

收获时期对早稻产量与镉积累分配特性的影响

王 罕¹ 郑德超¹ 田琴琴¹ 吴小京² 周文新¹ 易镇邪¹

(¹湖南农业大学农学院, 410128, 湖南长沙; ²郴州市农作物种子储备和技术推广站, 423000, 湖南郴州)

摘 要 为探讨湘南镉污染稻区早稻的适宜收获时期, 以湘早籼 45 号、陆两优 996 和株两优 4026 为材料, 于 2021-2022 年在湖南郴州镉污染稻田开展大田试验, 研究了收获时期 (齐穗后 18、21、24、27、30 d) 对早稻产量与镉积累分配特性的影响。结果表明, 收获时期对水稻有效穗数和穗粒数无显著影响, 但结实率、千粒重和产量随收获时期推迟而提高, 齐穗后 27 和 30 d 处理差异不显著, 但显著高于其他 3 个处理。随收获时期的延迟, 各品种叶和谷壳镉含量、镉积累量、镉分配系数呈下降趋势, 而茎和糙米镉含量、镉积累量、镉分配系数以及植株总镉积累量呈上升趋势, 除陆两优 996 外各品种齐穗后 30 d 收获处理的糙米镉含量与积累量显著高于其他处理。水稻灌浆中后期 (齐穗后 18~30 d) 籽粒镉主要来自土壤吸收和叶片、谷壳转运。早稻糙米镉含量品种间差异明显, 陆两优 996 各处理糙米镉含量均超过了国家标准 (0.2 mg/kg)。可见, 推迟收获时期有利于提高早稻产量, 但籽粒镉含量也会提高, 综合考虑产量和糙米镉含量, 湘南镉污染稻区早稻适宜的收获时期为齐穗后 27 d。

关键词 早稻; 收获时期; 产量; 镉含量

农作物对重金属的积累量与土壤重金属生物有效性、根系对重金属的吸收效率以及植物体内重金属的转运能力直接相关。水稻对镉的吸收能力较强, 稻米对镉具有较高富集能力^[1]。目前, 中国市售大米镉平均含量为 0.089~0.093 mg/kg, 其中超过国家规定的大米镉含量限量标准 (0.2 mg/kg) 的比例为 8%~10%^[2-3]。中国南方地区稻米镉超标情况尤为严峻, 稻米镉超标率在 23% 左右, 部分稻米镉含量甚至高达 4.9 mg/kg^[4]。镉污染问题严重威胁国家粮食安全, 水稻高产优质栽培是确保我国粮食生产的重要科学问题。为此, 前人就水稻镉污染防控问题, 在品种间差异^[5]、土壤改良剂^[6-7]、水分管理^[8-9]与耕作措施^[10-11]等方面开展了大量研究。

20 世纪以来, 由于人类活动的加剧, 使全球气候变化加快, 这对作物生产产生了深远的影响, 其中, 适宜收获时期的确定至关重要^[12]。有关收获时期的研究多注重其对水稻产量和米质的影响^[13-15]。众所周知, 水稻灌浆期是积累干物质的重要时期, 决定了水稻产量的高低。研究^[16-17]发现, 齐穗期一成熟期是水稻穗镉积累最主要的时期。同时, 不同基因型水稻稻米镉积累差异已

经明确^[18-21], 但对不同镉积累基因型水稻灌浆期至成熟期各器官的镉积累动态规律少有报道。为此, 在湘南地区开展大田试验, 研究不同收获时期对不同早稻品种产量及镉积累分配特性的影响, 为湘南镉污染稻田的早稻高产优质栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验地概况

于 2021-2022 年在湖南省郴州市苏仙区良田镇良田村早稻季开展试验。2021 年供试水稻品种为湘早籼 45 号和陆两优 996, 2022 年供试水稻品种为湘早籼 45 号和株两优 4026。

2021 年试验土壤基本理化性质为 pH 6.24、有机质 24.90 mg/kg、全氮 1.33 g/kg、碱解氮 174.65 mg/kg、全磷 0.51 g/kg、有效磷 21.64 mg/kg、全钾 6.54 g/kg、速效钾 176.64 mg/kg、全镉 0.66 mg/kg、有效镉 0.28 mg/kg。2022 年试验土壤基本理化性质为 pH 6.45、有机质 34.92 mg/kg、全氮 1.41 g/kg、碱解氮 180.51 mg/kg、全磷 0.72 g/kg、有效磷 25.15 mg/kg、全钾 9.32 g/kg、

作者简介: 王罕, 主要从事水稻镉污染防控技术研究, E-mail: 296128547@qq.com

易镇邪为通信作者, 主要从事作物高产生理与资源高效利用研究, E-mail: yizhenxie@126.com; 周文新为共同通信作者, 主要从事作物高产高效栽培研究, E-mail: zwxok@hunau.net

基金项目: 湖南省自然科学基金面上项目 (2022JJ30303); 青海省重点研发与转化计划 (2021-GX-172)

收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-02-13; 网络出版日期: 2023-03-31

速效钾 187.21 mg/kg、全镉 0.71 mg/kg、有效镉 0.33 mg/kg。

1.2 试验设计

分别设齐穗后 18、21、24、27、30 d 共 5 个收获时期处理（分别用I、II、III、IV、V表示），采用裂区试验设计，不同收获时期处理为主区，品种为副区，共 10 个处理，30 个小区，小区面积 10 m²，各小区之间用塑料薄膜包埂防止串水串肥。试验于 4 月 5 日播种，5 月 3 日移栽，2021 年湘早籼 45 号与陆两优 996 齐穗日期分别为 6 月 21 日和 6 月 23 日，2022 年湘早籼 45 号与株两优 4026 齐穗日期均为 6 月 19 日。

试验采用湿润育秧、人工移栽方式，株行距为 16.7 cm×20.0 cm，湘早籼 45 号 4~5 根苗/穴，陆两优 996 与株两优 4026 2~3 根苗/穴。施肥方案一致，基肥施复合肥（N、P₂O₅、K₂O 比例为 15:15:10）600 kg/hm²，返青追施尿素（含 N 46%）150 kg/hm²。水分管理以及其他农事操作与当地大田相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及其构成因素 收获时期各小区调查 80 蔸水稻的有效穗数，并按照单穴平均有效穗数取 5 株稻穗带回室内，考察总粒数、空粒数和千粒重，计算理论产量。同时，在各小区中心区域实收 80 穴，脱粒后去除稻草及空粒，称量谷重，用烘干法测含水率，折算成含水率 13.5%的产量。

1.3.2 镉积累分布特性 于各收获时期根据单穴平均有效穗数每小区取样 5 蔸带回室内，洗净后用 0.1 mol/L HCl 浸泡根系 15 min，去掉根表面吸

附的镉，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，将植株样分为根、茎（含枝梗）、叶、谷壳（含空秕粒）、糙米几部分，放入烘箱 105 ℃杀青 0.5 h，80 ℃烘干至恒重并称重。以上材料烘干后，用不锈钢植物样品粉碎机粉碎备用。植株采用硝酸—高氯酸高温消解方法，使用原子吸收分光光度计检测消化液中镉含量，计算各器官镉积累量与镉分配系数。镉积累量（mg/hm²）=生物量（kg/hm²）×各器官镉浓度（mg/kg）。镉分配系数（%）=各器官镉积累量（mg/hm²）/镉积累总量（mg/hm²）×100。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 Statistix 8 进行数据计算和统计检验。

2 结果与分析

2.1 收获时期对早稻产量及其构成因素的影响

由表 1 可见，不同收获时期下水稻的产量及其构成因素表现出明显差异。收获时期对 3 个水稻品种的有效穗数和穗粒数无显著影响，对结实率、千粒重及产量影响显著。

2021 年，湘早籼 45 号千粒重随收获时期推迟而提高，且处理V显著高于处理I，结实率与产量随收获时期推迟而提高，除处理IV和V差异不显著外，其他处理间差异显著（*P*<0.05）。陆两优 996 结实率随收获时期推迟而提高，处理V显著高于除处理IV之外的其他处理，千粒重以处理V和IV较高，显著高于其他处理，产量随收获时间延迟而提高，处理间规律与结实率一致。

表 1 不同收获时期下早稻产量及其构成因素
Table 1 Yield and its components of early rice under different harvest times

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	有效穗数 Productive panicle number (×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (t/hm ²)	实际产量 Actual yield (t/hm ²)
2021	湘早籼 45 号	I	308.03a	96.95a	58.57d	23.02b	4.02d	3.76d
		II	312.32a	96.47a	64.15c	23.23ab	4.49c	4.25c
		III	311.85a	96.18a	69.10b	23.57ab	4.89b	4.63b
		IV	309.81a	98.11a	76.75a	23.71ab	5.53a	5.25a
		V	310.12a	98.37a	77.32a	23.82a	5.62a	5.38a
	陆两优 996	I	289.75a	96.58a	46.74d	27.76b	3.63d	3.44d
		II	292.75a	93.31a	61.58c	27.63b	4.61c	4.46c
		III	303.00a	94.46a	66.77b	28.05b	5.12b	4.88b
		IV	292.75a	96.44a	69.49ab	28.61a	5.62ab	5.35ab
		V	293.00a	95.78a	73.08a	28.65a	5.88a	5.53a

续表 1 Table 1 (continued)

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	有效穗数 Productive panicle number ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	理论产量 Theoretical yield (t/hm^2)	实际产量 Actual yield (t/hm^2)
2022	湘早籼 45 号	I	324.58a	95.25a	55.01c	23.36b	3.97c	3.72c
		II	320.75a	94.82a	58.98bc	23.90ab	4.29c	4.02c
		III	320.33a	93.03a	66.12ab	24.10ab	4.75b	4.58b
		IV	322.00a	95.11a	68.67a	24.10ab	5.05ab	4.88a
		V	318.25a	93.38a	73.33a	24.22a	5.25a	5.03a
	株两优 4026	I	307.25a	118.43a	62.58d	26.33c	6.00c	5.78c
		II	306.75a	117.08a	67.48c	26.46bc	6.41bc	6.23b
		III	305.75a	116.77a	72.26b	26.59abc	6.50b	6.28b
		IV	310.33a	117.13a	75.50ab	26.88ab	7.38a	7.06a
		V	312.50a	118.84a	77.58a	26.99a	7.51a	7.26a

同列数据不同小写字母表示同一品种不同处理间差异达 5%显著水平 ($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters represent significant differences between the same species in different treatments ($P < 0.05$). The same below.

2022 年,湘早籼 45 号结实率随收获时期推迟而提高,其中处理V和IV显著高于处理I和II,处理III也显著高于处理I;千粒重随收获时期推迟而提高,处理间差异与 2021 年一致;产量随收获时期推迟而提高,处理IV和V差异不显著,但显著高于其他处理,处理III显著高于处理I和II,而处理I和II差异不显著。株两优 4026 结实率随收获时期推迟而提高,处理V显著高于除处理IV之外的其他处理,千粒重随收获时期推迟而提高,处理V、III、IV间差异不显著,但显著高于处理I和II;产量随

收获时间延迟而提高,处理IV和V差异不显著,但显著高于其他处理,处理II和III差异不显著,两者均显著高于处理I。

综上所述,收获时期对各品种有效穗数和穗粒数无显著影响,但各品种结实率、千粒重和产量随收获时期推迟而提高,其中,处理IV和V差异不显著,但显著高于前 3 个收获时期处理。

2.2 收获时期对早稻各器官干重的影响

由表 2 可见,2021 年,湘早籼 45 号根、茎、叶干重随收获时期延迟而下降,其中,处理V茎、

表 2 不同收获时期下早稻各器官干物质重

Table 2 Dry matter weight of different organs of early rice under different harvest times

t/hm²

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	根 Root	茎 Culm	叶 Leaf	谷壳 Chaff	糙米 Brown rice
2021	湘早籼 45 号	I	0.76a	3.36a	1.49a	0.82a	3.20d
		II	0.71a	3.26ab	1.36ab	0.87a	3.62c
		III	0.70a	3.23ab	1.22ab	0.86a	4.03b
		IV	0.69a	3.22ab	1.22ab	0.83a	4.70a
		V	0.64a	3.14b	1.09b	0.85a	4.77a
	陆两优 996	I	1.08a	4.09a	1.72a	1.09a	2.54d
		II	0.88b	3.72a	1.59a	1.12a	3.49c
		III	0.86b	3.72a	1.55a	1.14a	3.98bc
		IV	0.85b	3.59a	1.47a	1.14a	4.48ab
		V	0.84b	3.67a	1.43a	1.17a	4.71a
2022	湘早籼 45 号	I	0.62a	4.16a	1.58a	0.87a	3.10c
		II	0.61a	3.70ab	1.48a	0.85a	3.44bc
		III	0.58a	3.70ab	1.40a	0.84a	3.91b
		IV	0.54a	3.61b	1.39a	0.88a	4.17ab
		V	0.52a	3.27c	1.37a	0.91a	4.34a
	株两优 4026	I	0.73a	4.52a	1.61a	1.48a	4.52c
		II	0.72a	4.51a	1.43b	1.45a	4.96bc
		III	0.71a	4.50a	1.24c	1.47a	5.03b
		IV	0.66a	4.32a	1.12c	1.46a	5.92a
		V	0.65a	4.30a	1.10c	1.50a	6.01a

叶干重显著低于处理I，其他处理间无显著差异；糙米干重随收获时期延迟而增大，处理IV和V差异不显著，但显著高于其他处理。陆两优 996 根、茎、叶干重随收获时期延迟而下降，但均无显著差异；糙米干重不断增加，其中，处理V显著高于处理I、II、III，处理IV显著高于处理I和II，处理III显著高于处理I。

2022 年，湘早籼 45 号根、茎、叶干重随收获时期延迟而下降，其中，处理间叶干重差异不显著，茎干重处理V显著低于处理I，其他处理间无显著差异；糙米干重不断增加，其中处理V显著高于处理I、II、III，处理IV显著高于处理I、II，处理III显著高于处理I。株两优 4026 根、茎、叶干重随收获时期延迟而下降，其中，处理间茎干重差异不显著，叶干重处理I显著高于其他处理，糙米干重不断增加，其中处理IV和V显著高于处理I、II、III，处理III显著高于处理I。

综上所述，随收获时期延迟，水稻籽粒干重不

断增加，谷壳基本稳定，茎、叶干重不断减小，可见齐穗 18 d 后茎、叶积累的光合产物在不断外运。

2.3 收获时期对早稻各器官镉含量的影响

由表 3 可见，2021 年，湘早籼 45 号，根镉含量随收获时期推迟而提高，其中处理 V 显著高于其他处理；茎镉含量随收获时期推迟而提高，处理IV和V显著高于处理I和II；叶镉含量随收获时期推迟而下降，处理IV和V显著低于其他处理；谷壳镉含量随收获时期推迟而下降，处理V显著低于其他处理；糙米镉含量随收获时期推迟而提高，其中处理 V 显著高于其他处理，处理III、IV显著高于处理I和II。陆两优 996 根镉含量随收获时期推迟而提高，处理III、IV和V显著低于处理I；茎镉含量随收获时期推迟而提高，处理IV和V显著高于其他处理；叶镉含量随收获时期推迟而下降，处理I显著高于其他处理；谷壳镉含量随收获时期推迟而下降，处理I和II显著高于其他处理；糙米镉含量随收获时期推迟而提高，但仅处理 V 和I具有

表 3 不同收获时期的早稻各器官镉含量							
Table 3 Cd content of different organs of early rice under different harvest times							mg/kg
年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	根 Root	茎 Culm	叶 Leaf	谷壳 Chaff	糙米 Brown rice
2021	湘早籼 45 号	I	2.183b	0.456b	0.552a	0.272a	0.090c
		II	2.369b	0.523b	0.481a	0.251a	0.095c
		III	2.331b	0.598ab	0.473a	0.230ab	0.138b
		IV	2.357b	0.691a	0.373b	0.200ab	0.148b
		V	2.525a	0.729a	0.297b	0.176b	0.182a
	陆两优 996	I	2.256b	1.132c	0.890a	0.504a	0.291b
		II	2.423ab	1.359b	0.784b	0.481a	0.310ab
		III	2.618a	1.378b	0.740b	0.422b	0.323ab
		IV	2.648a	1.611a	0.707b	0.417b	0.324ab
		V	2.674a	1.656a	0.613c	0.385b	0.346a
2022	湘早籼 45 号	I	2.508a	0.444b	0.415a	0.300a	0.075b
		II	2.585a	0.547b	0.411a	0.275a	0.084b
		III	2.618a	0.554b	0.378a	0.251ab	0.099b
		IV	2.684a	0.603a	0.321b	0.208b	0.102b
		V	2.718a	0.675a	0.318b	0.182b	0.135a
	株两优 4026	I	2.256b	0.564b	0.356a	0.255a	0.094c
		II	2.423b	0.583b	0.330a	0.246a	0.098c
		III	2.548a	0.607a	0.332a	0.241a	0.110c
		IV	2.574a	0.611a	0.324ab	0.234a	0.140b
		V	2.618a	0.620a	0.311b	0.221a	0.188a

显著差异。

2022 年，湘早籼 45 号，根镉含量随收获时期推迟而提高，但处理间差异不显著；茎镉含量随收获时期推迟而提高，处理IV和V显著高于其他 3

个处理；叶镉含量随收获时期推迟而下降，处理IV和V显著低于其他处理；谷壳镉含量随收获时期推迟而下降，处理IV、V显著低于处理I和II；糙米镉含量随收获时期推迟而提高，其中处理V显著高

于其他处理，另外 4 个处理间差异不显著。株两优 4026，根、茎镉含量随收获时期推迟而提高，处理Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ显著高于处理Ⅰ和Ⅱ；叶镉含量随收获时期推迟而下降，处理Ⅴ显著低于处理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ；谷壳镉含量随收获时期推迟而下降，但处理间差异不显著；糙米镉含量随收获时期推迟而提高，其中处理Ⅴ显著高于其他处理，处理Ⅳ显著高于处理Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ。

综上所述，随收获时期推迟，各品种叶和谷壳镉含量呈下降趋势，而根、茎和糙米镉含量呈上升趋势，除陆两优 996 外各品种处理Ⅴ糙米镉含量显著高于其他处理。

2.4 收获时期对早稻各器官镉积累量的影响

由表 4 可见，2021 年，湘早籼 45 号，各处理间根镉积累量无显著差异，茎镉积累量随收获时期推迟而提高，其中处理Ⅳ和Ⅴ显著高于处理Ⅰ和Ⅱ；叶镉积累量随收获时期推迟而下降，其中处理

Ⅳ和Ⅴ显著低于其他 3 个处理；谷壳镉积累量随收获时期推迟而下降，其中处理Ⅴ显著低于处理Ⅰ和Ⅱ；糙米镉积累量随收获时期推迟而提高，除处理Ⅰ和Ⅱ无显著差异外其他处理间均差异显著；镉积累总量随收获时期推迟而提高，处理Ⅴ显著高于除处理Ⅳ外的其他处理，处理Ⅳ显著高于处理Ⅰ和Ⅱ。陆两优 996，各处理根镉积累量无显著差异，茎和根镉积累量随收获时期推迟而提高，其中处理Ⅳ和Ⅴ显著高于其他处理，处理Ⅲ和Ⅱ显著高于处理Ⅰ；叶镉积累量随收获时期推迟而下降，其中处理Ⅴ显著低于其他处理，处理Ⅳ、Ⅲ和Ⅱ显著低于处理Ⅰ；谷壳镉积累量随收获时期推迟而下降，其中处理Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ显著低于处理Ⅰ和Ⅱ；糙米镉积累量随收获时期推迟而提高，处理Ⅳ和Ⅴ无显著差异，其他处理间均差异显著；镉积累总量随收获时期推迟而提高，处理Ⅴ和Ⅳ显著高于其他处理，处理Ⅲ显著高于处理Ⅰ。

表 4 不同收获时期的早稻各器官镉积累量

Table 4 Cd accumulation amount of different organs of early rice under different harvest times								mg/hm ²
年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	根 Root	茎 Culm	叶 Leaf	谷壳 Chaff	糙米 Brown rice	合计 Total
2021	湘早籼 45 号	I	1659.10a	1533.51b	822.17a	222.83a	266.05d	4503.66c
		II	1682.18a	1706.43b	653.64a	218.07a	321.90d	4582.22c
		III	1631.63a	1932.01ab	576.87a	198.05ab	520.06c	4858.62b
		IV	1626.28a	2224.67a	454.75b	166.00ab	653.55b	5125.25ab
		V	1616.09a	2289.39a	323.52b	149.88b	822.20a	5201.08a
	陆两优 996	I	2436.52a	4629.13c	1531.61a	549.11a	682.71d	9829.08c
		II	2132.64a	5057.13b	1246.53b	538.21a	1034.48c	10 008.99bc
		III	2251.24a	5126.10b	1146.72b	481.02b	1206.69b	10 211.77b
		IV	2250.92a	5785.01a	1039.23b	474.85b	1365.86ab	10 915.87a
		V	2246.12a	6078.78a	876.29c	450.96b	1508.45a	11 160.60a
2022	湘早籼 45 号	I	1554.89a	1845.04b	655.57a	260.86a	214.66c	4531.02b
		II	1576.65a	2025.56b	608.57a	233.70b	264.92c	4709.40ab
		III	1518.32a	2049.76b	529.51b	211.11b	368.64b	4677.34ab
		IV	1449.25a	2177.26a	446.00b	183.43bc	407.63b	4663.57ab
		V	1413.11a	2205.98a	435.71b	165.65c	554.92a	4775.37a
	株两优 4026	I	1646.91a	2549.21a	572.86a	377.40a	405.28c	5551.66b
		II	1744.88a	2628.39a	471.50ab	356.70a	463.20c	5664.67b
		III	1809.18a	2707.04a	411.45b	354.27a	527.77b	5809.71ab
		IV	1698.81a	2638.74a	362.77b	341.64a	782.01b	5823.97ab
		V	1701.52a	2668.02a	341.63b	331.50a	1080.46a	6123.13a

2022 年，湘早籼 45 号，各处理根镉积累量无显著差异，茎镉积累量随收获时期推迟而提高，其中处理Ⅳ和Ⅴ显著高于其他处理；叶镉积累量随收获时期推迟而下降，其中处理Ⅳ和Ⅴ显著低于其他 3 个处理；谷壳镉积累量随收获时期推迟而下

降，其中处理Ⅴ显著低于处理Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ；糙米镉积累量随收获时期推迟而提高，处理Ⅴ显著高于其他处理，处理Ⅲ、Ⅳ也显著高于处理Ⅰ和Ⅱ；镉积累总量随收获时期推迟而提高，处理Ⅴ显著高于处理Ⅰ。株两优 4026，各处理根、茎镉积累量无显著差

异, 叶镉积累量随收获时期推迟而下降, 其中处理Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ显著低于处理Ⅰ; 谷壳镉积累量随收获时期推迟而下降, 但处理间差异不显著; 糙米镉积累量随收获时期推迟而提高, 处理Ⅴ显著高于其他处理, 处理Ⅲ、Ⅳ也显著高于处理Ⅰ和Ⅱ; 镉积累总量随收获时期推迟而提高, 处理Ⅴ显著高于处理Ⅰ。

综上所述, 随收获时期推迟, 各品种根镉积累量无显著变化, 叶、谷壳镉积累量呈下降趋势, 茎、糙米镉积累量与总积累量呈增加趋势, 除陆两优 996 外各品种处理Ⅴ糙米镉积累量显著高于

其他处理。

2.5 收获时期对早稻镉分配的影响

由图 1 可见, 随收获时期延迟, 湘早籼 45 号和陆两优 996 茎、糙米镉分配比例呈上升趋势, 根、叶和谷壳镉分配比例呈下降趋势; 株两优 4026 根、茎镉分配比例呈先上升后下降趋势, 叶、谷壳镉分配比例呈逐渐下降趋势, 糙米镉呈逐渐上升趋势。随收获时期延迟, 各器官镉分配系数的变化具有一定品种间差异, 但整体上表现为叶与谷壳镉分配系数下降、茎与糙米镉分配系数增大的趋势。

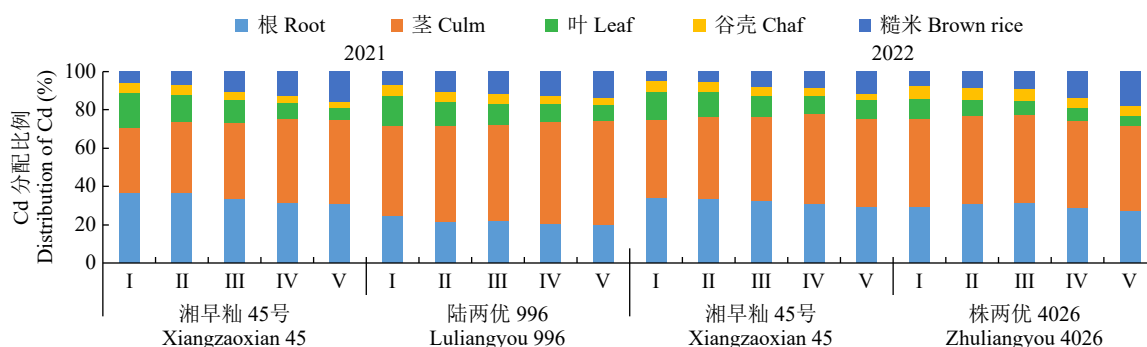


图 1 不同收获时期下早稻各器官镉分布

Fig.1 Cd distribution of different organs of early rice under different harvest times

3 讨论

灌浆结实期是水稻产量形成的关键阶段, 适宜的收获时期是获得高产与优质的关键。前人研究发现, 收获期过早导致水稻产量明显下降, 主要原因是籽粒充实度较差导致产量构成要素中的结实率和千粒重偏低^[22], 而随着收获期的推迟, 水稻成熟度提高, 水稻结实率和千粒重稳步提高, 产量逐渐增加并趋于稳定^[23]。本研究发现随收获时期延迟, 早稻各品种产量、结实率及千粒重均呈增加趋势, 但齐穗后 27 与 30 d 收获时差异不显著, 与前人结论基本一致。但林伟等^[24]认为, 水稻收获过晚会使掉穗、掉粒现象严重, 倒伏面积增加, 飞鸟和老鼠等动物偷食而造成的损失严重, 还造成收获作业时间和秋后翻地时间紧张。张国平等^[25]也认为, 水稻收获过迟将导致产量降低。本试验设置的收获时期为齐穗后 18~30 d, 未出现因收获过晚而产量下降的情况。

不同水稻品种籽粒对镉的积累量不同, 本研究发现, 水稻籽粒镉含量受基因型影响, 陆两优 996 籽粒镉含量明显高于湘早籼 45 号和株两优

4026, 其各处理糙米镉含量均超过了国家标准 (0.2 mg/kg), 与一般认为的陆两优 996 属高镉积累品种是一致的。进一步分析镉在水稻的分配, 发现陆两优 996 根镉占整株的比例低于湘早籼 45 号和株两优 4026, 而地上部分则相反, 可见陆两优 996 籽粒镉含量较高的原因与其地下向上运输镉的能力较强有关。各品种中, 湘早籼 45 号籽粒镉含量最低, 与前人^[26-27]认为的常规稻生物量较小、籽粒镉积累量明显低于杂交稻的观点一致。

关于收获时期对水稻糙米镉积累特性的影响尚未见报道, 本研究发现, 随着收获时期的延迟, 各早稻品种谷壳镉含量与积累量呈下降趋势, 而糙米镉含量与积累量呈上升趋势, 且除陆两优 996 外各品种齐穗后 30 d 收获处理的糙米镉含量与积累量显著高于其他各处理。本研究发现, 与齐穗后 27 d 收获处理相比, 齐穗后 30 d 收获处理糙米镉含量显著提高, 但其干物重提高并不显著, 推测认为水稻籽粒镉积累与干物质积累并不完全同步, 籽粒镉快速增长时期会晚于籽粒干物质的积累。可见, 综合考虑产量和稻米镉含量, 湘南镉污染区适宜种植的早稻品种为湘早籼 45 号和株两优

4026, 适宜收获时期为齐穗后 27 d, 此时收获可以获得较高的籽粒产量和较低的镉含量。在实际生产中, 由于多熟种植、品种生育期以及天气等原因, 具体的收获时期还需与实际生产相适应。

为探讨水稻灌浆中后期籽粒镉的来源, 本研究考察了水稻齐穗后 18~30 d 营养器官(根、茎、叶)与籽粒(谷壳、糙米)的干物重、镉含量和积累量变化, 发现在各器官干物重变化方面, 随收获时期推迟, 水稻籽粒干重不断增加, 谷壳基本稳定, 但根、茎、叶的重量不断减小; 在各器官镉含量变化方面, 随收获时期推迟, 各品种叶、谷壳镉含量呈下降趋势, 而根、茎镉含量呈上升趋势, 根镉含量无显著变化; 在各器官镉积累量变化方面, 随收获时期推迟, 叶、谷壳镉积累量呈下降趋势, 茎、糙米镉积累量与植株总镉积累量呈增加趋势。各品种植株总镉积累量随收获时期推迟表现增加趋势, 说明齐穗后 18~30 d 水稻仍在持续吸收土壤镉; 根干重下降, 但根镉含量上升, 根镉积累量无显著变化, 也说明了水稻灌浆中后期根系仍在吸收土壤中的镉; 谷壳重基本稳定, 但其镉含量与积累量呈下降趋势, 说明谷壳镉转运是籽粒镉的来源之一; 叶片重、镉含量与积累量均减小, 说明叶片镉转运也是籽粒镉的来源之一; 茎秆重下降, 但其镉含量与积累量上升, 说明茎秆是水稻灌浆中后期根系吸收镉的重要储存器官。综合来看, 水稻灌浆中后期(齐穗后 18~30 d)籽粒镉的主要来源是土壤吸收和叶片、谷壳转运。喻华等^[28]认为, 水稻籽粒镉来源于 2 个途径, 一是吸收土壤中的有效镉, 二是来自其他器官的转运。本研究的结果是从各器官镉含量与积累量的表观变化推断来的, 尚没有直接证据(即没有直接测定各器官的镉转运量), 对此还有待进一步研究证实。

4 结论

综上所述, 水稻灌浆中后期(齐穗后 18~30 d)籽粒镉主要来自土壤吸收和叶片、谷壳转运, 推迟收获时期有利于提高水稻产量, 但籽粒镉含量也会提高, 综合考虑产量、稻米镉含量, 湘南镉污染稻区早稻适宜的收获时期为齐穗后 27 d。

参考文献

[1] Sui F Q, Chang J D, Tang Z, et al. *Nramp5* expression and

functionality likely explain higher cadmium uptake in rice than in wheat and maize. *Plant and Soil*, 2018, 433(1/2): 377-389.

- [2] Chen H P, Tang Z, Wang P, et al. Geographical variations of cadmium and arsenic concentrations and arsenic speciation in Chinese rice. *Environmental Pollution*, 2018, 238: 482-490.
- [3] Mu T T, Wu T Z, Zhou T, et al. Geographical variation in arsenic, cadmium, and lead of soils and rice in the major rice producing regions of China. *Science of the Total Environment*, 2019, 677: 373-381.
- [4] 汪鹏, 王静, 陈宏坪, 等. 我国稻田系统镉污染风险与阻控. *农业环境科学学报*, 2018, 37(7): 1409-1417.
- [5] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析. *农业环境科学学报*, 2016, 35(6): 1028-1033.
- [6] 封文利, 郭朝晖, 史磊, 等. 控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响. *环境科学*, 2018, 39(1): 399-405.
- [7] 魏晓, 张鹏博, 赵丹丹, 等. 水稻土施硅对土壤-水稻系统中镉的降低效果. *生态学报*, 2018, 38(5): 1600-1606.
- [8] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收累积镉的影响及其作用机理. *生态学报*, 2007, 27(9): 3930-3939.
- [9] 苏雨婷, 赵英杰, 谷子寒, 等. 灌溉方式对土壤有效镉含量与双季稻产量形成及镉累积分配的影响. *作物研究*, 2018, 32(3): 180-187.
- [10] 常同举, 崔孝强, 阮震, 等. 长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响. *环境科学*, 2014, 35(6): 2381-2391.
- [11] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 168-176.
- [12] 张宁. 气候变化或致全球粮食危机. *生态经济*, 2021, 37(8): 5-8.
- [13] 马中涛, 马会珍, 崔文培, 等. 成熟度对优良食味水稻南粳 9108 产量、品质的影响. *江苏农业学报*, 2020, 36(6): 1353-1360.
- [14] 李文敏, 李萍, 崔晶, 等. 收获期对粳稻食味理化特性的影响. *天津农业科学*, 2020, 26(10): 25-30.
- [15] 成臣, 雷凯, 王盛亮, 等. 不同断水及收获期对南方优质晚粳稻产量和品质的影响. *作物研究*, 2020, 34(1): 1-7.
- [16] 帅泽宇, 谷子寒, 王元元, 等. 土壤耕作方式对双季稻产量构成与穗镉积累的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 348-357.
- [17] 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. *中国水稻科学*, 2022, 36(1): 55-64.
- [18] 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. *农业环境科学学报*, 2003(5): 529-532.
- [19] 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 等. 镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素. *环境科学*, 2021, 42(11): 5545-5553.
- [20] 张标金, 罗林广, 魏益华, 等. 不同基因型水稻镉积累动态差异分析. *中国农学通报*, 2015, 31(9): 25-30.
- [21] 贺慧, 陈灿, 郑华斌, 等. 不同基因型水稻镉吸收差异及镉对水稻的影响研究进展. *作物研究*, 2014, 28(2): 211-215.
- [22] 王丽妍, 杨成林. 不同收获期对寒地水稻产量和品质的影响. *北方水稻*, 2018, 48(2): 4-6, 11.
- [23] 萧长亮, 王安东, 王士强, 等. 不同收获期对寒地水稻产量和品质的影响. *黑龙江农业科学*, 2018(12): 7-10.
- [24] 林伟, 柴楠, 郑涛, 等. 寒地水稻不同收获期对产量的影响. *现代化农业*, 2017(2): 30-31.

- [25] 张国平, 陈仕龙, 颜迅平, 等. 优质稻最佳收获期试验初报. 贵州农业科学, 2007(1): 68, 65.
- [26] 王凯荣, 龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究. 农业环境保护, 1996(4): 145-149, 176, 193.
- [27] 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. 生态学报, 1999, 19(1): 106-109.
- [28] 喻华, 上官宇先, 涂仕华, 等. 水稻籽粒中镉的来源. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1940-1947.

Effects of Harvest Time on Yield and Cadmium Accumulation and Distribution Characteristics of Early Rice

Wang Han¹, Zheng Dechao¹, Tian Qinqin¹, Wu Xiaojing², Zhou Wenxin¹, Yi Zhenxie¹

(¹College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; ²Chenzhou Crop Seed Storage and Technology Extension Station, Chenzhou 423000, Hunan, China)

Abstract In order to explore the suitable harvest time of early rice in the cadmium-polluted rice area of southern Hunan, a field experiment was conducted in cadmium-polluted rice field of Chenzhou, Hunan province from 2021 to 2022 using Xiangzaoxian 45, Luliangyou 996 and Zhuliangyou 4026 as materials to study the effects of harvest time (18, 21, 24, 27, 30 days after full heading) on the yield and cadmium (Cd) accumulation and distribution characteristics of early rice. The results showed that the harvest time had no significant effect on the number of effective panicles and grains per panicle of rice, but the seed-setting rate, 1000-grain weight and yield increased with the delay of harvest time. There was no significant difference between the treatments of harvesting at 27 and 30 days after full heading, but they were significantly higher than those of the other three treatments. With the delay of harvest time, the Cd content, Cd accumulation and Cd distribution coefficient in leaves and chaffs of all varieties showed a downward trend, while the Cd content, Cd accumulation, Cd distribution coefficient in stems and brown rice and the plant total Cd accumulation showed an upward trend. Except Luliangyou 996, the Cd content and accumulation in brown rice of treatment of harvesting at 30 days after full heading were significantly higher than other treatments. In the middle and late stage of rice filling (18-30 days after full heading), the Cd in grain mainly came from soil absorption and transport of leaves and chaffs. The Cd content in brown rice of early rice varied significantly among varieties, and the Cd content in brown rice of each treatment of Luliangyou 996 exceeded the national standard (0.2 mg/kg). It can be seen that delaying the harvest time is beneficial to improve the yield of early rice, but the Cd content of grains will also increase. Comprehensively considering the yield and the Cd content of brown rice, the suitable harvest time for early rice in the Cd-polluted rice area in southern Hunan is 27 days after full heading.

Key words Early rice; Harvest time; Yield; Cadmium content