

# 栽培模式对水稻镉积累差异及其与光合生理关系的研究

刘 洋<sup>1</sup>, 张玉焯<sup>1\*</sup>, 方宝华<sup>1</sup>, 陈恺林<sup>1</sup>, 李 超<sup>2</sup>, 何 洋<sup>2</sup>

(1.湖南省水稻研究所, 湖南 长沙 410125; 2.湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

**摘要:**本研究以湘早籼45号和陆两优996为材料,研究了不同栽培模式下水稻体内镉(Cd)积累特性及其与光合生理之间的相关性。研究结果表明,在常规水育秧(T1)、软盘育秧(T2)、旱育秧(T3)、直播(T4)4种不同栽培模式下,产量差异达显著水平( $P < 0.05$ ),2个品种均在直播模式下产量最高;从不同器官来看,镉含量最高的是根系,最高可达 $10.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其次是茎秆、叶片,稻谷中含量最低;水稻体内重金属镉主要分布在茎秆中,占吸收总量的41.53%~54.67%,稻谷中镉分布量占4.92%~14.36%;直播栽培模式下植株对重金属镉的吸收能力最强,各个器官中的镉均显著高于其他3种栽培模式;光合生理特性与水稻各器官镉含量、积累量具有一定相关性,其中蒸腾速率与稻谷中镉积累量呈显著正相关,相关系数为 $r=0.684$  ( $P=0.029$ )。

**关键词:**水稻;栽培模式;镉;光合速率;蒸腾速率;相关性

中图分类号:S181

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)05-0450-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0162

## Relationships Between Cadmium Uptake Characteristics and Photosynthetic Physiology Under Different Cultivation Modes of Rice

LIU Yang<sup>1</sup>, ZHANG Yu-zhu<sup>1\*</sup>, FANG Bao-hua<sup>1</sup>, CHEN Kai-lin<sup>1</sup>, LI Chao<sup>2</sup>, HE Yang<sup>2</sup>

(1.Hunan Rice Research Institute, Changsha 410125, China; 2.Agricultural College, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

**Abstract:** Relationships between cadmium uptake characteristics and photosynthetic physiology of rice were studied by using Xiangzaoxian 45 and Luliangyou 996 as materials under four cultivation modes: conventional water raised seedling (T1), nursery seedling (T2), dryland raised seedling (T3), direct seeding (T4). The results showed that different cultivation modes had significant effect on the yield of two cultivars. The cadmium content of different organs followed the sequence of root>stem>leaf>grain. The cadmium uptaken by rice were mainly distributed in the stem, which accounted for 41.53%~54.67% of the gross number, the grain just occupied 4.92%~14.36%. The absorptive capacity of cadmium of direct seeding mode was stronger than the other three modes, and the cadmium content of each organ was higher than the other three cultivation modes significantly. Certain relevance existed between photosynthetic physiological characteristics and the cadmium content, accumulation of each rice organ. There were significant correlation between cadmium content of grain absorbed and transpiration rate. The correlation coefficient was  $r=0.684$  ( $P=0.029$ ).

**Keywords:** rice; cultivation mode; Cd; photosynthetic rate; transpiration rate; correlation

近年来,重金属污染日益受到公众关注,据不完全统计,我国目前受到重金属镉、铅污染的农田面积已达2万 $\text{hm}^2$ ,每年生产的镉含量超标农产品达14.6亿 $\text{kg}$ ,并且呈逐年递增的趋势<sup>[1-2]</sup>。稻米作为我国主要的农产品之一,全国60%以上的人口以其为主食,然而,稻米市场上,镉超标的现象普遍存在,尤其是江

西、湖南的一些县(市),重金属镉已经严重制约了水稻种植业的发展。由于镉在土壤中具有高度的移动性和对作物的高度毒害性,已被视为对水稻种植最具危害的一种重金属污染元素<sup>[3-5]</sup>。目前,国内外关于镉稻米的研究主要集中在镉的吸收、耐受机制,以及基因型差异等方面:王芳等<sup>[4]</sup>研究证明水稻茎叶细胞可溶部分的镉一部分与大分子量蛋白质结合,其余大部分与植物螯合肽(PCs)结合;Cosio<sup>[6]</sup>、Boominathan等<sup>[7]</sup>研究认为镉胁迫下一些应激蛋白对蛋白结构和可溶性方面的稳定作用在植物对镉的耐性中起到一定作用,相比之下,通过采取适宜的栽培措施降低水稻体内镉吸收量的研究鲜有报道。本研究对比研究了4种栽培

收稿日期:2014-06-20

基金项目:湖南省科技重大专项(2011FJ1002);“十二五”国家科技计划粮食丰产科技工程(2011BAD16B01)

作者简介:刘 洋(1984—),男,湖南湘西人,助理研究员,主要从事水稻绿色轻简栽培技术研究。E-mail: liuyang5339@sina.com

\*通信作者:张玉焯 E-mail: yuzhuzhang@hotmail.com

模式下水稻产量以及镉含量的差异,并进一步探讨了水稻镉积累差异及其与光合生理之间的关系,以期研究出能有效降低稻谷中镉含量的种植模式,为保障稻米质量安全提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地点位于湖南省岳阳市湘阴县农业科学研究所,介于东经 112°30′~113°02′,北纬 28°30′~29°03′之间,年平均气温为 17℃,全年无霜期为 223~304 d,年均降雨量 1 392.62 mm。粮食种植面积 9.883 万 hm<sup>2</sup>,粮食产量 58.79 万 t。近年来,来自湘江的农业灌溉水源污染严重,导致该地区农田重金属含量剧增,对当地粮食安全造成威胁。

### 1.2 试验设计

稻田土壤镉含量 0.587 mg·kg<sup>-1</sup>。供试材料为低镉吸收品种湘早籼 45 号、高镉吸收品种陆两优 996。设 4 种栽培模式:常规水育秧(T1)、软盘育秧(T2)、旱育秧(T3)、直播(T4),其中软盘育秧处理实行抛栽;旱育秧处理在育秧时保持秧厢湿润不淹水;直播处理将种子直接撒播至研究田。直播处理 2012 年 4 月 3 日播种,每 667 m<sup>2</sup> 播种 10 kg,其他 3 个处理 2012 年 3 月 20 日播种,秧龄期 30 d,密度 2.2×10<sup>4</sup> 株·667 m<sup>2</sup>,施肥量每 667 m<sup>2</sup> 复合肥(N:P:K 为 12:5:8)35 kg、菜枯 30 kg、尿素 6 kg,小区面积为 30 m<sup>2</sup>,重复 3 次。灌溉、肥料、除草等其他田间管理统一按照湖南省水稻高产栽培方法进行。

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 产量及其构成因子测定

每个小区取 5 蔸水稻植株,考察每穗实粒数、空秕粒数、结实率和千粒重等产量结构因子,结实率=每穗实粒数/(每穗实粒数+每穗空秕粒数);另外,收获时各小区单打单收 12 m<sup>2</sup>,晒干后称重,并按照稻谷水分标准折算出实际产量。

#### 1.3.2 生物产量称量

水稻收获前取水稻植株样品,先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,用吸水纸吸干表面水分。将茎(含鞘)、叶片、穗分开,于 100℃ 下杀青 1~2 h,然后在 70℃ 下烘干至恒重后称量。

#### 1.3.3 重金属镉测定

稻谷风干后按农业部部颁标准《米质测定方法》(NY 147—1988)出糙、磨样、过 100 目筛备用。用体积比为 4:1 的 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 对样品进行消化处理,用

原子吸收光谱仪(美国产)测定各样品的 Cd 的含量,每个样品重复测定 3 次。器官镉积累量(mg)=器官镉含量(mg·kg<sup>-1</sup>)×器官干物质重(g)/1 000。

### 1.3.4 光合生理特性测定

用 LI-6400 便携式光合系统测定仪(美国 Li-cor),于齐穗期选择晴好天气,9:00—11:00 am 在田间测定剑叶、倒 2 叶和倒 3 叶的光合速率(*P<sub>n</sub>*)、蒸腾速率(*T<sub>r</sub>*)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(*C<sub>i</sub>*),重复测定 5 次,取其平均值。测定时设定光强为 1 000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,气体流速为 600 μmol·s<sup>-1</sup>。

### 1.4 数据处理分析

一般数据统计采用 Excel 2003 软件分析,方差分析利用 SPSS 13.0 软件采用 One-Way ANOVA 方法分析,多重比较用 LSD 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻谷产量及生物产量

从表 1 中可以看出:湘早籼 45 号、陆两优 996 在 4 种不同栽培模式下,产量差异达显著水平(*P*<0.05)。2 个品种均表现为 T4 处理产量最高,分别比最低的 T2 处理高出 21.25%、11.77%。从产量构成因子上分析来看,T4 处理下湘早籼 45 号、陆两优 996 有效穗数分别为 31.2 万、28.0 万·667 m<sup>-2</sup>,显著高于其他 3 个处理;T2 处理下湘早籼 45 号的每穗总粒数和实粒数显著低于其他 3 种处理;在结实率和千粒重方面,4 种处理间差异不明显。株高方面,2 个品种均为 T3 处理最高。

在生物产量方面(表 2),T1、T4 处理的生物总量显著高于 T2、T3 处理,表明常规水育秧和直播模式下,水稻干物质积累量多,为高产形成打下基础。从不同器官的生物积累量分析来看,叶片的生物积累量以 T1 处理最多;茎秆方面,T4 的生物积累量显著高于 T2、T3 处理;T4 处理的稻谷生物积累量最高,湘早籼 45 号、陆两优 996 分别为 17.29、19.20 g·蔸<sup>-1</sup>。

### 2.2 器官镉含量及体内镉分布

从不同器官来看(表 3),根系中镉含量最高,湘早籼 45 号和陆两优 996 平均镉含量分别为 3.696 mg·kg<sup>-1</sup> 和 5.204 mg·kg<sup>-1</sup>,其中 T4 处理根系镉含量显著高于其他 3 种模式;茎秆中 2 个品种的镉平均含量分别为 0.536 mg·kg<sup>-1</sup> 和 0.856 mg·kg<sup>-1</sup>,为根系的 14.5%和 16.4%,其中 T4 处理下 2 个品种茎秆中的镉含量很高,显著高于其他 3 种模式;叶片中镉含量略低于茎秆,同样表现为 T4 处理高于其他处理,其中陆

表 1 不同栽培模式下水稻产量及其构成因子

Table 1 Yields and yield components of rice under different cultivation modes

品种 variety	栽培模式 Cultivation modes	株高 Plant height/cm	有效穗 Valid panicle/ 10 <sup>4</sup> ·667 m <sup>-2</sup>	每穗总粒数 Total grains per panicle	每穗实粒数 Filled grains per panicle	结实率 Ripening percentage/%	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/kg·667 m <sup>-2</sup>
湘早籼 45 号 Xiangzaoxian 45	T1	80.1a	26.1b	69.4a	63.6a	91.6a	23.6a	343.6b
	T2	80.1a	25.1b	55.9b	50.2c	89.7a	23.7a	310.5c
	T3	81.9a	25.8b	69.2a	62.4a	90.1a	23.7a	332.8b
	T4	81.7a	31.2a	64.8a	57.5b	88.6a	23.7a	376.5a
	平均	80.9	27.1	64.8	58.4	90.0	23.7	340.8
陆两优 996 Luliangyou 996	T1	89.2b	25.1b	73.9d	63.2c	85.5a	27.0a	400.6ab
	T2	94.3ab	18.3c	89.3b	74.0b	82.8a	27.8a	378.0b
	T3	98.1a	16.3c	107.3a	94.1a	87.7a	27.6a	384.1b
	T4	90.6b	28.0a	80.3c	68.3bc	85.1a	27.0a	422.5a
	平均	93.1	21.9	87.7	74.9	85.3	27.4	396.3

注:处理间标注不同字母者表示在 0.05 水平下差异显著。下同。

Note: Different letters at different treatments mean significant difference at 0.05 level. The same below.

表 2 不同栽培模式下水稻各器官的生物产量(g·蔸<sup>-1</sup>)

Table 2 The biological yield of rice organs under different cultivation modes (g·hill<sup>-1</sup>)

器官 organ	湘早籼 45 号 Xiangzaoxian 45				陆两优 996 Luliangyou 996			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
根系 Root	1.42b	1.03c	1.62a	1.29b	1.77a	1.54b	1.53b	1.20c
茎秆 Stem	21.58ab	20.34b	18.18c	23.93a	26.20a	21.32b	22.10b	25.67a
叶片 Leaf	11.28a	10.40ab	9.54b	10.96a	15.98a	12.34b	12.80b	14.33a
稻谷 grain	15.61b	14.24b	15.04b	17.29a	18.21ab	17.06b	17.54b	19.20a
总重 Total	49.89ab	46.01bc	44.38c	52.47a	62.16a	52.26b	53.97b	60.4a

表 3 不同栽培模式下水稻各器官的镉含量(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 3 The cadmium content of rice organs under different cultivation modes (mg·kg<sup>-1</sup>)

器官 organ	湘早籼 45 号 Xiangzaoxian 45					陆两优 996 Luliangyou 996				
	T1	T2	T3	T4	平均 average	T1	T2	T3	T4	平均 average
根系 Root	3.22b	2.53c	3.25b	5.77a	3.696	4.15b	3.78b	2.69c	10.19a	5.204
茎秆 Stem	0.39b	0.33b	0.39b	1.02a	0.536	0.61b	0.42c	0.37c	2.01a	0.856
叶片 Leaf	0.28c	0.43b	0.30c	0.61a	0.409	0.49b	0.30c	0.30c	1.56a	0.667
稻谷 Grain	0.05c	0.08b	0.09b	0.35a	0.143	0.20b	0.18b	0.09c	0.43a	0.230

两优 996 高达 1.56 mg·kg<sup>-1</sup>; 糙米中镉含量低于根、茎、叶,2 个品种平均为 0.143 mg·kg<sup>-1</sup> 和 0.230 mg·kg<sup>-1</sup>, 其中湘早籼 45 号在 T4 处理下糙米镉含量为 0.349 mg·kg<sup>-1</sup>, 而 T1、T2、T3 处理下镉含量较低;陆两优 996 在 T4 处理下糙米镉含量最高,为 0.43 mg·kg<sup>-1</sup>, 其次为 T1 处理,为 0.20 mg·kg<sup>-1</sup>, T2、T3 处理较低。试验结果表明,湘早籼 45 号根、茎、叶及糙米中平均镉含量均低于陆两优 996;镉在各器官的含量从高到低依次为根>茎>叶>糙米,表明在“源”向“库”的物质运输过

程中,镉在水稻体内的含量递减。

从图 1 中可以看出,水稻体内重金属镉主要分布在茎秆中,占吸收总量的 41.53%~54.67%;其次是叶片和根系,分别占植株吸收总量的 15.39%~29.89%和 12.91%~31.73%;稻谷中镉分布量最少,约占吸收总量的 4.92%~14.36%。4 种处理间比较来看,T4 处理下植株对重金属镉的吸收能力最强,分布于根系、茎秆、叶片、稻谷各器官中的镉均显著高于其他 3 种处理;湘早籼 45 号稻谷中镉的吸收量为 6.03 mg·蔸<sup>-1</sup>,是其

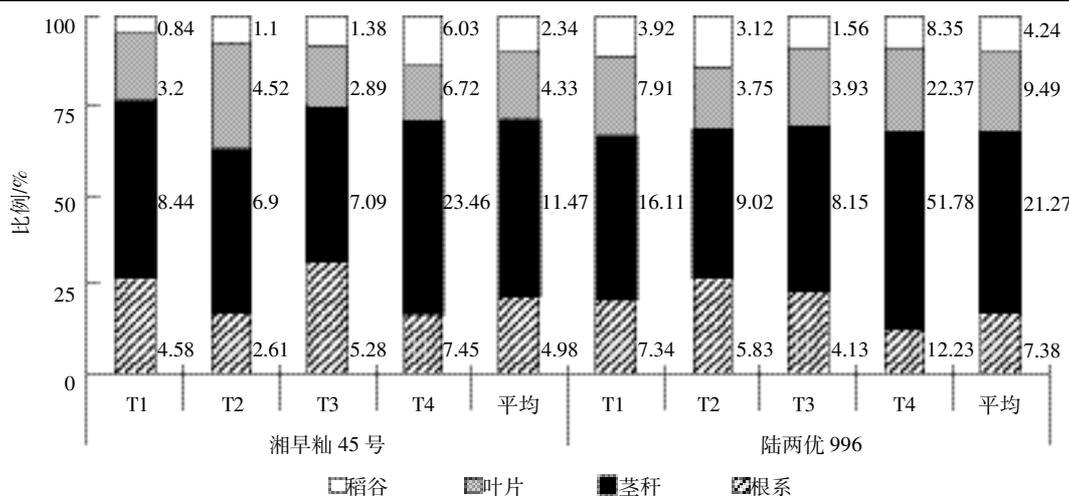


图 1 不同栽培模式下水稻体内镉分布情况(mg·莩<sup>-1</sup>)

Figure 1 The distribution of cadmium in rice organs under different cultivation modes (mg·hill<sup>-1</sup>)

他 3 种处理的 4.37~7.18 倍; 陆两优 996 稻谷中镉的吸收量为 8.35 mg·莩<sup>-1</sup>, 是其他 3 种处理的 2.13~5.35 倍。2 个品种间比较, 陆两优 996 对重金属镉的吸收量远多于湘早籼 45 号。

### 2.3 光合生理及其与镉吸收的相关性

从表 4 中可以看出, 湘早籼 45 号和陆两优 996 在 4 种栽培模式下, 光合速率、蒸腾速率在齐穗期差异显著。在净光合速率方面, T4 处理较高, 2 个品种分别为 17.4 μmolCO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 19.0 μmolCO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,

均显著高于 T3 处理, T2、T3 处理的净光合速率处于中间水平; 在蒸腾速率方面, 湘早籼 45 号表现为 T4>T1>T2>T3, 陆两优 996 表现为 T1>T4>T2>T3; 4 种处理间的胞间 CO<sub>2</sub> 浓度差异不明显。

对齐穗期光合特性与水稻各器官镉含量、积累量的相关性分析表明(表 5), 净光合速率和蒸腾速率均与水稻器官的镉含量、积累量呈正相关。净光合速率与器官镉含量、积累量的相关系数在 0.529~0.697 之间, 相关性不显著。蒸腾速率与稻谷中镉含量、积累

表 4 不同栽培模式下水稻齐穗期的光合特性

Table 4 Effect of different cultivation modes on the photosynthetic rate and transpiration rate

项目(Item)	湘早籼 45 号 Xiangzaoxian 45					陆两优 996 Luliangyou 996				
	T1	T2	T3	T4	平均 average	T1	T2	T3	T4	平均 average
光合速率(Pn) μmolCO <sub>2</sub> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	16.2ab	16.0ab	15.4b	17.4a	16.3	19.2a	18.3ab	17.6b	19.0a	18.5
蒸腾速率(Tr) μmolH <sub>2</sub> O·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	14.2ab	13.5b	12.0c	15.4a	13.8	16.9a	15.7a	14.5b	16.3a	15.8
胞间 CO <sub>2</sub> 浓度(Ci) μmolCO <sub>2</sub> ·mol <sup>-1</sup>	360a	358a	347a	351a	354	366a	367a	364a	352a	362

表 5 齐穗期光合特性与镉吸收积累特性的相关性

Table 5 Relationship between photosynthetic rate and cadmium accumulation on rice

项目 Item	根系镉含量	茎秆镉含量	叶片镉含量	稻谷镉含量	根系镉积累量	茎秆镉积累量	叶片镉积累量	稻谷镉积累量	镉积累总量
	Cd content in root	Cd content in stem	Cd content in leaf	Cd content in grain	Cd accumulation in root	Cd accumulation in stem	Cd accumulation in leaf	Cd accumulation in grain	Cd accumulation in plant
光合速率 Pn	0.574	0.551	0.529	0.603	0.617	0.591	0.616	0.597	0.628
相关系数 r	0.082	0.098	0.115	0.053	0.058	0.072	0.058	0.065	0.052
P 值	0.546	0.524	0.486	0.649*	0.639	0.562	0.561	0.684*	0.592
蒸腾速率 Tr	0.102	0.120	0.154	0.042	0.051	0.091	0.092	0.029	0.071
相关系数 r									
P 值									

注: “\*”表示相关性达 5% 显著水平。

Note: ‘\*’ means significant correlation at the 5% level.

量呈显著正相关, 相关系数分别为  $r=0.649$  ( $P=0.042$ )、 $r=0.684$  ( $P=0.029$ )。

从图 2 可以看出, 当水稻高产时, 糙米镉含量有高有低; 反之, 当水稻低产时, 糙米镉含量同样有高也有低, 表明糙米镉含量与产量之间没有显著相关性, 糙米镉含量并不随着产量的增加而增加或减少, 这可能主要与水稻品种的基因型差异和外界环境等因素有关。另经相关分析表明, 糙米镉含量与植株干物质重、千粒重、结实率等均无显著相关性。

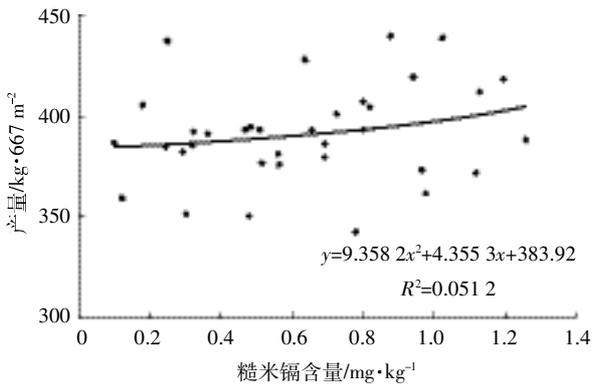


图 2 糙米镉含量与产量的关系

Figure 2 Relationship between Cd content in brown rice and yield

### 3 讨论

张磊等<sup>[8]</sup>的研究表明, 水稻不同品种对镉的积累能力差异显著, 本研究与前人研究结论一致, 即湘早粳 45 号、陆两优 996 两个不同品种对重金属镉的吸收特性差异显著, 稻谷中镉含量分别为  $0.143$ 、 $0.230$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 本研究还发现, 糙米中重金属镉的含量与稻谷产量没有必然联系, 即无论在高产或低产情况下, 糙米的镉含量有高也有低, 而李坤权等<sup>[9]</sup>和 He 等<sup>[10]</sup>研究认为糙米中的镉浓度和积累速率与水稻产量呈显著正相关, 这可能与水稻种植环境、肥水管理等外界因素有关; 此外, 在水稻体内镉在各个器官的分布方面, 该研究与李坤权等<sup>[9]</sup>的结论相一致, 即茎秆是镉的主要储存器官, 占吸收总量的  $41.53\%$ ~ $54.67\%$ , 而仅有一少部分的镉运输至稻谷。

鄂志国等<sup>[11]</sup>认为, 在镉胁迫下, 水稻根系生长受阻、光合作用受到抑制, 本试验研究在土壤镉含量为  $0.587$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的稻田中进行, 并未对水稻生长造成胁迫, 叶片能正常进行光合及蒸腾作用。本研究发发现齐穗期水稻蒸腾速率与稻谷中重金属镉的含量和积累量均呈显著的正相关, 相关系数分别为  $0.649$ 、 $0.684$ 。

从农业生产应用角度来说, 直播是世界上面积最

大的一种栽培方式, 具有省工、高效的特点<sup>[12]</sup>, 是水稻栽培技术的一个发展方向。然而, 本研究通过 4 种模式对比试验发现, 直播栽培模式下, 水稻根系对镉的吸收能力强于抛栽和移栽等其他模式, 这可能与直播根系分布特点及其根系吸收特性与其他栽培方式差异较大有关, 也与镉在土层中的分布特点有关, 导致茎秆、叶片, 尤其是稻谷中的镉含量均显著提高, 不利于水稻生产的可持续发展。由此可见, 关于水稻直播模式的降镉栽培技术还有待进一步研究。

### 4 结论

在常规水育秧、软盘育秧、旱育秧、直播 4 种栽培模式下, 湘早粳 45 号和陆两优 996 以直播模式下产量最高; 水稻器官的重金属镉含量从植株底部(根系)到顶部(稻谷)依次递减, 其中根系镉含量最高达  $10.19$   $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 水稻体内吸收的重金属镉  $41.53\%$ ~ $54.67\%$  储藏在茎秆中, 稻谷中仅占  $4.92\%$ ~ $14.36\%$ ; 直播产量最高, 同时对重金属镉的吸收能力也最强, 根、茎、叶、谷的镉含量均显著高于其他 3 种栽培模式; 此外, 该研究对光合生理特性与水稻各器官镉含量、积累量的相关性分析表明, 蒸腾速率与稻谷中镉积累量呈显著正相关, 相关系数为  $r=0.684$ 。

#### 参考文献:

- [1] 栾云霞, 陆安祥, 王纪华. 镉米问题形成原因及对策思考[J]. 农产品质量与安全, 2013(6): 49-51.
- [2] 余守武, 刘宜柏. 土壤-水稻系统重金属污染的研究现状和展望[J]. 江西农业学报, 2004, 16(1): 41-48.  
YU Shou-wu, LIU Yi-bai. Current situation and prospects of researches on heavy metals pollution in soil-rice system[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2004, 16(1): 41-48. (in Chinese)
- [3] WU Jia-wen, SHI Yu, ZHU Yong-xing, et al. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: a review[J]. *Pedosphere*, 2013 (6): 113-123.
- [4] 王芳, 丁杉, 张春华, 等. 不同镉耐性水稻非蛋白巯基及镉的亚细胞和分子分布[J]. 农业环境科学学报, 2010(4): 19-23.  
WANG Fang, DING Shan, ZHANG Chun-hua, et al. Non-protein thiols, subcellular and molecular distribution of cadmium in two rice cultivars with difference tolerance[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010 (4): 19-23. (in Chinese)
- [5] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 等. 微生物方法降低城市污泥的重金属含量研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(5): 511-515.  
MO Ce-hui, CAI Quan-ying, WU Qi-tang, et al. Research advances of microbiological method for heavy metal removal from municipal sludge[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2001, 7(5): 511-515. (in Chinese)
- [6] Cosio C, Martinoia E, Keller C. Hyperaccumulation of cadmium and zinc

- in *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri* at the leaf cellular level [J]. *Plant Physiol*, 2004, 134(2): 716-725.
- [7] Boomnathan R, Doran P M. Organic acid complexation, heavy metal distribution and the effect of ATPase inhibition in hairy roots of hyperaccumulator plant species[J]. *Biotechnol*, 2003, 101(2): 131-146.
- [8] 张磊, 杨惟薇, 张超兰, 等. 不同水稻类型对镉的耐性、累积性与转运性质研究[J]. 西南农业学报, 2013(6): 21-24.  
ZHANG Lei, YANG Wei-wei, ZHANG Chao-lan, et al. Cadmium tolerance, accumulation and translocation between 'super' rice, hybrid rice and conventional rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013(6): 21-24. (in Chinese)
- [9] 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(5): 18-21.  
LI Kun-quan, LIU Jian-guo, LU Xiao-long, et al. Uptake and distribution of cadmium in different rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003(5): 18-21. (in Chinese)
- [10] He J Y, Zhu C, Ren Y F, et al. Uptake subcellular distribution and chemical forms of cadmium in wild-type and mutant rice[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3): 371-377.
- [11] 鄂志国, 张玉屏, 王磊. 水稻镉胁迫应答分子机制研究进展[J]. 中国水稻科学, 2013(5): 95-100.  
E Zhi-guo, ZHANG Yu-ping, WANG Lei. Molecular mechanism of rice responses to cadmium stress[J]. *Chin J Rice Sci*, 2013(5): 95-100. (in Chinese)
- [12] 张玉焯. 适度控制早稻直播规模, 确保粮食总产稳定增长[J]. 湖南农业科学, 2012(2): 17-20.

## 欢迎订阅 2015 年《中国农业科学》中、英文版

《中国农业科学》中、英文版是由农业部主管、中国农业科学院与中国农学会共同主办的综合性学术期刊。主要刊登农牧业基础科学和应用基础科学研究论文、综述、简报等。设有作物遗传育种·种质资源·分子遗传学; 耕作栽培·生理生化·农业信息技术; 植物保护; 土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境; 园艺; 贮藏·保鲜·加工; 畜牧·兽医·资源昆虫等栏目。读者对象为国内外农业科研院所(所)、大专院校的科研、教学与管理人人员。

《中国农业科学》中文版为半月刊, 影响因子、总被引频次连续多年居全国农业科技期刊最前列或前列位次。为北京大学图书馆 1992—2011 年连续 6 次遴选的核心期刊, 位居《中文核心期刊要目总览》“农业综合类核心期刊表”的首位。1999—2008、2013—2014 年获“国家自然科学基金重点学术期刊专项基金”资助。1999 年获“首届国家期刊奖”, 2003、2005 年获“第二、三届全国国家期刊奖提名奖”; 2002—2013 年先后 11 次被中国科学技术信息研究所授予“百种中国杰出学术期刊”称号; 2009 年获中国期刊协会/中国出版科学研究院“新中国 60 年有影响力的期刊”称号; 2010、2013 年荣获“第二、三届中国出版政府奖期刊提名奖”, 2013 年获新闻出版广电总局“百强科技期刊”称号; 2012、2013 年获清华大学图书馆等“2012、2013 中国最具国际影响力学术期刊”称号。

《中国农业科学》中文版大 16 开, 每月 1、16 日出版, 国内外公开发售。每期 208 页, 定价 49.50 元, 全年定价 1188.00 元。国内统一连续出版物号: CN 11-1328/S, 国际标准连续出版物号: ISSN 0578-1752, 邮发代号: 2-138, 国外代号: BM43。

《中国农业科学》英文版(*Agricultural Sciences in China*, ASA), 2002 年创刊, 月刊。2012 年更名为《农业科学学报》(*Journal of Integrative Agriculture*, JIA)。2006 年 1 月起与国际著名出版集团 Elsevier 合作, 全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行。2009 年被 SCI 收录, 2013 年 JIA 影响因子为 0.625。

JIA 大 16 开, 每月 20 日出版, 国内外公开发售。每期 180 页, 国内订价 80.00 元, 全年 960.00 元。国内统一连续出版物号: CN 10-1039/S, 国际标准连续出版物号: ISSN 2095-3119, 邮发代号: 2-851, 国外代号: 1591M。

《中国农业科学》中、英文版均可通过全国各地邮局订阅, 也可向编辑部直接订购。

地址: 北京 中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部

邮编: 100081

电话: 010-82109808, 82106281, 82105098

传真: 010-82106247

网址: www.ChinaAgriSci.com; E-mail: zgnykx@caas.cn

联系人: 林鉴非