

# 盐分胁迫下两个苋菜品种对镉及主要渗透调节物质累积的差异\*

徐智敏<sup>1,2</sup> 何宝燕<sup>1,2\*\*</sup> 李取生<sup>1,2</sup> 雷永康<sup>1,2</sup> 梅秀芹<sup>1,2</sup> 曹刚<sup>1,2</sup> 周丽珍<sup>1,2</sup> 陈艳芳<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>暨南大学环境学院, 广州 510632; <sup>2</sup>水土环境毒性污染物防治与生物修复广东省高校重点实验室, 广州 510632)

**摘要** 采用重金属 Cd 平均含量为  $2.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的污灌菜园土, 在外源 NaCl 处理下进行盆栽试验, 研究花红圆叶苋菜(BRLA) 和红柳叶苋菜(ARW) 对 Cd 及主要渗透调节物质吸收和积累的品种间差异。结果显示: 随盐胁迫增强, 两品种根、叶 Cd 和  $\text{Na}^+$  含量较对照显著增加 ( $P < 0.05$ ), 且品种 ARW 的 Cd 累积量高于品种 BRLA。与 ARW 相比, BRLA 根可贮存更多的  $\text{Na}^+$  以减少向叶转运, 在 0.4% 盐处理时 BRLA 叶  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  比值降幅为 39.2%, 而 ARW 达 56.9%。盐分促进 BRLA 根、叶  $\text{Mg}^{2+}$  含量增加, 而 ARW 根  $\text{Mg}^{2+}$  则低于对照。盐胁迫后, 两品种根、叶脯氨酸含量显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 且 BRLA 表现较强的脯氨酸合成能力。两品种根、叶总游离氨基酸与可溶性蛋白含量随盐胁迫强度增大呈相反的变化。盐分促进了两品种根部可溶性糖积累。综上, BRLA 比 ARW 具有较低 Cd 累积性, 表现较好的耐盐性, 具备较强的渗透响应能力, 可为筛选和培育既耐盐又低累积 Cd 的农作物提供科学参考。

**关键词** 盐分胁迫; 苋菜; 镉累积; 耐盐性; 渗透调节物质; 品种差异

中图分类号 X173 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2015)2-0483-08

**Differences between two amaranth cultivars in accumulations of Cd and main osmotic adjustment substances under salt stress.** XU Zhi-min<sup>1,2</sup>, HE Bao-yan<sup>1,2\*\*</sup>, LI Qu-sheng<sup>1,2</sup>, LEI Yong-kang<sup>1,2</sup>, MEI Xiu-qin<sup>1,2</sup>, CAO Gang<sup>1,2</sup>, ZHOU Li-zhen<sup>1,2</sup>, CHEN Yan-fang<sup>1,2</sup> (<sup>1</sup>School of Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation, Department of Education of Guangdong Province, Guangzhou 510632, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2): 483–490.

**Abstract:** A pot experiment was conducted in sewage-irrigated garden soil ( $2.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd) pretreated with different concentrations of NaCl. The differences between two amaranth cultivars (BRLA and ARW) in accumulations of Cd and main osmotic adjustment substances under salt stress were investigated. Under salt stress, the contents of Cd and  $\text{Na}^+$  in roots and leaves of cultivars BRLA and ARW significantly increased compared with the control ( $P < 0.05$ ), and the Cd content was obviously higher in ARW than in BRLA. BRLA had stronger  $\text{Na}^+$  retention capacity in roots than ARW, decreasing the transportation of  $\text{Na}^+$  from root to leaf. In 0.4% NaCl treatment, the  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  ratio decreased by 39.2% in leaves of BRLA, and by 56.9% in leaves of ARW.  $\text{Mg}^{2+}$  content increased in roots and leaves of BRLA and decreased in roots of ARW. More proline accumulated in roots and leaves of both cultivars under salt stress compared with the control ( $P < 0.05$ ) and BRLA exhibited greater proline synthetic ability than ARW. Contents of soluble protein and free amino acids in roots and leaves of both cultivars decreased with the increase of soil salinity, while soluble sugar in roots of both cultivars increased with the increase of soil salinity. These results suggested that BRLA had lower Cd uptake, higher salt tolerance and stronger osmotic adjustment ability than ARW. Our study provided some useful information for screening and breeding of salt tolerant cultivars with low Cd accumulation.

\* 国家自然科学基金项目(41371321)和中央高校基本科研基金项目(21612103)资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: thbyan@jnu.edu.cn

收稿日期: 2014-09-28 接受日期: 2014-11-20

**Key words:** salt stress; amaranth; Cd accumulation; salt tolerance; osmotic adjustment substances; cultivar difference.

DOI:10.13292/j.1000-4890.20141121.001

近年来,土壤污染引发的健康问题越来越受到人们的关注,土壤盐渍化和重金属污染尤为突出。我国盐渍土分布广泛,受害土壤面积已高达0.33亿 $\text{hm}^2$ ,直接导致了蔬菜病虫害加重、产量品质下降(丁海荣等,2010)。为了缓解城市发展用地紧张,我国众多沿海地区纷纷实施“向海洋要地”工程,对沿海滩涂进行围垦,滩涂土壤属于滨海盐土类型,含盐量一般为0.15%~0.4%,同时每年大量难降解的重金属污染物排入水体,导致滩涂湿地既含有高盐分又有大量重金属等难降解污染物(孟庆峰等,2012)。据统计,近50年来珠江口滩涂海岸线每年向海延伸约60~150 m,珠江口围垦滩涂达 $6.0 \times 10^4 \text{hm}^2$ ,而这绝大部分是伴随重金属Cd污染的盐渍土(李取生等,2007)。

另一方面,我国设施农业发展迅猛,种植面积逐年增加,不合理的施肥、不科学的栽培管理导致设施土壤次生盐渍化发生,许多设施菜地土壤含盐量可达0.2%~0.6%(余海英等,2007)。全国设施园艺总面积1985年仅4.35万 $\text{hm}^2$ ,2008年已经发展到335万 $\text{hm}^2$ ,90%以上的面积用于生产蔬菜(杨曙辉等,2011)。长期高强度施肥,已经导致大量盐分及重金属积累,增加了农产品安全风险。有研究表明,大量施用人工肥料,土壤表层Cd累积达到国家II级标准的时间最短、风险最高(李树辉,2011),土壤盐分也会增强农作物对Cd的吸收(Usman *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2012)。在此类土壤条件下筛选低累积Cd且耐盐的农作物,越来越受到重视,研究盐胁迫下不同品种对Cd吸收及其主要渗透调节物质的变化差异,评价不同品种的累积Cd能力及抗逆响应能力,可为如何降低农产品健康风险提供实验科学依据。

植物在受到盐分胁迫时通过调节无机离子种类和数量维持细胞内外微环境的稳定,也可通过累积对细胞无毒的有机物(脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白质等)来进行渗透调节。植物在进行无机渗透调节的同时可能遭受离子毒害,故根系对离子选择性吸收和区隔化有利于降低地上部分盐分浓度,维持正常光合作用,这是植物抗盐性的重要机理之一(Adem *et al.*, 2014)。盐分对重金属Cd的吸收和累积机理尚不完全清楚。研究发现,土壤理化性质

及其植物根系特性都能影响植物对Cd的吸收和累积。目前较多的研究主要集中在盐分或Cd等单一因素对植物生理生长的影响等方面(Lacerda *et al.*, 2003; 李兆君等,2004; Han *et al.*, 2012),从植物的耐盐特性、渗透响应过程综合分析其对Cd吸收和累积的影响研究还很少。因此,在伴随Cd污染的盐渍土环境下,探究植物对Cd及主要渗透调节物质吸收和积累的品种间差异的研究有重要意义。

苋菜是我国各地广泛种植的蔬菜品种,因其丰富的食用价值、生长周期短、抗逆性强、耐湿、易栽培,加之病虫害很少发生,倍受广大菜农的青睐。本课题组前期已经对市面上广泛种植的15个苋菜品种进行筛选,发现不同苋菜品种Cd积累量存在显著差异(陈艳,2013)。本研究选择2种产自不同地区、具有稳定遗传特性且Cd累积能力有差异的苋菜进行土培实验,通过添加不同浓度盐分处理,探究苋菜对Cd及主要渗透调节物质积累的品种间差异,为筛选和培育既耐盐又低累积Cd的农作物提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自广州市郊区污灌菜园土(土壤理化性质:pH为5.45,Cd平均含量 $2.28 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤含盐量0.047%),根据我国食用农产品产地环境评价标准(HJ 332—2006),蔬菜用地土壤Cd含量最大限值为 $0.3 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤种植蔬菜存在健康风险。实验采集耕层(0~15 cm)土壤,并按照“S”型曲线挖掘混合土壤后运至玻璃温室内自然晾晒,测定含水率后研磨过筛(2 mm)去除杂物并充分混匀,用于盆栽实验。

根据前期的筛选结果选用对Cd的吸收和富集有显著差异的花红圆叶苋菜(BRLA)和红柳叶苋菜(ARW)作为供试植物,种子分别来自江西和河南。

### 1.2 试验设计

苋菜土培盆栽试验于2013年6月中旬至8月底进行,种植地点位于人工温室内。采用规格为 $22 \text{cm} \times 20 \text{cm}$ (直径 $\times$ 高度)的塑料盆,每盆装土2.5 kg,实验土壤盐分含量设计为1个对照和3个盐分处理梯度(CK、0.2%、0.3%、0.4%),每个处理做

3个重复 2个品种共 24盆,设计的盐分含量是指每千克自然风干土壤所含有的 NaCl 质量。根据土壤质量及所需含盐量,用分析纯 NaCl 固体与去离子水配制盐溶液,将盐溶液与过筛后的土壤充分混匀后浇水放置 1 周以上。用多菌灵配制溶液浸泡种子,播种后定期浇水和间苗,待生长至 70 d 左右收获。

### 1.3 样品处理与测定方法

采集成熟期苋菜根叶,先用清水和去离子水洗净,称量剪碎置钵中加去离子水充分研磨至匀浆,再置于 100 °C 恒温水浴锅中加热 90 min,冷却后 5000 r · min<sup>-1</sup> 高速离心 8 min,再抽滤弃渣取上清液,储存在血清瓶中置于 -20 °C 冰箱保存待测 (Silveira *et al.*, 2009)。取一定提取液采用等离子体发射光谱仪 (ICP) 测定 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 含量。取 5 mL 提取液加 5 mL 浓 HNO<sub>3</sub> 微波消解后调 pH,并采用石墨炉原子吸收分光光度计测定 Cd 含量。

新鲜苋菜根叶样品用 3% 磺基水杨酸充分研磨,离心过滤得提取液用于测定脯氨酸,用 10% 乙酸充分研磨制备提取液,采用酸性茚三酮比色法测定总游离氨基酸 (Bates *et al.*, 1973)。用磷酸盐缓冲液研磨后过滤得提取液,采用考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白质。水浴后过滤弃渣得提取液,采用硫酸蒽酮比色法测定可溶性糖 (Mišić *et al.*, 2011)。

### 1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 进行试验数据整理,文中所有指标均是测定植物根叶组织液中的含量,最后换算成植物鲜重的含量,即单位为 mg · kg<sup>-1</sup> FW,两品种根向叶 Cd 转运比值的计算方法为叶 Cd 含量与根 Cd 含量比。采用 SPSS 11.0 软件对试验数据进行方差分析和差异显著性检验,用 Origin 9.2 软件绘制图形。数据为平均值 ± SD。

## 2 结果与分析

### 2.1 苋菜根、叶组织液 Cd 含量和体内转运比值

由图 1 可知,在 Cd 污染的土壤中,随着土壤盐分浓度的增大,2 苋菜品种根、叶中 Cd 含量较对照均显著增加 ( $P < 0.05$ ),且在 0.4% 盐处理浓度时均达到最大。盐分胁迫后 2 苋菜品种根中 Cd 含量均显著高于叶部,添加盐分处理后 ARW 根中 Cd 含量显著高于 BRLA 品种 ( $P < 0.05$ )。在 CK、0.2%、0.3% 处理浓度时,ARW 叶中 Cd 含量也显著高于 BRLA 品种 ( $P < 0.05$ )。在 0.3% 盐处理浓度时 2 品种根、

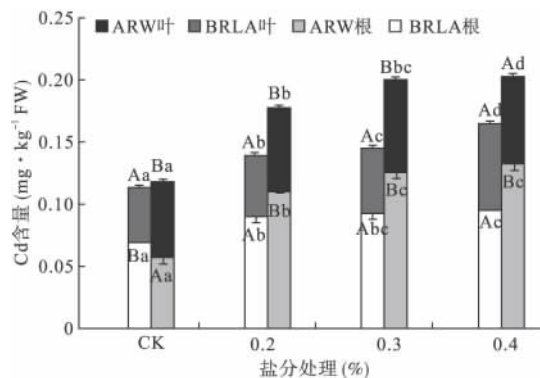


图 1 盐胁迫下不同苋菜品种根叶组织液 Cd 含量

Fig. 1 Cd content in root and leaf tissue water extracts of different amaranth cultivars under salt stress

不同大写字母代表相同处理不同品种间差异显著,不同小写字母代表相同品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

叶中 Cd 含量差异均达到最大,ARW 品种根、叶中 Cd 含量分别是 BRLA 的 1.35 倍和 1.40 倍。这说明两品种 Cd 吸收累积能力确实存在显著差异,这与前期研究结果是一致的。

苋菜的叶部作为主要的可食部分,Cd 在叶部累积量和 Cd 自根向叶转运比值对于评价其对人体的健康风险尤为重要,由图 1 可知,随着盐分胁迫强度加大,2 品种叶 Cd 累积量增大且都显著高于对照 ( $P < 0.05$ ),且 ARW 叶累积 Cd 能力更强。由图 2 可知,在中轻度盐分处理 (0.2% ~ 0.3%) 时,BRLA 品种根向叶 Cd 转运比值低于对照,ARW 品种在盐处理后也呈现类似变化。说明盐分促进了苋菜根、叶累积更多的 Cd,且根部吸收 Cd 的量比从根向叶转运 Cd 的量更多。另外,在盐分处理 (浓度为 0.4% 时),BRLA 品种的 Cd 转运比值高于 ARW,这说明 2 品

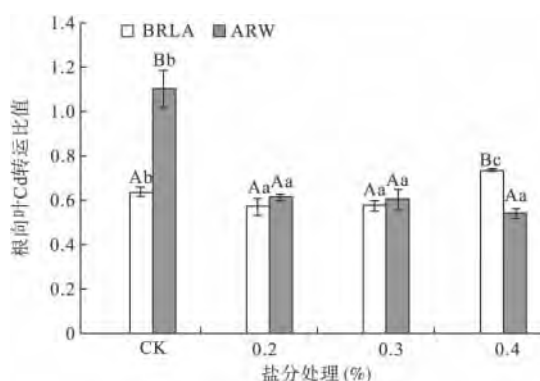


图 2 盐胁迫下不同苋菜品种叶根向叶转运比值

Fig. 2 The translocation ratio of Cd (from root to leaf) in different amaranth cultivars under salt stress

不同大写字母代表相同处理不同品种间差异显著,不同小写字母代表相同品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

种对 Cd 在体内的转运能力存在差异。

### 2.2 盐胁迫对苋菜根、叶组织液中主要无机渗透调节离子吸收的影响

由图 3 可知 2 品种根、叶中 Na<sup>+</sup> 含量均随盐处理强度加大而增加,盐分胁迫后 2 品种根中 Na<sup>+</sup> 含量高于叶部,且 BRLA 品种根中 Na<sup>+</sup> 含量显著高于 ARW 品种,而叶部含量呈现相反的规律,即 ARW 品种叶中 Na<sup>+</sup> 含量显著高于 BRLA 品种 ( $P < 0.05$ )。与 ARW 品种相比,BRLA 品种根部具备更强的 Na<sup>+</sup> 截留能力,从而减少 Na<sup>+</sup> 向地上部转运,维持较高的叶部 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 值。与对照相比,盐胁迫下 2 品种根、叶 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 值都显著下降,在中重度盐分处理(0.2%~0.4%)时根 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 值变化不明显,而叶 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 值显著下降,在 0.4% 盐分处理时 2 品种下降幅度达到最大,BRLA 品种降幅为 39.2%,而 ARW 降幅达 56.9%,说明 2 苋菜品种在盐分胁迫后耐盐特性存在较大差异。

由表 1 可知,盐胁迫后 BRLA 品种根、叶 Mg<sup>2+</sup> 含量显著高于对照 ( $P < 0.05$ ),而 ARW 品种根中 Mg<sup>2+</sup> 含量呈现不一样的变化,盐分处理试验组根中 Mg<sup>2+</sup> 含量均低于对照试验,但品种叶中 Mg<sup>2+</sup> 含量均显著高于根部,这也许是因为叶片是 Mg 最主要的存储器官,ARW 品种根中 Mg<sup>2+</sup> 含量高于 BRLA 品种 2 苋菜品种叶中 Mg<sup>2+</sup> 含量未呈现明显的差异。

盐分胁迫后 2 品种根中 Ca<sup>2+</sup> 含量总体没有太大变化,Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 值是评价植物细胞膜遭受盐离子毒害的重要指标,盐胁迫后 2 品种根 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 值与对照相比均出现显著下降 ( $P < 0.05$ ),随着盐分处理强度增大(0.2%~0.4%) 2 苋菜品种根 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 值未呈现明显变化,说明随着盐胁迫增强并未继续加剧其根细胞膜损伤,2 苋菜品种根细胞膜仍然能维持

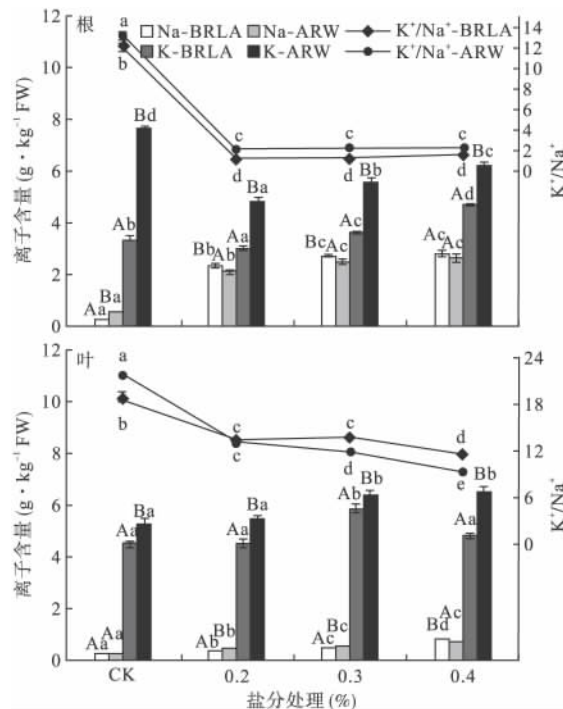


图 3 盐胁迫下不同苋菜品种根叶组织液 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 含量及 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> 值

Fig. 3 K<sup>+</sup> content, Na<sup>+</sup> content and K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> ratio in root and leaf tissue water extracts of different amaranth cultivars under salt stress

不同大写字母代表相同处理不同品种间差异显著,不同小写字母代表相同品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

正常的生理功能,BRLA 品种叶 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 值在中轻度盐分胁迫(CK~0.3%)时不断增大,在 0.4% 盐胁迫时有所下降,而 ARW 叶 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 值则随盐胁迫强度增大不断下降。

### 2.3 盐胁迫对苋菜根、叶组织液中主要有机渗透调节物质累积的影响

由表 2 可知,盐胁迫后 2 苋菜品种根、叶脯氨酸含量均显著高于对照 ( $P < 0.05$ ) 2 品种根中脯氨酸

表 1 盐胁迫下不同苋菜品种根叶组织液中 Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 含量及 Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> 值

Table 1 Mg<sup>2+</sup> content, Ca<sup>2+</sup> content and Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> ratio in root and leaf tissue water extracts of different amaranth cultivars under salt stress

器官	盐分处理 (%)	BRLA			ARW		
		Mg <sup>2+</sup> 浓度 (g·kg <sup>-1</sup> FW)	Ca <sup>2+</sup> 浓度 (g·kg <sup>-1</sup> FW)	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup> 浓度 (g·kg <sup>-1</sup> FW)	Ca <sup>2+</sup> 浓度 (g·kg <sup>-1</sup> FW)	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>
根	CK	0.207 ± 0.015 Aa	0.157 ± 0.006 Aa	0.57 ± 0.01 b	0.580 ± 0.026 Bd	0.157 ± 0.015 Aa	0.27 ± 0.01 b
	0.2	0.243 ± 0.021 Ab	0.133 ± 0.006 Ab	0.06 ± 0.00 a	0.343 ± 0.029 Ba	0.140 ± 0.010 Aa	0.07 ± 0.01 a
	0.3	0.323 ± 0.012 Ac	0.127 ± 0.006 Ab	0.05 ± 0.00 a	0.390 ± 0.010 Bb	0.153 ± 0.012 Ba	0.06 ± 0.01 a
	0.4	0.363 ± 0.012 Ad	0.133 ± 0.006 Ab	0.05 ± 0.01 a	0.407 ± 0.021 Bb	0.143 ± 0.006 Aa	0.05 ± 0.01 a
叶	CK	0.503 ± 0.006 Aa	0.117 ± 0.006 Ba	0.49 ± 0.03 b	0.627 ± 0.021 Ba	0.103 ± 0.006 Aa	0.41 ± 0.01 d
	0.2	0.647 ± 0.015 Ab	0.217 ± 0.006 Bc	0.64 ± 0.03 c	0.710 ± 0.010 Bb	0.110 ± 0.010 Aab	0.27 ± 0.02 c
	0.3	0.773 ± 0.006 Bc	0.287 ± 0.012 Bd	0.67 ± 0.02 c	0.723 ± 0.015 Ab	0.120 ± 0.010 Ab	0.22 ± 0.02 b
	0.4	0.640 ± 0.010 Ab	0.140 ± 0.010 Bb	0.27 ± 0.02 a	1.017 ± 0.021 Bc	0.107 ± 0.006 Aab	0.16 ± 0.01 a

不同大写字母代表相同处理不同品种间差异显著,不同小写字母代表相同品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表 2 盐胁迫下不同苋菜品种根叶组织液中脯氨酸和总可溶性糖含量

Table 2 Proline content and total soluble sugars content in root and leaf tissue water extracts of different amaranth cultivars under salt stress

器官	盐分处理 (%)	BRLA		ARW	
		脯氨酸含量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW)	总可溶性糖 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW)	脯氨酸含量 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW)	总可溶性糖 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW)
根	CK	0.423 ± 0.015 Aa	1.023 ± 0.060 Aa	0.400 ± 0.020 Aa	3.830 ± 0.104 Bb
	0.2	0.537 ± 0.025 Ab	3.173 ± 0.210 Ac	0.867 ± 0.015 Bd	4.480 ± 0.240 Bc
	0.3	0.837 ± 0.031 Bc	1.380 ± 0.100 Ab	0.607 ± 0.015 Ac	4.550 ± 0.125 Bc
	0.4	0.573 ± 0.015 Bb	1.560 ± 0.052 Ab	0.470 ± 0.020 Ab	3.437 ± 0.012 Ba
叶	CK	0.587 ± 0.012 Ba	2.250 ± 0.069 Ba	0.167 ± 0.012 Aa	1.067 ± 0.055 Aa
	0.2	0.557 ± 0.015 Ba	1.010 ± 0.092 Ab	0.220 ± 0.010 Ab	4.453 ± 0.095 Bd
	0.3	0.707 ± 0.023 Bb	0.953 ± 0.100 Ab	0.507 ± 0.015 Ac	2.317 ± 0.107 Bc
	0.4	0.857 ± 0.061 Bc	1.083 ± 0.085 Ab	0.240 ± 0.010 Ab	2.007 ± 0.035 Bb

不同大写字母代表相同处理不同品种间差异显著, 不同小写字母代表相同品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

含量呈现先升后降的变化趋势, BRLA 品种根中脯氨酸含量在 0.3% 处理时达到最大, 其含量为  $0.837 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  FW, 而 ARW 品种在 0.2% 处理浓度时已经最大, 其含量为  $0.867 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  FW。由表 2 可知, BRLA 品种叶中脯氨酸含量随盐胁迫增强持续积累, 且 BRLA 品种叶中脯氨酸含量显著高于 ARW 品种 ( $P < 0.05$ ), 而 ARW 品种在 0.4% 处理时叶中脯氨酸含量出现显著下降趋势, 但其含量仍高于对照。

盐胁迫后各盐分处理组 BRLA 根中可溶性糖含量均显著高于对照, ARW 品种在 0.2% 和 0.3% 盐分处理时根中可溶性糖含量显著高于对照 ( $P < 0.05$ ), 在 0.4% 盐分处理时显著下降且低于对照。盐胁迫后的 BRLA 品种叶中可溶性糖含量均低于对照, 而 ARW 品种叶中可溶性糖含量表现出相反的特征。

由图 4 可知, 2 苋菜品种根、叶中可溶性蛋白

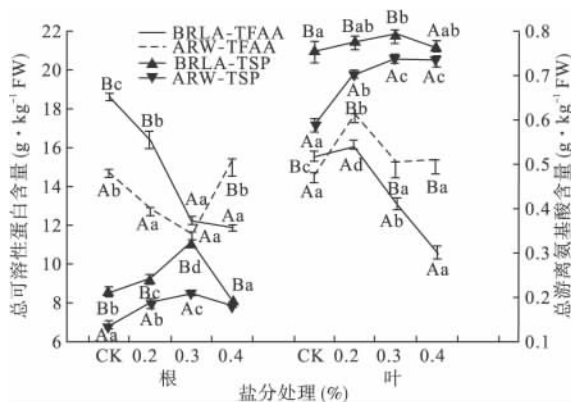


图 4 盐胁迫下不同苋菜品种根、叶组织液中总可溶性蛋白和总游离氨基酸含量

Fig. 4 Total soluble protein content and total free amino acids content in root and leaf tissue water extracts of different amaranth cultivars under salt stress

TFAA: 总游离氨基酸; TSP: 总可溶性蛋白。不同大写字母代表相同处理不同品种间差异显著, 不同小写字母代表相同品种不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

含量变化随盐分处理增强呈先升后降的趋势, 且均在 0.3% 处理时达到最大, BRLA 品种根、叶可溶性蛋白含量分别为  $11.08$  和  $21.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  FW, ARW 品种根、叶可溶性蛋白含量分别为  $8.52$  和  $20.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  FW。BRLA 品种根、叶中可溶性蛋白含量要高于 ARW 品种, BRLA 品种根、叶中可溶性蛋白含量分别是 ARW 品种的  $1.03 \sim 1.30$  倍和  $1.03 \sim 1.22$  倍。

在中轻度盐分处理 ( $\leq 0.3\%$ ) 时 2 苋菜品种根中游离氨基酸含量持续下降, 但在 0.4% 盐分处理时略有上升, 在中轻度盐分处理 ( $\leq 0.3\%$ ) 时, BRLA 品种根中游离氨基酸含量高于 ARW 品种, 在 0.4% 盐分处理时, ARW 品种根中游离氨基酸含量比 BRLA 品种高。2 苋菜品种叶中游离氨基酸含量均随盐胁迫加重呈先升后降的趋势, BRLA 和 ARW 品种叶中游离氨基酸含量均在 0.2% 盐分处理时达到最大, 分别为  $0.547$  和  $0.620 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  FW。在盐胁迫后 ARW 品种叶中游离氨基酸含量高于 BRLA 品种。2 品种根中可溶性蛋白和游离氨基酸含量随盐分梯度呈“互补的动态平衡”, 在 0.2% ~ 0.4% 盐分处理时叶中 2 个指标的含量也大致呈这种平衡关系, 可见盐胁迫后植物体内可溶性蛋白和游离氨基酸不断的互相转化, 这是植物渗透调节的重要途径。

### 3 讨论

#### 3.1 盐胁迫下两品种累积和转运 Cd 的差异

本试验对 2 苋菜品种根、叶 Cd 含量测定结果表明, 盐分促进了两品种根、叶对 Cd 的吸收和累积, 且盐胁迫后根部 Cd 含量显著高于叶部 ( $P < 0.05$ )。McLaughlin 等 (1994) 对盐渍土种植马铃薯的试验和 Helal 等 (1996) 对盐渍土种植玉米的试验都得到这一结果。许多研究表明, 盐分能通过土壤粘粒表面

阳离子交换或通过复杂的化学过程形成 Cl-Cd 配合物等方式 (Bingham *et al.*, 1984; Smolders *et al.*, 1996) 活化土壤中的 Cd 增加其生物有效性, 从而促进植物根系对 Cd 的吸收, 这也是本试验中盐分胁迫下苋菜 Cd 累积量增加的重要原因。许多研究发现, 盐分不仅能影响植物根对重金属的吸收, 也能影响其从根向叶转运能力 (Fitzgerald *et al.*, 2003; Wahla *et al.*, 2008)。本试验 BRLA 与 ARW 品种根、叶 Cd 含量存在显著差异且 BRLA 品种有较低的 Cd 累积量。另外, 在中轻度盐分 (0.2% ~ 0.3%) 处理时 2 品种 Cd 从根向叶转运比值显著低于对照 ( $P < 0.05$ ), 说明盐分对土壤 Cd 的活化量增加并未促进 Cd 从根向叶转运比例增大, Han 等 (2012) 的相关研究也得到了类似关于根向叶转运比值减少的结果。可见, 在相同的试验条件下, 不同苋菜品种对盐胁迫的渗透响应差异对 Cd 累积也有重要的影响。有研究发现, 植物可通过根细胞自身的有机物合成和无机离子含量比例变化等渗透响应过程改变根细胞结构和功能特性 (Stevens *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2010), 从而造成不同品种对 Cd 吸收和累积的差异, 而不同品种的耐盐特性不同和盐分胁迫下的渗透响应能力强弱便是导致这一差异的重要原因。

### 3.2 2 品种渗透调节物质的累积差异对其耐盐性及 Cd 累积的影响

盐胁迫后植物通过积累  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  作为其主要的无机渗透调节物质, 在进行渗透调节的同时植物存在大量吸收盐离子造成离子毒害的风险,  $\text{Na}^+$  是植物生长发育的非必需元素, 过量积累会影响植物对土壤中养分的吸收、破坏细胞内的离子平衡以及降低各种酶的活性等 (Demir *et al.*, 2002),  $\text{K}^+$  是目前公认的植物所必需的三大营养元素之一, 参与植物体内的许多生理生化过程, 如酶活性调节、蛋白质合成与转化和渗透调节过程等 (Golldeck *et al.*, 2003; 丁同楼等 2013)。本试验对 2 品种根、叶  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  含量测定结果可知, 盐分胁迫后与 ARW 品种相比, BRLA 根表现更强的  $\text{Na}^+$  截留能力, 这也是 BRLA 品种叶中  $\text{Na}^+$  含量较低的原因, 目前许多研究采用  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值表征植物受离子毒害程度和耐盐性强弱 (Weimberg, 1986),  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值下降会导致植物代谢紊乱, 增加细胞膜透性, 降低细胞内主要酶活性, 大量研究表明, 盐分胁迫会导致植物  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值下降 (Ghnaya *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2012)。盐胁迫后 2 品种苋菜根、叶  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值均显著下降 ( $P$

$< 0.05$ ), 但 2 品种直至收获均未出现枯萎、死亡等明显的受害症状, 2 品种根  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值在中重度盐分处理 (0.2% ~ 0.4%) 时变化不明显, 说明 2 品种根细胞随盐胁迫增强基本能维持正常的离子平衡, 并未继续加剧根细胞损伤。而叶作为植物光合作用的重要场所, 其遭受离子毒害程度直接影响植物正常生理代谢, 试验结果表明与 ARW 品种相比, BRLA 叶能维持较高  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值, 说明 BRLA 品种对  $\text{K}^+$  具有较强的运输选择性, 可以有效地把高盐分土壤中吸收的少量  $\text{K}^+$  运输至叶部, 从而减缓甚至抑制  $\text{Na}^+$  从根系向叶部转运, 最终维持叶中较高的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值。2 苋菜品种根、叶中  $\text{Mg}^{2+}$  含量差异表明, 盐胁迫已经影响到 ARW 根对土壤中  $\text{Mg}^{2+}$  的吸收,  $\text{Mg}^{2+}$  是叶绿素的重要组成部分, 参与许多光化学反应, 根系对  $\text{Mg}^{2+}$  吸收量的减少将直接影响叶片光合作用以及淀粉降解和糖的运输 (Huber *et al.*, 1980; 李春检 2008)。细胞膜是植物遭受盐胁迫最初部位,  $\text{Ca}^{2+}$  对于维持细胞膜结构稳定性有重要作用,  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  值可用于评价细胞膜伤害程度 (刘峰等 2001), 盐分胁迫会导致  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  比值下降, 降低抗氧化酶活性同时增强细胞膜脂质过氧化 (Jiang *et al.*, 2001)。本研究发现 2 品种根随盐胁迫增强未加剧膜的受损, 而 ARW 叶  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  比值不断下降, 可见其细胞膜受损较严重。综上可知, BRLA 品种根具备较强的  $\text{Na}^+$  截留以及限制  $\text{Na}^+$  向叶部转运的能力, 且能维持较高的  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  值、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$  值和正常的  $\text{Mg}^{2+}$  吸收, 可知 BRLA 较 ARW 品种耐盐性更强。

脯氨酸是重要的有机调节物质, 对于细胞的耐盐性和抵御重金属毒害有特殊的意义。普遍认为, 脯氨酸的增加对植物抵抗逆境胁迫有积极的意义。本研究表明, 盐胁迫后 BRLA 品种脯氨酸含量能够随盐胁迫增强持续积累且高于 ARW 品种。脯氨酸具有较强的亲水性能维持细胞正常膨压, 还是细胞内酶和亚细胞结构的保护剂 (Yokoi *et al.*, 2002; Silveira *et al.*, 2009)。因此可以认为, 与 ARW 品种相比, BRLA 具有较强的脯氨酸合成能力, 能够在中轻度盐分处理 ( $\leq 0.3\%$ ) 时, 其根部持续增加脯氨酸的累积, 说明 BRLA 品种具备较强的渗透响应能力, 对于增强其抵御盐分胁迫具有重要意义。另外, 研究发现, 脯氨酸对 Cd 有较强的螯合作用, 脯氨酸的积累对于植物解毒有积极作用, 脯氨酸能够通过螯合作用降低细胞中游离态的 Cd 移动能力 (Siripornadulsil *et al.*, 2002; Sharma *et al.*, 2006),

根部大量脯氨酸与游离态 Cd 螯合沉淀限制其向地上部移动,也许正是 BRLA 品种叶部 Cd 含量较低的原因之一。

BRLA 品种根中可溶性糖含量在盐胁迫后增加,叶中可溶性糖含量在盐胁迫后均低于对照,说明 BRLA 经光合作用合成的可溶性糖主要参与两部分的作用,一部分通过筛管向根部运输参与渗透调节,一部分作为合成其他有机渗透调节物质的能源。Manuel 等(2001)研究认为,盐胁迫下有机渗透调节物质的合成如脯氨酸需要可溶性糖提供碳源和能量,这也是可溶性糖含量下降的重要原因。另外,随着盐胁迫加重,BRLA 叶中可溶性糖含量并未有显著变化( $P > 0.05$ ),表明 BRLA 品种在满足以上两部分需求外仍能存储一定量的可溶性糖作为叶部渗透调节物质,由试验测定的其他有机渗透调节物质的含量数据可知,BRLA 品种更加倾向于合成有机物作为渗透调节的物质,从而避免吸收更多无机盐离子造成的离子毒害,这也许是因为 BRLA 品种渗透响应机制不一样,也可能是 BRLA 品种的渗透响应过程更加趋向于自我保护过程。植物中较多的可溶性糖存在液泡中,所以其含量对 Cd 转运影响不大(Toroser *et al.*, 1997; Martínez *et al.*, 2005)。

本试验表明,盐分促进了苋菜可溶性蛋白积累。许多研究发现,盐分迫使植物可溶性蛋白合成代谢增强,降低细胞渗透势,提高植物保水抗盐能力,BRLA 品种根、叶中可溶性蛋白含量均高于 ARW。本试验发现,在盐胁迫下两苋菜品种根、叶中可溶性蛋白和游离氨基酸含量大致呈“互补的动态平衡”,表明苋菜在盐胁迫后促进了细胞内游离氨基酸合成蛋白质这一过程。本试验发现,中轻度盐分处理(0.2%~0.3%)时,BRLA 品种根中游离氨基酸含量较高,而 BRLA 品种叶中游离氨基酸含量却低于 ARW 品种,说明 BRLA 叶部更倾向于游离氨基酸合成可溶性蛋白这一生化过程,可溶性蛋白质作为大分子有机渗透调节物质参与各种生化过程,可溶性蛋白亲水性强,可明显增加植物细胞亲水性、束缚水分和保持原生质弹性,提高植物抗盐能力(毛桂莲等 2005; 肖强等 2005)。由此可知,BRLA 品种根部可溶性蛋白和游离氨基酸含量均较 ARW 品种更高,且 BRLA 品种叶部更强的可溶性蛋白的合成能力,说明 BRLA 具备更强的耐盐保水特性。另外,可溶性蛋白也可与 Cd 螯合沉淀,降低 Cd 向叶部转运量。盐胁迫后苋菜通过合成一定量的有机

物质参与渗透调节,同时这些有机物质又会与进入细胞内的游离态 Cd 螯合沉淀,这是两品种 Cd 的转运比值降低的重要原因。

总体看来,盐胁迫下 2 苋菜品种根、叶对 Cd 及主要渗透调节物质的积累存在差异。与 ARW 品种相比,BRLA 品种具有更低 Cd 累积性,表现出较强的耐盐性,具备较好的渗透响应能力,这可为后期筛选既耐盐又低累积 Cd 作物品种提供一定的依据。

#### 参考文献

- 陈艳. 2013. 不同苋菜品种对重金属累积差异和机制初探(硕士学位论文). 广州: 暨南大学.
- 丁海荣,洪立洲,杨智青,等. 2010. 盐碱地及其生物措施改良研究现状. 现代农业科技, (6): 299-300.
- 丁同楼,贾玉辉,鲍敬,等. 2013. 不同耐盐性小麦根  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  的吸收特性. 植物生理学报, 49(1): 34-40.
- 李春检. 2008. 高级植物营养学. 北京: 中国农业大学出版社.
- 李取生,楚蓓,石雷,等. 2007. 珠江口滩涂湿地土壤重金属分布及其对围垦的影响. 农业环境科学学报, 26(4): 1422-1426.
- 李树辉. 2011. 北方设施菜地重金属的累积特征及防控对策研究(博士学位论文). 北京: 中国农业科学院.
- 李兆君,马国瑞,徐建民,等. 2004. 植物适应重金属 Cd 胁迫的生理及分子生物学机理. 土壤通报, 35(2): 234-238.
- 刘峰,张军,张文吉. 2001. 氧化钙对水稻幼苗的生理作用研究. 植物学通报, 18(4): 490-495.
- 毛桂莲,许兴. 2005. 枸杞耐盐突变体的筛选及生理生化分析. 西北植物学报, 25(2): 275-280.
- 孟庆峰,杨劲松,姚荣江,等. 2012. 滩涂围垦区土壤重金属调查及生态风险评价——以盐城市弼港镇为例. 农业环境科学学报, 30(11): 2249-2257.
- 肖强,郑海雷,陈瑶,等. 2005. 盐度对互花米草生长及脯氨酸,可溶性糖和蛋白质含量的影响. 生态学杂志, 24(4): 373-376.
- 杨曙辉,宋天庆,欧阳作富,等. 2011. 关于我国设施农业可持续发展问题的战略研究. 农业科技管理, 30(5): 1-5.
- 余海英,李廷轩,周健民. 2007. 设施土壤盐分的累积,迁移及离子组成变化特征. 植物营养与肥料学报, 13(4): 642.
- Adem GD, Roy SJ, Zhou M, *et al.* 2014. Evaluating contribution of ionic, osmotic and oxidative stress components towards salinity tolerance in barley. *BMC Plant Biology*, 14: 113.
- Bates LS, Waldren RP, Teare ID. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39: 205-207.
- Bingham FT, Sposito G, Strong JE, *et al.* 1984. The effect of chloride on the availability of cadmium. *Journal of Environ-*

- mental Quality*, **13**: 71 – 74.
- Demir Y, Kocaçaliskan I. 2002. Effect of NaCl and proline on bean seedlings cultured in vitro. *Biologia Plantarum*, **45**: 597 – 599.
- Fitzgerald FJ, Caffrey JM, Nesaratnam ST, et al. 2003. Copper and lead concentrations in salt marsh plants on the Suir Estuary, Ireland. *Environmental Pollution*, **123**: 67 – 74.
- Ghnaya T, Nouairi I, Slama I, et al. 2005. Cadmium effects on growth and mineral nutrition of two halophytes: *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*. *Journal of Plant Physiology*, **162**: 1133 – 1140.
- Golldack D, Quigley F, Michalowski CB, et al. 2003. Salinity stress-tolerant and-sensitive rice (*Oryza sativa* L.) regulate AKT1-type potassium channel transcripts differently. *Plant Molecular Biology*, **51**: 71 – 81.
- Han RM, Isabelle L, Ruan CJ, et al. 2012. NaCl differently interferes with Cd and Zn toxicities in the wetland halophyte species *Kosteletzkya virginica* (L.) Presl. *Plant Growth Regulation*, **68**: 97 – 109.
- Helal HM, Haque SA, Ramadan AB, et al. 1996. Salinity-heavy metal interactions as evaluated by soil extraction and plant analysis. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, **27**: 1355 – 1361.
- Huber SC, Maury W. 1980. Effects of magnesium on intact chloroplasts. I. Evidence for activation of (sodium) potassium/proton exchange across the chloroplast envelope. *Plant Physiology*, **65**: 350 – 354.
- Jiang YW, Huang BR. 2001. Effects of calcium on antioxidant activities and water relations associated with heat tolerance in two cool-season grasses. *Journal of Experimental Botany*, **52**: 341 – 349.
- Lacerda CF, Cambraia J, Oliva MA, et al. 2003. Osmotic adjustment in roots and leaves of two sorghum genotypes under NaCl stress. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, **15**: 113 – 118.
- Li QS, Chen Y, Fu HB, et al. 2012. Health risk of heavy metals in food crop grown on reclaimed tidal flat soil in the Pearl River Estuary. *Journal of Hazardous Materials*, **227**: 148 – 154.
- Manuel J, Reigosa R. 2001. Handbook of Plant Ecophysiology Techniques. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Martínez JP, Kinet JM, Bajji M, et al. 2005. NaCl alleviates polyethylene glycol-induced water stress in the halophyte species *Atriplex halimus* L. *Journal of Experimental Botany*, **56**: 2421 – 2431.
- McLaughlin MJ, Palmer LT, Tiller KG, et al. 1994. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers. *Journal of Environmental Quality*, **23**: 1013 – 1018.
- Mišić D, Šiler B, Živković JN, et al. 2011. Contribution of inorganic cations and organic compounds to osmotic adjustment in root cultures of two *Centaurium* species differing in tolerance to salt stress. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, **108**: 389 – 400.
- Sharma SS, Dietz KJ. 2006. The significance of amino acids and amino acid-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress. *Journal of Experimental Botany*, **57**: 711 – 726.
- Silveira JAG, Araújo SAM, Lima JPMS, et al. 2009. Roots and leaves display contrasting osmotic adjustment mechanisms in response to NaCl-salinity in *Atriplex nummularia*. *Environmental and Experimental Botany*, **66**: 1 – 8.
- Siripornadulsil S, Traina S, Verma DPS, et al. 2002. Molecular mechanisms of proline-mediated tolerance to toxic heavy metals in transgenic microalgae. *The Plant Cell*, **14**: 2837 – 2847.
- Smolders E, McLaughlin MJ. 1996. Effect of Cl on Cd uptake by Swiss chard in nutrient solution. *Plant and Soil*, **179**: 57 – 64.
- Stevens DP, McLaughlin MJ, Heinrich T, et al. 2003. Determining toxicity of lead and zinc runoff in soils: Salinity effects on metal partitioning and on phytotoxicity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **22**: 3017 – 3024.
- Toroser D, Huber SC. 1997. Protein phosphorylation as a mechanism for osmotic-stress activation of sucrose-phosphate synthase in spinach leaves. *Plant Physiology*, **114**: 947 – 955.
- Usman ARA, Kuzyakov Y, Stahr K. 2005. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals availability to wheat grown on sewage sludge-contaminated soil. *Soil & Sediment Contamination*, **14**: 329 – 344.
- Wahla IH, Kirkham MB. 2008. Heavy metal displacement in salt-water-irrigated soil during phytoremediation. *Environmental Pollution*, **155**: 271 – 283.
- Weimberg R. 1986. Growth and solute accumulation in 3-week-old seedlings of *Agropyron elongatum* stressed with sodium and potassium salts. *Physiologia Plantarum*, **67**: 129 – 135.
- Xu J, Yin H, Liu X, et al. 2010. Salt affects plant Cd-stress responses by modulating growth and Cd accumulation. *Planta*, **231**: 449 – 459.
- Yokoi SJ, Bressan RA, Hasegawa PM. 2002. Salt stress tolerance of plants. Center for Environmental Stress Physiology, Purdue University, JIRCAS Working Report, 2002: 25 – 33.

---

作者简介 徐智敏 男, 1991年生, 硕士研究生, 主要从事土壤污染与修复技术研究。E-mail: zhiminxu2012@sina.com  
责任编辑 魏中青

---