(Hg)、镉(Cd)、铬(Cr)和类金属砷(As)在内的 5 种重金属^[6]。农田土壤中重金属污染主要来源于污染物的大气沉降、污水农灌、农用物质施用和固体废弃物堆放等^[7]。重金属能够扰乱植物的光合作用、呼吸作用、抗氧化系统^[8-10],抑制植物的细胞分裂和伸长^[11],导致植物体营养亏缺,从而对作物的产量和品质造成严重影响^[12-14]。重金属被作物吸收富集达到一定阈值后能够通过食物链威胁人类健康,骨痛病^[15-16]、水俣病^[17]、镉

米^[18]、高血铅^[19]等病症屡见报道。

土地的绿色开发及作物的安全生产已经越来越引起人们的关注,筛选和选育低重金属积累品种是在中、轻度重金属污染土地上实现作物安全生产的较为经济有效的方法。作物对重金属的吸收和积累具有显著的品种间差异^[20]。陈小华等^[21]对上海市常见农作物在 Cd 污染土壤中的研究发现,不同作物可食部位 Cd 的富集系数由大到小依次为小麦 > 菠菜 > 水稻 > 青椒 > 花菜 > 西红柿 > 黄瓜 > 豇豆。陆美斌等^[22]采集 393 份中国黄淮海和长江中下游两大小麦优势产区的 8 个省(市)小麦样品分析发现,小麦受到的重金属 Cd 污染程度较轻,区域间和品种间差异都较为明显。褚卓栋等^[23]对 11 个中草药重金属富集能力的研究发现不同中草药对土壤重金属的累积能力存在明显差异,其中紫苑、知母对 Cd 富集能力较强,白芷、北沙参对 Hg 富

收稿日期:2019-05-05

基金项目:山东省农业科学院农业科技创新工程(CXGC2018D02);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-CES16);山东省农业重大应用技术创新项目;山东省农业良种工程(2019LZGC004)。

第一作者简介:张彦威(1987-),男,博士,助理研究员,主要从事大豆遗传育种研究。E-mail: 13854198480@163.com。

通讯作者:徐冉(1967-),男,博士,研究员,主要从事大豆遗传育种研究。E-mail: soybeanxu@126.com。

集能力较强,种植在“合格”土壤上的中草药也可能会出现超标的情况。程旺大等^[24]认为水稻籽粒重金属含量的稳定性因环境、基因型有较大差异,且亦因重金属种类而异,其中 Cd、As、Ni 的基因型效应明显大于环境效应,同时指出筛选和选育籽粒重金属含量低的品种以及通过农艺措施减少籽粒重金属含量是可行的。曹方彬等^[25-26]筛选出适应浙江不同生态条件种植的低重金属积累品种,其中秀水 187为低 Cd 高 Zn 积累的品种,嘉优 08-1 是 Cd 和Cr 的低积累品种,同时发现即使在非污染土地上,其可食用部位重金属含量也有可能超过安全标准。

大豆是中国重要的油料作物和高蛋白粮饲兼用作物,在中国的农业生产中占有重要地位。目前,对大豆重金属含量的研究也取得了一定的进展。赵云云等^[27]通过盆栽处理,发现在 Cd 处理条件下品种间籽粒 Cd 浓度存在显著性差异,其中华夏 3 号、桂 M32 籽粒浓度较低,同时指出大豆籽粒 Cd 积累与 Cd 耐性是由各自独立的遗传机制控制。Arao 等^[28-29]认为大豆幼嫩组织中的 Cd 含量与大豆籽粒中的 Cd 含量正相关。智杨等^[30]采用盆栽梯度试验研究了大豆对 Cd 和 Pb 的吸收、积累、以及转运等品种差异,并从中筛选出 Cd 低积累品种和 Pb 低积累品种。阳小凤等^[31]在 Cd 污染的农田对 62 个大豆品种进行小区试验,发现收获的大豆符合国标 Cd 限量标准的品种仅为总数的 1.2%。焦位雄等^[32]发现大豆对重金属的吸收能力表现为 Cd >

Hg > Pb。

作物对重金属吸收和积累的基因型差异为重金属低积累品种的选育提供了可能和良好前景。目前已经建立了硬粒小麦、向日葵、水稻、大豆等多种作物低 Cd 含量的选育方案^[33],培育了低 Cd 硬粒小麦品种^[34]和向日葵杂交种^[35],但其它作物重金属低积累品种的选育却鲜有报道。本研究在济南和滨州两地筛选大豆籽粒低重金属积累的种质和品种,研究大豆重金属含量的基因型和环境效应,为籽粒低重金属含量大豆的培育提供种质资源,本研究对优质大豆的绿色生产具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆种质 120 份,鲁豆 1 号、鲁豆 10 号、齐黄 34 等 18 个品种为本课题组繁育的大豆品种、品系及农家品种(表 1),中黄 13、豫豆 12 等 102 个品种(系)由中国农科院作物科学研究所、河南省农业科学院、山西省农业科学院、安徽省农业科学院、徐州市农业科学院、河北省农业科学院、四川省自贡市农业科学研究所等单位提供。

试验所用氢氟酸和硝酸由国产优级纯试剂经亚沸蒸馏而成;盐酸为优级纯(淄博化学试剂有限公司);双氧水为国产分析纯。

表 1 供试大豆种质
Table 1 Soybean germplasm in experiment

种质 Germplasm	来源 Source	种质 Germplasm	来源 Source	种质 Germplasm	来源 Source	种质 Germplasm	来源 Source	种质 Germplasm	来源 Source	种质 Germplasm	来源 Source
7106	福建	中黄 4 号	北京	邯 195	河北	晋豆 15	山西	皖豆 7 号	安徽	豫豆 19	河南
	Fujian	Zhonghuang 4	Beijing	Han 195	Hebei	Jindou 15	Shanxi	Wandou 7	Anhui	Yudou 19	Henan
7517	山东	文丰 4 号	山东	邯豆 5 号	河北	晋豆 21	山西	皖豆 9 号	安徽	豫豆 22	河南
	Shandong	Wenfeng 4	Shandong	Handou 5	Hebei	Jindou 21	Shanxi	Wandou 9	Anhui	Yudou 22	Henan
7605	山东	文丰 6 号	山东	沛豆 1 号	江苏	晋豆 31	山西	鲁 99-1	山东	豫豆 24	河南
	Shandong	Wenfeng 6	Shandong	Peidou 1	Jiangsu	Jindou 31	Shanxi	Lu 99-1	Shandong	Yudou 24	Henan
丰收黄 Fengshouhuang	山东	文丰 7 号	山东	汾豆 31	山西	晋遗 10 号	山西	鲁宁 1 号	山东	豫豆 25	河南
	Shandong	Wenfeng 7	Shandong	Fendou 31	Shanxi	Jinyi 10	Shanxi	Luning 1	Shandong	Yudou 25	Henan
中作 00-683 Zhongzuo 00-683	北京	早熟 6 号	北京	汾豆 62	山西	晋遗 50	山西	鲁豆 10 号	山东	豫豆 26	河南
	Beijing	Zaoshu 6	Beijing	Fendou 62	Shanxi	Jinyi 50	Shanxi	Ludou 10	Shandong	Yudou 26	Henan
中作 97-1121 Zhongzuo 97-1121	北京	齐黄 10 号	山东	沁阳水白豆	河南	徐豆 10 号	江苏	鲁豆 11	山东	豫豆 27	河南
	Beijing	Qihuang 10	Shandong	Qinyangshuibaidou	Henan	Xudou 10	Jiangsu	Ludou 11	Shandong	Yudou 27	Henan
中作 983 Zhongzuo 983	北京	齐黄 13	山东	郑 133	河南	徐豆 12	江苏	鲁豆 12	山东	豫豆 28	河南
	Beijing	Qihuang 13	Shandong	Zheng 133	Henan	Xudou 12	Jiangsu	Ludou 12	Shandong	Yudou 28	Henan
中品 661 Zhongpin 661	北京	齐黄 1 号(亚)	山东	郑 9007	河南	徐豆 135	江苏	鲁豆 1 号	山东	豫豆 29	河南
	Beijing	Qihuang 1(Ya)	Shandong	Zheng 9007	Henan	Xudou 135	Jiangsu	Ludou 1	Shandong	Yudou 29	Henan

续表 1

种质	来源	种质	来源	种质	来源	种质	来源	种质	来源	种质	来源
Germplasm	Source	Germplasm	Source	Germplasm	Source	Germplasm	Source	Germplasm	Source	Germplasm	Source
中品 662	北京	齐黄 1 号(有)	山东	郑 92116	河南	徐豆 2 号	江苏	鲁豆 2 号	山东	豫豆 6 号	河南
Zhongpin 662	Beijing	Qihuang 1 (You)	Shandong	Zheng 92116	Henan	Xudou 2	Jiangsu	Ludou 2	Shandong	Yudou 6	Henan
中品 95-5383	北京	齐黄 1 号(紫)	山东	郑 9525	河南	徐豆 9 号	江苏	鲁豆 3 号	山东	豫豆 7 号	河南
Zhongpin 95-5383	Beijing	Qihuang 1 (Zi)	Shandong	Zheng 9525	Henan	Xudou 9	Jiangsu	Ludou 3	Shandong	Yudou 7	Henan
中黄 10	北京	齐黄 21	山东	郑 97196	河南	高作选 1 号	山东	鲁豆 4 号	山东	豫豆 9 号	河南
Zhonghuang 10	Beijing	Qihuang 21	Shandong	Zheng 97196	Henan	Gaozuoxuan 1	Shandong	Ludou 4	Shandong	Yudou 9	Henan
中黄 13	北京	齐黄 31	山东	郑 99048	河南	烟黄 3 号	山东	鲁黑豆 2 号	山东	冀无腥 1 号	河北
Zhonghuang 13	Beijing	Qihuang 31	Shandong	Zheng 99048	Henan	Yanhuang 3	Shandong	Luheidou 2	Shandong	Jiwuxing 1	Hebei
中黄 15	北京	齐黄 33	山东	郑州 135	河南	菏 84-5	山东	滑豆 20	山东	冀观 52	河北
Zhonghuang 15	Beijing	Qihuang 33	Shandong	Zhengzhou 135	Henan	He 84-5	Shandong	Huadou 20	Shandong	Jiguan 52	Hebei
中黄 16	北京	齐黄 34	山东	莒选 23	山东	荷豆 12	山东	滨海大白花	山东	冀豆 11	河北
Zhonghuang 16	Beijing	Qihuang 34	Shandong	Juxuan 23	Shandong	Hedou 12	Shandong	Binhaidabaihua	Shandong	Jidou 11	Hebei
中黄 18	北京	许豆 3 号	河南	科丰 53	北京	商丘 85255	河南	豫豆 10 号	河南	冀豆 12	河北
Zhonghuang 18	Beijing	Xudou 3	Henan	Kefeng 53	Beijing	Shangqiu 85255	Henan	Yudou 10	Henan	Jidou 12	Hebei
中黄 19	北京	贡豆 10 号	四川	科丰 6 号	北京	皖豆 15	安徽	豫豆 11	河南	冀豆 17	河北
Zhonghuang 19	Beijing	Gongdou 10	Sichuan	Kefeng 6	Beijing	Wandou 15	Anhui	Yudou 11	Henan	Jidou 17	Hebei
中黄 22	北京	贡豆 13	四川	科新 3 号	北京	皖豆 16	安徽	豫豆 12	河南	冀豆 7 号	河北
Zhonghuang 22	Beijing	Gongdou 13	Sichuan	Kexin 3	Beijing	Wandou 16	Anhui	Yudou 12	Henan	Jidou 7	Hebei
中黄 27	北京	贡豆 3 号	四川	科新 4 号	北京	皖豆 19	安徽	豫豆 15	河南	冀豆 9 号	河北
Zhonghuang 27	Beijing	Gongdou 3	Sichuan	Kexin 4	Beijing	Wandou 19	Anhui	Yudou 15	Henan	Jidou 9	Hebei
中黄 28	北京	贡豆 4 号	四川	诱变 30	北京	皖豆 21	安徽	豫豆 16	河南	冀黄 13	河北
Zhonghuang 28	Beijing	Gongdou 4	Sichuan	Youbian 30	Beijing	Wandou 21	Anhui	Yudou 16	Henan	Jihuang 13	Hebei
中黄 39	北京	贡豆 5 号	四川	晋豆 13	山西	皖豆 2 号	安徽	豫豆 18	河南	濮海 10 号	河南
Zhonghuang 39	Beijing	Gongdou 5	Sichuan	Jindou 13	Shanxi	Wandou 2	Anhui	Yudou 18	Henan	Puhai 10	Henan

1.2 试验设计

试验于 2011 和 2012 年在滨州和济南 2 个试点进行,6 月中下旬播种,10 月上中旬收获。采用随机区组排列,重复 3 次,小区面积 6 m²,每小区 3 行,行长 4 m,行距 0.5 m,株距 0.1 m。其它田间管理按当地大田生产常规进行。大豆成熟后收获计产。2011 年分别采集济南和滨州试验点表层 20 cm 土壤,5 点取样,混合均匀后测定土壤重金属含量。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 籽粒重金属含量测定 大豆籽粒于 80 ℃烘干至恒重,经研磨罐研磨至 80 目。取 0.1 g 大豆粉末于 Teflon 消解灌内,滴 2~3 滴水润湿,加 6 mL 高纯硝酸、1 mL 氢氟酸以及 2 mL 双氧水后,加盖密闭后于 MAR60 型微波消解仪(美国 CEM 公司)中消解。用 7500ce 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 公司)测定重金属含量。每个样品重复 5 次。

1.3.2 土壤重金属含量测定 土壤样品经 105 ℃烘干至恒重,经研磨罐研磨至 200 目。取 0.1 g 干

燥土壤样品于聚四氟乙烯瓶中,加 2~3 滴水润湿,缓慢依次加入 1 mL 盐酸,3 mL 硝酸,3 mL 氢氟酸,在敞口情况下置于电热板上缓慢蒸发至湿盐状,再次加入 3 mL 硝酸和 1 mL 氢氟酸,置于烘箱中在 190 ℃加热 36 h,冷却后定容至 50 mL。用等离子体质谱仪(ICP-MS)测定重金属含量。每个样品重复 5 次。

重金属富集系数 = 大豆籽粒重金属含量/土壤中重金属含量。

1.3.3 广义遗传力 多年多点试验的广义遗传力计算公式如下:

$$H^2 = \frac{V_g}{V_g + \frac{V_{gl}}{l} + \frac{V_{gy}}{y} + \frac{V_e}{yl}}$$

1.4 数据分析

试验数据采用 SPSS 17.0 进行方差分析,采用 Excel 2010 进行数据统计及相关分析。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量分析

对济南和滨州试验地表层 20 cm 土壤样品的重

金属含量进行测定(表2),Pb、Cr、As、Cd和Hg在两个试点均有检出。但是参照食用农产品产地环境质量标准(HJ 332-2006),5种重金属含量均没有超过标准值。

表2 表层20 cm土壤重金属含量

Table 2 The content of heavy metals in 20 cm topsoil (mg·kg ⁻¹)					
地点 Location	Pb	Cr	As	Cd	Hg
济南 Jinan	36.32	52.71	6.61	0.08	0.14
滨州 Binzhou	22.38	73.66	7.95	0.11	0.16
环境标准 Standard value	80	150~250	25~40	0.30~0.60	0.30~1.00

表3 大豆种质籽粒重金属含量测定

Table 3 Determination of heavy metal content in seeds of soybean germplasms									
重金属 Heavy metal	年份 Year	地点 Location	品种数 No. of variety	平均值 Mean/(ng·g ⁻¹)	标准差 SD/(ng·g ⁻¹)	最大值 Max./(ng·g ⁻¹)	最小值 Min./(ng·g ⁻¹)	变异系数 CV	遗传力 H ²
Pb	2011	滨州	120	172.95	40.21	471.18	44.02	0.09	0.50
	2012	滨州	120	138.44	22.95	337.44	103.57	0.10	
	2011	济南	120	169.33	96.44	822.95	97.66	0.13	
	2012	济南	120	197.68	87.98	868.80	114.52	0.12	
Cr	2011	滨州	119	5992.47	218.69	6703.60	5439.60	0.17	0.50
	2012	滨州	120	6358.89	335.96	8248.60	5557.80	0.12	
	2011	济南	120	4096.32	500.84	5214.80	3270.40	0.26	
	2012	济南	120	4594.26	1336.83	7533.00	3417.00	0.32	
As	2011	滨州	119	105.96	37.19	241.36	37.02	0.18	0.51
	2012	滨州	120	40.09	19.76	102.03	6.75	0.21	
	2011	济南	120	46.62	18.64	139.64	20.25	0.16	
	2012	济南	120	69.48	24.85	185.44	32.28	0.16	
Cd	2011	滨州	119	36.23	39.19	388.14	14.46	0.10	0.88
	2012	滨州	119	36.80	61.05	456.08	0.55	0.13	
	2011	济南	120	28.01	11.50	63.02	4.61	0.20	
	2012	济南	119	35.38	8.15	105.82	21.16	0.10	
Hg	2011	滨州	120	2.13	0.40	3.50	1.32	0.18	0.46
	2012	滨州	120	5.07	2.31	11.99	2.10	0.23	
	2012	济南	120	4.18	2.05	8.92	0.80	0.25	

表4 大豆籽粒重金属富集系数

Table 4 Enrichment coefficient of heavy metals in soybean seeds					
地点 Location	Pb	Cr	As	Cd	Hg
济南 Jinan	0.0047	0.0777	0.0071	0.3501	—
滨州 Binzhou	0.0077	0.0814	0.0133	0.3294	0.0130

2.2 大豆籽粒重金属含量的种质间差异及稳定性分析

济南和滨州大豆籽粒样品 Pb、Cr、As、Cd 和 Hg 含量连续 2 年分析结果表明:大豆籽粒重金属含量存在很大差异,且这种差异的大小因元素而异,表现为 Cr>Pb>As>Cd>Hg(表3)。进一步对大豆籽粒对 5 种重金属的富集能力进行分析,发现大豆籽粒在济南和滨州对 5 种重金属富集能力基本稳定,表现为 Cd>Cr>Hg>Pb>As(表4)。遗传力分析表明:大豆籽粒中 Pb、Cr、As 和 Hg 含量的遗传力为 0.46~0.51,基因型效应明显,但受环境影响较大;大豆籽粒中 Cd 含量的遗传力较高,表明大豆籽粒中 Cd 含量受环境影响较小(表3)。

综合两年测定结果:籽粒 Pb 积累前 5 位品种的 Pb 含量约为籽粒 Pb 积累后 5 位品种的 2.26 倍,其中文丰 4 号籽粒的 Pb 含量为齐黄 1 号(紫)的 2.73 倍;籽粒 Cr 积累前 5 位品种的 Cr 含量约为籽粒 Cr 积累后 5 位品种的 1.24 倍,其中 7605 籽粒的 Cr 含量为中黄 39 的 1.30 倍;籽粒 AS 积累前 5 位品种的

As 含量约为籽粒 Pb 积累后 5 位品种的 5.57 倍,其中豫豆 10 号籽粒的 As 含量为滨海大白花的 8.63 倍;籽粒 Cd 积累前 5 位品种的 Cd 含量约为籽粒 Cd 积累后 5 位品种的 3.58 倍,其中齐黄 31 籽粒的 Cd 含量约为豫豆 11 的 5.36 倍;籽粒 Hg 积累前 5 位品种的 Hg 含量约为籽粒 Hg 积累后 5 位品种的 4.48 倍,其中齐黄 1 号(亚)籽粒的 Hg 含量约为中黄 39 的 7.44 倍。同时,以上品种在滨州和济南两地具有相对稳定的低/高积累特性(表 5)。

结果说明筛选和培育籽粒低重金属含量的大豆品种选育工作具有可行性。初步筛选出齐黄 1 号(紫)、徐豆 9 号等为籽粒低 Pb 积累品种;中黄 39、冀豆 7 号等为籽粒低 Cr 积累品种;皖豆 19、豫豆 10 号等为籽粒高 As 积累品种,滨海大白花、皖豆 21 等为籽粒低 As 积累品种;豫豆 11、中品 662 等籽粒低 Cd 积累品种;中黄 39、豫豆 12 等为籽粒低 Hg 积累品种。

2.3 大豆籽粒重金属含量的年份和地区间关系分析

大豆籽粒重金属含量的联合方差分析结果表明:5 种重金属含量在品种间存在极显著差异。同时,5 种重金属品种间、年份间、地区间差异均极显著,且品种与年份间、品种与地点间也存在极显著差异(表 6)。说明大豆籽粒重金属含量受品种、环境等多种因素影响。因此,在考虑大豆籽粒重金属含量稳定性的同时,为降低大豆重金属含量,应针对特定重金属污染环境进行基因型选择。

表 5 籽粒重金属含量低积累和高积累的大豆种质				
Table 5 Soybean germplasms with high or low accumulation of heavy metal in seeds				
重金属 Heavy metals	高积累 High accumulation		低积累 Low accumulation	
	种质 Germplasm	平均值 Mean/(ng·g ⁻¹)	种质 Germplasm	平均值 Mean/(ng·g ⁻¹)
Pb	鲁豆 2 号	237.21	齐黄 1 号(紫)	124.07
	鲁豆 1 号	240.20	徐豆 9 号	126.55
	齐黄 1 号(亚)	316.48	诱变 30	127.74
	中黄 22	318.13	郑 92116	130.00
	文丰 4 号	338.13	菏 84-5	133.14
Cr	豫豆 9 号	5990.45	中黄 39	4669.45
	齐黄 1 号(有)	6006.25	冀豆 7 号	4863.54
	鲁豆 1 号	6023.40	豫豆 19	4872.10
	贡豆 10 号	6026.50	中作 97-1121	4881.45
	7605	6063.90	豫豆 7 号	4911.40
As	晋豆 21	74.53	滨海大白花	16.14
	鲁豆 2 号	77.38	皖豆 21	19.39
	沁阳水白豆	124.05	冀豆 9 号	20.71
	皖豆 19	133.96	冀豆 17	21.12
	豫豆 10 号	139.40	邯 195	21.29
Cd	烟黄 3 号	118.12	豫豆 11	28.72
	中黄 16	121.75	中品 662	34.65
	中黄 28	124.21	豫豆 29	37.75
	鲁 99-1	128.49	豫豆 6 号	38.50
	齐黄 31	153.98	皖豆 9 号	40.72
Hg	齐黄 33	10.39	中黄 39	2.36
	文丰 7 号	11.52	豫豆 12	2.88
	晋遗 10 号	11.88	鲁豆 10 号	2.93
	滨海大白花	16.86	豫豆 19	2.99
	齐黄 1 号(亚)	17.57	齐黄 34	3.05

表 6 大豆种质籽粒重金属含量的方差分析
Table 6 ANOVA of heavy metal content in soybean seeds

变异来源	Pb			Cr			As			Cd			Hg		
	自由 度 <i>df</i>	均方 <i>MS</i>	<i>F</i>	自由 度 <i>df</i>	均方 <i>MS</i>	<i>F</i>	自由 度 <i>df</i>	均方 <i>MS</i>	<i>F</i>	自由 度 <i>df</i>	均方 <i>MS</i>	<i>F</i>	自由 度 <i>df</i>	均方 <i>MS</i>	<i>F</i>
品种 Variety	119	3.25 × 10 ⁴	1489.36 **	119	2.43 × 10 ⁶	78.28 **	119	7.80 × 10 ³	601.54 **	119	8.80 × 10 ³	339.36 **	119	1.03 × 10 ²	37.48 **
年份 Year	1	3.46 × 10 ⁵	15846.44 **	1	2.00 × 10 ⁹	64651.98 **	1	6.96 × 10 ³	536.55 **	1	1.34 × 10 ⁵	5153.55 **	1	3.12 × 10 ³	1129.98 **
地点 Location	1	3.48 × 10 ⁴	1593.88 **	1	1.10 × 10 ⁸	3532.75 **	1	1.57 × 10 ⁴	1206.72 **	1	2.73 × 10 ⁵	10523.76 **	1	40	14.49 **
品种 × 年份 Variety × Year	119	2.91 × 10 ⁴	1335.94 **	119	1.77 × 10 ⁶	57.05 **	119	7.71 × 10 ³	594.21 **	119	1.44 × 10 ³	55.38 **	119	1.40 × 10 ²	50.65 **
品种 × 地点 Variety × Location	119	3.47 × 10 ⁴	1590.46 **	119	3.13 × 10 ⁶	100.86 **	119	7.27 × 10 ³	560.44 **	119	9.30 × 10 ²	35.86 **	119	1.91 × 10 ²	69.28 **
误差 Error	1912	21.8		1913	3.10 × 10 ⁴		1881	13.0		1911	25.9		1412	2.76	
总变异 Total	2391			2392			2359			2390			1772		

** 表示处理间在 $P < 0.01$ 水平差异显著。
** indicate there is extremely significant difference ($P < 0.01$) between treatments.

2.4 大豆籽粒重金属含量与产量的相关性分析

大豆籽粒重金属含量与产量的相关分析结果显示:籽粒 Pb 含量与产量显著负相关;籽粒 Cr、Cd、As 和 Hg 含量与产量不相关,这可能与土壤重金属污染较轻有关(表 7)。大豆籽粒 5 种重金属含量之

间的相关分析结果显示:籽粒 Pb 含量与 Cr 含量极显著正相关,与 Cd 含量显著正相关;籽粒 Cr 含量与 Cd 含量极显著正相关;大豆籽粒其它重金属含量之间没有明显的相关性(表 7)。

表 7 大豆产量与籽粒重金属含量的相关性

Table 7 The correlation between soybean yield and heavy metal content in soybean seeds

	Pb	Cr	As	Cd	Hg	产量 Yield
Pb	1					
Cr	0.384703 **	1				
As	0.072148	-0.05126	1			
Cd	0.201635 *	0.395459 **	0.007945	1		
Hg	0.138073	-0.01456	-0.05629	-0.05381	1	
产量 Yield	-0.18011 *	-0.08872	-0.11744	-0.02117	-0.11976	1

* 表示处理间在 $P < 0.05$ 水平上显著相关; ** 表示处理间在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。

* indicate there is significant correlation ($P < 0.05$) between treatments; ** indicate there is extremely significant correlation ($P < 0.01$) between treatments.

3 讨 论

随着工农业的快速发展,大面积的农田受到重金属污染^[1-3]。阳小凤等^[31]在 Cd 污染的试验田进行的小区试验中仅有 1.2% 的品种符合国标 Cd 限量标准。周涛等^[36]对三江平原地区水稻、玉米、大豆进行的籽粒重金属含量的健康风险评价发现,大豆籽粒中等级为安全的样品占比最少,仅有 16.67%。曹方彬等^[26]研究表明,即使在非污染土地上,作物可食用部位重金属含量也有可能超过安全标准。本研究表明,在济南和滨州的未受重金属污染的试验点,部分品种籽粒重金属含量仍超过安全标准,两年两点试验中大豆籽粒 Pb 含量最大值为 0.33 ~ 0.87 mg · kg⁻¹,均超过大豆籽粒重金属限量标准值 0.2 mg · kg⁻¹,提醒我们在非污染土地上发展农业生产同样要注意作物重金属超标的风险。

作物对重金属的吸收和积累具有显著的品种间差异^[20-26],筛选和培育低重金属积累的品种对于作物的安全生产具有重要意义。赵云云等^[27,30]先后利用盆栽方法筛选获得 Cd、Pb 积累性的大豆品种。本研究所采用的 120 个大豆种质籽粒间存在 Pb、Cr、As、Cd 和 Hg 含量的极显著差异,5 种重金属的基因型效应明显,尤其是 Cd,证实了通过品种选育降低大豆籽粒重金属含量可能性。例如,豫豆 10 号籽粒 As 含量是滨海大白花籽粒 As 含量的 8.6 倍;齐黄 31 籽粒 Cd 含量是豫豆 11 籽粒 Cd 含量的 5.36 倍。因而,通过筛选重金属低积累的基因型,创制和培育籽粒重金属低积累的环保型大豆品种将是开展优质大豆绿色生产的一条经济、有效的

途径。本研究同时发现基因型、环境及基因型与环境互作对大豆籽粒 Pb、Cr、As、Cd、Hg 含量均具有极显著影响,从改善土壤条件角度降低大豆对重金属的吸收量可能会起到一定作用,选择籽粒重金属积累量低且对环境变化表现较稳定的基因型是品种选择的首要目标。

植物能够从土壤中富集重金属并向地上部运输,从而修复被重金属污染的土壤^[37]。然而植物对不同重金属的吸收和积累具有显著的物种间差异。前人研究表明,甘蓝型油菜^[38]和苕麻^[37]具有修复镉污染耕地的潜力。褚卓栋等^[23]的研究表明,紫苑、知母对 Cd 富集能力较强,白芷、北沙参对 Hg 富集能力较强。金晓丹等^[39]认为水稻根、茎、叶和籽粒富集 Cd 的能力均高于 Pb 和 As。焦位雄等^[32]认为在 Pb 污染耕地可优先选择种植玉米和大豆。智杨等^[30]发现大豆对 Pb 具有较强耐性,对 Cd 较为敏感。本研究发现大豆籽粒重金属富集能力因元素而异,表现为 Cd > Cr > Hg > Pb > As。因此,利用植物修复被重金属污染的土壤时需要考虑不同植物对不同重金属富集能力的差异性。

4 结 论

对济南和滨州连续两年种植的大豆籽粒重金属含量的测定发现大豆籽粒重金属富集能力因元素而异,表现为 Cd > Cr > Hg > Pb > As。初步筛选出齐黄 1 号(紫)、徐豆 9 号等籽粒低 Pb 积累品种;中黄 39、冀豆 7 号等为籽粒低 Cr 积累品种;皖豆 19、豫豆 10 号等为籽粒高 As 积累品种,滨海大白花、皖豆 21 等籽粒低 As 积累品种;豫豆 11、中品

662 等籽粒低 Cd 积累品种;中黄 39、豫豆 12 等籽粒低 Hg 积累品种,为籽粒低重金属含量大豆的培育提供种质资源。基因型、环境及基因型与环境互作对大豆籽粒 Pb、Cr、As、Cd 和 Hg 含量均具有极显著影响。

参考文献

[1] Wei B, Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. Microchemical Journal, 2010, 94(2):99-107.

[2] Li Z Y, Ma Z W, Kuijp T J V D, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 843-853.

[3] 陈学永,张爱华. 土壤重金属污染及防治方法研究综述[J]. 污染防治技术, 2013,26(3):41-44. (Chen X Y, Zhang A H. Review of studies on soil heavy metal pollution and its control methods[J]. Pollution Control Technology, 2013, 26(3): 41-44.)

[4] Solgi E, Esmaili-Sari A, Riyahi-Bakhtiari A, et al. Soil contamination of metals in the three industrial estates, Arak, Iran[J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology, 2012, 88(88):634-638.

[5] 陈卫平,杨阳,谢天,等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2):261-272. (Chen W P, Yang Y, Xie T, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 261-272.)

[6] 葛方度. 第一个重金属污染综合防治“十二五”规划诞生[J]. 西部资源, 2011, 2: 17. (Ge F D. The birth of first comprehensive prevention and control of heavy metal pollution in the twelfth five-year plan[J]. Western Resources, 2011, 2: 17.)

[7] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10): 1727-1736. (Fan T, Ye W L, Chen H Y, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(10):1727-1736.)

[8] Wahid A, Arshad M, Farooq M. Cadmium phytotoxicity: Responses, mechanisms and mitigation strategies: A review[J]. Organic Farming, Pest Control and Remediation of Soil Pollutants, 2009, 1:371-403.

[9] Cao F, Wang N, Zhang M, et al. Comparative study of alleviating effects of GSH, Se and Zn under combined contamination of cadmium and chromium in rice(*Oryza sativa*) [J]. Biology of Metals, 2013, 26(2):297-308.

[10] Liu X, Peng K, Wang A, et al. Cadmium accumulation and distribution in populations of *Phytolacca americana* L. and the role of transpiration[J]. Chemosphere, 2010, 78(9):1136-1141.

[11] 唐东民,伍钧,唐勇,等. 重金属胁迫对植物的毒害及其抗性机理研究进展[J]. 四川环境, 2008, 27(5): 79-83. (Tang D M, Wu J, Tang Y. The research advance in toxic hazard of heavy metal stress on plant and its resistance mechanism[J]. Sichuan Environment, 2008, 27(5): 79-83.)

[12] Hossain M, Hasanuzzaman M, Fujita M. Up-regulation of antioxidant and glyoxalase systems by exogenous glycinebetaine and proline in mung bean confer tolerance to cadmium stress[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2010, 16(3):259-272.

[13] Rascio N, Navariizzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting [J]. Plant Science, 2011, 180(2):169-181.

[14] Villiers F, Ducruix C, Hugouvieux V, et al. Investigating the plant response to cadmium exposure by proteomic and metabolomic approaches[J]. Proteomics, 2011, 11(9):1650-1663.

[15] Nogawa K, Sakurai M, Ishizaki M, et al. Threshold limit values of the cadmium concentration in rice in the development of itai-itai disease using benchmark dose analysis[J]. Journal of Applied Toxicology, 2017, 37(8):962-966.

[16] 袁一傲. 镉对人体健康影响及中毒诊断[J]. 环境保护科学, 1992, 18(1): 8-15. (Yuan Y A. The influence of Cd on human health and the diagnosis of poisoning[J]. Environmental Protection Science, 1992, 18(1): 8-15.)

[17] 王盛吉. 日本熊本县水俣病公害问题研究(1956 年-1959 年) [D]. 上海: 华东师范大学, 2017. (Wang S J. A study for Kumamoto Minamata disease environmental hazards event in Japan (1956-1959) [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.)

[18] 栾云霞,陆安祥,王纪华. 镉米问题形成原因及对策思考[J]. 农产品质量与安全, 2013, 6: 49-51. (Luan Y X, Lu A X, Wang J H. Causes and countermeasures of cadmium rice problem[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2013, 6: 49-51.)

[19] 于德娥,刘云儒,刘玉梅,等. 2007-2011 年中国儿童血铅水平及铅中毒率的分析[J]. 现代预防医学, 2015, 42(1): 66-68, 97. (Yu D E, Liu Y R, Liu Y M, et al. Blood lead levels and lead poisoning rates of children in China, 2007-2011[J]. Modern Preventive Medicine, 2015, 42(1): 66-68, 97.)

[20] Wu F, Zhang G. Genotypic variation in kernel heavy metal concentrations in barley and as affected by soil factors[J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(6):1163-1173.

[21] 陈小华,沈根祥,白玉杰,等. 不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选[J]. 环境科学, 2019(10):1-10. (Chen X H, Shen G X, Bai Y J, et al. Accumulation characteristics of Cd in different crops and screening of low-Cd accumulation cultivars[J]. Environmental Science, 2019(10):1-10.)

[22] 陆美斌,陈志军,李为喜,等. 中国两大优势产区小麦重金属镉含量调查与膳食暴露评估[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3866-3876. (Lu M B, Chen Z J, Li W X, et al. Survey and dietary exposure assessment of cadmium in wheat from two main wheat-producing regions in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(19): 3866-3876.)

[23] 褚卓栋,刘文菊,肖亚兵,等. 中草药种植区土壤及草药中重金属含量状况及评价[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1600-1607. (Chu Z D, Liu W J, Xiao Y B, et al. Survey and assessment of heavy metals in soils and herbal medicines from Chinese herbal medicine cultivated regions[J]. Environmental Science, 2010, 31(6): 1600-1607.)

[24] 程旺大,张国平,姚海根,等. 晚粳稻籽粒中 As、Cd、Cr、Ni、Pb 等重金属含量的基因型与环境效应及其稳定性[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 573-579. (Cheng W D, Zhang G P, Yao H

G, et al. Genotypic and environmental variation and their stability of As , Cr , Cd , Ni and Pb concentrations in the grains of *Japonica* Rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(4) : 573-579.)

[25] Cao F B, Ahmed I, Zheng W, et al. Genotypic and environmental variation of heavy metal concentrations in rice grains[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2013, 11(1) :718-724.

[26] 曹方彬. 水稻重金属积累的品种与环境效应及调控技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014. (Cao F B. Cultivar and environmental effects and regulation of heavy metal accumulation in rice [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.)

[27] 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. (Zhao Y Y, Zhong C X, Fang X L, et al. Genotypic differences in tolerance and accumulation to Cd among summer-sowing soybean varieties in south China[J]. *Soybean Science*, 2013, 32(3) :336-340.)

[28] Arao T, Ae N, Sugiyama M, et al. Genotypic differences in cadmium uptake and distribution in soybeans [J]. *Plant & Soil*, 2003, 251(2) :247-253.

[29] Arao T, Ishikawa S. Genotypic differences in cadmium concentration and distribution of soybean and rice[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2006, 40(1) :21-30.

[30] 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. (Zhi Y. Cadmium and lead low accumulation among Chinese soybean cultivars and the evaluation of quality difference and correlation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.)

[31] 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. (Yang X F, Ma S M, Huang S, et al. Study on the cadmium absorptive character and yield variationof soybean in cadmium contaminated farmland[J]. *Crop Research*, 2017, 31(6) :668-672.)

[32] 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. (Jiao W X, Yang H D, Feng D N, et al. Heavy metal content and accumulation characteristics in the edible parts of different crops under Cd, Hg, and Pb stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9) : 1726-1733.)

[33] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2-3) :301-310.

[34] Clarke J M, Mccaig T N, Depauw R M, et al. Strong field durum wheat[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2005, 85(3) :651-654.

[35] Miller J F, Alkhatib K. Registration of two oilseed sunflower genetic stocks, SURES-1 and SURES-2 resistant to tribenuron herbicide[J]. *Crop Science*, 2006, 46(1) :489-490.

[36] 周涛,苏小四,宋铁军,等. 三江平原典型农作区作物籽粒重金属健康风险评价 [J]. *环境与健康杂志*, 2018, 35(10) :896-899. (Zhou T, Su X S, Song T J, et al. Health risk assessment of heavy metals in seeds of different crops in typical agricultural area of Three River Plain [J]. *Journal of Environment and Health*, 2018, 35(10) :896-899.)

[37] 黄道友,朱奇宏,朱捍华,等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望 [J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(6) :1030-1043. (Huang D Y, Zhu Q H, Zhu H H, et al. Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminatedfarmland soil [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6) : 1030-1043.)

[38] 费维新,荣松柏,初明光,等. 油菜种植修复重金属镉等污染土壤研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(35) : 19-22, 93. (Fei W X, Rong S B, Chu M G, et al. Advances in phytoremediation of soil polluted by heavy metals such as cadmium by oilseed rape planting[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(35) : 19-22, 93.)

[39] 金晓丹,罗栋源,马华菊,等. 广西某铅锌矿区土壤镉、铅、砷形态分布对水稻重金属的影响 [J]. *西南农业学报*, 2018, 31(6) : 1293-1299. (Jin X D, Luo D Y, Ma H J, et al. Effect of soil Cd, Pb, As and their fractions distribution on corresponding heavy metals in rice surrounding lead-zinc mines in Guangxi province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(6) : 1293-1299.)