

DOI:10.11937/bfyy.201702045

农作物镉积累的品种差异及其机理研究进展

张 蕾¹, 吴隆坤², 李博骞¹, 吴 思¹, 王健欣¹

(1. 沈阳师范大学 生命科学学院, 辽宁 沈阳 110034; 2. 沈阳师范大学 粮食学院, 辽宁 沈阳 110034)

摘 要:我国土壤重金属污染严重,低积累品种的选育可以降低土壤重金属向人类食物链的转入风险,用于解决污染土壤上的食品安全生产问题。目前关于镉低积累品种筛选的研究包括水稻、大白菜、辣椒、花生、甘薯、向日葵和烟草等数 10 种农作物,不同品种的作物对镉表现出提取和在不同部位间的分配差异,并且可能影响营养元素的吸收。不同品种作物根系中的 Cd 离子吸收相关蛋白的表达、根系形态和根系分泌物都会影响作物对 Cd 的提取情况;植物输导组织的作用影响 Cd 在各部位的分配;在植物的不同亚细胞组分中镉含量不同,这可能与不同品种作物对 Cd 胁迫采取的适应策略不同有关。为了进一步促进镉低积累作物的选育工作,今后应加强应用研究。

关键词:低积累;镉排异型品种;机理研究;土壤污染;重金属污染

中图分类号:X 53 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)02-0184-07

2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》称,我国土壤环境状况总体不容乐观,部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧;在不同土地利用类型土壤中耕地的点位超标率最高,为 19.4%;在所有污染物中,镉(Cd)污染的点位超标率最高,为 7.0%;在 1 378 个污灌区土壤点位中,超标点位占 26.4%^[1]。由此农田的 Cd 污染问题尤为严重,直接危及我国的食品健康问题。对于土壤污染,物理和化学修复技术成本较高且环境友好性较差,植物修复周期较长,生物和纳米修复技术尚不成熟^[2],而且针对我国国情,不适宜停止所有农业活动进行土壤治理,应采用边修复边生产的方式,保障农产品安全和生态安全^[3]。转基因技术可以降低作物中重金属含量,但是由于其公众接受度很低,并不能被广泛地用于污染土壤的种植。近年来的研究发现同一物种的不同品种间存在着重金属积累量的差异,其中能够维持低重金属积累量的品种,以 Cd 为例,称为镉

低积累品种(low-Cd cultivars^[4]或 low Cd-accumulating cultivars^[5])或低镉表型(low cadmium phenotypes^[6]),其中使植物可食部分镉浓度低于食品卫生标准的品种称为镉排异型品种^[7](Cd excluders cultivars^[8]或 Cd excluding cultivars^[9])、污染安全品种^[10]或安全亲本材料^[11](Cd-safe cultivars^[12]或 pollution-safe cultivars^[13])。同一物种的不同品种可食部分 Cd 含量可差 10 倍以上,因此低积累品种的选育,一方面可以降低土壤重金属向人类食物链的转入风险,另一方面由于其可接受度和操作性都很强,可以被用于解决污染土壤上的食品安全生产问题^[14]。国内对低积累作物及机理研究方兴未艾,而发表于国内期刊上的文章并不多见,2016 年 7 月在中国知网采用“低积累品种”“排异品种”“污染安全品种”“安全亲本材料”主题词搜索到的文章仅有 67 篇,加上“机理”主题词后,搜索到的文章仅有 17 篇。故该研究将以 Cd 为例,对国内外有关 Cd 低积累作物的筛选及其机理的研究论文进行综述,以期使各位同行对相关方向的研究有更系统的了解,起到一定的借鉴作用。

1 作物镉积累的品种差异

作物对 Cd 的积累能力体现在 3 个方面:作物从土壤中提取 Cd 的能力即生物富集系数、作物将 Cd 从根部转运并分配到各个部位(其中最重要的是作

第一作者简介:张蕾(1984-),女,辽宁沈阳人,博士,讲师,现主要从事重金属污染控制等研究工作。E-mail:zhangleisynu@126.com

基金项目:国家自然科学基金青年资助项目(31600410);沈阳师范大学生态与环境研究中心主任基金资助项目(EERC-P-201502);沈阳师范大学校内资助项目(054-51500401)。

收稿日期:2016-09-27

物的可食部位)的能力即转运系数、Cd 积累与其它营养元素提取的关系。

1.1 作物对镉的提取能力差异

不同品种作物对 Cd 的提取差异因作物种类而异,针对部分作物进行部分代表性研究。由表 1 可知,不同品种作物间的可食部分 Cd 含量的最小差异仅为 0.38 倍^[15],最大差异可达 87 倍^[4]。除此之外,对镉积累品种差异进行研究的作物还有油菜^[16]、莴苣^[17]、芹菜^[18]、苋菜^[19]、番茄^[20]、向日葵^[21]、蓖麻^[22]和烟草^[23]等。

分析以上文献中研究品种数与品种间提取 Cd 的能力差异(即最高积累品种和最低积累品种之间的可食部分 Cd 含量差异倍数)发现,二者并无相关关系。同样,土壤 Cd 浓度升高,品种间提取 Cd 的能力差异也并不一定会提高。所以作物品种间积累

Cd 的能力差异主要与作物本身的种类有关,与研究品种数和土壤 Cd 浓度未发现显著相关性。

作物积累 Cd 的能力随生长阶段的不同表现出差异,不同品种间的 Cd 浓度差异也可能随生长期不同而异。张儒德等^[24]研究发现不同品种水稻茎叶 Cd 含量差异在生长前期较为明显,后期差异逐渐降低。这种差异同样也受土壤 Cd 浓度影响,但在不同的生长时期、土壤浓度组,“沈农 315”茎叶中 Cd 含量始终为最低浓度组之一。而 SUGIYAMA 等^[25]通过将 150 种大豆籽实中的 Cd 浓度与大豆幼苗中的 Cd 浓度对比分析,认为对于大豆,可以用苗期地上部分的 Cd 浓度来预测不同品种籽实中的 Cd 浓度,因此不需要等到收获期即可开展低积累品种的筛选。

作物积累 Cd 的能力也随土壤 Cd 浓度的变化而不同,即在低浓度时积累能力最低的品种,高浓度

表 1 作物镉积累的品种间差异的部分代表性数据
Table 1 Representative data of Cd-accumulation difference among varieties of different crops

| 物种 Species | 文献 Reference | 品种数 No. of the tested varieties | 收获时间 Harvest time | 土壤 Cd 浓度 Cd concentration in soil /(mg · kg ⁻¹) | 可食部分 Cd 浓度范围 Cd concentration in edible part /(mg · kg ⁻¹) | 根 Cd 浓度范围 Cd concentration in root /(mg · kg ⁻¹) |
|---------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------|---|--|--|
| 水稻 | SONG 等 ^[26] , 2015 | 20 | 成熟期 | 0.30 | 0.128~0.458 | 1.972~9.488 |
| | | 20 | 成熟期 | 0.60 | 0.226~0.806 | 4.706~20.197 |
| | ZHANG 等 ^[12] , 2014 | 146 | 成熟期 | 1.98 | 0.06~0.49 | 6.06~30.41 |
| | | 146 | 成熟期 | 8.99 | 0.11~1.00 | 107.66~640.58 |
| 玉米 | 陈建军等 ^[27] , 2014 | 25 | 成熟期 | 50.00 | 0.00~0.12 | 2.66~39.81 |
| 小麦 | SHI 等 ^[28] , 2015 | 12 | 成熟期 | 13.70 | 0.13~0.24 | 1.45~3.56 |
| 小白菜 | 陈瑛等 ^[29] , 2009 | 60 | 60 d | 0.60 | 0.021 1~0.055 5 ^a | |
| | | 60 | 60 d | 1.20 | 0.026 2~0.112 0 ^a | |
| | | 40 | 63 d | 1.00 | 0.37~1.15 | |
| 大白菜 | LIU 等 ^[9] , 2009 | 40 | 63 d | 2.50 | 1.74~4.98 | |
| | | 40 | 63 d | 5.00 | 2.03~8.83 | |
| 大葱 | LI 等 ^[30] , 2016 | 25 | 56 d | 2.50 | 0.18~0.41 | |
| | | 25 | 56 d | 5.00 | 0.26~0.61 | |
| 空心菜 | XIAO 等 ^[6] , 2015 | 32 | 78 d | 1.00(淹水) | 0.25~1.4 | 0.82~4.3 |
| | | 32 | 78 d | 1.00(非淹水) | 1.9~4.7 | 3.4~7.5 |
| | | 30 | 120 d | 0.28 | 0.07~0.23 | |
| 辣椒 | XIN 等 ^[31] , 2013 | 30 | 120 d | 1.16 | 0.39~1.23 | |
| | | 30 | 120 d | 2.69 | 1.32~3.28 | |
| | | 5 | 成熟期 | 0.15 | 0.05~0.11 | 0.16~0.20 |
| 大豆 | ZHI 等 ^[8] , 2015 | 5 | 成熟期 | 0.75 | 0.12~0.23 | 4.5~6.5 |
| | | 5 | 成熟期 | 1.12 | 0.19~0.57 | 4.3~7.1 |
| | SUGIYAMA 等 ^[25] , 2011 | 150 | 成熟期 | 0.50 | 0.054~0.234 | |
| 花生 | 杨志艺 ^[32] , 2010 | 15 | 成熟期 | 0.06 | 0.050~0.194 | |
| | | 15 | 成熟期 | 12.00 | 2.49~6.42 | |
| | | 30 | 成熟期 | 0.95 | 0.00~0.44 | |
| 甘薯 | HUANG 等 ^[4] , 2015 | 30 | 成熟期 | 1.67 | 0.01~0.87 | |
| | | 30 | 成熟期 | 2.91 | 0.33~2.65 | |
| 萝卜 | ZHENG 等 ^[15] , 2008 | 12 | 3 个月 | 3.60 | 0.60~1.64 ^b | 1.18~2.17 ^c |
| 胡萝卜 | ZHENG 等 ^[15] , 2008 | 10 | 3 个月 | 3.60 | 1.06~1.46 ^b | 0.74~0.96 ^c |

注:^a以鲜质量含量表示;^b表示主根中 Cd 浓度;^c表示地上部 Cd 浓度。

Notes:^acalculates with fresh weight;^b calculates Cd concentration in taproot;^c calculates Cd concentration in overground part.

时可能表现出并非最低的积累能力,在表1中列出的所有在不同浓度下研究的作物均表现出这种特性。但也有些品种在所有研究的土壤Cd浓度下,都保持着最低的积累能力,如在CHEN等^[33]的研究中,无论在对照组,还是添加 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 或 $2.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd的污染组,小白菜品种‘Aijiaoheiy333’都表现出了最低的镉积累能力。

1.2 作物对镉的运输和分配差异

重金属的转运系数可以被用来评价植物对重金属从根到地上部分或各个部位的转移能力,数值上等于植物转入部分重金属浓度与转出部分重金属浓度之比。不同品种对Cd在体内的转运能力不同,如在20种水稻品种中转运系数有很大变化,根到稻草,稻草到籽实中转运系数范围为 $0.342\sim 0.817$ 和 $0.366\sim 1.710$ ^[26]。LIU等^[34]对小麦的研究表明,在研究的30种小麦品种中,25种根到地上部分的转运系数小于1,即83.33%的品种中Cd更易分布在根部,其中有3个品种转运系数低至0.6以下。与此类似的,SHI等^[28]也认为Cd从土壤转移到小麦可食部分的第一道屏障是根,根到地上部分除第一、二节的其它节间部的转运系数为 $0.054\sim 0.150$,因品种不同而呈显著变化,之后的转移分别是:其它节间→第二节→第一节→花轴→谷壳→籽粒,其中花轴→谷壳、谷壳→籽粒的2个转移过程中,不同品种间的转运系数存在显著差异,而不同品种籽粒中的Cd浓度与总Cd含量和稻草向谷物中的转运系数相关。在HUANG等^[4]对甘薯的研究中更能体现该结论,研究从30种甘薯的筛选中得到4种高Cd品种和4种低Cd品种,高Cd品种食用根/地上部分和食用根/饲养根中Cd浓度的比例都显著高于低Cd品种,而地上部分/饲养根中Cd浓度比例与食用根中Cd浓度无相关性。相当一部分研究证实了与根系的吸收能力相比,植物可食部分的Cd含量在更大程度上取决于Cd在植物体内的分配^[35-37],对于Cd低积累品种,吸收的Cd主要积累在作物根部,而且这种差异在苗期更显著^[35,38]。但也有研究认为植物可食部分Cd含量与根系Cd浓度和地上部分Cd浓度相关,而与转运系数无关^[39]。

不同品种的重金属转运系数同样也受土壤Cd浓度的影响,且受土壤Cd浓度影响趋势不同。有些品种在土壤重金属浓度较高时,转运系数增大,有些品种在土壤重金属浓度升高时,转运系数降低,而也有品种在各浓度重金属胁迫下,转运系数并无显著差异^[26]。

1.3 镉积累与营养元素积累的关系

不同品种的农作物中除镉积累量不同,其体内的其它营养元素也可能受Cd互作态的影响而显著发生变化。如LI等^[30]研究表明,在大葱假茎和叶中Cd含量和营养元素如P、K、Ca、Mg、Fe、Zn、Cu和Mn等呈显著的正相关关系。而在大豆中,土壤的高Cd浓度抑制了大豆提取Mn的能力,而促进了大豆对Fe和Zn的吸收^[8]。在类似结论基础上,SUGIYAMA等^[25]认为可以利用大豆幼苗中Cd/Zn浓度比预测大豆籽实中的Cd含量。

2 不同品种作物镉积累的机理研究

不同的植物采用2种策略抵御高浓度重金属胁迫:第一种是排除策略,即植物通过降低重金属生物有效性或降低金属摄取转运蛋白的表达避免重金属进入根部或地上部分。第二种是耐受策略,通过对重金属的限制或解毒作用实现,通常植物对重金属除有耐受机制之外还具备富集特性^[40],采用耐受策略的植物又可以分为2类,第一类将Cd富集在根部,第二类优先将Cd富集在地上部分,这2种类型都同时具有对重金属的高耐受性和积累性。总之植物对重金属的耐受和/或积累作用是植物对重金属污染土壤的生理生态适应性的表现^[41-42]。故不同品种作物镉积累和转运的差异也可能是由于不同品种采用不同的适应策略,而Cd的提取和分配受一系列复杂因子在分子、组织和整株水平上的影响^[35]。

2.1 根的作用

植物根对Cd的提取存在着饱和和动力学,这种Cd的饱和特征受载体调控着^[43],很多二价过渡金属的转运蛋白都具有对Cd离子的提取能力^[40],如根中调控Cd吸收的载体包括Fe转运蛋白O₂IRT1、O₂IRT2^[44]和NrPIC1^[45]及Zn或Mn转运蛋白^[46-47],除此之外一些天然抗性相关巨噬细胞蛋白(resistance-associated macrophage protein,简称Nramp)也能调控Cd的转运,如AtNramp1、AtNramp3和AtNramp4等^[40],这些蛋白的表达能因不同品种而异,过量表达的品种可能会提取更多的Cd^[48]。

根系分泌低分子量有机酸的差别也是不同品种作物提取Cd差异的机制之一,如LIU等^[49]研究发现,在不同浓度Cd污染土壤中,水稻高积累品种根系土壤中的低分子量有机酸都高于低积累品种根际土壤中的含量。XIN等^[50]研究发现,虽然高低积累辣椒根际土壤中可交换态Cd含量无显著差异,根系分泌的低分子量有机酸总量也几乎相等,但低分子量有机酸的组成不同,其中一些成分,如酒石酸、乙

酸和草酸类等,可能对辣椒提取 Cd 起到很重要的作用。

Cd 提取与根系形态的关系方面,不同的研究得出不同的结论。小白菜的总 Cd 含量和地上部分 Cd 浓度都与根长、根表面积和根长/根生物量比值呈正相关关系^[51],对花生的研究也表明高积累品种的根系较发达^[52],而对玉米、大豆幼苗的研究表明,重金属的提取与根系结构无关^[21,53]。

2.2 植物输导组织的作用

输导组织是植物体中担负物质长途运输的主要组织,分为木质部和韧皮部。在被子植物中,木质部中的导管和韧皮部中的筛管起主要作用。通过木质部的转运过程对于 Cd 从根系到地上部分的转运过程非常重要^[54]。研究发现水稻木质部液汁中的 Cd 浓度与地上部分 Cd 含量呈现强正相关关系($r = 0.98$)^[55],同时通过木质部也可以实现块茎状根作物供养根向食用根 Cd 的转入。但 Cd 通过地上部分转移到食用根,可能是通过韧皮部^[4],韧皮部可能对低蒸腾速率组织(如籽粒、水果、块茎)中的 Cd 含量起到主要作用。在水稻中,由于花梗切断了木质部的连续性,Cd 最主要是通过韧皮部积累在籽粒中^[56],TANAKA 等^[57]估计在用 $1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cd 水培时,水稻籽粒中 91%~100% 的 Cd 来自韧皮部的转入。此外,即使是在受蒸腾作用影响的组织中,韧皮部对 Cd 的运输也起一定作用,放射性同位素分析显示,部分 Cd 从根转移到茎就可以迅速地从木质部转移到韧皮部^[58],所以即使是在高蒸腾速率组织,韧皮部中的 Cd 以植物螯合态 Cd 或谷胱甘肽 Cd 存在^[59],也能帮助长距离转运 Cd,而且在某些作物(如茄子^[60]、油菜^[59]等)的 Cd 从根向地上部分的运输中起决定性作用。

对于油菜^[16]、辣椒^[61]和硬质小麦^[62]等的研究均表明高/低积累品种地上部分的 Cd 含量的差异主要来自于木质部对 Cd 的转运,而非根对土壤中 Cd 的提取。Cd 传输到地上部分需要从根系共质体或质外体被主动运输进入到木质部^[63],根系液泡对 Cd 的区隔程度控制着 Cd 从共质体进入木质部的过程^[64],一些金属转运蛋白如 $\text{P}_{1\text{B}}\text{-ATPase}$ (可称为重金属 ATP 酶^[65])中的 OsHMA2、OsHMA3、AtHMA2 和 AtHMA4 等能将 Cd 从植物根系中泵出^[48],载入木质部,输送到植物地上部分。这些转运蛋白除帮助转运 Cd 外,在无 Cd 胁迫的环境中主要用于转运其它营养元素,如 OsHMA2 存在于植物根部的维管束中,可同时帮助运载 Cd 和 Zn 进入木质部。所以

在 OsHMA2 表达被抑制的水稻叶片中,Zn 和 Cd 浓度就会降低^[66],同样木质部中 Fe 的转运蛋白也能调节植物中的 Cd 浓度^[20,61],影响不同品种对 Cd 的积累。

而水稻中低亲和性阳离子转运蛋白 1(oslct1)有助于 Cd 从薄壁细胞载入筛管^[67],在生殖期,其在叶片和节中的表达非常强烈,在限制 oslct1 表达的水稻中,籽粒中 Cd 浓度降低一半,且其它元素的吸收和转运未被限制,因此 oslct1 表达较弱的品种即可作为低 Cd 品种^[68]。Cd 由叶片和茎的木质部向韧皮部的转移不仅对谷类作物籽粒中的镉积累十分重要,对块茎^[37]和其它作物果实^[69]中 Cd 浓度的影响也见报道,且影响了不同品种作物食用部分中的镉积累量。

2.3 亚细胞含量分布

在植物的不同亚细胞组分,Cd 含量不同。细胞器和热变性蛋白(heat denatured protein,HDP),被认为是重金属敏感组分(metal-sensitive fractions,MSF),金属富集微粒(metal-rich granule,MRG)和热稳定蛋白(heat stable protein,HSP)被认为是重金属生物脱毒(biologically detoxified metal,BDM)组分。研究发现对于蓖麻,Cd 主要富集在热稳定蛋白和细胞碎片部分,然后是金属富集微粒、热变性蛋白和细胞器。对 Cd 高积累品种,在幼叶的 MRG、细胞碎片、HSP 中的 Cd 含量和老叶 HSP 中 Cd 含量显著高于 Cd 低积累品种,即 Cd 高积累品种主要将 Cd 富集在生物脱毒组分,而降低了其生物活性和毒性^[22]。

植物的亚细胞组分对植物的转运系数也有显著影响。对水稻的研究表明,在根系的各亚细胞组分中,可溶性组分对 Cd 的转移起主要作用,而细胞壁对 Cd 在根系中的沉积过程起主要作用,并限制了根到籽粒中的转移,所以根中 Cd 的亚细胞分布是 Cd 在不同品种水稻中的转移和积累能力不同的主要机理^[36]。在对豆瓣菜^[70]、辣椒^[61]和小白菜^[71]等的研究中也得到类似的结论,认为叶中细胞壁对 Cd 的固定是高积累作物限制 Cd 的移动并解毒的主要机制。

3 展望

传统的修复方法无法环境友好又高效地解决土壤重金属污染问题,低积累品种的筛选和应用是目前重金属污染土壤上食品安全问题的有效解决途径。为了进一步促进 Cd 低积累作物的筛选和应用工作,今后应加强以下 2 个方面的研究。一是开展 Cd 低积累作物的早期筛选研究。根据作物 Cd 含量可能与基因表达、其它金属元素的含量及植物蒸腾

作用等因素相关,构建不需要一个生产周期即可筛选出 Cd 低积累作物品种的方法。针对日益增多的作物品种,Cd 低积累作物品种的早期筛选更为重要,可更加省时高效地指导农民选用最新投入市场的 Cd 低积累作物品种。二是进一步加深机理研究与应用研究间的联系。例如,机理研究中发现低分子量有机酸和根系形态可以影响作物对 Cd 的吸收,蒸腾作用影响作物向地上部分的转运,植物对 Cd 的耐受策略可能导致作物生物量较大但 Cd 浓度增加。因此,可以通过采用人为地改变这些因素以调控作物对 Cd 和营养元素的吸收,或筛选对 Cd 采取耐受适应策略且将 Cd 限制在非可食部位的作物等方法,保障作物的安全高效生产。

参考文献

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014.
- [2] SINGH A, PRASAD S M. Remediation of heavy metal contaminated ecosystem; an overview on technology advancement[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, 12(1): 253-266.
- [3] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009 (Z1): 558-565.
- [4] HUANG B, XIN J, DAI H, et al. Identification of low-Cd cultivars of sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) after growing on Cd-contaminated soil: uptake and partitioning to the edible roots[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(15): 11813-11821.
- [5] XIAO Q, WONG M H, HUANG L, et al. Effects of cultivars and water management on cadmium accumulation in water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) [J]. Plant and Soil, 2015, 391(1): 33-49.
- [6] LI Y-M, CHANEY R L, SCHNEITER A A, et al. Screening for low grain cadmium phenotypes in sunflower, durum wheat and flax[J]. Euphytica, 1997, 94(1): 23-30.
- [7] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. 农业环境科学学报, 2012(7): 1257-1263.
- [8] ZHI Y, HE K, SUN T, et al. Assessment of potential soybean cadmium excluder cultivars at different concentrations of Cd in soils[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 35: 108-114.
- [9] LIU W, ZHOU Q, SUN Y, et al. Identification of Chinese cabbage genotypes with low cadmium accumulation for food safety[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(6): 1961-1967.
- [10] 刘维涛, 周启星. 重金属污染预防品种的筛选与培育[J]. 生态环境学报, 2010(6): 1452-1458.
- [11] 张路. 水稻镉安全亲本材料对镉的吸收、转运及积累特征[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [12] ZHANG H, ZHANG X, LI T, et al. Variation of cadmium uptake, translocation among rice lines and detecting for potential cadmium-safe cultivars[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(1): 277-286.
- [13] LIU W, ZHOU Q, ZHANG Y, et al. Lead accumulation in different Chinese cabbage cultivars and screening for pollution-safe cultivars[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(3): 781-788.
- [14] HU Y, CHENG H, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review[J]. Environment International, 2016, 92-93: 515-532.
- [15] ZHENG R L, LI H F, JIANG R F, et al. Cadmium accumulation in the edible parts of different cultivars of radish, *Raphanus sativus* L., and carrot, *Daucus carota* var. *sativa*, grown in a Cd-contaminated soil[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 81(1): 75-79.
- [16] WU Z, ZHAO X, SUN X, et al. Xylem transport and gene expression play decisive roles in cadmium accumulation in shoots of two oilseed rape cultivars (*Brassica napus*) [J]. Chemosphere, 2015, 119: 1217-1223.
- [17] GARATE A, RAMOS I, MANZANARES M, et al. Cadmium uptake and distribution in three cultivars of *Lactuca* sp [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1993, 50(5): 709-716.
- [18] ZHANG K, WANG J, YANG Z, et al. Genotype variations in accumulation of cadmium and lead in celery (*Apium graveolens* L.) and screening for low Cd and Pb accumulative cultivars[J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2013, 7(1): 85-96.
- [19] ZHOU Y, XUE M, YANG Z, et al. High cadmium pollution risk on vegetable amaranth and a selection for pollution-safe cultivars to lower the risk[J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2013, 7(2): 219-230.
- [20] HARTKE S, DA SILVA A A, de MORAES M G. Cadmium accumulation in tomato cultivars and its effect on expression of metal transport-related genes[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2013, 90(2): 227-232.
- [21] LAPORTE M-A, STERCKEMAN T, DAUGUET S, et al. Variability in cadmium and zinc shoot concentration in 14 cultivars of sunflower (*Helianthus annuus* L.) as related to metal uptake and partitioning [J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 109: 45-53.
- [22] ZHANG H, GUO Q, YANG J, et al. Subcellular cadmium distribution and antioxidant enzymatic activities in the leaves of two castor (*Ricinus communis* L.) cultivars exhibit differences in Cd accumulation [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 120: 184-192.
- [23] SALVIANO A M, FONTES R L F, FONTES P C R, et al. Plant growth and cadmium distribution in plants of Brazilian tobacco cultivars as affected by cadmium in nutrient solution[M]. Plant Nutrition Springer Netherlands, 2001: 472-473.
- [24] 张儒德, 李军, 秦利, 等. 辽宁省 5 种不同基因型水稻对镉吸收差异的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016(5): 842-849.
- [25] SUGIYAMA M, AE N, HAJIKA M. Developing of a simple method for screening soybean seedling cadmium accumulation to select soybean genotypes with low seed cadmium[J]. Plant and Soil, 2011, 341(1): 413-422.
- [26] SONG W E, CHEN S B, LIU J F, et al. Variation of Cd concentration in various rice cultivars and derivation of cadmium toxicity thresholds for paddy soil by species-sensitivity distribution[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(9): 1845-1854.
- [27] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米 *Zea mays* 对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014(10): 1671-1676.
- [28] SHI G L, ZHU S, BAI S N, et al. The transportation and accumulation of arsenic, cadmium, and phosphorus in 12 wheat cultivars and their relationships with each other[J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 299: 94-102.

- [29] 陈瑛,李廷强,杨肖娥,等.不同品种小白菜对镉的吸收积累差异[J].应用生态学报,2009(3):736-740.
- [30] LI X,ZHOU Q,SUN X,et al. Effects of cadmium on uptake and translocation of nutrient elements in different welsh onion (*Allium fistulosum* L.) cultivars[J]. Food Chemistry,2016,194:101-110.
- [31] XIN J,HUANG B,LIU A,et al. Identification of hot pepper cultivars containing low Cd levels after growing on contaminated soil: uptake and redistribution to the edible plant parts[J]. Plant and Soil,2013,373(1):415-425.
- [32] 杨志艺. 镉处理对花生品质、生理机制和金属硫蛋白Ⅱ型基因表达的影响[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.
- [33] CHEN Y,LI T Q,HAN X,et al. Cadmium accumulation in different pakchoi cultivars and screening for pollution-safe cultivars[J]. Journal of Zhejiang University Science B,2012,13(6):494-502.
- [34] LIU W,LIANG L,ZHANG X,et al. Cultivar variations in cadmium and lead accumulation and distribution among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. Environmental Science and Pollution Research,2015,22(11):8432-8441.
- [35] HARRIS N S,TAYLOR G J. Cadmium uptake and partitioning in durum wheat during grain filling[J]. BMC Plant Biology,2013,13(1):1-16.
- [36] LIU J G,QU P,ZHANG W,et al. Variations among rice cultivars in subcellular distribution of Cd: The relationship between translocation and grain accumulation[J]. Environmental and Experimental Botany,2014,107:25-31.
- [37] DUNBAR K R,MCLAUGHLIN M J,REID R J. The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.)[J]. Journal of Experimental Botany,2003,54(381):349-354.
- [38] GREGER M,LÖFSTEDT M. Comparison of uptake and distribution of cadmium in different cultivars of bread and durum wheat[J]. Crop Science,2004,44(2):501-507.
- [39] YAN Y F,CHOI D H,KIM D S,et al. Genotypic variation of cadmium accumulation and distribution in rice[J]. Journal of Crop Science and Biotechnology,2010,13(2):69-73.
- [40] URAGUCHI S,FUJIWARA T. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. Rice,2012,5(1):1-8.
- [41] LIN Y F,AARTS M G M. The molecular mechanism of zinc and cadmium stress response in plants[J]. Cellular and Molecular Life Sciences,2012,69(19):3187-3206.
- [42] BELIMOV A A,PUHALSKY I V,SAFRONOVA V I,et al. Role of plant genotype and soil conditions in symbiotic plant-microbe interactions for adaptation of plants to cadmium-polluted soils[J]. Water, Air, and Soil Pollution,2015,226(8):1-15.
- [43] ISHIKAWA S,SUZUI N,ITO-TANABATA S,et al. Real-time imaging and analysis of differences in cadmium dynamics in rice cultivars (*Oryza sativa*) using positron-emitting ^{109}Cd tracer[J]. BMC Plant Biology,2011,11(1):1-12.
- [44] NAKANISHI H,OGAWA I,ISHIMARU Y,et al. Iron deficiency enhances cadmium uptake and translocation mediated by the Fe^{2+} transporters *OsIRT1* and *OsIRT2* in rice[J]. Soil Science and Plant Nutrition,2006,52(4):464-469.
- [45] GONG X,YIN L,CHEN J,et al. Overexpression of the iron transporter *NtPIC1* in tobacco mediates tolerance to cadmium[J]. Plant Cell Reports,2015,34(11):1963-1973.
- [46] RAMESH S A,SHIN R,EIDE D J,et al. Differential metal selectivity and gene expression of two zinc transporters from rice[J]. Risk Management and Insurance Review,2003,10(1):93-105.
- [47] CHANEY R L. How does contamination of rice soils with Cd and Zn cause high incidence of human Cd disease in subsistence rice farmers[J]. Current Pollution Reports,2015,1(1):13-22.
- [48] LEE S,GYNHEUNG A N. Over-expression of *OsIRT1* leads to increased iron and zinc accumulations in rice[J]. Plant Cell and Environment,2009,32(4):408-416.
- [49] LIU J,QIAN M,CAI G,et al. Variations between rice cultivars in root secretion of organic acids and the relationship with plant cadmium uptake[J]. Environmental Geochemistry and Health,2007,29(3):189-195.
- [50] XIN J,HUANG B,DAI H,et al. Roles of rhizosphere and root-derived organic acids in Cd accumulation by two hot pepper cultivars[J]. Environmental Science and Pollution Research,2015,22(8):6254-6261.
- [51] XIA S,DENG R,ZHANG Z,et al. Variations in the accumulation and translocation of cadmium among pak choi cultivars as related to root morphology[J]. Environmental Science and Pollution Research,2016,23(10):9832-9842.
- [52] ZHANG Z,LIU C,WANG X,et al. Cadmium-induced alterations in morpho-physiology of two peanut cultivars differing in cadmium accumulation[J]. Acta Physiologiae Plantarum,2013,35(7):2105-2112.
- [53] WANG P,DENG X,HUANG Y,et al. Root morphological responses of five soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivars to cadmium stress at young seedlings[J]. Environmental Science and Pollution Research,2016,23(2):1860-1872.
- [54] FONTANILI L,LANCILLI C,SUZUI N,et al. Kinetic analysis of zinc/cadmium reciprocal competitions suggests a possible Zn-insensitive pathway for root-to-shoot cadmium translocation in rice[J]. Rice,2016,9(1):1-13.
- [55] URAGUCHI S,MORI S,KURAMATA M,et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany,2009,60(9):2677-2688.
- [56] 仲晓春,陈京都,郝心宁. 水稻作物对重金属镉的积累、耐性机理以及栽培调控措施进展[J]. 中国农学通报,2015(36):1-5.
- [57] TANAKA K,FUJIMAKI S,FUJIWARA T,et al. Quantitative estimation of the contribution of the phloem in cadmium transport to grains in rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. Soil Science and Plant Nutrition,2007,61(4):232.
- [58] KOBAYASHI N I,TANOI K,HIROSE A,et al. Characterization of rapid intervascular transport of cadmium in rice stem by radioisotope imaging[J]. Journal of Experimental Botany,2013,64(2):507-517.
- [59] MENDOZA-CÓZATL D G,BUTKO E,SPRINGER F,et al. Identification of high levels of phytochelators, glutathione and cadmium in the phloem sap of *Brassica napus*. A role for thiol-peptides in the long-distance transport of cadmium and the effect of cadmium on iron translocation[J]. Plant Journal,2008,54(2):249-59.
- [60] QIN Q,LI X,ZHUANG J,et al. Long-distance transport of cadmium from roots to leaves of *Solanum melongena* [J]. Ecotoxicology,2015,24

- (10);2224-2232.
- [61] XIN J, HUANG B, DAI H, et al. Characterization of cadmium uptake, translocation, and distribution in young seedlings of two hot pepper cultivars that differ in fruit cadmium concentration[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(12):7449-7456.
- [62] HARRIS N S, TAYLOR G J. Cadmium uptake and translocation in seedlings of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation[J]. BMC Plant Biology, 2004, 4(1):1-12.
- [63] 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.
- [64] LANCILLI C A M, DENDENA B, SACCHI G A, et al. Cadmium retention capacity in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation[J]. Plant, Cell and Environment, 2011, 34(6):994-1008.
- [65] 张玉秀, 张媛雅, 孙涛, 等. 植物重金属转运蛋白 P₁(1B)-ATPase 结构和功能研究进展[J]. 生物工程学报, 2010(6):715-725.
- [66] TAKAHASHI R, ISHIMARU Y, SHIMO H, et al. The OsHMA2 transporter is involved in root-to-shoot translocation of Zn and Cd in rice[J]. Plant Cell and Environment, 2012, 35(11):1948-1957.
- [67] URAGUCHI S, FUJIWARA T. Rice breaks ground for cadmium-free cereals[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2013, 16(3):328-334.
- [68] URAGUCHI S, KAMIYA T, SAKAMOTO T, et al. Low-affinity cation transporter (*OsLCT1*) regulates cadmium transport into rice grains[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(52):20959-20964.
- [69] XIN J, HUANG B, DAI H. Difference in root-to-shoot Cd translocation and characterization of Cd accumulation during fruit development in two *Capsicum annuum* cultivars[J]. Plant and Soil, 2015, 394(1):287-300.
- [70] WANG J, SU L, YANG J, et al. Comparisons of cadmium subcellular distribution and chemical forms between low-Cd and high-Cd accumulation genotypes of watercress (*Nasturtium officinale* L. R. Br.) [J]. Plant and Soil, 2015, 396(1):325-337.
- [71] XUE M, ZHOU Y, YANG Z, et al. Comparisons in subcellular and biochemical behaviors of cadmium between low-Cd and high-Cd accumulation cultivars of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2014, 8(2):226-238.

Research Progress on Difference of Cd Accumulating Pattern and Its Mechanism Among Crop Varieties

ZHANG Lei¹, WU Longkun², LI Boqian¹, WU Si¹, WANG Jianxin¹

(1. College of Life Science, Shenyang Normal University, Shenyang, Liaoning 110034; 2. College of Grain Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang, Liaoning 110034)

Abstract: Heavy metal pollution has become a serious environmental and health problem. Selection and breeding of low cadmium cultivars has been used to minimize the influx of cadmium(Cd) into the human food chain, and thus help solve food security problems. Currently researches of low-Cd-cultivars selection included those of dozens kinds of crops, such as rice, cabbage, peppers, peanuts, sweet potatoes, sunflower and tobacco. Extraction from soil and distribution in different parts was distinct in different cultivars, and meanwhile Cd in crops might affect the absorption of nutrient. Expression of Cd uptake-associated protein, root morphology and root exudates affected Cd extraction in different cultivars. Conducting tissue played an important role in Cd distribution in different part of crops. Subcellular cadmium distribution in cultivars was varified, and might be related to the different strategies of different cultivars to withstand Cd stress. For further selection and breeding of low Cd cultivars, application study should be further strengthened in future research.

Keywords: low accumulation; Cd excluders cultivars; mechanism research; soil pollution; metal pollution