

李 堃, 余海英, 黄 富, 等. 镉低积累水稻亲本及其杂交组合镉积累特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1444-1450.

LI Kun, YU Hai-ying, HUANG Fu, et al. Characteristics of cadmium accumulation in low cadmium-accumulating rice parent and its hybrids[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1444-1450.

镉低积累水稻亲本及其杂交组合镉积累特征分析

李 堃¹, 余海英^{1*}, 黄 富², 陈光登¹, 张 路¹

(1.四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2.四川农业大学农学院, 成都 611130)

摘 要:为培育镉(Cd)安全水稻品种,以 Cd 低积累水稻亲本雅恢 2816 及其 4 个杂交组合泸 98A/雅恢 2816、5406A/雅恢 2816、C268A/雅恢 2816、蓉 18A/雅恢 2816 为研究对象,采用盆栽试验,分析 Cd 低积累水稻亲本及其杂交后代成熟期 Cd 积累分配特征,探讨亲本及杂交组合对 Cd 的吸收转运差异。结果表明:在 Cd 处理浓度为 1、2、4 mg·kg⁻¹ 条件下,杂交组合生物量均显著高于亲本,超亲优势达 21.86%~89.63%。不同浓度 Cd 处理下,亲本及杂交组合各器官 Cd 含量分配顺序均为根>茎、叶>>穗,其中杂交组合 5406A/雅恢 2816 和 C268A/雅恢 2816 的穗部 Cd 含量显著低于亲本,糙米 Cd 含量也仅为亲本的 57.14%~86.36%,低于食品安全国家标准 0.2 mg·kg⁻¹。随 Cd 处理浓度的增加,亲本及杂交组合 Cd 由根系向地上部的转移系数均降低,杂交后 Cd 在根系的分配比例上升,杂交组合根系 Cd 积累量为亲本的 1.49~3.24 倍,而茎、叶的分配比例仅为亲本的 72.06%~81.20%和 74.18%~91.08%。杂交组合 5406A/雅恢 2816 和 C268A/雅恢 2816 表现出优于亲本的籽粒 Cd 低积累特征,具有在中、轻度污染土壤上安全生产的潜力。

关键词:Cd 低积累亲本;杂交组合;积累;分配;杂种优势;安全生产

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)08-1444-07 doi:10.11654/jaes.2016-0137

Characteristics of cadmium accumulation in low cadmium-accumulating rice parent and its hybrids

LI Kun¹, YU Hai-ying^{1*}, HUANG Fu², CHEN Guang-deng¹, ZHANG Lu¹

(1.College of Resource Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: A pot culture experiment was conducted to investigate the characteristics of cadmium (Cd) accumulation, distribution and transport in a low Cd-accumulating rice parent (YaHui2816) and its hybrids (Lu98A/YaHui2816, 5406A/YaHui2816, C268A/YaHui2816, and Rong18A/YaHui2816) in order to select Cd pollution-safe breeding materials. The biomass of the hybrids was significantly higher than that of the parent, which was 21.86%~89.63% greater under 1 to 4 mg·kg⁻¹ Cd treatments. The Cd content in roots, stems and leaves increased as soil Cd concentrations increased. The Cd content in different tissues of the rice parent and its hybrids were in sequence of root > stem, leaf >> ear. The Cd content in ears of 5406A/YaHui2816 and C268A/YaHui2816 was significantly lower than that of the other hybrid combinations, and Cd in their brown rice was only 57.14%~86.36% of that of the rice parent, which was lower than the National Food Safety Standard (0.2 mg·kg⁻¹). The root-shoot translocation factors of Cd in the rice parent and its hybrids were significant decreased when soil Cd increased. The distribution of Cd in different parts of the rice parent was in order of stem>root>leaf> ear, whereas that order was root>stem> leaf>ear in the hybrids. The Cd accumulation in roots of the hybrids was 1.49~3.24 times higher than that of the parent. In conclusion, brown rice Cd content was lower in 5406A/YaHui2816 and C268A/YaHui2816 than in the low Cd-accumulative rice parent, and could be used as potential Cd pollution-safe materials to grow in medium to low Cd-polluted farmland.

Keywords: low Cd-accumulating parent; hybrid; accumulation; distribution; heterosis; safety production

收稿日期:2016-01-26

基金项目:四川省科技厅科技支撑项目(2014NZ0008);四川省教育厅青年基金(14ZB0017);四川农业大学“双支计划”项目

作者简介:李 堃(1992—),女,四川绵阳人,硕士研究生,主要从事土壤污染防治与安全生产的研究。E-mail:LiKunwe@163.com

*通信作者:余海英 E-mail:haiyingaa1@163.com

水稻是我国主要粮食作物,目前镉(Cd)已成为我国危害严重的农田污染源,稻田 Cd 污染使水稻生长发育受阻,导致产量、品质降低,稻米 Cd 含量大幅增加,并通过食物链对人体构成直接威胁^[1-2]。Liu 等^[3]研究发现,当大田 Cd 浓度为 $10.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,32 份水稻品种中有近 50% 的糙米 Cd 含量超过食品安全国家标准限值。降低水稻籽粒 Cd 含量已成为保障粮食安全的重要课题。研究表明,由于基因型差异所导致的水稻籽粒 Cd 含量在品种间的差异可达显著水平,利用品种间差异进行水稻籽粒 Cd 安全品种的选育是可行的。Liu 等^[4]研究发现,不同水稻品种籽粒 Cd 含量相差 10 倍以上。刘建国等^[5]指出,在污染地区通过品种选择可将稻米中 Cd 含量降低 90%。同时,Cd 在水稻体内的积累分配也存在明显的品种间差异。郑陶等^[6]研究表明,相同 Cd 处理下水稻 Cd 高积累品种对 Cd 的转运能力显著高于普通品种。籽粒中 Cd 含量及 Cd 在地上部的分配比率与 Cd 从地上部向籽粒的迁移率显著相关,糙米中 Cd 含量表现为杂交籼稻>常规籼稻>常规粳稻^[7-8]。对 Cd 的亚细胞分布研究表明,Cd 低积累品种可溶部分中 Cd 的分布显著低于 Cd 高积累品种^[9]。目前,水稻 Cd 低积累材料的筛选及其耐 Cd 机理的研究已普遍展开,而对于 Cd 低积累材料的遗传特性及其杂交后代对 Cd 的积累转运特征还鲜见报道。

糙米中 Cd 含量存在杂种负优势,且在世代间遗传传递率较强^[10],表明利用 Cd 低积累种质资源进行杂交育种是改良水稻籽粒 Cd 含量的有效途径。赵步洪等^[11]指出,杂交稻组合 Cd 吸收量的大小与其亲本的吸收量密切相关,在安全品种的选育中父本的选择尤为重要。本文以籽粒 Cd 低积累水稻作为父本,与不育系材料创制不同杂交组合,通过分析水稻亲本及其杂交组合 Cd 积累分配特征,探讨 Cd 胁迫下 Cd 低积累水稻亲本的遗传特性,为培育籽粒 Cd 安全的杂交水稻品种,进一步发掘与籽粒 Cd 含量相关的基因提供材料及理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为前期筛选获得的 Cd 低积累水稻亲本雅恢 2816(播抽期 108 d,抗稻瘟病,文中表示为 A)及其 4 个杂交组合沪 98A/雅恢 2816、5406A/雅恢 2816、C268A/雅恢 2816、蓉 18A/雅恢 2816(文中分别表示为 B、C、D、E),由四川农业大学农学院提供。供

试土壤为灰色冲积物发育的潮土,采自四川省都江堰市蒲阳镇双柏村,其基本理化性质为:pH 6.40、有机质 $15.98 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.92 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $127.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $8.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $47 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤全 Cd 含量 $0.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试肥料为尿素(N 46%)、磷酸二氢钾(P_2O_5 52%, K_2O 34%)、氯化钾(K_2O 63%),均为分析纯。

1.2 试验设计与处理

分别设置 4 个 Cd 处理水平: $0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (CK)、 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cd1)、 $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cd2)、 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cd4)。氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)肥用量分别为 150、100、105 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,每个处理重复 3 次,共 60 盆,完全随机排列。采用土培盆栽,供试土壤经风干磨碎过 10 目筛,每盆(12 L)装土 10 kg。将相应量的 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯试剂)配成溶液,与土壤混合均匀,陈化 30 d 待用,平衡后测定 Cd1、Cd2 和 Cd4 条件下土壤 Cd 有效量分别为 0.55、1.02、2.10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。旱地育秧,三叶期选取长势一致的秧苗进行移栽,于移栽前 1 d 将氮、磷、钾肥施入土壤,按照常规管理,做好病虫害防治工作和长势记录。试验于 2014 年 5 月至 10 月在四川农业大学有防雨设施的网室中进行。

成熟期采样,每桶 2 株混合样为 1 次重复,共 3 个重复。将所采样品先用自来水冲洗干净,根部在 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 溶液中浸泡 15 min,再用去离子水洗净,最后用吸水纸擦干。将样品分为根、茎、叶、枝梗、谷壳、糙米, $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min 后, $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重,称重后粉碎备用。

1.3 测定项目及方法

土壤理化性质采用常规分析方法;水稻产量采用万深 SC-G 自动种子考种分析及千粒重仪测定;土壤 Cd 全量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ (体积比,5:1:1)消化;有效态 Cd 含量采用 DTPA 提取;植株 Cd 含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (体积比,5:1)消化,利用原子吸收分光光度计测定,其中谷壳及糙米 Cd 含量采用石墨炉分析^[12]。以国家标准物质 GBW 10044 GSB-22 为内标控制分析质量。

1.4 数据处理与分析

转移系数=茎叶(或穗)Cd 含量/根系(或茎叶)Cd 含量;滞留率(%)=(地下部 Cd 含量-地上部 Cd 含量)/地下部 Cd 含量 $\times 100\%$;超亲优势(%)=(F_1 -高亲值)/高亲值 $\times 100\%$ ^[13-14]。

统计分析采用 DPS(11.0),多重比较选择 LSD 法;图表制作采用 Origin 8.0 和 Excel 2013。

2 结果与分析

2.1 Cd 处理对水稻生物量的影响

不同浓度 Cd 处理下, 杂交组合各器官生物量均显著高于亲本, 根、茎、叶、穗生物量分别较亲本增加了 102.47%~199.42%、8.06%~37.05%、30.84%~51.41% 和 9.63%~139.44%(表 1)。4 个杂交后代中, 根、茎、叶生物量在组合间差异不显著, 穗部生物量则表现为杂交组合 C 显著高于其他组合。可见, 亲本及杂交组合在中、低浓度 Cd 处理下能够正常生长, 且杂交组合生物量优于亲本。

2.2 Cd 处理对水稻 Cd 积累与分配的影响

2.2.1 Cd 含量

不同浓度 Cd 处理下, 亲本及杂交组合各器官 Cd 含量分配顺序均为根>茎、叶>>穗, 且随处理浓度提高而显著增加(表 2)。杂交后代茎部 Cd 含量在不同 Cd 处理和不同组合间均无显著差异, 而根系、叶片、穗部 Cd 含量与亲本相比变异较大, 且杂交组合间差异显著。Cd 胁迫下, 杂交组合根系 Cd 含量为 13.66~36.90 mg·kg⁻¹ (CV=27.97%), 以组合 C 的增加量最为显著, 为亲本的 1.08~1.11 倍, 其他组合的 1.06~1.22 倍, 而组合 D 显著降低, 仅为亲本的 73.69%~79.77%, 其他组合的 74.04%~93.37%。叶片 Cd 含量 (CV=9.52%) 则与根系相反, 表现为组合 D 最高而组合 C 最低。穗部 Cd 含量 (CV=29.04%) 以组合 C、D 在

中、低浓度 Cd 处理下降幅最为明显, 分别较亲本降低了 33.33%~37.50%和 6.25%~12.50%, 且仅为其他杂交组合的 45.45%~69.57%和 68.18%~91.30%。这表明, 以籽粒 Cd 低积累水稻为父本创制的不同杂交组合各器官 Cd 含量变异较大, 杂交增强了组合 C 根系对 Cd 的吸收能力, 而使组合 D 根系吸收 Cd 的能力减弱。

2.2.2 分配比例

不同浓度 Cd 处理下, 亲本材料各器官 Cd 积累量分配比例为茎>根>叶>穗, 而杂交组合为根>茎>叶>穗, 均以穗部 Cd 积累量的分配比例最低(图 1)。与亲本相比, 各杂交组合根系 Cd 积累量的分配比例均上升, 积累量达亲本的 1.49~3.24 倍, 以组合 C 最

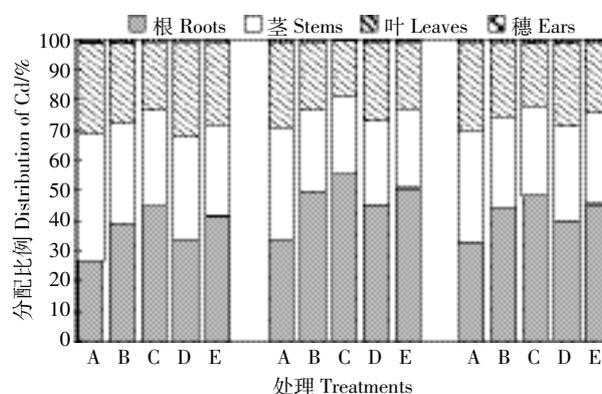


图 1 Cd 在水稻材料各器官中的分配比例

Figure 1 Proportion of Cd in different tissues of rice

表 1 Cd 处理对水稻材料各器官生物量的影响(g·株⁻¹)

Table 1 Effects of different Cd treatments on biomass of different tissues of rice(g·plant⁻¹)

Cd 处理 Cd treatment	根 Roots					茎 Stems					叶 Leaves					穗 Ears				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
CK	4.67bb	12.57ab	12.91ab	12.90ab	12.51ab	11.78bb	15.38ab	15.89ab	15.96ab	15.57ab	10.41bb	14.03ab	13.62ab	13.71ab	14.10ab	25.10da	39.44ba	60.10aa	39.71ba	37.98ca
Cd1	4.72bb	12.77ab	12.99ab	12.89ab	13.06ab	11.89bb	16.23ab	15.84ab	16.30ab	15.92ab	10.53bb	14.10ab	14.04ab	14.09ab	14.51ab	24.18eb	39.35ba	54.45ab	36.18cb	32.11db
Cd2	5.02ca	14.42aba	15.02aa	14.95aba	14.35ba	13.47ba	17.64aa	17.59aa	18.24aa	17.52aa	11.17ba	16.77aa	16.69aa	16.64aa	16.91aa	22.37dc	31.80bb	41.87ac	31.64bc	27.70cc
Cd4	4.05bc	8.53ac	8.13ac	8.20ac	8.75ac	11.25cc	12.15bc	12.55abc	12.59ac	12.27abc	9.24bc	12.57ac	12.19ac	12.33ac	12.41ac	17.40dd	19.08cc	27.26ad	25.48bd	17.68dd

注: 不同小写字母表示同一处理不同材料间差异显著 ($P \leq 0.05$); 上标不同小写字母表示同一材料不同处理间差异显著 ($P \leq 0.05$)。下同。

Note: Different small letters within a treatment mean significant difference between different materials at 0.05 level, superscript of different small letters within a variety mean significant difference between different treatments at 0.05 level. The same as below.

表 2 Cd 处理对水稻材料各器官 Cd 含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 2 Effects of different Cd treatments on Cd content in different tissues of rice(mg·kg⁻¹)

Cd 处理 Cd treatment	根 Roots					茎 Stems					叶 Leaves					穗 Ears				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Cd1	17.66bcc	17.23cc	19.59ac	13.66dc	18.45abb	11.01ac	11.35ac	11.53ac	10.87ac	11.06ac	8.95dc	10.51cb	9.09dc	11.50ab	11.04bb	0.16cc	0.22ac	0.10cc	0.15dc	0.18bc
Cd2	31.24bb	28.53cb	33.87ab	24.92db	29.99bca	12.67ab	12.59ab	13.50ab	12.59ab	12.74ab	11.54bb	11.27cb	10.16db	12.91aa	11.11cab	0.24bb	0.23cb	0.16cb	0.21db	0.25ab
Cd4	38.42aa	30.32ba	36.90aa	28.31ca	31.64ba	15.39aa	14.55aa	14.63aa	14.63aa	15.07aa	14.80aa	11.45ca	10.69da	12.93ba	11.50ca	0.28ba	0.28ba	0.30aa	0.30aa	0.28ba

大,组合 D 最小;茎、叶 Cd 积累量的分配比例则降低至亲本的 72.06%~91.08%,在组合间表现为 D 最大而 C 最小。杂交后,根系 Cd 积累量增加,地上部分分配比例减少,穗部 Cd 积累量亦随之降低。

2.2.3 转移系数

转移系数是水稻植株各组织 Cd 含量的比值,用于表征 Cd 在水稻植株中的迁移特征。由表 3 分析可知,随 Cd 处理浓度的增加,Cd 由根到茎叶的转移系数均有所降低,且杂交组合的降幅更大,以组合 C 最低,仅为亲本的 87.39%~93.20%;由茎叶到穗的转移系数仅组合 C 在中、低浓度 Cd 处理下,以及组合 D 在低浓度 Cd 处理下有所降低,为亲本及其他组合的 50%。滞留率则与此相反,仅组合 C 高于亲本,而组合 D 降幅最大。这表明亲本及杂交组合在较低浓度时将 Cd 由根系向地上部转运的效率更高,而在高浓度下可将更多的 Cd 固持于根系。杂交后组合 C 对 Cd 的转运能力降低,可将更多的 Cd 富集在根部,限制其向地上部的转运;而组合 D 将 Cd 由根系转运并固定于茎叶中的能力增强,限制 Cd 向穗部转移。

2.3 Cd 处理对水稻籽粒 Cd 含量及产量的影响

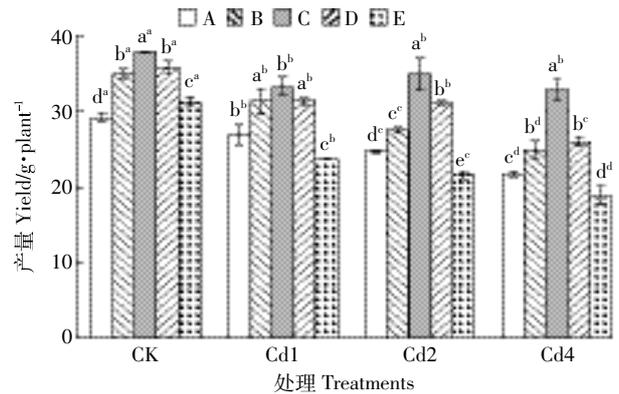
2.3.1 籽粒 Cd 含量

在相同浓度 Cd 处理下,亲本及杂交组合穗部各部位 Cd 含量随 Cd 处理浓度的提高而显著增加,表现为枝梗>谷壳>糙米(表 4)。杂交后各组合糙米 Cd 含量均小于国际食品法典委员会的限量标准 0.4 mg·kg⁻¹,以组合 C、D 在中、低浓度 Cd 处理下的降幅最

大,仅为亲本的 57.14%~86.36%,且小于食品安全国家标准(GB 2762—2012)0.2 mg·kg⁻¹。

2.3.2 水稻产量

Cd 胁迫条件下,亲本及其杂交组合的产量均较对照显著降低,但组合间变化趋势不一致(图 2)。CK 条件下,各杂交组合的产量均显著高于亲本,增幅达 7.04%~29.86%;Cd 处理条件下,除组合 E 较亲本有显著降低外,其余各组合与亲本相比均显著增加。其中,中、低浓度 Cd 处理对组合 C 和组合 D 的产量均



图中不同小写字母表示同一处理不同材料间差异显著(P≤0.05);上标不同小写字母表示同一材料不同处理间差异显著(P≤0.05)。下同
Different small letters within a treatment mean significant difference between different materials at 0.05 level, different small letter superscripts within a variety mean significant difference between different treatments at 0.05 level. The same as below

图 2 Cd 处理对水稻产量的影响

Figure 2 Effects of different Cd treatments on rice yields

表 3 Cd 处理下不同水稻材料 Cd 转移系数的变化

Table 3 Transfer coefficients of Cd in rice as affected by different Cd treatments

Cd 处理 Cd treatment	转移系数 Transfer coefficients										滞留率 Retention rates/%				
	根-茎叶 Roots-Stems and Leaves					茎叶-穗 Stems and Leaves-Ears									
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Cd1	0.57	0.64	0.53	0.82	0.60	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	72.20	71.62	80.91	62.08	70.35
Cd2	0.39	0.42	0.35	0.51	0.40	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	79.23	77.85	83.97	72.79	77.56
Cd4	0.39	0.43	0.34	0.49	0.42	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	78.37	75.46	83.22	75.38	75.19

表 4 Cd 处理对水稻材料穗部 Cd 含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 4 Effects of different Cd treatments on Cd content in branches of rice(mg·kg⁻¹)

Cd 处理 Cd treatment	枝梗 Branches					谷壳 Chaffs					糙米 Brown rice				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
Cd1	0.43dc	0.51bc	0.48cc	0.55ac	0.52bc	0.34ac	0.30cc	0.25ec	0.31bc	0.29dc	0.14cc	0.20ab	0.08ec	0.12dc	0.16bc
Cd2	0.57cdb	0.62bb	0.56db	0.63ab	0.58cb	0.40bb	0.35db	0.33eb	0.44ab	0.37cb	0.22ab	0.22aab	0.13cb	0.19bb	0.23ab
Cd4	0.63ca	0.68aba	0.64ca	0.69aa	0.67ba	0.45ba	0.44ca	0.37da	0.52aa	0.44ca	0.25ba	0.24ca	0.26aba	0.27aa	0.24ca

无显著影响。这表明,Cd胁迫使水稻亲本及杂交组合产量显著降低,但胁迫条件下杂交稻在产量上更具优势。

2.4 Cd处理条件下杂交组合杂种优势分析

Cd胁迫下杂交组合生物量、产量、糙米Cd含量均表现出不同程度的杂种优势(表5)。在不同浓度Cd处理下杂交组合的生物量均显著高于亲本,杂种优势达21.86%~89.63%。就产量而言,除组合E外,其余杂交组合的杂种优势均为正值,平均杂种优势可达38.81%,以组合C表现最好。当Cd处理浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,杂交组合间糙米Cd含量差异较大,杂种优势变幅达-42.86%~42.86%,其中组合C和组合D糙米中Cd含量具有较大的杂种负优势。可见,Cd胁迫下杂交组合生物量与产量杂种优势普遍存在,且在中、低浓度Cd处理条件下组合C和组合D糙米中Cd含量杂种负优势最为明显。

3 讨论

Cd安全种质的筛选是提高水稻Cd安全性的有效途径,水稻亲本作为育种的基本材料,其Cd耐性和Cd吸收、积累能力为Cd安全品种的培育提供了依据。课题组前期在Cd处理下对146份水稻亲本材料进行了耐性探讨以及吸收差异评价,筛选到耐性较强的Cd低积累恢复系亲本雅恢2816^[15]。本研究在前人基础上以雅恢2816为亲本配制4个杂交组合。对亲本材料雅恢2816成熟期籽粒Cd含量分析发现,在轻度(全Cd为 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、中度(全Cd为 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和重度(全Cd为 $4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)污染土壤上,水稻亲本雅恢2816糙米Cd含量均低于国际食品法典委员会限量标准($0.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且在Cd处理浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,低于我国食品安全标准最大限量($0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[6],具有籽粒Cd低积累的特点,因而在Cd安全材料的育种上具有一定应用价值。在4个杂交组合中,5406A/雅恢2816和C268A/雅恢2816的糙米Cd含量在Cd处理浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时与亲本相比显著降低,分别为 0.08 、 $0.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.12 、 0.19

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均达到食品安全国家标准($<0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。因此,5406A/雅恢2816和C268A/雅恢2816在中、轻度Cd污染农田的安全生产中具有一定应用前景。

杂种优势是生物界的普遍现象,对优势组合的选育具有重要意义^[17]。在本研究中,杂交组合生物量在不同浓度Cd处理下始终优于亲本,且在Cd处理浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时生长未受影响,在Cd处理浓度为 $2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时生物量显著增加,单株生物量最高可达 97.32 g 。张路等^[18]指出,Cd安全材料生物量随Cd处理浓度增加显著降低,在Cd处理浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时为 $38.28\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$,可见本研究中杂交组合生物量更具优势。杂交组合生物量的优势也促进了其产量的提升,除组合E外,其余杂交组合在Cd胁迫下的单株产量均显著高于亲本。亲本Cd积累特征直接影响杂交组合Cd吸收量,选择籽粒低积累亲本有利于减少组合品种Cd含量^[19]。本研究中,糙米Cd含量的杂种优势在组合间差异较大,组合5406A/雅恢2816和C268A/雅恢2816糙米的Cd含量显著低于亲本,具有较大的杂种负优势。基于品种间的差异,众多学者利用不同的作图群体定位到了一些影响水稻Cd积累能力的QTL,但因材料与部位不同差异较大^[20-21]。Yao等^[22]研究表明,杂交稻籽粒Cd积累量主要由基因的加性效应引起。但也有研究指出,杂种的性状由双亲共同决定,基因表达的差异是表型多样性的重要来源,优势杂种基因的平均表达量高于无优势的杂种,认为杂种优势与基因的非加性表达有关^[23-24]。可见,分子水平上基因表达模式的差异与杂种后代的表型性状密切相关,后期可通过联合QTL作图等手段对杂种后代基因差异表达模式深入研究,揭示杂种优势形成的分子基础。

本研究中,亲本及杂交组合各部位Cd含量均表现为根系最高而穗部最低,且杂交组合根系Cd积累量分配比例高于亲本。He等研究表明,水稻籽粒Cd含量主要受根系吸收以及由木质部与韧皮部向地上部转运的影响^[25]。细胞壁作为重金属进入植物的第一道屏障,能够固定进入植株的Cd降低其活性,Cd超

表5 Cd胁迫下水稻生物量、产量、糙米Cd含量杂种优势(%)
Table 5 Heterosis analysis of rice biomass, yields, and brown rice Cd content(%)

Cd处理 Cd treatment	生物量 Biomass				产量 Yield				Cd含量 Cd content			
	B	C	D	E	B	C	D	E	B	C	D	E
Cd1	60.66	89.63	54.83	47.31	16.78	23.97	16.71	-11.80	42.86	-42.86	-14.29	14.29
Cd2	54.97	75.19	56.58	46.99	11.73	41.76	26.42	-12.46	0.00	-40.91	-13.64	4.55
Cd4	24.77	43.37	39.72	21.86	14.52	50.71	19.34	-13.18	-4.00	4.00	8.00	-4.00

富集植物东南景天根部吸收的 Cd 有 61.13%~63.14% 分布于细胞壁中, 蓖麻根系对 Cd 的积累能力显著高于其他部位, 细胞中的 Cd 主要分布于可溶部分, 细胞壁次之^[26-28]。对水稻的研究也有相似的结果, Cd 的亚细胞分布表现为可溶部分>细胞壁>细胞器^[29]。这可能由于不同植物对 Cd 的解毒机制存在差异所导致。在本研究中, 杂交后组合 5406A/雅恢 2816 根系对 Cd 的吸收能力增强, 但 Cd 由根系向地上部的转移系数降低, 从而降低了 Cd 对地上部的毒害, 液泡的区隔化作用可能是导致其耐性较强的原因。对于 C268A/雅恢 2816 而言, 杂交后根系对 Cd 的吸收能力减弱, 其穗部 Cd 含量较低的原因可能在于根系对 Cd 的限制吸收作用。对水稻 Cd 胁迫应答分子机制的报道指出, 细胞壁的吸附、液泡的隔离以及转运蛋白运输对限制 Cd²⁺的吸收和向地上部的转移有积极作用。定位于水稻根系液泡膜上的基因 *OsHMA3* 以及其同源基因 *OsHMA2* 可通过将 Cd²⁺从细胞质转运并隔离于液泡, 以及参与 Cd 向木质部的装载并由地下部向地上部的转运控制籽粒 Cd 含量^[30-31]。Shimpei 等^[32]证实, 低亲和性阳离子转运蛋白 *OsLCT1* 在 Cd²⁺的运输过程中能够减少 Cd 由韧皮部向籽粒的转运。因此, 对现有材料进行与籽粒 Cd 低积累相关分子机制的研究, 进一步发掘与 Cd 含量相关的基因并了解其功能对遗传改良和选育低 Cd 品种具有重要意义。

4 结论

在 Cd 处理浓度为 1 mg·kg⁻¹ 和 2 mg·kg⁻¹ 的条件下, 杂交组合正常生长且生物量超亲优势显著。水稻亲本及杂交组合均呈现穗部最低的 Cd 积累特征, 杂交后组合 5406A/雅恢 2816 根系对 Cd 的滞留作用增强, 而组合 C268A/雅恢 2816 根系对 Cd 的吸收减弱, 穗部 Cd 含量显著低于亲本。当 Cd 处理浓度为 1 mg·kg⁻¹ 和 2 mg·kg⁻¹ 时, 杂交组合 5406A/雅恢 2816 和 C268A/雅恢 2816 糙米中 Cd 含量达到食品安全国家标准(<0.2 mg·kg⁻¹), 在中、轻度 Cd 污染农田的安全生产上具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] 唐 非, 雷 鸣, 唐 贞, 等. 不同水稻品种对镉的积累及其动态分布[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6):1092-1098.
TANG Fei, LEI Ming, TANG Zhen, et al. Accumulation characteristic and dynamic distribution of Cd in different genotypes of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 1092-1098.
- [2] 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]. *Biometals*, 2004, 17:549-553.
- [3] Liu J G, Qian M, Cai G L, et al. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(Suppl 1/2):443-447.
- [4] Bing L, Xun W, Qi X, et al. Identification of rice cultivars with low brown rice mixed cadmium and lead contents and their interactions with the micronutrients iron, zinc, nickel and manganese[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(10):1790-1798.
- [5] 刘建国, 李坤权, 张祖建. 水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2):291-294.
LIU Jian-guo, LI Kun-quan, ZHANG Zu-jian. Difference of lead uptake and distribution in rice cultivars and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2):291-294.
- [6] 郑 陶, 李廷轩, 张锡洲, 等. 水稻 Cd 高积累品种对 Cd 的富集特性[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7):1492-1500.
ZHENG Tao, LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou, et al. Accumulation characteristics of cadmium-accumulated rice cultivars with high cadmium accumulation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(7):1492-1500.
- [7] 李 军, 梁吉哲, 刘侯俊, 等. Cd 对不同品种水稻微量元素累积特性及其相关性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3):441-447.
LI Jun, LIANG Ji-zhe, LIU Hou-jun, et al. Influence of Cd on microelements accumulation and their correlation in different rice cultivars of Northeastern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3):441-447.
- [8] Liu J G, Liang J S, Li K Q, et al. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9):1467-1473.
- [9] Wu F B, Dong J, Qian Q Q, et al. Subcellular distribution and chemical form of Cd and Cd-Zn interaction in different barley genotypes[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(10):1437-1446.
- [10] 曹应江, 游书梅, 蒋开锋, 等. 籼型三系杂交稻稻米中重金属镉含量的杂种负优势效应及配合力、遗传力分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3):668-671.
CAO Ying-jiang, YOU Shu-mei, JIANG Kai-feng, et al. Analysis of heterosis, combining ability and heritability of cadmium content in brown rice of tri-line indica hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3):668-671.
- [11] 赵步洪, 张洪熙, 奚岭林, 等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3):306-312.
ZHAO Bu-hong, ZHANG Hong-xi, XI Ling-lin, et al. Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice[J]. *Chin J Rice Sci*, 2006, 20(3):306-312.
- [12] McGrath S P, Lombi E, Gray C W, et al. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators *Thlaspi caerulescens* and *Arabidopsis halleri*[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141:115-125.
- [13] 程龙玲, 周守标, 吴晓艳, 等. 弯囊苔草对 Cd 胁迫的响应及其 Cd

- 富集能力的研究[J]. 中国草地学报, 2012, 34(2):16-22.
- CHENG Long-ling, ZHOU Shou-biao, WU Xiao-yan, et al. Studies on responses of *Carex dispalata* to Cd stress and its accumulation ability[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(2):16-22.
- [14] 桑世飞, 王会, 梅德胜, 等. 利用全基因组 SNP 芯片分析油菜遗传距离与杂种优势的关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12):2469-3478.
- SANG Shi-fei, WANG Hui, MEI De-sheng, et al. Correlation analysis between heterosis and genetic distance evaluated by genome-wide SNP chip in *Brassica napus*[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12):2469-3478.
- [15] 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 Xi-zhou, ZHANG Hong-jiang, LI Ting-xuan, 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.
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB 2762—2012 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Ministry of Health of PRC. GB 2762—2012 National food safety standard: Limits of contaminants in food[S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [17] 张涛, 倪先林, 蒋开锋, 等. 水稻功能基因标记遗传距离与杂种优势的相关性研究[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(6):567-572.
- ZHANG Tao, NI Xian-lin, JIANG Kai-feng, et al. Correlation between genetic distance based on molecular markers of functional genes and heterosis in rice[J]. *Chin J Rice Sci*, 2009, 23(6):567-572.
- [18] 张路, 张锡洲, 李廷轩, 等. Cd 胁迫对水稻亲本材料 Cd 吸收分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2288-2295.
- ZHANG Lu, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. Effects of cadmium stress on uptake and distribution of cadmium in different rice varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2288-2295.
- [19] 张路, 张锡洲, 李廷轩, 等. 水稻镉安全亲本材料对镉的吸收分配特性[J]. 中国农业科学, 2015, 48(1):174-184.
- ZHANG Lu, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. Cd uptake and distribution characteristics of Cd pollution-safe rice materials[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(1):174-184.
- [20] Satoru I, Noriharu A, Masahiro Y. Chromosomal regions with quantitative trait loci controlling cadmium concentration in brown rice (*Oryza sativa*)[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2):345-350.
- [21] Xue D, Chen M, Zhang G. Mapping of QTLs associated with cadmium tolerance and accumulation during seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Euphytica*, 2009, 165(3):587-596.
- [22] Yao W Y, Sun L, Zhou H, et al. Additive, dominant parental effects control the inheritance of grain cadmium accumulation in hybrid rice[J]. *Molecular Breeding*, 2015, 35(1). doi10.1007/S11032-015-0246-0
- [23] Auger D L, Gray A D, Ream T S, et al. Nonadditive gene expression in diploid and triploid hybrids of maize[J]. *Genetics*, 2005, 169(1):389-397.
- [24] Ju C L, Zhang F, Gao Y F, et al. Cloning, chromosome mapping and expression analysis of an *R2R3-MYB* gene under-expressed in maize hybrid[J]. *Molecular Biology Reports*, 2006, 33(2):103-110.
- [25] He J Y, Zhu C, Ren Y F, et al. Genotypic variation in grain cadmium concentration of lowland rice[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2006, 169(5):711-716.
- [26] 于辉, 杨中艺, 杨知建, 等. 不同类型镉积累水稻细胞镉化学形态及亚细胞和分子分布[J]. 应用生态学报, 2008, 19(10):2221-2226.
- YU Hui, YANG Zhong-yi, YANG Zhi-jian, et al. Chemical forms and subcellular and molecular distribution of Cd in two Cd-accumulation rice genotypes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10):2221-2226.
- [27] Ni T H, Zhang W Y. Subcellular distribution of cadmium in mining ecotype *Sedum alfredii*[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(8):925-928.
- [28] 陈亚慧, 刘晓宇, 王明新, 等. 蓖麻对镉的耐性、积累及与镉亚细胞分布的关系[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9):2440-2446.
- CHEN Ya-hui, LIU Xiao-yu, WANG Ming-xin, et al. Cadmium tolerance, accumulation and relationship with Cd subcellular distribution in *Ricinus communis* L.[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9):2440-2446.
- [29] He J Y, Zhu C, Ren Y F, et al. Uptake, subcellular distribution, and chemical forms of cadmium in wide-type and mutant rice[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(3):371-377.
- [30] Tezuka K, Miyadate H, Katou K, et al. A single recessive gene controls cadmium translocation in the cadmium hyperaccumulating rice cultivar Cho-Ko-Koku[J]. *Theoretical & Applied Genetics*, 2010, 120(6):1175-1182.
- [31] Satoh-nagasawa N, Mori M, Nakazawa N, et al. Mutations in rice (*Oryza sativa*) heavy metal ATPase 2 (*OsHMA2*) restrict the translocation of zinc and cadmium[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2012, 53(1):213-224.
- [32] Shimpei U, Takehiro K, Takuya S, et al. Low-affinity cation transporter (*OsLCT1*) regulates cadmium transport into rice grains[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(52):20959-20964.