

利用 AMMI 模型分析稻米镉含量的 基因型与环境互作效应

温 娜^{1,2}, 王景安^{1*}, 刘仲齐^{1,2*}

(1.天津市动植物抗性重点实验室 天津师范大学生命科学学院, 天津 300387; 2.农业部环境保护科研监测所生态毒理与环境修复研究中心, 天津 300191)

摘 要:以湖南推广种植的 10 个早稻和 8 个晚稻品种为基因型材料,在安全区、轻度度和轻度污染区选择 4 个试验点进行试验,通过 AMMI 模型研究基因型与环境互作效应对稻米 Cd 积累量及其稳定性的影响。结果表明:土壤 Cd 污染程度和生长季节对稻米的 Cd 积累量均有显著影响,污染区晚稻品种的稻米 Cd 超标率明显高于早稻;基因型对早稻稻米的 Cd 含量具有极显著影响,因而可通过选择种植稻米含量低且遗传稳定性好的低积累品种来降低稻米的 Cd 积累量;环境对晚稻稻米 Cd 积累量的影响占主导效应,可通过分析品种地点的互作效应来确定低积累品种的适宜推广区域。稳定性参数 D_i 值的计算明晰了稻米 Cd 积累量的稳定性,对于正确指导低积累品种的推广应用具有重要意义。

关键词:稻米;Cd;基因与环境;AMMI 模型; D_i 值

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0817-07 doi:10.11654/jaes.2015.05.001

Analysis of Genotypic and Environmental Effects on Cadmium Content in Rice by AMMI Model

WEN Na^{1,2}, WANG Jing-an^{1*}, LIU Zhong-qi^{1,2*}

(1.Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, College of Life Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Centre for Research in Eco-toxicology and Environmental Remediation, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Cadmium (Cd) accumulation in rice is greatly influenced by genotypes and environmental factors. In this study, ten early and eight late rice cultivars, widely planted in Hunan Province, were selected as genotype materials and were planted at four experimental sites in each of safe, and slightly and lowly contaminated areas. The AMMI model was used to analyze genotype and environment interactive effects on Cd content and stability in rice. Soil Cd pollution degree and plant growth season had significant impacts on Cd accumulation in rice. The ratios of rice Cd to the official maximum allowable limit in late rice were significantly higher than those in early rice cultivars in the Cd contaminated sites. Cadmium content in early rice was significantly influenced by genotypes. Therefore, varieties with low and stable Cd content in rice grain could be chosen to reduce Cd accumulation in early rice. However, environmental factors had dominant effects on cadmium accumulation in late rice. It would be critical to analyze the genotype and environment interaction to determine appropriate areas for late rice cultivars with low Cd accumulation. The stability of Cd accumulation in rice was determined by D_i values, which is important for guiding extension of rice cultivars with low Cd accumulation.

Keywords: rice; cadmium; genotype; environment; AMMI model; D_i value

收稿日期:2015-01-06

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(农业部环境保护科研监测所)资助项目(2014-szjj-lzq);2014 年农业生态环境保护项目(2014-072);2014 年中国农科院科技创新工程项目(2014-cxgc-lzq)

作者简介:温 娜(1987—),女,河北卢龙人,硕士研究生,主要从事植物营养学研究。E-mail:wennuan1208@126.com

* 通信作者:王景安 E-mail:jingawang899@126.com;刘仲齐 E-mail:liuzhongqi508@163.com

镉(Cd)是环境中迁移性很强的重金属,可通过作物进入食物链从而危害人体健康。水稻是我国第一大粮食作物,也是Cd积累能力最强的大宗谷类作物,并且从水稻生长发育状态和稻米外观无法判断在其体内的Cd积累量,表现出较强的隐蔽性和危险性^[1],因而Cd污染农田中稻米的安全生产问题受到普遍关注。相关调查发现,目前我国Cd污染耕地达 $1.33 \times 10^5 \text{ hm}^2$,涉及11个省市的25个地区^[2],而轻、中度的Cd污染土壤占很大比重,能否在这些土壤上生产质量安全的稻米成为当前亟待解决的问题。通过重金属低积累品种的筛选来降低作物对重金属的吸收积累以减少籽粒的重金属含量,被普遍认为是目前可行的有效途径^[3],并且已有试验表明很多作物存在重金属低积累品种,如水稻^[4-5]、玉米^[6]、番茄^[7]。

许多研究表明,水稻对重金属的吸收和积累存在基因型间的差异,同时也受环境影响,即基因型与环境因子共同影响籽粒重金属含量^[8-10]。但目前有关水稻重金属基因型与环境互作效应的机理尚不清楚,而且相关的研究系统性也较差,如只针对同一区域的不同品种、不同地区的同一品种或少数几个品种展开探究,很难准确反映水稻基因型、环境对其积累重金属特性的影响。本文采用AMMI模型(主效可加互作可乘模型),研究不同水稻基因型与不同环境区域互作对稻米Cd积累量的影响,能更有效地展现品种与环境互作的复杂生物现象,从而为Cd低积累稳定品种的筛选工作奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选择近年来湖南两季稻区大面积种植的水稻新品种18个,其中:早稻品种10个,包括湘早粳24号、湘早粳42号、湘早粳45号、T优705、株两优819、湘早粳143号、中嘉早17、湘早粳6号、湘早粳11号、嘉249等;晚稻品种8个,包括黄华占、丰源优263、新优188、丰源优2297、湘晚粳13号、丰源优299、湘晚粳12号、丰源优272。

1.2 试验方法

根据土壤Cd含量,在湖南省湘江流域选择4个试验点,分别代表安全区(土壤Cd含量 $<0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、风险区($\text{Cd} \approx 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、轻微污染区(土壤Cd含量为 $0.3 \sim 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、轻度污染区(土壤Cd含量为 $0.6 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),采用随机区组设计,小区面积为 10 m^2 ,3次重复。于2013年在相同试验田先后进行早晚

两季水稻的田间试验,水稻收获时每小区随机取4株,挖取带根土壤1~2 kg,对水稻根际土壤和稻米中Cd的含量进行检测。

1.3 测定方法

土样消煮:将待测土壤样品自然风干,再用四分法将土样磨碎,100目过筛。准确称取0.25 g土样置于消煮管中,加10 mL HNO_3 +4 mL HF浸泡过夜,之后用消解仪ED 54于 120°C 下加热0.5 h、 150°C 下加热3 h,赶酸,定容。

籽粒消煮:准确称取0.5 g籽粒于消煮管中,加入7 mL HNO_3 浸泡过夜,用消解仪ED 54于 110°C 下加热2.5 h,待其冷却后加入1 mL H_2O_2 ,继续加热1.5 h,赶酸,定容。

所有样品采用石墨炉原子吸收光谱法测定。

1.4 统计方法

1.4.1 AMMI模型统计分析

AMMI模型又称主效可加互作可乘模型^[11-12],其特点是将方差分析与主成分分析结合在一起,模型表达如下:

$$y_{ijk} = u + \alpha_i + \beta_j + \sum_{s=1}^N \lambda_s r_{is} \delta_{js} + \rho_{ij} + \xi_{ijk}$$

式中: y_{ijk} 表示第*i*个基因型在第*j*个试点环境的第*k*次重复的Cd含量; u 为总体Cd含量平均值; α_i 是第*i*个基因型的主效应; β_j 是第*j*个试点环境的主效应; λ_s 是第*s*个交互效应主成分轴(IPCA)的特征值; r_{is} 是第*s*个主成分的基因型得分; δ_{js} 是第*s*个主成分的环境得分; N 是模型主成分分析中主成分因子轴的总个数; ρ_{ij} 为残差; ξ_{ijk} 为试验误差。

1.4.2 稳定性参数计算

$$Di = \sqrt{\sum_{s=1}^N \lambda_{is}^2}$$

式中: N 为显著的IPCA个数; λ_{is} 是第*i*个基因型在第*s*个IPCA上的得分。

Di 值越小,品种越稳定, Di 值越大表示试点对品种差异的判别力越强^[13]。

2 结果与分析

2.1 不同地点和季节稻米Cd含量的变化

由表1可以看出,早稻地点S1、S2的土壤Cd含量在安全范围内,而S3、S4土壤Cd含量分别达到轻微污染和轻度污染的程度。相比之下,晚稻土壤中的Cd污染程度普遍提高,只有S1的土壤Cd含量依然保持在安全范围之内。这说明双季稻区的农田土壤

Cd 含量不是恒定不变的,会随着生长季节不同出现较大的波动。

表 1 各试点早、晚季水稻土壤 Cd 含量(pH 5.2~5.5)
Table 1 Content of Cd in soils from different sites grown with early and late rice(pH 5.2~5.5)

水稻品种 Rice variety	土壤 Cd 含量 Soil Cd content/mg·kg ⁻¹			
	S1	S2	S3	S4
早稻 Early rice	0.117	0.180	0.466	0.788
晚稻 Late rice	0.217	0.301	0.733	0.958

注:早稻试验区土壤 Cd 含量为收获期 40 株水稻植株根际土中 Cd 含量的平均值;晚稻试验区土壤 Cd 含量为新优 188 和丰源优 272 收获期 8 株水稻植株根际土中 Cd 含量的平均值。

根据食品安全国家标准(GB 2762—2012)和土壤环境质量标准(GB 15618—1995),稻米和农田土壤中 Cd 的限量指标分别为 0.2 mg·kg⁻¹ 和 0.3 mg·kg⁻¹。由表 2 可见,在土壤 Cd 含量小于 0.3 mg·kg⁻¹ 的 2 个试验点 S1 和 S2,供试的 10 个早稻品种中,稻米 Cd 含量超标的分别占 10%和 30%,但在轻微污染区 S3,稻米 Cd 超标的品种仅占 10%,轻度污染区中的稻米 Cd 超标的品种则高达 70%,但 4 个试验点的稻米 Cd 含量均未超过 FAO/WHO 规定的稻米 Cd 最大标准限量(WLs)0.4 mg·kg⁻¹。晚季稻的 Cd 超标率明显高于早稻(表 2),即使在安全区(S1),所有品种的稻米 Cd 含量全部超过国家标准 0.2 mg·kg⁻¹,其中低于 FAO/WHO 规定的水稻品种有 5 个,占 62.5%;在轻微污染区(S2),稻米 Cd 含量低于 0.4 mg·kg⁻¹ 的品种有 6 个,占 75.0%;而在轻度污染区(S3、S4),稻米 Cd 含量比国家限量标准高 2.7~11.5 倍。

表 2 不同地点与季节对稻米 Cd 含量的影响
Table 2 Effects of different sites and rice varieties on rice Cd content

品种 Variety	地点 Site	土壤 Cd 含量				稻米 Cd 超标率 Percentage of rice Cd exceeding the limit/%	
		最小值 Min/ mg·kg ⁻¹	最大值 Max/ mg·kg ⁻¹	标准差 SD/ mg·kg ⁻¹	变异系数 CV/%	a	b
早稻 Early rice	S1	0.083	0.155	0.019	16.24	10.00	0.00
	S2	0.164	0.203	0.010	5.56	30.00	0.00
	S3	0.340	0.606	0.092	19.74	10.00	0.00
	S4	0.430	1.252	0.266	33.76	70.00	0.00
晚稻 Late rice	S1	0.151	0.315	0.064	29.49	100.00	37.50
	S2	0.271	0.316	0.024	7.97	100.00	25.00
	S3	0.681	0.840	0.093	12.69	100.00	100.00
	S4	0.767	1.120	0.124	12.94	100.00	100.00

注:a 稻米 Cd 超标率为稻米 Cd 含量超过国家标准(0.2 mg·kg⁻¹)的品种数占总品种数的百分比;b 稻米 Cd 超标率为稻米 Cd 含量超过 FAO/WHO 标准(0.4 mg·kg⁻¹)的品种数占总品种数的百分比。

2.2 稻米 Cd 积累能力的 AMMI 模型分析

AMMI 模型分析结果表明,基因型、地点及二者的互作对稻米 Cd 积累量均有明显影响,且它们相对作用的大小因水稻生长季节的不同而有明显的差异(表 3)。对于早稻而言,稻米的 Cd 积累量在不同品种和地点间均达到极显著水平($P<0.01$),且基因型和地点对稻米 Cd 含量的变异平方和分别占处理平方和的 46.74%、34.17%,表明品种的控制强于环境因子的影响;对于晚稻而言,环境对稻米 Cd 含量的影响最大,基因型和地点的交互作用对稻米 Cd 积累的影响大于基因型本身的影响。

2.3 稻米 Cd 积累量的基因型与环境变异分析

双标图能直观地反应品种与地点的交互作用,是分析 G×E 的有效工具。AMMI1 双标图横轴表示稻米的平均 Cd 积累量,纵轴表示品种与环境的交互效应(IPCA1),在水平方向上,品种和地点的分散程度能够表明相应的主效应。在垂直方向 IPCA1 绝对值越

表 3 水稻籽粒 Cd 积累量的 AMMI 分析结果
Table 3 Results of AMMI analysis for Cd accumulation in rice grain

变异来源 Source of variation	Cd 积累量 Cd accumulation/mg·kg ⁻¹					
	早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
	df	SS	p	df	SS	p
基因 Genotype	9	0.409 4	0.000 1	7	2.093 1	0.000 1
环境 Environment	3	0.299 3	0.000 1	3	17.174 6	0.000 1
交互作用 Interaction	27	0.167 1	0.202 6	21	3.542 5	0.000 1
IPCA1	11	0.113 8	0.000 1	9	2.5109	0.000 1
IPCA2	9	0.039 9	0.024 1	7	0.146 4	0.000 3
残差 Residual	7	0.013 5		5	0.885 2	
误差 Error	80	0.388 7		64	2.055 5	

小,表明品种与环境互作效应越小,即品种越稳定。此外,以 $IPCA1=0$ 作水平线,品种与地点在同一侧的表明它们有正的交互作用,反之则为负的交互作用。

从图 1(A)可以看出,对于早稻,品种在水平方向的分散程度要大于地点间的分散程度,说明品种间的变异要大于地点间的变异。 g_4 (T 优 705)的 Cd 含量在地点 S1、S3 有负向交互作用,即 T 优 705 在这两个地点种植会相应减少稻米 Cd 积累量,但其 Cd 含量仍远高于其他品种,表明 T 优 705 为 Cd 高积累品种。 g_5 (株两优 819)的 Cd 含量在地点 S1、S3 有正向交互作用,而它的 Cd 积累量仍小于其他品种,表明株两优 819 为 Cd 低积累品种。 g_6 (湘早籼 143)、 g_7 (中嘉早 17)、 g_9 (湘早籼 11 号)的平均 Cd 含量相近,但 $IPCA1$ 值不同,表明这 3 个品种在各地表现有差异,其中中嘉早 17 的稳定性较好。

对于晚稻,地点在水平方向的分散程度要大于品种的分散程度,表明地点间的变异要大于品种间的变异。从图 1(B)可以看出, g_{12} (丰源优 263)的 Cd 含量在地点 S1、S2 有负交互作用,而它的 Cd 含量最高,表明丰源优 263 为 Cd 高积累品种。相应的, g_{14} (丰源优 2297)为 Cd 低积累品种。

图 2 给出了品种、地点的 $IPCA1$ 和 $IPCA2$ 的双标图,图中越接近坐标原点的品种越稳定。此外,品种在地点与原点连线上的垂直投影到原点的距离表示这个品种与该地点交互作用的大小,连线越长交互作用越大,反之交互作用越小。如果投影落在连线的反向延长线上则表示交互作用为负向。

由图 2(A)可以看出,早稻品种 g_1 (湘早籼 24 号)、 g_7 (中嘉早 17)、 g_8 (湘早籼 6 号)、 g_9 (湘早籼 11

号)离坐标原点较近,说明这 4 个品种的稻米 Cd 含量较稳定;而 g_4 (T 优 705)和 g_6 (湘早籼 143)在地点 S2 的稻米 Cd 积累量有较大的正向交互作用,表明这些品种在污染风险区种植时,稻米中的 Cd 含量会显著增加,超过食品安全限量标准的风险较大。

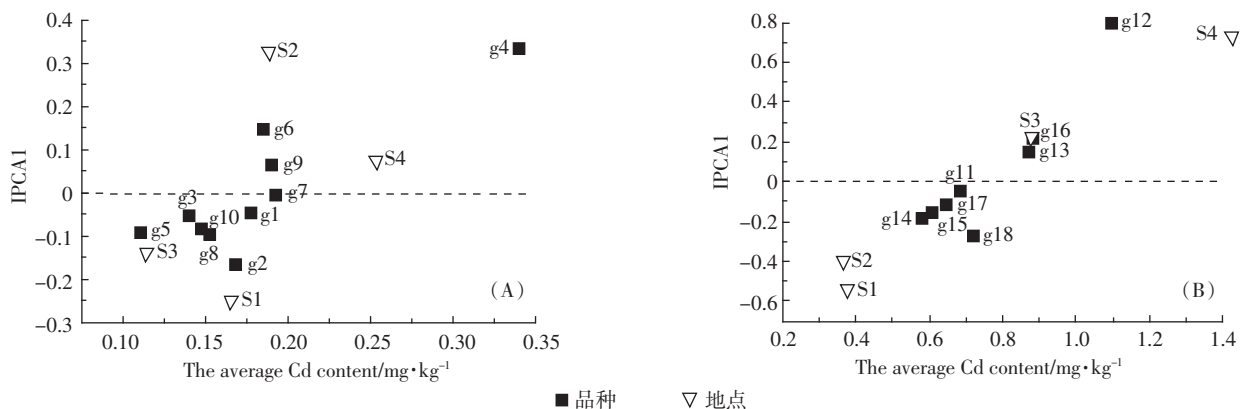
由图 2(B)可以看出,晚稻品种 g_{12} (丰源优 263)的稻米 Cd 积累量在试点 S3 和 S4 表现出正向交互作用, g_{15} (湘晚籼 13 号)在试点 S3、 g_{11} (黄华占)在试点 S4 分别表现出较大的正向交互作用,说明这些品种在轻度污染区种植会显著提高稻米 Cd 含量。

2.4 双季稻米 Cd 积累的稳定性

为定量描述双季水稻品种的稳定性,利用 AMMI 模型 2 个显著的主成分轴的 $IPCA$ 值分别计算出各个品种的稳定性参数 D_i 值(表 4)。

早稻品种的稳定性依次为:湘早籼 24>中嘉早 17>湘早籼 11>湘早籼 6>株两优 819>湘早籼 45>湘早籼 42>嘉 249>湘早籼 143>T 优 705(表 4)。综合各品种的 Cd 积累量,可以认为:湘早籼 24、中嘉早 17、湘早籼 11、湘早籼 6 和株两优 819 属于稻米中 Cd 积累量较低且遗传稳定性好的基因型,适合于轻度度和轻度污染区大面积种植;T 优 705 的稻米 Cd 积累量较高,且环境变异大,属于环境依赖型的高积累品种,不适合在轻度度和轻度污染区种植;湘早籼 45、湘早籼 42、嘉 249 和湘早籼 143 的稻米 Cd 积累量较低,但遗传稳定性较差,需要根据它们与各试验点互作效应确定适宜的种植范围。

晚稻各品种的稳定性依次为丰源优 299>丰源优 2297>新优 188>湘晚籼 12>丰源优 272>黄华占>湘晚籼 13>丰源优 263(表 5)。只有丰源优 2297 在 S1 和



$g_1 \sim g_{10}$ 分别代表早稻:湘早籼 24、湘早籼 42、湘早籼 45、T 优 705、株两优 819、湘早籼 143、中嘉早 17、湘早籼 6、湘早籼 11、嘉 249;
 $g_{11} \sim g_{18}$ 分别代表晚稻:黄华占、丰源优 263、新优 188、丰源优 2297、湘晚籼 13、丰源优 299、湘晚籼 12、丰源优 272。下同

图 1 早稻稻米 Cd 积累量(A)和晚稻稻米 Cd 积累量(B)的 AMMI1 双标图

Figure 1 AMMI1 biplot of Cd accumulation in early rice(A) and late rice(B)

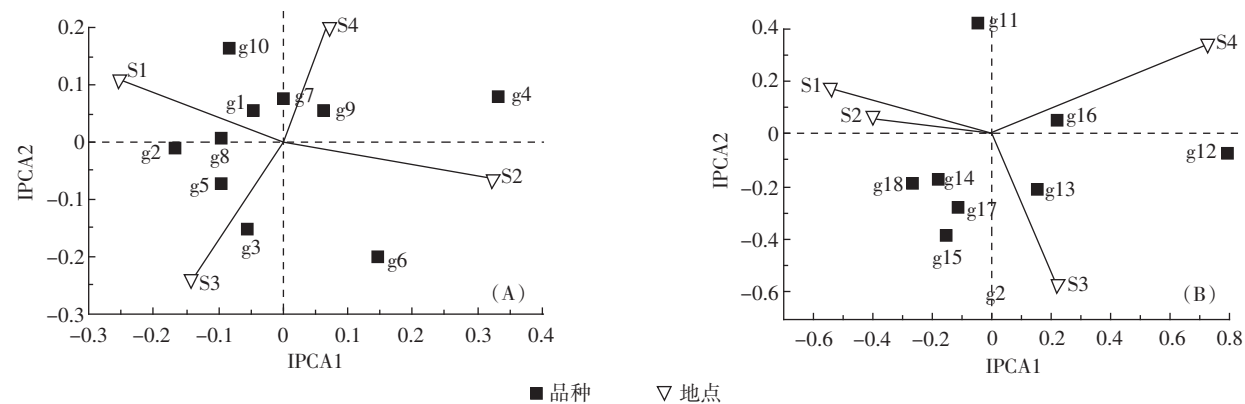


图 2 早稻稻米 Cd 积累量(A)和晚稻稻米 Cd 积累量(B)的 AMMI2 双标图
Figure 2 AMMI2 biplot of Cd accumulation in early rice(A) and late rice(B)

表 4 早稻稻米在各地的 Cd 积累量及稳定性参数

Table 4 Stability parameter of Cd accumulation in early rice grain at different sites

品种名称 Variety	Cd 含量 Cd content/mg·kg ⁻¹	IPCA1	IPCA2	Di	排序 Sequence
湘早籼 24	0.177 2±0.056 9	-0.047 4	0.056 2	0.073 5	10
湘早籼 42	0.168 0±0.045 4	-0.166 3	-0.010 7	0.166 6	4
湘早籼 45	0.139 4±0.046 4	-0.055 2	-0.153 4	0.163 0	5
T 优 705	0.339 4±0.056 8	0.332 9	0.078 9	0.342 1	1
株两优 819	0.110 6±0.040 3	-0.094 6	-0.072 5	0.119 2	6
湘早籼 143	0.184 4±0.022 0	0.147 6	-0.201 7	0.249 9	2
中嘉早 17	0.192 4±0.023 7	0.000 1	0.077 0	0.077 0	9
湘早籼 6	0.152 1±0.014 4	-0.096 3	0.006 2	0.096 5	7
湘早籼 11	0.190 2±0.016 5	0.062 8	0.055 1	0.083 5	8
嘉 249	0.147 8 ±0.009 7	-0.083 6	0.165 0	0.185 0	3

S2 的稻米 Cd 积累量相对较小且比较稳定,适宜在轻度污染区大面积推广种植;其他品种的稻米 Cd 积累量都在 0.3 mg·kg⁻¹ 以上,环境变异较大,不宜在污染农田推广种植。

3 讨论

水稻对重金属的吸收和积累在基因型间存在显著差异,这为在轻度重金属污染土壤上持续生产质量

安全稻米提供了有效可行的途径。然而,仅以土壤 Cd 总量为依据划分安全区和污染区并不能完全保证稻米 Cd 含量的安全性,并且同一区域的土壤 Cd 含量不是一成不变的,会随生长季节和水分状况等因素出现较大波动。本研究发现,即便在土壤 Cd 含量很低的安全区也有一定比例的稻米 Cd 含量超标,与彭华等^[14]的研究结果基本一致。此外,在土壤 Cd 含量达到轻度污染程度的试验点(S3),早稻稻米的 Cd 超标率

表 5 晚稻稻米在各地的 Cd 积累量及稳定性参数

Table 5 Stability parameter of Cd accumulation in late rice grain at different sites

品种名称 Variety	Cd 含量 Cd content/mg·kg ⁻¹	IPCA1	IPCA2	Di	排序 Sequence
黄华占	0.686 9±0.098 4	-0.050 3	0.417 6	0.420 6	3
丰源优 263	1.095 0±0.158 7	0.793 6	-0.074 7	0.797 1	1
新优 188	0.870 2±0.100 4	0.149 3	-0.212 5	0.259 6	6
丰源优 2297	0.580 0±0.068 3	-0.181 4	-0.175 7	0.252 6	7
湘晚籼 13	0.608 9±0.117 5	-0.152 5	-0.386 5	0.415 5	2
丰源优 299	0.881 8±0.142 8	0.218 2	0.051 0	0.224 1	8
湘晚籼 12	0.648 4±0.162 2	-0.113 1	-0.277 6	0.299 8	5
丰源优 272	0.720 3±0.159 8	-0.271 0	-0.189 4	0.330 6	4

仅为10%,说明其他因素,如土壤类型^[15]、pH^[16]、Cd有效态^[17]等对稻米Cd积累也有很大影响。而相同试点,晚稻土壤Cd含量较早稻明显提升,可能是因为晚稻成熟期间,土壤表层水分的蒸发量大于降水量,在毛管力的作用下,使多雨期因淋溶下沉的Cd及成土母质中的Cd^[18-19]迁移到土壤表层,造成了土壤Cd含量的升高。晚稻的Cd积累量在安全区(S1)或风险区(S2)均全部超过国家标准,其稻米的Cd超标情况高于早稻,可能是因为:一方面晚稻籽粒对Cd的富集能力强于早稻^[20];另一方面,生长季节等环境条件的改变对稻米Cd积累量有较大影响,如晚稻生育期延长利于积累更多的Cd。此外,早稻根际的分泌物^[21]、晒田对水分的影响^[22]、肥料的施用^[23]都使得土壤Cd的生物活性大幅提升,致使晚稻稻米Cd含量超标严重。

AMMI分析结果表明,基因型和环境对早稻稻米Cd含量均有极显著影响,且基因型效应占主导地位。如株两优819在各试点的平均稻米Cd积累量为 $0.1106\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,T优705为 $0.3394\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其富集Cd的能力差异达3倍以上,与周金林等^[24]研究结果基本一致,且按我国稻米重金属Cd含量 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的限量标准,株两优819稻米Cd含量达标,而T优705则明显超标,进一步证明了通过筛选Cd低积累水稻品种从而降低稻米Cd含量的可行性。这种基因型间的差异可能是由水稻对Cd的吸收、积累受根系对Cd的吸收、转运,木质部的装载及韧皮部的输入等方面的影响造成的。有研究发现,木质部中Cd含量与籽粒中的Cd含量呈极显著正相关,且低积累品种木质部汁液中Cd的含量及Cd在导管中的运输速率均低于高积累品种^[25]。此外,Tanaka等^[26]用褐飞虱探针法研究发现,籽粒中90%的Cd由韧皮部转运而来,并且低积累水稻品种韧皮部的Cd浓度要显著低于其他品种。

对于晚稻而言,试点环境对稻米Cd含量的影响超过了遗传主效应,表明品种仅能对稻米Cd含量起部分作用,起主导作用的仍是土壤环境。这种差异可能是因为早稻和晚稻的遗传背景不同所致。有研究认为,在大田稻米Cd含量平均较低的地区,品种的选择对籽粒Cd积累量的影响大,而在籽粒Cd含量平均较高的地区,品种的选择作用较小^[22]。因此,在进行稻米的安全生产时,不但要考虑品种的差异,还要考虑地点环境的差别,做到品种、地点的最适组合以减少稻米的Cd积累量,如本研究中,选择品种与其具有负向交互作用的地点组合可有效降低稻米的

Cd含量。当然,也可通过改变农艺措施等方式降低土壤Cd的有效性或从减少水稻对Cd的吸收等方面入手^[27-28],减少稻米的Cd积累量。

品种的稳定性对于稻米的广泛适应性十分重要,选择稻米中Cd积累量低且在地点间稳定性好的品种对于稻米的安全生产具有重要意义。本研究发现,早稻品种株两优819和湘早籼6号、晚稻品种丰源优2297具有稻米Cd含量低且稳定好的优点,在轻度污染区推广种植,有助于降低稻米Cd含量超标的风险。

4 结论

(1)土壤Cd含量和生长季节对稻米Cd积累量均有明显影响,晚稻品种的稻米Cd超标情况较早稻更为严重。

(2)基因型对早稻稻米Cd积累量的影响占主导地位;地点环境对晚稻稻米Cd积累量的影响占主导地位。

(3)筛选稻米Cd含量低且遗传稳定性好的低积累品种在轻度污染区推广种植,能够有效改善稻米的Cd污染状况。

参考文献:

- [1] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biomaterials*, 2004, 17(5): 549-553.
- [2] 应兴华,金连登,徐霞,等.我国稻米质量安全现状及发展对策研究[J].农产品质量与安全,2010(6):40-43.
YING Xing-hua, JIN Lian-deng, XU Xia, et al. Research on the security situation and development countermeasure of rice quality in China[J]. *Agricultural Quality and Standards*, 2010(6):40-43.
- [3] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seeding stage[J]. *Field Crops Research*, 2002, 77(213): 93-98.
- [4] 徐燕玲,陈能场,徐胜光,等.低镉累积水稻品种的筛选方法研究:品种与类型[J].农业环境科学学报,2009,28(7):1246-1352.
XU Yan-ling, CHEN Neng-chang, XU Sheng-guang, et al. Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium: Cultivars versus type [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7):1246-1352.
- [5] Arao T, Ae N. Genotypic variation in cadmium levels of rice grain[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2003, 49(4):473-479.
- [6] Florijn P J, Beusichem M L. Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines[J]. *Plant and Soil*, 1993, 150(1):25-32.
- [7] 朱芳,方炜,杨中艺.番茄吸收和积累Cd能力的品种间差异[J].生态学报,2006,26(12):4071-4075.

- ZHU Fang, FANG Wei, YANG Zhong-yi. Variations of Cd absorption and accumulation of 36 *Lycopersicon esculentum* cultivars[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12):4071-4075.
- [8] Moral R, Gilkes R J, Moreno-Caselles J. A comparison of extractants for heavy metals in contaminated soils from Spain[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, 33: 2781-2791.
- [9] Nan Z R, Zhao C Y, Li J J, et al. Relations between soil properties and selected heavy metal concentrations in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in contaminated soil[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 133(1-4):205-213.
- [10] Wu F B, Zhang G P. Genotypic variation in kernel heavy metal concentrations in barley and as affected by soil factors[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(6):1163-1173.
- [11] 施万喜. 利用 AMMI 模型分析陇东旱地冬小麦新品种(系)丰产稳产性[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3):37-43.
- SHI Wan-xi. Analysis on high yield and stability of winter wheat cultivars in dry land of east Gansu by AMMI model[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3):37-43.
- [12] 胡希远, 尤海磊, 宋喜芳, 等. 作物品种稳定性分析不同模型的比较[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(1):110-117.
- HU Xi-yuan, YOU Hai-lei, SONG Xi-fang, et al. Comparison of different models for crop stability analysis[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(1):110-117.
- [13] Fouceteau V, Daouk M El, Bari C. Interpretation of genotype by environment interaction in two sunflower experimental networks[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2001, 102(2/3):327-334.
- [14] 彭 华, 戴金鹏, 纪雄辉, 等. 稻田土壤与稻米中 Cd 含量初探[J]. 湖南农业科学, 2013(7):68-72.
- PENG Hua, DAI Jin-peng, JI Xiong-hui, et al. Correlation between cadmium content in paddy soil and in rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013(7):68-72.
- [15] 成颜君, 龚伟群, 李恋卿, 等. 2 种杂交水稻对 2 种不同土壤中 Cd 吸收与分配的比较[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5):1895-1900.
- CHENG Yan-jun, GONG Wei-qun, LI Lian-qing, et al. Comparison of Cd uptake and partitioning in plant tissues by two hybrid rice grown in two contrasting paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5):1895-1900.
- [16] 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 Agricultura Sinica*, 2014, 47(18):3633-3640.
- [17] Richard J R, Martin A A S. Metal speciation and its role in bioaccessibility and bioavailability[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 64(1):59-113.
- [18] 李 娟, 唐 庆, 周 墨, 等. 降雨量对土壤中重金属元素行为影响的研究[J]. 高校地质学报, 2013, 19(增刊):450.
- LI Juan, TANG Qing, ZHOU Mo, et al. Study on the rainfall capacity effected on heavy metal behavior in soil[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2013, 19(Suppl):450.
- [19] 侯青叶, 杨忠芳, 杨晓燕, 等. 成都平原区水稻土成土剖面 Cd 的形态分布特征及影响因素研究[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 2008, 15(5):36-46.
- HOU Qing-ye, YANG Zhong-fang, YANG Xiao-yan, et al. Study of distribution of geochemical speciation of cadmium and factors controlling the distribution in paddy soil profile[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing; Peking University)*, 2008, 15(5):36-46.
- [20] 王凯荣, 郭 炎. 重金属污染对稻米品质影响的研究[J]. 农业环境保护, 1993, 12(6):254-257.
- WANG Kai-rong, GUO Yan. Effect of heavy metal pollution on rice quality[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1993, 12(6):254-257.
- [21] 徐加宽, 杨连新, 王余龙, 等. 水稻对重金属元素的吸收与分配机理的研究进展[J]. 植物学通报, 2005, 22(5):614-622.
- XU Jia-kuan, YANG Lian-xin, WANG Yu-long, et al. Advances in the study uptake and accumulation of heavy metal in rice (*Oryza sativa*) and its mechanisms[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 22(5):614-622.
- [22] Makino T, Luo Y M, Wu L H, et al. Heavy metal pollution of soil and risk alleviation methods based on soil chemistry[J]. *Pedologist*, 2010, 53:38-49.
- [23] Grant C A. Influence of phosphate fertilizer on cadmium in agricultural soils and crops[J]. *Pedologist*, 2011, 54:143-155.
- [24] 周金林, 陈 虎, 郭忘摸. 大田双季种植籼稻籽粒镉积累差异研究[J]. 湖南农业科学, 2013(11):26-28.
- ZHOU Jin-lin, CHEN Hu, GUO Wang-mo. Differences in Cd accumulation in grains of double-season planted indica rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013(11):26-28.
- [25] Ueno D, Koyama E, Yamaji N, et al. Physiological genetic and molecular characterization of a high-Cd-accumulating rice cultivar, Jarjan[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(7):2265-2272.
- [26] Tanaka K, Fujimaki S, Fujiwara T, et al. Quantitative estimation of the contribution of the phloem in cadmium transport to grains in rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(1):72-77.
- [27] 谢运河, 纪雄辉, 刘绍兵, 等. 有机物料和钝化剂对降低环境容量土壤黑麦草吸收积累 Cd 及其平衡的影响[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(2):229-233.
- XIE Yun-he, JI Xiong-hui, LIU Shao-bing, et al. Effects of different organic materials and passivators on cadmium uptaking and balance of ryegrass in low environmental capacity soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2014, 35(2):229-233.
- [28] 李 欣. 减少水稻对镉吸收的土壤调控措施[J]. 农业科技与装备, 2009, 4(184):27-30.
- LI Xin. Regulatory measures to reduce cadmium absorption by rice[J]. *Agricultural Science and Technology and Equipment*, 2009, 4(184):27-30.