

蔡秋玲, 林大松, 王 果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1028–1033.

CAI Qiu-ling, LIN Da-song, WANG Guo, et al. Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1028–1033.

不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析

蔡秋玲^{1,2}, 林大松², 王 果^{1*}, 王 迪^{2*}

(1. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘 要: 选取 84 个水稻品种在镉(Cd)中轻度污染农田上进行原位小区试验, 通过统计分析水稻 Cd 富集系数及转运系数, 探索具有相似产量与 Cd 富集能力的水稻品种各器官 Cd 的富集及 Cd 在土壤-水稻系统中转移特征, 比较不同类型水稻 Cd 富集与转运的差异。结果表明: 水稻糙米 Cd 富集系数范围为 0.10~0.78, 小区产量范围为 8.20~11.50 kg(以小区面积 3.5 m×3.5 m 计), 不同水稻品种产量与糙米 Cd 富集能力不存在显著相关性。以产量和糙米 Cd 富集系数为指标将所有水稻品种进行聚类分为高产高 Cd(组 1)、低产高 Cd(组 2)、高产低 Cd(组 3)和低产低 Cd(组 4)四组。水稻各器官 Cd 富集规律均为根系>茎>叶>糙米, Cd 由根系向上传递过程中, 含量越来越低。不同产量和富集能力的水稻类型的差异, 主要在于茎和叶的富集与转移。高产或高 Cd 品种有较强的将 Cd 从根转运到茎和从茎、叶转运到米的能力。低 Cd 水稻无论产量高低, 对各器官的 Cd 转运能力无显著影响。筛选、培育适合在中轻度污染区种植的高产低 Cd 水稻品种是可行的。在种植过程中控制茎的吸收与转运将对保障粮食安全生产具有重要意义。

关键词: 水稻; 品种; 镉; 富集系数; 转运系数; 产量

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)06-1028-06 doi:10.11654/jaes.2016.06.002

Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars

CAI Qiu-ling^{1,2}, LIN Da-song², WANG Guo^{1*}, WANG Di^{2*}

(1. College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350000, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: In-situ plot experiments were conducted to investigate characteristics of cadmium accumulation and transferring among various organs in 84 varieties of rice. Based on the interaction of production and Cd accumulation in brown rice, statistical differences analysis of accumulation and transfer factors were explored to study the feature of the Cd accumulation and transfer of rice. The results indicated that: The Cd accumulation factors(AF) of brown rice in all rice varieties were 0.10~0.78, and the area production were 8.20~11.50 kg (3.5 m×3.5 m). There is no significant correlation between the rice production and Cd AF of brown rice. Based on interaction of rice production and Cd AF of brown rice, all varieties were sorted by clustering analysis into four groups as high production with high Cd accumulation(group 1), low production with high Cd accumulation(group 2), high production and low Cd accumulation(group 3), low production and low Cd accumulation(group 4). Cd AF in different organs of all varieties followed the order of root>stem>leaf>brown rice, decreasing in the transfer process from root to shoot. The difference of rice types with different production and concentration mainly depended on the accumulation and transfer in the stem and leaf. Rice varieties with high production or high Cd accumulation had strong capacities to transfer Cd from root to stem and further to leaf and brown rice. Production had no significant effect on the transfer capacity of Cd among different organs for the rice varieties with low Cd accumulation. It is feasible to screen and cultivate rice varieties with high production and low Cd accumulation that are suitable to plant in the middle and light Cd contaminated area. Controlling the absorption and transportation of the stem and leaf for Cd in the rice planting will be of great significance to ensure the safety of food production.

Keywords: rice; cultivar; cadmium; accumulation factor; transfer factor; production

收稿日期: 2016-01-19

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项项目(201403014)

作者简介: 蔡秋玲(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事环境生态学研究。E-mail: qiulingcai928@126.com

* 通信作者: 王 果 E-mail: gwang572003@yahoo.com.cn; 王 迪 E-mail: wdaepi@163.com

土壤重金属引起的农田污染及食品安全隐患^[1],近几年成为备受关注的研究重点。水稻是我国重要的口粮作物,也是最易从土壤吸附重金属的作物之一。随着重金属在土壤中的不断累积及土壤酸化作用增强,水稻的重金属超标事件不断发生^[2],特别是重金属Cd。不同品种水稻的Cd富集能力存在差异,有研究表明不同水稻品种对Cd吸收差异使得其籽粒Cd的积累成倍增加^[3],主要原因是有毒重金属能够通过必需营养元素的离子通道进入植物体内^[4]。周歆^[5]和张标金^[6]等研究也证实不同类型的水稻籽粒Cd含量相差数倍。此外,Yu等^[7]发现在不同Cd浓度胁迫下,同一品种水稻籽粒Cd含量存在差异。说明水稻籽粒Cd含量的差异由遗传特性和土壤Cd浓度共同影响。近年来,随着水稻Cd富集能力研究的不断深入,发现这种差异的表现与水稻的生物量没有必然联系。不同品种水稻根系耐Cd的能力有所不同^[8],而且Cd从水稻根部向上转运的强度以及地上部向籽粒的输送速率也存在差异^[9]。这些因素共同影响着水稻品种间Cd富集的差异性。通过研究者的不断努力,发现水稻中存在许多与金属转运相关的蛋白家族^[10],在作物体内对Cd的迁移过程发挥了重要作用。

水稻籽粒Cd富集是一个复杂的生理过程。目前水稻吸收及迁移转化Cd的相关研究有很多,但在水稻各器官对籽粒Cd积累的贡献方面还没有系统的研究。因此,本研究选择在自然条件下种植84个水稻品种,筛选具有相似产量与Cd吸附特性的品种进行归类分组,研究不同类型水稻各器官Cd富集及各环节转运特征,探讨影响水稻籽粒Cd富集的重要因素,从而为高产低Cd水稻品种的筛选提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 土壤背景

本实验为小区试验,选点湖南省湘潭市水稻田。试验田常年种植双季稻,前作为早稻。土壤的基本理化性质所选指标均采用常规方法测定,测定结果见表1。

表 1 土壤的基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil used in the experiments

土壤类型	土壤肥力	pH 值	有机质/%	全氮/ g·kg ⁻¹	有效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	全 Cd 含量/ mg·kg ⁻¹
壤土	中等	5.94	5.12	3.28	16.37	160.2	0.62

1.2 植物材料

参试品种为适合湖南省种植的晚稻品种,共84个,编号及具体水稻品种名称见表2。

表 2 试验水稻材料编号及品种名称
Table 2 Codes and names of rice materials used in the experiments

编号	品种名称	编号	品种名称	编号	品种名称
R01	D 两优 311	R29	鹏优 8108	R57	隆晶优 2855
R02	盛泰 A×YC352	R30	深优 513	R58	088S×R608
R03	隆香优 97	R31	隆香优华占	R59	健优 111
R04	玖两优 47	R32	盛泰 A/PC626	R60	179S×P143
R05	深优 9559	R33	湘丰优 269	R61	玖两优 434
R06	33S×R305	R34	炳优 0117	R62	丰优华占
R07	炳优 2855	R35	潭两优 8751	R63	甬优 5550
R08	桃优香占	R36	恒丰优 777	R64	粘两优华 1
R09	耘两优软占	R37	炳优 503	R65	五丰 A×YC343
R10	六福优 900	R38	五优 311	R66	占两优 28
R11	深优 5620	R39	湘甬优华占	R67	湘宁优 3 号
R12	安丰优 0861	R40	早丰优航 1573	R68	建优 127
R13	创宇 9 号	R41	玖两优 801	R69	33S×R928
R14	HD9802S×R71	R42	岳优 3700	R70	皖稻 199
R15	永 3A×华占	R43	五丰优 5103	R71	33S×黄华占
R16	五丰优 33	R44	炳优 7615	R72	396A×华占
R17	鹏优 6377	R45	深优 126	R73	炳优 28
R18	六福优 585	R46	甬优 4540	R74	恒丰优华占
R19	玖两优 207	R47	634A×a-7	R75	炳优 665
R20	炳 1A×R67-35	R48	早丰优 0861	R76	荣优华占
R21	中青优 1 号	R49	钱 6 优 930	R77	农香 24
R22	H 优 277	R50	和丰优 6377	R78	两优 66
R23	H28A×7601	R51	33S×828	R79	安丰优 736
R24	安丰优 308	R52	建优 2 号	R80	隆晶优 3621
R25	炳优 1 号	R53	五丰 A×R661	R81	两优 274
R26	五丰优 5018	R54	五优 2588	R82	玖两优 1179
R27	玉丰 91	R55	黄软占	R83	金穗 128
R28	五丰 192	R56	C 两优 336	R84	236S×89

1.3 试验方法

试验品种(30 d 苗龄)于2014年7月23日移栽至水稻试验田,随机区组排列,四周设不少于5行的保护行。小区面积为3.5 m×3.5 m,株距和行距均为20 cm。田间栽培管理按常规措施进行,所有小区保持一致,期间未发生影响产量的病虫害,水稻于11月21日收获。

1.3.1 采集样品及测定

各小区按照五点采样法各采集一个混合水稻样品和土壤。水稻植株先后用自来水、蒸馏水清洗,将植株分为根、茎、叶、稻谷部分。稻谷风干称量为W₁,按农业部颁布《米质测定方法》(NY147—1988)出糙。所有采集样品110℃杀青后,70℃烘至恒重。然后粉碎,

过 60 目筛。样品中 Cd 含量采用 HNO_3 湿消解法,用 ICP-MS(型号:Agilent 7500 Series)测定。以国家标准物质 GBW10045(GSB-23)作为质控,保证数据真实性。土样经自然风干,去除杂质,粉碎过 100 目筛,测土壤 Cd 全量,用 ICP-MS(同上)测定,以 GSS8 标准物质为质控。

1.3.2 产量测定

分别收获试验田各小区水稻。将水稻用碾米机分为稻草与稻谷两部分,自然风干,稻谷称重为 W_2 ,记录。各小区稻谷总产量为: $W=W_1+W_2$ 。

1.4 数据处理

富集系数(AF_{A-B})=A 器官中重金属含量/土中重金属含量

转运系数(TF_{A-B})=B 器官中重金属含量/A 器官中该重金属含量

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据整理,运用 SPSS18.0 进行系统聚类、方差及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 水稻产量与 Cd 富集能力的相关性分析

本试验田为中轻度 Cd 污染区,Cd 对水稻各项生理指标及自然产量没有产生明显影响。84 个水稻品种的稻米 Cd 含量范围为 $0.04\sim 0.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明不同品种的水稻糙米 Cd 含量存在差异。为减少污染物空间差异性的影响,本研究对作物及相应根系土壤进行一对一采样。测得作物根系土壤 Cd 全量范围为 $0.39\sim 0.73\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但作物 Cd 含量与土壤含量不存在一一对应性。根据糙米及土壤 Cd 含量计算每个品种的糙米 Cd 富集系数,将其作为反映 Cd 富集能力的指标。计算得 Cd 富集系数范围为 $0.10\sim 0.78$,平均值为 0.28 ± 0.13 ,水稻的产量范围为 $8.20\sim 11.50\text{ kg}$ (以小区 $3.5\text{ m}\times 3.5\text{ m}$ 计),平均产量为 $(9.80\pm 0.51)\text{ kg}$ 。但水稻产量与糙米 Cd 富集系数之间不存在显著相关性(图 1)。

为进一步研究具有类似产量与 Cd 富集能力的水稻富集及转运特征,选取产量和 Cd 富集系数两个变量,按照最远邻元素分析的系统聚类方式,将所有水稻品种分为四组进行统计分析,水稻组别为高产高 Cd(组 1)、低产高 Cd(组 2)、高产低 Cd(组 3)和低产低 Cd(组 4)。分组后,通过对这两个变量进行新复极差比较,验证了组间具有显著差异(见表 3)。

2.2 不同特征水稻品种各器官 Cd 富集能力的差异性分析

分组统计水稻各器官的富集系数。从图 2 可知:

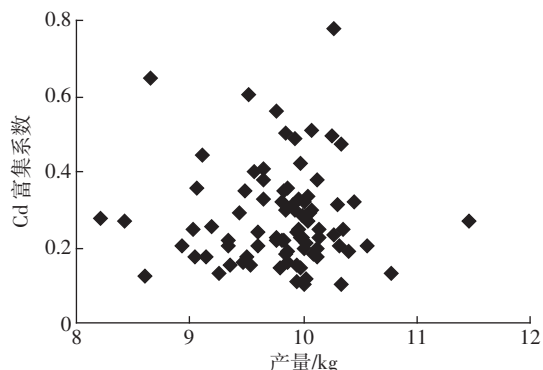


图 1 水稻糙米 Cd 富集系数与产量的相关性

Figure 1 Correlations between production and Cd accumulation factor of brown rice

表 3 分类表

Table 3 Classification table

组别	类型	个数	检验:平均值及新复极差比较	
			$AF_{\text{糙米-土}}$	W/kg
组 1	高产高 Cd 水稻	9	0.56a	9.86b
组 2	低产高 Cd 水稻	19	0.35b	9.73c
组 3	高产低 Cd 水稻	39	0.21c	10.11a
组 4	低产低 Cd 水稻	17	0.20c	9.14c

注:同一列中,数据后不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

Note: lowercases behind data indicate the significant differences among different experiment groups($P<0.05$).

四组数据中,不同类型水稻植株总体对 Cd 的富集能力顺序均为根系>茎>叶>糙米,产量和糙米 Cd 富集能力并不影响这一规律性。进入植株中的 Cd 主要在根部富集,差异性主要在于高 Cd 或高产水稻的各器官 Cd 富集能力均高于低 Cd 水稻。

探讨产量和 Cd 富集能力两个因子对水稻各器官富集系数的影响作用,其分析结果如图 2 所示。当富集能力相似时(图 2a 和 2b),除了高产高 Cd 水稻的茎和糙米富集系数显著高于低产高 Cd 水稻,产量高低没有对各器官的富集系数产生明显影响。同为高产水稻时(图 2c),高 Cd 富集品种的茎、糙米富集系数显著高于相应的低 Cd 品种;而同为低产水稻时(图 2d),高 Cd 水稻各器官的富集系数显著高于相应的低 Cd 水稻。说明糙米 Cd 富集能力对水稻各器官富集系数影响要比产量的影响重要得多,茎和叶的富集系数更容易受到富集量和产量的影响。

2.3 水稻不同性状水稻各部位 Cd 转运能力差异性分析

计算水稻各部位的 Cd 转运系数,统计每个水稻组数据。探讨产量和 Cd 富集系数两个因子对水稻各

器官转运系数的影响作用,其分析结果如图 3 所示。对于低 Cd 品种来说,产量没有对任何环节的转运系数产生明显影响,但对于高 Cd(或高产)品种,高产

(高 Cd)品种根-茎、茎-糙米和叶-糙米的转运系数显著高于低产(或低 Cd)品种;而同为低产品种时,高 Cd 富集品种的土-根、根-茎转运系数显著高于低 Cd

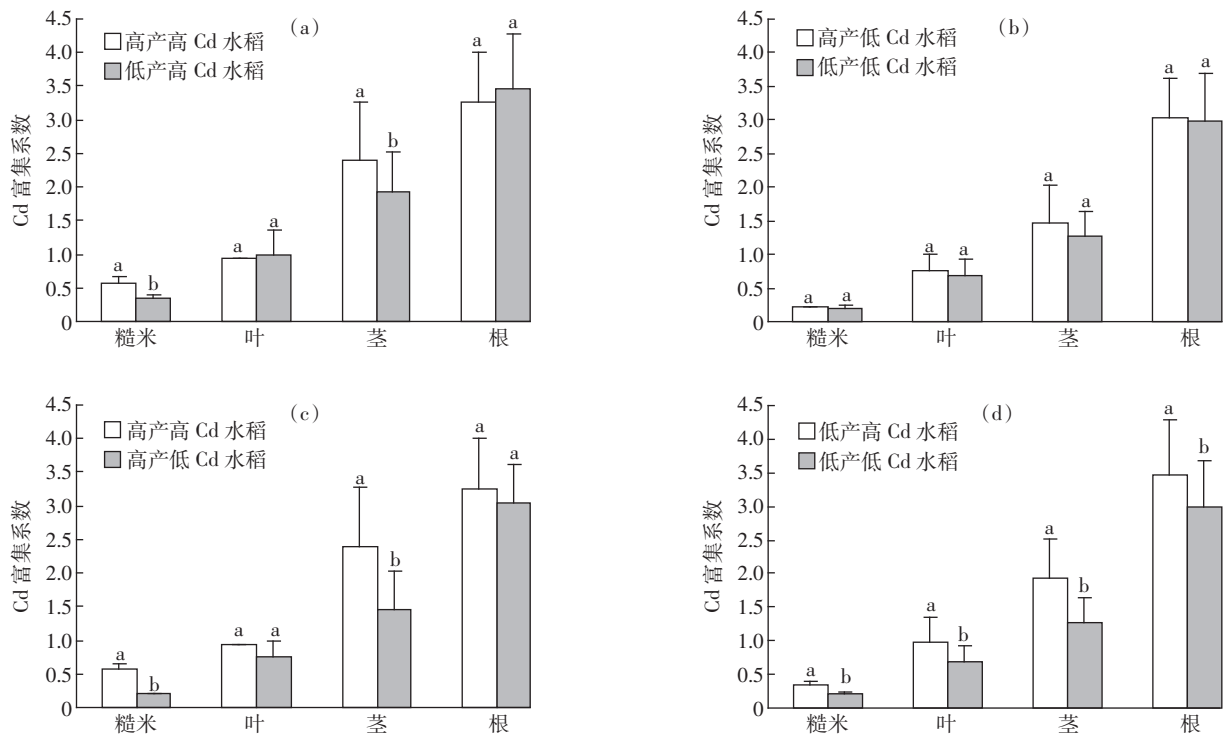


图 2 不同产量及 Cd 富集能力的水稻组富集系数差异性比较

Figure 2 Comparison of Cd accumulation factor in different organs for various groups of rice with different production and Cd accumulation

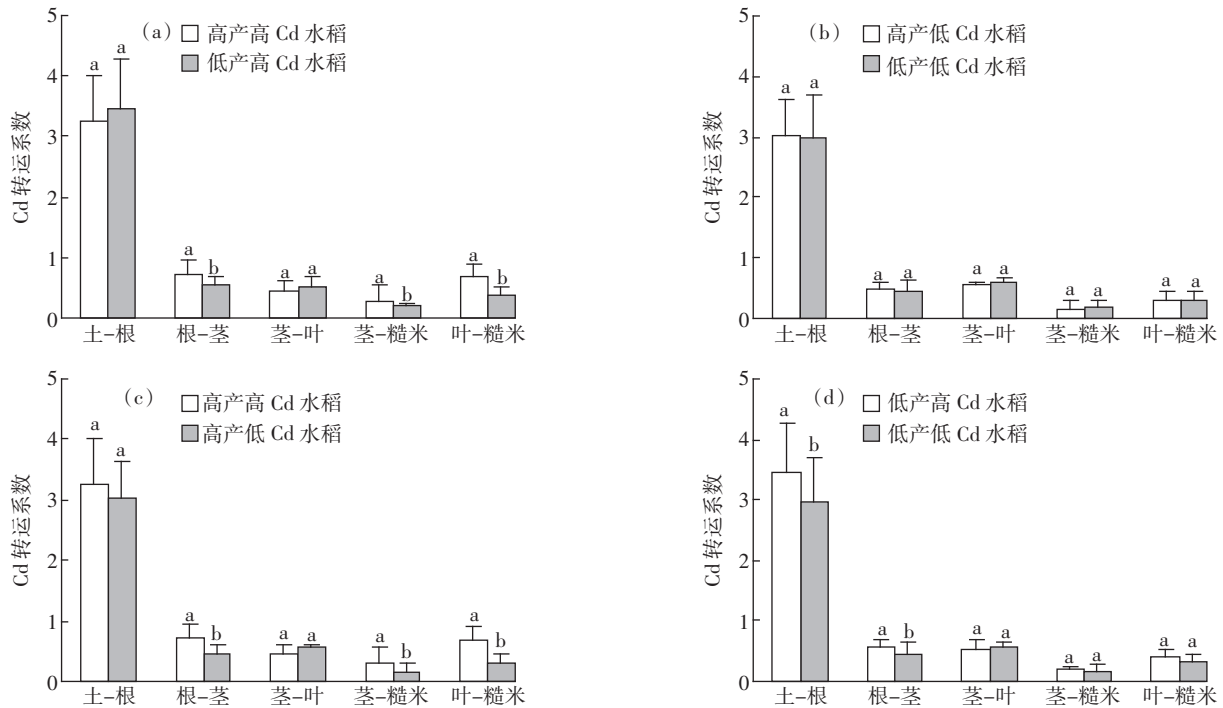


图 3 不同产量及 Cd 富集能力的水稻组转运系数差异性比较

Figure 3 Comparison of Cd transfer factor among different organs for various groups of rice with different production and Cd accumulation

品种。说明高产或高 Cd 品种有较强的将 Cd 从根转运到茎和从茎、叶转运到米的能力,而相对于低产低 Cd 品种来说,低产高 Cd 品种则有相对较强的将 Cd 从土壤转运至根系、根系转运至茎的能力,但在继续向上转运的能力不明显。

3 讨论

Cd 在土壤-植物系统中的迁移与分配是多重因素共同决定的。水稻籽粒 Cd 含量主要由根系的吸收及向地上部转运决定的。根系是 Cd 进入水稻体内的首要门户,是 Cd 的主要积累器官^[11]。Nocito 等^[12]研究表明根对进入植物体中的 Cd 富集能力在 49%~79% 之间,潜在移动的 Cd 离子约为总 Cd 的 24%。进入植物根部的 Cd 一部分累积在根系细胞壁和液泡中^[13],一部分通过质外体和共质体这两种途径进行运输^[14]。通过对比各组水稻根 Cd 富集系数发现,除了低产高 Cd 水稻和低产低 Cd 水稻的 Cd 富集系数之间差异显著,其他两组对比,均无显著差异。表明根对 Cd 的吸收并不能直接反映籽粒镉积累状况,与胡莹等^[15]研究结果一致。

地上部的转运主要经历的过程包括了 Cd 离子进入木质部、木质部的转运及韧皮部的输送。根中 Cd 离子通过内皮层并入共质体途径,进入中柱的木质部才能继续向上转运,并在叶片和茎秆中积累^[16]。当水稻进入灌浆期,茎节的 Cd 优先输送到谷粒,叶面的 Cd 再转运到茎节也输送到谷粒中。Uraguchi 等^[17]研究发现水稻木质部的 Cd 浓度与地上部包括籽粒 Cd 含量呈显著相关。Liu 等^[18]研究发现籽粒 Cd 含量与 Cd 从茎叶向籽粒转运能力呈显著正相关。Tanaka 等^[19]研究发现 90% 的 Cd 通过韧皮部输送实现水稻籽粒的积累,说明韧皮部的输送速率决定着籽粒的 Cd 积累水平。根系吸收的 Cd 一部分通过穗轴直接进入籽粒,另一部分转运到叶片储存起来,在灌浆期通过穗轴进入籽粒^[20]。Rodda 等^[21]研究表明糙米中 60% 的 Cd 含量是由剑叶、茎秆等在水稻开花灌浆前累积的 Cd 重新活化,通过韧皮部输入籽粒。在水稻组间比较分析中发现,除了低产低 Cd 水稻与高产低 Cd 水稻的茎和米 Cd 富集系数无显著差异,其他两两组对比,均有显著差异。说明籽粒 Cd 的富集,茎叶起了直接作用,是籽粒积累 Cd 的通路之一,与居学海等^[22]研究结果一致。

随着对水稻 Cd 吸收转运分子机制的深入探究,目前已发现一些与 Cd 转运相关的基因对地上部的

转运发挥了巨大作用。而很多基因的存在不仅仅是控制水稻 Cd 的通路,同时具有影响多种元素共吸收的能力。如 Takahashi^[23-24]研究发现 OsHMA2 基因参与地下部向地上部的转运,对重金属 Cd 和 Zn 在木质部装载都发挥作用。Uraguchi 等^[25-26]研究发现,在茎叶及节点存在一些与 Cd 吸收相关基因,对籽粒 Cd 的富集起到重要作用。如 OsLCT1 基因主要在水稻生殖阶段的叶片和水稻茎节高强度表达,通过韧皮部参与 Cd 向谷粒运输过程。这也充分证明,地上部对水稻籽粒 Cd 的富集起到重要作用。从基因层面探究将是未来研究的重点。

从本文研究结果可见,产量对于水稻 Cd 吸收有一定影响,但是最重要的影响因素还是水稻本身富集能力,一些水稻品种存在保持低 Cd 富集基因。因此,筛选、培育适合在中轻度污染区种植的高产低 Cd 水稻品种是可行的。本研究 84 个品种中,筛选出 39 个高产低 Cd 水稻品种。此外,在水稻组间比较分析发现,水稻的茎叶是影响其重金属吸收的重要环节,由此在水稻生产过程中配合控制根的吸收,辅以阻隔重金属在茎、叶环节的转移等手段,例如延长淹水时间、喷施叶面调理剂,都有可能降低稻米超标的潜在风险。

4 结论

(1)从 84 个水稻品种统计结果可见,水稻产量与糙米 Cd 富集能力不存在相关性。按产量和糙米 Cd 富集能力两指标划分的水稻组别中,各组水稻各器官 Cd 富集能力和 Cd 在水稻体内各环节的转运能力存在差异。

(2)不同类型水稻中各器官 Cd 富集规律均为根系>茎>叶>糙米,主要差异在于茎-叶的富集与转运,这可能是控制水稻籽粒 Cd 积累的重要因素。

(3)筛选、培育适合在中轻度污染区种植的高产低 Cd 水稻品种是可行的。在种植过程中控制茎叶的吸收与转运可降低水稻籽粒重金属 Cd 超标风险。

参考文献:

- [1] 曾希柏,徐建明,黄巧云,等.中国农田重金属问题的若干思考[J].土壤学报,2013,50(1):186-194.
ZENG Xi-bai, XU Jian-ming, HUANG Qiao-yun, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1):186-194.
- [2] 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,2012,31(7):1257-1263.
ZHAN Jie, WEI Shu-he, NIU Rong-cheng. Advances of cadmium con-

- taminated paddy soil research and new measure of its production in China: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1257-1263.
- [3] 史 静, 潘根兴, 张乃明. 镉胁迫对不同杂交水稻品种 Cd、Zn 吸收与积累的影响[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10): 2904-2910.
SHI Jing, PAN Gen-xing, ZHANG Nai-ming. Effect of cadmium stress on Cd and Zn uptake and accumulation of different cultivars of hybrid rice[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(10): 2904-2910.
- [4] Bernal M, Testillano P, Alfonso M, et al. Identification and subcellular localization of the soybean copper P1B-ATPase GmHMA8 transporter [J]. *Journal of Structural Biology*, 2007, 158(1): 46-58.
- [5] 周 歆, 周 航, 胡 森, 等. 不同杂交水稻品种糙米中重金属 Cd、Zn、As 含量的差异研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 145-150.
ZHOU Xin, ZHOU Hang, HU Miao, et al. The difference of Cd, Zn and As accumulation in different hybrid rice cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(11): 145-150.
- [6] 张标金, 罗林广, 魏益华, 等. 不同基因型水稻镉积累动态差异分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9): 25-30.
ZHANG Biao-jin, LUO Lin-guang, WEI Yi-hua, et al. Analysis of cadmium accumulation dynamics in rice with distinct genotypes[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(9): 25-30.
- [7] Yu H, Wang J L, Fang W, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(2/3): 302-309.
- [8] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 522-528.
HE Jun-yu, REN Yan-fang, WANG Yang-yang, et al. Root morphological and physiological responses of rice seedlings with different tolerance to cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(2): 522-528.
- [9] 龙小林, 向珣朝, 徐艳芳, 等. 镉胁迫下籼稻和粳稻对镉的吸收、转移和分配研究[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(2): 177-184.
LONG Xiao-lin, XIONG Xun-chao, XU Yan-fang, et al. Absorption, transfer and distribution of Cd in Indica and Japonica rice under Cd stress[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(2): 177-184.
- [10] 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.
- [11] 肖美秀, 林文雄, 陈祥旭, 等. 镉在水稻体内的分配规律与水稻镉耐性的关系[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 379-381.
XIAO Mei-xiu, LIN Wen-xiong, CHEN Xiang-xu, et al. The relation between the law of Cd distribution in rice and the Cd-tolerance[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2): 379-381.
- [12] Nocito 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, 4(6): 994-1008.
- [13] 吴 倩. 不同 Cd 水平对水稻材料根系形态及 Cd 亚细胞分布的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2009: 13-19.
WU-Qian. The effect of different cadmium levels on morphology and subcellular distribution in rice root[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2009: 13-19.
- [14] Ueno D, Koyama E, Yamaji N, et al. Physiological, genetic, and molecular characterization of a high-Cd-accumulating rice cultivar, Jarjan [J]. *Experimental Botany*, 2011, 62(7): 2265-2272.
- [15] 胡 莹, 黄益宗, 段桂兰, 等. 镉对不同生态型水稻的毒性及其在水稻体内迁移转运[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(6): 664-670.
HU Ying, HUANG Yi-zong, DUAN Gui-lan, et al. Cadmium toxicity and its translocation in two ecotype rice cultivars[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(6): 664-670.
- [16] Uranguchi S, Fujiwara T, Rice breaks ground for cadmium-free cereals [J]. *Plant Biology*, 2013, 16(3): 328-334.
- [17] 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.
- [18] Liu J G, Qian M, Cai G L, et al. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1/2): 443-447.
- [19] Tanaka K, Fujimaki S, Fujiwara T, et al. Cadmium concentrations in the phloem sap of rice plants (*Oryza sativa* L.) treated with a nutrient solution containing cadmium[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2003, 49(2): 311-313.
- [20] 文志琦, 赵艳玲, 崔冠男, 等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1280-1286.
WEN Zhi-qi, ZHAO Yan-ling, CUI Guan-nan, et al. Effects of cadmium accumulation characteristics in vegetative organs on cadmium content in grains of rice[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8): 1280-1286.
- [21] Rodda M S, Li G, Reid R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: the relative importance of remobilization within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2): 105-114.
- [22] 居学海, 张长波, 宋正国, 等. 水稻籽粒发育过程中各器官镉积累量的变化及其与基因型和土壤镉水平的关系[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 634-640.
JU Xue-hai, Zhang Chang-bo, SONG Zheng-guo, et al. Changes in cadmium accumulation in rice organs during grain development and their relationship with genotype and cadmium levels in soil[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5): 634-640.
- [23] 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.
- [24] Yamaji N, Xia J X, Ueno M N, et al. Preferential delivery of zinc to developing tissues in rice is mediated by P-Type heavy metal ATPase OsHMA2[J]. *Plant Physiology*, 2013, 162(2): 927-939.
- [25] Uraguchi S, Kamiya T, Sakamoto T, et al. Low-affinity cation transporter (OsLCT1) regulates cadmium transport into rice grains[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108(52): 20959-20964.
- [26] Uraguchi S, Kamiya T, Clemens S, et al. Characterization of OsLCT1, a cadmium transporter from indica rice (*Oryza sativa*) [J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, 151(3): 339-347.