

曾民, 曾黎琼, 王玲仙, 等. 元江普通野生稻渗入系籽粒镉评价及与农艺性状的相关性分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(8): 1644–1649.

ZENG M, ZENG L Q, WANG L X, et al. Cd accumulation in grains of introgression lines of Yuanjiang common wild rice and its correlation with agronomic traits in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(8): 1644–1649.



开放科学 OSID

元江普通野生稻渗入系籽粒镉评价及与农艺性状的相关性分析

曾民^{1,2}, 曾黎琼^{1,2}, 王玲仙^{1,2}, 李娥贤^{1,2}, 钟巧芳^{1,2}, 赵白英⁴, 郭蓉^{3*}

(1. 云南农业科学院生物技术与种质资源研究所, 昆明 650223; 2. 云南省农业生物技术重点实验室, 昆明 650223; 3. 云南农业科学院经济作物研究所, 昆明 650205; 4. 元江县农村产业发展中心, 云南 元江 653300)

摘要:为探讨云南普通野生稻渗入系籽粒积累镉的能力,并分析其籽粒镉含量与田间农艺性状的相关性,于2019年3—10月在滇南某镉污染农田种植120份元江普通野生稻渗入系BC₃F₄株系,测定其籽粒镉含量,并就籽粒镉含量与渗入系材料主要农艺性状展开相关性研究。结果表明:120份渗入系材料籽粒镉含量差异极显著,籽粒镉含量在0.05~3.57 mg·kg⁻¹范围内,存在广泛的遗传多样性,从中筛选出镉低积累材料54份,高积累材料3份。120份渗入系材料含3种水稻类型(籼稻、粳稻及彩色稻),3种水稻类型籽粒镉含量在种内差异显著,变异系数大;在种间,籽粒镉含量彩色稻与籼稻、粳稻间均存在显著差异,而籼稻与粳稻间差异不显著。籽粒镉含量与渗入系株系产量及结实率间存在正相关性,相关系数分别为0.411和0.300,与其他性状无相关性。籼稻类、粳稻类产量与籽粒镉含量的相关系数分别为0.446和0.672,籼稻类、粳稻类结实率与籽粒镉含量的相关系数分别为0.362和0.634。研究表明,渗入系后代各株系间镉积累差异极显著,可从中筛选出低积累和高富集株系;渗入系株系籽粒镉含量与产量及结实率存在相关性,可作为田间判别株系镉含量的依据,并为镉积累相关基因挖掘提供理论依据。

关键词:普通野生稻;渗入系;镉;农艺性状

中图分类号:S511.9;X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2021)08-1644-06 **doi:**10.11654/jaes.2021-0196

Cd accumulation in grains of introgression lines of Yuanjiang common wild rice and its correlation with agronomic traits in rice

ZENG Min^{1,2}, ZENG Liqiong^{1,2}, WANG Lingxian^{1,2}, LI Exian^{1,2}, ZHONG Qiaofang^{1,2}, ZHAO Baiying⁴, GUO Rong^{3*}

(1. Biotechnology and Germplasm Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650223; 2. Yunnan Provincial Key Lab of Agricultural Biotechnology, Kunming 650223, China; 3. Industrial Crop Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650205, China; 4. Rural Industry Development Center of Yuanjiang County, Yuanjiang 653300, China)

Abstract: This study aimed to evaluate the cadmium (Cd) accumulation capacity of Yunnan common wild rice by investigation of Cd accumulation in grains of introgression lines of Yuanjiang common wild rice and to explore the relationship between the Cd content in the grains and the main agronomic traits of rice. A total of 120 BC₃F₄ strains of Yuanjiang wild rice introgression lines were planted in a Cd-contaminated farmland in southern Yunnan from March to October in 2019. We detected the Cd content in the grains, evaluated the main agronomic traits, and also conducted a correlation analysis between them. The results were as follows: the minimum and maximum Cd

收稿日期:2021-02-20 录用日期:2021-04-27

作者简介:曾民(1980—),男,湖南常德人,博士,助理研究员,从事土壤重金属污染修复研究。E-mail:1833642906@qq.com

*通信作者:郭蓉 E-mail:grmm0207@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41761070);中华人民共和国农业农村部指令性项目(2130139)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41761070); Mandatory Projects of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China(2130139)

accumulation in the 120 introgression lines were $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $3.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, indicating an extensive genetic diversity in Cd uptake in the grains of the introgression line progeny. Fifty-four low-Cd accumulation and three high-Cd-accumulation strains were screened from the 120 introgression lines. The 120 introgression lines were divided into three types, including indica, japonica, and colored rice. Each rice type exhibited a substantial difference in the Cd content in the grains with large variation coefficients. The Cd content in the grains of colored rice was significantly different from those of indica and japonica rice, whereas no significant difference could be detected between the indica and japonica rice. The Cd content in the grains positively correlated with rice yield and seed setting rate with correlation coefficients of 0.411 and 0.300, respectively, and no correlation with other traits. The correlation coefficients between the grain Cd content and indica and japonica yields were 0.446 and 0.672, respectively, and the correlation coefficients between the grain Cd content and seed setting rate of indica and japonica were 0.362 and 0.634, respectively. The Cd accumulation difference among the strains of the introgression lines was very significant, and low and high accumulation lines could be selected from them. We observed a correlation between the Cd content in the seeds of the introgression lines and the yield and seed setting rate, which could be used as a basis for the field identification of the Cd content in the lines and to provide a theoretical basis for mining Cd accumulation-related genes.

Keywords: *Oryza rufipogon* Griff.; introgression lines; cadmium; agronomic traits

2014年《全国土壤污染状况调查公报》调查结果显示,我国约 $2.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 耕地受到重金属的污染,占总耕地面积的 19.4%,其中镉(Cd)污染位列第一^[1]。水稻是我国第一大粮食作物,我国有 2/3 的人口以水稻为主食,与其他作物相比,水稻具有大量吸收积累镉的特性^[2],因此稻米安全成为事关粮食安全的重要课题^[3]。研究表明,不同水稻品种对镉的吸收和富集存在明显的品种间遗传差异^[4]。因此筛选镉低积累水稻资源,培育低镉品种是解决水稻镉污染问题最直接且最经济的方法^[5]。目前,已从现有品种中筛选出多份镉低积累品种^[6-7],但这些品种多属于现代栽培稻,是以产量、品质为育种目标进行选育的,为加快育种进程,除目标性状外,会选择其他性状均相对一致的材料作为其亲本,这将造成其后代遗传背景相对狭窄,导致鉴定到的与镉低积累相关的基因相对较少,进一步增加了低镉新种质筛选的难度^[8]。

野生稻是现代栽培稻的祖先,是水稻种质资源的天然基因库,在漫长的独立进化过程中,野生稻经受各种灾害和不良环境的自然选择,形成了极其丰富的遗传多样性,拥有栽培稻所不具有的或已消失的许多优良遗传基因。研究表明,从野生稻中发掘新耐性基因的几率是现代栽培稻的 50 倍^[9]。

本试验在镉污染稻田种植 120 份元江普通野生

稻渗入系材料,通过测定各材料籽粒的镉含量,筛选出镉低积累和高富集的稻种资源,并分析元江普通野生稻渗入系后代籽粒镉含量与田间主要农艺性状之间的相关性,探讨能否通过田间农艺性状初步判断渗入系株系籽粒镉含量。本研究不仅可拓宽水稻在镉吸收富集方面的遗传背景,还可为低镉品种的选育和水稻镉积累机理的研究提供种质材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料及地点

选取元江普通野生稻 BC₃F₄ 群体中表型差异的 120 份渗入系株系作为试验材料,将其种植于镉污染的农田。该群体是以元江普通野生稻为母本,合系 35 为父本,通过杂交、胚挽救、回交等方法形成的研究群体材料。120 份渗入系株系包括籼稻 78 份,粳稻 30 份,彩色稻 12 份(包括红米、紫米、黑米等)。

试验地位于滇南某镉污染水稻主产区,该地土壤为水稻土,依照网格布点法采集土样,测得的土壤基本性质如表 1 所示。

1.2 田间试验方法

供试材料于 2019 年 3 月育秧并移栽于镉污染的稻田内。120 份株系材料按照水稻田间育种的方法安排试验,即每份株系材料捆成 3 份,120 份材料作为

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the tested soil

项目 Item	pH(n=21)	Cd(n=21)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	水解性氮(n=3) Hydrolysable N/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷(n=3) Available P/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾(n=3) Available K/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有机质(n=3) Organic matter/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
均值 Mean	6.88±0.02	0.38±0.01	118.4±13.6	38.2±8.5	86.2±11.1	29.2±2.9
范围 Range	6.71~6.99	0.36~0.39	105.3~132.5	30.6~47.4	74.5~96.5	26.5~32.2

一组,共分为3组。每组采用随机区组方式种植,120份材料每份均种植3行,每行种10株,株距15 cm,行距20 cm,材料与材料间隔25 cm。每个小区面积为0.54 m²(135 cm×40 cm)。田间记录各小区苗数、株高、分蘖数、生育期、产量、生物量等农艺性状数据。

1.3 样品采集与分析

水稻成熟后按小区单收,测定生物量,经脱粒后晾晒烘干测定小区产量,将各小区的部分谷粒用砻谷机脱壳、粉碎机粉碎后,装入干净的10号自封袋中保存备用。所有籽粒样品根据《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB/T 5009.15—2014)标准测定,样品用湿式消解法消解后,用石墨炉原子吸收光谱法测定镉含量,利用大米植物国家标准参比物质GBW10010(GSB-1)和空白样进行分析质量控制。

1.4 数据处理与统计分析

试验数据利用Microsoft Excel 2007进行均值、标准差计算和绘图,利用SPSS 19.0进行方差分析和LSD多重比较,相关性分析采用皮尔逊(Pearson)相关系数法,采用非参数检验中K个独立样本检验不同类型水稻的差异性。

2 结果与分析

2.1 元江普通野生稻渗入系材料籽粒镉积累的差异性

120份渗入系材料镉含量为0.05~3.57 mg·kg⁻¹,最大值是最小值的71.4倍,差异极显著,其平均镉含量为0.31 mg·kg⁻¹。如图1所示,渗入系材料籽粒镉含量呈正态分布,其中14份材料的镉积累量<0.10 mg·kg⁻¹,40份材料的镉含量为0.10~0.19 mg·kg⁻¹,25份材料的镉含量为0.20~0.29 mg·kg⁻¹,20份材料的镉含量为0.30~0.39 mg·kg⁻¹,11份材料的镉含量为0.40~0.49 mg·kg⁻¹,7份材料的镉含量为0.50~0.99 mg·kg⁻¹,3份材料的镉含量>1.00 mg·kg⁻¹,镉含量<0.10 mg·kg⁻¹的占比11.7%,镉含量在0.10~0.19 mg·kg⁻¹间的占比33.3%。结果表明元江普通野生稻渗入系材料籽粒镉含量多态性丰富,其中含有大量镉低积累材料,可作为镉低积累品种种质资源,大部分籽粒镉含量分布在父母亲本籽粒镉含量的范围内(元江普通野生稻籽粒镉含量为0.10 mg·kg⁻¹,合光35籽粒镉含量为0.42 mg·kg⁻¹),符合杂交组合的遗传分配定律。

0.49 mg·kg⁻¹,7份材料的镉含量为0.50~0.99 mg·kg⁻¹,3份材料镉含量>1.00 mg·kg⁻¹,镉含量<0.10 mg·kg⁻¹的占比11.7%,镉含量在0.10~0.19 mg·kg⁻¹间的占比33.3%。结果表明元江普通野生稻渗入系材料籽粒镉含量多态性丰富,其中含有大量镉低积累材料,可作为镉低积累品种种质资源,大部分籽粒镉含量分布在父母亲本籽粒镉含量的范围内(元江普通野生稻籽粒镉含量为0.10 mg·kg⁻¹,合光35籽粒镉含量为0.42 mg·kg⁻¹),符合杂交组合的遗传分配定律。

2.2 不同类型渗入系材料镉积累的差异性

依据性状将120份渗入系材料分为籼稻、粳稻和彩色稻3种类型,如表2所示,3种类型水稻籽粒镉含量均在种内存在显著差异,其变异系数较大,3种类型籽粒镉含量最高值为最低值的75.8倍。其中彩色稻的籽粒镉含量与籼稻、粳稻间存在显著差异($P<0.05$);籼稻与粳稻间籽粒镉含量不存在显著差异。

2.3 渗入系籽粒镉含量与农艺性状的相关性

籽粒镉含量与渗入系株系农艺性状的相关性分析结果表明,株高、分蘖数、生物量及生育期等性状与籽粒镉含量均无相关性。如图2所示,籽粒镉含量与

表2 不同类型渗入系材料籽粒镉含量

Table 2 Variations of Cd content in grain within 3 types of rice

类型 Type	数量 Number	平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	范围 Range/(mg·kg ⁻¹)	变异系数 CV/%
籼稻	78	0.34±0.03b	0.05~3.79	129.0
粳稻	30	0.28±0.03b	0.05~1.55	92.5
彩色稻	12	0.16±0.02a	0.07~0.45	60.9
所有材料	120	0.31±0.02	0.05~3.79	123.0

注:同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant difference at $P<0.05$ level.

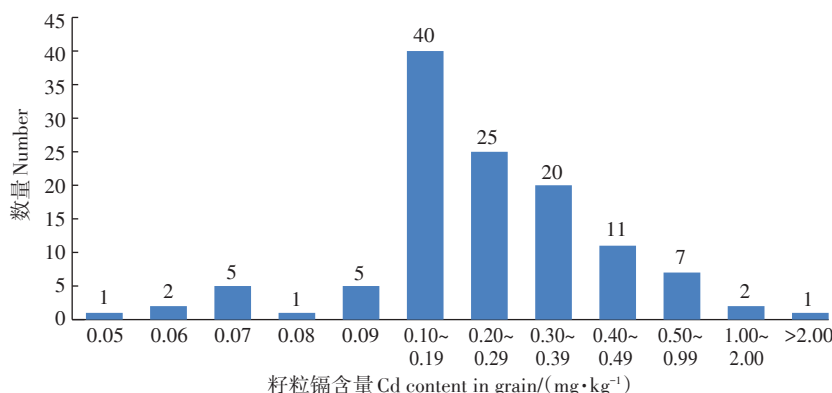


图1 120份渗入系材料籽粒镉含量分布

Figure 1 Distribution of the Cd content in grains of 120 introgression lines tested

水稻产量、结实率之间存在极显著正相关性($P<0.01$), 相关系数分别为0.666和0.646。

对3种类型渗入系株系进行籽粒镉含量与水稻产量、结实率的相关性分析:有色稻的籽粒镉含量与水稻产量、结实率无相关性,粳稻和籼稻的籽粒镉含量与水稻产量、结实率之间均呈极显著正相关(图3、图4)。因此,可将产量和结实率作为筛选渗入系株系籽粒镉含量的田间性状。

对低镉株系(籽粒镉含量 $<0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)进行产量和结实率的相关分析,如图5所示,产量与结实率呈极显著正相关($r=0.511, P<0.01$)。这表明结实率是影响产量的主要因素之一。

3 讨论

低镉水稻品种选育的关键是挖掘与镉累积相关的基因。不同水稻品种对镉的吸收、转运和分配的差

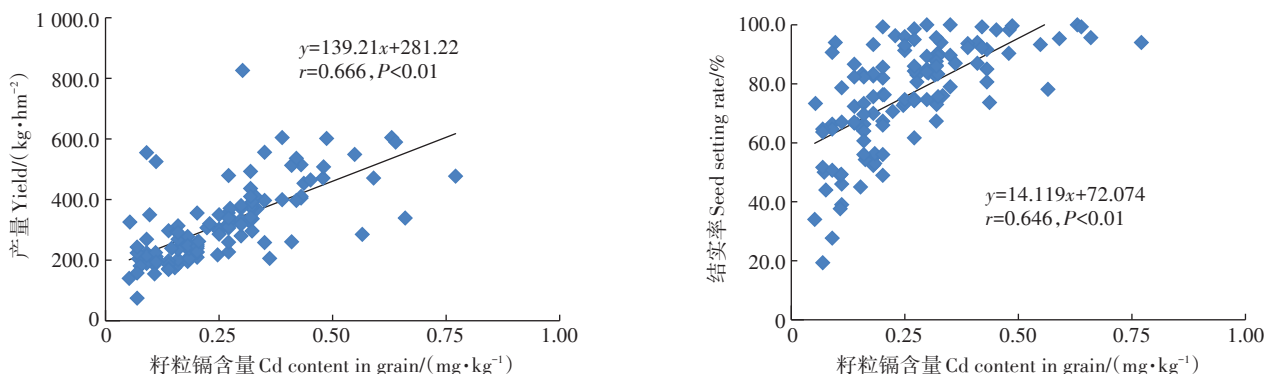


图2 117份渗入系株系产量、结实率和籽粒镉含量的相关性

Figure 2 Correlation between the Cd content in grain and yield or seed setting rate in 117 introgression lines rice

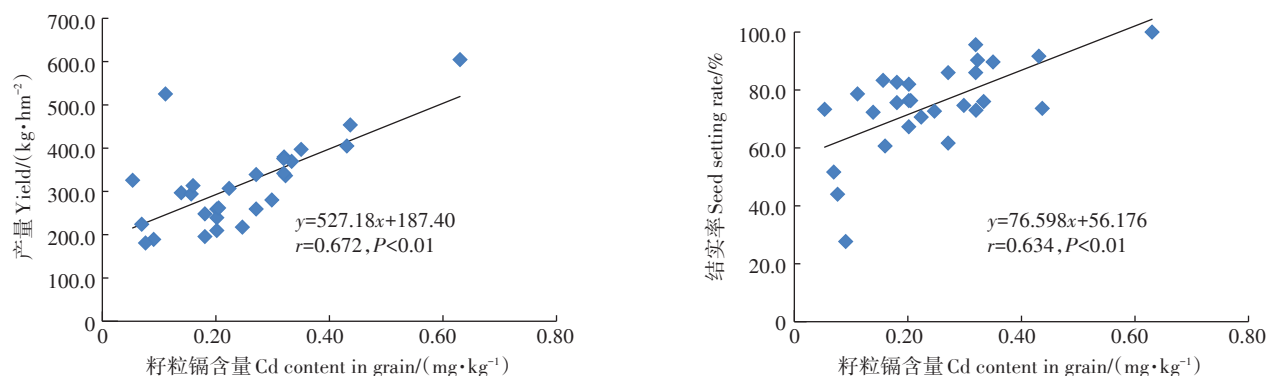


图3 28份渗入系粳稻产量、结实率和籽粒镉含量的相关性

Figure 3 Correlation between the Cd content in grain and yield or seed setting rate in 28 introgression lines Japonica

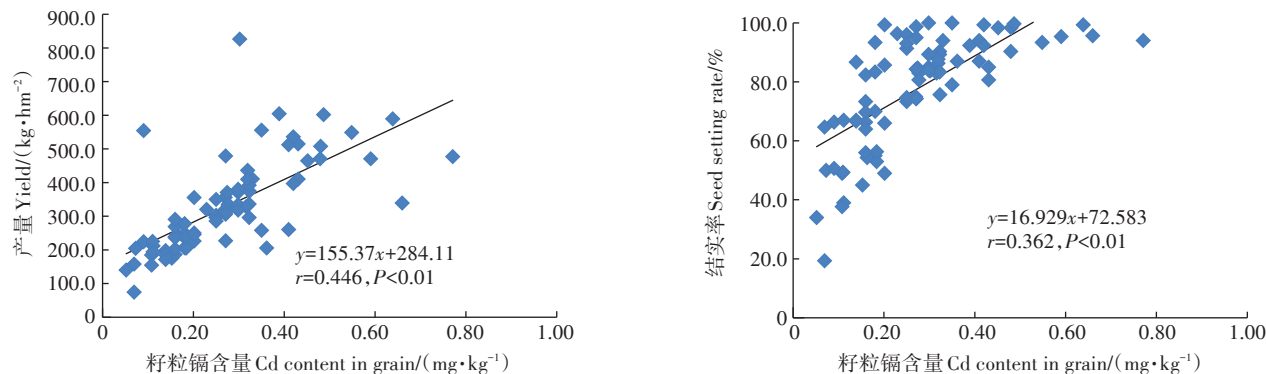


图4 77份渗入系籼稻产量、结实率和籽粒镉含量的相关性

Figure 4 Correlation between the Cd content in grain and yield or seed setting rate in 77 introgression lines indica

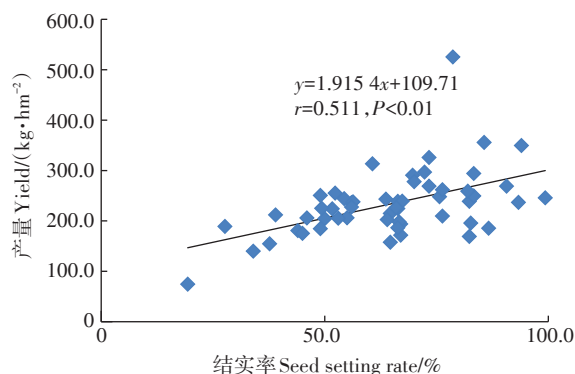


图5 低镉渗入系株系的产量和结实率的相关性

Figure 5 Correlation between yield and seed setting rate of low cadmium introgression lines

异,本质是基因不同导致的^[10]。水稻根系通过 *Nramp5*、*Nramp1* 等基因吸收土壤镉^[11-15], *HMA2*、*HMA3*等基因参与镉从根部到地上部的运输^[16], *LCT1*等基因将镉转运到籽粒^[17-19]。水稻基因解析了水稻对镉的吸收、转运及积累的过程,但依然未在水稻中发现显著影响籽粒镉含量的基因,在硬质小麦中已发现能显著降低籽粒镉含量的基因,并加以应用^[20]。因此应进一步发掘水稻中与镉积累相关的基因,更好地解析水稻吸收积累镉的机制,为水稻低镉品种选育提供理论依据。

新种质资源引入有利于发掘到与镉积累相关的基因^[21-22]。云南土壤镉背景值($0.218 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)极显著高于全国水平($0.097 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),元江普通野生稻原生境就位于镉高背景值区域范围内^[23]。研究表明,元江普通野生稻与现代栽培稻相比具有有益矿质元素含量高、有害重金属含量低等特点^[24-25]。研究材料元江普通野生稻渗入系后代群体,它是通过杂交、胚挽救、回交和自交等方法将元江普通野生稻染色体片段渗入到后代株系中,该群体株系遗传背景相似,但存在不同大片段元江野生稻基因,是进行野生稻基因挖掘的优良群体材料。本试验通过对120份渗入系后代籽粒镉积累量的分析,发现渗入系后代籽粒镉含量差异显著,从中获得了一批籽粒镉低积累材料。这表明元江普通野生稻渗入系后代群体对镉吸收积累方面的遗传多样性丰富,可能存在与籽粒镉低积累相关的基因,但这还需要进一步研究。

利用基因的连锁遗传来寻找与镉相关的基因。水稻镉研究难点之一是只能通过测定才能确定籽粒镉含量,田间很难判断,尤其在群体材料多时。基因并不是单独存在于染色体上,而是和其他基因共同存

在于染色体上,因此相邻基因间存在连锁遗传的特性。与镉积累相关的基因是和其他基因一起存在于染色体上,若其距离很近则会存在连锁遗传,如果能够将籽粒镉含量和其他性状联系起来则可以通过其他性状间接对镉积累相关基因进行筛选,从而找到与镉积累相关的基因。现有品种是以产量、品质等性状为育种目标,通过系统选育方法选育而成,其遗传背景相似、遗传多样性差。同样育种要求导致其产量等相关农艺性状趋于一致,因此很难从农艺性状上分辨其差异,也不可能寻找到其与籽粒镉含量间的关系。而元江普通野生稻渗入系群体形态差异性明显,多保留有野生稻的各种性状,因此可能存在与籽粒镉含量有关系的性状。由于渗入系群体的选育周期长、世代多、群体材料数量繁多,而且检测成本较高,无法完全通过检测的方法确定籽粒镉含量。所以通过120份渗入系材料籽粒镉含量与田间农艺性状间的相关性研究,寻找到与籽粒镉含量相连锁的基因或者性状,这有利于与镉积累相关的渗入系后代群体的选择、保存及研究。试验发现结实率、产量与籽粒镉含量存在极显著的相关性,这表明渗入系群体内与产量和结实率有关的基因可能也与籽粒对镉的吸收积累相关,通过对其进行分子水平研究,是否能够发现与水稻籽粒镉积累相关的基因或者某种连锁的基因,有待进一步研究。

4 结论

(1)元江普通野生稻渗入系材料籽粒镉积累差异极显著,籽粒镉含量遗传多态性丰富,含有丰富的低积累材料,镉含量 $<0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的有54份,占比为45%。

(2)元江普通野生稻渗入系籽粒镉含量与水稻农艺性状中的产量和结实率显著相关,与株高、分蘖数、生物量及生育期等性状不存在相关性。

(3)元江普通野生稻渗入系后代所形成的3种类型水稻籽粒镉含量在籼稻、粳稻间差异不显著,但二者均与彩色稻的籽粒镉含量差异显著。籼稻、粳稻的产量及结实率与籽粒镉含量存在极显著相关性。

参考文献:

- [1] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等.《全国土壤污染状况调查公报》探析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1689-1692. CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the bulletin of national soil pollution survey[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.

- [2] 喻华,上官宇先,涂仕华,等.水稻籽粒中镉的来源[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10):1940-1947. YU H, SHANGGUAN Y X, TU S H, et al. Sources of cadmium accumulated in rice grain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(10):1940-1947.
- [3] YUAN X P, WANG J, SHANG Y, et al. Health risk assessment of cadmium via dietary intake by adults in China[J]. *J Sci Food Agric*, 2014, 94(2):373-380.
- [4] BERNAL M, TESTILLANO P, ALFONSO M, et al. Identification and subcellular localization of the soybean copper P_{1B}-ATPase *GmHMA8* transporter[J]. *Journal of Structural Biology*, 2007, 158(1):46-58.
- [5] SEBASTIAN A, PRASAD M. Cadmium minimization in rice: A review [J]. *Agron Sustain Dev*, 2014, 34(1):155-173.
- [6] 张锡洲,张洪江,李廷轩,等.水稻镉耐性差异及镉低积累种质资源的筛选[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11):1434-1440. ZHANG X Z, ZHANG H J, LI T X, et al. Differences in Cd-tolerance of rice and screening for Cd low-accumulation rice germplasm resources[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(11):1434-1440.
- [7] 赵均良,张少红,杨梯丰,等.181份多样性籼稻种质苗期和成熟期镉积累表型评价[J]. 分子植物育种, 2018, 16(18):6080-6087. ZHAO J L, ZHANG S H, YANG T F, et al. Phenotype evaluation of Cd accumulation of 181 diverse indica germplasm at seedling and mature stages[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(18):6080-6087.
- [8] LIANG S, XU X, JIANG Y, et al. Genetic diversity, rather than cultivar type, determines relative grain Cd accumulation in hybrid rice[J]. *Front Plant Science*, 2016, 7:1-12.
- [9] CHENG Z, YIN F, LI D, et al. Genetic diversity of wild rice species in Yunnan Province of China[J]. *Rice Science*, 2012, 19(1):21-28.
- [10] 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[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6):1028-1033. CAI Q L, LIN D S, WANG G, et al. Differences in cadmium accumulation and transfer capacity among different types of rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1028-1033.
- [11] 刘仲齐,张长波,黄永春.水稻各器官镉阻控功能的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4):721-727. LIU Z Q, ZHANG C B, HUANG Y C. Research advance on the functions of rice organs in cadmium inhibition: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4):721-727.
- [12] SASAKI A, YAMAJI N, YOKOSHO K, et al. *Nramp5* is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. *The Plant Cell*, 2012, 24(5):2155-2167.
- [13] 赵艳玲,张长波,刘仲齐.植物根系细胞抑制镉转运过程的研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(3):209-213. ZHAO Y L, ZHANG C B, LIU Z Q. Inhibiting cadmium transport process in root cells of plants: A review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3):209-213.
- [14] 肖清铁,王经源,郑新宇,等.水稻根系响应镉胁迫的蛋白质差异表达[J]. 生态学报, 2015, 35(24):8276-8283. XIAO Q T, WANG J Y, ZHENG X Y, et al. Analysis of the differently expressed proteins in rice roots in response to cadmium stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24):8276-8283.
- [15] SASAKI A, YAMAJI N, MA J. Overexpression of *OsHMA3* enhances Cd tolerance and expression of Zn transporter genes in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(20):6013-6021.
- [16] SUN L J, WANG J, SONG K, et al. Transcriptome analysis of rice (*Oryza sativa* L.) shoots responsive to cadmium stress[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9:10177.
- [17] YAN Y, CHOI D, KIM D, et al. Genotypic variation of cadmium accumulation and distribution in rice[J]. *J Crop Sci Biotechnol*, 2010, 13(2):69-73.
- [18] ZHOU Q, SHAO G, ZHANG Y, et al. The difference of cadmium accumulation between the indica and japonica subspecies and the mechanism of it[J]. *Plant Growth Regulation*, 2017, 81(3):1-10.
- [19] LIU J, QU P, ZHANG W, et al. Variations among rice cultivars in subcellular distribution of Cd: The relationship between translocation and grain accumulation[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2014, 107(6):25-31.
- [20] 陈彩艳,唐文帮.筛选和培育镉低积累水稻品种的进展和问题探讨[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(6):1044-1051. CHEN C Y, TANG W B. A perspective on the selection and breeding of low-Cd rice[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6):1044-1051.
- [21] 张标金,张祥喜,罗林广,等.与植物镉吸收转运相关的主要基因家族[J]. 基因组学与应用生物学, 2013, 32(1):127-134. ZHANG B J, ZHANG X X, LUO L G, et al. The major gene families related to cadmium absorption and transportation in plants[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2013, 32(1):127-134.
- [22] 李江遐,张军,马友华,等.不同水稻品种对镉的吸收转运及其非蛋白巯基含量的变化[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12):2140-2145. LI J X, ZHANG J, MA Y H, et al. Uptake and translocation of cadmium and content of non-protein thiols in different rice cultivars[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(12):2140-2145.
- [23] 王红华,严婷婷.云南省高背景值耕地土壤现状与作物积累状况初探[C]. 全国耕地土壤污染监测与评价技术研讨会, 2006:127-132. WANG H H, YAN T T. Preliminary study on the status of soil and crop accumulation in cultivated land with high background value in Yunnan Province[C]. National Workshop on Monitoring and Evaluation of Soil Pollution in Arable Land, 2006:127-132.
- [24] 黄兴奇,陈勇,戴陆园,等.云南作物种质资源[M]. 昆明:云南科技出版社, 2005. HUANG X Q, CHEN Y, DAI L Y, et al. Crop germplasm resources of Yunnan Province[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2005.
- [25] 柯学,陈越,殷富有,等.普通野生稻在稻属中的分类进化及资源研究[J]. 分子植物育种, 2018, 16(4):1363-1376. KE X, CHEN Y, YIN F Y, et al. Taxonomic evolution and resource research of *Oryza rufipogon* Griff. in phylogeny of *Oryza* and its advances[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(4):1363-1376.