

崔广娟, 曹华元, 陈康, 等. 镉胁迫对 4 种基因型大豆生长和体内元素分布的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 49-57.
CUI Guangjuan, CAO Huayuan, CHEN Kang, et al. Effects of cadmium stress on plant growth and element distribution of four soybean genotypes[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(5): 49-57.

镉胁迫对 4 种基因型大豆生长和体内元素分布的影响

崔广娟^{1,2†}, 曹华元^{1†}, 陈康¹, 王秀荣¹

(1 亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室/华南农业大学根系生物学研究中心, 广东 广州 510642;

2 仲恺农业工程学院 环境科学与工程学院, 广东 广州 510255)

摘要:【目的】分析不同基因型大豆的镉 (Cd) 敏感性差异, 筛选耐 Cd 基因型应用于大豆育种。【方法】选用‘巴西 10 号’、‘本地 2 号’、‘桂夏豆 2 号’、‘华夏 3 号’ 4 种基因型大豆, 设置不同 Cd 浓度处理, 测定主根长、生物量、总根长、根表面积、Cd 浓度以及不同营养元素浓度等指标。【结果】在 11 mg/kg Cd 处理下, ‘华夏 3 号’ 主根长与对照相比没有明显变化, 其他基因型主根生长均受到明显抑制; 在高于 46 mg/kg Cd 处理下, 4 种基因型大豆主根生长均受到严重抑制。Cd 处理降低了大豆生物量, ‘巴西 10 号’ 和 ‘本地 2 号’ 受到的 Cd 毒害较严重; ‘桂夏豆 2 号’ 和 ‘华夏 3 号’ 在 10、20 mg/kg Cd 处理下生物量显著高于 ‘巴西 10 号’ 和 ‘本地 2 号’。4 种基因型大豆的根部 Cd 浓度远高于地上部, 在 10 mg/kg Cd 处理下, ‘本地 2 号’ 的地上部 Cd 浓度显著高于 ‘桂夏豆 2 号’ 和 ‘华夏 3 号’, 表明耐 Cd 的 ‘桂夏豆 2 号’ 和 ‘华夏 3 号’ 有较少的 Cd 转移到地上部。Cd 处理后 4 种基因型大豆的根系生长均受到明显抑制, 相比于其他 3 种大豆基因型, ‘华夏 3 号’ 的总根长和根表面积受到的抑制程度最小。在不同 Cd 浓度处理中 4 种基因型大豆各营养元素的浓度有显著差异。【结论】4 种基因型大豆的耐 Cd 能力存在显著差异, ‘巴西 10 号’ 和 ‘本地 2 号’ 是 Cd 敏感基因型, ‘桂夏豆 2 号’ 和 ‘华夏 3 号’ 是耐 Cd 基因型。耐 Cd 能力的差异可能与 Cd 处理下大豆根系生长和体内元素分布有关。

关键词: 大豆; 基因型; 镉胁迫; 根系性状; 生物量; 营养元素浓度

中图分类号: S511; S502

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2020)05-0049-09

Effects of cadmium stress on plant growth and element distribution of four soybean genotypes

CUI Guangjuan^{1,2†}, CAO Huayuan^{1†}, CHEN Kang¹, WANG Xiurong¹

(1 State Key Laboratory for Conservation and Utilization of Subtropical Agro-bioresources/Root Biology Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 College of Environmental Science and Engineering,

Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510255, China)

Abstract: 【Objective】To analyze cadmium (Cd) sensitivity differences of different soybean genotypes, and screen Cd-tolerant genotypes for soybean breeding. 【Method】Different Cd concentrations were set, four soybean genotypes of ‘Baxi No. 10’, ‘Bendi No. 2’, ‘Guixiadou No. 2’ and ‘Huaxia No. 3’ were selected as test

收稿日期: 2019-11-22 网络首发时间: 2020-07-10 13:28:12

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20200709.1715.016.html>

作者简介: 崔广娟 (1991—), 女, 硕士, E-mail: 1483522532@qq.com; 曹华元 (1994—), 男, 硕士, E-mail: 185700595@qq.com; †表示对本文贡献相同; 通信作者: 王秀荣 (1971—), 女, 研究员, 博士, E-mail: xiwang@scau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0200200, 2017YFD0200203)

materials. The taproot length, biomass, total root length, root surface area, Cd concentration and nutrient element concentrations were determined. 【Result】 Under 11 mg/kg Cd treatment, the taproot length of ‘Huaxia No. 3’ did not obviously change compared with the control while the taproot growths of other three soybean genotypes were distinctly inhibited. The taproot growths of four soybean genotypes were severely inhibited when Cd concentrations were higher than 46 mg/kg. Cd treatment reduced soybean biomass. ‘Baxi No. 10’ and ‘Bendi No. 2’ were more severely Cd-toxic. ‘Guixiadou No. 2’ and ‘Huaxia No. 3’ showed significantly higher biomasses than ‘Baxi No. 10’ and ‘Bendi No. 2’ under 10 and 20 mg/kg Cd stress treatments. The Cd concentrations in roots of four soybean genotypes were far higher than those in shoots. In 10 mg/kg Cd treatment, Cd concentration in the shoot of ‘Bendi No. 2’ was significantly higher than those in shoots of ‘Guixiadou No. 2’ and ‘Huaxia No. 3’, indicating that Cd-resistant ‘Guixiadou No. 2’ and ‘Huaxia No. 3’ transferred less Cd from root to shoot. The root growths of four soybean genotypes were significantly inhibited by Cd stress. The total root length and root surface area of ‘Huaxia No. 3’ were less inhibited compared with other three soybean genotypes. There were significant differences among nutrient element concentrations of four soybean genotypes treated by different Cd concentrations. 【Conclusion】 There are significant genotypic differences of Cd tolerances among four soybean genotypes. ‘Baxi No. 10’ and ‘Bendi No. 2’ are Cd-sensitive genotypes while ‘Guixiadou No. 2’ and ‘Huaxia No. 3’ are Cd-tolerant genotypes. The differences of Cd tolerance may relate to root growth and element distribution in soybean under Cd treatments.

Key words: soybean; genotype; cadmium stress; root character; biomass; nutrient element concentration

随着我国工业化快速发展,土壤重金属污染越发严重^[1]。重金属污染影响植物的生长、产量和品质,甚至会通过食物链迁移到人体内威胁人类健康^[2-3]。镉(Cd)污染作为重金属污染的头号元凶,对其研究的紧迫性日益剧增。Cd是作物生长的限制因素,会降低植物体内的叶绿素含量,进而影响正常光合作用^[4];还会诱发高活性氧自由基,导致植物由于过氧化而提前衰老^[5]。Cd对植株的毒害程度取决于多方面因素,包括植物种类、Cd浓度和Cd胁迫时间等。丁海东等^[6]发现1 μmol/L低浓度Cd溶液能提高番茄种子发芽势,2 mmol/L的高浓度Cd溶液会降低种子发芽势、发芽率,抑制根的生长;Ederli等^[7]研究表明100 μmol/L Cd浓度胁迫下芦苇根结构没有明显变化;周全等^[8]研究发现Cd质量分数高于0.5 mg/kg时12个水稻品种的苗高均显著下降,干物质量和叶绿素含量等也受到明显影响;Gzyl等^[9]的结果同样证明了类似的观点。由此可见,不同植物对Cd胁迫的反应不同,有必要在不同植物上进行Cd处理研究。

Cd毒害不但显著抑制植物生长,还会影响植物对必需营养元素的吸收及营养元素在植物体内的有效性。He等^[10]研究发现,Cd敏感型水稻突变体的总根长及根表面积会随Cd溶液浓度的增加而增加,导致根系对Cd的吸收量比野生型更高;有研究

发现Cd抑制重金属超积累植物地上部对锌(Zn)、铁(Fe)和锰(Mn)的吸收以及根部对Fe、Mn的吸收^[11];此外,Cd处理会显著降低甘蓝叶中Fe、Mn、镁(Mg)含量以及根中Mn含量^[12]。这些研究表明植物的耐Cd能力可能与植物必需营养元素吸收有重要联系,目前相关报道还较少。

大豆 *Glycine max* L.是世界上重要的粮食作物、油料作物和饲料来源,营养价值极高,富含蛋白质、氨基酸、脂肪和多种矿物质^[13]。同时,大豆是Cd毒害敏感作物,在受Cd污染的土壤中生长的大豆的多种农艺性状都表现出毒害症状^[14-15]。因此,Cd污染会严重影响大豆生产,研究大豆对Cd胁迫的响应十分重要。本研究以对Cd敏感程度不同的4种基因型大豆作为材料,研究不同浓度的Cd胁迫处理对大豆种子萌发、植株生长及元素积累的影响,从大豆根系性状以及体内元素积累和分配的角度解析不同基因型大豆Cd敏感性存在差异的原因,筛选耐Cd基因型用于大豆育种。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

材料为4种基因型大豆:‘巴西10号’、‘本地2号’、‘桂夏豆2号’和‘华夏3号’。试验所用土壤来自华南农业大学增城教学科研基地,土

壤基本理化性状参见文献 [16]。所用石英砂均是商业购买,分粗砂和中砂。

1.2 营养液

营养液采用改良版大豆砂培 1/2 Hoagland 营养液,母液 (1 000 ×) 具体配方:252.76 g/L KNO_3 、43.57 g/L K_2SO_4 、590.38 g/L $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、246.47 g/L $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、29.40 g/L $\text{Fe-EDTA}(\text{Na})$ 、0.89 g/L $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.09 g/L $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.04 g/L $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、0.20 g/L $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、68.05 g/L KH_2PO_4 和 1.24 g/L H_3BO_3 , pH 5.8~6.0。种子萌发培养基配方:1/2 Hogland 营养液、10 g/L 蔗糖、3 g/L 琼脂粉。

1.3 方法

1.3.1 试验设计 Cd 对大豆种子萌发影响的试验在培养室进行,设置不同 Cd 浓度的萌发培养基,镉质量分数分别为 0(对照)、2、11、23、46、114、228 mg/kg $\text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$,每个处理 3 次重复,每皿播 6 粒种子。不同基因型大豆 Cd 处理盆栽试验在网室大棚进行,设置 3 种 Cd 质量分数处理,分别为 0(对照)、10、20 mg/kg $\text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$,每个处理 4 次重复。

1.3.2 测定指标及方法 在大豆主根生长试验中,挑选 4 种基因型大豆饱满无伤痕的种子,置于培养皿内,单层排列,打开培养皿,放入干燥器中,将干燥器放入通风橱中。干燥器中放入烧杯,烧杯中加入 100 mL 次氯酸钠,然后沿着杯壁缓慢加入 4.2 mL 盐酸,次氯酸钠和盐酸反应产生氯气,盖上干燥器盖子,用氯气消毒 10 h。之后打开干燥器盖子,盖上培养皿盖,拿出培养皿放在超净工作台内,打开培养皿盖通风约 30 min,除去多余的氯气以免影响种子生长。将消毒后的种子种脐向下播种在培养基中,置于 24 °C 培养室中光照培养。5 d 后拍照,用尺子量主根长,记录数据。

盆栽试验采用砂土培。石英砂用清水冲洗干净后,121 °C 灭菌 40 min,间隔 24 h 后重复灭菌 1 次,土壤与石英砂采用相同灭菌方式,然后将石英砂与土壤按照质量比 4:1 的比例混匀。称取 $\text{CdCl}_2 \cdot 5/2\text{H}_2\text{O}$ 配置 0(CK)、10、20 mg/kg Cd 溶液,按比例倒入砂土混合基质中混匀,静置平衡 20 d 后装盆,每盆装 2 kg 混合砂土。大豆种子用氯气熏蒸灭菌后,每盆播 3 颗饱满健康的种子,浇适量营养液,出苗后每盆挑选生长一致的大豆植株保留 1 株。每周补充 1 次营养液,45 d 后收获,测定植株生物量、根系性状和元素浓度等指标。根系用自来水冲洗干净后,用台式扫描仪 (Epson 1460XL) 扫描根系,用根系分析软件 WinRHIZO (Regent Instruments Inc., 加拿

大) 分析总根长和根表面积。植株地上部与根系样品分别烘干粉碎称质量后,经马福炉在 550 °C 条件下灰化 8 h,用原子吸收分光光度计测定 Cd、钙 (Ca)、Mg、Fe、铜 (Cu)、Zn、Mn 和钾 (K) 的浓度,磷 (P) 浓度用钼锑抗比色法测定。

1.4 数据分析

试验数据均采用 Microsoft Excel 2010 (Microsoft Company, 美国) 软件和 SPSS 18.0 进行数据处理和双因素方差分析,采用 Duncan's 法对不同 Cd 处理或基因型进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 Cd 处理对不同基因型大豆主根生长的影响

Cd 处理极显著影响大豆主根生长 ($P < 0.001$),并且不同基因型大豆的主根长对加 Cd 处理的反应也存在极显著差异 ($P < 0.001$) (表 1)。由图 1a 可知,与对照相比,2 mg/kg Cd 处理下 4 种基因型大豆主根长有增加的趋势;随着 Cd 浓度增加,从 11 mg/kg 开始,主根长的伸长逐渐受到抑制,23 mg/kg 时‘巴西 10 号’、‘本地 2 号’、‘桂夏豆 2 号’和‘华夏 3 号’主根长分别比对照下降了 50%、20%、37% 和 50%;114、228 mg/kg Cd 处理时 4 种基因型大豆的主根长均受到严重抑制,比对照减少 1 倍以上。同时 Cd 对不同基因型的抑制程度有所不同,‘华夏 3 号’的耐 Cd 能力较好,在 11 mg/kg Cd 处理下,主根长与对照相比没有明显变化,其他基因型均受到明显抑制;在 Cd 质量分数 ≥ 46 mg/kg 处理下,所有基因型主根长均受到严重抑制。

2.2 Cd 处理对不同基因型大豆生物量的影响

Cd 处理极显著影响大豆的生物量 ($P < 0.001$),并且不同基因型大豆的生物量也存在极显著差异 ($P < 0.001$) (表 1)。由图 1b 可知,与对照相比,4 种基因型大豆的生物量均随着 Cd 浓度的增加明显下降。在 10、20 mg/kg Cd 处理后,‘巴西 10 号’生物量分别比对照减少 86%、84%,‘本地 2 号’减少 74%、76%,‘桂夏豆 2 号’减少 53%、56%,‘华夏 3 号’减少 59%、70%。4 种基因型大豆的耐 Cd 能力存在显著差异,不加 Cd 时,‘巴西 10 号’、‘本地 2 号’、‘桂夏豆 2 号’的生物量无显著差异,均显著低于‘华夏 3 号’;在 10 mg/kg Cd 处理下,4 种基因型大豆的生物量差异显著,表现为‘巴西 10 号’ < ‘本地 2 号’ < ‘桂夏豆 2 号’ < ‘华夏 3 号’;在 20 mg/kg Cd 处理下,‘华夏 3 号’与‘桂夏豆 2 号’生物量无显著差异,均显著高于‘巴西 10 号’和‘本地 2 号’。结果表明,

Cd 会抑制植株正常生长, Cd 处理后 4 种基因型大豆 2 号’的耐 Cd 能力显著优于‘巴西 10 号’和豆的生物量存在显著差异,‘华夏 3 号’和‘桂夏本地 2 号’。

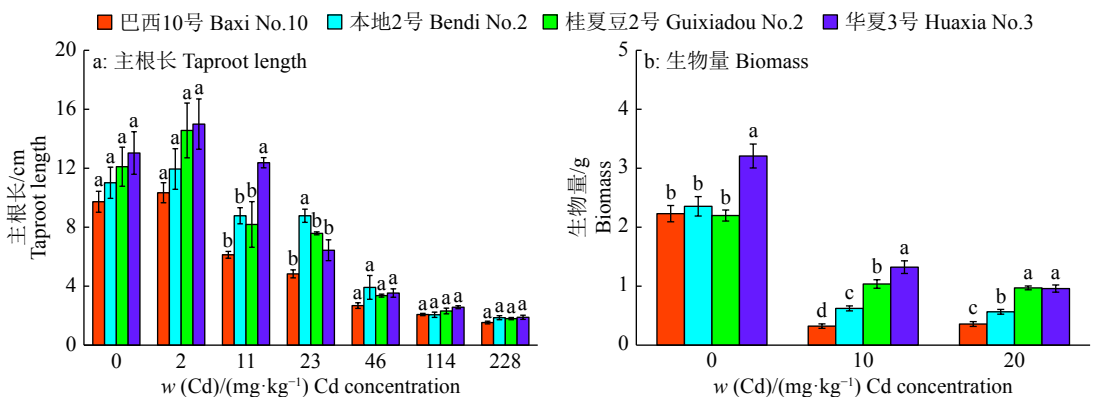
表 1 Cd 处理对不同基因型大豆生长指标影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA of effects of Cd treatment on growth indicators of different soybean genotypes

指标 Index	$F^{1)}$		
	Cd处理 Cd treatment	基因型 Genotype	Cd处理×基因型 Cd treatment × Genotype
主根长 Taproot length	120.06***	11.68***	2.47***
生物量 Biomass	392.05***	39.85***	5.39***
总根长 Total root length	762.59***	20.36***	5.19***
根表面积 Root surface area	338.72***	13.56***	2.86*
地上部Cd浓度 Cd concentration of shoot	86.24***	4.02*	1.90
根部Cd浓度 Cd concentration of root	198.65***	30.80***	12.75***
地上部P浓度 P concentration of shoot	22.66***	15.24***	4.90***
地上部K浓度 K concentration of shoot	211.23***	22.77***	5.44***
地上部Ca浓度 Ca concentration of shoot	15.64***	0.53	4.35**
地上部Mg浓度 Mg concentration of shoot	5.52**	13.55***	0.27
地上部Fe浓度 Fe concentration of shoot	9.70***	2.47	5.36***
地上部Cu浓度 Cu concentration of shoot	53.64***	9.87***	8.15***
地上部Zn浓度 Zn concentration of shoot	13.95***	5.50**	2.04
地上部Mn浓度 Mn concentration of shoot	37.53***	19.26***	6.06***
根部P浓度 P concentration of root	19.83***	21.56***	10.51***
根部K浓度 K concentration of root	74.33***	6.07**	12.51***
根部Ca浓度 Ca concentration of root	0.26	2.01	4.20**
根部Mg浓度 Mg concentration of root	1.33	13.51***	2.34
根部Fe浓度 Fe concentration of root	3.57*	5.11**	2.73*
根部Cu浓度 Cu concentration of root	18.92***	4.06*	2.99*
根部Zn浓度 Zn concentration of root	10.26***	7.58***	3.73**
根部Mn浓度 Mn concentration of root	49.00***	4.63**	3.96**

1) “*”表示 $P < 0.05$, “**”表示 $P < 0.01$, “***”表示 $P < 0.001$ (双因素方差分析)

1) “*” indicates $P < 0.05$, “**” indicates $P < 0.01$, “***” indicates $P < 0.001$ (Two-way ANOVA)



各小图中相同 Cd 浓度处理柱子上方的不同小写字母表示不同基因型大豆间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)

Different lowercase letters on the columns of the same Cd concentration treatment in each figure indicate significant differences among different soybean genotypes ($P < 0.05$, Duncan's method)

图 1 Cd 处理对不同基因型大豆主根长和生物量的影响

Fig. 1 Effects of Cd treatments on taproot lengths and biomasses of different soybean genotypes

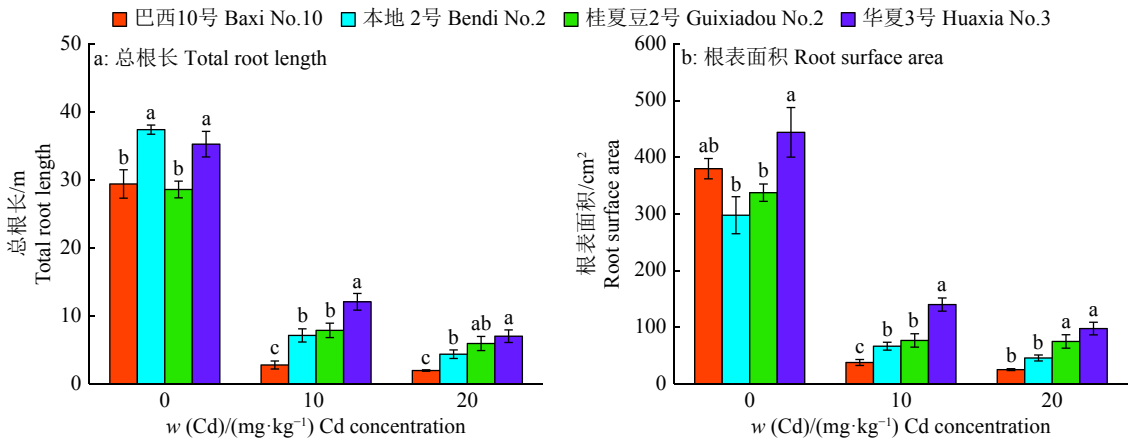
2.3 Cd处理对不同基因型大豆根系性状的影响

Cd处理极显著影响大豆的总根长和根表面积 ($P < 0.001$), 并且不同基因型大豆的总根长和根表面积也存在极显著差异 ($P < 0.001$)(表1)。由图2可知, 4种基因型大豆总根长和根表面积随着Cd浓度的增加逐渐下降。与对照相比, ‘巴西10号’的总根长在10、20 mg/kg Cd处理下均减少90%以上, ‘华夏3号’分别减少66%和80%。不加Cd时, ‘本地2号’和‘华夏3号’的总根长显著高于‘巴西10号’和‘桂夏豆2号’, ‘本地2号’和‘华夏3号’之间差异不显著; ‘华夏3号’的根表面积显著高于‘本地2号’和‘桂夏豆2号’。在10 mg/kg Cd处理下, ‘华夏3号’的总根长和根表面积显著高于‘本地2号’和‘桂夏

豆2号’, ‘本地2号’和‘桂夏豆2号’之间无显著差异, ‘巴西10号’的总根长和根表面积均显著低于其他3种基因型。在20 mg/kg Cd处理下, ‘华夏3号’的总根长显著高于‘巴西10号’和‘本地2号’, ‘华夏3号’和‘桂夏豆2号’之间无显著差异; ‘桂夏豆2号’和‘华夏3号’的根表面积显著高于‘巴西10号’和‘本地2号’。

2.4 Cd处理对不同基因型大豆Cd浓度的影响

Cd处理极显著影响大豆地上部和根部Cd浓度 ($P < 0.001$), 并且不同基因型大豆地上部Cd浓度对存在显著差异 ($P < 0.05$), 根部Cd浓度存在极显著差异 ($P < 0.001$)(表1)。由图3可知, 大豆根部的Cd浓度远高于地上部。与对照相比, 在10、20

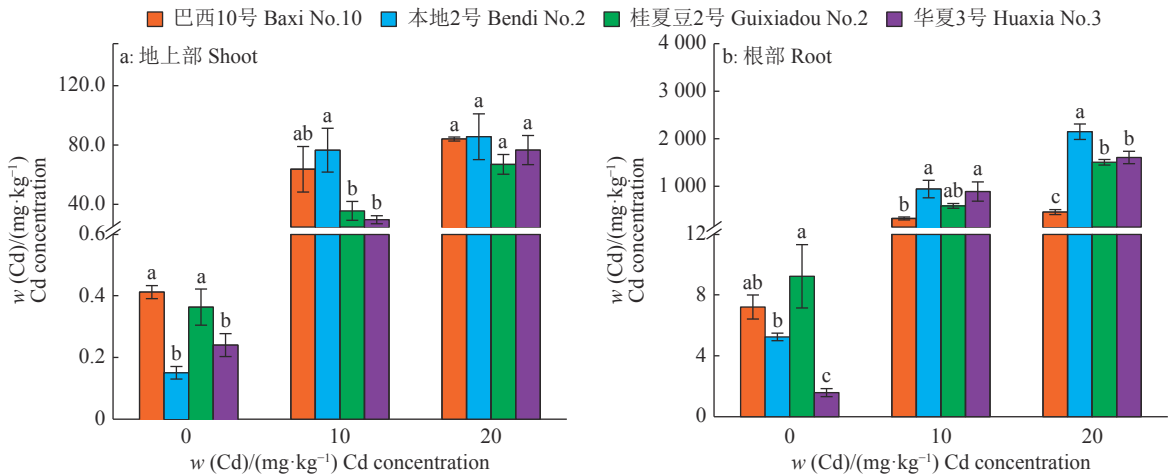


各小图中相同Cd浓度处理柱子上方的不同小写字母表示不同基因型大豆间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)

Different lowercase letters on the columns of the same Cd concentration treatment in each figure indicate significant differences among different soybean genotypes ($P < 0.05$, Duncan's method)

图2 Cd处理对不同基因型大豆总根长和根表面积的影响

Fig. 2 Effects of Cd treatments on total root length and root surface area of different soybean genotypes



各小图中相同Cd浓度处理柱子上方的不同小写字母表示不同基因型大豆间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)

Different lowercase letters on the columns of the same Cd concentration treatment in each figure indicate significant differences among different soybean genotypes ($P < 0.05$, Duncan's method)

图3 Cd处理对不同基因型大豆Cd浓度的影响

Fig. 3 Effects of Cd treatments on Cd concentrations of different soybean genotypes

mg/kg 处理下, 4 种基因型大豆的地上部和根部 Cd 浓度均增加了 10 倍以上。不加 Cd 时, ‘本地 2 号’和‘华夏 3 号’地上部 Cd 浓度显著低于‘巴西 10 号’和‘桂夏豆 2 号’, 同时‘巴西 10 号’和‘桂夏豆 2 号’, 以及‘本地 2 号’和‘华夏 3 号’均无显著差异; ‘桂夏豆 2 号’根部 Cd 浓度显著高于‘本地 2 号’和‘华夏 3 号’, 与‘巴西 10 号’差异不显著。在 10 mg/kg Cd 处理下, ‘本地 2 号’地上部 Cd 浓度显著高于‘桂夏豆 2 号’和‘华夏 3 号’, 与‘巴西 10 号’差异不显著; ‘巴西 10 号’根部 Cd 浓度显著低于‘本地 2 号’和‘华夏 3 号’, 与‘桂夏豆 2 号’无显著差异。在 20 mg/kg Cd 处理下, 4 种基因型大豆地上部 Cd 浓度无显著差异; ‘巴西 10 号’的根部 Cd 浓度最低, ‘本地 2 号’最高, ‘华夏 3 号’和‘桂夏豆 2 号’无显著差异。

2.5 Cd 处理对不同基因型大豆营养元素浓度的影响

由表 2 可知, Cd 处理显著影响不同基因型大豆地上部各种营养元素的浓度。与对照相比, 4 种基因型大豆地上部 P、K、Cu、Fe 浓度在 2 种 Cd 浓度

胁迫处理下均有增加的趋势。在 10 mg/kg Cd 处理下, ‘本地 2 号’地上部 Ca 浓度比对照显著增加, ‘华夏 3 号’地上部 Ca 浓度比对照显著降低; 在 20 mg/kg Cd 处理下, ‘巴西 10 号’、‘桂夏豆 2 号’和‘华夏 3 号’地上部 Ca 浓度均比对照显著降低。在 10 mg/kg Cd 处理下, ‘巴西 10 号’、‘本地 2 号’和‘桂夏豆 2 号’地上部 Zn 浓度比对照显著增加。10 mg/kg Cd 处理下‘巴西 10 号’地上部 Mn 浓度比对照显著降低, 20 mg/kg Cd 处理下‘本地 2 号’、‘桂夏豆 2 号’和‘华夏 3 号’地上部 Mn 浓度比对照显著增加。

由表 3 可知, Cd 对不同基因型大豆根部营养元素浓度有很大影响。在 20 mg/kg Cd 处理下, 4 种基因型大豆根部 Mn 浓度均比对照显著增加。结合表 1 可知, 除 Ca 以外, 根部营养元素浓度在基因型之间差异显著。与对照相比, 在 2 种 Cd 处理下‘巴西 10 号’根部 P、K、Zn 浓度显著增加, 根部 Ca 浓度显著降低; ‘本地 2 号’根部 K 浓度比对照显著增加; ‘桂夏豆 2 号’根部 Cu 浓度比对照显著增加。

表 2 Cd 处理对不同基因型大豆地上部营养元素浓度影响

Table 2 Effects of Cd treatments on nutrient element concentrations in shoots of different soybean genotypes

基因型 Genotype	w(Cd)/ (mg·kg ⁻¹)	w/(g·kg ⁻¹)				w/(mg·kg ⁻¹)			
		P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn
巴西10号 Baxi No. 10	0	0.58±0.02b	20.91±0.66b	13.14±0.38a	3.37±0.11a	71.09±6.63b	6.11±1.09c	36.52±1.75b	21.07±1.90a
	10	2.01±0.41a	45.45±2.06a	14.43±1.21a	4.11±0.69a	84.07±23.62ab	12.41±1.15b	55.24±3.62a	12.25±2.06b
	20	1.89±0.08a	46.02±2.78a	10.34±0.77b	3.84±0.14a	143.02±48.14a	17.86±1.75a	53.95±7.92a	15.96±3.53ab
本地2号 Bendi No. 2	0	1.21±0.03a	17.11±0.37b	11.39±1.02b	4.49±0.46a	112.91±12.88b	6.05±0.52c	30.01±2.23b	23.05±2.68b
	10	1.43±0.07a	32.22±0.98a	15.01±0.75a	5.35±0.32a	152.91±18.41a	16.80±2.61a	47.14±1.96a	24.86±1.02b
	20	1.47±0.19a	35.95±1.18a	12.01±1.13ab	5.15±0.61a	126.43±2.78ab	11.88±1.00b	37.33±2.75b	48.84±3.74a
桂夏豆2号 Guixiadou No. 2	0	0.71±0.06b	23.78±0.71b	13.26±0.26a	3.30±0.10b	80.33±8.39b	5.99±0.68c	31.66±2.11b	21.38±1.86b
	10	1.11±0.03a	38.93±1.29a	12.46±0.55a	3.79±0.08a	192.72±17.03a	11.61±0.59a	45.98±3.00a	23.56±0.46b
	20	1.07±0.13a	38.10±1.49a	10.76±0.17b	3.72±0.17a	84.47±6.45b	8.22±0.55b	32.74±0.19b	40.24±4.55a
华夏3号 Huaxia No. 3	0	0.63±0.02b	23.52±0.85c	14.22±0.31a	3.38±0.07b	98.88±13.58b	5.96±0.61b	38.16±3.19a	27.35±1.70b
	10	0.95±0.05a	32.28±0.38b	12.19±0.25b	3.99±0.04a	128.75±26.92ab	9.47±0.28a	40.73±5.99a	21.60±0.76b
	20	0.94±0.06a	36.60±1.32a	11.23±0.34b	3.96±0.12a	169.07±24.23a	10.68±1.20a	35.58±1.70a	41.09±5.71a

1) 数据为平均值±SE; 相同基因型同列数据后的不同小写字母表示不同Cd处理浓度间差异显著($P < 0.05$, Duncan's法)

1)The datum is mean±SE; Different lowercase letters in the same column and genotype indicate significant differences among different Cd treating concentrations ($P < 0.05$, Duncan's test)

表3 Cd处理对不同基因型大豆根部营养元素浓度的影响¹⁾

Table 3 Effects of Cd treatments on nutrient element concentrations in roots of different soybean genotypes

基因型 Genotype	w(Cd)/ (mg·kg ⁻¹)	w/(g·kg ⁻¹)					w/(mg·kg ⁻¹)			
		P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	
巴西10号 Baxi No. 10	0	0.77±0.03b	27.03±1.01b	12.25±0.59a	4.06±0.19a	914.90±144.91b	13.45±1.71b	46.60±2.38b	10.04±0.89b	
	10	1.65±0.21a	38.62±1.46a	7.81±0.97b	3.26±1.02a	1 302.15±91.69a	16.48±6.69b	96.91±1.02a	13.90±1.79b	
	20	1.30±0.18a	34.78±1.63a	9.68±0.97b	2.87±0.20a	1 080.64±122.55ab	30.84±5.09a	85.39±13.22a	21.18±2.41a	
本地2号 Bendi No. 2	0	0.64±0.04b	30.80±0.80c	9.06±0.22a	1.88±0.10b	1 403.30±172.15a	17.07±1.91b	57.32±4.75a	13.00±1.68b	
	10	0.97±0.07a	34.69±0.15b	8.74±1.89a	2.63±0.23a	1 525.43±158.69a	43.79±12.26a	82.65±20.22a	11.59±1.20b	
	20	1.07±0.03a	41.33±1.35a	7.82±0.96a	3.01±0.08a	1 189.80±142.57a	29.48±3.18ab	74.67±8.29a	31.94±3.01a	
桂夏豆2号 Guixiadiou No. 2	0	0.82±0.02b	28.66±0.76b	8.88±0.43b	4.34±0.14a	1 150.17±125.49a	10.27±0.64b	44.51±2.29b	13.45±1.86b	
	10	0.85±0.05ab	24.49±1.62c	10.53±0.78a	4.67±0.31a	1 158.35±189.60a	28.82±3.20a	66.85±1.61a	17.29±2.36ab	
	20	0.93±0.04a	40.78±0.96a	9.25±0.56ab	3.96±0.06a	1 476.97±144.46a	38.28±11.14a	49.94±2.04ab	20.86±1.72a	
华夏3号 Huaxia No. 3	0	0.88±0.09a	28.59±2.59b	7.61±0.22b	4.46±0.30a	880.46±47.58b	13.56±1.37b	60.01±4.00a	13.05±1.78b	
	10	0.75±0.06a	31.44±0.14b	10.03±0.54a	4.35±0.26a	1 111.47±71.84ab	24.78±5.94ab	47.31±1.87a	11.26±0.41b	
	20	0.88±0.03a	40.13±1.78a	9.24±0.69ab	3.30±0.33b	1 242.21±90.77a	26.99±4.14a	54.81±3.57a	19.50±1.80a	

1) 数据为平均值±SE; 相同基因型同列数据后的不同小写字母表示不同Cd处理浓度间差异显著($P < 0.05$, Duncan's法)

1)The datum is mean±SE; Different lowercase letters in the same column and genotype indicate significant differences among different Cd treating concentrations ($P < 0.05$, Duncan's test)

3 讨论与结论

Cd是危害作物生长发育的重金属元素,当植物体内Cd的累积量达到一定程度时便会对植物产生毒害作用。种子萌发作为植物生长的起始阶段,对外界环境胁迫最为敏感,变化特征反映了植物对Cd胁迫的耐受能力^[17]。主根长通常用于衡量种子萌发后幼苗的生长状况。杜兰芳等^[18]研究发现Cd胁迫对豌豆幼苗根长具有明显的抑制作用,且随着Cd浓度的增加,抑制作用逐渐增强;李冬等^[19]发现在低浓度(10 μmol/L)Cd处理下,豌豆幼苗的主根长降低了65.20%。本研究培养基萌发试验结果表明不同基因型对Cd的耐受能力存在差异。相比于不加Cd对照,在2 mg/kg(相当于10 μmol/L)Cd处理下大豆主根长有增加的趋势;在大于11 mg/kg Cd处理下,除‘华夏3号’以外,其余基因型大豆主根的生长均受到明显抑制;在Cd质量分数大于23 mg/kg时,4种基因型大豆主根长均受到严重抑制;这一结果与前期研究^[6]结果一致。‘华夏3号’耐Cd性优于其他基因型,说明不同基因型的耐Cd性存在差异^[20-21]。

Cd胁迫下植物生物量和籽粒产量都会有明显下降^[22];本研究的盆栽试验也发现,加Cd处理后4种基因型大豆的植株生物量均显著降低。Cd处理下‘桂夏豆2号’和‘华夏3号’的生物量显著高于‘巴西10号’和‘本地2号’,表明‘巴

西10号’、‘本地2号’的植株生长对Cd敏感,属于Cd敏感基因型;‘桂夏豆2号’、‘华夏3号’比较耐Cd,属于耐Cd基因型,且‘华夏3号’的耐Cd能力显著高于‘巴西10号’;这一结果与Wang等^[23]的研究结果一致。根系是植物吸收土壤中水分和营养元素的重要器官,可作为预防Cd进入植物体内的屏障^[24-26]。有研究表明Cd可以通过抑制细胞分裂、养分吸收等抑制根系生长,耐性强的品种一般表现为根系生物量大、根长较长^[24-25]。本研究中,加Cd处理后4种基因型大豆的总根长和根表面积均显著降低,耐Cd能力强的‘华夏3号’和‘桂夏豆2号’的根系生长发育比‘巴西10号’更好,具有更大的总根长和根表面积。由此可见,耐Cd能力不同是引起不同基因型根系性状的差异的主要原因之一。

在土壤Cd含量相同的条件下,大豆各器官的Cd含量存在显著差异,一般表现为根部>地上部^[27-28]。本研究4种基因型大豆根部Cd浓度也都远远高于地上部,表明植物会把从土壤中吸收的Cd保留在根部,阻止过多的Cd转移到地上部对植株光合作用造成影响^[29]。进一步观察胁迫条件下不同基因型之间的根部Cd浓度发现‘华夏3号’显著高于‘巴西10号’,说明耐Cd能力强的基因型根部对Cd的积累量更高,只有较少的Cd转移到地上部,这和张芬琴^[30]的研究结果一致。此外,本研究在不加Cd处理的植株中也检测到Cd元素,这主要是由

于本试验使用砂土混合物作为培养介质,土壤本身含有微量的 Cd,但并不影响大豆的正常生长。从植株 Cd 累积量来看,黄运湘等^[31]研究发现,在全 Cd 质量分数为 0.10 mg/kg、有效 Cd 质量分数为 0.04 mg/kg 的红壤和河潮土上分别种植大豆,不加 Cd 处理时植株体内单株 Cd 累积量分别为 5.33 和 5.00 μg ,大豆没有出现任何 Cd 胁迫症状,这个 Cd 累积量与本研究不加 Cd 处理的大豆植株体内 Cd 累积量(单株 2.03~5.19 μg)相当,间接证明混合砂土中土壤 Cd 含量没有达到影响大豆生长的阈值。

植物体内存在营养元素的平衡,Cd 过量时会打破这种平衡。在 Cd 进入植物体的过程中,会与其他养分元素竞争转运的结合位点,从而引起植物体内元素浓度的改变,尤其会与一些二价金属如 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 和 Zn^{2+} 等产生相互作用,影响这些有益元素的吸收^[26, 32]。本研究中,相比于不加 Cd 处理,加 Cd 后植物体内的营养元素浓度发生了显著变化,尤其是地上部 P、K、Cu、Fe 浓度呈现一致上升的趋势。研究发现 Cd 胁迫抑制秋华柳根部 Ca 的吸收和积累^[33]。本试验发现在 10 mg/kg Cd 处理下,Cd 敏感基因型‘本地 2 号’地上部 Ca 浓度呈增加趋势,耐 Cd 基因型‘华夏 3 号’呈降低趋势;Cd 敏感基因型‘巴西 10 号’根部 Ca 浓度显著降低,耐 Cd 基因型‘华夏 3 号’、‘桂夏豆 2 号’呈增加趋势。此外,研究发现 Cd 和 Zn 在大豆籽粒中表现为协同作用,在叶片中表现为拮抗作用^[34],本试验中 Cd 胁迫处理下 Cd 敏感基因型‘巴西 10 号’地上部和根部 Zn 浓度均显著增加。Cd 敏感与耐 Cd 基因型大豆在 Cd 处理后 Ca、Zn 浓度变化趋势有明显差异。以上结果表明,Cd 处理后植株体内营养元素浓度变化明显,但变化的趋势并不一致,没有表现出一致的与 Cd 协同或拮抗的作用,这与前期研究结果^[35]类似,具体机制还有待进一步研究。

综上所述,Cd 胁迫显著抑制不同基因型大豆主根生长和植株生长,不同基因型的耐 Cd 能力表现不同。‘巴西 10 号’和‘本地 2 号’是 Cd 敏感基因型,‘桂夏豆 2 号’和‘华夏 3 号’属于耐 Cd 基因型。耐 Cd 基因型大豆主要通过根系生长和体内元素浓度变化缓解 Cd 毒害。

参考文献:

- [1] LI H, LUO N, LI Y W, et al. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. *Environ Pollut*, 2017, 224: 622-630.
- [2] FINZGAR N, LESTAN D. The two-phase leaching of Pb, Zn and Cd contaminated soil using EDTA and electrochemical treatment of the washing solution[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(9): 1484-1491.
- [3] REHMAN M Z U, RIZWAN M, ALI S, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by using *Solanum nigrum*: A review[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2017, 143: 236-248.
- [4] VAN ASSCHE F, CLIJSTERS H. Effect of metals on enzyme activity in plants[J]. *Plant Cell Environ*, 1990, 13(3): 195-206.
- [5] TALANOVA V V, TITOV A F, BOEVA N P. Effect of increasing concentrations of heavy metals on the growth of barley and wheat seedlings[J]. *Russ J Plant Phys*, 2001, 48(1): 100-103.
- [6] 丁海东,朱为民,杨少军,等.镉、锌胁迫对番茄幼苗生长及脯氨酸和谷胱甘肽含量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2005, 21(3): 191-196.
- [7] EDERLI L, REALE L, FERRANTI F, et al. Responses induced by high concentration of cadmium in *Phragmites australis* roots[J]. *Physiol Plantarum*, 2004, 121(1): 66-74.
- [8] 周全,王宏,张迎信,等.不同镉浓度处理下水稻植株镉含量变化及其镉调控相关基因表达分析[J]. *中国水稻科学*, 2016, 30(4): 380-388.
- [9] GZYL J, CHMIELOWSKA-BAK J, PRZYMUSIŃSKI R, et al. Cadmium affects microtubule organization and post-translational modifications of tubulin in seedlings of soybean (*Glycine max* L.)[J]. *Front Plant Sci*, 2015, 6(511): 449-455.
- [10] HE J Y, ZHU C, REN Y F, et al. Root morphology and cadmium uptake kinetics of the cadmium-sensitive rice mutant[J]. *Biol Plantarum*, 2007, 51(4): 791-794.
- [11] KÜPPER H, KOCHIAN L V. Transcriptional regulation of metal transport genes and mineral nutrition during acclimatization to cadmium and zinc in the Cd/Zn hyperaccumulator, *Thlaspi caerulescens* (Ganges population)[J]. *New Phytol*, 2010, 185(1): 114-129.
- [12] 孙建云,沈振国.镉胁迫对不同甘蓝基因型光合特性和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2605-2610.
- [13] CUI G, AI S, CHEN K, et al. Arbuscular mycorrhiza augments cadmium tolerance in soybean by altering accumulation and partitioning of nutrient elements, and related gene expression[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2019, 171: 231-239.
- [14] ZHOU H, ZENG M, ZHOU X, et al. Assessment of heavy metal contamination and bioaccumulation in soybean plants from mining and smelting areas of southern Hunan Province, China[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2013, 32(12): 2719-2727.
- [15] XUE Z, GAO H, ZHAO S. Effects of cadmium on the photosynthetic activity in mature and young leaves of soybean plants[J]. *Environ Sci Pollut R*, 2014, 21(6):

- 4656-4664.
- [16] ZHANG S, ZHOU J, WANG G, et al. The role of mycorrhizal symbiosis in aluminum and phosphorus interactions in relation to aluminum tolerance in soybean[J]. *Appl Microbiol Biot*, 2015, 99(23): 10225-10235.
- [17] 潘高, 张合平, 刘鹏, 等. 镉胁迫对苍耳种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[J]. *草业学报*, 2017, 26(11): 157-166.
- [18] 杜兰芳, 沈宗根, 王立新, 等. $CdCl_2$ 对豌豆种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(7): 1411-1416.
- [19] 李冬, 王艳芳, 王悦华, 等. 外源褪黑素对镉胁迫下豌豆种子萌发、幼苗抗性生理及镉含量的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(11): 2271-2279.
- [20] 王志坤, 廖柏寒, 黄运湘, 等. 镉胁迫对大豆幼苗生长影响及不同品种耐镉差异性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1143-1147.
- [21] 丁氏清茶. 甜高粱在重金属镉胁迫下的生理反应和基因鉴定[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [22] 赵云云, 钟彩霞, 方小龙, 等. 华南地区 11 个春播大豆品种抗镉性的差异[J]. *华南农业大学学报*, 2014, 35(3): 111-113.
- [23] WANG P, DENG X, HUANG Y, et al. Comparison of subcellular distribution and chemical forms of cadmium among four soybean cultivars at young seedlings[J]. *Environ Sci Pollut R*, 2015, 22(24): 19584-19595.
- [24] DI TOPPI L S, GABBRIELLI R. Response to cadmium in higher plants[J]. *Environ Exp Bot*, 1999, 41(2): 105-130.
- [25] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应[J]. *生态学报*, 2011, 31(2): 522-528.
- [26] DONG J, WU F, ZHANG G. Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*)[J]. *Chemosphere*, 2006, 64(10): 1659-1666.
- [27] 李沛然, 龚颖婷, 黄丽颖, 等. 大豆镉累积及吸收转运特性研究[J]. *广东农业科学*, 2016, 43(5): 82-86.
- [28] 王崇臣, 王鹏, 黄忠臣. 盆栽玉米和大豆对铅、镉的富集作用研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(24): 10383-10386.
- [29] NOCITO F F, LANCILLI C, DENDENA B, et al. Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation[J]. *Plant Cell Environ*, 2011, 34(6): 994-1008.
- [30] 张芬琴. 镉胁迫对二种不同耐性豆科植物生长与活性氧代谢的影响及水杨酸对镉毒害的缓解效应[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [31] 黄运湘, 廖柏寒, 王志坤. 镉胁迫对大豆生长及籽粒中营养元素含量的影响[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(2): 11-15.
- [32] MONTEIRO M S, SANTOS C, SOARES A M V M, et al. Assessment of biomarkers of cadmium stress in lettuce[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2009, 72(3): 811-818.
- [33] 刘媛, 马文超, 张雯, 等. 镉胁迫对秋华柳根系活力及其 Ca、Mg、Mn、Zn、Fe 积累的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1109-1115.
- [34] 黄运湘, 王志坤, 袁红, 等. 大豆对镉胁迫的生理反应及耐镉机理探讨[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(8): 1514-1520.
- [35] 顾秀聪, 王超, 张松贺. Cd 对大白菜生长、叶绿素含量及体内矿物营养元素的影响[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线. [2011-02-14]. <http://www.paper.edu.cn/release/paper/content/201102-118>.

【责任编辑 李庆玲】