

## 华南地区夏播大豆品种镉耐性及籽粒镉积累的差异

赵云云, 钟彩霞, 方小龙, 马启彬, 年海, 杨存义

(华南农业大学 农学院/国家大豆改良中心广东分中心, 广东 广州 510642)

**摘要:**通过污染土壤盆栽对 11 个华南地区主栽的夏大豆品种在夏播条件下镉(Cd)耐性和籽粒 Cd 积累的差异进行了比较。结果表明:在 Cd 处理条件下 11 个大豆品种的生物量和籽粒干重均比对照有不同程度下降,且品种间差异显著,综合考虑相对生物量和籽粒干重指标,桂夏豆 2 号、巴西 3 号是耐性品种,华夏 3 号、桂 M32、巴西 15、桂早 1 号和埂青 82 是中等耐性品种,而巴西 10 号、福豆 234、华夏 4 号和中黄 24 是敏感品种。同时发现在 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,而中黄 24 籽粒 Cd 浓度最高。相关分析发现,籽粒 Cd 浓度与籽粒、地上部(籽粒除外)和根的相对干重的相关性不显著,而与地上部(籽粒除外)Cd 浓度显著正相关,表明籽粒 Cd 积累与 Cd 耐性是由各自独立的遗传机制控制。

**关键词:**华南;夏播大豆;镉耐性;镉积累

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2013)03-0336-05

## Genotypic Differences in Tolerance and Accumulation to Cd among Summer-sowing Soybean Varieties in South China

ZHAO Yun-yun, ZHONG Cai-xia, FANG Xiao-long, MA Qi-bin, NIAN Hai, YANG Cun-yi

(College of Agronomy, South China Agricultural University/Guangdong Sub-center of National Soybean Improvement Center, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** A pot experiment was conducted to explore the tolerance and accumulation to Cd in 11 soybean varieties of South China. The biomass and yield of 11 soybeans varieties at high concentration of Cd treatments decreased significantly than control. Based on relative biomass and relative dry seed weight, Guixiadou 2, Brazil 3 varieties were tolerant varieties, and Huaxia 3, Gui M32, Brazil 15, Guizao 1 and Gengqing 82 were medium, while Zhonghuang 24, Brazil 10, Fudou 234 and Huaxia 4 were sensitive varieties. Significant genotypic differences in seed cadmium levels were found. The seed cadmium concentration was lowest in Huaxia 3 and Gui M32, and highest in Zhonghuang 24. Correlation analysis revealed that seed Cd concentration was significantly correlated with aerial part Cd concentration, but no significantly correlated with relative dry seed weight, relative aerial part dry weight and root dry weight. The results indicated that breeding soybean varieties with cadmium tolerance and low-cadmium accumulation in seed was possible.

**Key words:** South China; Summer-sowing soybean; Cd tolerance; Cd accumulation

大豆是植物性蛋白和食用油的主要来源,在人类日常消费中占有重要地位。近年来,由于采矿业的发展、含镉(Cd)废水的农田灌溉、污泥的农业利用、磷肥的使用及矿区飘尘的沉降等,我国土壤中 Cd 含量迅速增加,成为农业生产的挑战之一。美国对六大主要农作物调查后发现大豆 Cd 积累量高于其他作物<sup>[1]</sup>,且在同样土壤上生产的粮食中大豆的 Cd 积累量也高于其他作物<sup>[1-2]</sup>。相关调查发现一些在土壤 Cd 含量极低的田块中生产的大豆籽粒中 Cd 积累也会超过国际标准  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[3-4]</sup>。降低 Cd 污染土壤上生产的大豆籽粒中 Cd 积累是亟需解决的食物安全问题,也是大豆育种中应考虑的重要性状之一。

研究表明大豆品种间 Cd 抗性和籽粒 Cd 积累存在显著性差异<sup>[5-8]</sup>。Boggess 等<sup>[7]</sup>通过污染土盆栽法用生物量减少、可见症状和茎叶 Cd 浓度为指

标评价了 30 多个美国主要大豆品种,发现 Dunfield、Harosoy、Arksoy、Dare、Flambeau 和 Scioto 属于 Cd 敏感品种,而 Clark、Mandarin、Mukden、Jackson 和 Lee 属于 Cd 抗性品种。Arao 等<sup>[6]</sup>通过污染田种植、不同供镉土培试验和营养液培养实验评价了 15 个日本品种的镉积累,发现品种间存在显著性差异,其中品种 En-b0-1-2 在各种条件下种子镉积累最低,品种 Harosoy 最高。中国开展大豆品种间 Cd 耐性和籽粒 Cd 积累研究不多,黄湘云等对湖南和江西的 10 个品种进行苗期 Cd 耐性的比较,发现品种间差异显著,其中湘春豆 13、沔 1101 和湖南农家种耐性较强<sup>[9]</sup>。现对华南地区主栽的 11 个夏大豆品种采用污染土盆栽培养的方法,评价其 Cd 耐性和籽粒 Cd 积累差异,旨在为华南地区选育抗污染低积累的大豆品种提供材料。

收稿日期:2012-11-26

基金项目:国家自然科学基金(31271745);国家“十一五”科技支撑计划(2011BAD35B06);国家高技术研究发展计划(2012AA101106);公益性行业(农业)项目(C10032)。

第一作者简介:赵云云(1988-),女,在读硕士,主要从事大豆分子育种研究。E-mail:zhaoyy-1988@163.com。

通讯作者:杨存义(1966-),男,博士,副教授,主要从事植物营养性状遗传学与改良研究。E-mail:ycy@scau.edu.cn。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试材料选自华南地区目前生产上主栽品种 11 个,其中华夏 4 号、华夏 3 号来自广东,福豆 234、埂青 82 来自福建省,桂早 1 号、桂夏豆 2 号和桂 M32 来自广西,中黄 24 来自北京,巴西 15、巴西 3 号和巴西 10 号来自巴西。

供试土壤采自华南农业大学跃进北教学实验基地。土壤基本性质用常规分析法测定,其土壤肥力性状:pH 5.67,有机质  $21.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮  $1.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $97.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 方法

采用污染土壤盆栽实验,土壤采回后经自然风干、捶碎、过筛,拌匀后装盆,每盆装风干土  $7.0 \text{ kg}$ 。设置对照和 Cd 两个处理,对照(CK)土壤中不添加 Cd,Cd 处理土壤中添加  $19.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$  (分析纯,分子量为 228.35)。选取籽粒饱满的大豆种子直接播于土壤中,每盆播种 9 粒,苗出齐后保留生长一致的 3 株。每处理 3 次重复,随机区组排列。在大豆生长期每天以  $500 \sim 700 \text{ mL}$  自来水浇灌至成熟。

成熟后分别收获植株根系、地上部(籽粒除外)和籽粒,其中成熟前脱落的叶子每天按单株收集,在烘箱中烘干至恒重后分别称量干重。大豆植株 Cd 含量采用干灰法消化后,用原子吸收分光光度法测定<sup>[10]</sup>。采用 Cd 胁迫下测定的各项指标与对照的相对值(耐性因子)共同对供试大豆品种的 Cd 耐性

进行评价。以各器官 Cd 浓度为指标对供试大豆品种的 Cd 积累进行评价。同时以转运系数(TsF)和单位根重吸收量作为反映不同品种吸收和转运差异的指标,其计算公式为:

转运系数(TsF) = 地上部(包括茎、叶、荚壳和籽粒)Cd 浓度( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )/根部 Cd 浓度( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

单位根重吸收量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) = 单株总 Cd 积累量( $\text{mg}$ )/根干重( $\text{g}$ )

### 1.3 数据处理

所有数据采用 SPSS 18.0 统计软件和 Excel 2007 进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同大豆品种间 Cd 耐性的差异

地上部(籽粒除外)干重、根干重和籽粒产量是综合反映大豆生长状态的主要指标,其相对值(耐性因子)可作为筛选大豆抗 Cd 的指标。由表 1 可知,与对照相比,在 Cd 处理条件下 11 个夏大豆的地上部(籽粒除外)干重、根干重和籽粒产量均受到不同程度的影响,品种间存在显著差异。中黄 24、巴西 10 号、福豆 234 相对地上部(籽粒除外)干重均低于 50%,而桂夏豆 2 号、巴西 15、巴西 3 号相对地上部(籽粒除外)干重均高于 80%。根干重除桂夏豆 2 号和巴西 3 号略有增加外,其他基因型都有不同程度下降,其中中黄 24、巴西 10 号相对根干重低于 60%,而巴西 15、桂 M32 高于 80%。这表明品种间的地上部(籽粒除外)干重对 Cd 胁迫的响应存在显著性差异。

表 1 Cd 对大豆根系、地上部(籽粒除外)生物量和籽粒产量的影响

Table 1 Different responses of the root weight,shoot weight and yield in 11 soybean varieties under high-Cd stress

品种 Variety	根干重			地上部(籽粒除外)干重			籽粒干重		
	Root dry weight/ $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$		相对值 RV/%	Shoot dry weight/ $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$		相对值 RV/%	Seed dry weight/ $\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$		相对值 RV/%
	Cd	CK		Cd	CK		Cd	CK	
桂夏豆 2 号 Guixiadou 2	$1.48 \pm 0.17 \text{ b}$	$1.39 \pm 0.14 \text{ d}$	106.4	$15.66 \pm 1.51 \text{ b}$	$17.01 \pm 1.82 \text{ bc}$	92.1	$4.90 \pm 0.33 \text{ c}$	$5.85 \pm 0.11 \text{ a}$	86.8
巴西 3 号 Brazil 3	$1.49 \pm 0.15 \text{ b}$	$1.46 \pm 0.11 \text{ cd}$	102.1	$16.64 \pm 1.42 \text{ b}$	$17.62 \pm 2.25 \text{ b}$	94.4	$5.00 \pm 0.28 \text{ c}$	$5.98 \pm 0.65 \text{ a}$	83.7
华夏 3 号 Huaxia 3	$2.34 \pm 0.24 \text{ a}$	$3.11 \pm 0.19 \text{ a}$	75.3	$16.33 \pm 1.95 \text{ b}$	$25.44 \pm 2.81 \text{ a}$	64.2	$4.47 \pm 0.99 \text{ c}$	$6.27 \pm 0.73 \text{ ab}$	71.2
埂青 82 Gengqing 82	$0.93 \pm 0.02 \text{ b}$	$1.36 \pm 0.11 \text{ d}$	68.2	$11.12 \pm 0.62 \text{ cd}$	$15.24 \pm 0.96 \text{ bc}$	73.0	$5.10 \pm 0.24 \text{ c}$	$8.02 \pm 0.34 \text{ de}$	63.6
桂 M32Gui M32	$1.56 \pm 0.14 \text{ ab}$	$1.79 \pm 0.16 \text{ c}$	87.6	$14.88 \pm 1.10 \text{ bc}$	$19.59 \pm 1.00 \text{ ab}$	75.9	$5.12 \pm 0.23 \text{ c}$	$8.22 \pm 0.62 \text{ de}$	62.2
巴西 15 Brazil 15	$2.28 \pm 0.35 \text{ ab}$	$2.62 \pm 0.19 \text{ b}$	85.4	$21.40 \pm 2.39 \text{ a}$	$24.56 \pm 1.56 \text{ a}$	87.1	$5.18 \pm 0.10 \text{ c}$	$9.31 \pm 0.08 \text{ e}$	55.6
桂早 1 号 Guizao 1	$0.74 \pm 0.05 \text{ b}$	$1.10 \pm 0.07 \text{ de}$	67.1	$8.16 \pm 0.44 \text{ de}$	$13.44 \pm 1.38 \text{ bc}$	60.7	$3.29 \pm 0.26 \text{ b}$	$6.39 \pm 0.55 \text{ abc}$	51.5
福豆 234 Fudou 234	$1.03 \pm 0.11 \text{ b}$	$1.48 \pm 0.05 \text{ cd}$	69.5	$9.27 \pm 1.75 \text{ d}$	$18.87 \pm 1.27 \text{ ab}$	49.1	$3.24 \pm 0.47 \text{ b}$	$7.72 \pm 0.95 \text{ bcde}$	41.9
中黄 24 Zhonghuang 24	$0.38 \pm 0.04 \text{ b}$	$0.74 \pm 0.07 \text{ e}$	51.1	$3.97 \pm 0.46 \text{ e}$	$10.58 \pm 0.56 \text{ c}$	37.6	$1.94 \pm 0.28 \text{ a}$	$5.73 \pm 0.30 \text{ a}$	33.9
华夏 4 号 Huaxia 4	$0.80 \pm 0.14 \text{ b}$	$1.33 \pm 0.05 \text{ d}$	60.0	$10.05 \pm 1.33 \text{ d}$	$16.47 \pm 1.79 \text{ bc}$	61.0	$2.27 \pm 0.18 \text{ ab}$	$6.73 \pm 0.60 \text{ abcd}$	33.7
巴西 10 号 Brazil 10	$0.62 \pm 0.04 \text{ b}$	$1.11 \pm 0.04 \text{ de}$	55.6	$7.44 \pm 0.63 \text{ de}$	$17.23 \pm 0.38 \text{ bc}$	43.2	$2.48 \pm 0.13 \text{ ab}$	$7.89 \pm 0.21 \text{ cde}$	31.4

同一列中不同的字母表示在 0.05 水平差异显著。

Values within a column followed by different letters are significantly different at 0.05 probability level. RV: relative value.

在 Cd 胁迫下,中黄 24、巴西 10 号、华夏 4 号籽粒产量下降严重,低于对照的 40%,华夏 3 号、桂

M32、埂青 82 的籽粒产量分别为对照的 60% ~ 75%,而桂夏豆 2 号和巴西 3 号籽粒产量下降较少,

分别达到对照的 80%。表明品种间籽粒产量对 Cd 胁迫的响应存在显著性差异。

综合地上部(籽粒除外)干重、根干重和籽粒产量的数据,桂夏豆 2 号和巴西 3 号属于抗 Cd 品种,巴西 10 号、中黄 24 和华夏 4 号是 Cd 敏感品种,巴西 15、华夏 3 号、桂 M32 和埂青 82 属于中间型品种。

## 2.2 Cd 胁迫条件下大豆品种间主要器官 Cd 浓度的差异

作物各器官(尤其可食部分)中 Cd 浓度是评价食品安全性的关键指标,因此可用于评价品种间积累特性的差异。从表 2 可知,在 Cd 处理条件下 11 个夏大豆品种的不同器官中 Cd 浓度明显不同,根部和地上部(籽粒除外)远高于籽粒,而不同品种间同一器官中 Cd 浓度也存在显著性差异。根部 Cd 浓度相对较高的是中黄 24、华夏 4 号和桂早 1 号,而桂夏豆 2 号、巴西 15 和巴西 3 号相对较低。地上部(籽粒除外)Cd 浓度相对较高的是中黄 24、巴西 10 号和福豆 234,而最低的是华夏 3 号,仅为  $16.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。大豆根部和地上部的 Cd 浓度明显高于土壤中 Cd 浓度,表明大豆根系可主动吸收土壤中的 Cd。

表 2 Cd 处理条件下不同大豆品种各器官 Cd 浓度的差异

Table 2 Differences of Cd concentration among 11 Soybean varieties under Cd stress

品种 Variety	Cd 浓度 Cd concentration/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			转运系数 TsF
	根 Root	地上部(籽粒除外) Shoot	籽粒 Seed	
桂夏豆 2 号 Guixiadou 2	$19.58 \pm 1.02 \text{ a}$	$19.85 \pm 0.66 \text{ ab}$	$3.67 + 0.37 \text{ cd}$	0.82
巴西 3 号 Brazil 3	$20.15 \pm 1.57 \text{ a}$	$21.84 \pm 0.95 \text{ bc}$	$4.43 + 0.13 \text{ b}$	0.88
华夏 3 号 Huaxia 3	$23.13 \pm 1.02 \text{ abc}$	$16.12 \pm 0.25 \text{ a}$	$2.10 + 0.11 \text{ g}$	0.57
埂青 82 Gengqing 82	$24.13 \pm 3.12 \text{ abc}$	$19.90 \pm 1.39 \text{ ab}$	$2.58 + 0.09 \text{ fg}$	0.60
桂 M32Gui M 32	$22.18 \pm 1.02 \text{ abc}$	$19.92 \pm 1.15 \text{ ab}$	$2.14 + 0.10 \text{ g}$	0.69
巴西 15 Brazil 15	$19.94 \pm 1.35 \text{ a}$	$18.18 \pm 1.14 \text{ ab}$	$2.91 + 0.24 \text{ ef}$	0.76
桂早 1 号 Guizao 1	$26.10 \pm 2.62 \text{ bc}$	$20.91 \pm 2.18 \text{ abc}$	$3.01 + 0.10 \text{ def}$	0.61
福豆 234 Fudou 234	$24.41 \pm 1.93 \text{ abc}$	$25.56 \pm 1.87 \text{ cd}$	$3.10 + 0.37 \text{ def}$	0.81
中黄 24 Zhonghuang 24	$27.03 \pm 0.30 \text{ c}$	$29.84 \pm 2.48 \text{ d}$	$5.61 + 0.09 \text{ a}$	0.81
华夏 4 号 Huaxia 4	$26.99 \pm 1.86 \text{ c}$	$22.85 \pm 1.11 \text{ bc}$	$3.55 + 0.21 \text{ cde}$	0.72
巴西 10 号 Brazil 10	$20.96 \pm 1.20 \text{ ab}$	$27.70 \pm 2.30 \text{ d}$	$4.15 + 0.27 \text{ bc}$	1.04

同一列中不同的字母表示在 0.05 水平差异显著。

Values within a column followed by different letters are significantly different at 0.05 probability level, TsF: Transfer coefficient.

## 2.3 大豆品种间 Cd 积累量与根系吸收能力的差异

大豆单株 Cd 积累量在品种间存在显著性差异(表 3),其中中黄 24 和桂早 1 号单株总 Cd 积累量较低,分别为 0.14 和 0.20 mg,而巴西 15 和巴西 3 号的单株 Cd 积累量较高,分别为 0.45 和 0.42 mg。由于单株 Cd 积累量是生物量与浓度的乘积,而各品种生物量不同,单株 Cd 积累量和籽粒 Cd 浓度间无显著关系。

大豆各器官 Cd 积累量的百分比差异大, Cd 积累量的最大部分在在地上部(籽粒除外),达到植株总积累量 80% 以上,而根系和籽粒只占总积累量的 15%

在 Cd 处理条件下 11 个夏大豆品种的籽粒中 Cd 浓度明显不同,最高的中黄 24( $5.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),较低的华夏 3 号、桂 M32 和埂青 82,分别为 2.10、2.14 和  $3.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,中黄 24 籽粒 Cd 浓度是华夏 3 号的 2.5 倍。同时发现在 Cd 污染的土壤中生产的大豆籽粒 Cd 浓度最低的品种也已远超过国际卫生组织规定作为人类和动物食物的大豆籽粒的 Cd 浓度应低于  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的限量标准,因此认为现有品种在重金属污染的土壤中种植,其籽粒中 Cd 很可能会超标。

地上部 Cd 浓度与根部 Cd 浓度的比值(转运系数)常用于表征植物由地下部分向地上部分转运重金属的能力。从表 2 可知,转运系数在品种间存在差异,其中华夏 3 号、桂早 1 号、埂青 82 转运系数分别为 0.57、0.61 和 0.60,而巴西 10 号、巴西 3 号、桂夏豆 2 号、中黄 24 和福豆 234 转运系数均达到 0.80 以上。转运系数小的品种,其籽粒中 Cd 浓度也较低,而转运系数大品种,其籽粒中 Cd 浓度也较高。因此,根系向地上部分转运重金属能力是籽粒 Cd 积累的决定性因素。

左右(表 3)。根部 Cd 积累量华夏 3 号最高(17%),巴西 10 号最低(6%);地上部(籽粒除外)中 Cd 积累量巴西 10 号最高(90%),华夏 3 号最低(80%);籽粒中 Cd 积累量中黄 24 最高(8%),巴西 15、桂 M32、华夏 3 号和华夏 4 号仅为 3%。籽粒中 Cd 低积累的品种除根系吸收能力差外,其根系向地上部转运 Cd 的能力也差,因此不同大豆品种的籽粒 Cd 积累的机制可能不同。

大豆体内 Cd 主要是通过根系吸收的,可用单位根重 Cd 吸收量来比较根系吸收 Cd 的能力。供试品种间单位根系吸收量存在显著差异(表 3),其

中华夏 3 号、桂 M32 和巴西 15 的单位根系吸收量较小,而中黄 24、巴西 10 号和华夏 4 号的单位根重 Cd 吸收量较高。将籽粒 Cd 浓度的高低和单位根重 Cd 吸收量比较,发现二者存在高度一致性,表明根系吸收能力是影响籽粒 Cd 浓度的重要因素。

表 3 Cd 处理对不同大豆品种 Cd 积累及分布的影响  
Table 3 Differences of Cd accumulation and distribution among 11 Soybean varieties under Cd stress

品种 Variety	单株积累量 Total uptake /mg · plant <sup>-1</sup>	单位根吸收量 Uptake per root weight /g · kg <sup>-1</sup>	各器官百分数 Percentage/%		
			根 Root	地上部(籽粒除外) Shoot	籽粒 Seed
桂夏豆 2 号 Guixiadou 2	0.36 ± 0.03 efg	0.24 ± 0.02 bc	8	87	5
巴西 3 Brazil 3	0.42 ± 0.04 fg	0.28 ± 0.02 bc	7	88	5
华夏 3 号 Huaxia 3	0.33 ± 0.04 cdef	0.14 ± 0.02 a	17	80	3
埂青 82 Gengqing 82	0.26 ± 0.01 bcd	0.28 ± 0.01 bc	9	86	5
桂 M32Gui M 32	0.34 ± 0.02 bcde	0.22 ± 0.02 ab	10	87	3
巴西 15 Brazil 15	0.45 ± 0.05 g	0.20 ± 0.02 ab	10	87	3
桂早 1 号 Guizao 1	0.20 ± 0.01 ab	0.27 ± 0.02 bc	9	86	5
福豆 234Fudou 234	0.27 ± 0.04 bcde	0.26 ± 0.05 bc	9	87	4
中黄 24Zhonghuang 24	0.14 ± 0.02 a	0.37 ± 0.05 d	7	85	8
华夏 4 号 Huaxia 4	0.26 ± 0.04 bcd	0.32 ± 0.04 cd	8	89	3
巴西 10 Brazil 10	0.23 ± 0.01 def	0.37 ± 0.03 d	6	90	4

各器官百分率为各器官积累量占植株总积累量的百分数。  
Percentage is the ratio of accumulation in each organ to the total accumulation per plant.

2.4 大豆品种 Cd 抗性与各器官 Cd 浓度间的关系

Cd 抗性与 Cd 积累是大豆在污染土壤中种植时必须考虑的两个重要性状,分析大豆各器官 Cd 浓度与籽粒、地上部(籽粒除外)和根相对干重的相关性可揭示大豆各器官 Cd 浓度与 Cd 抗性间的关系(表 4)。籽粒 Cd 浓度与地上部(籽粒除外)Cd 浓度

呈极显著正相关,而与根 Cd 浓度相关性不显著,表明地上部(籽粒除外)Cd 浓度对籽粒 Cd 积累更为重要。籽粒 Cd 浓度与籽粒、地上部(籽粒除外)和根相对干重的相关性不显著,因此籽粒 Cd 积累与植株 Cd 抗性由不同的基因控制。

表 4 不同大豆品种抗性与籽粒积累的相关性分析  
Table 4 Correlation coefficient in dry weight, Cd concentrations and accumulation among different soybean organs

		相对干重 Relative weight			Cd 浓度 Cd concentration			单株 积累量 Total uptake	单位根 吸收量 Uptake per root weight	转运系数 TsF
相对干重 Relative weight	地上部 (籽粒除外) Shoot	根 Root	籽粒 Seed	地上部 (籽粒除外) Shoot	根 Root	籽粒 Seed	0.864 **	0.838 **	-0.551	-0.153
	1	0.915 **	0.852 **	-0.723 *	-0.673 *	-0.313				
	地上部(除籽粒外)Shoot	1	0.897 **	-0.595	-0.753 **	-0.233				
Cd 浓度 Cd concentration	地上部(除籽粒外)Shoot	1	0.897 **	-0.595	-0.753 **	-0.233	0.838 **	-0.58	0.007	
	根 Root		1	-0.696 *	-0.615 *	-0.297	0.683 *	-0.635 *	-0.239	
	籽粒 Seed			1	-0.696 *	-0.615 *	-0.297	0.683 *	-0.635 *	-0.239
单株积累量 Total uptake	地上部(除籽粒外)Shoot			1	0.370	0.786 **	-0.667 *	0.874 **	0.654 *	
	根 Root				1	0.134	-0.795 **	0.396	-0.414	
	籽粒 Seed					1	-0.362	0.763 **	0.661 *	
单位根吸收重 Uptake per root weight								1		0.025
转运系数 TsF									1	0.562

\*代表  $P < 0.05$ ; \*\*代表  $P < 0.01$ 。  
\* Correlation is significant at the 0.05 level; \*\* Correlation is significant at the 0.01 level.

对相对籽粒干重(指示耐性)、籽粒 Cd 浓度(指示积累能力)、单位根吸收量(指示吸收能力)和转运系数(指示根系向上分配能力)4 个指标进行相关分析(表 4),结果相对籽粒干重只与单位根重吸收量呈

显著负相关,籽粒 Cd 浓度则与转运系数、单位根重吸收量呈显著和极显著正相关,由此可发现,大豆的根系吸收能力决定了 Cd 抗性和籽粒积累,且大豆籽粒 Cd 积累还与根系向地上部分分配能力密切相关。

### 3 结论与讨论

土壤中 Cd 浓度达  $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  或植物体内 Cd 含量达到  $0.2 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时会对植物产生毒性效应<sup>[11]</sup>, 因此要在污染土壤种植大豆, 首先大豆的生长不能受到严重影响, 即大豆具有抗污染能力。大豆是以收获籽粒为目的的作物, 籽粒产量是关键指标, 而大豆籽粒产量与生物量密切相关<sup>[12]</sup>, 因此要综合相对生物量(籽粒除外)和相对大豆籽粒产量进行评价, 耐性指数常被作为筛选指标用于抗性材料的筛选<sup>[13]</sup>。本研究中 11 个夏大豆基因型间用不同指标单独评价时同一品种结果不一致, 例如巴西 15, 地上部生物量和根系在 Cd 处理条件下可达对照的 85% 以上, 但籽粒产量下降近 50%。只有相对地上部生物量(籽粒除外)、相对根系重和相对籽粒产量都高于 80% 的桂夏豆 2 号、巴西 3 号才被认为是抗性品种, 而相对生物量、相对根系重和相对籽粒产量都低于 60% 的巴西 10 号、福豆 234、华夏 4 号和中黄 24 是敏感品种。

污染土壤种植大豆时要求籽粒中 Cd 浓度满足食品安全标准。本试验结果发现华夏 3 号、桂 M32 和埂青 82 的籽粒和地上部 Cd 浓度相对较低, 但根部 Cd 浓度却较高, 而中黄 24、巴西 10 号和巴西 3 号籽粒和地上部(籽粒除外)Cd 浓度较高, 但根部 Cd 浓度却相对较低。籽粒 Cd 浓度最低的华南地区主栽品种也已远超过国际 Cd 限量标准  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的 5 倍, 因此可认为现有主栽品种在重金属污染的土壤中种植生产存在风险。进一步分析发现籽粒 Cd 浓度高的品种 Cd 总吸收量并不高, 但其根系吸收能力(单根重吸收量)和根系向地上部转运能力(转运系数)均高。大豆嫁接试验也证明, 地上部积累差异由根系吸收能力和根系转运能力决定, 籽粒低积累品种将吸收的 Cd 大部分保留在根系中<sup>[14-15]</sup>。因此有必要从品种间的根系吸收能力和根系向地上部转运能力两个方面进行研究, 揭示大豆 Cd 积累的分子机制, 寻找分子育种的靶位点。

大豆 Cd 抗性与 Cd 积累是污染土壤上种植大豆必须关注的两个方面, 常以相对籽粒产量和相对地上部生物量(籽粒除外)为主要指标评价大豆 Cd 抗性, 而以籽粒 Cd 浓度为指标评价 Cd 积累, 但一直以来未就二者间的关系做深入分析。本研究结果发现高抗品种桂早 1 号和巴西 3 号籽粒 Cd 浓度较高, 而中等抗性品种华夏 3 号籽粒 Cd 积累较低, 但敏感品种巴西 10 号、中黄 24 等籽粒 Cd 积累最高。进一步分析发现籽粒 Cd 浓度与相对籽粒产量、相对地上部干重(籽粒除外)和相对根干重的相关性不显著, 而与地上部 Cd 浓度显著正相关, 表明籽粒 Cd 积累与 Cd 抗性有各自独立的遗传机制。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] Bingham F T, Page A L, Mahler R J. Growth and cadmium accumulation of plants grown on a soil treated with a cadmium-enriched sewage sludge[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1975, 14: 207-211.
- [3] Lavado R S. Concentration of potentially toxic elements in field crops grown near and far from cities of the Pampas (Argentina) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 80(2): 116-119.
- [4] Shute T, Macfie S M. Cadmium and zinc accumulation in soybean: A threat to food safety? [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 371(1-3): 63-73.
- [5] 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.
- [6] Arao T, Ae N, Sugiyama M, et al. Genotypic differences in cadmium uptake and distribution in soybeans[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251: 247-253.
- [7] Boggess S F, Willavize S, Koeppel D E. Differential response of soybean varieties to soil cadmium[J]. *Agronomy Journal*, 1978, 70(5): 756-760.
- [8] Arao T, Ishikawa S. Genotypic differences in cadmium concentration and distribution of soybeans and rice[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2006, 40(1): 21-30.
- [9] 黄运湘, 廖柏寒, 王志坤, 等. 不同大豆品种镉毒害效应及耐镉差异性[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 34(5): 519-524. (Huang Y X, Liao B H, Wang Z K, et al. Cadmium toxicity and differences in tolerance to cadmium of various soybean varieties[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Nat. Sci.)*, 2008, 34(5): 519-524.)
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. (Lu R K. Soil agricultural chemical analysis method [M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 1999.)
- [11] Sanità Di Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41(2): 105-130.
- [12] 黄中文, 赵团结, 喻德跃, 等. 大豆生物量积累、收获指数及产量间的相关与 QTL 分析[J]. *作物学报*, 2008(6): 944-951. (Huang Z W, Zhao T J, Yu D Y, et al. Correlation and QTL mapping of biomass accumulation, apparent harvest index, and yield in soybean[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008(6): 944-951.)
- [13] Metwally A, Safronova V I, Belimov A A, et al. Genotypic variation of the response to cadmium toxicity in *Pisum sativum* L[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(409): 167-178.
- [14] Ishikawa S, Ae N, Sugiyama M, et al. Genotypic variation in shoot cadmium concentration in rice and soybean in soils with different levels of cadmium contamination[J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2005, 51: 101-108.
- [15] Sugiyama M, Ae N, Arao T. Accumulation of large amounts of Cd in the root may limit the accumulation of Cd in edible above-ground portions of the plant[J]. *Plant and Soil*, 2007, 295: 1-11.