

李奇, 吴在敬, 林芳源, 等. 水分和密度对化感水稻产量、品质及籽粒中 Pb、Cd 含量的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(4): 25-32.

水分和密度对化感水稻产量、品质及籽粒中 Pb、Cd 含量的影响

李 奇¹, 吴在敬², 林芳源³, 胡 飞¹

(1 华南农业大学 农学院, 广东 广州 510642; 2 广东省江门市新会区农技推广中心, 广东 江门 529100;
3 广东省江门市新会区农林局, 广东 江门 529100)

摘要:【目的】探讨化感水稻产量、品质及重金属含量与水分管理和种植密度的关系, 更好地发挥化感水稻环境友好的特点。【方法】以‘化感稻 3 号’、‘化两优 78 号’以及早季的‘玉香油占’和晚季的‘百香占’为材料, 研究不同水分管理 (孕穗期晒田 WN、孕穗期不晒田 WS) 和种植密度 (高密度 DH、当地种植密度 DN) 处理下稻米的产量、品质以及籽粒中 Pb 和 Cd 含量的变化。【结果】稻米产量和品质在不同水分和密度管理条件下差异不显著, 但在品种间有显著差异, 表现为‘化两优 78 号’产量高于其他品种。WSDN 处理显著降低了常规稻‘百香占’的精度率, 但对化感品种影响不显著。WS 处理降低了稻米 Pb 和 Cd 含量, 尤其是显著降低了化感稻米 Cd 含量。密度和品种对稻米 Pb 和 Cd 含量影响不显著。【结论】水分和密度处理对化感水稻的产量和稻米品质影响不显著, 但 WS 处理能够显著降低化感水稻籽粒中 Cd 含量。

关键词: 化感水稻; 水分管理; 种植密度; 稻米品质; Pb; Cd
中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)04-0025-08

Effects of water managements and planting densities on allelopathic rice yields, qualities and the contents of Pb and Cd in rice grains

LI Qi¹, WU Zaijing², LIN Fangyuan³, HU Fei¹

(1 College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Agricultural Technology Promotion Center of Xinhui, Jiangmen 529000, China;
3 Xinhui Agricultural and Forestry Bureau, Jiangmen 529000, China)

Abstract: 【Objective】To investigate the relationships of the yields, qualities and heavy metals contents of allelopathic rice with water managements and planting densities, and make better use of environmentally friendly characteristics of allelopathic rice. 【Method】The rice materials, including ‘Allelopathy rice No.3’, ‘Hualiangyou 78’, ‘Yuxiangyouzhan’ in early season and ‘Baixiangzhan’ in late season, were cultivated under two different water managements (WN: paddy field drainage during booting stage, WS: paddy field continuous irrigation during booting stage) and two different planting densities (DH: high planting density, DN: local planting density). And then their yields, qualities, and Pb and Cd contents in grains were investigated. 【Result】The rice yields and qualities had no significant differences in different water and density treatments, but differed among rice cultivars. ‘Hualiangyou 78’ yield was the highest in all materials. WSDN treatment significantly reduced the milled rice percentage of ‘Baixiangzhan’, but had no significant effect on allelopathic rice cultivars. WS treatment reduced

the contents of Pb and Cd in rice grains, especially the contents of Cd in allelopathic rice cultivars. The planting densities and rice cultivars had no significant effect on Pb and Cd contents in rice grains. 【Conclusion】 Both water and density treatments have no significant effect on yields and qualities of allelopathic rice materials, but WS can significantly reduce the Cd contents of allelopathic rice grains.

Key words: allelopathic rice; planting density; water management; rice quality; Pb; Cd

水稻是世界上最为重要的粮食作物之一，其产量和品质一直受到人们的关注^[1-3]。农田土壤重金属污染是影响稻米品质的重要因素，稻米中铅（Pb）、镉（Cd）的含量是农产品质量安全检测的重要指标^[4]。作物中重金属积累会影响食品安全，甚至引发公共事件^[5-7]。

稻田水分和密度的管理与水稻产量、杂草控制和籽粒重金属含量有密切关系。李贵等^[8]研究发现‘华抗草 78’配合 10 cm 水层和每公顷 45~60 万株苗的种植密度，能够提高对杂草的控制，达到增产的效果；Limura^[9]发现水分影响作物对重金属尤其是 Cd 的吸收；Hu 等^[10]发现增加土壤水分有助于降低水稻对重金属 Cd 的吸收；张苏波^[11]在探索不同水稻品种吸收重金属的试验中发现籼稻的吸 Cd 速率高于粳稻 2 倍以上。化感水稻本身具有抗草的作用，目前鲜有关于化感水稻吸收重金属的研究报道，是否可以运用化感水稻品种结合水分和密度管理，实现既能减少杂草危害，稳产增产，又能降低籽粒重金属含量，改善稻米品质的目标，为水稻安全生产以及重金属污染土壤综合利用提供参考，促进化感水稻品种的推广和使用。

本研究以华南农业大学农学院水稻化感作用研究课题组育成的‘化感稻 3 号’、‘化两优 78 号’和当地常规品种为材料，通过不同水分和密度管理，分析化感水稻在不同水分和密度管理条件下籽粒中 Pb 和 Cd 的含量及其产量和品质差异，为构建化感水稻高产优质安全的栽培技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

化感水稻品种：‘化感稻 3 号’、‘化两优 78 号’。对照品种为当地常规种，早季：‘玉香油占’，晚季：‘百香占’，均为广东省江门市新会区大泽镇百业科绿机械化专业合作社主栽品种。

1.2 试验设计

试验于 2016 年在广东省江门市新会区大泽镇张村进行，试验地为水稻土，土壤性质：pH 5.2，有机质 39.54 g·kg⁻¹，碱解氮 165.58 mg·kg⁻¹、速效磷 131.68 mg·kg⁻¹、速效钾 193.54 mg·kg⁻¹、Pb

78.32 mg·kg⁻¹、Cd 0.17 mg·kg⁻¹。根据中华人民共和国国家标准 GB15618—1995^[12]土壤环境质量标准规定的土壤环境质量标准 $w(\text{Pb}) \leq 250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ， $w(\text{Cd}) \leq 0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 可知，试验地重金属含量合格。

秧盘育苗至 3 叶期时进行人工移栽，每穴 2 株，采用裂区设计。主区设 2 个水分处理：孕穗期晒田 WN、孕穗期不晒田 WS；水分管理时间：早季（5 月 7 日—5 月 28 日）、晚季（9 月 11 日—10 月 8 日）。期间高筑田埂，并覆盖薄膜，防止田间水分流失，地表水层过低时利用水泵灌水，保证地表有 2~6 cm 的水层。晒田结束后，WN 区与 WS 区田间水分管理保持一致。裂区设 2 个种植密度：当地种植密度 DN（每公顷 31 万穴）、高密度 DH（每公顷 52 万穴），DN 株行距为 16 cm×20 cm，DH 株行距为 16 cm×12 cm。再裂区设 4 个水稻品种材料。试验共设 12 个处理，每个处理重复 3 次，每个小区面积 11.52 m²，小区间距 0.4 m，试验地总面积 633.65 m²。试验过程中施肥、病虫害防治等与当地一致。

1.3 指标及测定方法

1.3.1 稻米产量和品质测定 每小区随机取 5 穴，收获后自然风干，统计单穴有效穗数、实粒数、空秕粒数、千粒质量和产量。待收获 3 个月后，将籽粒做干燥处理，使含水量（w）在 12%~14% 之间，去除青米、碎米和杂质，参照中华人民共和国国家标准 GB/T17891—1999^[13]进行米质分析，包括加工和外观品质等。

1.3.2 稻米 Pb、Cd 含量测定 Pb 和 Cd 含量参照中华人民共和国国家标准 GB5009.12—2010^[14]和 GB5009.15—2014^[15]进行测定。

1.4 数据处理

试验数据采用软件 SPSS 19.0 和 Excel 2010 处理，采用 Duncan’s 法分析处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 水分、密度与化感水稻产量及其构成的关系

水分和密度不是影响稻米产量的主要因素，产量差异主要由品种决定（表 1）。由表 2 和表 3 可知，DH 处理条件下水稻有效穗数增加，每穗粒数降

低, 其中‘化两优 78 号’在早季表现较为明显, 在相同水分管理条件下 DH 与 DN 处理有效穗数和每穗粒数的差异达到了显著水平。晚季 WS 处理条件下水稻千粒质量降低, 其中‘化感稻 3 号’和‘化两优 78 号’表现较为明显, 晚季‘化感稻 3 号’在 WSDH 处理下千粒质量显著低于 WNDH, ‘化两优 78 号’在 WSDN 处理下千粒质量显著低于 WNDN。在品种间, ‘化两优 78 号’产量较高, 早季在 WSDH 和 WNDN 处理下与‘化感稻 3 号’差异显著, 晚季在 WNDN 处理下与‘百香占’差异显著。

表 1 影响稻米产量因素的主效应分析
Table 1 The main effect analyses of factors affected rice yields

变异来源	自由度	P	
		早季	晚季
水分	1	0.111	0.891
密度	1	0.177	0.545
品种	2	0.028	0.075
水分×密度	1	0.698	0.364
水分×品种	2	0.562	0.255
品种×密度	2	0.552	0.188
水分×品种×密度	2	0.585	0.241

表 2 不同水分和密度管理条件下早季水稻的产量¹⁾
Table 2 The rice yields under different water and planting density managements in early season

品种	栽培措施	有效穗数/($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	实际产量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
化感稻3号	WSDH	298.97±25.95ab	186.40±15.53ab	87.17±1.27ab	21.27±1.45e	7.83±0.74bcde
	WSDN	270.83±7.25bc	221.10±6.21a	78.47±8.08b	22.10±1.40cde	7.32±0.29cde
	WNDH	320.23±6.97a	216.07±21.10a	84.43±3.15ab	21.70±1.27de	7.04±0.61de
	WNDN	226.87±13.66d	211.03±23.27ab	84.33±4.35ab	21.53±1.31de	5.86±0.12e
化两优78号	WSDH	316.33±11.73ab	162.10±9.96bcde	90.67±4.14a	26.17±0.20a	10.23±0.86a
	WSDN	237.27±3.09cd	211.33±16.41ab	84.83±1.99ab	24.57±0.09abc	8.96±0.52abcd
	WNDH	318.27±12.04ab	130.17±4.14c	89.57±3.06ab	24.87±0.33abc	8.56±1.17abcd
	WNDN	243.07±13.13cd	181.10±4.84ab	86.87±3.00ab	25.93±0.62ab	8.87±0.78abcd
玉香油占	WSDH	266.20±3.35bcd	194.63±24.16ab	88.67±0.52ab	23.17±0.66bcde	9.29±0.42abc
	WSDN	232.63±4.01cd	213.33±6.25a	90.43±0.43a	24.00±0.52abcd	9.54±0.77ab
	WNDH	289.37±15.31ab	177.57±7.03ab	87.77±2.09ab	24.37±0.41bcde	7.49±0.48bcde
	WNDN	224.57±21.44d	192.30±17.24ab	89.00±0.50ab	23.53±0.33abcd	7.99±0.24bcd

1)WN: 孕穗期晒田, WS: 孕穗期不晒田, DN: 当地种植密度, DH: 高密度; 同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示处理间差异不显著($P>0.05$, Duncan’s 法)

表 3 不同水分和密度管理条件下晚季水稻的产量¹⁾
Table 3 The rice yields under different water and planting density managements in late season

品种	栽培措施	有效穗数/($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	每穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	产量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
化感稻3号	WSDH	356.50±18.63bcd	229.03±11.97abc	77.63±7.44a	18.57±0.17e	9.23±1.31ab
	WSDN	278.50±15.71ef	263.90±28.43a	79.03±2.13a	19.03±0.47de	9.91±0.36ab
	WNDH	326.40±25.03def	244.80±8.56ab	78.30±2.34a	21.00±0.51cd	9.14±0.24ab
	WNDN	256.23±5.25f	257.13±4.00a	68.77±6.48a	20.50±0.30cde	9.21±0.56ab
化两优78号	WSDH	315.93±11.16def	176.40±17.15def	73.00±3.55a	24.23±0.38ab	9.97±0.93a
	WSDN	338.90±13.26cde	181.27±32.00cde	74.93±4.96a	22.70±1.31bc	9.02±0.74ab
	WNDH	310.20±17.04def	171.40±3.87defg	74.80±1.31a	24.63±0.38ab	10.41±0.19a
	WNDN	284.73±14.33def	202.40±15.37bcd	73.17±2.49a	25.03±0.49a	9.68±0.26a
百香占	WSDH	494.20±33.79a	138.57±20.77efg	77.47±2.34a	21.73±1.19c	8.68±0.64ab
	WSDN	412.53±12.99b	124.37±6.79fg	77.97±1.89a	20.83±0.12cd	8.28±0.52ab
	WNDH	533.57±42.34a	123.30±7.47g	70.13±4.26a	21.07±1.27cd	8.86±0.19ab
	WNDN	402.80±24.72bc	126.30±0.10fg	74.73±3.98a	21.13±0.43cd	7.43±0.76b

1)WN: 孕穗期晒田, WS: 孕穗期不晒田, DN: 当地种植密度, DH: 高密度; 同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示处理间差异不显著($P>0.05$, Duncan’s 法)

2.2 水分、密度与化感水稻米质的关系

水分和密度不是影响稻米品质的主要因素，稻米品质的差异主要由品种决定(表 4)。由表 5 和表 6 可知，同品种稻米加工和外观品质在不同水分和密度处理条件下差异均不显著，化感稻在 WSDH 处理条件下有较高的垩白率、垩白大小和垩白度。在品种间，‘化两优 78 号’早季 WS 和 WNDH 处理的垩白率显著高于‘玉香油占’，晚季 WSDN 处理的精米率显著高于‘百香占’。‘化感稻 3 号’早季 WN 处理的糙米率、精米率和整精米率显著低于‘玉香油占’，晚季 WNDH 处理的糙米率显著低于‘百香占’。

2.3 不同水分和密度管理条件下稻米 Pb 含量的变化

2.3.1 不同水分管理条件对稻米 Pb 含量的影响
水分是影响稻米 Pb 含量的主要因素(表 7)。在图 1

中，早、晚季各品种 WS 处理的稻米 Pb 含量均比 WN 少，但两者的差异在同品种中没有达到显著水平。WS 处理早季稻米中 Pb 含量比 WN 处理降低最多的是‘化两优 78 号’，差异达 0.256 mg·kg⁻¹，晚季是‘百香占’，差异达 0.052 mg·kg⁻¹。

2.3.2 不同种植密度对稻米 Pb 含量的影响
密度不是影响稻米 Pb 含量的主要因素(表 7)。由图 2 可知，早、晚季同品种稻米 Pb 含量在 DH 和 DN 处理下的差异均不显著。早季‘化感稻 3 号’DH 处理 Pb 含量低于 DN 处理，差异达 0.042 mg·kg⁻¹；‘玉香油占’DH 处理 Pb 含量高于 DN 处理，差异达 0.042 mg·kg⁻¹。晚季‘化感稻 3 号’和‘化两优 78 号’DH 处理 Pb 含量均低于 DN 处理，差异分别达 0.011 和 0.167 mg·kg⁻¹；‘百香占’DH 处理的 Pb 含量高于 DN 处理，差异达 0.083 mg·kg⁻¹。

表 4 影响稻米加工品质的主效应分析

Table 4 The main effect analyses of factors affecting rice processing qualities													
变异来源	自由度	P _{早季}						P _{晚季}					
		糙米率	精米率	整精米率	垩白率	垩白大小	垩白度	糙米率	精米率	整精米率	垩白率	垩白大小	垩白度
水分	1	0.767	0.912	0.848	0.097	0.487	0.234	0.118	0.586	0.145	0.969	0.677	0.872
密度	1	0.745	0.879	0.247	0.753	0.983	0.812	0.995	0.530	0.380	0.383	0.348	0.288
品种	2	0.017	0.021	0.015	0.008	0.064	0.280	0.005	0.003	0.731	0.050	0.489	0.181
水分×密度	1	0.298	0.563	0.908	0.852	0.455	0.405	0.830	0.619	0.453	0.561	0.903	0.269
水分×品种	2	0.077	0.152	0.136	0.377	0.615	0.506	0.363	0.608	0.401	0.919	0.488	0.892
品种×密度	2	0.346	0.779	0.922	0.235	0.878	0.180	0.981	0.883	0.283	0.944	0.106	0.718
水分×品种×密度	2	0.907	0.808	0.891	0.934	0.461	0.816	0.121	0.099	0.353	0.812	0.474	0.600

表 5 不同水分和密度管理条件下早季稻米加工和外观品质¹⁾

Table 5 The processing and exterior qualities of rice under different water and planting density managements in early season								%
品种	栽培措施	糙米率	精米率	整精米率	垩白率	垩白大小	垩白度	
化感稻3号	WSDH	77.52±1.29abc	65.39±1.29cd	51.65±2.05bc	35.67±6.12bc	43.39±1.31a	15.34±2.23ab	
	WSDN	77.72±1.74abc	65.59±2.41bcd	50.01±4.85c	31.33±3.84c	37.41±0.68a	11.74±1.51ab	
	WNDH	76.14±0.60bc	63.83±0.67d	49.89±0.70c	36.67±4.26bc	33.59±2.34a	12.50±2.35ab	
	WNDN	75.79±0.44c	64.22±0.47d	50.14±1.45c	32.00±1.00c	35.55±5.84a	11.36±1.80b	
化两优78号	WSDH	79.03±1.39ab	68.52±1.31abc	58.11±1.81ab	58.33±7.06a	33.73±3.87a	19.20±1.17a	
	WSDN	79.35±0.92a	68.59±0.78abc	56.31±2.32abc	54.67±4.37a	26.69±1.14a	14.57±1.27ab	
	WNDH	80.54±0.65a	69.67±0.62a	57.98±1.12ab	49.00±1.53ab	27.47±4.36a	13.54±2.45ab	
	WNDN	79.75±0.76a	68.24±0.72abc	56.46±0.71abc	44.67±1.86abc	34.75±4.44a	15.36±1.26ab	
玉香油占	WSDH	77.88±0.25abc	67.70±0.78abc	56.55±1.16abc	30.33±6.17c	38.52±5.27a	12.04±3.52ab	
	WSDN	79.73±0.96a	67.84±0.12abc	56.18±1.58abc	33.00±5.03c	44.77±6.88a	14.13±0.63ab	
	WNDH	80.25±0.94a	69.16±1.00ab	59.64±2.28a	32.00±7.77c	42.14±10.65a	11.99±0.67ab	
	WNDN	80.53±0.52a	69.17±1.15ab	57.95±2.07ab	38.67±2.91bc	40.24±8.70a	15.90±4.49ab	

1)WN: 孕穗期晒田, WS: 孕穗期不晒田, DN: 当地种植密度, DH: 高密度; 同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示处理间差异不显著(P>0.05, Duncan’s法)

表 6 不同水分和密度管理条件下晚季稻米加工和外观品质¹⁾

Table 6 The processing and exterior qualities of rice under different water and planting density managements in late season							%
品种	栽培措施	糙米率	精米率	整精米率	垩白率	垩白大小	垩白度
化感稻3号	WSDH	75.91±0.17ab	64.96±0.91bc	59.55±1.58ab	17.33±5.36a	45.67±6.90ab	8.43±3.48a
	WSDN	74.43±0.34b	63.85±0.26c	57.62±0.56ab	12.33±2.03a	44.81±2.61ab	5.45±0.68a
	WNDH	74.35±2.20b	63.34±1.79c	56.69±1.96b	14.67±1.33a	47.92±4.34ab	7.00±0.84a
	WNDN	76.35±1.50ab	64.97±1.31bc	57.63±2.18ab	16.33±1.76a	57.47±15.61a	8.88±1.37a
化两优78号	WSDH	79.68±0.39a	68.08±1.11abc	61.25±1.23ab	17.33±2.91a	49.28±9.57ab	8.76±2.35a
	WSDN	80.63±1.57a	69.38±1.34ab	62.00±1.52ab	14.00±2.65a	29.99±8.59b	4.65±1.82a
	WNDH	79.42±0.34ab	70.22±1.14a	62.05±0.40ab	16.33±2.60a	46.39±4.73ab	7.55±1.26a
	WNDN	78.45±0.58ab	67.46±0.72abc	61.59±0.95ab	16.33±5.70a	31.55±2.86b	5.37±2.01a
百香占	WSDH	78.40±0.86ab	68.13±0.54abc	61.59±1.21ab	9.33±5.36a	42.50±4.21ab	4.35±2.84a
	WSDN	77.71±0.28ab	63.93±3.18c	58.59±3.99ab	8.67±5.67a	51.39±8.61ab	3.48±1.68a
	WNDH	80.28±3.14a	66.31±1.16abc	60.76±1.12ab	7.00±2.89a	50.33±8.05ab	3.98±2.06a
	WNDN	80.52±2.74a	69.45±2.06ab	62.80±1.68ab	9.00±1.00a	40.36±2.52ab	3.59±0.22a

1)WN: 孕穗期晒田, WS: 孕穗期不晒田, DN: 当地种植密度, DH: 高密度; 同列数据后凡是有一个相同小写字母者, 表示处理间差异不显著($P>0.05$, Duncan's 法)

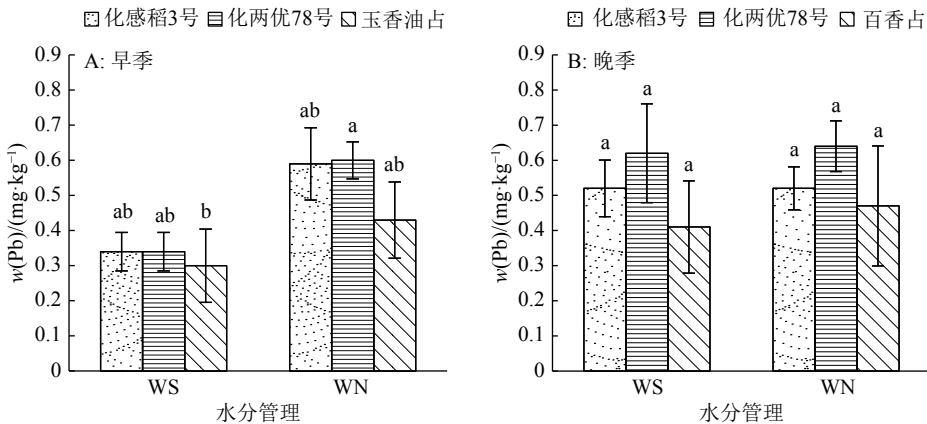
2.3.3 不同水稻品种对稻米 Pb 含量的影响 品种不是影响稻米 Pb 含量的主要因素 (表 7)。化感水稻 Pb 含量比常规稻高 (图 3), 早、晚季稻米 Pb 含量最高的均是 ‘化两优 78 号’, 分别为 0.475 和 0.631 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Pb 含量最低的是早季的 ‘玉香油占’ (0.368 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和晚季的 ‘百香占’ (0.440 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2.4 不同水分和密度管理条件下稻米 Cd 含量的变化

2.4.1 不同水分管理条件对稻米 Cd 含量的影响 水分是影响稻米 Cd 含量的主要因素 (表 7)。由图 4 可知, 早、晚季各品种 WS 处理的稻米 Cd 含量均低于 WN 处理。早季 ‘化两优 78 号’ WS 处理的 Cd 含量显著低于 WN 处理, 两者差异达

表 7 影响稻米 Pb 和 Cd 含量的主效应分析

Table 7 The main effect analyses of factors affecting Pb and Cd contents in rice					
变异来源	自由度	P_{Pb}		P_{Cd}	
		早季	晚季	早季	晚季
水分	1	0.009	0.849	0.033	0.000
密度	1	1.000	0.755	0.400	0.483
品种	2	0.427	0.426	0.303	0.182
水分×密度	1	0.684	0.476	0.670	0.673
水分×品种	2	0.751	0.844	0.699	0.577
品种×密度	2	0.890	0.633	0.858	0.518
水分×品种×密度	2	0.152	0.763	0.988	0.822



WS: 孕穗期不晒田, WN: 孕穗期晒田; 各图中柱子上凡是有一个相同小写字母者, 表示差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

图 1 不同水分管理条件对稻米 Pb 含量的影响

Fig. 1 Effects of different water managements on Pb contents of rice

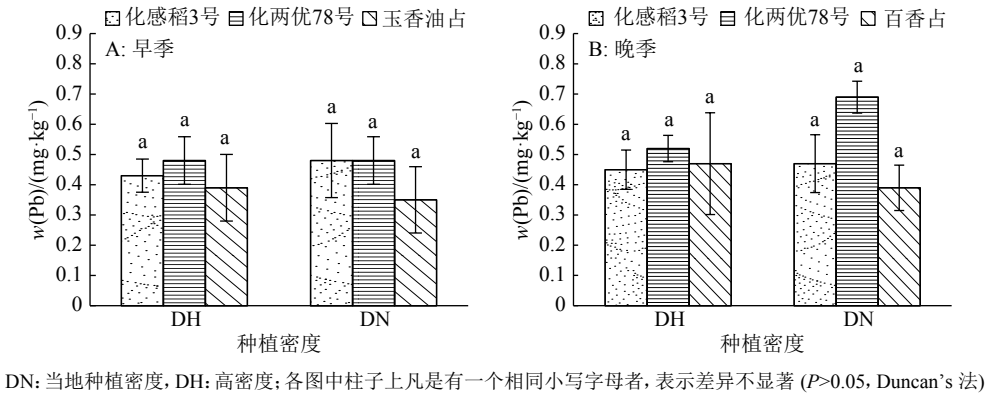


图 2 不同种植密度对稻米 Pb 含量的影响

Fig. 2 Effects of different planting densities on Pb contents of rice

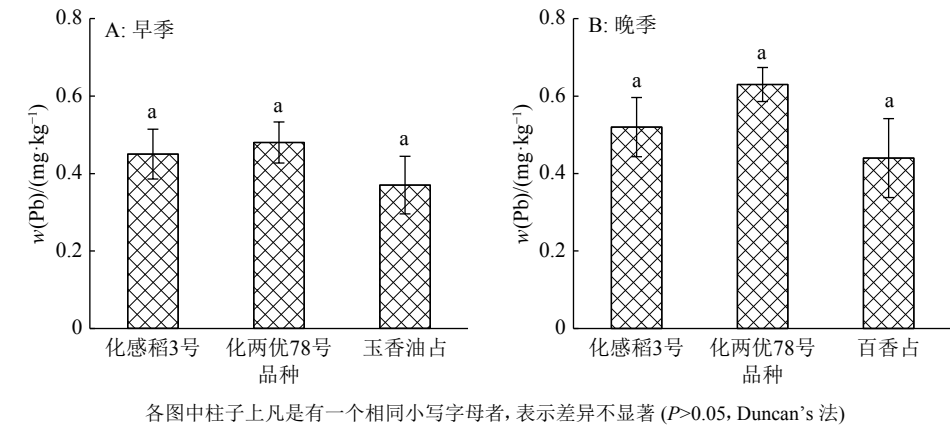


图 3 不同水稻品种对稻米 Pb 含量的影响

Fig. 3 Effects of different cultivars on Pb contents of rice

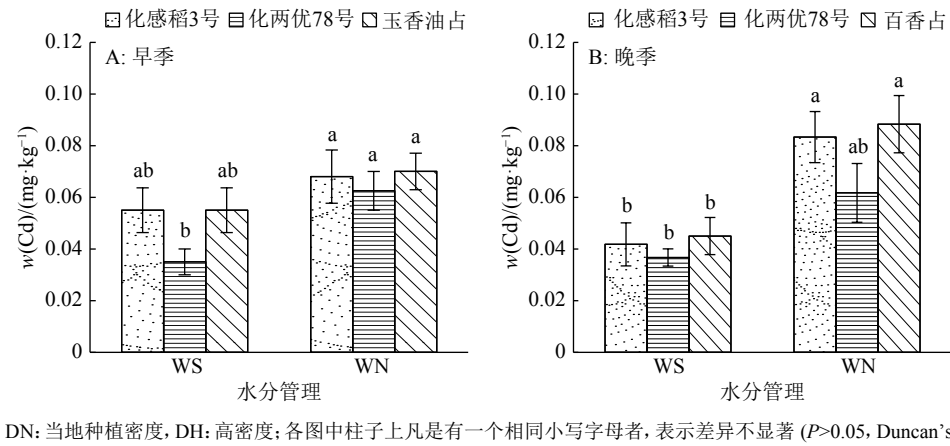


图 4 不同水分管理对稻米中 Cd 含量的影响

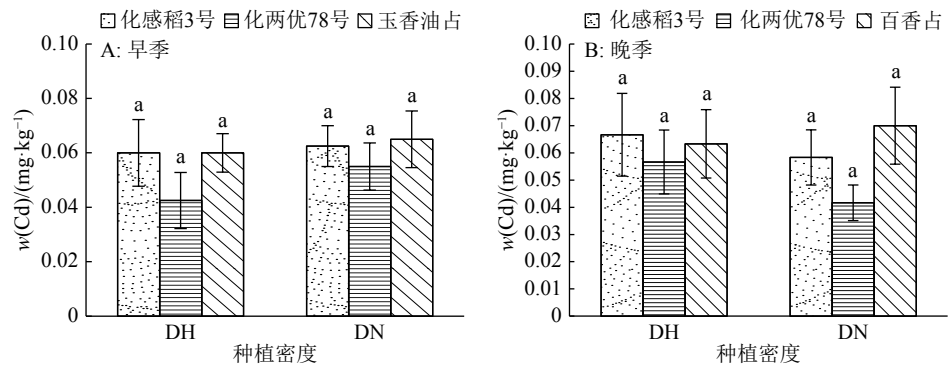
Fig. 4 Effects of different water managements on Cd contents of rice

0.028 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 晚季 ‘化感稻 3 号’ 与 ‘百香占’ WS 处理的 Cd 含量均显著低于 WN 处理, 差异分别达 0.042 和 0.043 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.4.2 不同种植密度对稻米 Cd 含量的影响 密度不是影响稻米 Cd 含量的主要因素 (表 7)。由图 5 可知, 同品种稻米早晚季的 Cd 含量在 DH 和 DN 处理间差异均不显著。早季 ‘化感稻 3 号’、‘化两优 78 号’ 和 ‘玉香油占’ DH 处理的 Cd 含

量均低于 DN 处理, 差异分别达 0.003、0.013 和 0.005 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 晚季 ‘化感稻 3 号’ 和 ‘化两优 78 号’ DH 处理的 Cd 含量均高于 DN 处理, 差异分别达 0.008 和 0.015 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, ‘百香占’ DH 处理的 Cd 含量低于 DN 处理, 差异达 0.007 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

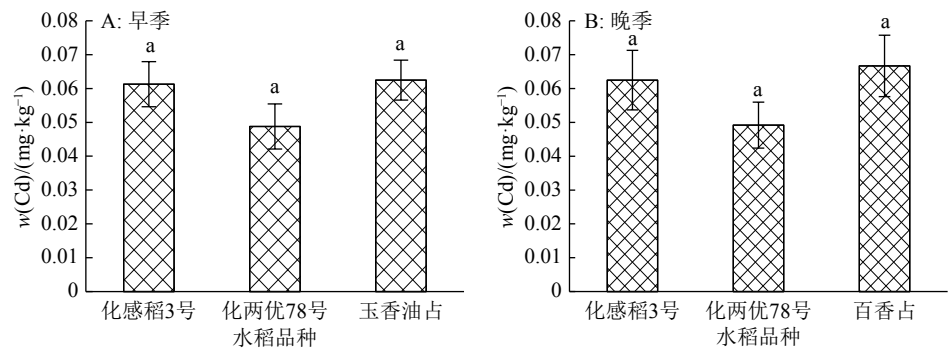
2.4.3 不同水稻品种对稻米 Cd 含量的影响 品种不是影响稻米 Cd 含量的主要因素 (表 7)。常规稻 Cd 含量高于化感水稻 (图 6), 其中含量最高的



DN: 当地种植密度, DH: 高密度; 各图中柱子上凡是有一个相同小写字母者, 表示差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

图 5 不同种植密度对稻米 Cd 含量的影响

Fig. 5 Effects of different planting densities on Cd contents of rice



DN: 当地种植密度, DH: 高密度; 各图中柱子上凡是有一个相同小写字母者, 表示差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

图 6 水稻品种对稻米 Cd 含量的影响

Fig. 6 Effects of different cultivars on Cd contents of rice

是早季的‘玉香油占’ ($0.063\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和晚季的‘百香占’ ($0.067\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。Cd 含量最低的是‘化两优 78 号’, 早季和晚季均为 $0.049\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3 讨论与结论

3.1 水分、密度和品种对水稻产量的影响

水分、密度和品种是影响水稻产量的重要因素。Islam 等^[16]研究发现提高种植密度能够增加水稻的有效穗数, 达到增产的效果。Lv 等^[17]认为湿润灌溉会降低有效穗数, 从而降低水稻的产量。姜元华等^[18]研究显示杂交粳稻的产量高于杂交籼稻。本研究结果与前人类似, 提高密度能够增加水稻的有效穗数但降低了每穗粒数, WS 能够降低千粒质量, 在不同水分和种植密度条件下, 各处理水稻的产量差异没有达到显著水平, 差异主要表现在品种间。

3.2 水分、密度和品种对稻米品质的影响

稻米品质与栽培条件存在复杂的互作关系, 水分、密度以及品种均会在不同程度上影响稻米的品质。吕银斐等^[19]研究发现干湿交替灌溉能够提高稻米的精米率和整精米率, 降低垩白率和垩白度。龙文飞等^[20]认为提高种植密度可以减小稻米的垩白

率, 但垩白度有所增加。马鹏等^[21]对 15 个水稻品种进行米质分析, 发现糙米率和精米率在品种间有很大变幅。本研究结果与前人类似, 提高种植密度能够增加化感水稻的垩白度、垩白率和垩白大小, 但与常规密度处理相比差异并不显著。在 WN 处理中, ‘化感稻 3 号’的糙米率、精米率和整精米率显著低于‘玉香油占’, 在 WS 处理中 2 个品种的稻米品质差异不显著, 这说明稻米品质受品种影响, 但这种影响可通过增加田间水分得到改善。

3.3 水分、密度和品种对稻米 Pb 和 Cd 含量的影响

水稻根系从土壤中吸收重金属, 并在体内进一步转运, 积累到地上部, 这个过程受水稻品种和外部环境的影响^[22]。淹水能够改变土壤中 Cd 的有效性, 从而降低水稻籽粒 Cd 含量^[23]。刘昭兵等^[24]对 5 种水分管理方式试验后发现, 全生育期淹水情况下, 糙米 Cd 含量最低。朱海江^[25]采用营养液培养试验和全生育期温室土培试验发现旱作处理的水稻籽粒 Pb 含量普遍高于常规水分管理, 本研究也得了类似的结论, 各品种 WS 处理的稻米 Pb、Cd 含量都有所降低。目前有关种植密度与稻米重金属吸收关系的研究鲜有报道, 在本研究中提高种植密度对

稻米中 Pb 和 Cd 含量的影响不显著。王琳等^[26]研究发现不同品种的水稻对重金属的富集能力显著不同,李波等^[27]研究发现 27 个水稻品种 Cd 含量的最高值与最低值相差 13 倍,Pb 含量相差 22 倍。本研究也证实了这一结论,‘化两优 78 号’对 Pb 的吸收大于常规稻,对 Cd 的吸收小于常规稻,但不同品种对相同重金属的吸收差异没有达到显著水平,这可能与本研究选择的试验材料以及材料种类较少有关。

另外,试验田 Pb 和 Cd 含量均没超标,稻米籽粒中 Cd 含量正常,但 Pb 含量超出了中华人民共和国国家标准 GB2762—2017^[28]食品中污染物限量规定的稻米中 Pb 和 Cd 含量的标准值: $w(\text{Pb}) \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $w(\text{Cd}) \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这可能与水稻对重金属的富集能力有关,还需要进一步深入的探索。

3.4 结论

WS 处理能够降低化感水稻对 Pb 和 Cd 的吸收,其中‘化两优 78 号’Cd 含量最低。WS 处理配合 DH 处理对化感水稻的产量和品质影响不显著,在 Cd 含量较高的土壤中种植化感水稻可以降低籽粒中 Cd 含量超标的风险。

参考文献:

[1] 胡群,夏敏,张洪程,等.氮肥运筹对钵苗机插优质食味水稻产量及品质的影响[J].作物学报,2017,43(3): 420-431.

[2] WANG L, LIU D, PU H, et al. Use of hyperspectral imaging to discriminate the variety and quality of rice[J]. Food Anal Methods, 2015, 8(2): 515-523.

[3] AHMAD U, ALFARO L, YEBOAH-AWUDZI M, et al. Influence of milling intensity and storage temperature on the quality of Catahoula rice (*Oryza sativa* L.)[J]. LWT-Food Sci Technol, 2017, 75: 386-392.

[4] 方申超,毛慧.稻米中铅、镉含量与稻田土壤质量的关系[J].芜湖职业技术学院学报,2016,18(3): 59-62.

[5] MEHARG A A, NORTON G, DEACON C, et al. Variation in rice cadmium related to human exposure[J]. Environ Sci Technol, 2013, 47(11): 5613-5618.

[6] 陈明,王道尚,张丙珍.综合防控重金属污染保障群众生命安全:2009 年典型重金属污染事件解析[J].环境保护,2010(3): 49-51.

[7] 陈善荣,陈明.广东省北江韶关段镉污染事件案例分析[J].环境教育,2008(1): 49-53.

[8] 李贵,吴竞仑,王一专,等.栽插密度和水层对水稻化感品种抑草作用的影响[J].上海交通大学学报(农业科学版),2007,25(6): 561-565.

[9] LIMURA K. Heavy metal problems in paddy soils[M]//KITAGISHI K, YAMANE I. Heavy metal pollution in soils of Japan. Tokyo: Japan Scientific Societies Press, 1981.

[10] HUP P, HUANG J, OUYANG Y, et al. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars[J]. Environ Geochem Health, 2013, 35(6): 767-778.

[11] 张苏波.不同水稻品种吸收重金属特点研究[D].扬州:扬州大学,2016.

[12] 中华人民共和国国家标准.土壤环境质量标准:GB 15618—1995[S].北京:中国标准出版社,1995.

[13] 中华人民共和国国家标准.优质稻谷:GB/T 17891—1999[S].北京:中国标准出版社,1999.

[14] 中华人民共和国国家标准.食品中铅的测定:GB 5009.12—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.

[15] 中华人民共和国国家标准.食品中镉的测定:GB 5009.15—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.

[16] ISLAM M S, RASHID M M, MONDAL M K, et al. Effect of planting density on the performance of hybrid rice (*Oryza sativa* L.) under waterlogged condition[J]. Agri-culturists, 2013, 11(2): 109-113.

[17] LV Y F, REN Y F, LIU D, et al. Effects of different water managements on yield and cadmium accumulation in rice[J]. Adv Mater Res, 2015, 1073/1076: 248-252.

[18] 姜元华,张洪程,赵可,等.长江下游地区不同类型水稻品种产量及其构成因素特征的研究[J].中国水稻科学,2014,28(6): 621-631.

[19] 吕银斐,任艳芳,刘冬,等.不同水分管理方式对水稻生长、产量及品质的影响[J].天津农业科学,2016,22(1): 106-110.

[20] 龙文飞,傅志强,钟娟.节水灌溉条件下施肥与密度对双季晚稻‘丰源优 299’产量和稻米品质的影响[J].中国农学通报,2016,32(9): 1-5.

[21] 马鹏,陶诗顺,吴霞,等.四川盆地不同水稻品种稻米品质分析鉴定[J].安徽农业科学,2014,42(28): 9936-9937,9941.

[22] 仲晓春,陈京都,郝心宁.水稻作物对重金属镉的积累、耐性机理以及栽培调控措施进展[J].中国农学通报,2015,31(36): 1-5.

[23] 胡坤,喻华,冯文强,等.中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响[J].生态学报,2011,31(8): 2341-2348.

[24] 刘昭兵,纪雄辉,彭华,等.水分管理模式对水稻吸收累积镉的影响及其作用机理[J].应用生态学报,2010,21(4): 908-914.

[25] 朱海江.水稻对重金属铅的吸收积累特征及其农艺调控研究[D].杭州:浙江大学,2004.

[26] 王琳,杜瑞英,王旭,等.不同品种稻米重金属富集差异研究[J].热带农业科学,2015,35(6): 56-61,81.

[27] 李波,杜瑞英,文典,等.广东省主栽水稻品种稻米重金属含量差异研究[J].热带农业科学,2014,34(5): 5-10.

[28] 中华人民共和国国家标准.食品中污染物限量:GB 2762—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

【责任编辑 李庆玲】