

余丹萍, 李取生, 王立立, 等. 缺 Fe/Zn 及盐胁迫下苋菜对 Cd 及矿质元素的吸收与 IRT1 表达的关系[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2): 234-239.
YU Dan-ping, LI Qu-sheng, WANG Li-li, et al. Cadmium and mineral element accumulation and IRT1 gene expression of *Amaranth hybridus* L. under iron/zinc deficiencies or salt stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2): 234-239.

缺 Fe/Zn 及盐胁迫下苋菜对 Cd 及矿质元素的吸收与 IRT1 表达的关系

余丹萍^{1,2}, 李取生^{1,2}, 王立立^{1,2*}, 徐智敏^{1,2,3}, 郭世鸿^{1,2,3}, 胡妮^{1,2}, 陈惠君^{1,2}

(1.暨南大学环境学院, 广州市环境暴露与健康重点实验室, 广州 510632; 2.广东省环境污染控制与修复材料中心, 广州 510632; 3.暨南大学生命科学技术学院, 广州 510632)

摘要 选用 Cd 低累积品种白梗尖叶苋菜(B)和高累积品种花红苋菜(H) 2 个苋菜品种, 采用水培法分别研究了在缺 Fe、缺 Zn 和盐胁迫 3 种处理条件下 2 个苋菜品种对矿质元素以及 Cd 的累积特征, 并通过测定 2 个品种不同处理根部 IRT1(铁离子转运蛋白)的表达量, 建立了缺 Fe/Zn 及盐胁迫下苋菜对 Cd 及矿质元素的吸收与 IRT1 表达的关系。结果表明, 3 个处理组中 2 个苋菜品种生物量均显著低于对照组, 缺 Fe 以及缺 Zn 处理显著促进了 2 个苋菜品种对 Cd 以及矿质元素的累积, 而盐胁迫显著抑制了苋菜对 Cd 的累积, 同时促进了其对矿质元素的累积($P < 0.05$)。不同处理下 Zn、Fe 相关转运基因 IRT1 的表达差异显著, IRT1 表达量的增加可以促进植物对 Cd、Fe、Zn、Mn、Mg 等元素的吸收($P < 0.05$)。

关键词 苋菜; 矿物质; 盐胁迫; IRT1

中图分类号: X503.23 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)02-0234-06 doi:10.11654/jaes.2016.02.004

Cadmium and mineral element accumulation and IRT1 gene expression of *Amaranth hybridus* L. under iron/zinc deficiencies or salt stress

YU Dan-ping^{1,2}, LI Qu-sheng^{1,2}, WANG Li-li^{1,2*}, XU Zhi-min^{1,2,3}, GUO Shi-hong^{1,2,3}, HU Ni^{1,2}, CHEN Hui-jun^{1,2}

(1.School of Environment, Jinan University, Key Laboratory of Environmental Exposure and Health of Guangzhou City, Guangzhou 510632, China; 2.Guangdong provincial research center of environmental pollution control and remediation material, Guangzhou 510632, China; 3.College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract Previous research has showed that iron-regulated transporter 1 (IRT1) gene plays an important role in the accumulation and transfer of metals in plants. Here a low Cd-accumulating cultivar Baigenjianye(B) and a high Cd-accumulating cultivar Huahong(H) were used to investigate the characteristics of mineral element and Cd accumulation by and IRT1 expression level in roots of *Amaranth hybridus* L. under iron(Fe) or zinc(Zn) deficiencies or salt stress. Quantitative PCR was used to determine the expression level of IRT1. Biomass of two cultivars obviously decreased in the treatments, with the greatest reduction observed in Fe deficiency. The accumulation of Cd and mineral elements significantly($P < 0.05$) increased under Fe and Zn deficiency treatments. However, salt stress showed a significant($P < 0.05$) inhibiting effect on Cd accumulation but a significant ($P < 0.05$) promotion on the accumulation of mineral elements. The concentrations of Cd, Fe, Zn and Mg, and the expression of gene IRT1 in root protoplasts were obviously higher in high Cd-accumulating cultivar Huahong(H) than those in low Cd-accumulating cultivar Baigenjianye(B). Furthermore, elevated expression levels of IRT1 promoted the concentrations of Cd, Fe, Zn and Mg in stems and leaves. Therefore, while Cd concentration in crops is concerned, the content of minerals in the soil should be paid attention to at the same time.

Keywords amaranth; minerals; salt stress; IRT1

收稿日期 2015-10-16

基金项目 国家自然科学基金项目(41371321) 广东省产学研项目(2013B0906001)

作者简介 余丹萍(1989—),女,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究方向为环境修复技术与应用。E-mail:1285950415@qq.com

*通信作者:王立立 E-mail:10wanglili@163.com

近年来,我国土壤重金属污染形势十分严峻,近1/5的耕地受到重金属Cd污染,不仅造成了严重的经济损失,而且威胁着人们的健康^[1],而部分污染土壤盐渍化^[2]及其中Fe、Zn元素的生物有效性低^[3-4]都会影响植物对Cd的吸收,对我国农作物质量安全构成了进一步威胁。有研究表明,Fe、Zn均能与Cd产生交互作用影响植物对Cd的吸收累积^[5],盐离子不仅可以活化土壤中的Cd,也会改变植物吸收转运Cd的能力^[6-7],因此复合胁迫的条件下植物对Cd吸收累积的机制是亟待研究的课题。

植物通过转运蛋白来调节其对金属离子的吸收和体内分配以维持细胞内金属离子的平衡^[8-9]。目前,已报道金属转运蛋白中研究最多的是ZIP家族(ZRT/IRT-like proteins),其中ZIP1、ZIP2、ZIP3、ZNT1、IRT1等已经从植物中分离并鉴定^[10]。IRT1为铁离子转运蛋白,水稻OsIRT1蛋白能够转运 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cd^{2+} ,拟南芥AtIRT1是根部 Fe^{2+} 高亲和性吸收转运蛋白^[11-12]。Cd为植物非必需元素,因而没有高选择性的蛋白通道,酵母试验表明AtIRT1具有广泛的底物特异性,为Cd进入植物体内提供了通道^[13]。IRT1可高效转运 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 离子,相关研究表明铁转运蛋白IRT1可高效转运Cd^[14]。因此,从分子生物学角度探究缺Fe/Zn及盐胁迫等处理条件下,IRT1的表达量与Cd含量的关系,对揭示各种营养元素与Cd之间的交互作用机理具有重要意义。

苋菜在中国南方种植广泛,以其丰富的食用价值倍受广大菜农的青睐。但苋菜容易受到Cd污染^[15],因此本研究选用苋菜作为实验材料,从分子生物学角度探索缺Fe/Zn及盐渍化条件下植物对Cd吸收累积的机制,以期对复合胁迫土壤的安全应用及植物对Cd蓄积机制的完善提供科学依据。

1 材料方法

1.1 试验材料

根据前期的筛选结果^[16],选取Cd低累积品种白梗尖叶苋菜(B)(广州长合种子有限公司)和Cd高累积品种花红苋菜(H)(广州太和广联种苗行)2个广州市常见苋菜品种,供试种子购自广州市种子市场。

白沙购自河源市英川有限责任公司。其理化性质:总Cd、Zn、Mg、Fe、Mn、Na含量分别为1.038 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和41.12、894.3、43.25、2.125、302.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

将育苗板用洗净灭菌的白沙铺满后置于塑料盆

中,供试种子用30%双氧水浸泡10 min后用清水冲洗数次并播种于育苗板中,进行沙培育苗。种子发芽前浇灌适量的蒸馏水以保证种子能够正常发芽,发芽后叶面喷洒100%霍格兰营养液,在塑料盆中加入适量的蒸馏水。3 d后开始在塑料盆中浇灌100%霍格兰营养液,3周后选取长势均匀的苋菜幼苗移于水培盆进行水培试验。水培盆中加入100%的霍格兰营养液,3 d更换一次营养液,经过6 d的全营养液稳定培养后进行处理,共设4个处理。全液:全营养液+Cd,缺Fe:全营养液缺Fe(营养液中不添加Fe元素)+Cd,缺Zn:全营养液缺Zn(营养液中不添加Zn元素)+Cd,加盐:全营养液盐胁迫(添加含量为0.3%的NaCl)+Cd。其中全液为对照组,其余3组为实验组,Cd以 $Cd(NO_3)_2\cdot 4H_2O$ 的形式加入,Cd浓度设置为0.25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。每个处理3个重复,3 d换一次营养液,6 d后收获植物。

1.3 样品预处理与测定方法

将收获的植物样品用蒸馏水洗净,将茎叶和根部剪开,取部分根尖的鲜样速冻后置于 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱保存,茎叶和根部分别用滤纸包好放在烘箱中 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重。称取烘干的植物样0.1~0.4 g于消解管中,加入10 mL硝酸微波消解(CEM corporation, MARS5),消解后将样品定容到25 mL并用中速滤纸过滤,用于测定Cd、Fe、Zn、Na、Mn、Mg的含量。Cd的测定使用石墨炉原子吸收分光光度计(日本岛津公司,AA-7000),其余金属使用等离子发射光谱仪(美国PE公司,OPTIMA2000DV)测定。用Trizol试剂提取植物根部总RNA并通过凝胶电泳检验RNA的完整性,用cDNA反转录试剂盒合成cDNA的第一条链,通过实时荧光定量PCR仪(BioRad,CFX96)测定IRT1的表达量。引物根据苋菜IRT1基因序列利用Oligo 7设计并由上海生工生物工程有限公司合成。

1.4 数据处理

利用SPSS 11.0对数据进行标准方差分析以及显著性差异分析,显著性差异分析选用邓肯统计方法。

2 结果与分析

2.1 缺Fe/Zn和盐胁迫对苋菜生物量的影响

缺Fe/Zn和盐胁迫处理下,苋菜生物量的变化如图1所示。缺Fe、缺Zn及盐胁迫处理下2个苋菜品种生物量均明显低于对照组,缺Fe处理下生物量下降最为明显,在缺Fe处理下2个品种总生物量分别下降85.43%(B)和55.89%(H),盐胁迫处理对植物生

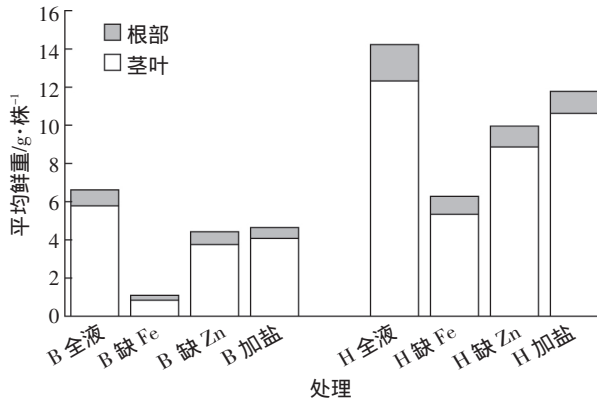


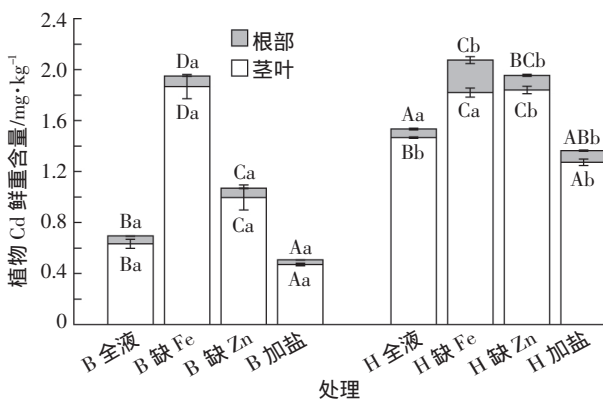
图 1 苋菜的平均鲜重

Figure 1 Average fresh weight of amaranth

物量影响最小, 2 个品种总生物量分别下降 29.83% (B)和 17.21%(H)。由此可知 3 个处理中缺 Fe 对植物的生物量影响最大。B 品种在 3 个处理组中生物量较对照组的下降率都比 H 品种高, 缺 Fe/Zn 和盐胁迫对 B 品种生物量的影响作用都比 H 品种大。

2.2 缺 Fe/Zn 和盐胁迫对苋菜矿质元素累积的影响

由图 2 可知, 缺 Fe、缺 Zn 处理下 2 个苋菜品种茎叶和根部的 Cd 含量均显著高于对照组, 而盐胁迫处理茎叶的 Cd 含量显著低于对照组。2 个品种在缺 Fe 处理中, 茎叶和根部 Cd 含量相对于对照组增幅均比其他处理组大, 茎叶分别增加 195%(B)和 24%(H), 而根部分别增加 36%(B)和 281%(H)($P < 0.05$); 在缺 Zn 处理中, 茎叶相对于对照组分别增加 58%(B)和 25%(H), 而根部分别增加 19%(B)和 72%



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

Different uppercase letters indicate significant difference between treatments within a cultivar; different lowercase letters indicate significant difference between cultivars within a treatment ($P < 0.05$). The same below

图 2 苋菜根部和茎叶中的 Cd 鲜重含量

Figure 2 Cadmium content in roots and stems of amaranth

(H); 在盐胁迫中茎叶相对于对照组分别增加 16% (B)和 15%(H), 而根部分别减少 40%(B)和增加 36% (H)。在相同处理组中, B 品种茎叶 Cd 含量相对于对照组的增幅都较 H 品种高, 但是根部却呈现相反的趋势。

由表 1 可知, 在缺 Fe 处理中, 2 个品种茎叶 Zn、Mg、Fe、Mn 的含量都显著高于对照, 且增加幅度较其他处理组大, 缺 Zn 处理中 Fe、Mg 两元素的含量显著高于对照组, 而 Zn 元素含量显著低于对照组。盐胁迫处理中 Zn、Mg、Fe、Mn 含量均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。H 品种在 4 个处理中各矿质元素的含量均高于 B 品种。在盐胁迫处理中, H 品种根 Na 含量显著高于 B 品种, 但是 B 品种茎叶 Na 含量显著高于 H 品种 ($P < 0.05$), 并且两品种茎叶 Na 的鲜重含量较对照组分别增加 44.20 倍(B)和 16.86 倍(H), 根部 Na 的鲜重含量较对照组分别增加 11.52 倍(B)和 20.93 倍(H)。B 品种茎叶 Na 元素的鲜重含量较对照组的增幅大于 H 品种, 而根部表现出相反的趋势。

2.3 缺 Fe/Zn 和盐胁迫对苋菜金属转运相关基因表达的影响

IRT1 能够转运包括 Fe 和 Zn 在内的众多金属离子。根据图 3 可知, 3 个处理组根部 IRT1 的表达量都比对照组高。对照组中 B 品种 IRT1 的表达量低于 H 品种, 但是缺 Fe、缺 Zn 处理中 B 品种根部 IRT1 的表达量显著增加, 并且高于 H 品种 ($P < 0.05$)。H 品种缺 Fe、缺 Zn 处理中根部 IRT1 的表达量与对照组差异不显著, 而盐胁迫处理中根部 IRT1 的表达量显著高于对照组 ($P < 0.05$)。

3 讨论

本研究发现, 在缺 Fe/Zn 条件下 2 个苋菜品种的

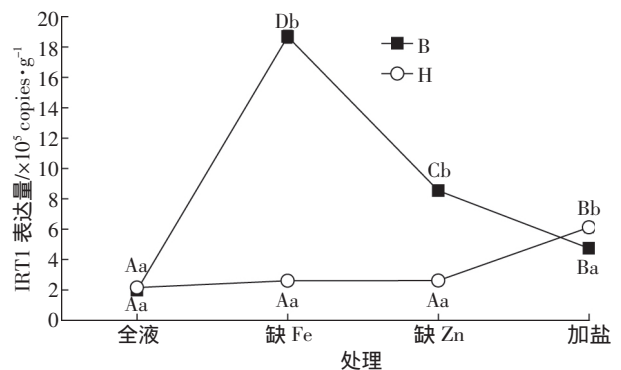


图 3 苋菜根部 IRT1 的表达量

Figure 3 Expression of IRT1 in roots of amaranth

表1 两个苋菜品种茎叶、根部矿质元素的鲜重含量

Table 1 Content of mineral elements in stems and roots of amaranth

器官 Organ	处理 Treatment	Fe/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Mg/mg·kg ⁻¹	Mn/mg·kg ⁻¹	Na/mg·kg ⁻¹
茎叶	B 全液	8.18±0.13Aa	13.10±0.32Ba	385.30±14.52Aa	53.72±1.77Aa	58.71±7.56Aa
	B 缺铁	34.03±3.01Da	32.08±1.26Da	825.41±25.87Ca	97.52±3.84Ba	143.19±5.19Aa
	B 缺锌	17.96±2.42Ba	7.39±0.82Aa	486.41±48.85Ba	54.72±5.77Aa	52.38±7.80Aa
	B 加盐	25.71±1.72Ca	15.71±0.75Ca	416.09±41.59Aa	53.39±5.03Aa	2 653.58±217.20Ba
	H 全液	26.29±1.42Ab	21.47±0.15Bb	495.97±4.89Ab	77.22±0.68Aa	66.25±1.54Ba
	H 缺铁	42.16±2.93Bb	36.21±0.78Cb	547.80±27.88Bb	111.24±4.94Cb	46.64±2.63Ab
	H 缺锌	39.69±1.03Bb	10.54±0.10Ab	613.95±32.42Cb	85.51±3.56Bb	91.04±4.45Cb
	H 加盐	49.97±3.91Cb	21.63±0.04Bb	617.21±7.70Cb	85.27±0.85Bb	1 183.10±13.26Db
根部	B 全液	110.42±3.65Ba	3.53±0.32Ba	105.25±3.31Ba	4.14±0.13Ab	12.71±1.97Aa
	B 缺铁	156.49±0.91Db	4.83±0.04Ca	101.86±0.88Aa	3.98±0.02Aa	20.11±0.03Ab
	B 缺锌	96.9±2.44Aa	2.11±0.19Aa	113.89±0.18Db	4.18±0.45Aa	14.53±0.68Aa
	B 加盐	150.13±1.16Ca	4.38±0.61Ca	108.94±0.540Ca	3.83±0.12Aa	171.81±24.12Ba
	H 全液	99.75±1.57Bb	13.67±1.60Bb	152.53±7.53Bb	2.81±0.01Aa	18.66±0.24Aa
	H 缺铁	58.18±8.66Aa	54.26±4.65Cb	232.30±17.25Cb	72.56±4.72Db	12.97±1.21Aa
	H 缺锌	96.23±4.70Ba	4.72±0.31Ab	112.31±0.80Aa	21.11±2.58Bb	13.34±1.30Aa
	H 加盐	182.31±19.69Cb	11.17±0.23Bb	115.23±2.81Ab	29.96±6.34Cb	409.29±22.78Bb

注:不同大写字母代表相同品种不同处理间差异显著;不同小写字母代表不同品种相同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters indicate significant difference treatments within a cultivar; different lowercase letters indicate significant difference between cultivars within a treatment ($P<0.05$).

生物量都较对照组明显减少。由于Fe和Zn元素都是植物生长所必需的元素,并与植物的光合作用有关,它们的缺乏会影响植物的正常生长,且有研究表明Cd对植物的光合作用有一定的阻碍作用,因此,在Cd存在条件下,缺Fe/Zn会导致植物生物量的降低^[17-19]。实验过程中缺Fe处理新叶变黄,这可能是由于植物对Fe的需求量较其他必需元素大,故在缺Fe处理中因缺少Fe元素而阻碍了叶绿素的合成,新叶叶片变黄,光合速率降低^[20-21]。缺Zn处理中,植物生物量减少的幅度明显小于缺Fe。虽然大量研究表明Zn元素的缺失也会影响植物正常的光合作用,阻碍植物的正常生长^[22],但是因为植物对Zn元素的需求量小,并且实验中植物仅缺Zn 6 d,时间较短并未表现出明显的病症,所以生物量降低幅度不大。本研究发现,盐胁迫下2个苋菜品种的生物量较对照组都有所降低。赵可夫^[23]发现盐胁迫会对植物造成渗透胁迫和离子胁迫,其中渗透胁迫造成植物吸水困难,而离子胁迫对植物代谢功能产生毒害,从而影响植物的正常生长,导致生物量降低。因此,在Cd与缺Fe、Cd与缺Zn、Cd与盐胁迫对植物的双重毒害作用下,3个处理组的植株生长受到不同程度的抑制,生物量都比对照组明显减少。

通过对两个苋菜品种茎叶和根部Cd含量的测

定,发现在缺Fe、缺Zn处理中植物茎叶和根部Cd含量较对照组显著增加。有研究表明Cd与Fe、Zn的吸收都存在拮抗作用,Cd可以通过Fe和Zn的转运通道进入植物体内^[14, 24-25],因此在缺Fe、缺Zn处理中Fe元素和Zn元素的缺失促使大量的Cd进入植物体内,使植物茎叶大量累积Cd。而研究发现在盐胁迫处理中两个品种茎叶Cd含量都较对照组有所降低。大量研究表明盐离子可以通过增加土壤中Cd的移动性和生物可利用性来促进植物对重金属的累积^[26],然而在水培条件下NaCl中的Cl⁻可以与Cd²⁺形成CdCl_n²⁻ⁿ,植物对Cd²⁺的吸收效率比CdCl_n²⁻ⁿ高,因此在盐胁迫中植物地上部Cd含量较对照组要低^[6]。在盐胁迫处理中,由于处于高盐度的环境中,植物通过大量吸收环境中的水分来降低体内的盐分浓度,植物体内水分可能进一步增加了金属的可移动性,从而促进了金属元素从根部向茎叶的转移,因此在盐胁迫处理中茎叶中Fe、Mg、Zn以及Mn等金属元素的含量绝大多数较对照组要高。本研究发现在盐胁迫处理中B品种茎叶Na、Cd的鲜重含量较对照组的增幅大于H品种,而根部表现出相反的趋势。相关研究表明植物把过量的盐离子隔离在对其生命活动影响小的部位,从而减少盐分的毒害作用^[27-28]。H品种将盐分和Cd截留在根部,减少向茎叶的转移从而减少盐分对

其生长的毒害,因此H品种比B品种耐盐性更强。两个苋菜品种根部矿质元素的含量在不同处理组之间变化较为复杂,则是由于根部不仅是重金属吸收的部位也是重金属转移的部位,不同品种之间的重金属累积能力也存在诸多差异。

IRT1为Fe离子转运蛋白,定位于细胞质膜上,在缺Fe条件下主要在根部外皮层表达,将Fe和其他金属从根外转运至表皮细胞内^[30]。本研究对照组中H品种IRT1的表达量高于B品种,是由于Cd通过IRT1进入了植物体内。有研究表明IRT1可能是苋菜吸收Cd的一个关键基因^[31-32]。在本研究缺Fe、缺Zn处理中,2个苋菜品种根部IRT1的表达量都有所增加,并且这2个处理组中茎叶、根部Cd含量都显著增加。Lee等^[13]发现缺Fe胁迫能够诱导拟南芥根部IRT1的转录。故笔者认为缺Fe、缺Zn诱导了IRT1的表达。Nakanishi等^[11]发现IRT1的选择性低,可以转运众多二价金属离子,IRT1的大量表达也会引起植物对于其他金属元素的吸收增加,故本研究中缺Fe、缺Zn处理Fe、Zn、Mg、Mn元素的含量显著增加。盐胁迫处理中,茎叶与根部Na元素的含量急剧上升,其他的矿质元素含量显著增加但是幅度不大,而两个品种根部IRT1的表达量较对照组都显著增加($P < 0.05$)。由此推论Na元素可能通过IRT1所控制的蛋白通道进入植物体,虽然大量Na离子的存在促进了植物IRT1的大量表达,但是Na离子占据了通道,因而矿质元素含量增幅不明显,Cd含量显著减少。

对照组中H品种IRT1表达量高于B品种,在缺Fe、缺Zn处理组中,B品种IRT1表达量显著增加,其茎叶Cd累积量也较对照组显著增加,而H品种IRT1表达量增加不显著($P > 0.05$)。因此可以推断,IRT1的表达过量可以增加植物对Cd的吸收累积,但IRT1并非植物吸收转运Cd的唯一关键基因。陈艳芳等^[33]证明HMA4也是植物转运Cd的一个重要基因。在缺Fe、缺Zn处理组B品种IRT1大量表达,H品种中表达量增加幅度不大,因而缺Fe、缺Zn能够在更大程度上刺激Cd低累积品种IRT1的表达。

4 结论

(1)Cd低累积品种苋菜(B)对缺Fe/Zn及盐胁迫的耐性较差,在缺Fe环境中种植会极大地增加作物的健康风险,且在受污染土壤中其生物量较少,不适宜污染地区农业种植。Cd高累积品种苋菜(H)的生物量受到复合污染的影响较小,并表现出了较高的耐盐

性,可以在盐渍化土壤中种植。

(2)缺Fe/Zn可以促进Fe转运蛋白IRT1的表达,而IRT1的表达过量可以增加植物对Cd的吸收累积,因此在关注土壤Cd污染对农作物质量安全影响时,不仅要关注污染土壤中Cd的含量,也应该关注土壤中矿质元素的含量。

(3)盐分环境中大量Na元素占据IRT1,抑制了植物对Cd的吸收,但是在盐渍土壤中植物对Cd的吸收是一个复杂的过程,还需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 程旺大,姚海根,吴伟,等.土壤-水稻体系中的重金属污染及其控制[J].中国农业科技导报,2005,7(4):51-54.
CHENG Wang-da, YAO Hai-gen, WU Wei, et al. Heavy metal pollution and its countermeasures in soil-rice system[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2005, 7(4): 51-54.
- [2] 李取生,楚蓓,石雷,等.珠江口滩涂湿地土壤重金属分布及其对围垦的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1422-1426.
LI Qu-sheng, CHU Bei, SHI Lei, et al. Heavy metal distribution in tidal wetland soils and its effect on reclamation in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1422-1426.
- [3] 陆欣春,田霄鸿,杨习文,等.氮锌配施对石灰性土壤锌形态及肥效的影响[J].土壤学报,2010,47(6):181-192.
LU Xin-chun, TIAN Xiao-hong, YANG Xi-wen, et al. Effects of combined application of nitrogen and zinc fractions and fertilizer efficiency in calcareous soil[J]. *Acta Pedologica Science*, 2010, 47(6): 181-192.
- [4] Subramanian K S, Tenshia V, Jayalakshmi K, et al. Biochemical changes and zinc fractions in arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus intraradices*) inoculated and uninoculated soils under differential zinc fertilization[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 43(1): 32-39.
- [5] 黄益宗,朱永官,黄凤堂,等.镉和铁及其交互作用对植物生长的影响[J].生态环境,2004,13(3):406-409.
HUANG Yi-zong, ZHU Yong-guan, HUANG Feng-tang, et al. Effects of cadmium and iron and their interactions on plants growth: A review [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3): 406-409.
- [6] Lefevre I, Marchal G, Meerts P, et al. Chloride salinity reduces cadmium accumulation by the Mediterranean halophyte species *Atriplex halimus* L.[J]. *Environ Exp Bot*, 2009, 65(1): 142-152.
- [7] Usman A R A, Kuzyakov Y, Stahr K. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals availability to wheat grown on sewage sludge-contaminated soil[J]. *Soil & Sediment Contamination*, 2005, 14(4): 329-344.
- [8] Colangelo E P, Guerinot M L. Put the metal to the petal: Metal uptake and transport throughout plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2006, 9(3): 322-330.
- [9] Yang X, Feng Y, He Z, et al. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation[J]. *J Trace Elem Med Biol*, 2005, 18(4): 339-353.
- [10] Pence N S, Larsen P B, Ebbs S D, et al. The molecular physiology of

- heavy metal transport in the Zn/Cd hyper-accumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, 97(9):4956-4960.
- [11] Nakanishi H, Ogawa I, Ishimaru Y, et al. Iron deficiency enhance cadmium uptake and translocation mediated by Fe²⁺ transporters OsIRT1 and OsIRT2 in rice[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2006, 52(4):464-469.
- [12] Eide D, Broderius M, Full J, et al. A novel iron-regulated metal transporter from plants identified by functional expression in yeast[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1996, 93(11):5624-5628.
- [13] Lee S, An G. Over-expression of OsIRT1 leads to increased iron and zinc accumulation in rice plant[J]. *Plant Cell Environ*, 2009, 32(4):408-416.
- [14] 贺晓燕, 龚义勤, 徐良, 等. 萝卜铁转运蛋白基因 RsIRT1 分子特征分析[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(6):13-18.
HE Xiao-yan, GONG Yi-qin, XU Liang, et al. Molecular characterization of iron-regulated transporter gene RsIRT1 in radish[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(6):13-18.
- [15] 徐智敏, 何宝燕, 李取生, 等. 盐胁迫下苋菜对镉及主要渗透调节物质累积的品种间差异[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2):483-490.
XU Zhi-min, HE Bao-yan, LI Qu-sheng, et al. Differences between two amaranth cultivars in accumulations of Cd and main osmotic adjustment substances under salt stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(2):483-490.
- [16] 李松松. 盐胁迫下不同品种苋菜对重金属及营养元素蓄积差异的研究[D]. 广州:暨南大学, 2014.
LI Song-song. The Research of differences in accumulation of heavy metals and nutrient elements in amaranth cultivars under salt stress[D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.
- [17] 李素贞, 陈景堂. 植物锌铁转运相关蛋白家族的研究进展[J]. 生物技术通报, 2013, 2:8-14.
LI Su-zhen, CHEN Jing-tang. Progresses in studying of protein families involved in Zn/Fe transporting in plants[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2013, 2:8-14.
- [18] Rogers E E, Guerinet M L. Guerinet FRD3, a member of the multidrug and toxin efflux family, control iron deficiency responses in Arabidopsis[J]. *Plant Cell*, 2002, 14(8):1787-1799.
- [19] 王焕校. 污染生态学基础[M]. 昆明:云南大学出版社, 1990:91-108.
WANG Huan-xiao. Basis of pollution ecology[M]. Kunming: Yunnan University Press, 1990:91-108.
- [20] Kobayashi T, Nishizawa N K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants[J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2012, 63:131-152.
- [21] 刘芷宇, 唐永良, 罗质超. 主要作物营养失调症状图谱[M]. 北京:农业出版社, 1982:47-48.
LIU Zhi-yu, TANG Yong-liang, LUO Zhi-chao. The main symptoms of crop nutrient disorders atlas[M]. Beijing: Agriculture Press, 1982:47-48.
- [22] 张进, 吴良欢, 王敏艳. 铁氮配施对稻米中铁、锌、钙、镁和蛋白质含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):122-125.
ZHANG Jin, WU Liang-huan, WANG Min-yan. Effect of iron and nitrogen mixed fertilizers on the content of Fe, Zn, Ca, Mg and protein in brown rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):122-125.
- [23] 赵可夫. 植物对盐渍逆境的适应[J]. 生物学通报, 2002, 37(2):7-9.
ZHAO Ke-fu. Plant adaptation to saline[J]. *Bulletin of Biology*, 2002, 37(2):7-9.
- [24] 付宝荣, 李法云, 臧树良, 等. 锌营养条件下镉污染对小麦生理特性的影响[J]. 辽宁大学学报, 2000, 27(4):366-370.
FU Bao-rong, LI Fa-yun, ZANG Shu-liang, et al. Effect of Cd on physiological characteristics of wheat under the condition of Zn nutrition[J]. *Journal of Liaoning University*, 2000, 27(4):366-370.
- [25] 李元, 王焕校, 吴玉树. Cd、Fe 及其复合污染对烟草叶片几项生理指标的影响[J]. 生态学报, 1992, 12(2):147-154.
LI Yuan, WANG Huan-xiao, WU Yu-shu. Effects of cadmium and iron on the some physiological indicators in leaves of tobacco[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, 12(2):147-154.
- [26] 徐明岗, 李菊梅, 陈世宝. 共存阳离子对土壤吸附 Cu²⁺ 的影响特征[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5):935-938.
XU Ming-gang, LI Ju-mei, CHEN Shi-bao. Adsorption of Cu²⁺ by soils under different co-existing cation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5):935-938.
- [27] 王学征, 李秋红, 吴凤芝. NaCl 胁迫下栽培型番茄 Na⁺、K⁺ 吸收、分配和转运特性[J]. 中国农业科学, 2010, 43(7):1423-1432.
WANG Xue-zheng, LI Qiu-hong, WU Feng-zhi. Study on the characteristics of absorption, distribution and selective transport of Na⁺ and K⁺ in tomato plants under salt stress[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(7):1423-1432.
- [28] 管志勇, 陈发棣, 陈素梅, 等. NaCl 胁迫对 2 个菊属野生种幼苗体内 K⁺、Na⁺ 和 Cl⁻ 分布及生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(12):3198-3205.
GUAN Zhi-yong, CHEN Fa-di, CHEN Su-mei, et al. Effects of NaCl stress on organ compartmental allocation of K⁺, Na⁺ and Cl⁻ and growth of two dendranthema species seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12):3198-3205.
- [29] Guerinet M L. The ZIP family of metal transporters[J]. *Biochim Biophys Acta*, 2000, 1465(1/2):190-198.
- [30] Lombi E, Tearall K L, Howarth J R, et al. Influence of iron status on cadmium and zinc uptake by different ecotypes of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant Physiol*, 2002, 128(4):1359-1367.
- [31] Bovet L, Rossi L, Lugon-Moulin N. Cadmium partitioning and gene expression studies in nicotiana tabacum and nicotiana rustica[J]. *Physiologia Plantarum*, 2006, 128(3):466-475.
- [32] Barberon M, Zelazny E, Robert S, et al. Monoubiquitin-dependent endocytosis of the Iron-Regulated Transporter 1 (IRT1) transporter controls iron uptake in plants[J]. *Proc Nat Acad Sci*, 2011, 108(32):450-458.
- [33] 陈艳芳, 李取生, 何宝燕, 等. 高/低 Cd 累积苋菜品种金属累积特性与关键转运基因表达的关系[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6):1041-1046.
CHEN Yan-fang, LI Qu-sheng, HE Bao-yan, et al. Metal accumulation and expressions of root two key transporter genes, HMA4 and IRT1, of high/low Cd-accumulation amaranth cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(6):1041-1046.