

李桃, 李军, 韩颖, 等. 磷对水稻镉的亚细胞分布及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1712–1718.

LI Tao, LI Jun, HAN Ying, et al. Effects of phosphorus on subcellular distribution and chemical speciation of cadmium in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1712–1718.

磷对水稻镉的亚细胞分布及化学形态的影响

李桃, 李军*, 韩颖, 耿杰, 薛飞, 陈凯

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘要:为了探讨磷对水稻耐镉性的影响,采用盆栽实验,以沈农315(耐性)和花粳1417(敏感性)水稻为研究对象,对分蘖末期水稻根系及茎叶中镉的亚细胞分布以及化学形态进行比较分析。结果表明:增施磷肥显著降低了两品种水稻的镉含量,沈农315根系镉含量明显高于花粳1417,茎叶镉含量低于花粳1417;两品种各部位细胞壁镉的分配比例随磷的增加而明显增加,细胞器镉的分配比例逐渐降低。镉的化学结合形态整体上呈现为氯化钠提取态>醋酸提取态>去离子水提取态>乙醇提取态>盐酸提取态,其中醋酸提取态所占比例随磷增加而增加,沈农315和花粳1417的增幅分别为19.70%~31.32%、10.05%~16.36%,氯化钠提取态显著降低,降幅分别为23.38%~40.11%、22.55%~39.56%。由此说明,增施磷肥能有效增加水稻对镉的耐受性,且不同品种表现不同。

关键词:水稻;磷;镉;亚细胞分布;化学形态

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)09-1712-07 doi:10.11654/jaes.2017-0267

Effects of phosphorus on subcellular distribution and chemical speciation of cadmium in rice

LI Tao, LI Jun*, HAN Ying, GENG Jie, XUE Fei, CHEN Kai

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: To determine the effect of phosphorus on cadmium tolerance in rice, a pot experiment was carried out with two genotypes of rice: Shennong315, a cadmium-tolerant variety, and Huajing1417, a cadmium-sensitive variety. The subcellular distribution and chemical form of cadmium in these two varieties were analyzed at the end of the tillering stage of rice. The results showed that the application of phosphate fertilizer significantly reduced the cadmium content of the two cultivars. The content of cadmium in roots of Shennong315 was higher than that of Huajing1417, and the content of cadmium in stem and leaves was lower than that of Huajing1417. The proportion of cadmium in the cell wall of the cultivars increased significantly with increase in phosphorus, and the proportion of cadmium in the organelle gradually reduced. The chemical binding morphology of cadmium overall proceeded in the order sodium chloride extract>acetic acid extract>distilled water extract>ethanol extract>hydrochloric acid extract. The proportion of acetic acid extract increased with increase in phosphorus. Shennong315 increased by 19.70%~31.32% and Huajing1417 increased by 10.05%~16.36%. The proportion of sodium chloride extract was significantly decreased with increase in phosphorus. Shennong315 fell by 23.38%~40.11% and Huajing1417 fell by 22.55%~39.56%. Therefore, the application of phosphate fertilizer can effectively increase the tolerance of rice to cadmium, and different varieties have different performances. This study provides a scientific basis for the use of phosphorus to alleviate cadmium toxicity in rice.

Keywords: rice; phosphorus; cadmium; subcellular distribution; chemical form

收稿日期:2017-03-03

作者简介:李桃(1991—),女,辽宁阜新人,硕士研究生,从事重金属污染土壤修复研究。E-mail:1457872377@qq.com

*通信作者:李军 E-mail:syau_ljun@163.com

基金项目:2012年辽宁省科学基金项目(L2012241)

Project supported: The Science Foundation of the Liaoning Province, China(L2012241)

镉是环境中具有高毒害性的重金属元素,其生物迁移性强,极易被植物吸收和积累^[1],进而对植株产生毒害使可食用部分镉含量超标,威胁食品安全,危害人类健康。水稻是人类主要食用的粮食作物之一,同时也是易积累镉的农作物之一,有研究表明,不同基因型水稻间各部位的镉含量分配存在显著差异^[2],镉在植株内的转运情况、存在形态以及分布特征也不相同^[3]。水稻根系及地上部主要通过细胞壁固持^[4]、细胞可溶部分区室化^[5]作用结合并束缚大量的镉^[6],减少进入细胞器的镉含量,以减少自由态的镉紊乱植株细胞内的代谢功能^[7],从而缓解镉对水稻的毒害作用。这是水稻细胞层面上主要的耐镉机制。

磷素是植物生长必需的营养元素之一,通过多种途径参与植物代谢过程^[8]。水稻分蘖期是植株主要的营养吸收时期。有研究发现,磷酸盐可以抑制植物对镉的吸收^[9-10],其中镉的醋酸提取态,主要通过二代磷酸盐与重金属结合形成螯合物^[11],以减少镉在植株内的移动性,从而降低镉对植株的毒害作用。此外,磷营养可以增加细胞壁的厚度从而固持更多的镉。但磷对植物镉积累的影响因植株基因型不同而异,因此研究磷对镉在不同水稻亚细胞的分布及化学结合形态积累的影响,为进一步阐明磷对水稻的耐镉机理提供实验依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

盆栽试验用土取自沈阳农业大学稻作所试验田耕层 0~20 cm 水稻土,风干后过 3 mm 筛用于水稻种植。取过 1 mm 和 0.25 mm 筛的土样,采用常规方法,土壤基本理化性质分析结果:pH 6.64;全氮 1.43 g·kg⁻¹;全磷 0.71 g·kg⁻¹;全钾 15.5 g·kg⁻¹;碱解氮 98 mg·kg⁻¹;速效磷 12.08 mg·kg⁻¹、速效钾 12.16 mg·kg⁻¹;有机质 21.2 g·kg⁻¹;全镉 0.49 mg·kg⁻¹。

供试水稻为沈农 315(耐性)、花粳 1417(敏感型),稻苗均由沈阳农业大学稻作所提供。

1.2 实验设置与处理

选用氮、磷、钾肥分别为脲、磷酸二氢钠、氯化钾;镉为氯化镉。实验设置基肥氮(N)为 100 mg·kg⁻¹,钾(K₂O)为 150 mg·kg⁻¹,磷(P₂O₅)设 4 个水平分别为 0 mg·kg⁻¹(P0)、150 mg·kg⁻¹(P1)、450 mg·kg⁻¹(P2)、900 mg·kg⁻¹(P3),镉为 5 mg·kg⁻¹(Cd5),采用全因素设计,每处理 6 次重复。将过筛土以每盆 4 kg 装入口径 20 cm、高 25 cm 的塑料盆,将 Cd 以溶液形式加入土壤

充分搅拌均匀并淹水平衡 10 d,之后将基肥氮、磷、钾肥分别以溶液形式加入土壤混匀并淹水平衡 24 h。挑选长势均匀的水稻幼苗于 5 月 29 日移栽至盆中,每盆一穴,每穴 2 株,水面保持 2~3 cm,在水稻种植 25 d 时追施分蘖肥(N:50 mg·kg⁻¹),待水稻种植 45 d 后选取长势均衡的植株在分蘖末期采样。每处理取 3 个重复用于实验室分析。

1.3 试验方法

1.3.1 植株全镉含量测定

将采集的水稻根部与地上部清洗干净,于 105 °C 杀青 20 min,70 °C 烘干 2 h,粉碎过 60 目筛,并称取 0.5 g,加入 HNO₃-HClO₄(体积比 1:4)混合酸 10 mL 过夜。调节沙浴逐级升温至(196±5) °C,消煮至澄清,剩余近 2 mL,待冷却,润洗过滤,纯水定容至 25 mL 待测。将待测液用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-OES(VISTA-MPX,美国)测定镉含量。

1.3.2 植株亚细胞组分镉含量测定

将采集的植株鲜样用蒸馏水清洗后以纱布吸干表面水分,按料液比 1:10 称取根系、茎叶各 1 g 样品,加入配制的预冷缓冲液[蔗糖 250 mmol·L⁻¹,Tris-HCl(pH 7.4) 50 mmol·L⁻¹,DTT 1 mmol·L⁻¹] 5 mL 冰浴研磨至匀浆,再加 5 mL 冲洗钵体,匀浆与冲洗液同置于 15 mL 离心管中。采用差速离心(Thermo Scientific Sorvall LYNX 4000),参照 Weigel 等^[12]的技术,按照王芳等^[13]的方法略有改动。所有处理均在 4 °C 下进行:按 2400 r·min⁻¹ 离心 15 min 得到沉淀部分为细胞壁组分;将上清液以 12 000 r·min⁻¹ 离心 45 min 得到沉淀部分为细胞器组分;上清液为细胞可溶部分。将细胞壁、细胞器组分于 70 °C 烘干,加入混合酸 10 mL,转入三角瓶放置过夜(≥10 h),消煮、润洗过滤、定容至 10 mL,测定镉含量。

1.3.3 植株镉化学形态测定

将植株鲜样清洗拭干,称取 1 g 剪为 1~2 mm² 的碎片置于离心管,加入 10 mL 提取剂浸提,于 25 °C 恒温箱内放置 20 h,之后 25 °C 恒温振荡 2 h,以 4000 r·min⁻¹ 离心 10 min,倒出上清液,再加入同体积提取剂,恒温振荡 2 h、离心 10 min,将两次上清液同置于三角瓶备用。采用以下 5 种提取剂逐步浸提:80%乙醇、去离子水、1 mol·L⁻¹ 氯化钠、2% 醋酸、0.6 mol·L⁻¹ 盐酸。所得上清液置于电热板蒸发至近干(1~2 mL),加酸、消煮、润洗过滤、10%硝酸定容至 10 mL,测定镉含量。

1.4 数据处理

实验数据应用 Excel 软件进行统计整理,应用

SPSS 18.0 进行数据差异性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施磷量对水稻镉含量的影响

由图 1 可以看出,两品种水稻根部镉含量明显高于茎叶。在 P0 处理下水稻根及茎叶镉含量均最高,说明此时植株受镉的毒害作用最大。与 P0 相比,各施磷处理均明显降低了两品种根系的镉含量,且随施磷水平的提高镉含量显著降低,沈农 315 和花粳 1417 分别降低了 16.68%~27.37%、18.27%~28.09%,在 P3 水平上降低幅度最大。与 P1 相比,随着磷的增加水稻根及茎叶中镉含量的降低幅度呈逐渐减缓趋势,且 P2、P3 处理之间的镉含量差异不显著,说明增施磷肥可以缓解镉对水稻的毒害,但磷对镉的抑制存在一定阈值,磷过量对镉的抑制作用不明显。两个水稻品种茎叶的镉含量在不同磷处理中的变化趋势与根部相似,同样表现出了镉含量随磷增加而逐渐降低的趋势。沈农 315 与花粳 1417 的降低幅度分别为 32.20%~

64.02%、33.22%~66.44%,在 P3 水平上降低幅度最大,但 P2、P3 处理之间的镉含量差异不显著。可见磷对茎叶镉含量的影响大于根部。

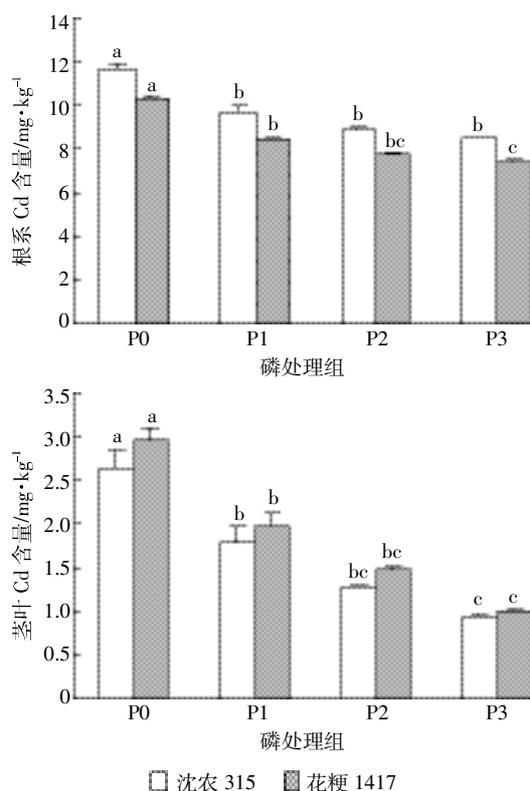
相较两个品种而言,沈农 315 根部镉含量明显高于花粳 1417,而茎叶镉含量明显低于花粳 1417。这可能是由于沈农 315 对重金属的转运能力较低,能将更多的镉富集在根部,减少了镉向地上部的迁移。花粳 1417 茎叶镉含量较高可能是由于其对镉的迁移能力较强,向茎叶转运镉量较多所致。这说明植株对镉的吸收积累情况受基因型的影响。

2.2 不同施磷量对水稻亚细胞镉含量的影响

由表 1 可以看出,在 4 个磷处理中两品种根及茎叶亚细胞各组分镉含量的分配比例均呈现细胞壁>细胞可溶部分>细胞器的趋势,说明不同镉耐性的水稻其镉的亚细胞分布趋势是一致的。

在植株根系中,与 P0 相比,施磷明显降低了各亚细胞组分中的镉含量,改变了镉在亚细胞各组分中的分配比例。水稻细胞壁和细胞可溶部分的镉占比在 P0 水平中最少,说明缺磷时植株细胞壁及细胞可溶部分对镉的固持和束缚作用较弱,自由态镉离子数量相对较多,对植株的胁迫作用更大;而细胞器中镉含量及所占比例在 P0 处理中最高,沈农 315 和花粳 1417 分别达到 26.67%、29.87%,细胞器是植株主要的代谢场所,若镉浓度较高会对水稻生长产生胁迫效应,说明在缺磷处理中,水稻根细胞受镉毒害作用比其他磷处理更大。与 P0 相比,磷的增加明显提高了两品种根部镉在细胞壁及细胞可溶部分的比例,降低了镉在细胞器中的比例,且细胞壁中镉分配率的增长和细胞器中镉分配率的降低更为明显,均在 P3 处理时变化最大:沈农 315 和花粳 1417 细胞壁镉分别增长了 13.11 和 10.94 个百分点,细胞器镉分别降低了 15.60 和 14.02 个百分点。这说明磷的增加主要增强了根细胞壁对镉的束缚,减少了进入细胞器的镉含量,从而减少镉与蛋白质结合干扰植株生理代谢的毒害作用,进而缓解了植株镉胁迫。

在茎叶中,两品种亚细胞组分中镉的分配比例变化规律与根部相似,在缺磷时植株受镉毒害作用最大,随磷的增加镉毒害逐渐减轻,与 P0 相比,在 P3 处理时磷对茎叶镉胁迫的缓解效果最好。两品种细胞器中镉的分配比例明显低于根部,说明镉对茎叶的毒害小于根部。在相同磷水平下,沈农 315 茎叶细胞壁镉的分配比例明显大于根部,达到 50.09%~58.13%,细胞可溶部分镉的分配比例略有增加;而花粳 1417 茎



不同字母表示同一品种在不同磷处理中的差异达 5% 显著水平

Different letters indicate significant difference in the same level of different phosphorus treatments at the 5% level

图 1 不同磷水平下水稻根及茎叶镉含量

Figure 1 Effects of different phosphorus levels on cadmium content in roots and stems of rice

表1 不同磷水平下水稻根与茎叶亚细胞各组分镉含量(mg·kg⁻¹ DW)Table 1 Effects of different P levels on subcellular fractions of Cd in rice root and stem leaf(mg·kg⁻¹ DW)

品种	磷处理水平	根			茎叶		
		细胞壁	细胞器	细胞可溶部分	细胞壁	细胞器	细胞可溶部分
沈农 315	P0	4.559±0.097a (42.79)	2.842±0.137a (26.67)	3.255±0.076a (30.54)	1.449±0.061a (50.09)	0.469±0.044a (16.20)	0.975±0.022a (33.71)
	P1	4.441±0.132a (48.85)	1.700±0.052b (18.70)	2.951±0.105b (32.45)	1.049±0.040b (56.35)	0.180±0.003b (9.69)	0.632±0.029b (33.96)
	P2	4.285±0.127a (52.09)	1.230±0.052c (14.96)	2.710±0.098bc (32.95)	0.691±0.026c (57.42)	0.103±0.013c (8.57)	0.409±0.016c (34.01)
	P3	4.258±0.208a (55.90)	0.863±0.061d (11.07)	2.576±0.206c (33.03)	0.508±0.033d (58.13)	0.066±0.014c (7.55)	0.300±0.011d (34.32)
花粳 1417	P0	3.569±0.084a (37.28)	2.859±0.271a (29.87)	3.145±0.147a (32.85)	1.161±0.042a (39.68)	0.577±0.020a (19.70)	1.19±0.067a (40.62)
	P1	3.215±0.352a (41.45)	1.956±0.036b (25.22)	2.586±0.059b (33.34)	0.849±0.051b (44.56)	0.268±0.024b (14.07)	0.79±0.059b (41.37)
	P2	3.305±0.312a (45.68)	1.431±0.046c (19.78)	2.499±0.249b (34.54)	0.623±0.066c (46.42)	0.157±0.007c (11.68)	0.56±0.022c (41.90)
	P3	3.248±0.072a (48.22)	1.067±0.091d (15.85)	2.421±0.069b (35.94)	0.464±0.013d (48.60)	0.088±0.007d (9.19)	0.40±0.015d (42.21)

注:数据为平均值(n=3)±标准差;括号内数据为亚细胞各组分所占比例。同列同一品种不同字母表示处理间差异达5%显著水平。下同。

Note: Data for average (n=3)±standard deviation; The data in brackets is the proportion of subcellular components. Different letters in the same rows indicate significant difference among treatments at the 5% level. The same below.

叶细胞壁镉的分配比例与根部相差不大,细胞可溶部分镉的分配比例明显增加。这说明两品种茎叶中的耐镉机制存在差异。

对于两品种而言,沈农 315 根细胞壁对镉的固持能力比花粳 1417 更强,进入细胞器参与代谢的镉更少,减少了其向地上部的运输,但两品种根细胞可溶部分的镉含量及分配比例差异不显著。在茎叶中,花粳 1417 的细胞壁分配比例更小,细胞可溶部分分配比例更大。这说明两品种茎叶在对镉的胁迫表现上存在较大差异,可能与磷的吸收利用差异有关。

2.3 不同施磷量对水稻镉化学形态的影响

由表 2 可以看出,镉形态的回收率为 91.13%~97.26%,说明本实验所采用的提取方法能较好地用于镉化学结合形态的研究。两品种根部各提取态的分配比例呈现为氯化钠提取态>醋酸提取态>去离子水提取态>乙醇提取态>盐酸提取态,说明不同镉耐性的水稻其镉化学形态分布趋势是一致的。

与 P0 相比,增施磷明显改变了水稻镉各提取态的分配比例。镉的氯化钠提取态、乙醇提取态所占比例随磷的增加逐渐降低,以氯化钠提取态变化最为明显,沈农 315 和花粳 1417 的降幅分别为 23.38%~40.11%、22.55%~39.56%,在各施磷水平间镉含量降低差异显著,P3 处理降到最低,但 P2、P3 处理间差异不显著。镉的氯化钠提取态是镉与蛋白质结合的形

态,干扰酶活性,影响作物正常生长发育,氯化钠提取态占比越多的作物,镉耐性越低;乙醇提取态迁移能力更强,毒性更高。磷的增加显著降低了镉氯化钠提取态和乙醇提取态,说明磷对植株抑制镉毒害效果显著。镉的醋酸提取态和去离子水提取态的分配比例随磷的增加而逐渐增加,其中以醋酸提取态变化最为明显,沈农 315 和花粳 1417 的增幅分别为 19.70%~31.32%、10.05%~16.36%,在各施磷水平间镉含量差异显著,P3 处理降到最低,但 P2、P3 处理间差异不显著。醋酸提取态是镉与二代磷酸盐结合的形态,磷酸盐类吸附镉,使活性态镉数量减少,降低了镉在植株内的迁移,从而提高了植株对镉的耐受性。

相对而言,相同磷水平上,沈农 315 的氯化钠提取态和乙醇提取态镉含量均低于花粳 1417,而醋酸提取态及分配比例明显高于花粳 1417,盐酸提取态略有增加但变化不明显,两品种间变化不显著。

3 讨论

3.1 施磷量对水稻植株镉含量的影响

磷是植物生长必需的营养元素之一,参与植株碳水化合物、蛋白质的合成与代谢,可促进植株生长,增强植物抗逆能力^[14-15],从而在一定程度上缓解镉的毒害作用。在本实验中添加镉为 5 mg·kg⁻¹,缺磷条件下植株镉含量最高,此时对植株的毒害程度最大,随施

表2 不同磷水平水稻根系Cd形态含量

Table 2 Effects of different P levels on chemical forms of Cd in rice root

品种	磷处理水平	Cd/mg·kg ⁻¹ DW					回收率/%
		乙醇提取态	去离子水提取态	氯化钠提取态	醋酸提取态	盐酸提取态	
沈农 315	P0	1.415±0.028a (13.28)	1.596±0.159a (14.98)	5.505±0.28a (51.66)	1.857±0.096c (17.43)	0.283±0.043c (2.66)	91.13
	P1	0.698±0.031b (7.68)	1.576±0.051a (17.36)	4.218±0.181b (46.45)	2.312±0.161b (25.46)	0.277±0.021ab (3.05)	93.27
	P2	0.440±0.061c (5.19)	1.579±0.034a (18.64)	3.535±0.068c (41.71)	2.640±0.073a (31.15)	0.281±0.008a (3.31)	95.77
	P3	0.347±0.011d (4.21)	1.613±0.043a (19.54)	3.301±0.095c (40.00)	2.704±0.046a (32.77)	0.287±0.031a (3.48)	97.26
花粳 1417	P0	1.449±0.180a (14.66)	1.349±0.060a (13.65)	5.513±0.148a (55.78)	1.370±0.123c (13.87)	0.202±0.023a (2.04)	96.07
	P1	0.745±0.048b (9.11)	1.435±0.025a (17.54)	4.270±0.301b (52.18)	1.523±0.151b (18.61)	0.210±0.006a (2.56)	97.26
	P2	0.493±0.105c (6.76)	1.413±0.052a (19.38)	3.567±0.0177c (48.91)	1.619±0.101a (22.20)	0.200±0.019a (3.75)	94.51
	P3	0.422±0.146c (6.00)	1.449±0.086a (20.61)	3.333±0.243c (47.39)	1.638±0.111a (23.29)	0.191±0.023a (2.71)	95.08

磷量增加,两品种水稻各部位的镉含量逐渐降低,说明施磷对缓解植株镉毒害有一定的作用。在磷为 900 mg·kg⁻¹ 时镉含量降至最低,但与磷为 450 mg·kg⁻¹ 时差异不显著。这与一些学者的研究结果不尽相同:董善辉等^[16]研究发现,当施磷量为 450 mg·kg⁻¹ 时,水稻各部位镉含量均达到最低值;Singh^[17]发现常量磷供应下燕麦和油菜的镉含量不受磷影响,但在高磷水平下,植株体内的镉含量明显上升;高超等^[18]研究施用磷酸钙(SSP)和磷酸二铵(DAP)对水稻镉含量的影响,结果表明镉随磷施用量增加而减少,在磷为 900 mg·kg⁻¹ 时镉含量最低。

3.2 施磷量对水稻亚细胞镉含量的影响

水稻主要通过细胞壁、细胞可溶部分束缚和固持植株中镉来达到缓解重金属毒害的作用。刘清泉等^[19]认为,在细胞壁中镉含量最高,是因为细胞壁中含有大量的负电荷基团,这些基团通过与带正电荷的重金属离子沉淀络合,使大部分镉被束缚在细胞壁中。在磷供应充足情况下,植株细胞壁多糖含量降低从而减少与重金属的结合位点^[20],进而提高植株金属耐性。磷与镉在植株细胞壁形成金属螯合物,减少了 Cd²⁺在木质部的长距离输送,降低了向地上部的迁移率^[21]。所以随着施磷量的增加植株细胞壁的镉含量所占比例也会增加。本实验得出水稻亚细胞各组分镉含量为细胞壁>细胞可溶部分>细胞器,与前人研究结果一致^[3,7,14]。水稻根及茎叶亚细胞镉含量变化趋势与水稻镉全量保持一致。

3.3 施磷量对水稻镉化学结合形态的影响

水稻体内的镉以不同的化学结合形态存在于植株的不同部位^[3],其不同的化学形态可以反映镉的不同活性、毒性、迁移能力以及与基质分离的难易程度^[22]。一般而言,植株中的镉主要以氯化钠结合形态存在,因为镉对蛋白质或其他有机化合物中巯基有很强的亲和力^[23],在本实验中也表现出镉在水稻内主要以氯化钠提取态存在。当磷浓度增加时,沈农 315、花粳 1417 的总提取态下降,具有高迁移活性的乙醇提取态、氯化钠提取态不断降低,占比也不断减少,而迁移活性较弱的醋酸提取态及盐酸提取态有所增加;去离子水提取态的有机酸盐和金属一代磷酸盐可与镉在原生质膜表面的结合位置上形成螯合物^[24],从而限制镉在水稻内迁移性,因此随磷酸盐增加镉去离子提取态逐渐增加。两品种间存在镉含量变化的显著差异,则可能是由于两种水稻存在基因型上的差异亦或是对磷的吸收利用效率的差异^[25]。

4 结论

(1)两品种水稻根系及茎叶的镉含量随施磷量的增加呈现逐渐降低的趋势,降低幅度逐渐减缓,当磷为 900 mg·kg⁻¹ 时镉含量最低,但与磷为 450 mg·kg⁻¹ 时差异不显著。沈农 315 主要将镉富集在根部,花粳 1417 的镉向地上部迁移较多。

(2)水稻根与茎叶亚细胞各组分镉的分布为细胞壁>细胞可溶部分>细胞器。磷浓度越高,镉在细胞

壁的分配比例越多,细胞器比例越少。沈农 315 将更多的镉束缚在根细胞壁,减少了镉向地上部的转运。花粳 1417 细胞器镉比例较高。

(3)水稻镉的化学结合形态分配比例呈现为氯化钠提取态>醋酸提取态>去离子水提取态>乙醇提取态>盐酸提取态。随着磷的增加镉的氯化钠提取态、乙醇提取态比例逐渐降低,醋酸提取态、去离子水提取态比例逐渐增加,盐酸提取态比例略有增加但变化不明显。沈农 315 的氯化钠提取态比例显著低于花粳 1417,而醋酸提取态比例显著高于花粳 1417。

参考文献:

- [1] 区惠平,周柳强,刘昔辉,等.不同施磷量对土壤-玉米系统中镉生物有效性的影响[J].生态环境学报,2013,22(7):1220-1225.
OU Hui-ping, ZHOU Liu-qiang, LIU Xi-hui, et al. Effect of phosphate fertilizer on phytoavailability of cadmium in soil-corn system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7): 1220-1225.
- [2] 王凯,徐世龙,杨远柱,等.水稻镉吸收与转运机理研究进展[J].作物研究,2014,28(8):926-930.
WANG Kai, XU Shi-long, YANG Yuan-zhu, et al. Research progress on mechanism of cadmium uptake and translocation in rice[J]. *Crop Research*, 2014, 28(8): 926-930.
- [3] 于辉,杨中艺,杨知建,等.不同类型镉积累水稻细胞镉化学形态及亚细胞和分子分布[J].应用生态学报,2008,19(10):2221-2226.
YU Hui, YANG Zhong-yi, YANG Zhi-jian, et al. Chemical forms and subcellular and molecular distribution of Cd in two Cd-accumulation rice genotypes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2221-2226.
- [4] Jiang H M, Yang J C, Zhang J F. Effects of external phosphorus on the cell ultrastructure and the chlorophyll content of maize under cadmium and zinc stress[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(3): 750-756.
- [5] 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.
- [6] 张雯.硫硒交互对水稻幼苗镉累积和毒害的影响机制研究[D].上海:华东理工大学,2014:12-26.
ZHANG Wen. Sulfur selenium interaction on Cd accumulation and toxicity in rice seedlings effect mechanism research[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014: 12-26.
- [7] 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.
- [8] 王艳丽,王京,刘国顺,等.磷胁迫对烤烟高亲和磷转运蛋白基因表达及磷素吸收利用的影响[J].西北植物学报,2015,35(7):1403-1408.
WANG Yan-li, WANG Jing, LIU Guo-shun, et al. Expression of high-affinity phosphate transporter genes, phosphorus absorption and utilization in flue-cured tobacco under deficient phosphorus stress[J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2015, 35(7): 1403-1408.
- [9] Tu C, Zheng C R, Chert H M. Effect of applying chemical fertilizers on forms of lead and cadmium in red soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(1/2): 133-138.
- [10] Sorial M E. Alleviation of the adverse effects of lead and cadmium on growth and chemical changes of pea plant by phosphorus and calcium treatments[J]. *Journal of Pest Control and Environmental Sciences*, 2001, 9(1): 161-194.
- [11] 杨志敏,郑绍健,胡霏堂.不同磷水平下植物体内镉的积累、化学形态及生理特性[J].应用与环境生物学报,2000,6(2):121-126.
YANG Zhi-min, ZHENG Shao-jian, HU Ai-tang. Accumulation, chemical forms and physiological characterization of cadmium in plants affected by phosphorus[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2000, 6(2): 121-126.
- [12] Weigel J J, Jager H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plant[J]. *Plant Physiology*, 1980, 65: 480-482.
- [13] 王芳,丁杉,张春华,等.不同镉耐性水稻非蛋白巯基及镉的亚细胞和分子分布[J].农业环境科学学报,2010,29(4):625-629.
WANG Fang, DING Shan, ZHANG Chun-hua, et al. Non-protein thiols, subcellular and molecular distribution of cadmium in two rice cultivars with difference tolerance[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4): 625-629.
- [14] Clabeaux B L, Navarro D A G, Aga D S, et al. Cd tolerance and accumulation in the aquatic macrophyte, *Chara australis*: Potential use for charophytes in phytoremediation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(12): 5332-5338.
- [15] 刘昭兵,纪雄辉,彭华,等.磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J].应用生态学报,2012,23(6):1585-1590.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1585-1590.
- [16] 董善辉,李军,赵梅.磷对镉污染土壤中水稻吸收积累镉的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(9):39-42.
DONG Shan-hui, LI Jun, ZHAO Mei. Influence of phosphate application on rice absorbing and accumulation of Cd in Cd polluted paddy soil[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(9): 39-42.
- [17] Singh B P. Cadmium and fluoride uptake by oats and rape from phosphorus fertilizers in two different soil[J]. *Norwegian J Agric Sci*, 1990, 4: 239-250.
- [18] 高超,聂洪光,聂帅.磷对镉胁迫下水稻亚细胞分布的影响[J].农业科技与装备,2014(8):5-6.
GAO Chao, NIE Hong-guang, NIE Shuai. Effects of different phosphorus on subcellular distribution under Cd stress[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2014(8): 5-6.
- [19] 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.
- [20] 黄文方, 陈晓阳, 邢承华, 等. 磷对水稻耐铝性及根尖细胞壁组分的影响[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(2): 161-167.
- HUANG Wen-fang, CHEN Xiao-yang, XING Cheng-hua, et al. Effects of phosphorous on aluminum tolerance and cell wall polysaccharide components in rice root tips[J]. *Chin J Rice Sci*, 2013, 27(2): 161-167.
- [21] 刘 亮, 王桂萍, 沈振国. 镉胁迫下磷供应对芥菜生长和镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(6): 1429-1435.
- LIU Liang, WANG Gui-ping, SHEN Zhen-guo. Effects of phosphorus supply on growth and cadmium uptake of mustard under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(6): 1429-1435.
- [22] 杨志敏, 郑绍健, 胡霭堂. 不同磷水平和介质 pH 对玉米和小麦镉积累的影响[J]. 南京农业大学学报, 1999, 22(1): 45-50.
- YANG Zhi-min, ZHENG Shao-jian, HU Ai-tang. Effects of different levels of P supply and pH on the content of cadmium in corn and wheat plants[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, 22(1): 45-50.
- [23] Alarcón A L, Madrid R, Romojaro F, et al. Calcium forms in leaves of muskmelon plants grown with different calcium compounds[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21(9): 1897-1912.
- [24] 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 等. 农作物对镉毒害的耐性机理探讨[J]. 应用生态学报, 1995, 6(1): 87-91.
- YANG Ju-rong, HE Jian-qun, ZHANG Guo-xiang, et al. Tolerance mechanism of crops to Cd pollution[J]. *Chinese Journal of Applied ecology*, 1995, 6(1): 87-91.
- [25] Wissuwa M, Ae N. Genotypic variation for tolerance to phosphorus deficiency in rice and the potential for its exploitation in rice improvement [J]. *Plant Breeding*, 2001, 120: 43-48.