

张 曼, 张锡洲, 李廷轩, 等. 镉处理对水稻镉安全材料的镉积累及转移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 223–229.

ZHANG Man, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. Cd accumulations and transfer characteristics of Cd pollution-safe rice materials under different Cd treatments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 223–229.

## 镉处理对水稻镉安全材料的镉积累及转移特性的影响

张 曼<sup>1</sup>, 张锡洲<sup>1\*</sup>, 李廷轩<sup>1</sup>, 余海英<sup>1</sup>, 张 路<sup>1</sup>, 黄 富<sup>2</sup>, 张 翼<sup>3</sup>

(1.四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2.四川农业大学农学院, 成都 611130; 3.甘孜州农业畜牧局, 四川 康定 626000)

**摘 要:**采用土培试验,以前期筛选出的水稻 Cd 安全材料 D62B 为试验材料,普通材料 Luhui17 为对照材料,研究水稻 Cd 安全材料对 Cd 的转移特性以及不同叶位对 Cd 的积累差异。结果表明:在不同 Cd 处理浓度下,D62B 生长受到了一定程度的抑制,且各器官生物量均随 Cd 处理浓度的增加而显著降低。在分蘖期、抽穗期和成熟期,当 Cd 处理浓度为  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,D62B 生物量分别较  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd 处理降低了 43.74%、45.72%和 40.24%。D62B 地上部各器官 Cd 含量在不同生育期均显著低于 Luhui17,且成熟期穗部 Cd 含量仅为 Luhui17 的 44.52%~54.59%;D62B 根系对 Cd 的滞留率在不同生育期均大于 Luhui17,茎叶-穗的转移系数显著低于 Luhui17。抽穗期,D62B 上部 3 片功能叶(简称 3 片功能叶)的 Cd 含量在不同 Cd 处理下均显著低于普通材料 Luhui17,其积累量则在  $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd 处理浓度下显著低于 Luhui17,分别为 Luhui17 的 72.10%和 78.00%,且倒 2 叶 Cd 积累量差异最大。据此认为,D62B 根系对 Cd 较强的固持作用以及抽穗期 3 片功能叶低 Cd 积累量是其籽粒 Cd 含量较低的主要因素之一,这为后期水稻 Cd 低积累品种的培育及推广应用提供理论依据。

**关键词:**水稻;Cd 安全材料;积累;转移

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)02-0223-07 doi:10.11654/jaes.2016-1047

### Cd accumulations and transfer characteristics of Cd pollution-safe rice materials under different Cd treatments

ZHANG Man<sup>1</sup>, ZHANG Xi-zhou<sup>1\*</sup>, LI Ting-xuan<sup>1</sup>, YU Hai-ying<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>1</sup>, HUANG Fu<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>3</sup>

(1.College of Resource Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 3.Ganzi Bureau of Agriculture and Animal Husbandry, Kangding 626000, China)

**Abstract:** A pot experiment was carried out to study the Cd translocation characteristics and Cd accumulation characteristics in different leaf parts of the Cd-Safe Rice Cultivars (D62B) with the control of a common rice cultivar (Luhui17). The biomass of different tissues of D62B significantly decreased with the increasing Cd concentrations in soils. Compared with the treatment of  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd, the biomass of D62B decreased by 43.74%, 45.72% and 40.24% when exposed to  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd. Cd concentrations in tissues of the aboveground part of D62B were significantly lower than those of Luhui17 during different growth stages. At the mature stage, Cd concentrations in panicle of D62B were only 44.52%~54.59% of those of Luhui17. The retention rate in roots of D62B were significantly higher than those of Luhui17, and the translation coefficients of D62B were significantly lower than those of Luhui17. Besides, at the heading stage, Cd concentrations in the three upper leaves of D62B, referred to as the three functional leaves, were significantly lower than those of Luhui17. Cd accumulations in the

收稿日期:2016-08-12

作者简介:张 曼(1990—),女,山东沾化人,硕士研究生,从事土壤污染防治与安全生产方面的研究。E-mail:zhangman\_sicau@163.com

\*通信作者:张锡洲 E-mail:zhangxzhou@163.com

基金项目:四川省科技支撑计划(2014NZ0008);四川省教育厅项目(14ZB0017)

**Project supported:** The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of Sichuan Province, China (2014NZ0008); The Scientific Research Foundation of the Education Department of Sichuan Province, China (14ZB0017)

three functional leaves of D62B were 72.10% and 78.00% of those of Luhui17 with the treatment of  $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd and  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Cd. These results indicated that the great accumulation ability in root and low accumulation in the three functional leaves contributed much to the rice safety when exposed to Cd. Furthermore, these results would provide theoretical basis for the cultivation and application of low Cd accumulation cultivars.

**Keywords:** rice; Cd pollution-safe materials; accumulation; transfer

农业部2014年发布的土壤污染调查公报显示,我国耕地土壤环境质量堪忧,其中Cd污染超标情况较为严重。调查显示,全国部分市售大米中约70%潜存Cd食物暴露风险<sup>[1]</sup>。因此,培育和推广应用Cd安全水稻品种(CSCs)<sup>[2]</sup>,对于实现粮食的安全生产具有重大现实意义。目前,许多学者通过筛选已得到Cd低积累品种,且多集中于植株对Cd的吸收、运输及积累特征的研究<sup>[3-5]</sup>。研究表明,植物地上部Cd浓度取决于根系向地上部转运Cd的能力,而植物结实器官的Cd积累能力取决于营养器官向生殖器官转运Cd的能力<sup>[6-7]</sup>。水稻开花灌浆前,糙米中60%的Cd来自水稻剑叶、茎秆等部位累积的Cd重新活化,并通过韧皮部运输到籽粒<sup>[8]</sup>。可见,水稻糙米中Cd含量与抽穗期茎叶中Cd的累积量密切相关。同时,研究发现功能叶对籽粒正常灌浆结实起着决定性作用,而功能叶中累积的Cd可能与光合产物一起运输至籽粒<sup>[9]</sup>,且主要是抽穗前叶中累积的Cd<sup>[10]</sup>。水稻剑叶对Cd的输出率明显高于其他叶位叶片,可达50%<sup>[11]</sup>。Kashiwagi等<sup>[10]</sup>也发现,水稻下部叶中积累的Cd转运到上部叶,再由上部叶转运至茎秆和穗。然而,目前关于水稻不同叶位中累积的Cd对籽粒Cd含量的影响结果不一,且缺乏系统性。因此,本试验通过探讨水稻Cd安全材料<sup>[12-13]</sup>不同器官对Cd的积累转移特征,明确水稻不同叶位中Cd积累量与糙米Cd含量的相关性,以期进一步揭示Cd在植株内积累与转移规律,从而为Cd低积累品种的培育和推广提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

供试水稻:水稻Cd安全材料D62B和普通材料Luhui17,由四川农业大学农学院提供。

供试土壤:灰潮土,采自四川省都江堰市蒲阳镇双柏村。基本理化性质为:pH 6.70、有机质  $15.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮  $0.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮  $127.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷  $8.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾  $47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全Cd  $0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试肥料:尿素(N 46%)、磷酸二氢钾( $\text{P}_2\text{O}_5$  52%)、

$\text{K}_2\text{O}$  34%)、氯化钾( $\text{K}_2\text{O}$  63%),均为分析纯。

### 1.2 试验设计与处理

试验设  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cd1)、 $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cd4)和  $8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cd8)3个Cd处理,每个处理重复9次,完全随机排列。用12 L的塑料桶装土10 kg(干土重), $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯试剂)以溶液形式施入土壤中,充分混匀,平衡4周待用。旱地育秧,待秧苗生长至4叶期后进行移栽,在移栽前1 d将氮、磷、钾肥(N: $\text{P}_2\text{O}_5$ : $\text{K}_2\text{O}$ =1.5:1:1)以溶液形式施入土壤并混匀。选择长势一致的秧苗移栽至桶中,每桶定苗2株,按照常规管理并做好防病防虫工作和长势记录。试验于2014年5至9月在四川农业大学教学科研园区有防雨设施的网室中进行。

分别于水稻分蘖期、抽穗期和成熟期采样,采用整桶采集方式,每次采样3个重复。样品采集后先用自来水冲洗干净,根部在  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{-EDTA}$  溶液中浸泡15 min,之后用去离子水洗净,吸水纸擦干。植株样品分为根、茎、叶、穗,其中叶部分以不同叶位方式采集,即倒1叶、倒2叶、倒3叶、基部叶(倒3叶以下叶合并一起统称基部叶)。样品在  $105^\circ\text{C}$  下杀青30 min后,  $75^\circ\text{C}$  下烘干至恒重,粉碎备用。

### 1.3 测定项目与方法

土壤基本理化性质采用常规分析方法;土壤Cd全量采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ (V/V/V, 5:1:1)消化,植株Cd含量采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (V/V, 5:1)消化,原子吸收分光光度计测定<sup>[14]</sup>。

### 1.4 数据处理

根系对Cd的滞留率(%)=(1-地上部Cd含量/根系Cd含量) $\times 100$ <sup>[15]</sup>;茎叶-穗转移系数=穗部Cd含量/茎叶Cd含量。

数据统计分析采用DPS11.0,多重比较采用LSD法;图表制作采用Origin 8.1和Excel 2013。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同Cd处理对水稻Cd安全材料生物量的影响

由表1可知,在不同生育期,两类水稻材料各器官生物量均随Cd处理浓度的提高而明显降低,且

D62B 降低幅度小于 Luhui17。比较两类水稻材料,其根生物量在  $4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下差异达最大,茎、叶和穗生物量在  $8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下差异达最大。随着水稻生育期的推进,D62B 和 Luhui17 各器官生物量均显著增加,且两者差异逐渐增大。不同 Cd 处理下,D62B 根、茎生物量在抽穗期和成熟期,叶生物量在三个生育期,穗生物量在成熟期显著高于 Luhui17,且 D62B 整株生物量均明显高于 Luhui17,为 Luhui17 的 1.12~1.26 倍。这表明,D62B 植株生长受 Cd 抑制程度小于 Luhui17。

## 2.2 不同 Cd 处理对水稻 Cd 安全材料 Cd 含量和转移系数的影响

由表 2 可知,在不同生育期,两类水稻材料各器官 Cd 含量均随 Cd 处理浓度的提高而显著增加。不同 Cd 处理下,D62B 茎、叶和穗的 Cd 含量在各生育期均显著低于 Luhui17;而根部 Cd 含量仅在  $1.4\text{ mg}\cdot$

$\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下达显著差异,在  $8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下,仅分蘖期差异显著。比较两类水稻材料,在  $8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下,其根、茎 Cd 含量在分蘖期差异最大,D62B 分别为 Luhui17 的 89.74%和 65.95%;叶和穗的 Cd 含量在抽穗期差异最大,D62B 分别为 Luhui17 的 79.30%和 34.78%。这表明,D62B 对 Cd 的积累能力低于 Luhui17。

由表 3 可知,不同 Cd 处理下,两类水稻材料的根系滞留率随生育期的推进逐渐增大,在成熟期滞留率达最大;D62B 根系滞留率在各生育期均大于 Luhui17,且在抽穗期  $8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd 处理下差异达最大。这表明,D62B 根系对 Cd 的固持能力大于 Luhui17。茎叶-穗转移系数是穗部 Cd 含量与茎叶 Cd 含量之比,反映植株茎叶向穗部转移 Cd 的能力。在不同生育期,两类水稻材料茎叶-穗的转移系数均随 Cd 处理浓度的提高而增大。不同 Cd 处理下,D62B 茎

表 1 不同 Cd 处理浓度对水稻生物量的影响( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ )

Table 1 Effects of Cd on the biomass of different tissues of rice( $\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$ )

| 处理<br>Treatment | 生育期<br>Growth stage | 根 Root  |         | 茎 Stem  |         | 叶 Leaf  |         | 穗 Ear   |         |
|-----------------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                 |                     | D62B    | Luhui17 | D62B    | Luhui17 | D62B    | Luhui17 | D62B    | Luhui17 |
| Cd1             | 分蘖期 Tillering stage | 2.43c   | 2.14c   | 4.16b   | 3.80c   | 6.58c*  | 5.47c   | —       | —       |
|                 | 抽穗期 Heading stage   | 7.66b*  | 7.03b   | 17.43a* | 14.47b  | 14.75b* | 12.66b  | 5.65b   | 4.96b   |
|                 | 成熟期 Mature stage    | 12.29a* | 10.74a  | 17.52a* | 16.07a  | 19.22a* | 15.95a  | 32.21a* | 29.40a  |
| Cd4             | 分蘖期 Tillering stage | 1.44c   | 1.29c   | 3.29c   | 2.89c   | 4.65c*  | 3.89c   | —       | —       |
|                 | 抽穗期 Heading stage   | 6.43b*  | 5.62b   | 12.91b* | 10.84b  | 10.38b* | 9.26b   | 3.90b   | 3.53b   |
|                 | 成熟期 Mature stage    | 10.05a* | 9.29a   | 13.84a* | 12.88a  | 14.07a* | 11.95a  | 21.63a* | 18.84a  |
| Cd8             | 分蘖期 Tillering stage | 1.29c   | 1.19c   | 2.65c   | 2.18c   | 3.47c*  | 2.51c   | —       | —       |
|                 | 抽穗期 Heading stage   | 5.07b*  | 4.56b   | 9.51b*  | 8.58b   | 7.28b*  | 6.32b   | 2.83b   | 2.60b   |
|                 | 成熟期 Mature stage    | 7.89a*  | 7.38a   | 12.48a* | 10.37a  | 10.46a* | 8.37a   | 17.72a* | 15.94a  |

注:不同小写字母表示同一处理同一材料不同时期差异显著( $P<0.05$ );\*表示同一处理同一时期不同材料间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different small letters mean significant difference ( $P<0.05$ ) among different growth stages. \* mean significant difference ( $P<0.05$ ) among two rice cultivars. The same below.

表 2 不同 Cd 处理浓度对水稻各器官 Cd 含量的影响( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 2 Effect of Cd on the Cd concentration in different tissues of rice( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

| 处理<br>Treatment | 生育期<br>Growth stage | 根 Root  |          | 茎 Stem |         | 叶 Leaf |         | 穗 Ear |         |
|-----------------|---------------------|---------|----------|--------|---------|--------|---------|-------|---------|
|                 |                     | D62B    | Luhui17  | D62B   | Luhui17 | D62B   | Luhui17 | D62B  | Luhui17 |
| Cd1             | 分蘖期 Tillering stage | 40.00b  | 49.54b*  | 7.06a  | 9.90a*  | 4.49a  | 5.51a*  | —     | —       |
|                 | 抽穗期 Heading stage   | 36.93c  | 41.75c*  | 4.55b  | 6.57 b* | 3.01c  | 3.88c*  | 0.34a | 0.88a*  |
|                 | 成熟期 Mature stage    | 48.66a  | 54.26a*  | 3.35c  | 6.37b*  | 3.48b  | 4.30b*  | 0.24a | 0.52b*  |
| Cd4             | 分蘖期 Tillering stage | 84.54a  | 95.78a*  | 11.23a | 14.71a* | 7.61a  | 8.18a*  | —     | —       |
|                 | 抽穗期 Heading stage   | 70.42b  | 82.72b*  | 9.87b  | 14.27a* | 5.62c  | 6.74c*  | 0.81a | 2.30a*  |
|                 | 成熟期 Mature stage    | 86.10a  | 97.08a*  | 6.63c  | 12.87b* | 6.61b  | 7.69b*  | 0.65b | 1.46b*  |
| Cd8             | 分蘖期 Tillering stage | 136.67a | 152.29a* | 13.13a | 19.91a* | 11.10a | 12.02a* | —     | —       |
|                 | 抽穗期 Heading stage   | 121.77c | 124.64c  | 13.76a | 19.78a* | 8.20c  | 10.34c* | 1.52a | 4.37a*  |
|                 | 成熟期 Mature stage    | 131.09b | 130.87b  | 9.62b  | 15.56b* | 9.34b  | 11.37b* | 1.07b | 1.96b*  |

表 3 不同 Cd 处理浓度对水稻根系滞留率和转移系数的影响  
Table 3 Effect of Cd on retention rates and translation coefficients of rice

| 处理 Treatment | 生育期 Growth stage    | 滞留率 Retention rate/% |         | 茎叶-穗转移系数 Stems and Leaves-Ear translation coefficients |         |
|--------------|---------------------|----------------------|---------|--------------------------------------------------------|---------|
|              |                     | D62B                 | Luhui17 | D62B                                                   | Luhui17 |
| Cd1          | 分蘖期 Tillering stage | 86.32                | 85.25   | —                                                      | —       |
|              | 抽穗期 Heading stage   | 91.02                | 88.89   | 0.09                                                   | 0.17    |
|              | 成熟期 Mature stage    | 96.03                | 94.40   | 0.07                                                   | 0.10    |
| Cd4          | 分蘖期 Tillering stage | 89.21                | 88.55   | —                                                      | —       |
|              | 抽穗期 Heading stage   | 90.13                | 88.47   | 0.10                                                   | 0.21    |
|              | 成熟期 Mature stage    | 95.34                | 93.25   | 0.09                                                   | 0.14    |
| Cd8          | 分蘖期 Tillering stage | 91.24                | 89.70   | —                                                      | —       |
|              | 抽穗期 Heading stage   | 91.84                | 88.71   | 0.13                                                   | 0.28    |
|              | 成熟期 Mature stage    | 95.57                | 93.66   | 0.11                                                   | 0.14    |

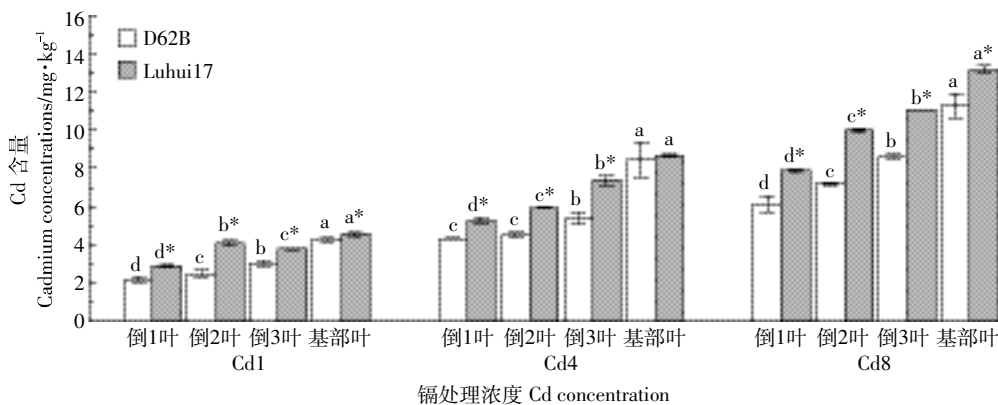
叶-穗的转移系数均明显低于 Luhui17，抽穗期两者差异均达到最大,D62B 转移系数仅为 Luhui17 的 46.43%~52.94%。由此可知,D62B 根系的固持能力大于 Luhui17,而茎叶-穗的转移能力低于 Luhui17。

2.3 抽穗期水稻 Cd 安全材料不同叶位 Cd 积累特性及其对糙米 Cd 含量的影响

由图 1 可知,在不同 Cd 处理下,两类水稻材料不同叶位 Cd 含量均随 Cd 处理浓度的提高显著增加,且不同叶位 Cd 含量表现为基部叶>倒 3 叶>倒 2 叶>倒 1 叶。两类水稻材料不同叶位 Cd 含量均在 8 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理下差异达最大,D62B 不同叶位 Cd 含量仅为 Luhui17 的 72.10%~85.55%。D62B 上部 3 片功能叶(简称 3 片功能叶)Cd 含量均显著低于 Luhui17,仅为 Luhui17 的 60.47%~82.03%,倒 2 叶 Cd 含量与 Luhui17 差异最大,远大于其余叶位。

由图 2 可知,随 Cd 处理浓度提高,D62B 和 Luhui17 的 3 片功能叶 Cd 积累量呈增加的趋势,基部叶 Cd 积累量表现为先增加后降低的特征,在 4 mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理浓度时达到最大值,分别高达 22.26、21.24 μg·plant<sup>-1</sup>。在不同 Cd 处理下,D62B 不同叶位 Cd 积累量表现为基部叶最高,其次为倒 2 叶,倒 3 叶和倒 1 叶最低。比较两类水稻材料可知,在 1mg·kg<sup>-1</sup> Cd 处理浓度时,D62B 倒 2 叶 Cd 积累量显著低于 Luhui17,为 Luhui17 Cd 积累量的 74.37%;当 Cd 处理浓度增加至 4、8 mg·kg<sup>-1</sup> 时,D62B 倒 1 叶、倒 2 叶 Cd 积累量均显著低于Luhui17,仅为 Luhui17 Cd 积累量的 82.20%~86.94%。这表明,D62B 的 3 片功能叶 Cd 积累量远低于 Luhui17。

对两类水稻材料抽穗期不同叶位 Cd 积累量与糙米 Cd 含量进行相关性分析,结果(表 4)显示,两类



不同小写字母表示同一处理同一材料不同叶位间差异显著( $P<0.05$ );\*表示同一处理同一叶位下不同材料间差异显著( $P<0.05$ )。下同  
Different small letters mean significant difference( $P<0.05$ ) among different leaf position. \* mean significant difference( $P<0.05$ ) among two rice cultivars.  
The same as below

图 1 抽穗期水稻不同叶位叶片 Cd 含量  
Figure 1 Cd concentrations in different parts of leaves of different rice cultivars at heading stage

水稻材料糙米 Cd 含量与 3 片功能叶 Cd 积累量呈极显著正相关关系( $r=0.77^{**}\sim 0.94^{**}$ ),但与基部叶 Cd 积累量的相关性不显著。D62B 倒 2 叶和倒 3 叶 Cd 积累量与糙米 Cd 含量相关系数较高,分别高达 0.93 和 0.94,倒 1 叶与糙米 Cd 含量的相关系数也达到极显著相关( $r=0.77^{**}$ ),可见 D62B 的 3 片功能叶中累积的 Cd 对其糙米 Cd 含量影响较大。

### 3 讨论

#### 3.1 Cd 胁迫下水稻安全材料对 Cd 的积累和转移特性

植物体内的 Cd 与土壤中 Cd 含量、生长环境、基因型、生育时期、生物量等因素相关<sup>[16-17]</sup>。研究表明,水稻植株各器官 Cd 含量随土壤 Cd 浓度的提高而增加<sup>[18-19]</sup>,虽然 Cd 在水稻植株各器官中的浓度大小顺序为根>茎>叶>穗,但不同器官间 Cd 浓度差异较大,

且差异幅度因器官不同而有很大差别,说明不同水稻品种对 Cd 的积累、分布存在显著差异<sup>[20]</sup>。本研究结果表明,两类水稻材料各器官 Cd 含量均随土壤 Cd 浓度的升高而显著增加,其根系 Cd 含量在 Cd 浓度为  $8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时差异不显著,但安全材料 D62B 茎、叶、穗的 Cd 含量在不同 Cd 处理下均显著低于 Luhui17。

研究表明,水稻根部向地上部转运镉的能力很大程度上决定水稻籽粒 Cd 含量<sup>[21]</sup>。本研究结果表明,D62B 根系对 Cd 的滞留率明显大于 Luhui17,且随生育期的推进,根系的滞留作用加大,说明 D62B 根系对 Cd 的固持能力明显强于 Luhui17,因而可减少 Cd 向地上部转运,降低地上部 Cd 含量。这与前期研究中发现 D62B 根系细胞壁对 Cd 的固持作用强于 Luhui17 及 D62B 对 Cd 的转运速率小于 Luhui17 的结果一致<sup>[20]</sup>。研究发现,籽粒灌浆期间,叶片中储存的部

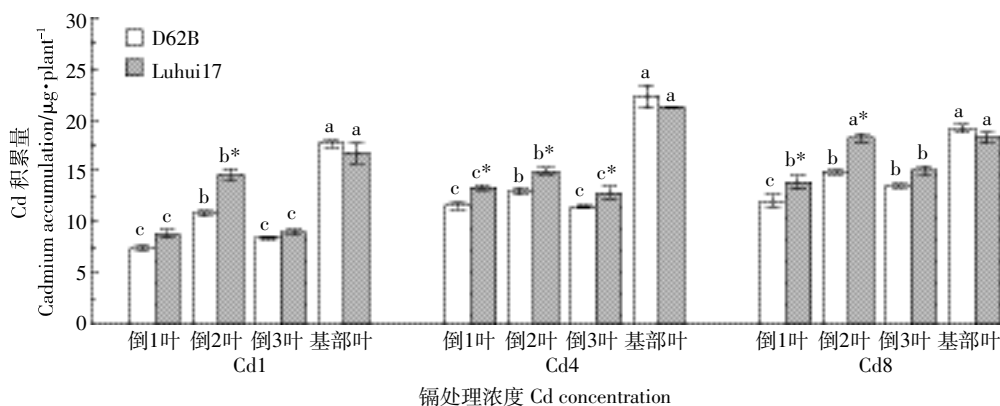


图 2 抽穗期水稻不同叶位叶片 Cd 积累量

Figure 2 Cd accumulation in different leaf parts of different rice cultivars at heading stage

表 4 水稻抽穗期不同叶位叶片 Cd 积累量与糙米 Cd 含量的相关性

Table 4 Correlation analysis between the Cd accumulation in different leaf parts at heading stage and the Cd concentrations in brown rice of the two rice cultivars

| 材料 Variety | 器官 Organ                    | 糙米 Brown rice | 倒 1 叶 1st leaf from the top | 倒 2 叶 2st leaf from the top | 倒 3 叶 3st leaf from the top | 基部叶 Basal leaf |
|------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| D62B       | 糙米 Brown rice               | 1             |                             |                             |                             |                |
|            | 倒 1 叶 1st leaf from the top | 0.77**        | 1                           |                             |                             |                |
|            | 倒 2 叶 2st leaf from the top | 0.93**        | 0.78**                      | 1                           |                             |                |
|            | 倒 3 叶 3st leaf from the top | 0.94**        | 0.88**                      | 0.96**                      | 1                           |                |
|            | 基部叶 Basal leaf              | 0.02          | 0.59                        | 0.2                         | 0.25                        | 1              |
| Luhui17    | 糙米 Brown rice               | 1             |                             |                             |                             |                |
|            | 倒 1 叶 1st leaf from the top | 0.81**        | 1                           |                             |                             |                |
|            | 倒 2 叶 2st leaf from the top | 0.88**        | 0.55                        | 1                           |                             |                |
|            | 倒 3 叶 3st leaf from the top | 0.92**        | 0.89**                      | 0.71*                       | 1                           |                |
|            | 基部叶 Basal leaf              | 0.22          | 0.59                        | -0.1                        | 0.41                        | 1              |

注:\*\* 表示在 0.01 水平上极显著相关;\* 表示在 0.05 水平上显著相关。

Note:\*\* and \* respectively mean correlation are significant at the 0.01 and 0.05 level.

分Cd可与其他营养元素一起转运到籽粒中<sup>[9]</sup>,且籽粒Cd含量与Cd从地上部到籽粒的分配比例高度相关<sup>[22]</sup>。本研究表明,两类水稻材料茎叶中累积的Cd向穗部转移能力在抽穗期强于成熟期。D62B茎叶向穗的转移系数显著低于Luhui17,且随Cd处理浓度增加差异幅度呈增加的趋势。这是因为在籽粒发育过程中,营养体中Cd是按比例输出的<sup>[11]</sup>,D62B茎叶中Cd累积量显著低于Luhui17,致使转运到籽粒中Cd总量显著小于Luhui17;而且前期研究发现D62B地上部对Cd的固持能力明显高于Luhui17,继而降低了地上部Cd的有效性<sup>[20]</sup>。正是由于D62B这种根系对Cd的高固持作用和茎叶对Cd的低转运能力,致使D62B糙米Cd含量低于食品安全国家标准限值,表现出籽粒Cd低积累的特点。

### 3.2 Cd胁迫下水稻安全材料不同叶位Cd积累特征及对糙米Cd含量的影响

叶片不仅是光合作用的场所,也是提供籽粒营养的储存器官。研究表明,水稻叶中活化的Cd先转运至茎节,然后通过维管束转运到上部茎节,最终经韧皮部运送到籽粒<sup>[5]</sup>,且在灌浆初期至成熟期,水稻剑叶中Cd含量有明显的下降<sup>[23]</sup>。本研究表明,D62B的3片功能叶Cd含量均显著低于Luhui17,且随Cd胁迫浓度的增加,两类材料Cd含量差异增大。研究发现,小麦和水稻籽粒中的Cd主要来源于茎叶中累积的Cd再活化分配到籽粒<sup>[8,24]</sup>。可见,籽粒Cd含量与叶片Cd的积累密切相关。本研究表明,在 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd处理浓度时,两类水稻材料不同叶位Cd积累量差异不大,而在 $4, 8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  Cd处理浓度时,D62B的3片功能叶Cd积累量显著低于Luhui17;D62B基部叶镉积累量分配比例明显大于Luhui17,即D62B将更多的镉积累在基部叶。D62B的3片功能叶Cd积累量表现为倒2叶>倒3叶、倒1叶。这是由于抽穗期3片功能叶生物量表现为倒2叶>倒1叶>倒3叶,田永超<sup>[25]</sup>在探讨水稻不同叶位叶片干重时亦得到相同结果。对两类水稻材料在抽穗期不同叶位Cd积累量与糙米Cd含量进行相关性分析可知,糙米的Cd含量与3片功能叶中Cd积累量呈极显著正相关关系,但与基部叶相关性不显著,与Harris等<sup>[26]</sup>运用同位素<sup>109</sup>Cd对基因相近的两个小麦材料进行研究得到的结果一致。这可能是由于基部叶多为衰老叶片,光合作用弱,不能向籽粒提供光合产物,而水稻3片功能叶中光合特性较好<sup>[27]</sup>。有研究指出,3片功能叶是籽粒灌浆过程的主要营养来源,水稻的倒1叶和倒2叶对产量的贡献

度约占74%<sup>[28]</sup>。这说明D62B在抽穗期累积在3片功能叶中的Cd是糙米Cd的主要来源之一。因此,后期研究中可以深入探讨3片功能叶中累积的Cd向籽粒的转运途径及影响因素,这可能与同化物的运输、运输通道、籽粒接纳Cd的能力以及库的活性<sup>[29]</sup>有关。

## 4 结论

水稻Cd安全材料D62B在三个生育期茎、叶、穗的生物量显著高于普通材料Luhui17,Cd含量均显著低于Luhui17,其根系对Cd的固持作用较强,且茎叶-穗的转移系数明显小于Luhui17。同时,在抽穗期,D62B不同叶位Cd积累量表现为基部叶>倒2叶>倒3叶、倒1叶,3片功能叶Cd积累量与糙米Cd含量呈极显著正相关关系。由此表明,深入研究Cd在植株不同器官间的迁移和转运规律,尤其是3片功能叶中累积的Cd向籽粒的转运和分配规律,将有助于揭示Cd在水稻体内的转运与积累的机理,从而为Cd低积累品种的培育和推广应用提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] 甄燕红,成颜君,潘根兴,等.中国部分市售大米中Cd,Zn,Se的含量及其食品安全评价[J].安全与环境学报,2008,8(1):119-122.  
ZHEN Yan-hong, CHENG Yan-jun, PAN Gen-xing, et al. Content of Cd, Zn, Se and food safety evaluation of rice in China[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(1): 119-122.
- [2] Zhang H J, Zhang X Z, Li T X, et al. Variation of cadmium uptake, translocation among rice lines and detecting for potential cadmium-safe cultivars[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(1): 277-286.
- [3] Yu H, Wang J, 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): 302-309.
- [4] Águeda G, Gil-Díaz M D M, Lobo M D C. Metal tolerance in barley and wheat cultivars: Physiological screening methods and application in phytoremediation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, doi: 10.1007/s1368-016-1387-4.
- [5] Uruguchi S, Fujiwara T. Rice breaks ground for cadmium-free cereals[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, 16(3): 328-334.
- [6] Mori S, Uruguchi S, Ishikawa S, et al. Xylem loading process is a critical factor in determining Cd accumulation in the shoots of *Solanum melongena* and *Solanum torvum*[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2009, 67(1): 127-132.
- [7] 张玉秀,于飞,张媛雅,等.植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J].中国生态农业学报,2008,16(5):1317-1321.  
ZHANG Yu-xiu, YU Fei, ZHANG Yuan-ya, et al. Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2008, 16(5): 1317-1321.
- [8] Rodda M S, Li G, Reid R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants; the relative importance of remobilisation within the plant and

- root Cd uptake post-flowering[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1):105-114.
- [9] 朱智伟,陈铭学,牟仁祥,等.水稻镉代谢与控制研究进展[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18):3633-3640.
- ZHU Zhi-wei, CHEN Ming-xue, MOU Ren-xiang, et al. Advances in research of cadmium metabolism and control in rice plants[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2014, 47(18):3633-3640.
- [10] Kashiwagi T, Shindoh K, Hirotsu N, et al. Evidence for separate translocation pathways in determining cadmium accumulation in grain and aerial plant parts in rice[J]. *Bmc Plant Biology*, 2009, 9(8):1-10.
- [11] 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.
- [12] 张锡洲,张洪江,李廷轩,等.水稻镉耐性差异及镉低积累种质资源的筛选[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11):1434-1440.
- ZHANG Xi-zhou, ZHANG Hong-jiang, LI Ting-xuan, et al. Differences in Cd-tolerance of rice and screening for Cd low-accumulation rice germplasm resources[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2013, 21(11):1434-1440.
- [13] 张路,张锡洲,李廷轩,等.水稻镉安全亲本材料对镉的吸收分配特性[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1):174-184.
- ZHANG Lu, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. Cd uptake and distribution characteristics of Cd pollution-safe rice materials[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2015, 48(1):174-184.
- [14] Tang H, Li T, Yu H, et al. Cadmium accumulation characteristics and removal potentials of high cadmium accumulating rice line grown in cadmium-contaminated soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(15):15351-15357.
- [15] 陈亚慧,刘晓宇,王明新,等.蓖麻对镉的耐性、积累及与镉亚细胞分布的关系[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9):2440-2446.
- CHEN Ya-hui, LIU Xiao-yu, WANG Ming-xin, et al. Cadmium tolerance, accumulation and relationship with Cd subcellular distribution in *Ricinus communis* L.[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9):2440-2446.
- [16] Ishikawa S, Makino T, Ito M, et al. Low-cadmium rice(*Oryza sativa* L.) cultivar can simultaneously reduce arsenic and cadmium concentrations in rice grains[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 62(4):327-339.
- [17] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2):301-310.
- [18] Wang F, Wang M, Liu Z, et al. Different responses of low grain-Cd-accumulating and high grain-Cd-accumulating rice cultivars to Cd stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 96:261-269.
- [19] Uruguchi S, Fujiwara T. Cadmium transport and tolerance in rice: Perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. *Rice*, 2012, 5(5):1-8.
- [20] 张路,张锡洲,李廷轩,等. Cd胁迫对水稻亲本材料 Cd 吸收分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2288-2295.
- ZHANG Lu, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. Effects of cadmium stress on uptake and distribution of cadmium in different rice varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2288-2295.
- [21] 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]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(9):2677-2688.
- [22] Liu J, Qian M, Cai G, 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):443-447.
- [23] Tadakatsu Y, Tadashi G, Mariyo K, et al. Xylem and phloem transport of Cd, Zn and Fe into the grains of rice plants(*Oryza sativa* L.) grown in continuously flooded Cd-contaminated soil[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(3):445-453.
- [24] Chan D Y, Hale B A. Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(408):2571-2579.
- [25] 田永超,朱艳,曹卫星.水稻不同叶位层物理结构与冠层反射光谱的定量研究[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(2):137-141.
- TIAN Yong-chao, ZHU Yan, CAO Wei-xing. Quantitative study on canopy spectral reflectance and physical structure of leaf at different layers[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(2):137-141.
- [26] Harris N S, Taylor G J. Remobilization of cadmium in maturing shoots of near isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium accumulation[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(360):1473-1481.
- [27] 江立庚,曹卫星,姜东,等.水稻叶氮量等生理参数的叶位分布特点及其与氮素营养诊断的关系[J]. 作物学报, 2004, 30(8):745-750.
- JIANG Li-geng, CAO Wei-xing, JIANG Dong, et al. Distribution of leaf nitrogen, amino acids and chlorophyll in leaves of different positions and relationship with nitrogen nutrition diagnosis in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(8):745-750.
- [28] 于洪兰,王伯伦,王术,等.不同叶位叶片对水稻籽粒充实的影响[J]. 种子, 2009, 28(2):1-5.
- YU Hong-lan, WANG Bo-lun, WANG Shu, et al. Effects of different position leaves on grain plumpness in rice[J]. *Seed*, 2009, 28(2):1-5.
- [29] 赵步洪,张洪熙,奚岭林,等.杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3):306-312.
- ZHAO Bu-hong, ZHANG Hong-xi, XI Ling-lin, et al. Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(3):306-312.