

水稻镉离子流速的基因型差异及其与镉积累量的关系研究

韩立娜^{1,2}, 居学海², 张长波², 宋正国², 王景安^{1*}, 刘仲齐^{1,2}

(1.天津市动植物抗性重点实验室 天津师范大学生命科学学院, 天津 300387; 2.农业部环境保护科研监测所生态毒理与环境修复研究中心, 天津 300191)

摘要:为了研究水稻镉(Cd)积累量与其流速之间的关系,采用非损伤微测技术对四种基因型水稻根系不同部位和根茎维管束组织中的镉离子(Cd^{2+})流速进行了测定。结果表明,根系不同部位的 Cd^{2+} 流速存在显著差异,伸长区的 Cd^{2+} 流速显著大于根冠,根毛区和根毛,且在基因型间存在明显差异。根系伸长区维管束组织的最大 Cd^{2+} 流速比其表皮细胞的流速大1倍以上,基因型间的差异较小。茎秆维管束组织中的 Cd^{2+} 流速在基因型间的差异非常显著,T优705各部位的 Cd^{2+} 流速都明显大于其他品种,且稳定性较好,致使其根系和地上部的Cd积累量也显著大于其他品种。根茎维管束组织中的 Cd^{2+} 流速能够准确地反映不同水稻品种转运和积累Cd的潜力。

关键词:水稻; Cd^{2+} 流速;Cd积累量;遗传差异;维管束组织

中图分类号:S511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)01-0037-06 **doi:**10.11654/jaes.2014.01.004

Genotypic Variation of Cd^{2+} Flux and Its Relationship with Cd Accumulation in Rice Plant

HAN Li-na^{1,2}, JU Xue-hai², ZHANG Chang-bo², SONG Zheng-guo², WANG Jing-an^{1*}, LIU Zhong-qi^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, College of Life Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Centre for Research in Ecotoxicology and Environmental Remediation, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Cadmium flux in plants varies among different genotypes. A study was conducted to measure the Cd^{2+} flux rate (CFR) in different root regions as well as vascular bundle tissues of roots and stems of four rice (*Oryza Sativa*) genotypes using a Non-invasive Micro-test Technique (NMT). The CFR in rice roots had significant differences among different root regions and genotypes. It was obviously greater in the elongation region of root than in the root cap, root hair region and root hairs. Although the maximum CFR was over 2 time greater in vascular bundle tissue of root elongation region than in the epidermal cells of root, its variation among genotypes was not significant. However, the CFR in the vascular bundle tissues of stem showed a significant genotypic variation. The CFR in each part of the variety "T-you 705" was apparently higher and more stable than that in other genotypes, resulting in significantly higher Cd accumulations in roots and shoots of "T-you 705". Therefore, the CFR in the vascular bundle tissues of roots and stems could be used as an accurate indicator of Cd transport and accumulation potential in rice varieties.

Keywords: rice; Cd^{2+} flux; Cd accumulation; genetic variation; vascular tissue

收稿日期: 2013-05-31

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(农业部环境保护科研监测所)资助项目(2013-szjj-lzq-04); 2013年农业生态环境保护项目(2013-072)

作者简介: 韩立娜(1988—),女,河北卢龙人,硕士研究生,主要从事植物营养学研究。E-mail: hanlina0528@163.com

* 通信作者: 王景安 E-mail: jingnanwang899@126.com

Cd 是生物毒性最强的重金属之一,严重影响植物的生长发育。作为植物生长的非必需元素,Cd 能够通过其根系吸收并由食物链富集,严重影响人类健康^[1-2]。水稻(*Oryza Sativa* L.)作为我国乃至世界的主要粮食作物对 Cd 具有较强的吸收和富集能力^[3],根系吸收水分和无机盐的同时也将 Cd 和其他重金属吸收体内,其吸收的 Cd 大部分积累在根系中,少量转运到地上部分,因此茎秆中的 Cd 积累量显著低于根系,同时基因型之间存在显著差异^[4-7]。水稻糙米中 Cd 的吸收量与土壤中的 Cd 含量及茎秆中 Cd 的积累量密切相关^[8-9],木质部的 Cd 转运能力是决定 Cd 在在地上部及籽粒中 Cd 含量的主要因素^[10-11]。

在污染环境中,水稻各部位吸收和积累 Cd 的能力存在很大差异,且受土壤有机质、水分管理等一系列因素的影响^[12-13]。传统的研究方法是对水稻植株进行长时间的 Cd 胁迫,然后测定分析 Cd 积累量在器官和品种之间的差异,由于试验周期长,易受不可控因素的干扰。运用非损伤微测技术能够在正常生理状态下快速准确地测量离子流速的变化,直观地反映植物对离子的吸收情况。研究表明,杨树(*Populus*)的 Na^+ 、 Cl^- 、 H^+ 流速与其耐盐能力密切相关^[14]。高积累型东南景天(*Sedum alfredii* Hance)的根系、原生质体、液泡中的 Cd^{2+} 流速显著高于低积累型^[15],说明离子流速与植物体内的离子积累量之间存在着必然的联系。目前有关水稻 Cd^{2+} 流速与 Cd 积累关系的研究却鲜有报道。因此,本文以四种不同的水稻品种为材料,对根、茎不同部位的 Cd^{2+} 流速的遗传差异及其与 Cd 转运积累的关系进行了研究。

1 材料与方法

1.1 植物材料和生长条件

选取 T 优 705、II 优 416、湘粳 42、湘粳 24 等湖南省大面积种植的水稻品种进行试验。挑取健康饱满的种子用 75% 酒精浸泡 5 min,蒸馏水冲洗 3 次,再用 5% NaClO 浸泡 10 min,蒸馏水冲洗 3 次,播种于 9 cm 的培养皿中,30 °C 催芽 48 h 露白后播种于珍珠岩、蛭石的育苗盘中。挑取长势一致的 6 叶期幼苗分别在 Hoagland 营养液和含有 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{Cd}^{2+}$ 的 Hoagland 营养液(添加 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)进行水培试验,每个处理 3 次重复,每个重复 8 株,每 5 d 更换 1 次营养液,处理 21 d 后收获,将水稻用自来水冲洗,再用蒸馏水冲洗后于 105 °C 杀青 20 min,75 °C 烘干至恒重,磨细后储存,用于测定样品中 Cd 含量。

1.2 Cd^{2+} 流速测定

Cd^{2+} 流速参照 Sun^[15] 的方法。选择出苗后 10 d 的湘粳 24 水稻幼苗,用去离子水冲洗根系表面,然后将其根系浸泡在含 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ 、 $50 \mu\text{molCaCl}_2$ 的处理液中,分别胁迫 10、20、30、40 min 后,将其根系转移到含有 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ 、 $50 \mu\text{molCaCl}_2$ 测试液的塑料培养皿中,利用非损伤微测系统(SIET system BIO-001A; Younger USA Sci. & Tech. Corp.)测定根冠、伸长区、根毛区和根毛的 Cd^{2+} 流速。将切除根冠的根系和切除根系的幼茎分别浸泡在含 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ 、 $50 \mu\text{molCaCl}_2$ 的处理液中,分别胁迫 10、20、30、40 min 后,转移到测试液($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ 、 $50 \mu\text{molCaCl}_2$)中测定维管束组织中的 Cd^{2+} 流速。其他品种只测定根毛伸长区、伸长区维管束和茎基维管束组织中的 Cd^{2+} 流速。标准液校正斜率在 $29 \pm 3 \text{ mV}$ 的范围时进行流速测定,每次测定 10 min,每个处理重复 5 株。 Cd^{2+} 流速数据用旭月公司自行开发的软件转化成 Cd^{2+} 流速 ($\text{pmol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (<http://www.xuyue.net/image flux>)。

1.3 Cd 含量测定

准确称取水稻样品 0.2000 g,加入 $\text{HNO}_3\text{:HClO}_4=4:1$ ^[14] 的混合液 10 mL,过夜采用平板消煮法,温度控制在 190 °C,消煮至溶液颜色变为无色冒白烟,最后蒸发至体积为 1 mL 左右,消煮完成后,定容到 50 mL,用原子吸收仪(AAS ZEE nit700)测定样品 Cd 含量。

1.4 数据分析

采用 SPSS17.0 进行 Duncan 检验及 OriginPro8 作图。

2 结果与分析

2.1 水稻伸长区 Cd^{2+} 流速的基因型差异

根系是植物吸收营养和水分的主要器官,当暴露于 Cd 环境中时,根系不同部位的 Cd^{2+} 流速存在显著差异。本实验中根系伸长区的 Cd^{2+} 流速均是负值,处理 10 min 后 Cd^{2+} 流速平均值最大达到 $-70.74 \pm 9.31 \text{ pmol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,而后随着时间的延长, Cd^{2+} 的吸收量缓慢降低(图 1);在 20~30 min 的处理时间内, Cd^{2+} 流速的变化不明显,未达到显著差异。而根毛和根毛区的 Cd^{2+} 流速出现外排现象,可能是由于根毛区属于分化成熟的组织,40 min 的处理时间不足以使根毛区的伤流完全渗出,于是出现 Cd^{2+} 随伤流液一起外排的现象。因此,本研究把胁迫 10 min 和 20 min 后伸长区的离子流速分别作为反映水稻最大吸收能力和稳定吸

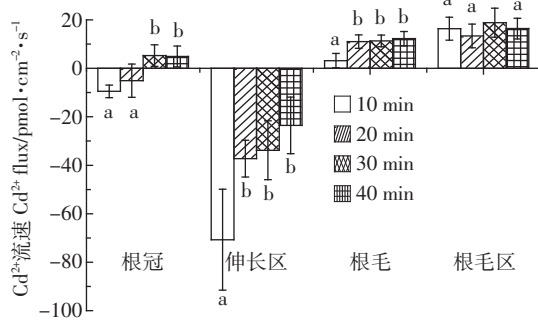


图1 不同Cd胁迫时间(10~40 min)条件下水稻根系不同部位的Cd²⁺流速

Figure 1 The Cd²⁺ flux rate in different regions of rice roots at different time of Cd stress (10~40 min)

收能力的指标,据此来比较基因型间Cd²⁺流速的遗传差异。

不同基因型伸长区的Cd²⁺流速均与时间呈负相关(图2)。T优705根系伸长区的最大Cd²⁺流速和稳定流速均高于其他水稻品种。在处理10 min后,其伸长区的Cd²⁺流速达到 -90.14 ± 6.81 pmol·cm⁻²·s⁻¹,与Ⅱ优416、湘粳42之间存在显著差异,与湘粳24差异未达到显著水平。处理20 min后T优705的Cd²⁺流速下降到 -62.00 ± 5.39 pmol·cm⁻²·s⁻¹,依然显著高于其他3个品种。处理时间从10 min延长到20 min后,T优705的Cd²⁺流速下降了31.22%,Ⅱ优416、湘粳42、湘粳24的流速分别下降了57.34%、59.88%、47.29%。

2.2 水稻根系维管束和茎基部维管束Cd²⁺流速的基因型差异

根系的维管束组织吸收Cd²⁺流速较表皮细胞的流速普遍增大一倍以上(图3),伸长区维管束Cd²⁺的

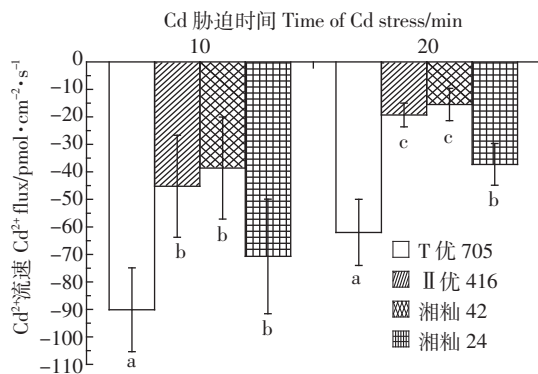
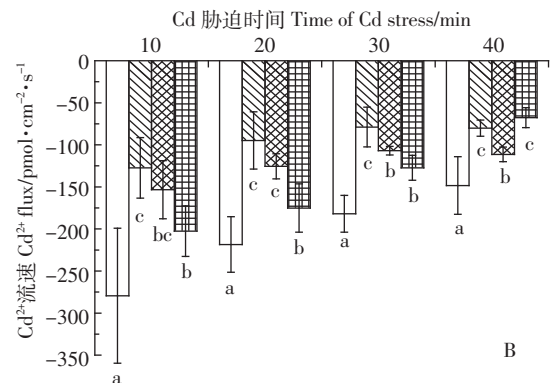
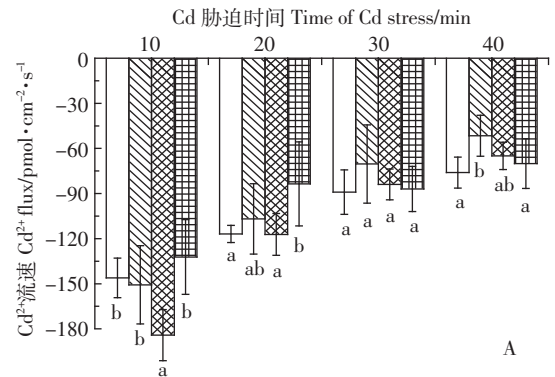


图2 不同水稻品种根系伸长区Cd²⁺流速在基因型间的差异
Figure 2 Genotypic variation of mean Cd²⁺ flux rate in elongation region of rice roots

最大流速和稳定流速在不同基因型之间的差异并不十分明显。但是在Cd²⁺流速随着胁迫时间的延长而下降的幅度在基因型间有很大的差异,处理30 min时T优705的流速只下降了39.00%,而Ⅱ优416、湘粳42的流速分别下降了53.33%、54.45%。



□ T优705 ▨ Ⅱ优416 ▩ 湘粳42 ■ 湘粳24

图3 不同水稻品种根系伸长区维管束组织Cd²⁺流速(A)和茎基维管束组织Cd²⁺流速(B)的基因型差异

Figure 3 Genotypic variation of mean Cd²⁺ flux rate in vascular bundle tissues of root elongation region(A) and shoots(B) of rice

与根系维管束组织不同,茎基维管束组织的Cd²⁺流速在基因型之间有显著差异;随着处理时间的延长,四种水稻茎基维管束均出现吸收减慢的趋势(图3B)。在不同的胁迫时间段,T优705茎基的Cd²⁺流速均显著高于其他基因型。湘粳24在Cd胁迫40 min后的Cd²⁺流速下降了66.59%,下降幅度较大,而Ⅱ优416、湘粳42的Cd²⁺流速在30 min后达到稳定。

在相同的胁迫时间内,多数品种茎基维管束的Cd²⁺流速明显大于根系维管束的流速,茎基维管束的Cd²⁺流速在基因型之间的差异更加明显。两类维管束组织的耐Cd能力也有明显的不同。

2.3 根系及地上 Cd 积累量在基因型间的遗传差异。

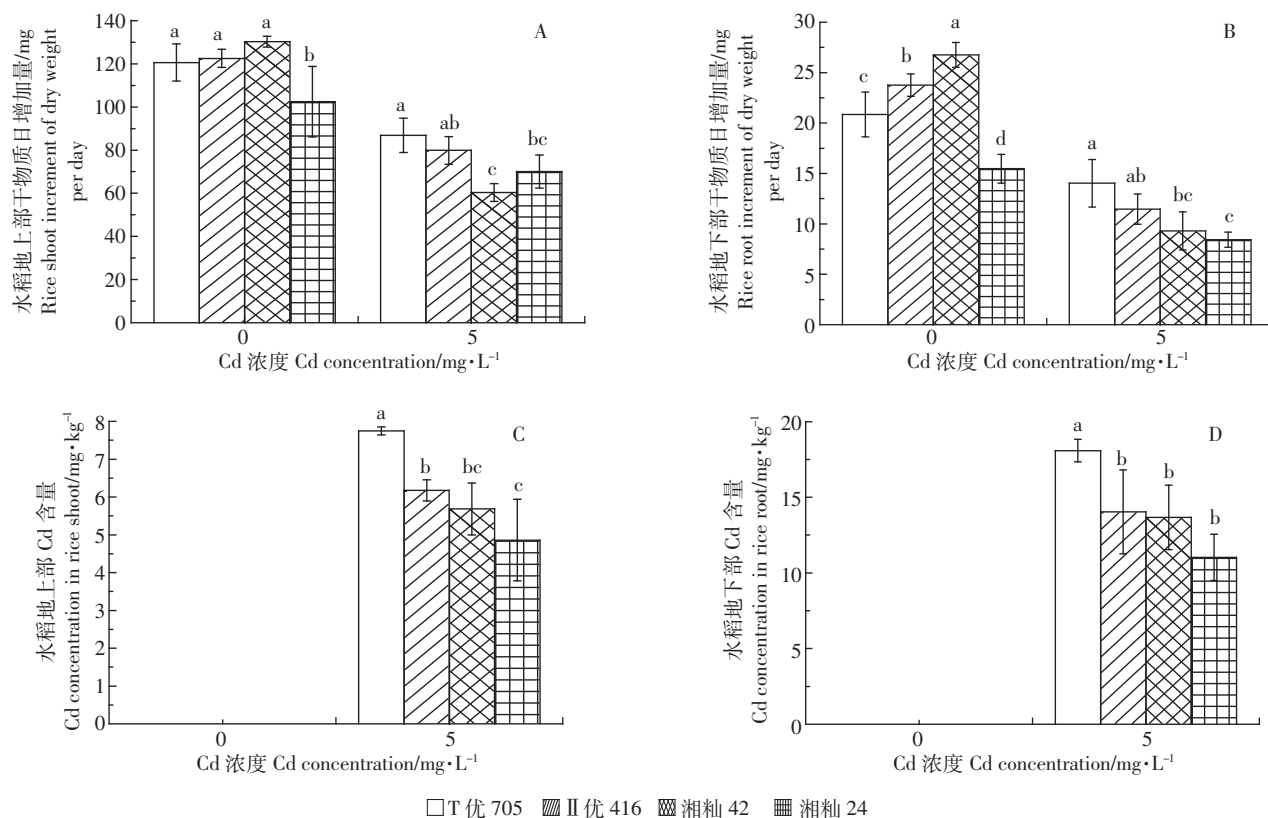
Cd 胁迫下四种水稻的生物量日增加量与对照相比均明显下降,且地上增加量均比地下明显(图 4A)。在没有 Cd 胁迫条件下 T 优 705 与 II 优 416、湘粳 42 地上部分的增加量差异不显著,但是在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的胁迫下 T 优 705 地下、地上部分的增加量均最大,与其他基因型之间存在显著差异,表明在胁迫环境下 T 优 705 的 Cd 耐性更强。

根系作为首先接触重金属胁迫的器官,将吸收的 Cd 一部分储存在植物根系细胞中,一部分则转移到植株地上部分。在含 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的营养液中培养 3 周后,四种水稻根系的 Cd 含量显著高于地上部分(图 4B)。T 优 705 根系的 Cd 含量显著高于其他 3 个品种。地上部的 Cd 积累量在基因型间的差异更加明显, T 优 705 的 Cd 积累量最高,湘粳 24 的积累量最低。说明通过根系维管束组织和茎基维管束组织的主动转运后,基因型间 Cd 积累能力的差异在地上部分表现得更加充分。

3 讨论

3.1 水稻根系吸收 Cd^{2+} 的主要部位及方式

根系通过被动扩散和主动吸收两种方式吸收营养和水分。根毛区是根系行使吸收功能的主要区域^[17]。当外界的 Cd^{2+} 浓度超过根系内部的 Cd^{2+} 浓度时, Cd^{2+} 就会顺着化学梯度流入到根系内;与此同时,根系细胞能够通过自身的代谢途径主动吸收环境中的 Cd^{2+} 。非损伤微测技术能在不伤害细胞的情况下测定其主动吸收离子的速率,能够客观地反映细胞主动吸收离子的能力。本研究发现,水稻根系伸长区的表皮细胞主动吸收 Cd^{2+} 的能力最强,且在不同基因型间的差异最大。在碱蓬和大麦中也发现根冠至伸长区的 Cd 离子流速最快^[18-19]。随着胁迫时间的延长,伸长区细胞吸收 Cd^{2+} 速度缓慢下降,下降幅度在基因型间表现出显著差异。T 优 705 的最大吸收速率和稳定吸收速率都显著高于其他品种,说明在 Cd 胁迫条件下该品种吸收转运 Cd 的能力较强。在含 $\text{Cd}^{2+} 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的营养液



Different letters indicate a significant difference among genotypes at 5% level ($P < 0.05$). The same below

图 4 不同水稻品种日增加量(A、B)和 Cd 含量(C、D)的基因型差异

Figure 4 Genotypic variation of biomass diurnal increment(A, B) and Cd concentrations(C, D) in roots and shoots of rice

中培养 21 d 后, T 优 705 根系中的 Cd 含量显著高于其他品种, 进一步说明该品种在较短时间内就能将环境中 Cd^{2+} 及时转运到根系中累积起来, 并成为向地上部分转运的缓冲库。其他 3 个品种根系伸长区的 Cd^{2+} 流速虽然表现出明显差异, 但根系内 Cd 积累量的差异并未达到显著水平。这可能是因为这 3 个品种的 Cd^{2+} 吸收流速较低, 且随着胁迫时间的延长而急剧衰减, 致使被动扩散成为它们根系中积累 Cd 的主要途径。当主动吸收的贡献率较低时, 水稻根系中的 Cd 积累量主要取决于环境因素。

3.2 水稻维管束中 Cd^{2+} 流速在基因型间的差异

水稻地上部分 Cd 的累积受到根系吸收、根细胞液泡的区室化和滞留、木质部的装载和运输等环节的影响^[20], 木质部的运输是水稻积累 Cd 的重要一环。本研究表明, 水稻根系伸长区维管束组织中的 Cd^{2+} 流速显著高于表皮细胞的 Cd^{2+} 流速, 说明维管束组织主动吸收能力更强。和根系维管束组织相比, 茎基维管束的最大 Cd^{2+} 流速更大, 在品种之间的差异更明显, 对 Cd 胁迫的反应更敏感。在测试的 4 个品种中, T 优 705 的 Cd^{2+} 流速显著高于其他基因型, 在相同胁迫时间内, T 优 705 根系和茎基维管束组织中的 Cd^{2+} 流速下降幅度最小, 说明 T 优 705 的维管束组织转运 Cd 的能力最强。本研究发现在相同的 Cd 胁迫环境中, T 优 705 的根系和地上部的 Cd 积累量都显著地高于其他品种, 且干物质的日增加量(图 4A、图 4B)也显著高于其他的品种, 说明该品种确实具有较强的耐 Cd 能力, 因而能够把根系中的 Cd 有效地转运到地上部分。

3.3 Cd^{2+} 流速与 Cd 积累之间的关系

水稻吸收的 Cd 来源于外界, 其积累量也主要取决于外界的 Cd 浓度^[21], 但是基因型之间存在显著差异^[4-7]。这种差异成为筛选低积累品种的主要依据。由于积累量由主动运输能力和被动吸收能力共同决定, 在高污染环境中, 通过被动吸收摄入的 Cd 往往大于主动吸收数量, 致使环境干扰掩盖了不同基因型间主动吸收能力的遗传差异, 降低了低积累品种的选育效率, 因此前人在研究水稻品种之间差异时存在着许多不一致的地方^[16, 22]。 Cd^{2+} 流速直接反应了细胞的主动吸收能力, 其大小和衰减幅度是衡量细胞转运效率和抗逆能力的客观指标^[15]。本研究证明, T 优 705 根系伸长区以及根茎维管束组织中的 Cd^{2+} 流速显著高于其他品种, 其流速随胁迫时间而下降的幅度明显小于其他品种, 因此, 其主动吸收和累积 Cd

的能力最强, 致使其根系和地上部的 Cd 积累量最大。地上部分 Cd 积累量最低的品种为湘粳 24, 其维管束组织中的 Cd^{2+} 流速容易随着胁迫时间的延长而急剧下降, 这可能是敏感型品种降低体内 Cd 积累量的一种防卫机制。由此可见, 以 Cd^{2+} 流速为依据, 从流速慢且稳定性差的品种中容易筛选出地上部 Cd 含量低的基因型。

4 结论

水稻根系不同部位的 Cd^{2+} 流速存在显著差异, 伸长区的 Cd^{2+} 流速显著地大于根冠区, 根茎维管束组织的 Cd^{2+} 流速显著大于根系伸长区。茎基维管束组织中 Cd^{2+} 流速在基因型间的差异非常显著。T 优 705 各部位的 Cd^{2+} 流速都明显大于其他品种, 其流速随胁迫时间延长而下降的幅度也显著小于其他品种, 这是其根系和地上部的 Cd 积累量显著大于其他品种的主要原因。因此, 根据根茎维管束组织中的 Cd^{2+} 流速可以准确地鉴别不同水稻品种转运和积累 Cd 的潜力。

参考文献:

- [1] 龚伟群, 潘根兴. 中国水稻生产中 Cd 吸收及其健康风险的有关问题[J]. 科技导报, 2006, 24(5): 43-48.
GONG Wei-qun, PAN Gen-xing. Issues of grain Cd uptake and the potential health risk of rice production sector of China[J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(5): 43-48.
- [2] 刘侯俊, 梁吉哲, 韩晓日, 等. 东北地区不同水稻品种对 Cd 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.
- [3] Chaney R L, Reeves P G, RYAN J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biomaterials*, 2004, 17: 549-553.
- [4] 曾 翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 水稻植株镉积累分配的差异[J]. 作物研究, 2006, 4: 342-344.
ZENG Xiang, ZHANG Yu-zhu, WANG Kai-rong, et al. Genotype difference in accumulation and distribution of cadmium in rice[J]. *Plant Crop Research*, 2006, 4: 342-344.
- [5] 杨春刚, 廖西元, 张秀福, 等. 不同基因型水稻籽粒镉积累的差异[J]. 中国水稻科学, 2006, 20: 660-662.
YANG Chun-gang, LIAO Xi-yuan, ZHANG Xiu-fu, et al. Genotypic difference in cadmium accumulation in brown rice[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2006, 20: 660-662.
- [6] Ueno D, Koyama E, Yamaji N, et al. Physiological, genetic, and molecular characterization of a high-Cd-accumulating rice cultivar Jarjan[J]. *J Exp Bot*, 2011, 62: 2265-2267.

- [7] Nocito F F, Lancilli C, Dendena B, et al. Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation[J]. *Plant Cell and Environment*, 2011, 34:994-1008.
- [8] He J Y, Zhu C, Ren Y F, et al. Genotypic variation in grain cadmium concentration of lowland rice[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2006, 169:711-716.
- [9] 叶新新, 周艳丽, 孙波. 适于轻度 Cd、As 污染土壤种植的水稻品种筛选[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6):1082-1088.
YE Xin-xin, ZHOU Yan-li, SUN Bo. Screening of suitable rice cultivars for the adaptation to lightly contaminated soil with Cd and As [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6):1082-1088.
- [10] Uruguchi 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]. *J Exp Bot*, 2009, 60(9):2766-2688.
- [11] Uruguchi S, Kamiya T, Sakamoto A. Low-affinity cation transporter (OsLCT1) regulates cadmium transport into rice grains[J]. *PNAS*, 2011, 108(52):20959-20964.
- [12] 黄东芬, 溪岭林, 王志琴, 等. 结实期灌溉方式对水稻品质和不同器官镉浓度与分配的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(3):456-464.
HUANG Dong-fen, Xi Ling-lin, WANG Zhi-qin, et al. Effects of irrigation regimes during grain filling on grain quality and the concentration and distribution of cadmium in different organs of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(3):456-464.
- [13] 江巧君, 周琴, 韩亮亮, 等. 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻吸收和分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1):9-14.
JIANG Qiao-jun, ZHOU Qin, HAN Liang-liang, et al. Effect of organic manure on uptake and distribution of cadmium in different rice genotypes under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1):9-14.
- [14] Sun J, Chen S L, Dai S X, et al. NaCl-induced alternations of cellular and tissue ion fluxes in roots of salt-resistant and salt-sensitive poplar species[J]. *Plant Physiology*, 2009, 149:1141-1153.
- [15] Sun J, Wang R G, Liu Z Q, et al. Non-invasive microelectrode cadmium flux measurements reveal the spatial characteristics and real-time kinetics of cadmium transport in hyperaccumulator and nonhyperaccumulator ecotypes of *Sedum alfredii*[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2013, 170:355-359.
- [16] 李坤权, 刘建国, 陆小龙等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5):529-532.
LI Kun-quan, LIU Jian-guo, LU Xiao-long, et al. Uptake and distribution in different rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5):529-532.
- [17] Jungk A. Root hairs and acquisition of plant nutrients from soil[J]. *Plant Nut Soil Sci*, 2001, 164:121-129.
- [18] Li L Z, Liu X L, Peijnenburg W G M, et al. Pathways of cadmium fluxes in the root of the halophyte *Suaeda salsa*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 75:1-7.
- [19] Pinos M A, Shaff J E, Kochian L V, et al. Development, characterization, and application of a cadmium-selective micro-electrode for the measurement of cadmium fluxes in roots of *Thlaspi* species and wheat[J]. *Plant Physiol*, 1998, 116:1393-1401.
- [20] Clemen S, Michael G, Kramer U. A long way ahead: Understanding and engineering plant metal accumulation[J]. *Trend Plant Sci*, 2002, 7:309-315.
- [21] ZHANG Ren-nan, Zhao Chuan-yan, Lin Ji-jun et al. Relation between soil properties and selected heavy metal concentration in spring wheat (*Triticum aestivum*) grown in contaminated soils[J]. *Water, Air, Soil Pollution*, 2002, 133:205-213.
- [22] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄入风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3):112-115.
LI Zheng-wen, ZHANG Yan-ling, PAN Gen-xing, et al. Grain Contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environment Science*, 2003, 24(3):112-115.