

引用格式:

袁帅, 蒋艳方, 陈基旺, 陈平平, 张桂莲, 周文新, 易镇邪. 不同再生稻品种的镉积累转运差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(3): 1–8.

YUAN S, JIANG Y F, CHEN J W, CHEN P P, ZHANG G L, ZHOU W X, YI Z X. Differences in cadmium accumulation and translocation among different ratoon rice varieties[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(3): 1–8.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 不同再生稻品种的镉积累转运差异

袁帅, 蒋艳方, 陈基旺, 陈平平, 张桂莲, 周文新, 易镇邪\*

(湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** 以8个再生稻品种湘早籼45号(V1)、Y两优911(V2)、恒两优金农丝苗(V3)、甬优4149(V4)、Y两优9918(V5)、凤两优464(V6)、隆两优1988(V7)和两优121(V8)为材料, 于2021年开展大田试验, 比较了8个不同再生稻品种间产量与Cd吸收、转运及积累特性差异。结果表明: V5的头季与再生季产量均最高, 实际产量分别为6.81、5.62 t/hm<sup>2</sup>, 影响产量的主要因素是每穗粒数; 头季与再生季糙米Cd含量从高至低依次为V3、V5、V1、V6、V8、V7、V2、V4, 其原因主要是品种间Cd富集系数存在差异; 头季除V3和V5外, 其他品种糙米Cd含量均低于0.2 mg/kg; 再生季中V2、V4、V7、V8的糙米Cd含量低于0.2 mg/kg; V3、V5的头季与再生季水稻穗部的Cd积累量较高, V2、V4的较低; 相关性分析结果表明, 糙米Cd含量与植株各器官(根、茎、叶及稻桩)Cd含量及糙米镉富集系数呈极显著正相关, 整体上与各器官镉转运系数的相关性不显著; 此外, 各品种头季糙米镉含量均低于再生季的, V3、V5及V6的穗部Cd积累量表现为头季的显著高于再生季的, 而其他品种表现相反。兼顾水稻产量和糙米Cd含量情况, 甬优4149(V4)可能适合种在镉污染稻田里, Cd超标风险较小。

**关键词:** 再生稻; 头季; 再生季; 镉; 富集系数

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)03-0001-08

## Differences in cadmium accumulation and translocation among different ratoon rice varieties

YUAN Shuai, JIANG Yanfang, CHEN Jiawang, CHEN Pingping, ZHANG Guilian, ZHOU Wenxin, YI Zhenxie\*

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** Using eight ratoon rice varieties, Xiangzaoxian 45(V1), Yliangyou 911(V2), Hengliangyou Jinnongsimiao (V3), Yongyou 4149(V4), Yliangyou 9918(V5), Fengliangyou 464(V6), Longliangyou 1988(V7) and Liangyou 121 (V8) as materials, a field experiment was carried out in 2021 to compare the differences in yield and Cd absorption, translocation and accumulation characteristics among the 8 different ratoon rice varieties. The results showed that V5 had the highest yield in both the first and ratoon crops, with actual yields of 6.81 t/hm<sup>2</sup> and 5.62 t/hm<sup>2</sup>, respectively. The main factor affecting yield was the number of grains per ear. V3 showed the highest Cd content in brown rice of the first and ratoon crops, followed by V3, V5, V1, V6, V8, V7, V2 and V4. The main reason was that there were significant differences in Cd bioaccumulation factors among varieties. In the first crop, except for V3 and V5, the Cd content of brown rice of other varieties was lower than 0.2 mg/kg; in the ratoon crop, the Cd content of brown rice of V2, V4, V7, and V8 was lower than 0.2 mg/kg. The Cd accumulation in the rice panicle in the first and ratoon crops was higher in V3 and V5, and lower in V2 and V4. The results of correlation analysis showed that the Cd content in brown rice and

收稿日期: 2024-11-06

修回日期: 2025-05-21

基金项目: 湖南创新型省份建设专项经费资助项目(2025QK1006); 国家重点研发计划专项(2023YFD2301400、2018YFD0301005)

作者简介: 袁帅(1997—), 男, 湖南岳阳人, 博士研究生, 主要从事作物高产生理与资源高效利用研究, 1395396254@qq.com; \*通信作者, 易镇邪, 博士, 教授, 主要从事作物高产生理与资源高效利用研究, yizhenxie@126.com

the Cd accumulation in the panicle were extremely significantly positively correlated with the Cd content in various organs of the plant (roots, stems, leaves and stubble) and the Cd bioaccumulation factors of brown rice, but were not significantly correlated with the Cd translocation factors of various organs. In addition, the Cd content of brown rice in the first crop of each variety was lower than that in the ratoon crop. The Cd accumulation in the panicle of V3, V5 and V6 was significantly higher in the first crop than that in the ratoon crop, while the other varieties was on the contrary. Taking into account the rice yield and Cd content in brown rice, Yongyou 4149(V4) is a variety with a lower risk of exceeding the Cd standard for rice fields contaminated with Cd.

**Keywords:** ratoon rice; first cropping season; ratoon cropping season; cadmium; bioaccumulation factor

水稻是中国主要粮食作物之一, 大米在中国谷物消费量中占55%<sup>[1]</sup>, 其产量和品质直接影响粮食安全。近年来, 由于城镇化建设加快、农村劳动力大量流失、劳动力紧缺、生产成本提高及水稻种植效益降低等因素, 双季稻种植面积减少, 甚至出现了稻田抛荒现象<sup>[2]</sup>。在此背景下, 再生稻作为一种低成本、高效益的稻作模式受到重视。

随着工业和社会经济的迅速发展, 耕地土壤镉(Cd)污染和农产品Cd超标问题日益突出。稻田Cd污染常见的治理措施有化学修复<sup>[3]</sup>、生物修复<sup>[4]</sup>、农艺调控<sup>[5]</sup>与品种筛选<sup>[6-7]</sup>等, 其中培育和筛选低Cd积累水稻品种, 不但能有效降低水稻籽粒的Cd含量, 而且技术利用简单、经济成本低, 且对环境友好<sup>[8]</sup>。因此, 低镉水稻品种的筛选与选育备受重视。

近年来, 诸多学者针对不同水稻品种对Cd的积累差异进行了研究。薛涛等<sup>[9]</sup>认为不同水稻品种对Cd的吸收能力相差较大, 通过品种替代的方式将谷物中的Cd降至食用限量范围以内, 是确保食品安全的有效方法。ZHONG等<sup>[10]</sup>发现不同水稻品种的Cd吸收和积累效果具有明显的差异性。在Cd高度污染稻田中, 大部分水稻品种糙米Cd含量均超出中国食品安全国家标准值(GB 2762—2022), 但也有部分水稻品种糙米Cd含量低于0.2 mg/kg。蒋艳方等<sup>[11]</sup>、陈基旺等<sup>[12]</sup>、黄新杰等<sup>[13]</sup>针对再生稻Cd积累转运特性及其与头季稻的差异进行了研究, 但有关再生稻Cd积累特性的研究较少。鉴于此, 本研究以8个再生稻品种为材料开展大田试验, 研究不同再生稻品种的产量与Cd吸收、转运及积累差异, 以期为再生稻安全生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试再生稻品种共8个, 分别为湘早籼45号(V1)、Y两优911(V2)、恒两优金农丝苗(V3)、甬优4149(V4)、Y两优9918(V5)、凤两优464(V6)、隆两优1988(V7)和两优121(V8)。

### 1.2 试验设计

于2021年在湖南省衡阳县西渡镇梅花村(111°37'E, 26°97'N)进行大田试验。试验地土壤为红壤, 供试土壤pH为6.37, 土壤镉质量分数为0.45 mg/kg, 有机质、全氮、全磷、全钾质量分数分别为24.53、1.41、0.59、9.45 g/kg, 碱解氮、有效磷、速效钾、有效镉质量分数分别为158.23、33.21、148.98、0.17 mg/kg。以8个再生稻品种为材料, 采用随机区组试验设计, 每个品种3次重复, 共24个小区。每个小区面积为30 m<sup>2</sup>, 田埂覆膜。于3月20日播种, 4月26日移栽, 每穴3~4株基本苗, 行穴距为20 cm×20 cm, 统一常规灌溉。

头季施肥方案: 头季基肥施用量为600 kg/hm<sup>2</sup>, 基肥为复混肥料(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O质量比为22:8:12), 移栽后第5天追施尿素(含氮46.4%)190 kg/hm<sup>2</sup>。再生季施肥方案: 于头季收割前10 d施尿素150 kg/hm<sup>2</sup>, 头季收获后第2天施尿素150 kg/hm<sup>2</sup>、氧化钾(含K<sub>2</sub>O 60.0%)60 kg/hm<sup>2</sup>。头季人工收割, 留桩高度35 cm。各再生稻品种具体信息见表1, 其数据均来源于国家水稻数据中心(<https://www.ricedata.cn/variety/>)。

表1 不同再生稻品种相关信息

Table 1 Information related to different ratoon rice varieties

水稻品种	亲本来源	生育期/d (头季)	系谱	审定编号	种植区域
湘早籼45号(V1)	舟优903(♀)、浙辐504(♂)	106	籼型常规水稻	湘审稻2007002	湖南省作双季早稻种植
Y两优911(V2)	Y58S(♀)、创恢911(♂)	142	籼型两系杂交水稻	国审稻20216023	长江上游作一季中稻种植
恒两优金农丝苗(V3)	恒59S(♀)、金农丝苗(♂)	120	籼型两系杂交水稻	湘审稻20190067	湖南省作双季早稻种植
甬优4149(V4)	甬梗41A(♀)、F9249(♂)	140	籼粳交三系杂交水稻	国审稻20210095	长江上游作一季中稻种植
Y两优9918(V5)	Y58S(♀)、R928(♂)	130	籼型两系杂交水稻	国审稻2011015	长江中下游作一季中稻种植
凤两优464(V6)	凤S(♀)、XC464(♂)	133	籼型两系杂交水稻	国审稻20200182	长江中下游作一季中稻种植
隆两优1988(V7)	隆科638S(♀)、R1988(♂)	141	籼型两系杂交水稻	国审稻20176010	长江中下游作一季中稻种植
两优121(V8)	1892S(♀)、H121(♂)	134	籼型两系杂交水稻	湘审稻20170008	湖南省作双季早稻种植

### 1.3 测定项目与方法

产量性状的测定：于头季和再生季的成熟期在每个小区选择80穴水稻，记录有效穗数，计算平均有效穗数；按平均有效穗数每个小区取5穴水稻进行考种，考察并记录水稻产量构成因素(每穗粒数、结实率、千粒质量)，计算其理论产量。水稻成熟后每个小区除边3行外随机实收80穴(3.2 m<sup>2</sup>)，称量谷质量，用烘干法测定含水率，按含水量13.5%折算实际产量。

土壤性状的测定：于早稻移栽前按五点取样法取0~20 cm土样，自然风干磨碎后分别过孔径为0.850、0.150 mm的筛。采用“盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸全消解”法测定土壤全镉含量，采用 DTPA 提取剂浸提法测定有效镉含量，使用原子吸收分光光度计(AA800, Perkin Elmer)检测消化液及浸提液中的镉含量。参照《土壤农化分析》<sup>[14]</sup>中的方法测定土壤pH以及有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、全氮、全磷、全钾含量。

植株镉含量的测定：于头季与再生季的齐穗期、灌浆中期和成熟期进行取样，每个小区采集水稻5穴，将植株洗净后用0.1 mol/L盐酸浸泡根系15 min，去掉根表面吸附的Cd，用自来水冲洗3遍，再用去离子水冲洗3遍，吸干表面水分后，将植株样品分为根、茎、叶、穗，成熟期植株的穗进一步分为枝梗、空粒、颖壳和糙米，分别装袋后放入烘箱于105 °C杀青0.5 h，80 °C烘干至恒重。称量样品质量后，用不锈钢植物样品粉碎机粉碎。采用硝酸-高氯酸高温消解法，使用原子吸收分光光度计(AA800, Perkin Elmer)检测消化液中的Cd含量。再

生稻Cd积累量、Cd转移系数和Cd富集系数的计算参考陈基旺等<sup>[12]</sup>的方法进行。

### 1.4 数据统计

采用SPSS 24进行单因素方差分析(ANOVA)和皮尔逊相关检验；采用Origin 2021绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同再生稻品种产量的差异

从表2可知，各再生稻品种头季产量均显著高于再生季产量。头季理论产量为5.82~7.08 t/hm<sup>2</sup>，均值为6.44 t/hm<sup>2</sup>；再生季理论产量为3.92~5.94 t/hm<sup>2</sup>，均值为5.18 t/hm<sup>2</sup>。其中，V5头季与再生季的产量均最高，V4的次之，2个品种的产量均显著高于其他品种的。V1头季与再生季的产量均最低。头季V4和V5的产量高于平均产量，再生季V2、V4、V5的产量高于平均产量。综合来看，V4和V5双季均表现出高产的特征。

头季中V4和V5的每穗粒数较高，V6的最低，且部分品种间存在显著差异；V6的结实率最高，显著高于其他品种的；有效穗数和千粒质量品种间差异未达显著水平。再生季V8的有效穗数最高，V4的最低，两者间差异达显著水平，但每穗粒数表现相反；V4的结实率最高，V1的最低；V7的千粒质量最高，V2的最低。

各再生稻品种的头季理论产量和实际产量均显著高于再生季的。产量构成因素方面，各品种头季有效穗数显著少于再生季的，但每穗粒数、结实率和千粒质量均显著高于再生季的。

表2 不同再生稻品种产量与产量构成因素

季别	品种	有效穗数/( $\times 10^6 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	每穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	理论产量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	实际产量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
头季	V1	2.20B	141.21cA	69.30bA	27.23A	5.82cA	5.45cA
	V2	2.18B	161.17bA	65.04bA	28.05A	6.41bA	6.07bA
	V3	2.21B	152.34cA	63.96bA	27.96A	6.01bcA	5.90bA
	V4	2.13B	170.21aA	70.17bA	27.06A	6.88aA	6.52aA
	V5	2.10B	181.16aA	68.65bA	27.11A	7.08aA	6.81aA
	V6	2.41B	122.62dA	82.84aA	26.07A	6.38bcA	6.03bA
	V7	2.30B	152.62cA	64.03bA	27.87A	6.22bcA	5.94bA
	V8	2.13B	161.22bA	65.99bA	27.85A	6.32bcA	6.07bA
再生季	V1	3.94bA	98.04dB	42.69cB	23.80bB	3.92dB	3.49dB
	V2	3.72bA	118.93cB	53.75abB	22.54bB	5.35bB	5.12bB
	V3	3.67bA	106.70cdB	56.84aB	23.19bB	5.16bcB	4.89cB
	V4	2.62cA	144.07aB	59.62aB	25.19aB	5.70aB	5.53aB
	V5	3.25bA	128.20bB	54.48abB	26.17aB	5.94aB	5.62aB
	V6	3.76bA	100.67cdB	53.68abB	24.61aB	5.02cB	4.75bcB
	V7	3.81bA	101.53cdB	50.39bB	26.37aB	5.11bcB	4.94bcB
	V8	4.29aA	94.68dB	54.04abB	23.07bB	5.06cB	4.79cB

注: 同列不同小写字母表示同一季别不同水稻品种之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ ), 同列不同大写字母表示同一品种头季与再生季之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

相关性分析结果(表3)表明, 头季每穗粒数与产量(理论产量、实际产量)均呈显著正相关, 其他产量构成因素与产量相关性不显著。再生季每穗粒数和结实率与产量均呈显著正相关, 有效穗数与理论产量呈显著负相关。综合头季与再生季来看, 每穗粒数是决定再生稻产量的主要因素。

表3 产量与产量构成因素相关性分析

产量	相关系数			
	有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒质量
头季理论产量	-0.409	0.715*	0.149	-0.292
头季实际产量	-0.432	0.743*	0.081	-0.195
再生季理论产量	-0.665*	0.882*	0.767*	0.415
再生季实际产量	-0.509	0.826*	0.782*	0.485

注: \*表示相关性显著( $P < 0.05$ )。

## 2.2 不同再生稻品种镉含量差异

由表4可见, 不同再生稻品种间Cd含量存在显著差异。头季各品种根、茎、叶、糙米的Cd含量依次降低。根Cd含量为1.09~1.83 mg/kg, 其中V3的最高, 显著高于其他品种的, V4的最低。茎Cd含量为0.73~1.29 mg/kg, 其中V3的最高, 显著高于其他品

种(V5除外)的, V4的最低, 显著低于其他品种(V2除外)的。叶Cd含量为0.16~0.34 mg/kg, 其中V3的最高, V2、V4的较低, 显著低于其他品种的; 糙米Cd含量为0.11~0.23 mg/kg, V3、V5、V1、V6、V8、V7、V2、V4糙米Cd含量依次降低, 除V3和V5外, 其他品种糙米Cd含量均低于0.20 mg/kg。

再生季各品种根、稻桩、茎、叶、糙米的Cd含量依次降低。根、稻桩、茎、叶、糙米Cd含量分别为2.76~4.50、0.98~3.03、1.01~2.46、0.20~0.66、0.14~0.28 mg/kg。与头季趋势一致, 再生季V3各器官的Cd含量均最高, V4、V2的较低。糙米的Cd含量从高至低依次为V3、V5、V1、V6、V8(V7)、V2、V4, 其中V3的显著高于除V1和V5以外的其他品种, 而V2和V4的显著低于其他品种。此外, V2、V4、V7、V8的糙米Cd含量低于0.20 mg/kg。

此外, 各品种再生季各器官的Cd含量均高于头季的。其中, 各品种再生季根、茎的Cd含量显著高于头季的; V1、V4、V6及V7再生季糙米的Cd含量显著高于头季的。

表4 不同再生稻品种头季与再生季成熟期各器官Cd含量

**Table 4 Cd content in various organs during the first and ratoon cropping seasons with different ratoon rice varieties mg/kg**

季别	品种	根	茎	叶	糙米	稻桩
头季	V1	1.55bB	1.01bcdB	0.26bB	0.17bcB	
	V2	1.13dB	0.77eB	0.17d	0.13de	
	V3	1.83aB	1.29aB	0.34aB	0.23a	
	V4	1.09dB	0.73eB	0.16d	0.11eB	
	V5	1.46bB	1.17abcB	0.28abB	0.21ab	
	V6	1.25cB	0.97cdB	0.21cB	0.16cB	
	V7	1.15cdB	0.88dB	0.20cB	0.14cdB	
	V8	1.31cB	0.86dB	0.22c	0.15cd	
再生季	V1	3.78abA	1.92bA	0.42bcA	0.22abA	2.11b
	V2	2.77dA	1.38cdA	0.22d	0.15c	1.02d
	V3	4.50aA	2.46aA	0.66aA	0.28a	3.03a
	V4	2.76dA	1.01dA	0.20d	0.14cA	0.98d
	V5	4.16abA	2.13abA	0.48bA	0.24ab	2.25ab
	V6	3.49bcA	1.76bcA	0.33cA	0.20bA	1.71bc
	V7	3.42bcA	1.72bcA	0.32cA	0.19bA	1.32cd
	V8	3.03cdA	1.48cA	0.24d	0.19b	1.06d

注：同列不同小写字母表示同一季别不同水稻品种之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )，同列不同大写字母表示同一品种头季与再生季之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

系统聚类分析结果(图1)表明，不同再生稻品种分成3类，具体分为I类(低Cd品种)、II类(中等Cd品种)和III类(高Cd品种)，I类水稻包括V2和V4；II类水稻包括V7、V8、V6和V1；III类水稻包括V3和V5。

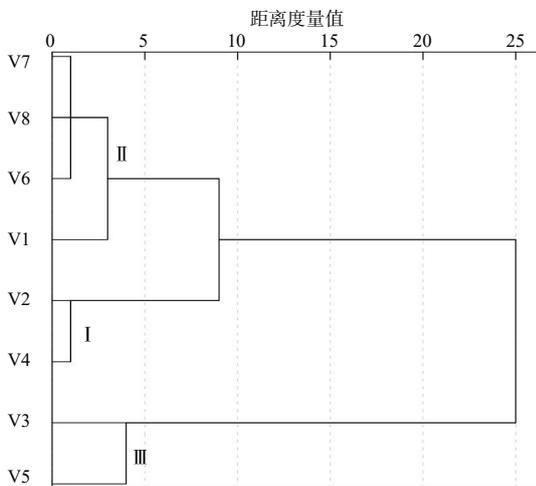


图1 不同再生稻品种糙米Cd含量聚类分析结果

Fig.1 Cluster analysis of Cd content in brown rice of different ratoon rice varieties

### 2.3 不同再生稻品种镉转运系数与富集系数差异

由表5可见，不同再生稻品种间头季与再生季成熟期各器官Cd富集系数存在差异。头季与再生季V3各器官的富集系数最高，V4的最低。就糙米而言，头季与再生季V3的富集系数均显著高于除V5以外的其他品种的，V4的显著低于其他品种 (V2除外)的。头季V5根-糙米、茎-糙米的转运系数均最高，V4的最低；V6、V5叶-糙米的Cd转运系数较高，V1的最低，但品种间差异不显著。再生季V8茎-糙米、稻桩-糙米的Cd转运系数均最高，V3的最低，2个品种间的差异显著，而根-糙米、叶-糙米Cd转运系数品种间无显著差异。整体来看，各个品种再生季根-糙米和叶-糙米的转运系数显著低于头季的，而再生季各部位富集系数显著高于头季的。

表5 不同再生稻品种各器官成熟期转运系数与富集系数

**Table 5 Translocation and bioaccumulation factors of various organs in the maturity stage of different ratoon rice varieties**

季别	品种	转运系数				富集系数				
		根-糙米	茎-糙米	叶-糙米	稻桩-糙米	根	茎	叶	糙米	稻桩
头季	V1	0.11A	0.17A	0.65A		3.44bB	2.22bcdB	0.58bB	0.38bcB	
	V2	0.12A	0.17A	0.76A		2.51dB	1.71eB	0.38dB	0.30de	

表5(续)

季别	品种	转运系数				富集系数					
		根-糙米	茎-糙米	叶-糙米	稻桩-糙米	根	茎	叶	糙米	稻桩	
头季	V3	0.13A	0.18A	0.68A		4.07aB	2.87aB	0.76aB	0.51aB		
	V4	0.10A	0.15A	0.69A		2.42dB	1.62eB	0.36dB	0.24eB		
	V5	0.14A	0.18A	0.75A		3.24bB	2.60abcB	0.62abB	0.47ab		
	V6	0.13A	0.16A	0.76A		2.78cB	2.16cdB	0.47cB	0.36cB		
	V7	0.12A	0.16A	0.70A		2.56cdB	1.96dB	0.44cB	0.31cdB		
	V8	0.11A	0.17A	0.68A		2.91cB	1.91dB	0.49cB	0.33cdB		
	再生季	V1	0.06B	0.10bB	0.11B	0.52c	8.40abA	4.27bcA	0.93abA	0.49bcA	4.69b
		V2	0.05B	0.15abA	0.11B	0.68b	6.16dA	3.07dA	0.49cA	0.33dA	2.27cd
V3		0.06B	0.09bB	0.11B	0.42c	10.00aA	5.47aA	1.47aA	0.62aA	6.73a	
V4		0.05B	0.14abA	0.14B	0.70ab	6.13dA	2.24dA	0.44cA	0.31dA	2.18d	
V5		0.06B	0.11bB	0.11B	0.50c	9.24abA	4.73bA	1.07abA	0.53ab	5.00ab	
V6		0.06B	0.12abB	0.11B	0.61bc	7.76bcA	3.91cA	0.73bA	0.44cA	3.80bc	
V7		0.06B	0.14abA	0.11B	0.59bc	7.60bcA	3.82cA	0.71bA	0.42cA	2.93bc	
V8		0.06B	0.18aA	0.13B	0.79a	6.73cdA	3.29dA	0.53bA	0.42cA	2.36c	

注：同列不同小写字母表示同一季别不同水稻品种之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )，同列不同大写字母表示同一品种头季与再生季之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

## 2.4 不同再生稻品种镉积累量差异

如表6所示，头季与再生季各品种穗部Cd积累量随着生育进程逐渐增加，头季各品种在灌浆中期—成熟期穗部Cd积累量最大，再生季各品种于齐穗期前这一阶段穗部Cd积累量最大。品种间比较，头季与再生季V3各生育期穗部Cd积累量均最高，V4的最低。比较头季与再生季间穗部Cd积累量发

现，齐穗期前，各品种再生季穗部的Cd积累量显著高于头季的，灌浆中期—成熟期，各品种头季穗部的Cd积累量显著高于再生季的，齐穗期—灌浆中期头季与再生季穗部Cd积累量没有明显规律。从全生育期来看，V3、V5及V6头季穗部Cd积累量显著高于再生季的。头季与再生季V3、V5穗部Cd积累量较高，V2、V4的较低。

表6 不同再生稻品种各生育阶段穗部Cd积累量

Table 6 Cd accumulation in panicle of different ratoon rice varieties at different growth stages					mg/hm <sup>2</sup>
季别	品种	齐穗期前	齐穗期—灌浆中期	灌浆中期—成熟期	全生育期
头季	V1	327.04cB	494.59cB	956.64cA	1 778.27dB
	V2	183.39deB	347.79deA	788.56deA	1 319.74eB
	V3	709.54aB	987.71aA	1 611.87aA	3 309.12aA
	V4	164.16cB	297.19eA	699.55eA	1 160.90fB
	V5	549.79bB	819.27abA	1 358.30bA	2 727.36bA
	V6	373.00cB	795.12bA	1 038.52cA	2 206.64cA
	V7	199.89dB	367.16dB	857.15dA	1 424.20eB
	V8	201.32dB	389.38dA	933.47cA	1 524.17deB
再生季	V1	925.02bcA	591.64cA	452.75bB	1 969.41bA
	V2	858.11cdA	238.55eB	353.20cB	1 449.86dA
	V3	1 155.35aA	974.56aA	552.09aB	2 602.00aB
	V4	826.49dA	198.31eB	316.00dB	1 340.80dA
	V5	1 091.32abA	827.05bA	529.78aB	2 448.15aB
	V6	925.40bcA	554.29cB	437.67bB	1 917.36bB
	V7	887.43cdA	425.14dA	402.41bcB	1 714.98cA
	V8	870.65cdA	359.65dA	395.10bcB	1 625.40cA

注：同列不同小写字母表示同一季别不同水稻品种之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )，同列不同大写字母表示同一品种头季与再生季之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

如表7所示，头季与再生季各生育阶段秸秆Cd积累量均以V3和V5的较高，以V4的最低。大部分品种头季与再生季的秸秆Cd积累量存在显著差异。齐穗期前，各品种再生季秸秆Cd积累量显著高于头季的；灌浆中期—成熟期，各品种头季秸秆的Cd积

累量显著高于再生季的；齐穗期—灌浆中期头季与再生季秸秆Cd积累量差异因品种而异；全生育期，整体上各品种再生季秸秆Cd积累量高于头季，除V7外，其他品种头季与再生季的差异达显著水平。

表7 不同再生稻品种各生育阶段秸秆Cd积累量

**Table 7 Cd accumulation in straw of different ratoon rice varieties at different growth stages** mg/hm<sup>2</sup>

季别	品种	齐穗期前	齐穗期—灌浆中期	灌浆中期—成熟期	全生育期
头季	V1	1 760.16bB	958.49bA	920.85cA	3 639.50bB
	V2	1 405.03cB	577.22d	578.42dA	2 560.67dB
	V3	2 031.83aB	1 223.83aA	1 415.85aA	4 671.51aB
	V4	1 256.19dB	505.89d	473.19eA	2 235.27dB
	V5	1 951.17abB	1 181.60ab	1 290.04abA	4 422.81aB
	V6	1 429.22cB	996.21bA	1 012.82bcA	3 438.25bB
	V7	1 874.38abB	1 096.95abA	812.09cA	3 783.42b
	V8	1 451.17cB	736.18c	883.82cA	3 071.17cB
再生季	V1	3 676.32cA	802.99bB	286.91bB	4 766.22bA
	V2	2 465.01eA	635.18c	117.84cdB	3 218.03dA
	V3	4 208.31aA	1 047.53aB	537.92aB	5 793.76aA
	V4	2 261.78eA	564.02d	85.49dB	2 911.29dA
	V5	3 912.36aA	1 129.33a	424.97aB	5 466.66aA
	V6	3 091.86dA	777.18bB	220.32bB	4 089.36cA
	V7	2 985.52dA	744.96bB	176.73bcB	3 907.21c
	V8	2 787.69dA	724.87b	150.63bcB	3 663.19cdA

注：同列不同小写字母表示同一季别不同水稻品种之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )，同列不同大写字母表示同一品种头季与再生季之间的差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。

### 2.5 糙米镉含量与镉富集及转运系数的相关性分析

将糙米Cd含量与各器官(根、茎、叶及稻桩)Cd含量、转运系数及糙米富集系数进行相关性分析，结果如表8所示。头季糙米Cd含量与各器官Cd含量

和糙米Cd富集系数均呈极显著正相关，但与Cd转运系数的相关性不显著。与头季趋势一致，再生季糙米Cd含量与各器官Cd含量和糙米Cd富集系数均呈极显著正相关，与各器官Cd转运系数的相关性均不显著。

表8 糙米Cd含量与各器官Cd含量、Cd转运系数及糙米Cd富集系数的相关系数

**Table 8 Correlation coefficient between the Cd content in brown rice and Cd content, Cd translocation factors in different organs and Cd bioaccumulation factors in brown rice**

指标	相关系数								
	根Cd含量	茎Cd含量	叶Cd含量	稻桩Cd含量	根-糙米Cd转运系数	茎-糙米Cd转运系数	叶-糙米Cd转运系数	稻桩-糙米Cd转运系数	糙米Cd富集系数
头季糙米Cd含量	0.869**	0.912**	0.905**	0.922**	0.208	0.151	-0.075	-0.524	0.995**
再生季糙米Cd含量	0.935**	0.955**	0.924**	0.922**	0.579	-0.517	-0.526	-0.524	0.984**

注：\*\*表示相关性极显著( $P < 0.01$ )。

### 3 结论与讨论

在Cd污染土壤上筛选水稻品种，既要关注水稻对Cd的积累情况，也要兼顾水稻的产量。本研究中，结合头季与再生季来看，各水稻品种中以甬优4149(V4)和Y两优9918(V5)双季均表现出水稻高产的特征；分析产量构成因素发现，影响产量的主要因素是每穗粒数，这与周文新等<sup>[15]</sup>的研究结果一致。

根据国家标准，稻米Cd含量限量标准为0.2 mg/kg<sup>[16]</sup>。本研究中，头季恒两优金农丝苗(V3)和Y两优9918(V5)，再生季湘早籼45号(V1)、恒两优金农丝苗(V3)和Y两优9918(V5)的糙米Cd含量超过了国家标准限值。头季与再生季恒两优金农丝苗(V3)和Y两优9918(V5)的穗部Cd积累量较高，Y两优911(V2)和甬优4149(V4)的较低。聚类分析结果显示，可以将8个供试水稻品种分为3类：I类水稻(低Cd品种)包括Y两

优911(V2)和甬优4149(V4); II类水稻(中等Cd品种)包括湘早籼45号(V1)、凤两优464(V6)、隆两优1988(V7)和两优121(V8); III类水稻(高Cd品种)包括恒两优金农丝苗(V3)和Y两优9918(V5)。

水稻对Cd的富集能力是考察植株从土壤中吸收Cd能力的一个重要指标<sup>[17]</sup>。本研究中,不同再生稻品种间糙米Cd含量和穗部积累量存在差异,这主要是因为品种间Cd富集系数存在显著差异,而Cd转运系数品种间差异不大。相关性分析结果表明,头季与再生季糙米Cd含量均与植株各器官(根、茎、叶及稻桩)Cd含量及糙米Cd富集系数存在极显著正相关,而整体上与植株各器官-糙米的Cd转运系数的相关性不显著。可见,本研究中影响再生稻品种间糙米镉含量的主要因素是水稻本身的Cd富集能力。研究表明,不同水稻品种的Cd吸收差异可使其籽粒Cd积累量成倍增加<sup>[18]</sup>。冯凯璇等<sup>[19]</sup>认为,不同品种水稻重金属离子的吸收差异是导致品种间各器官Cd含量和分布差异的主要原因。本研究8个品种中,兼顾水稻产量和糙米Cd含量情况,推测甬优4149(V4)可能适合种在镉污染稻田里,Cd超标风险较小,且产量较高。

此外,关于再生稻头季与再生季Cd积累特性的差异,本研究中各个品种糙米Cd含量均表现为再生季高于头季的。头季稻留下的老桩是再生稻前期生长发育的基础,其营养物质的转运对再生季腋芽萌发和植株生长起决定性作用<sup>[20]</sup>。因此,稻桩中残留的营养物质向再生苗转移的同时,积累下来的镉可能也会随营养物质的转移而转运到再生苗中,对再生季植株对于Cd的吸收和积累造成了较大的促进作用。根据各品种头季与再生季各生育阶段穗部Cd积累量可知,灌浆中期—成熟期是头季穗部Cd积累最主要的时期,而再生季穗部Cd积累的主要时期在齐穗期前。因此,针对再生稻生产过程中的降镉措施,头季应以灌浆中期—成熟期为重点,再生季应以齐穗前为重点。

#### 参考文献:

- [1] ZHOU M N, WANG J Y, JI H. Virtual land and water flows and driving factors related to livestock products trade in China[J]. *Land*, 2023, 12(8): 1493.
- [2] 肖玉娥, 卢俊玮. 恢复双季稻面积的困境与对策[J]. *粮食科技与经济*, 2020, 45(4): 25–28.
- [3] SHI J W, FAN D X, LI M Q. The relationship between cadmium exposure and mortality in postmenopausal females: a cohort study of 2001–2018 NHANES[J]. *Nutrients*, 2023, 15(21): 4604.
- [4] 朱晓丽, 张婵娟, 张星, 等. 生物炭固定化硫酸盐还原菌对镉污染土壤的钝化修复[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(5): 421–429.
- [5] SOUDANI A, GHOLAMI A, MOHAMMADI ROOZBAHANI M, et al. Heavy metal phytoremediation of aqueous solution by *Typha domingensis*[J]. *Aquatic Ecology*, 2022, 56(2): 513–523.
- [6] 李陈贞, 孙亚莉, 刘红梅, 等. 镉胁迫下不同水稻品种幼苗生长及光合性能的差异[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(2): 147–152.
- [7] 李虎, 吴子帅, 陈传华, 等. 镉低积累水稻品种筛选及其在镉超标稻田的表现评价[J]. *南方农业学报*, 2022, 53(1): 96–103.
- [8] 江南, 颜旭, 周延彪, 等. 水稻镉积累影响因素与低镉稻米生产策略[J]. *中国水稻科学*, 2021, 35(4): 342–351.
- [9] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1818–1826.
- [10] ZHONG X M, WANG G, ZHANG P C, et al. Cadmium accumulation and yield difference of different rice varieties under cadmium stress[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(9): 1696–1701, 1756.
- [11] 蒋艳方, 陈基旺, 崔璨, 等. 杂交稻头季与再生季镉积累分配特性差异研究[J]. *中国水稻科学*, 2022, 36(1): 55–64.
- [12] 陈基旺, 陈平平, 王晓玉, 等. 不同节位再生稻镉积累分配及其与头季稻的差异[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(4): 790–797.
- [13] 黄新杰, 陈威, 易镇邪, 等. 轻度镉污染稻田再生稻品种筛选研究[J]. *杂交水稻*, 2023, 38(4): 148–154.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 周文新, 易镇邪, 屠乃美, 等. 头季稻齐穗期剑叶光合产物分配与再生稻产量的相关性[J]. *核农学报*, 2008, 22(6): 860–864.
- [16] 吴家梅, 谢运河, 官迪, 等. 硅肥等量施用对土壤镉生物有效性和水稻吸收镉的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5727–5736.
- [17] 陈楠, 张昊, 杨慧敏, 等. 土壤pH对土壤镉形态及稻米镉积累的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 44(2): 176–182, 209.
- [18] HAMID Y, TANG L, YASEEN M, et al. Comparative efficacy of organic and inorganic amendments for cadmium and lead immobilization in contaminated soil under rice-wheat cropping system[J]. *Chemosphere*, 2019, 214: 259–268.
- [19] 冯凯璇, 杨亚春, 李江遐, 等. 不同类型水稻对镉(Cd)吸收、转运与富集的差异分析[J]. *四川环境*, 2023, 42(3): 350–356.
- [20] WU W G, LI Z, XI M, et al. Ratoon rice system of production: a rapid growth pattern of multiple cropping in China: a review[J]. *Plants*, 2023, 12(19): 3446.

责任编辑: 毛友纯  
英文编辑: 罗维