有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻镉吸收和分配的影响

江巧君，周　琴，韩亮亮，江海东*

（南京农业大学农业部南方作物生理生态重点开放实验室，江苏省信息农业高技术研究重点实验室，南京 210095）

摘　要：以镇稻88和Ⅱ优107两个不同基因型水稻为材料，采用两年盆栽试验方法，研究了有机肥对水稻镉吸收及分配的影响。结果显示：镉胁迫（3.0 mg·kg^{-1}）下，水稻各器官的镉含量以及根系镉分配比例增加，穗的镉分配比例减少。有机肥对不加镉处理（土壤背景镉含量0.202 mg·kg^{-1}）的营养器官镉含量没有显著影响，籽粒镉含量略降低，但影响不显著。有机肥降低加镉处理的根系、糠层和精米的镉含量，影响根系的镉分配比例，减少穗的镉分配比例，并且一定程度减少籽粒中精米的镉分配比例。有机肥可能是通过减少土壤有效态镉，以降低水稻植株对土壤中镉的吸收，并且抑制镉往地上部以及精米中输送，从而显著降低了精米中的镉含量。另外，有机肥对两个基因型水稻的影响表现不同。

关键词：水稻；镉；有机肥；镉吸收；镉分配规律

中图分类号：X503.231　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1672-2043(2013)01-0009-06　　doi:10.11654/jaes.2013.01.002

Effects of Organic Manure on Uptake and Distribution of Cadmium in Different Rice Genotypes Under Cadmium Stress

JIANG Qiao-jun, ZHOU Qin, HAN Liang-liang, JIANG Hai-dong*

(Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology in Southern China, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Jiangsu Province Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture, Nanjing 210095, China)

Abstract: Two rice genotypes, Zhendao88 (*Oryza sativa* subsp. *japonica*) and Eryou107 (*O. sativa* subsp. *indica*), were used to study the effects of organic manure (OM) on the uptake and distribution of cadmium (Cd) in rice by two years pot experiments with two-factor random block design. Two Cd treatments were natural soil (background concentrations of soil cadmium 0.202 mg·kg^{-1}) and artificial Cd-contaminated soil (added 3.0 mg·kg^{-1} cadmium). Two fertilizer treatments were chemical fertilizer (300 kg N·hm^{-2}) and chemical fertilizer (300 kg N·hm^{-2})+OM (1.96 g·kg^{-1} dried soil). The results showed that Cd concentration in various organs of plant and distribution ratio of cadmium in root increased significantly under cadmium stress (3.0 mg·kg^{-1}), while the distribution ratio of cadmium in panicle decreased. OM had no significant effects on Cd concentration in vegetative organs of the treatments with natural soil, and slightly decreased that in panicle. However, OM could reduce the Cd concentration in root, bran and milled rice, increase the distribution ratio of cadmium in root, and decrease that in panicle under cadmium stress. For panicle, the distribution ratio of cadmium in milled rice was also partially decreased with OM treatment under cadmium stress. Therefore it is suggested that OM might significantly decrease the Cd concentration in milled rice by reducing available Cd in the soil and inhibiting Cd transportation from root to above-ground and above-ground to milled rice. Furthermore, the effects of organic manure in two different rice genotypes were different.

Keywords: rice; cadmium; organic manure; cadmium uptake; distribution law of cadmium

水稻（*Oryza sativa* L.）是我国乃至全球最主要的粮食作物，我国大约60%的人口以水稻为主食[1]。水稻被认为是对镉（Cd）吸收最强的大宗谷类作物，易在籽实中积累，现今稻米中镉含量超标的问题日益严重[2-3]。水稻在较低污染程度的情况下就表现为籽粒镉含量已经超标，但其生长并未受到严重影响[4]，使得在生产中容易忽略水稻镉污染的现象。因此，如何缓解镉对农作物的伤害以及降低镉在作物中的积累是当前亟待解决的问题。

研究发现，向镉污染土壤中加入有机肥可增加土

收稿日期：2012-05-23

基金项目："十一五"国家科技支撑计划重点资助项目（2007BAD89D12）

作者简介：江巧君（1987—），女，浙江台州人，在读硕士，主要从事作物逆境生理研究。E-mail：2009101054@njau.edu.cn

* **通信作者**：江海东　E-mail：hdjiang@njau.edu.cn

壤对重金属的吸附能力，提高土壤对重金属的缓冲性，减少植物对其的吸收，阻碍它进入食物链[5-6]。原因可能是一方面有机肥中的腐植酸能与镉离子形成络合物或螯合物，促使土壤中的交换态镉向松结合态、锰氧化物结合态镉转换，从而降低其生物活性；另一方面，有机肥影响土壤的其他基本性状，间接影响土壤镉有效性[7-8]。另外，无机有机肥料配施可保证养分的全面性，肥效稳定持久，符合农业的可持续发展，因此有机肥逐渐被作为改良剂运用到对重金属污染土壤的修复改良中[9]。研究显示，有机肥不仅降低土壤有效态镉含量，降低作物受镉毒害，而且显著增加作物生物量和经济产量[10-11]。

但是，目前关于有机肥对重金属土壤的改良作用，大多是研究有机肥对土壤中镉有效性以及苗期作物生长的影响，对作物体内镉的吸收分配规律的研究较少，并且对研究结果还有一定争议[12-13]。如有研究发现有机物料不能减少土壤有效态镉，甚至会活化土壤中的镉，增加土壤有效镉，增加植物对镉的吸收[14-15]。本试验设计在总氮量一致的情况下，分别设置化肥处理和有机肥化肥配施处理，研究有机肥对两个不同基因型水稻在较低污染程度镉胁迫（3.0 mg·kg^{-1}）下，水稻对镉的吸收以及在不同器官中的分配的影响，探讨有机肥对镉污染土壤的改良机理，为水稻生产区镉污染土壤的改良以及农业安全生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

水稻：镇稻 88，粳稻（*Oryza sativa* L. subsp. *japonica* Kato var. Zhendao88）；Ⅱ优 107，三系杂交中籼稻（*Oryza sativa* L. subsp. *indica* Kato var. Eryou107）。

有机肥：以牛粪为主要原料的生物商品有机肥，全氮含量 17.03 g·kg^{-1}，全磷含量 11.31 g·kg^{-1}，全钾含量 14.37 g·kg^{-1}，全镉含量为 0.133 mg·kg^{-1}。

1.2 试验设计

试验于 2010 年和 2011 年在南京农业大学牌楼试验站进行。采用盆栽土培方法，盆的内径 25 cm，高 30 cm，每盆装 10 kg 干土。试验设计为双因素随机区组试验，分别为镉因素（Cd0：0 mg·kg^{-1}，Cd3：3.0 mg·kg^{-1}）和肥料因素（CF：化肥，OM：有机肥），共 4 个处理（表 1）。各处理的总纯氮含量均为 300 kg·hm^{-2}，化肥处理的氮源全部由尿素提供，有机肥处理的氮源分别为有机肥、尿素各 150 kg·hm^{-2}。

取深层的大田土壤（全氮含量 1.16 g·kg^{-1}，全磷含量 2.98 g·kg^{-1}，全钾含量 28.63 g·kg^{-1}，全镉含量 0.202 mg·kg^{-1}），风干后过 2 mm 筛，根据试验设计分别添加镉（$CdCl_2·2.5H_2O$）和有机肥（见表 1）及 225 kg·hm^{-2} 磷肥和 225 kg·hm^{-2} 钾肥（其中有机肥处理添加的磷肥和钾肥减去有机肥中的磷含量和钾含量），充分混匀后装入塑料桶内，加水稳定两周后待用。于 5 月底育苗，6 月底，将幼苗移栽到塑料桶中，每桶 3 穴，每穴 2 株。塑料桶摆放于露天的网室里，以达到尽量接近大田环境的目的，进行统一的管理。在 2010 年，桶内保持 2 cm 左右的水层，在乳熟期进行晒田；2011 年苗期的桶内水层保持在 2 cm 左右，拔节期至灌浆中期，由于当时天气，隔几天就有一次暴雨，暴雨之后将其过多水分倾倒出后，并进行适当的晒田，这个阶段处于干-湿交替的状态，乳熟期后同 2010 年一样进行晒田处理。

1.3 测试项目

水稻生物量：于抽穗期、成熟期，每处理各取 3 株大小一致的水稻植株，洗净根系泥土，然后用去离子水清洗整个植株，分为根、茎、叶鞘、叶片、穗，其中成熟期的籽粒又分为颖壳、糠层、精米。各样品杀青烘干至恒重，称重。

各器官镉含量：将烘干的样品磨碎后过 100 目筛，称取 1.0 g，用 HNO_3:$HClO_4$=5:1 的混合消解液消解至澄清后定容，用原子吸收分光光度计测消解液的镉浓度。

1.4 数据处理

采用 SPSS、Excel 等软件处理数据。

表 1 各处理 Cd 及肥料施用量

Table 1 The application rates of Cd and fertilizers of each treatment

处理 Treament	纯 Cd 添加量/mg·kg^{-1} 干土	尿素施用量/g·kg^{-1} 干土	尿素中的纯氮施用量/kg·hm^{-2}	有机肥施用量/g·kg^{-1} 干土	有机肥纯氮/kg·hm^{-2}
Cd0+CF（不加镉加化肥）	0	0.145	300	0	0
Cd0+OM（不加镉加有机肥）	0	0.072	150	1.96	150
Cd3+CF（加镉加化肥）	3.0	0.145	300	0	0
Cd3+OM（加镉加有机肥）	3.0	0.072	150	1.96	150

2 结果与分析

2.1 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻的营养器官的镉含量的影响

由表 2 可知,两个基因型各处理的镉含量均表现为根>茎>鞘、叶。加镉处理的各个器官的镉含量都显著高于无镉处理。有机肥对无镉处理的镉含量没有显著影响,但显著降低加镉处理的根系镉含量,对茎、鞘和叶片的镉含量影响表现不一,总体表现为略有降低。两年的镉含量有所不同,2011 年各器官的四个处理平均镉含量均高于 2010 年。

2.2 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻的籽粒镉含量的影响

由表 3 可知,两个基因型水稻的籽粒不同部分的镉含量不一,但都表现为糠层的含量远大于精米和颖壳。加镉处理的各个部分的镉含量均显著高于不加镉处理,并且加镉处理的精米镉含量均已超过我国的食品卫生标准(≤0.2 mg·kg^{-1})。无镉处理下,有机肥不同程度降低了各部位的镉浓度,但差异并不显著。加镉处理下,镇稻 88 有机肥处理的颖壳、糠层和精米的镉含量显著降低,两年分别平均降低 7.02%、12.79%、26.10%。Ⅱ优 107 的糠层和精米的镉含量显著降低,两年平均降低幅度为 11.95%和 27.50%;两年的颖壳镉含量受有机肥影响不一致,2010 年的影响不显著,2011 年的有机肥处理显著降低。

两年间的籽粒镉含量存在一定差异,两个基因型都表现为 2011 年的含量高于 2010 年。

2.3 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻的单茎镉积累量以及各器官镉分配比例的影响

由表 4 可知,镉胁迫下,两个基因型水稻的单茎镉积累量均显著增加。有机肥对不加镉处理的单茎镉积累量没有显著影响,但显著降低了两个基因型水稻的加镉处理的单茎镉积累量。

抽穗期和成熟期的镉主要积累在根系中,镇稻 88 和Ⅱ优 107 在抽穗期的两年平均分配比例分别为 64.43%和 80.94%,在成熟期的分配比例分别为 78.12%和 77.62%,而积累在籽粒中的量较少,成熟期两个基因型水稻的籽粒分配比例分别为 4.55%和 6.01%。与无镉处理相比,加镉处理的根系分配比例增加,地上部分尤其是穗的分配比例显著降低。镉胁迫下,镇稻 88 的有机肥处理根系镉分配比例在抽穗期和成熟期相对化肥处理有所降低,Ⅱ优 107 在抽穗期表现降低,而在成熟期有所增加。有机肥处理可在一定程度减少穗的镉分配比例,但差异不显著。

表 2 有机肥对镉胁迫下水稻不同器官镉含量的影响(mg·kg^{-1})

Table 2 Effects of organic manure on the Cd concentration of different rice genotypes under cadmium stress(mg·kg^{-1})

基因型 Variety	年份 Year	处理 Treatment		抽穗期 Heading stage				成熟期 Mature stage			
				根 Root	茎 Stem	鞘 Leaf sheath	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	鞘 Leaf sheath	叶 Leaf
镇稻 88	2010	Cd0	CF	1.68c	0.59b	0.24b	0.13b	2.84b	1.04b	0.23c	0.25b
Zhendao88			OM	1.79c	0.42b	0.29b	0.14b	2.56b	0.95b	0.12d	0.23b
		Cd3	CF	34.20a	7.61a	1.08a	0.79a	43.30a	8.97a	1.46a	0.93a
			OM	30.76b	7.97a	1.19a	0.77a	43.10a	8.50a	1.37b	0.88a
	2011	Cd0	CF	1.06c	0.50b	0.23c	0.18c	2.79c	0.71c	0.36b	0.20b
			OM	1.41c	0.67b	0.20c	0.15c	2.76c	0.94c	0.07b	0.21b
		Cd3	CF	37.38a	8.17a	2.97a	0.99a	46.93a	19.93b	6.59a	1.26a
			OM	32.33b	7.17a	2.53b	0.83b	42.05b	21.57a	6.26a	1.42a
Ⅱ优 107	2010	Cd0	CF	1.79b	1.30bc	0.10b	0.17b	2.69c	0.91b	0.14c	0.27b
Eryou107			OM	1.81b	0.73c	0.12b	0.22ab	2.39c	0.61b	0.07c	0.22b
		Cd3	CF	18.08a	3.13ab	0.31a	0.33a	30.12a	9.39a	1.04a	0.43ab
			OM	17.07a	4.19a	0.39a	0.25ab	25.22b	7.05a	0.78b	0.61a
	2011	Cd0	CF	1.15c	1.10c	0.35c	0.13b	1.90c	0.75c	0.27c	0.23b
			OM	1.49c	0.79c	0.46c	0.14b	1.80c	0.56c	0.12c	0.19c
		Cd3	CF	31.45a	8.84b	0.73b	0.47a	46.00a	20.30a	3.41b	0.70a
			OM	25.17b	10.80a	1.01a	0.48a	43.16b	17.69b	3.89a	0.66a

注:同列不同小写字母表示同一年份内四个处理间差异达 0.05 显著水平(P<0.05)。下同。

Note: Different letters in same column mean significant difference among four treatments of the same year at 0.05 level(P<0.05). The same below.

2.4 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻的籽粒各部位的镉分配比例的影响

由表 5 可知，籽粒的镉分配规律因不同基因型、镉处理和有机肥而不同。镇稻 88 的无镉处理的籽粒中的镉分配比例大小为糠层>精米>颖壳，Ⅱ优 107 的分配比例为精米>糠层>颖壳。两个基因型的加镉处理的精米镉分配比例显著增加，而糠层中的显著降低，镇稻 88 的颖壳的镉分配比例也显著降低。有机肥处理的精米镉分配比例降低，糠层和颖壳的分配比例增加，其中 2011 年的镇稻 88 和Ⅱ优 107 的比例增减达到显著性差异。

3 讨论

本试验结果表明，两个基因型水稻的各器官的镉含量表现为根>>茎>鞘>叶片（表 2），镉在植株各器官的分配也是以根系为主，镇稻 88 和Ⅱ优 107 成熟期的根系镉积累百分比分别为 78.12%和 77.62%，说明根系吸收镉后，大部分积累在根系中，只有小部分被转运至地上部器官。这与前人的研究结果基本一致[16-18]，但有些研究显示，叶鞘的镉含量略大于茎叶[19]。

不同基因型水稻糙米的镉含量表现不同，目前研究显示，超级稻>三系杂交稻>两系杂交稻>常规晚籼

表 3 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻籽粒镉含量的影响（mg·kg^{-1}）

Table 3 Effects of Organic manure on Cd concentration in the grain of different rice genotypes under cadmium stress（mg·kg^{-1}）

年份 Year	处理 Treatment		镇稻 88			Ⅱ优 107		
			颖壳 Chaff	糠层 Bran	精米 Milled Rice	颖壳 Chaff	糠层 Bran	精米 Milled Rice
2010	Cd0	CF	0.071c	0.525c	0.066c	0.072b	0.357c	0.102c
		OM	0.063c	0.496c	0.057c	0.067b	0.355c	0.098c
	Cd3	CF	0.329a	1.134a	0.503a	0.323a	0.789a	0.729a
		OM	0.303b	1.010b	0.438b	0.329a	0.690b	0.463b
2011	Cd0	CF	0.088c	0.583c	0.082c	0.083c	0.384c	0.094c
		OM	0.082c	0.502c	0.057c	0.091c	0.358c	0.077c
	Cd3	CF	0.869a	1.293a	0.692a	0.925a	1.143a	0.939a
		OM	0.815b	1.104b	0.420b	0.874b	1.012b	0.764b

表 4 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻的各器官镉分配比例以及单茎镉积累量的影响

Table 4 Effects of organic manure on the distribution ratio of cadmium in different organs and Cd accumulation of individual shoot in different rice genotypes under cadmium stress

基因型 Variety	年份 Year	处理 Treatment		抽穗期分配比例/%					成熟期分配比例/%					单茎镉积累量 Cd accumulation per shoot/μg
				根 Root	茎 Stem	鞘 Leaf sheath	叶 Leaf	穗 Panicle	根 Root	茎 Stem	鞘 Leaf sheath	叶 Leaf	穗 Panicle	
镇稻 88	2010	Cd0	CF	62.01b	16.00ab	12.97b	4.10a	4.93a	68.21b	17.04a	5.83a	3.93a	4.99a	3.61c
Zhendao88			OM	62.31b	12.44c	16.63a	4.59a	4.03b	67.25b	19.20a	3.72b	4.33a	5.51a	3.15c
		Cd3	CF	80.85a	13.02bc	3.90c	1.66b	0.57c	84.50a	10.02b	2.51b	1.05b	1.92b	52.53a
			OM	76.61a	16.86a	4.31c	1.76b	0.46c	83.87a	10.83b	2.50b	1.08b	1.71b	47.20b
	2011	Cd0	CF	55.33c	12.71ab	19.20a	10.80a	1.95b	76.08b	6.09b	6.41a	2.60a	8.81a	4.36c
			OM	52.98c	17.50a	16.03b	9.27a	4.22a	81.28ab	6.25b	1.40b	2.99a	8.08a	3.96c
		Cd3	CF	79.38a	7.70b	8.32d	2.12b	2.48b	82.29a	6.65b	7.20a	0.92b	2.94b	66.80a
			OM	69.93b	12.43ab	12.29c	2.97b	2.38b	81.47ab	8.26a	6.79a	1.06b	2.41b	61.12b
Ⅱ优 107	2010	Cd0	CF	72.45b	16.54a	4.44b	5.06a	1.52b	69.74b	12.78b	3.45a	5.06b	8.97a	4.38c
Eryou107			OM	74.41b	12.47b	6.23a	5.17a	1.72a	67.86b	15.37a	2.64a	6.15a	7.98a	4.17c
		Cd3	CF	91.71a	5.15c	1.56c	1.13b	0.45d	79.62a	12.70b	2.71a	0.78c	4.19b	48.08a
			OM	90.86a	5.86c	1.85c	0.54b	0.89c	81.04a	11.62b	2.47a	1.40c	3.46b	38.05b
	2011	Cd0	CF	71.73b	8.94a	15.25a	2.92a	1.16b	69.93c	7.03a	9.09a	3.98a	9.98a	5.44c
			OM	69.55b	7.08ab	19.35a	3.05a	0.98b	79.00b	6.18a	3.19b	3.10a	8.53b	5.25c
		Cd3	CF	89.95a	4.51b	1.73b	0.59b	3.21a	86.87a	6.66a	3.44b	0.47b	2.57c	123.84a
			OM	86.88a	6.68ab	2.86b	0.66b	2.91a	88.08a	5.84a	3.50b	0.42b	2.16c	116.35b

表 5 有机肥对镉胁迫下不同基因型水稻的籽粒镉分配比例的影响(%)

Table 5 Effects of organic manure on the distribution ratio of cadmium in grain of different rice genotypes under cadmium stress(%)

年份 Year	处理 Treatment		镇稻 88			Ⅱ优 107		
			颖壳 Chaff	糠层 Bran	精米 Milled Rice	颖壳 Chaff	糠层 Bran	精米 Milled Rice
2010	Cd0	CF	7.18ab	56.24a	36.58b	12.99ab	27.37a	59.65c
		OM	7.46a	55.88a	36.66b	12.20b	29.59a	58.21c
	Cd3	CF	5.85b	24.73b	69.42a	12.23b	10.57b	77.20a
		OM	5.67b	25.31b	69.02a	13.54a	12.67b	73.79b
2011	Cd0	CF	11.28c	46.41a	42.31c	12.72c	37.87a	49.41bc
		OM	13.07c	50.82a	36.11d	17.79b	37.41a	44.80c
	Cd3	CF	17.47b	21.47b	61.05a	19.21ab	16.80b	63.99a
		OM	22.62a	25.32b	52.06b	21.81a	16.91b	61.27ab

稻>常规粳稻[20]。本试验结果显示,Ⅱ优 107 的精米镉含量大于镇稻 88,而糠层中的镉含量略低于镇稻 88,说明系杂交籼稻的糙米高镉含量主要是精米的镉含量较高。

有机肥对无外源镉添加的处理(0.202 mg·kg^{-1})营养器官的镉含量无显著影响,籽粒的镉含量略有减少,但差异并不显著。说明有机肥对自然背景镉含量水平的土壤中的水稻无显著影响。

有机肥显著降低加镉处理(0.202 mg·kg^{-1}+3.0 mg·kg^{-1})的抽穗期和成熟期的根系以及籽粒的镉含量,尤其是对精米和糠层的影响较大。虽然有机肥处理的精米镉含量仍未降至安全水平,但相比化肥处理,有机肥有效降低了稻米的镉含量,两个基因型水稻平均降低了 26.80%。说明有机肥可以有效降低稻米的镉含量,原因可能是因为有机肥增加结合态镉含量,减少有效态镉[21],使得水稻对镉的吸收量减少。有机肥一定程度增加Ⅱ优 107 的根系镉分配比例,但略减少镇稻 88 的根系镉分配。说明有机肥可抑制Ⅱ优 107 根系中的镉往地上部运输,却能一定程度促进镇稻 88 的镉往地上部输送。在籽粒中,有机肥处理的精米镉分配比例降低,糠层和颖壳的分配比例增加,其中 2011 年的镇稻 88 和Ⅱ优 107 的比例增减达到显著性差异。镉被吸收进入植物体内后,进行重新分配,茎秆中的镉重新分配时,部分镉可能是通过韧皮部进入穗[22-23]。因此,有机肥对精米镉分配比例的降低可能是有机肥直接或间接影响韧皮部对镉的运输,但具体影响机制还不清楚,有待进一步的研究。

本研究的两年试验结果显示,2011 年的镉含量和单茎镉积累量大于 2010 年。可能是因为 2010 年的水稻在灌浆中期之前保持水层,而 2011 在这个时期,由于天气的原因,使得水稻生长环境保持干—湿交替的状态。有研究显示,水稻长期在淹水环境中,根系表面会产生铁氧化物,即铁膜[24]。铁膜是无定形的胶体,能够吸附所处环境中的离子,从而会影响植物对离子的吸收,降低土壤中有效镉[25],导致 2010 的水稻镉含量以及单茎镉积累量较低。

4 结论

有机肥对背景值镉含量的土壤中水稻的镉含量及分配没有显著影响,但可以有效降低镉胁迫下两个基因型水稻根系和糙米的镉含量,并且在籽粒的镉分配中,有机肥略增加颖壳和糠层的镉分配,减少精米中的镉分配。但是,有机肥对镇稻 88 和Ⅱ优 107 的影响途径不尽相同。对镇稻 88,主要是减少根系对镉的吸收,却在一定程度上促进根系往地上部转运,但最终导致精米的镉含量显著降低。对Ⅱ优 107,有机肥是通过降低根系的吸收、以及略减少根系往地上部运输,并降低籽粒中精米的镉分配,各个过程共同作用,有效降低精米和糠层中镉含量。有机肥对不同基因型水稻的影响机制不同,可能是因为不同基因型水稻的生长势不同,其具体影响机制还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 史 静, 李正文, 龚伟群, 等. 2 种常规水稻 Cd、Zn 吸收与器官分配的生育期变化:品种、土壤和 Cd 处理的影响[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1):32-40.
SHI Jing, LI Zheng-wen, GONG Wei-qun, et al. Uptake and partitioning of Cd and Zn by two non-hybrid rice cultivars in different growth stages:Effect of cultivars, soil type and Cd spike[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1):32-40.

[2] Wang X C, Yan W D, An Z, et al. Status of trace elements in paddy soil and sediment in Taihu Lake region [J]. *Chemosphere*, 2003, 50:707-710.

[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]. *Biometals*, 2004, 17:549-553.

[4] 吴启堂, 陈 卢, 王广寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收积累的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1):104-107.
WU Qi-tang, CHEN Lu, WANG Guang-shou. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):104-107.

[5] 张亚丽, 沈其荣, 姜 洋.有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J].土壤学报, 2001, 38(2):212-218.
ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, JIANG Yang. Effects of organic manure on the amelioration of Cd-polluted soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2):212-218.

[6] 张连忠, 路克国, 王宏伟, 等. 重金属和生物有机肥对苹果根区土壤微生物的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2):92-95.
ZHANG Lian-zhong, LU Ke-guo, WANG Hong-wei, et al. Effect of heavy metal and bio-fertilizer on microorganisms in soil of apple root[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2):92-95.

[7] Pierzynski G M, Schwab A P. Bioavailability of zinc, cadmium, and lead in a metal-contained alluvial soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22:247-254.

[8] 张亚丽, 沈其荣, 谢学俭, 等. 猪粪和稻草对镉污染黄泥土生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11):1997-2000.
ZHANG Ya-li, SHEN Qi-rong, XIE Xue-jian, et al. Effects of pig manure and rice straw on biological activity of Cd-contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1997-2000.

[9] 张 青, 徐明岗, 罗 涛, 等. 3 种不同性质改良剂对镉锌污染水稻土的修复效果及评价[J]. 热带作物学报, 2010, 31(4):541-546.
ZHANG Qing, XU Ming-gang, LUO Tao, et al. Effects and remediation evaluation of amendments in Cd-Zn contaminated paddy(*Oryza sativa*) soil[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(4):541-546.

[10] 华 珞, 陈世宝, 白玲玉, 等. 有机肥对镉锌污染土壤的改良效应[J]. 农业环境保护, 1998, 17(2):55-62.
HUA Luo, CHEN Shi-bao, BAI Ling-yu, et al. Amelioration of soils polluted by cadmium and zinc by organic matter[J]. *Agro-environmental Protection*, 1998, 17(2):55-59, 62.

[11] 詹绍军, 喻 华, 冯文强, 等. 不同有机物料与石灰对小麦吸收镉的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2):214-217, 231.
ZHAN Shao-jun, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effects of different organic material and lime on wheat grow and cadmium uptake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2):214-217, 231.

[12] 潘 逸, 周立祥.施用有机物料对土壤中 Cu、Cd 形态及小麦吸收的影响:田间微区试验[J]. 南京农业大学学报, 2007, 30(2):142-146.
PAN Yi, ZHOU Li-xiang. Influence of applying organic manures on the chemical form of Cu and Cd in the contaminated soil and on wheat uptake:Field micro-plot trials[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, 30(2):142-146.

[13] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等.长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J].植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):129-135.
LI Ben-yin, HUANG Shao-min, ZHANG Yu-ting, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):129-135.

[14] 陈同斌, 陈志军.水溶性有机质对土壤中镉吸附行为的影响[J].应用生态学报, 2002, 13(2):183-186.
CHEN Tong-bin, CHEN Zhi-jun. Cadmium adsorption in soil influenced by dissolved organic matter derived from rice straw and sediment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(2):183-186.

[15] 贾 乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10):1992-1998.
JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10):1992-1998.

[16] 肖美秀, 林文雄, 陈冬梅, 等. 耐 Cd 水稻种质资源的筛选[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2006, 35(2):117-122.
XIAO Mei-xiou, LIN Wen-xiong, CHEN Dong-mei, et al. Selection of rice germ plasm tolerant to cadmium stress[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition)*, 2006, 35(2):117-122.

[17] 黄冬芬, 奚岭林, 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.

[18] 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.

[19] 周鸿凯, 何觉民, 陈小丽, 等. 大田生产条件下不同品种水稻植株中镉的分布特点[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2):229-234.
ZHOU Hong-kai, HE Jue-min, CHEN Xiao-li, et al. The Cd uptake and distribution features in plant organs of four rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):229-234.

[20] 曾 翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 不同品种水稻糙米含镉量差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1):67-69, 83.
ZENG Xiang, ZHANG Yu-zhu, WANG Kai-rong, et al. Genotype difference of brown rices in Cd content[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1):67-69, 83.

[21] 陕 红, 刘荣乐, 李书田. 施用有机物料对土壤镉形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):136-144.
SHAN Hong, LIU Rong-le, LI Shu-tian. Cadmium fractions in soils as influenced by application of organic materials[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1):136-144.

[22] Herren T, Feller U. Transport of cadmium via xylem and phloem in maturing wheat shoots:Comparison with the translocation of zinc, strontium and rubidium[J]. *Annals of Botany*, 1997, 80:623-628.

[23] Hart J J, Weich R M, Noevell W A, et al. Characterization of cadmium biding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars[J]. *Plant Physiology*, 1998, 116:1413-1420.

[24] Chen C C, Dixon J B, Turner F T. Iron plaque on rice roots, morphology and models of development[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44:1113-1119.

[25] Kuo S. Concurrent sorption of phosphate and zinc, cadmium, or calcium by a hydrous ferric oxide[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50:1412-1419.