

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, 35(5): 842-849.

ZHANG Ru-de, LI Jun, QIN Li, et al. Study on the difference of cadmium absorption in five rice genotypes of Liaoning Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5): 842-849.

辽宁省 5 种不同基因型水稻对镉吸收差异的研究

张儒德¹, 李 军¹, 秦 利², 韩 颖¹, 孟 博¹, 黄元财^{3*}

(1.沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2.沈阳农业大学生物科学技术学院, 沈阳 110866; 3.沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866)

摘要:为对耐镉性强且低积累水稻品种的培育提供理论实践依据,在土壤外源添加镉的条件下,采用盆栽试验研究了辽宁省 5 个不同基因型水稻根系、茎叶、籽粒对镉吸收积累的差异,通过对分蘖期、抽穗期镉在茎叶各亚细胞组分含量的分析,探讨了产生差异的机理。结果表明,水稻各部位镉含量随外源添加镉浓度的增加而升高且存在显著的基因型差异。不同基因型水稻籽粒镉富集系数存在显著的差异,且随添加镉浓度的升高,籽粒镉富集系数有下降趋势,5 个品种富集系数相对较高的是沈稻 47 和辽粳 9 号,相对较低的是辽星 1 号、沈农 15 和沈农 315,其中沈农 315 在各处理下均最低,与其他品种存在极显著差异。随着水稻生长发育,抽穗期镉在茎叶亚细胞各组分的含量低于分蘖期,且总体呈现细胞壁最大,可溶性部分次之,细胞器最小的规律;镉在各亚细胞组分的含量和分配比例因基因型和生育期不同而异,镉耐性品种辽星 1 号、沈农 15 和沈农 315 细胞壁和可溶性组分的镉含量和分配比例高于敏感性品种沈稻 47 和辽粳 9 号,细胞器的镉含量则低于敏感性品种。

关键词: 镉; 基因型; 水稻; 生育时期; 吸收; 亚细胞分布

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)05-0842-08 doi:10.11654/jaes.2016.05.004

Study on the difference of cadmium absorption in five rice genotypes of Liaoning Province

ZHANG Ru-de¹, LI Jun¹, QIN Li², HAN Ying¹, MENG Bo¹, HUANG Yuan-cai^{3*}

(1.College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2.College of Bioscience and Technology, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3.College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to provide theoretical and practical basis for breeding rice varieties with high tolerance to cadmium and low accumulation, a pot experiment was conducted with five rice genotypes of Liaoning Province under soil exogenous cadmium added conditions. The cadmium accumulation in different parts of rice plant were investigated, meanwhile the contents and distribution in subcellular fractions of rice were analyzed to further reveal the mechanism. Results showed that, the cadmium content in each part of rice was increased with increasing cadmium amount and the differences were significant; there were significant differences in cadmium accumulation coefficients in grain of rice genotypes, there was a downward tendency of the cadmium accumulation coefficient with increasing cadmium amount, among which Shendao 47 and Liaojing 9 were relatively high, while Liaoxing 1, Shennong 15 and Shennong 315 were low, and Shennong 315 was the lowest under all treatments; the cadmium content in subcellular fractions of stem and leaf at heading stage was lower than that at tillering stage, the cell wall was the largest, the soluble part was the second, and the organelle is the smallest. The content and distribution proportion in subcellular fractions of rice were different among genotypes and growing stages, cadmium content and distribution proportion in the cell wall and soluble part of cadmium tolerance rice variety Liaoxing 1, Shennong 15 and Shennong 315 were higher than those of sensitive varieties Shendao 47 and Liaojing 9, organelles were lower than sensitive varieties.

Keywords: cadmium; genotype; rice; growth stage; absorption; subcellular distribution

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 2012 年辽宁省科学研究一般项目(L2012241)

作者简介: 张儒德(1990—), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 从事重金属污染土壤修复研究。E-mail: rude9054@163.com

* 通信作者: 黄元财(1974—), 男, 博士, 讲师, 主要从事水稻栽培生理研究。E-mail: hyc001@163.com

镉(Cd)是生物毒性很强的重金属元素,土壤镉污染在世界范围内广泛存在并日益严重,我国受镉污染的土地面积已超 28 万 hm^2 ,其中大部分属中轻度污染^[1]。如何合理利用中轻度镉污染土壤,降低镉在作物体内的含量是目前的研究热点。农田系统中的镉主要来自大气沉降、污水灌溉、工矿业废渣、农用化学投入品等,辽宁作为重工业基地,也存在这方面问题,例如沈阳张士污灌区,就有约三分之一农田土壤受到重金属污染,有待修复^[2-3]。近年来大量研究表明,不同类型作物及同一作物的不同基因型品种对重金属的吸收、积累存在显著的差异,筛选种植低镉积累作物,配合合理的钝化改良措施是降低重金属在作物体内积累的重要措施^[4]。但有关作物镉低积累的机理和影响因素尚不十分清楚。同时也有研究表明在微观层次上研究重金属的亚细胞分布,即重金属在各细胞组分的含量,有利于阐述重金属在植物体内的耐性和迁移机理。

近年来,由于镉污染引起的稻米中镉含量超标问题已成为我国亟待解决的环境问题之一。徐燕玲等^[5]认为在低污染水平土壤上,水稻对镉的累积品种间存在一定的稳定性,而水稻类型间镉含量没有显著差异,因此应针对品种来筛选并对筛选出来的稳定的品种进行重点研究。刘侯俊等^[6]以东北广泛种植的 32 种水稻为例进行盆栽试验,结果显示不同水稻品种间镉的吸收积累特性存在明显差异。本试验在前人研究的基础上,通过盆栽试验,选取辽宁省广泛种植且性状稳定的 5 个品种^[7],研究不同浓度镉胁迫下不同基因型水稻对镉的吸收和积累差异,并采用差速离心技术分离出不同水稻亚细胞组分,对各组分镉的含量进行测定与分析,进而探讨产生差异的机理,为培育耐镉性强且低积累的水稻品种和能够在生产实践中合理利用中轻度镉污染土壤提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试水稻

试验以 5 个粳稻品种辽星 1 号、沈稻 47、辽粳 9 号、沈农 315 和沈农 15 为试材。

1.2 供试土壤

土壤采集自沈阳农业大学农学院水稻试验基地耕层常用水稻土,采样深度 0~20 cm。土样风干后过 2.00 mm 筛,用于种植水稻。取部分土样磨碎后,分别过 1.00 mm 和 0.25 mm 尼龙筛,用于测定土壤基本性质。采用常规方法^[8],测定结果见表 1。

1.3 试验设计

试验采用室外盆栽,采用内径 20 cm、高 25 cm 的塑料盆,每盆装入过 2.00 mm 筛的风干土 4.00 kg,施 $\text{N}[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ 0.10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{K}_2\text{O}[\text{K}_2\text{SO}_4]$ 0.10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{P}_2\text{O}_5[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2]$ 0.10 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,基肥以粉末形式混匀搅拌入土,确保土肥均匀混合。设置 4 个镉浓度处理: Cd0 (0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cd1 (2.50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cd2 (5.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 Cd3 (7.50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),各处理均重复 3 次。将 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 与去离子水配成母液,逐级稀释后与土壤充分混合并进行淹水使之达到平衡。经消毒、催芽、砂培 20 d (三叶期)后,将水稻幼苗移栽至盆,每盆一穴 2 株,全生育期参照大田高产栽培技术管理。

1.4 测定方法

1.4.1 水稻生长期植株各部位镉含量的测定

在水稻生长分蘖期、抽穗期和成熟期分别采样。用水枪将根系与土壤冲离、洗净,用蒸馏水再冲洗 3 遍,吸水纸吸干,连同地上部于 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 20 min,之后降到 70 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重,称重后装袋。将根、茎、叶、穗分别称重。取水稻籽粒并称重,脱壳后,将水稻根、茎、叶、精米粉碎,过 0.25 mm 尼龙筛。称取植株各部位样品,加硝酸和混酸 ($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=87:13$),消煮直至澄清,静置冷却后定容过滤,用等离子发射光谱仪 ICP-OES (VISTA-MPX, USA) 测定镉的含量。

1.4.2 水稻体内镉的亚细胞含量测定

分别于分蘖期、抽穗期取鲜样茎、叶各 1.00 g,加入 10.00 mL Tris-HCl 缓冲液 (0.154 g DTT, 0.25 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 蔗糖溶液, pH 7.40, 液料比 1:10) 冰浴迅速研磨成匀浆后,采用差速分级离心技术分离出根、茎和叶各细胞组分,参照 Weigel 等^[9]和 Rathore 等^[10]研究方法建立的亚细胞分级方法,将离心管置于低速离心机上,于 1000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速下离心 10 min,移出

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of soil used in the experiment

pH 值	有机质 Organic matter/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 Alkalic resolvable nitrogen/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 (P_2O_5) Available phosphorus/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 (K_2O) Available potassium/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 Total nitrogen/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 Total phosphorus/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾 Total potassium/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全镉 Total cadmium/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
6.83	25.21	85.00	10.26	66.51	1.18	0.38	12.61	0.58

上层清液,剩余为细胞壁部分;将分离出的上清液置于超速低温离心机,在 $12\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速下离心 $45\ \text{min}$,再次移出上层清液,下层为细胞器部分;二次离心取得上层清液为可溶性部分^[11]。以 $1:4(V/V)$ 的 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮对样品进行处理,用 ICP-OES (VISTA-MPX,USA)测定 Cd 的含量。

1.5 统计分析

籽粒富集系数=籽粒镉含量/土壤镉含量

所有数据均采用 3 次重复的平均值 \pm 标准偏差来表示,采用 SPSS19.0 在 95%和 99%的置信区间进行处理间差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同基因型水稻各部位镉含量

2.1.1 茎叶镉含量随生育时期的变化

从图 1 可以看出,茎叶镉含量随水稻的生长发育而逐渐降低,即分蘖期>抽穗期>成熟期。不同基因型水稻茎叶镉含量不同,因处理浓度和生育时期而异,生长前期较为明显,后期差异逐渐降低。Cd0 处理下分蘖期,辽星 1 号和沈农 315 呈极显著差异,沈农 15 和沈农 315 呈显著差异;在抽穗期,辽星 1 号和沈农 315 呈极显著差异,沈农 15 和沈农 315 呈极显著差异;成熟期辽星 1 号、沈农 15 和沈农 315 三者间无显著差异。Cd1 处理下分蘖期和抽穗期,辽星 1 号和沈农 15、沈农 315 均存在显著差异,成熟期辽星 1 号、沈农 15 和沈农 315 三者间无显著差异。由图 1 还可看出,相比未添加镉情况,Cd1 处理下水稻茎叶镉含量增加。沈稻 47 和辽梗 9 号茎叶镉含量在各处理下

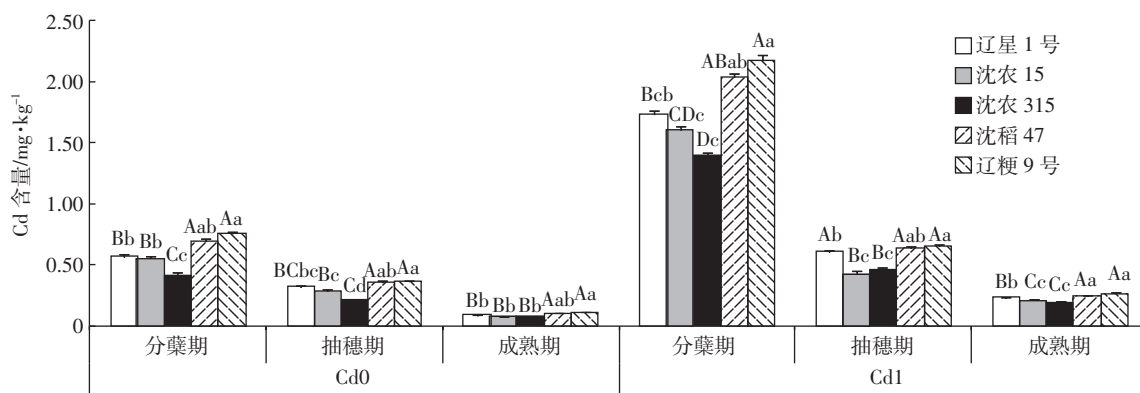
以及各生育时期均较高,说明二者对镉具有较强的吸收能力,而沈农 315 在各处理下以及各生育时期镉含量均最低,其对镉的吸收能力最弱。

2.1.2 成熟期各部位镉含量随外源添加镉浓度的变化

籽粒对镉的吸收因基因型和外源添加镉浓度不同而异,从而表现出不同基因型的差异。这种差异在低镉浓度条件下较为明显,高镉浓度下差异缩小。从表 2 可以看出,随处理浓度升高,水稻各部位镉含量增加,但整体均呈现根系最高、茎叶次之、籽粒含量最低的趋势。水稻各部位镉含量存在基因型差异,其中籽粒镉含量以沈农 315 最低,在外源添加镉处理下均与其他品种呈现极显著差异。在 Cd3 处理下,辽梗 9 号籽粒镉含量为 $0.205\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过国标规定的限值 $0.20\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但超标幅度不大。说明在中轻度污染土壤中通过筛选籽粒镉积累较低的品种,可以实现安全生产稻米。从籽粒镉含量大小来看,相对较低的是辽星 1 号、沈农 15 和沈农 315,相对较高的是沈稻 47 和辽梗 9 号。

茎叶镉含量以沈农 315 最低,在 Cd0、Cd1、Cd2 处理下均为极显著差异。在未添加镉处理下,沈稻 47 茎叶镉含量为 $0.109\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,辽梗 9 号为 $0.108\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在添加镉处理下,辽梗 9 号茎叶镉含量最高。根系镉含量以沈农 15 最低,辽梗 9 号最高。总体来看,辽梗 9 号各部位镉含量均最高,沈稻 47 各部位镉含量相对较高,二者属于高积累品种,而沈农 315 茎叶和籽粒镉含量均最低,辽星 1 号和沈农 15 各部位镉含量相对较低,属于低积累品种。

2.1.3 富集系数



图中不同大、小写字母分别表示同一生育时期不同水稻品种在 0.01 和 0.05 水平上差异显著。下同
Different majuscule and minuscule letters indicate significantly different between different rice at the same growth stage in level of 0.01 and 0.05 respectively. The same below

图 1 不同基因型水稻茎叶镉含量的生育时期变化

Figure 1 The different of Cd concentration in rice stem and leaf at different stages between genotypes

表2 成熟期不同基因型水稻镉的含量(mg·kg⁻¹)Table 2 The cadmium content of different genotypes rice in mature time(mg·kg⁻¹)

处理 Treatments	部位 Parts	辽星1号 Liaoxing 1	沈农15 Shennong 15	沈农315 Shennong 315	沈稻47 Shendao 47	辽梗9号 Liaojing 9
Cd0	籽粒 Grain	0.033±0.003Dbc	0.029±0.002CDcd	0.025±0.003BCd	0.036±0.002ABb	0.042±0.003Aa
	茎叶 Stem leaf	0.090±0.004ABab	0.077±0.006Bb	0.069±0.01Bc	0.109±0.003Aa	0.108±0.002Aa
	根系 Root	1.127±0.089BCbc	0.939±0.009BCc	1.064±0.022Cc	1.247±0.047ABab	1.501±0.018Aa
Cd1	籽粒 Grain	0.089±0.005BCb	0.078±0.006BCd	0.060±0.005Dc	0.114±0.008ABa	0.122±0.010Aa
	茎叶 Stem leaf	0.225±0.032Bb	0.205±0.034BCb	0.181±0.025Cc	0.244±0.027ABb	0.267±0.043Aa
	根系 Root	3.075±0.083BCbc	2.772±0.125Cc	3.086±0.086BCb	3.234±0.090ABb	3.970±0.082Aa
Cd2	籽粒 Grain	0.102±0.005Bb	0.108±0.005Bb	0.064±0.008Cc	0.143±0.011Aa	0.157±0.012Aa
	茎叶 Stem leaf	0.428±0.020Cc	0.406±0.023Cc	0.340±0.014Dd	0.554±0.032Bb	0.650±0.040Aa
	根系 Root	5.154±0.229Bc	4.389±0.171Bd	4.957±0.233Bcd	6.771±0.329Ab	7.386±0.467Aa
Cd3	籽粒 Grain	0.111±0.013Bb	0.116±0.014Bb	0.078±0.010Cc	0.186±0.007Aa	0.205±0.010Aa
	茎叶 Stem leaf	0.841±0.021Bbc	0.767±0.033Bc	0.740±0.049Bc	1.006±0.097ABab	1.166±0.099Aa
	根系 Root	8.911±0.219Bb	8.562±0.238Bb	8.993±0.223Bb	10.516±0.276Aa	12.060±0.272Aa

注:同行不同大、小写字母表示品种间在0.01、0.05水平上差异显著。下同。

Note: Different letters indicated significant difference between varieties at 0.01 and 0.05 level in the same row. The same below.

富集系数是衡量水稻籽粒对重金属镉富集能力强弱的重要指标。从图2可以看出,辽星1号、沈农15和沈农315相对于沈稻47和辽梗9号的富集系数较小,籽粒富集能力较弱。在4组处理下,籽粒富集系数最大的均为辽梗9号,最小的均为沈农315。这说明辽梗9号富集能力较强,而沈农315富集能力最弱,且在Cd1、Cd2、Cd3处理下均与其他基因型水稻存在极显著差异。

由图2还可知,随着外源添加镉浓度的增加,籽粒富集系数逐渐降低,且在Cd2处理后,富集系数变化幅度很小。这说明籽粒对镉的吸附能力随外源添加镉浓度的增加,在一定范围内会有所降低。5种基因型水稻籽粒镉的富集系数存在一定差异,随外源添加镉浓度的增加,基因型间差异性逐步降低。Cd1处理

下,辽星1号、沈农15和沈农315间存在极显著差异,沈稻47和辽梗9号间存在显著差异;而在Cd3处理下辽星1号和沈农15间、沈稻47和辽梗9号间均无显著差异。

2.2 不同耐性水稻亚细胞分布差异

2.2.1 镉胁迫下各基因型水稻生长情况

从表3可以看出,在外源添加镉条件下,镉胁迫显著影响了水稻的产量和生物量(干重)。除辽星1号,随外源添加镉含量的增加,籽粒产量和生物量呈降低趋势,与前人研究一致^[6-7]。Cd3处理相比未添加镉条件下:辽星1号籽粒产量由58.66g增至59.75g,其他品种沈农15由53.74g降至52.25g,沈农315由58.14g降至55.80g,沈稻47由59.92g降至51.36g,辽梗9号由60.54g降至52.72g。辽星1号、沈农

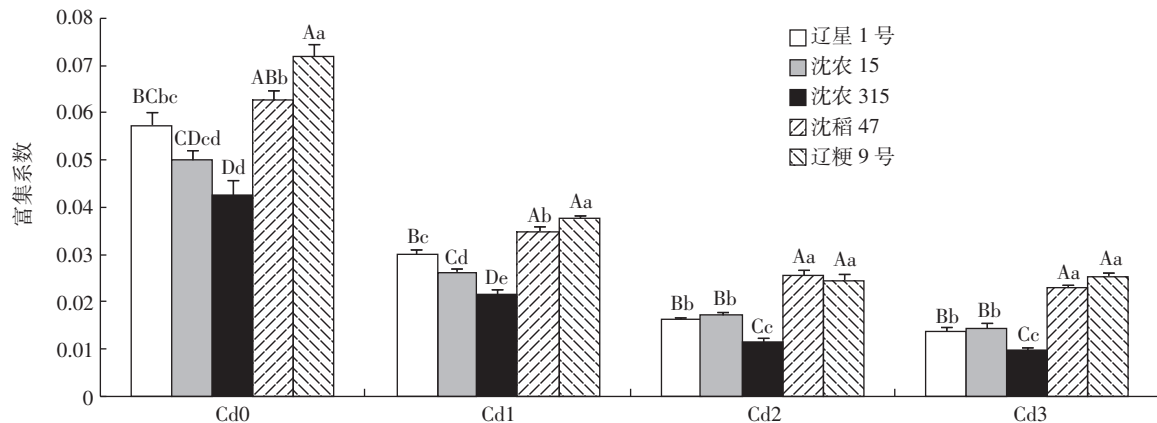


图2 不同基因型水稻籽粒富集系数

Figure 2 The cadmium concentration factor of grain in different genotypes rice

表3 镉胁迫下不同基因型水稻籽粒产量和生物量(g·盆⁻¹)Table 3 Grain yield and biomass in different types rice with cadmium tolerance(g·pot⁻¹)

处理 Treatments	部位 Parts	辽星1号 Liaoxing 1	沈农 15 Shennong 15	沈农 315 Shennong 315	沈稻 47 Shendao 47	辽粳9号 Liaojing 9
Cd0	籽粒 Grain	58.66±5.38b	53.74±4.21c	58.14±4.89b	59.92±5.94a	60.54±4.62a
	茎叶 Stem leaf	58.17±4.98b	54.51±4.64d	56.23±4.23c	60.01±5.62a	62.20±5.25a
	根系 Root	12.77±1.05ab	8.34±0.66b	7.87±0.56b	14.21±1.24a	15.75±1.32a
Cd1	籽粒 Grain	60.49±5.32a	52.74±4.91c	57.32±5.11b	58.26±4.65ab	59.40±4.62a
	茎叶 Stem leaf	61.28±5.23a	53.59±4.32d	55.75±4.72c	55.02±4.27c	57.08±4.64b
	根系 Root	12.80±1.22a	7.60±0.72b	7.10±0.59b	11.80±1.07a	12.20±1.11a
Cd2	籽粒 Grain	60.74±5.89a	52.50±4.34c	56.87±4.29b	55.87±4.56bc	57.68±4.83b
	茎叶 Stem leaf	61.39±5.23a	51.95±4.72c	53.05±4.56b	53.67±4.29b	55.69±4.74b
	根系 Root	9.60±0.78a	6.28±0.52b	5.62±0.48b	9.54±0.86a	9.92±0.87a
Cd3	籽粒 Grain	59.75±4.23a	52.25±4.18c	55.80±4.28b	51.36±4.62c	52.72±4.23c
	茎叶 Stem leaf	60.03±4.92a	51.89±4.82d	55.63±4.64b	52.69±4.44c	53.48±4.63bc
	根系 Root	8.32±0.62a	5.88±0.32b	4.11±0.29b	8.52±0.55a	8.24±0.62a

15和沈农315在添加镉处理下,籽粒产量和生物量下降较少,影响程度较轻,说明其耐镉性较强;沈稻47和辽粳9号受镉胁迫籽粒产量和生物量下降较大,影响程度较大,说明其耐镉性弱。

2.2.2 镉在不同基因型水稻茎叶中的亚细胞分布

由表4可以看出,抽穗期镉在茎叶亚细胞各组分的含量低于分蘖期,镉在水稻茎叶各亚细胞组分中的含量和分配比例均表现为细胞壁>细胞可溶性组分>细胞器。

细胞各组分中镉含量和分配比例因耐性和生育时期而异,表现出显著性差异。分蘖期镉耐性品种细

胞壁中镉的含量0.994~1.017 mg·kg⁻¹和分配比例56.54%~58.41%高于敏感性品种的0.945~0.955 mg·kg⁻¹和50.08%~50.30%,耐性品种细胞器中镉的含量0.070~0.123 mg·kg⁻¹和分配比例4.10%~6.86%明显低于敏感性品种的0.283~0.302 mg·kg⁻¹和15.06%~15.82%,且耐性品种与敏感性品种表现出极显著差异。而在细胞可溶性组分中,耐性品种镉的分配比例36.60%~37.76%高于敏感性品种的34.09%~34.64%,沈农315中的含量略低于沈稻47和辽粳9号,且差异不显著,在抽穗期具有同样差异。由此可以看出,水稻耐镉程度与镉在水稻亚细胞各组分的含量与

表4 不同基因型水稻茎叶的亚细胞组分镉含量(Cd1处理,mg·kg⁻¹)Table 4 The cadmium content in subcellular fractions in rice stem and leaf(Cd1, mg·kg⁻¹)

时期 Stage	亚细胞组分 Subcellular fractions	辽星1号 Liaoxing 1	沈农 15 Shennong 15	沈农 315 Shennong 315	沈稻 47 Shendao 47	辽粳9号 Liaojing 9
分蘖期 Tillering	F1	1.017±0.100Aa	1.005±0.093Aa	0.994±0.100Aa	0.945±0.096Bb	0.955±0.097Bb
		(56.54)	(56.80)	(58.14)	(50.30)	(50.08)
	F2	0.123±0.009Bc	0.098±0.007Cd	0.070±0.009De	0.283±0.018Ab	0.302±0.028Aa
	(6.86)	(5.51)	(4.10)	(15.06)	(15.82)	
	F3	0.658±0.061ABab	0.666±0.052Aa	0.646±0.55Bb	0.651±0.042Bb	0.650±0.044Bb
		(36.60)	(37.68)	(37.76)	(34.64)	(34.09)
抽穗期 Heading	F1	0.308±0.017ABab	0.276±0.017ABab	0.323±0.010Aa	0.271±0.017ABb	0.287±0.019Bb
		(59.81)	(59.74)	(59.81)	(58.28)	(55.73)
	F2	0.053±0.004Cc	0.044±0.002CDd	0.044±0.003Dd	0.072±0.009Bb	0.081±0.004Aa
	(10.29)	(9.52)	(8.15)	(15.48)	(15.73)	
	F3	0.154±0.023ABab	0.142±0.018Bb	0.173±0.011Aa	0.122±0.011Bb	0.147±0.015Bb
		(28.90)	(30.74)	(32.04)	(26.24)	(28.54)

注:括号内数字为亚细胞各组分镉含量占总量的百分数。F1:细胞壁;F2:细胞器;F3:可溶性组分。

Note: The values in brackets are percent distribution. F1: Cell wall ingredient; F2: Organelle ingredient; F3: Soluble substance.

分布比例有关,镉在耐性品种细胞壁和可溶性组分中的含量和分布比例较高,细胞器中的含量和分布比例较低,敏感性品种则相反。

3 讨论

3.1 水稻茎叶镉含量生育时期的变化

水稻生长前期生物量增长较小,植株镉含量较高,随着水稻生长加速,生物量迅速增大,导致生长后期茎叶镉含量有所降低。水稻分蘖期之前,对土壤中镉的适应能力较差,生育前期易受土壤中镉的抑制影响,随着水稻的生长,对镉的适应能力逐渐增强,从而减弱了镉对水稻的毒害作用^[12]。本研究中,水稻茎叶镉含量随着水稻的生长逐渐降低,即分蘖期最大,抽穗期次之,成熟期最小,说明其对水稻的毒害作用也随之逐渐减弱。但水稻体内镉积累量是一直增加的,即水稻成熟期吸收镉总量必然大于分蘖期和抽穗期^[13]。

3.2 水稻各部位镉含量与籽粒镉含量的关系

水稻各部位吸收的镉含量存在显著的基因型差异,其中镉在籽粒中含量较低的沈农 315 最低,辽粳 9 号最高。当土壤外源加镉为 $7.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,仅有辽粳 9 号籽粒镉含量超过国标规定的限值 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,所以在中轻度污染土壤中通过筛选种植籽粒镉积累较低的品种,可以实现安全生产稻米。

水稻籽粒富集镉的过程首先是根系对镉的活化和吸收,然后木质部进行装载和运输,后经节间韧皮部富集到水稻籽粒中^[14]。辽星 1 号、沈农 15 和沈农 315 籽粒镉含量和富集系数相对较低,而沈稻 47 和辽粳 9 号相对较高,水稻籽粒对镉的吸收受到根系和茎叶对镉的富集影响,根系吸收的镉在向地上部运输的过程中,受到茎叶的截留,从而使得最终籽粒中镉的含量非常低。植物根系是重金属进入植物的门户,根系的形态、生理活性及根系微生物等都会影响植物对重金属的吸收^[15],说明根系和茎叶对镉的富集吸收强弱影响了籽粒对镉的富集程度。

Florijin 等^[16]研究认为,与根系的吸收能力相比,植物籽粒的镉含量在更大程度上取决于镉在植物体内的分配。与之相似,Dunbar 等^[17]认为镉在植物体内运输和分配差异而非吸收差异是导致镉在植物可食部位低积累的主要原因。从本文富集系数来看,低镉浓度处理下水稻籽粒富集系数大于高镉浓度处理,说明低镉浓度处理下籽粒富集能力相对较大,水稻吸收的镉向籽粒富集的比例较高,而高镉浓度处理下水稻吸收的镉更多的被根系和茎叶所富集,向籽粒富集的

镉相对较少,与前人研究一致。

3.3 不同基因型水稻茎叶镉亚细胞分布

3.3.1 细胞壁和细胞可溶性组分的耐性机理

水稻的耐镉性与镉在水稻各亚细胞组分的分布密切相关^[18]。镉是植物的非必需元素,通过钙、铁、锰、锌等必需元素的吸收通道进入植物体内。本研究发现,镉在细胞壁中的含量和分布比例最大,可溶性组分次之,细胞器最小。细胞壁是阻挡土壤中镉进入植物体内的第一道保护屏障,也是必经之路,也是吸收镉的主要场所,对水稻耐镉胁迫具有重要作用。镉既能以自由离子 Cd^{2+} 的形式,也能够以 Cd-PC 、 Cd-GSH 等螯合形式进入根细胞内^[19]。

本研究发现镉在细胞壁中分布比例为 $50.08\% \sim 58.14\%$ (分蘖期)、 $55.73\% \sim 59.81\%$ (抽穗期),表明细胞壁对镉具有储存沉淀作用^[20]。杨居荣等^[18]研究小麦发现,在细胞壁中的含量和分布最高,这是因为细胞壁中含有大量的负电荷基团,这些基团与带正电荷的重金属离子沉淀络合^[21],而且细胞壁中的多糖、果胶酸和蛋白质等成分,也能够降低细胞内重金属浓度,减少重金属离子的跨细胞膜运输^[22-23]。这一机理目前在其他植物研究上有所报道:对三色堇富集镉的研究认为,镉主要分布在细胞壁中,且细胞壁对镉的固持可有效减弱镉从地下部向地上部转移^[24];大麦耐镉品种与敏感品种镉主要分布于细胞壁中,而耐镉品种细胞壁中镉含量较高^[25];小麦和玉米体内的 Pb 主要集中在根系细胞壁^[26]。

细胞可溶性组分也是镉储存的重要场所,其含有的一系列化合物,如金属硫蛋白(MTs)、植物螯合肽(PCs)、有机酸、氨基酸等,可与镉结合形成络合物^[27]。对水稻耐镉胁迫也有一定的作用,使重金属离子在细胞内被区隔化,减少镉向细胞器转移^[28]。

3.3.2 水稻镉耐性与镉在各亚细胞组分中的关系

不同镉耐性水稻中各亚细胞组分镉的含量和分布比例有显著性差异。耐性品种细胞壁和可溶性组分含量和分配比例相对高于敏感性品种,细胞器的含量和分配比例相对较低。本研究表明水稻对镉的耐性程度与其亚细胞分布有关,镉在细胞器中的含量和分布比例较低,则其镉耐受性越明显,反之则相反,与陈京都研究结果一致。细胞器镉含量和分配比例直接影响了水稻镉耐受性强弱。此外,本研究还发现,抽穗期亚细胞各组分含量低于分蘖期,也在亚细胞层次解释了胁迫对水稻前期生长发育影响较大,后期影响逐渐降低的原因。

4 结论

(1)水稻茎叶镉含量随生长发育而降低,成熟期各部位吸收的镉含量与籽粒富集系数均存在显著的基因型差异,且随着外源添加镉浓度的变化而改变。本研究得出,辽星1号、沈农15和沈农315籽粒含量相对较低,属于低镉积累品种,沈稻47和辽梗9号相对较高,属于高镉积累品种。在中轻度污染土壤中通过筛选种植籽粒镉积累较低的品种,可以实现安全生产稻米。

(2)镉在各细胞组分中的含量和分配比例因基因型和生长时期而异,表现出显著性差异,镉在细胞壁中的含量和分配比例最大,可溶性组分次之,细胞器最小。镉耐性品种细胞壁及可溶性组分中镉含量和分布比例相对较大,细胞器中镉含量和分布比例相对较小,敏感性品种则相反。

参考文献:

- [1] 崔玉静,赵中秋,刘文菊,等. 镉在土壤-植物-人体系统中迁移积累及其影响因素[J]. 生态学报, 2003, 23(10):2133-2143.
CUI Yu-jing, ZHAO Zhong-qiu, LIU Wen-ju, et al. Transfer of cadmium through soil-plant-human continuum and its affecting factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2133-2143.
- [2] Wong C S, Lia X D, Zhang G, et al. Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China[J]. *Atmosphere Environment*, 2003, 37(6):767-776.
- [3] Nan Z R, Zhao C Y, Li J J, et al. Relations between soil properties and selected heavy metal concentrations in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in contaminated soils[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2002, 133(1-4):205-213.
- [4] 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, 19(6):1452-1458.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing. Selection and breeding of heavy metal pollution-safe cultivars[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6): 1452-1458.
- [5] 徐燕玲,陈能场,徐胜光,等. 低镉积累水稻品种的筛选方法研究: 品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7):1346-1352.
XU Yan-ling, CHEN Neng-chang, XU Sheng-guang, et al. Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium: Cultivars versus types [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7):1346-1352.
- [6] 刘侯俊,梁吉哲,韩晓日,等. 东北地区不同水稻品种对镉的累积特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):220-227.
LIU Hou-jun, LIANG Ji-zhe, HAN Xiao-ri, et al. Accumulation and distribution of cadmium in different rice cultivars of Northeastern China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):220-227.
- [7] 辽宁省科技厅. 水稻栽培技术[M]. 沈阳:东北大学出版社, 2010: 40-60.
Science and Technology Department of Liaoning Province. Rice cultivation techniques[M]. Shenyang: Northeastern University Press, 2010: 40-60.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000: 29-90.
BAO Shi-dan. Soil agricultural chemistry analysis[M]. Third edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 29-90.
- [9] Weigel J J, Jager H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plant[J]. *Plant Physiology*, 1980, 65: 480-482.
- [10] Rathore V S, Bajaj Y P, Wittwer S H. Subcellular localization of zinc and calcium in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) tissues[J]. *Plant Physiology*, 1972, 49: 207-211.
- [11] 周卫,汪林,林葆. 镉胁迫下钙对镉在玉米细胞中分布及对叶绿体结构与酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(4): 335-340.
ZHOU Wei, WANG Lin, LIN Bao. Effects of calcium supply on subcellular distribution of cadmium, chloroplast ultra structure, RuBPC and PEPC activity in maize under cadmium stress[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4):335-340.
- [12] 黄冬芬,奚岭林,杨立年,等. 不同耐镉基因型水稻农艺和生理性状的比较研究[J]. 作物学报, 2008, 34(5):809-817.
HUANG Dong-fen, XI Ling-lin, YANG Li-nian, et al. Comparisons in agronomic and physiological traits of rice genotypes differing in cadmium-tolerance[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5):809-817.
- [13] 程旺大,姚海根,张国平,等. 镉胁迫对水稻生长和营养代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3):528-537.
CHENG Wang-da, YAO Hai-gen, ZHANG Guo-ping, et al. Effect of cadmium on growth and nutrition metabolism in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3):528-537.
- [14] 朱智伟,陈铭学,牟仁祥,等. 水稻镉代谢与控制研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18):3633-3640.
ZHU Zhi-wei, CHEN Ming-xue, MOU Ren-xiang. Advances in research of cadmium metabolism and control in rice plants[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(18): 3633-3640.
- [15] Guo Y, George E, Marschner H. Contribution of an arbuscular mycorrhizal fungus to the uptake of cadmium and nickel in bean and maize plants[J]. *Plant and Soil*, 1996, 184: 195-205.
- [16] Florijn P J, Van Beusichem M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines[J]. *Plant and Soil*, 1993, 50: 25-32.
- [17] 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: 349-354.
- [18] 杨居荣,鲍子平,蒋婉茹. 不同耐镉作物体内镉结合体的对比研究[J]. 作物学报, 1995, 21(5): 605-611.
YANG Ju-rong, BAO Zi-ping, JIANG Wan-ru. Comparative study on the Cd-binding complex in crops with different Cd tolerance[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1995, 21(5):605-611.
- [19] Carrier P, Baryl A, Havaux M. Cadmium distribution and microlocalization in oilseed rape (*Brassica napus*) after long-term growth on cadmium-contaminated soil[J]. *Planta*, 2003, 216(6): 939-950.
- [20] 杨菲,唐明凤,朱玉兴. 水稻对镉的吸收和转运的分子机理[J]. 杂交水稻, 2015, 30(3): 2-8.

- YANG Fei, TANG Ming-feng, ZHU Yu-xing. molecular Mechanism of cadmium absorption and transport in rice[J]. *Hybrid Rice*, 2015, 30(3): 2-8.
- [21] 刘清泉,陈亚华,沈振国,等.细胞壁在植物重金属耐性中的作用[J].植物生理学报, 2014, 50(5): 605-611.
- LIU Qing-quan, CHEN Ya-hua, SHEN Zhen-guo, et al. Roles of cell wall in plant heavy metal tolerance[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5): 605-611.
- [22] Allen D L, Jarrell W M. Proton and copper adsorption to maize and soybean root cell walls[J]. *Plant Physiology*, 1989, 89: 823-832.
- [23] Rauser W E. Structure and function of metal chelators produced by plants[J]. *Cell Biochem and Biophys*, 1999, 31:19-48.
- [24] 白雪,陈亚慧,耿凯,等.镉在三色堇中的积累及亚细胞与化学形态分布[J].环境科学学报, 2014, 34(6):1600-1605.
- BAI Xue, CHEN Ya-hui, GENG Kai, et al. Accumulation subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Viola tricolor* L. [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6):1600-1605.
- [25] 陆仲烟,刘仲齐,宋正国,等.大麦中镉的亚细胞分布和化学形态及PCs合成的基因型差异[J].农业环境科学学报, 2013,32(11): 2125-2131.
- LU Zhong-yan, LIU Zhong-qi, SONG Zheng-guo, et al. Subcellular distribution and chemical forms of Cd and the synthesis of phytochelatin (PCs) in different barley genotypes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2125-2131.
- [26] 孙贤斌,李玉成,王宁.铅在小麦和玉米中活性形态和分布的比较研究[J].农业环境科学学报, 2005, 24(4): 666-669.
- SUN Xian-bin, LI Yu-cheng, WANG Ning. Comparisons on active chemical form and distribution of lead in wheat and corn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4): 666-669.
- [27] Bhatia N P, Walsh K B, Baker A J. Detection and quantification of ligands involved in nickel detoxification in a herbaceous Ni hyperaccumulator *Stackhousia tryonii* bailey[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56(415):1343-1349.
- [28] 周守标,徐礼生,吴龙华,等.镉和锌在皖景天细胞内的分布及化学形态[J].应用生态学报, 2008, 19(11): 2515-2520.
- ZHOU Shou-biao, XU Li-sheng, WU Long-hua, et al. Subcellular distribution and chemical forms of Cd and Zn in *Sedum jinianum*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(11):2515-2520.