

# 2 种杂交水稻对 2 种不同土壤中 Cd 吸收与分配的比较

成颜君, 龚伟群, 李恋卿, 潘根兴

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

**摘要:**选择两种水稻(超级稻“Ⅱ优明 86”和普通杂交稻“汕优 63”)与乌栅土和红沙泥田两种水稻土为材料, 采用添加(2.5 mg Cd·kg<sup>-1</sup> 土) 和不添加外源 Cd 处理进行盆栽试验, 研究了不同杂交稻品种在不同生育期对 Cd 的吸收及其器官分配。结果表明, 抽穗期是杂交稻和超级稻 Cd 吸收的关键时期, 且 Cd 处理下超级稻品种 Cd 吸收能力高于普通杂交稻品种。无外源 Cd 处理下, 超级稻品种比普通杂交稻品种表现出更高的转运能力, 因而是转运和器官分配特点而不是吸收 Cd 能力决定两者的子粒 Cd 水平。不过, 在外源 Cd 处理下, 土壤因素成为超级稻子粒 Cd 含量高于杂交稻的主要因素, 超级稻在 Cd 化学有效性高的红沙泥田中的 Cd 吸收能力显著高于普通杂交稻, 这可能是我们以前报道的酸性红壤水稻土中杂交稻子粒 Cd 吸收积累成倍增加的主要原因。

**关键词:**杂交水稻; Cd; 吸收与分配; 土壤条件; 生育期

中图分类号: X503.231    文献标识码: A    文章编号: 1672-2043(2008)05-1895-06

## Comparison of Cd Uptake and Partitioning in Plant Tissues by Two Hybrid Rice Grown in Two Contrasting Paddy Soils

CHENG Yan-jun, GONG Wei-qun, LI Lian-qing, PAN Gen-xing

(Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Growing of hybrid rice cultivars are increasingly extended in South China for high rice production. However, much attention has been paid to the higher Cd uptake and grain accumulation by the hybrid rice than the conventional rice for the last 5 years. To understanding the possible mechanism for the enhanced Cd uptake by hybrid rice cultivars, a pot experiments were conducted with two rice cultivars (a super hybrid rice and a common hybrid rice) on two different soils with and without Cd spiking (2.5 mg Cd·kg<sup>-1</sup> soil) to soils. The uptake and partitioning of Cd by rice was determined with atomic adsorption spectroscopy(AAS) at different growth stages. The results showed that on the basis of total biomass construction, the most intense active Cd uptake for both hybrid rice cultivars happened at the heading stage. Compared to common hybrid rice cultivars, Cd uptake by super rice ones was much enhanced under Cd spiking. While super rice cultivars had a higher capacity to translocate and partition Cd to grains than the common rice under no Cd spiking. That is, under no Cd pollution, the Cd translocation and partitioning drive the grain Cd level by the rice cultivars. However, with spiked Cd, soil factor may become significant in controlling the Cd availability as super rice had Cd uptake in grains as several folds as common rice cultivars when grown in an acidic soil. This explained intense enhanced Cd uptake and accumulation in rice grains by hybrid rice cultivars grown in red soil region from South China as reported in previous studies.

**Keywords:** hybrid rice ; cadmium ; uptake and accumulation ; soil condition; growing stages

由于污水灌溉、污泥施用、施肥和工业污染等原因,我国土壤 Cd 污染问题日趋严重。许多研究表明,

收稿日期: 2007-11-15

基金项目: 国土资源部、江苏省国土生态地球化学调查重大项目 (EG0008); 高等学校博士点基金项目(B2002613)

作者简介: 成颜君(1982—), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向为土壤重金属污染与食品安全。

E-mail: sxtcyj2004@ yahoo.com.cn

通讯作者: 潘根兴 E-mail: pangengxing @ yahoo.com.cn

Cd 通过土壤-作物-食物系统是人类 Cd 暴露的主要途径<sup>[1-3]</sup>。水稻是我国人民的重要粮食作物, 而杂交水稻是当前我国稻米生产的主要品种。为了保障未来粮食生产, 我国正在推广单产达 9 t·hm<sup>-2</sup> 以上的超级稻。然而许多研究表明, 水稻是大宗农作物中子粒 Cd 吸收最强的<sup>[4]</sup>, 在工矿污染条件下甚至可能产生“Cd 米”, 从而严重危害人类健康<sup>[5]</sup>。

以前的研究表明, 杂交水稻对土壤中原有 Cd 的

吸收与积累,基因型的影响可能高于土壤类型的影响,但对外源 Cd 的吸收与子粒积累,土壤类型的影响可能强于品种基因型,而土壤与品种间的正交互作用(Cd 吸收强的超级稻种植于土壤 Cd 化学有效性高的土壤)会使水稻子粒 Cd 积累成倍提高<sup>[6]</sup>。超级稻是我国为提高水稻生产能力而正在大力推广的品种,我们的研究<sup>[6]</sup>已经表明,超级稻子粒 Cd 累积明显强于杂交稻,从而加大了子粒 Cd 的食品安全风险。普通杂交稻 Cd 的吸收与分配因品种而异,且植株 Cd 吸收以苗期和抽穗期最为强烈。但还不清楚超级稻植株 Cd 吸收积累在不同生育期间的变化及其与子粒 Cd 吸收的关系。

本文采用室内盆栽试验研究 2 个不同品种杂交水稻(1 个超级稻和 1 个普通杂交稻)在 2 种不同性质土壤中对土壤固有 Cd 和外加 Cd 的吸收和分配的生育期变化,分析讨论其与不同品种子粒 Cd 积累的关系,为认识 Cd 在土壤-水稻系统中的迁移及其子粒 Cd 积累机制提供科学依据,为选育高产低 Cd 超级稻品种而实现 Cd 安全的水稻生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试作物

- (1)品种 A,Ⅱ优明 86,为超级稻品种,购买种子的 Cd 含量为  $65\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\pm 9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。
  - (2)品种 B,汕优 63,为普通杂交稻品种,购买种子的 Cd 含量为  $38\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\pm 7\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。
- 2 个品种均为籼型三系杂交稻,全生育期为 150 d $\pm$ 10 d。

1.2 供试土壤

- (1)乌栅土(Soil W),为太湖地区典型脱潜型水稻土(Typical Haplaquept),采自江苏省昆山市农业科技示范园区。
  - (2)红沙泥田(Soil H),属红壤性水稻土,为典型简育湿润老成土(Typical Hapludults),采自中国科学院鹰潭红壤生态试验站,第四纪红黏土母质所发育。
- 2 种土壤均采自耕层,在 2004 年 5 月采集,运回实验室后经风干,磨碎,过 5 mm 孔径筛,混匀备用,

另取部分磨碎过 1 mm 和 0.149 mm 尼龙筛供基本性质测定。供试土壤的基本理化性质分析结果见表 1。

1.3 Cd 处理

目前研究报道的土壤 Cd 污染水平一般在 5 mg·kg<sup>-1</sup> 以下<sup>[7,8]</sup>,本研究采用土壤无外源 Cd(Cd0 处理)和外源添加 Cd 处理(外加 Cd 2.5 mg·kg<sup>-1</sup>)。外加 Cd 的方法是将分析纯 CdCl<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O 溶解于水配制成溶液,水稻移栽前加入土壤。

1.4 盆栽试验

采用直径 20 cm、高 20 cm 的塑料盆,每盆装土 3.0 kg,加入外源 Cd 溶液,混匀,然后在每盆中加入 0.642 g 尿素、0.531 g 过磷酸钙和 0.522 g 氯化钾<sup>[9]</sup>,加水搅成匀浆,混匀之后放置 20 d。将购买的稻种浸种催芽,在沙培中生长,秧龄 30 d 时移植于盆钵中,每盆 3 茺,返青后间苗为 6 个基本苗,按大田栽培管理要求进行灌水和追肥。试验完全随机设计,设 3 次重复,盆栽试验于 2004 年在南京农业大学网室进行。

1.5 植株样品采集与 Cd 测定

1.5.1 样品的采集

分别在苗期、抽穗期、成熟期采集植株样本,先移出盆钵,使植株脱离土壤,用自来水小心洗净根系泥土,然后用去离子水清洗整个植株,按根、茎叶和子粒等不同器官分别处理,105 ℃杀青 20 min,60 ℃烘干,称重。取部分用不锈钢粉碎机(天津泰斯特 FW80)得到粉碎样品,过 0.25 mm 尼龙筛,供化学分析用。盆中土壤经破碎后拣出可见有机残体,混匀,取部分磨碎,分别过 1 mm 和 0.149 mm 尼龙筛,供化学分析用。

1.5.2 样品消化和 Cd 测定

植株样品采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>(4:1, V/V)混合酸消化,参照鲁如坤推荐的方法<sup>[10]</sup>。称取粉碎的植株样品 2 g 左右置于 100 mL 高脚烧杯中,加入 10 mL 混合酸,静置消化过夜,次日,将烧杯置于电热板上,170 ℃下砂浴消化,并不断滴加混合酸,至溶液颜色变为无色并冒白烟后,再继续蒸发至剩余体积 2 mL 左右,冷却,定容至 25 mL,消煮液采用原子吸收分光光谱仪测定(北京普析 TAS986),消化和测定中所用试剂均为 GR 级。以国家标准物质 GBW07603(灌木枝叶标准物

表 1 供试土壤的基本性质  
Table 1 Basic properties of studied soils

| 土壤类型 | pH(H <sub>2</sub> O) | 有机碳/g·kg <sup>-1</sup> | CEC/cmol·kg <sup>-1</sup> | 粘粒含量/g·kg <sup>-1</sup> | 速效磷/mg·kg <sup>-1</sup> | 全 Cd/mg·kg <sup>-1</sup> |
|------|----------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 土壤 W | 5.84                 | 24.26                  | 11.50                     | 230.60                  | 14.50                   | 0.71                     |
| 土壤 H | 5.25                 | 15.01                  | 4.86                      | 130.11                  | 6.36                    | 0.43                     |

质 0.38 mg·kg<sup>-1</sup>)为内标控制分析质量。

1.6 统计分析

分析结果进行平均值和标准差统计,统计检验采用 SPSS for Windows 11.0 软件,显著性差异水平为  $P\leq 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 生物量

不同处理下供试 2 品种在不同生育期的生物量观测结果示于图 1。无论在何生育期,加 Cd 处理下生长于土壤 H 中的 2 个品种的生物量均无显著差异;而土壤 W 中,Cd 处理对品种 A 在不同生育期的生物量都无影响,而 Cd2.5 处理显著降低了品种 B 在抽穗期的生物量。可以看出,Cd0 处理下,同种土壤、同一生育期中没有观察到生物量的品种差异。但加 Cd 处理下,品种 A 抽穗期生物量显著大于品种 B,且土壤 W 中显著高于土壤 H 中,这是因为土壤 H 肥力较低。王凯荣<sup>[1]</sup>采用水培试验表明,水稻抽穗期生物量变化对 Cd 胁迫最敏感。本试验中也只在抽穗期观察到 Cd 处理下的生物量的品种间差异,说明 Cd 对杂交稻和超级稻生长的影响都在抽穗期最明显。无论有无外加 Cd 处理,在苗期品种 B 生物量在土壤 W 中总是小于土壤 H,但是到了成熟期,在无 Cd 处理下是土壤 W 中大于土壤 H 中,在 Cd2.5 处理下两种土壤中无明显差异;对品种 A 来说,苗期 Cd 处理下的情况与品种 B 相似,在抽穗期表现为土壤 W 中大于土壤 H 中。看来,Cd 处理和较高的 Cd 有效性似乎促进了普通杂交稻在苗期的生长。而到了抽穗期,这时候的生殖生长需要较好的土壤养分条件,在肥力较高的土壤 W 中生物量高于土壤肥力较低的土壤 H。

2.2 植株 Cd 总吸收量的生育期变化

对不同生育期收获的水稻植株进行 Cd 含量测定,结合测定的植株生物量计算植株在各生育期时

Cd 吸收总量,其结果示于图 2。植株 Cd 总吸收量介于 (58.66±5.47)  $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$  ~ (1 330.49±507.62)  $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ ,相差近 23 倍。无 Cd 处理下,无论何生育期,单个品种的植株 Cd 总吸收量在两种土壤中没有差异,同种土壤上两品种间也无差异。说明供试水稻对土壤固有的低含量 Cd 的吸收程度较低。外加 Cd 处理下的情况较为复杂,在有效性较高的土壤 H 中,各生育期均表现出显著的品种差异。在不同生育期,品种 A 的植株 Cd 总吸收量是品种 B 的 1.4~1.6 倍;土壤 W 中则不表现出品种差异。因此,无外源 Cd 下,品种间差异表现在对有效性 Cd 的吸收差异上。对于同一品种来说,各生育期中植株 Cd 总吸收量还表现出显著的土壤差异,从苗期到成熟期,品种 A 的植株 Cd 总吸收量在土壤 H 中分别是土壤 W 中的 11 倍到 3 倍,品种 B 在土壤 H 中则分别是土壤 W 中的 11 倍到 2 倍。可见,土壤的因素可能相当或大于品种的因素,而外界 Cd 浓度则加大这些因素的作用。

将各生育期植株 Cd 吸收量示于图 3。水稻不同生育期对 Cd 的积累程度因品种、Cd 处理和土壤条件而异。不加 Cd 时,土壤 W 中 2 品种吸收 Cd 最多的时期均是抽穗期,占全生育期总量的 70%多,但 Cd 有效性高的土壤 H 中,抽穗期的 Cd 吸收量只占全生育期总量的 40%多,而成熟期的 Cd 吸收量约达到全生育期总量的 50%。而品种 A 和 B 的 Cd 总吸收量比土壤 W 中升高了 6 倍和 2 倍。Cd 处理下,2 品种吸收 Cd 最多的时期仍均是抽穗期,占全生育期总量的 51%~88%。然而,土壤 H 中品种 A 和 B 的成熟期 Cd 总吸收量较土壤 W 中分别降低了 66%和 44%。史静等<sup>[12]</sup>对 2 种常规稻的研究结果表明,不加 Cd 时分蘖期、成熟期是常规稻 Cd 吸收的关键时期,总计占全生育期的 84%~97%;加 Cd 处理下,Cd 亲和力强的品种则在成熟期吸 Cd 增多。可见,杂交稻在不同时期的 Cd 吸收特点与常规稻不同。在 Cd 有效供应的条

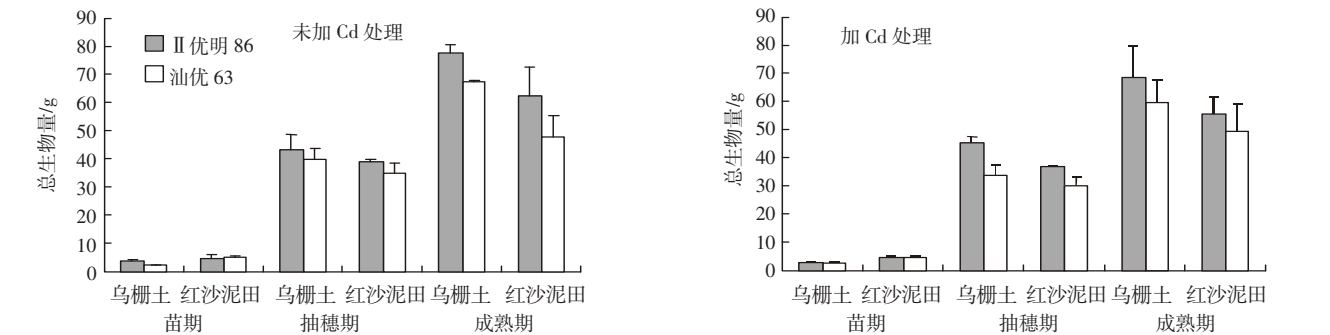


图 1 供试水稻不同生育期的总生物量  
Figure 1 The total plant biomass of studied rice cultivars in different growth stages(Left, Cd0; Right, Cd2.5)

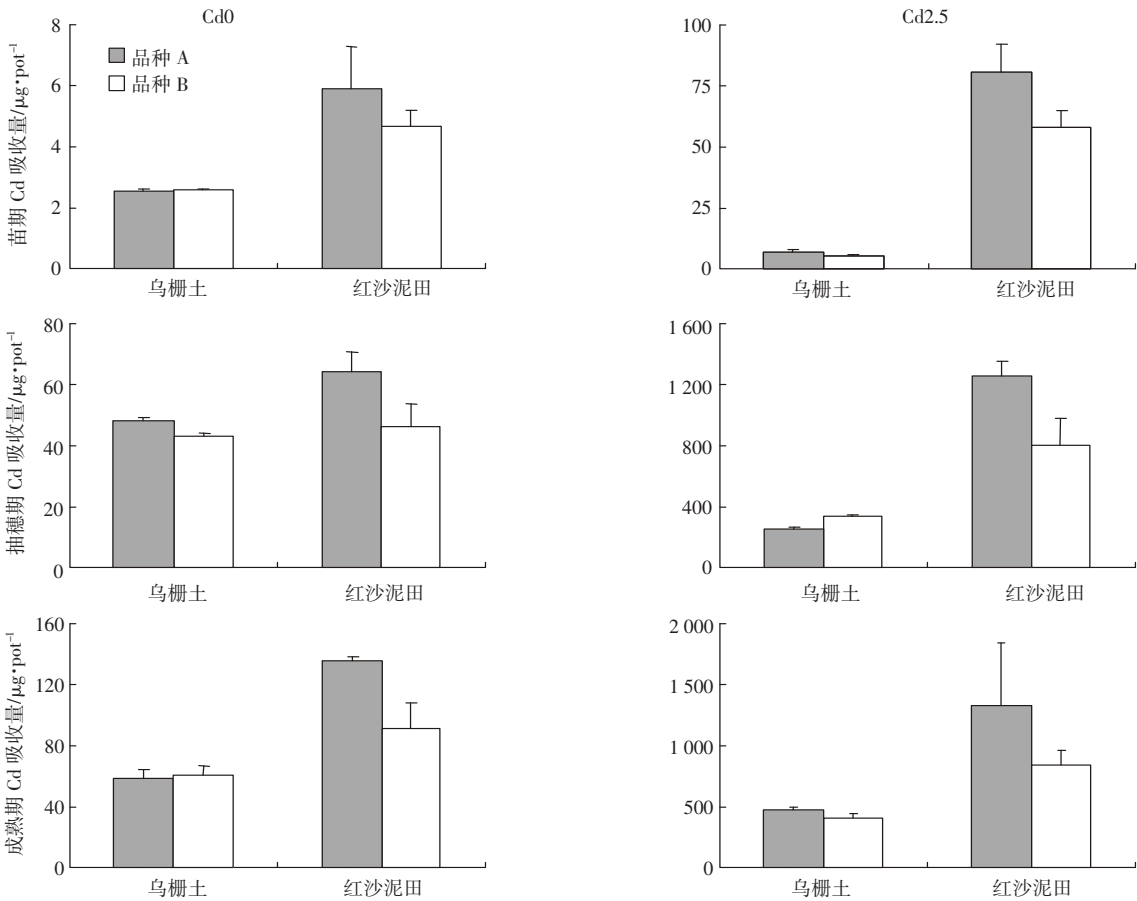


图 2 不同 Cd 处理下不同土壤中供试水稻品种 Cd 吸收量  
Figure 2 Cd uptake by studied cultivars in different soils under different Cd treatments

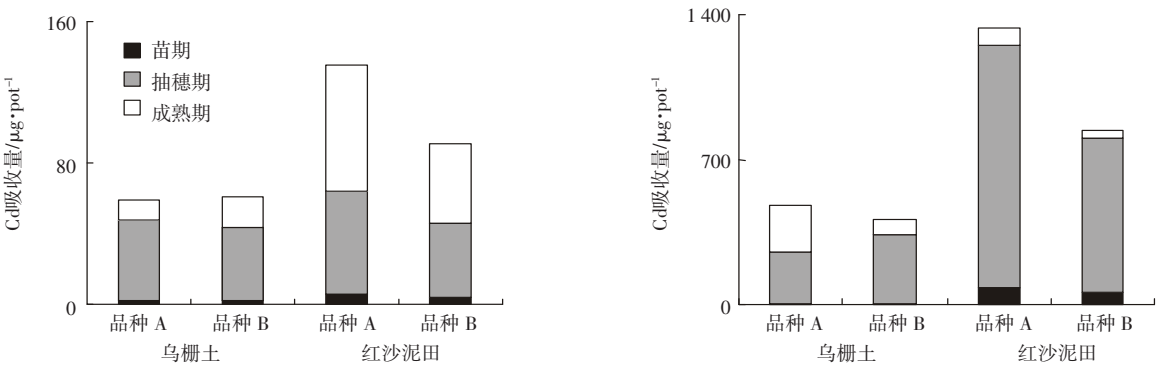


图 3 不同 Cd 处理下供试水稻不同生育期 Cd 吸收量(左,Cd0 处理;右,Cd2.5 处理)  
Figure 3 Cd uptake in growth stages under different Cd treatments (Left, Cd0; Right, Cd2.5)

件下(土壤 H 中或外加 Cd,或两者都具备),杂交稻在成熟期的 Cd 吸收量也大为增加,并且占植株总 Cd 的份额提高,超级稻品种比普通杂交稻品种更甚。但无论如何,与常规稻相同的是,抽穗期都是水稻 Cd 吸收的关键时期。需要注意的是,在土壤 H 中,Cd 处理下品种 A 在苗期、抽穗期和成熟期的 Cd 总吸收量比品种 B 分别高出 38%、56%和 58%,尽管两品种 Cd

吸收量的生育期分配相近。因此,品种 A 在后期吸 Cd 量增加可能是其高植株 Cd 积累的主要因素。

2.3 植株吸收 Cd 的器官分配

将不同 Cd 处理下供试杂交稻各生育期 Cd 总量的器官分配示于表 2。未加 Cd 处理下,无论何种土壤中或何生育期中,品种 A 的根和茎叶 Cd 量与品种 B 均无差异。加 Cd 处理下,在抽穗期和成熟期,品种 A

表 2 不同生育期下根、茎叶中 Cd 总累积量(μg·pot<sup>-1</sup>)  
Table 2 Uptaken Cd between root and shoot in different growth stages(μg·pot<sup>-1</sup>)

| 处理    | 土壤 | 品种 | 苗期          |             | 抽穗期            |               | 成熟期            |               |
|-------|----|----|-------------|-------------|----------------|---------------|----------------|---------------|
|       |    |    | 根           | 茎叶          | 根              | 茎叶            | 根              | 茎叶            |
| Cd0   | W  | A  | 1.30±0.04c  | 1.21±0.07b  | 16.96±0.49c    | 31.11±1.18d   | 31.08±3.64b    | 23.99±6.81d   |
|       |    | B  | 1.74±0.13c  | 0.81±0.06b  | 21.93±1.48c    | 21.29±1.88d   | 25.78±2.56b    | 26.21±5.35d   |
|       | H  | A  | 3.15±0.72c  | 2.72±0.72b  | 15.58±1.09c    | 48.66±6.18d   | 84.99±2.55b    | 46.25±0.49d   |
|       |    | B  | 2.31±0.45c  | 2.36±0.14b  | 37.61±14.48c   | 19.55±5.00d   | 52.53±9.56b    | 36.46±8.92d   |
| Cd2.5 | W  | A  | 6.83±1.76c  | 1.62±0.52b  | 144.32±6.98b   | 108.23±23.09c | 259.06±24.60b  | 202.63±10.99b |
|       |    | B  | 3.64±0.55c  | 1.62±0.02b  | 211.83±16.02b  | 124.16±12.04c | 250.24±29.66b  | 148.24±1.30c  |
|       | H  | A  | 48.67±9.47a | 25.21±2.89a | 420.99±76.17a  | 830.26±39.11a | 830.92±453.16a | 468.79±72.47a |
|       |    | B  | 36.16±4.50b | 25.74±2.37a | 355.58±106.72a | 444.77±95.96b | 600.83±208.91a | 220.80±19.30b |

注:表中同列中不同字母表示不同处理间差异显著(P≥0.05, Duncan 检验)。

茎叶 Cd 量都显著高于品种 B,均约是品种 B 的 2 倍。可见,加 Cd 处理下,品种 A 较品种 B 在生殖生长期茎叶 Cd 积累量更多,而茎叶 Cd 容易转运到子粒。在土壤 H 中,加 Cd 处理下 2 种杂交稻根、茎叶中 Cd 量均比未加 Cd 处理下显著提高,其中在抽穗期,品种 A 和 B 根 Cd 总量分别是无外加 Cd 处理的 27 倍和 9 倍,茎叶 Cd 总量分别是无外加 Cd 处理的 17 倍和 23 倍;而在成熟期,品种 A 和 B 根 Cd 总量分别是无外加 Cd 处理的 10 倍和 11 倍,茎叶 Cd 总量分别是无外加 Cd 处理的 10 倍和 6 倍。而在土壤 W 中,加 Cd 处理下 2 种杂交稻的抽穗期根 Cd 总量只比未加 Cd 处理显著增加了 8~9 倍,茎叶 Cd 总量分别是无外加 Cd 处理的 3 倍和 6 倍,但在成熟期则分别是无外加 Cd 处理的 8 倍和 5 倍。说明在 Cd 处理下,土壤 H 中品种 A 在抽穗期时根 Cd 积累和成熟期茎叶 Cd 积累比土壤 W 中更强烈,从而向其子粒的转运更多而提高了子粒 Cd 水平。

为了探讨 Cd 在杂交水稻中各器官的运移分配能力,将同种杂交稻茎叶与根的 Cd 含量相比得出分

配系数示于表 3。可以看出,未加 Cd 处理下,在苗期和抽穗期时,同种土壤上的 2 杂交稻的分配系数呈显著差异。土壤 W 中,品种 A 的根向茎叶的转运能力从苗期至抽穗期始终强于品种 B;土壤 H 中,品种 A 的根向茎叶的转运能力虽然在苗期小于品种 B,但在抽穗期大于品种 B,说明无外加 Cd 处理的条件下,超级稻Ⅱ优明 86 比普通杂交稻汕优 63 在抽穗期具有更强的 Cd 从根向茎叶转运机制。

3 讨论

龚伟群等<sup>[6]</sup>已经证明超级稻品种比杂交稻具有更强的子粒 Cd 吸收积累能力。我们以前提出<sup>[6]</sup>,杂交水稻子粒对土壤中原有 Cd 吸收与积累,基因型影响高于土壤类型。在本研究中,在未加 Cd 处理下,同种土壤上超级稻与杂交稻间的总生物量、Cd 总吸收量及各器官 Cd 总积累量均无差异。在基因型影响的类型中,水稻中 Cd 的总吸收量和 Cd 在水稻中的分配对水稻子粒中 Cd 含量影响最大。分析得知,加 Cd 处理

表 3 不同生育期 Cd 在水稻根与茎叶的分配系数  
Table3 The Shoot/root partitioning of Cd by studied rice plants in different growth stages

| Cd处理  | 土壤 | 品种 | 苗期           | 抽穗期          | 成熟期        |
|-------|----|----|--------------|--------------|------------|
| Cd0   | W  | A  | 0.35±0.02a   | 0.36±0.01b   | 0.23±0.02a |
|       |    | B  | 0.25±0.03bc  | 0.17±0.03cde | 0.16±0.08a |
|       | H  | A  | 0.27±0.03b   | 0.55±0.08a   | 0.23±0.05a |
|       |    | B  | 0.33±0.01a   | 0.24±0.04c   | 0.27±0.02a |
| Cd2.5 | W  | A  | 0.12±0.02e   | 0.15±0.01de  | 0.29±0.08a |
|       |    | B  | 0.20±0.06cd  | 0.12±0.01e   | 0.25±0.08a |
|       | H  | A  | 0.19±0.01d   | 0.37±0.08b   | 0.21±0.06a |
|       |    | B  | 0.24±0.03bcd | 0.24±0.04c   | 0.27±0.02a |

注:Cd 的分配系数以水稻茎叶的 Cd 含量与水稻根部的 Cd 含量之比来表示;表中同列中不同字母表示不同处理间差异显著(P≥0.05, Duncan 检验)

下乌栅土中超级稻和杂交稻子粒Cd含量分别是未加Cd处理的6倍和5倍,而加Cd处理红沙泥田中超级稻和杂交稻子粒Cd含量分别是未加Cd处理的8倍和7倍。由于未加Cd处理的2种土壤中和Cd处理的乌栅土中,超级稻和杂交稻子粒Cd的吸收总量无显著差异,而二者子粒Cd含量却差异显著,相当于杂交稻的1.3~1.7倍。说明超级稻在强吸收的基础上,根向茎叶、子粒的迁移分配进一步加剧了吸收Cd在子粒中的积累。

我们认为,杂交水稻对外源Cd的吸收与子粒积累,土壤类型的影响强于品种基因型。在本研究中发现,Cd处理下杂交稻生物量在红沙泥田和乌栅土间的生物量差异远远没有两土壤间的Cd吸收总量的差异显著。这说明土壤更深刻地影响杂交稻对Cd的吸收能力。然而供试不同品种的Cd总吸收量在不同土壤上表现有异。尽管在乌栅土中品种间差异不明显,但红沙泥田中存在显著的品种差异。在Cd处理下乌栅土中,Ⅱ优明86比汕优63在苗期表现出更强的Cd由根向茎叶的转运能力,及在成熟期的茎叶中积累更多Cd量,这可能是超级稻Ⅱ优明86子粒Cd吸收积累更强的原因。在Cd处理下的红沙泥田中,除了Cd吸收总量上存在显著的品种差异外,根和茎叶中Cd总量无论是何生育期,始终是Ⅱ优明86显著大于汕优63,并且在抽穗期Ⅱ优明86比汕优63表现出更强的Cd从根向茎叶的转运。由此可知,与普通杂交稻相比,超级稻更强的子粒Cd积累不仅与品种的Cd吸收能力更强有关,而且与其更强的由根向茎叶并进而向子粒的Cd运转能力有更密切关系,这可能是超级稻子粒Cd富集的重要机理之一。

参考文献:

[1] Dudka S, Miller W P. Accumulation of potentially toxic elements in plants and their transfer to human chain[J]. *J Environ Science and Health*, 1998B, 84(4):681-708.

[2] Reeves P G, Nielsen E J O , Brien-nimens C, et al. Cadmium bioavailability from edible sun flower kernels: A long-term study with men and women volunteers [J]. *Environmental Research Section A*87, 2001: 81-91.

[3] 潘根兴, Andrew C Chang , Albert L Page.土壤-作物污染物迁移分配与食物安全的评价模型及其应用[J]. *应用生态学报*,2002,13(7):854-858.

PAN Gen-xing , Andrew C Chang , Albert L Page. Modeling transfer and partitioning of potentially toxic pollutants in soil-crop system for

human food security[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2002,13(7): 854-858.

[4] 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.

[5] 李继强,陈锡永,唐意佳,等. 环境镉污染及其对人群健康影响的研究[J]. *中国公共卫生*, 2001,17(3):196-198.

LI Ji-qiang , CHEN Xi-yong , TANG Yi-jia , et al. Environmental cadmium pollution and the effect on population health[J]. *China Public Health*, 2001,17(3):196-198.

[6] 龚伟群,李恋卿,潘根兴. 杂交水稻对Cd的吸收与籽粒积累:土壤和品种的交互影响[J]. *环境科学*,2006,27(8): 1647-1653.

GONG Wei-qun , LI Lian-qing , PAN Gen-xing. Cd uptake and accumulation in grains by hybrid rice in two paddy soil : Interactive effect of soil type and cultivars[J]. *Environmental Science* , 2006,27(8): 1647-1653.

[7] 曹仁林,贾晓葵,张建顺. 镉污染水稻土防治研究[J]. *天津农林科技*, 1999,12(6):12-17.

CAO Ren-lin , JIA Xiao-kui , ZHANG Jian-shun. The protection study of the Cd-contaminated paddy soils[J]. *Science anf Technology of Tian-jin Agriculture and Forestry*, 1999,12(6):12-17.

[8] 李永涛,刘科学,张池,等. 广东大宝山地区重金属污染水土土壤的Cu Pb Zn Cd 全量与DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. *农业环境科学学报*,2004,23(6):1110-1114.

LI Yong-tao , LIU Ke-xue , ZHANG Chi , et al. Relationships between total and DTPA extractable contents of Cu, Pb, Zn, Cd in trace metal-contaminated paddy soils of Dabaoshan, Guangdong[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2004,23(6):1110-1114.

[9] 吴启堂,陈卢,王广寿. 水稻不同品种对Cd吸收累积的差异和机理研究[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 Ecological Sinica*, 1999,19(1):104-107.

[10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社, 2000. 205-226.

LU Ru-kun. The Chemistry Analysis Method of Soil Agriculture[M]. Chinese Agricultural Science Technology Press, 2000. 205-226.

[11] 王凯荣. Cd对不同基因型水稻生长毒害影响的比较研究[J].*农业生态环境*, 1996, 12(3): 18-23.

WANG Kai-rong. Comparative study on Cd phytotoxicity to different genes of rice[J]. *Rural Eco-Environment*, 1996, 12(3): 18-23.

[12] 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.