

超远缘杂交水稻品种及土壤改良措施对 稻米吸收镉的影响

曾松亭¹, 杨宁², 何觉民³

(1 中国水稻研究所, 浙江 杭州 311400; 2 湖南环境生物职业技术学院 园林学院, 湖南 衡阳 421005;
3 深圳前海觉民科技有限公司 湛江实验室, 广东 湛江 524015)

[摘要] **【目的】**探讨超远缘杂交不同水稻品种和不同土壤改良措施对稻米吸收镉(cadmium, Cd)的影响, 为土壤改良措施治理Cd污染农田土壤的田间效应与低Cd积累水稻材料的育种研究提供支撑和理论依据。**【方法】**采用田间试验法, 以西瓜芝麻稻17Z2028、西瓜稻90-11抗、西瓜稻90-11-6和西瓜稻90-11等4个超远缘杂交水稻品种为研究对象, 通过对其早稻和晚稻稻米Cd含量及农艺性状的测定, 分析不同水稻品种对Cd吸收能力的差异; 同时以西瓜芝麻稻17Z2028为例, 比较石灰、生物炭、复合肥+矿物肥和石灰+生物炭4种土壤改良措施对土壤理化性质(pH值、土壤有机质含量和阳离子交换量)、土壤Cd含量、稻米Cd含量和稻米Cd富集系数的影响; 最后对西瓜芝麻稻17Z2028进行基因检测。**【结果】**超远缘杂交新种质有利于降低稻米Cd含量, 4个超远缘杂交品种早稻的稻米Cd含量为0.088~0.095 mg/kg, 晚稻的稻米Cd含量为0.100~0.108 mg/kg, 均未超过国家标准0.200 mg/kg, 且显著低于早稻湘早45的稻米Cd含量(0.578 mg/kg)和晚稻湘早45的稻米Cd含量(0.589 mg/kg)。4个超远缘杂交水稻品种的株高显著大于湘早45, 而根长、根表面积和根体积则显著小于湘早45。与常规栽培比较, 施用石灰等4种土壤改良处理能显著降低稻米Cd含量和Cd富集系数, 早稻的稻米Cd含量和Cd富集系数分别降低56.522%~71.739%和51.626%~63.821%, 而晚稻分别降低59.615%~72.115%和55.091%~64.182%; 晚稻品种稻米Cd含量和Cd富集系数显著高于相同的早稻品种。稻米Cd含量与土壤pH值呈极显著负相关, 与土壤有机质含量和阳离子交换量呈显著负相关, 而与土壤总Cd含量呈显著正相关, 与土壤有效Cd含量呈极显著正相关。超远缘杂交水稻品种的基因测序说明超远缘杂交有利于培育低Cd水稻新种质。**【结论】**超远缘杂交水稻品种的应用、土壤改良措施的合理使用以及“晚稻优先于早稻”的治理思路, 能有效降低稻米Cd含量并降低治理成本。

[关键词] 超远缘杂交水稻; 镉; 土壤改良措施; 稻米Cd富集系数

[中图分类号] X171; S511

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2027)03-0127-12

Effects of super-distant hybrid rice cultivars and soil amelioration measures on cadmium (Cd) accumulation in rice grains

Zeng Songting¹, Yang Ning², He Juemin³

(1 China National Rice Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 311400, China;

2 College of Landscape Architecture, Hunan Polytechnic of Environment and Biology, Hengyang, Hunan 421005, China;

3 Zhanjiang Laboratory, Shenzhen Qianhai Juemin Technology Company, Zhanjiang, Guangdong 524015, China)

Abstract: 【Objective】 The study aims to explore the effects of super-distant hybrid rice cultivars and different soil amelioration measures on Cd accumulation in rice grains. The findings can provide support and a theoretic-

[收稿日期] 2026-01-04 **[修回日期]** 2026-02-10

[基金项目] 广东省农业攻关项目(2009B020303009); 湖南省财政厅项目(湘财资环指[2023]5号); 衡阳市科技计划项目(202150083609)

[作者简介] 曾松亭(1971—), 男, 湖南蓝山人, 博士, 主要从事农业经济管理与作物育种研究。E-mail: yangning8787@sina.com

[通信作者] 何觉民(1952—), 男, 湖南新化人, 教授, 硕士, 主要从事作物遗传育种研究。E-mail: xqzml1@163.com

cal basis for evaluating field effects of soil amelioration measures in remediating Cd-contaminated farmland soils, as well as for breeding research on low-Cd-accumulation rice materials. 【Method】 Field experiments were carried out with four super-distant hybrid rice cultivars, namely Watermelon sesame rice 17Z2028, Watermelon rice 90-11 kang, Watermelon rice 90-11-6 and Watermelon rice 90-11 as test materials. By determining Cd content and agronomic traits of grains from early and late rice crops, differences in Cd uptake capacity among these cultivars were analyzed. Taking Watermelon sesame rice 17Z2028 as an example, the effects of four soil amelioration measures-lime, biochar, compound fertilizer combined with mineral fertilizer, and lime combined with biochar on soil physicochemical properties (pH, soil organic matter and cation exchange capacity), soil Cd content, grain Cd content and Cd enrichment coefficient of grain were further compared. Finally, genetic detection was performed on this cultivar. 【Result】 New germplasms derived from super-distant hybridization effectively decreased Cd content in rice grains. For the four tested cultivars, Cd concentrations were 0.088—0.095 mg/kg in early rice grains and 0.100—0.108 mg/kg in late rice grains. All values were below the national standard limit of 0.200 mg/kg, and significantly lower than those of Xiangzao 45, which recorded 0.578 mg/kg in early rice and 0.589 mg/kg in late rice. The four super-distant hybrid rice cultivars exhibited significantly taller plant height but shorter root length, smaller root surface area and root volume compared with Xiangzao 45. Compared to conventional cultivation, the four soil amelioration treatments including lime markedly reduced grain Cd content and Cd enrichment coefficient. For early rice, the two indicators decreased by 56.522%—71.739% and 51.626%—63.821%, while the corresponding reductions for late rice were 59.615%—72.115% and 55.091%—64.182%. In addition, grain Cd content and Cd enrichment coefficient were significantly higher in late rice than in the corresponding early rice cultivars. Grain Cd content showed an extremely significant negative correlation with soil pH. It was, significantly negatively correlated with soil organic matter and cation exchange capacity, significantly positively correlated with total soil Cd, and had an extremely significant positive correlation with soil available Cd content. Genetic sequencing of super-distant hybrid rice cultivars explained that super-distant hybridization facilitates the breeding of new low-Cd rice germplasms. 【Conclusion】 The application of super-distant hybrid rice cultivars, proper use of soil amelioration measures and the management strategy of prioritizing late rice over early rice can effectively reduce grain Cd content and cut remediation costs.

Key words: super-distant hybrid rice; cadmium (Cd); soil amelioration measures; Cd enrichment coefficient

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国仅次于玉米的第二大粮食作物,保障其安全高产对我国粮食稳产、食品安全和人体健康等具有重大意义。如今我国土壤重金属特别是Cd污染已成为重要的环境问题,使水稻安全生产形势变得十分严峻^[1]。在干旱、洪水与热浪等极端天气等影响下,水旱灾害反常性增强,严重影响我国水稻的产量和品质,以休耕Cd污染稻田,辅之以国外进口粮食来实现我国粮食安全的目的是不可行的^[2-3]。因此,开展Cd污染稻田的稻米Cd调控研究,对于保障我国粮食安全迫在眉睫。国内外大量学者研究指出,以土壤钝化和生理阻隔为出发点,Cd低积累品种、土壤改良措施以及适当的农艺措施联合使用是解决当前大面积“Cd大米”问题的重要途径之一^[1,4]。已有研究表明,不同品种稻米中对Cd的吸收和积累存在显著差异,不同水稻品种或基因类型对Cd的耐性不同,从而对Cd

的吸收和积累差异很大^[5-6];基因*OsHMA2*的表达可降低稻米Cd含量^[7];控制Cd从节点向稻米转化的转移蛋白*OsLCT1*基因表达会提高稻米Cd积累^[8]。外界因素包括土壤理化性质和农艺管理措施等对稻米Cd含量也存在一定影响。王一志等^[9]和董霞等^[10]研究表明,土壤pH、有效态Cd含量和土壤质地等均对稻米Cd含量存在影响;Zhang等^[11]和李磊明^[12]的研究发现,施用Si肥可促进作物生长,增强作物抗逆能力,在保证水稻产量的同时还可以显著降低稻米Cd的累积。目前大多数对Cd低积累水稻品种的研究主要针对单一稻季或单一污染程度不同品种的筛选,以及相应栽培管理措施的优化,很少针对大田环境下不同当地主栽品种之间Cd累积程度的研究,具有相对的局限性。同时农民的种植习惯、水稻本身的产量以及水稻田土壤Cd含量的空间分布差异等因素,都会影响Cd低积累品种的推

广泛应用。因此从大田实际种植的主栽品种中筛选Cd低积累品种具有很重要的应用价值。

前期对湖南省岳阳市湘阴县水稻田土壤的调查结果表明,水稻田表层土壤(0~20 cm)Cd含量超标点数已近85%,超标含量在0.328~1.895 mg/kg,处于轻中度污染程度,另外湘阴县水稻田土壤酸化严重,土壤Cd的生物有效性偏高,因此针对湖南省湘阴县轻中度Cd污染酸性稻田土壤特点,筛选Cd低积累主栽品种,改变土壤Cd的有效性,降低稻米对土壤Cd吸收是控制稻米Cd含量的关键。基于以上目标,本研究在湖南省湘阴县Cd污染土壤中进行了大田超远缘杂交低Cd水稻主栽品种的采样调查,同时对典型低Cd水稻品种进行了石灰、生物炭、复合肥+矿物肥、石灰+生物炭等土壤改良措施大田试验,以及对典型主栽品种超远缘杂交水稻种子的基因进行检测,以期为土壤改良措施治理Cd污染农田土壤的田间效应与低Cd积累水稻材料的育种研究提供支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及样品采集方法

本研究在湖南省岳阳市湘阴县杨林寨乡(112°55'46" E, 28°48'08" N)水稻主栽区随机采集4个村20户农户的5个主栽品种,分别为早、晚稻2季的西瓜芝麻稻17Z2028、西瓜稻90-11抗、西瓜稻90-11-6、西瓜稻90-11等4个超远缘杂交水稻品种以及湘早45(CK)。调查区水稻田2022年0~20 cm土层土壤检测结果为土壤有机质含量25.98 g/kg, pH值5.45, 阳离子交换量5.84 cmol/kg, 全氮含量2.42 g/kg, 全磷含量0.50 g/kg, 全钾含量13.00 g/kg, 有效磷含量4.27 mg/kg, 有效钾含量57.95 mg/kg, 土壤全Cd和有效态Cd含量分别为0.40和0.22 mg/kg。

1.2 试验设计

1.2.1 超远缘杂交不同水稻品种对稻米吸收Cd的影响试验 试验田选择在杨林寨乡某村,总面积1 hm²,早稻与晚稻2季在同一试验田分别设置西瓜芝麻稻17Z2028、西瓜稻90-11抗、西瓜稻90-11-6、西瓜稻90-11等4个超远缘杂交水稻品种和湘早45(CK1)5个处理,每个处理0.2 hm²,且连成一片,不同处理用高30 cm且包裹塑料薄膜的田埂隔开,同一处理不分区。田间随机调查分3个区域,每个区域面积为30 m²,各区稻米采集采用5点混合法。田块管理按常规栽培习惯。参照农业部农作物品种

区域试验技术规范NY/T 1300—2007调查5个处理水稻品种的株高、千粒质量、有效穗数、结实率、产量、根长、根表面积、根体积等农艺性状。

1.2.2 不同土壤改良措施对稻米吸收Cd的影响试验 同样选择在杨林寨乡某村的水稻田开展大田试验,以具有典型代表性的超远缘杂交水稻品种西瓜芝麻稻17Z2028为研究对象,在其早稻与晚稻2季分别设置常规栽培(CK2)、石灰、生物炭、复合肥+矿物肥和石灰+生物炭5个处理。其中石灰处理是在插秧前10~15 d,按150 kg/hm²施入CaO(pH值为12.26)后翻耕土壤,确保在犁田(或打田)过程中混合均匀;生物炭处理是在插秧前10~15 d,按1 000 kg/hm²用量均匀撒播生物炭(生物炭种类为煅烧温度400~450 °C的水稻秸秆)后翻耕土壤,并确保在犁田(或打田)过程中混合均匀;复合肥+矿物肥处理是400 kg/hm²35%复合肥(N、P和K质量比18:8:9)与1 500 kg/hm²多元素微孔矿物肥(含有植物生长必需元素K、Si、Ca、Fe、Mg、B等)混合均匀,作底肥撒施后翻耕土壤;石灰+生物炭处理是在插秧前10~15 d翻耕土壤,同时按150 kg/hm²撒播CaO(pH值为12.26)和1 000 kg/hm²生物炭(生物炭种类为煅烧温度400~450 °C的水稻秸秆),并确保在犁田(或打田)时混合均匀。其它水分、农药和化肥管理按照常规水稻栽培方式^[13-14]。

试验采用随机区组排列,面积均为120 m²,每个处理重复3次,各处理用高30 cm且包裹塑料薄膜的田埂隔开,各处理间采用单灌单排,严控串灌,各区稻米和0~20 cm土层土壤样品的采集采用5点混合法。

1.3 样品采集及测定

在每个试验小区采用5点取样法取0~20 cm土层500 g新鲜土壤,自然风干,土壤样品共取3次,取样时间分别在早稻移栽前、早稻收获后(晚稻移栽前)和晚稻收获后。

土壤总Cd和有效Cd含量分别用HCl-HNO₃-HClO₄-HF四酸消解和DTPA-CaCl₂-TEA缓冲溶液浸提后,采用电感耦合等离子体光谱仪分析法(GB/T 17141—1997)^[15]测定。土壤理化性质测定参照文献[16]的方法:土壤有机质含量采用K₂Cr₂O₇容量法测定,土壤离子交换量采用1 mol/L CH₃COONH₄交换法测定,土壤pH测定采用电点法,土水比为1:2.5。

在早、晚2季稻谷成熟期,于每个试验小区采用5点取样法采集500 g稻谷样品,晒干,共取3次。稻

米 Cd 含量采用体积比为 4:1 的 $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ (优级纯)微波消解后,用电感耦合等离子体光谱仪分析法(GB 5009.15—2014)测定^[17]。

1.4 Cd 富集系数计算公式

稻米 Cd 富集系数一般用于描述复杂田间条件下,受多种因素影响后稻米积累 Cd 的综合能力^[18]。早(晚)稻稻米 Cd 富集系数=早(晚)稻稻米 Cd 含量/早(晚)稻移栽前土壤有效 Cd 含量。

1.5 西瓜芝麻稻 17Z2028 的基因检测

1.5.1 基因组的提取与测序 使用 BGISEQ-500 平台,选取广东海洋大学水稻纲间杂交种西瓜芝麻稻 17Z2028 种子及其母本 Y 两优 900 种子送深圳华大基因股份有限公司进行检测,每个样品产出 64.67 M 数据。采用华大自主研发的过滤软件 SOAPnuke 对原始数据进行过滤,过滤掉低质量 reads 和有引物污染的 reads,获得高质量的 clean reads。使用比对软件 BWA (Burrows-Wheeler Aligner) (bwa-mem2 v2.2)将 clean reads 比对到参考基因组(西瓜芝麻稻 17Z2028 参考基因组为水稻和西瓜)上,同时使用远程扫描电子显微镜(remote scanning electron microscopy, RSEM)计算基因和转录本的表达水平。

1.5.2 单核苷酸多态性和插入与缺失的调用分析 使用 BWA 的 MEM 算法,将每个 clean reads 映射到水稻和西瓜参考基因组(平均映射率和参考基因组平均覆盖率分别为 97.23% 和 26 倍),使用综合基因组观察(integrative genomics viewer, IGV)工具对 clean reads 进行不同尺度下的可视化,查看 reads 在外显子、内含子、非翻译区(untranslated region, UTR)、基因间区的分布情况,以及外显子间的 junction 检测与 reads 支持情况。同时对映射结果排序,重复读取使用序列比对工具(sequence alignment/map tools, SAMtools)(v1.9)进行 rmdup。西瓜芝麻稻 17Z2028 中的单核苷酸多态性(single nucleotide polymorphism, SNP)和插入与缺失(insertion and deletion, InDel),使用基因组分析工具包(Genome Analysis Toolkit, GATK)中的单倍型调用程序模块进行调用,并使用以下参数进行过滤: $\text{QD} < 2.0 || \text{MQ} < 40.0 || \text{FS} > 60.0 || \text{质量} < 30.0 || \text{MQrankSum} < -12.5 || \text{ReadPosRankSum} < -8.0 - \text{clusterSize} 2 - \text{clusterWindowSize} 5$ 。GATK 鉴定的 SNP 被进一步过滤获取次要等位基因频率 $> 3\%$,且缺失数据 $< 15\%$ 高质量的 SNP。使用 snpEff 软

件^[19]在参考基因组的基础上进行 SNP 注释,将 SNP 分为基因间区域、上游或下游区域、外显子或内含子,编码外显子中的 SNP 进一步分为同义 SNP 或非同义 SNP。外显子中的 InDels 根据其是否导致移码进行分组。

1.6 数据处理

所有试验数据计算采用 Excel 2013 软件和 SPSS 26.0 软件进行,采用 One-way ANOVA 和 LSD 比较不同数据间的差异($\alpha = 0.05$),相关分析采用 Pearson 系数法,并在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平检验相关系数的显著性。所有试验数据均用 3 次重复的“平均值±标准差”形式表达。

2 结果与分析

2.1 不同品种稻米 Cd 含量及农艺性状的比较

2.1.1 稻米 Cd 含量 由表 1 可以看出,在西瓜芝麻稻 17Z2028、西瓜稻 90-11 抗、西瓜稻 90-11-6、西瓜稻 90-11 等 4 个超远缘杂交水稻品种中,早稻稻米 Cd 含量为 0.088~0.095 mg/kg,均值为 0.092 mg/kg,远低于稻米 Cd 国家标准 0.200 mg/kg,显著低于早稻湘早 45(CK1)的稻米 Cd 含量($P < 0.05$);同理,晚稻稻米 Cd 含量为 0.100~0.108 mg/kg,均值为 0.104 mg/kg,远低于稻米 Cd 国家标准,显著低于晚稻湘早 45(CK1)的稻米 Cd 含量($P < 0.05$);晚稻稻米 Cd 含量均显著高于相同的早稻品种($P < 0.05$),西瓜芝麻稻 17Z2028、西瓜稻 90-11 抗、西瓜稻 90-11-6、西瓜稻 90-11 和湘早 45(CK1)的晚稻稻米 Cd 含量分别为相同品种早稻稻米 Cd 的 1.120, 1.137, 1.136, 1.290 和 1.019 倍。以上结果说明,不同品种之间稻米 Cd 含量差异明显,超远缘杂交水稻品种的稻米 Cd 含量远低于稻米国家标准,显著低于湘早 45(CK1)的稻米 Cd 含量($P < 0.05$);相同品种晚稻稻米 Cd 含量显著高于相同品种的早稻($P < 0.05$)。

2.1.2 不同水稻品种的农艺性状 由表 2 可知,无论是早稻还是晚稻,不同水稻品种的农艺性状存在差异,西瓜芝麻稻 17Z2028、西瓜稻 90-11 抗、西瓜稻 90-11-6、西瓜稻 90-11 等 4 个西瓜稻品种的株高显著大于湘早 45(CK1)($P < 0.05$),而湘早 45(CK1)的根长、根表面积和根体积均显著大于西瓜芝麻稻 17Z2028、西瓜稻 90-11 抗、西瓜稻 90-11-6、西瓜稻 90-11 等 4 个西瓜稻品种($P < 0.05$),千粒质量的大小顺序为西瓜稻 90-11-6 > 西瓜稻 90-11 > 西瓜稻 90-11 抗(或湘早 45(CK1)) > 西瓜芝麻稻 17Z2028。

表 1 不同水稻品种稻米 Cd 含量的比较

Table 1 Comparison of Cd content in grains among different rice cultivars

mg/kg

稻季 Rice season	西瓜芝麻稻 17Z2028 Watermelon sesame rice 17Z2028	西瓜稻 90-11 抗 Watermelon rice 90-11 kang	西瓜稻 90-11-6 Watermelon rice 90-11-6	西瓜稻 90-11 Watermelon rice 90-11	湘早 45(CK1) Xiangzao 45(CK1)
早稻 Early rice	0.092±0.002 Bb	0.095±0.003 Bb	0.088±0.001 Cb	0.093±0.001 Bb	0.578±0.003 Ab
晚稻 Late rice	0.103±0.001 Ca	0.108±0.002 Ba	0.100±0.003 Ca	0.105±0.000 Ba	0.589±0.004 Aa

注:同行数据后标不同大写字母表示不同水稻品种差异显著($P<0.05$),同列数据后标不同小写字母表示不同稻季间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters in the same row indicate significant differences among rice cultivars ($P<0.05$). Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between rice seasons($P<0.05$).

表 2 不同水稻品种的农艺性状

Table 2 Agronomic traits of different rice cultivars

稻季 Rice season	水稻品种 Rice cultivar	株高/cm Plant height	千粒质量/g Thousand-grain weight	有效穗数/ ($\times 10^4 \cdot 667\text{m}^{-2}$) Effective panicle number	结实率/% Seed setting rate
早稻 Early rice	西瓜芝麻稻 17Z2028 Watermelon sesame rice 17Z2028	115.452±5.001 Aa	20.580±0.892 Ea	24.780±0.282Aa	80.315±7.322 Bb
	西瓜稻 90-11 抗 Watermelon rice 90-11 kang	117.643±4.980 Aa	24.785±0.743 Ca	24.987±0.353 Aa	79.890±5.494 Bb
	西瓜稻 90-11-6 Watermelon rice 90-11-6	118.248±7.091 Aa	26.583±0.835 Aa	23.345±0.276 Ba	80.027±4.993 Bb
	西瓜稻 90-11 Watermelon rice 90-11	119.671±6.036 Aa	25.931±0.545 Ba	23.532±0.840 Ba	79.865±6.876 Bb
	湘早 45(CK1) Xiangzao 45 (CK1)	99.230±5.004 Ba	23.352±0.490 Ca	24.636±0.564 Aa	79.993±7.353 Bb
	西瓜芝麻稻 17Z2028 Watermelon sesame rice 17Z2028	115.379±8.218 Aa	21.498±0.501 Da	23.723±0.346 Bb	88.569±6.987 Aa
晚稻 Late rice	西瓜稻 90-11 抗 Watermelon rice 90-11 kang	116.345±7.383 Aa	23.990±0.753 Ca	25.004±0.269 Aa	87.963±7.893 Aa
	西瓜稻 90-11-6 Watermelon rice 90-11-6	119.643±6.537 Aa	26.005±0.815 Aa	23.163±0.540 Ba	88.001±8.001 Aa
	西瓜稻 90-11 Watermelon rice 90-11	118.696±4.876 Aa	25.743±0.557 Ba	23.742±0.327 Ba	87.995±7.812 Aa
	湘早 45(CK1) Xiangzao 45 (CK1)	98.671±5.373 Ba	23.978±0.396 Ca	24.581±0.264 Aa	88.123±8.125 Aa
稻季 Rice season	水稻品种 Rice cultivar	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield	根长/cm Root length	根表面积/ cm^2 Root surface area	根体积/ cm^3 Root volume
早稻 Early rice	西瓜芝麻稻 17Z2028 Watermelon sesame rice 17Z2028	7 725.452±50.342 Cb	2 240.313±110.236 Ba	567.250±4.893 Ba	15.363±0.183 Da
	西瓜稻 90-11 抗 Watermelon rice 90-11 kang	7 525.966±48.323 Cb	2 213.640±112.054 Ba	574.122±5.006 Ba	16.005±0.455 Ca
	西瓜稻 90-11-6 Watermelon rice 90-11-6	7 668.474±57.315 Cb	2 187.915±108.956 Ca	569.331±4.425 Ba	15.899±0.342 Da
	西瓜稻 90-11 Watermelon rice 90-11	7 546.793±55.730 Cb	2 178.368±120.006 Ca	574.655±3.986 Ba	17.122±0.290 Ba
	湘早 45(CK1) Xiangzao 45 (CK1)	7 286.446±48.796 Db	3 214.251±111.487 Aa	624.687±5.787 Aa	20.343±0.265 Aa
	西瓜芝麻稻 17Z2028 Watermelon sesame rice 17Z2028	9 043.126±50.008 Aa	2 241.713±123.419 Ba	569.452±4.755 Ba	16.617±0.196 Ca
晚稻 Late rice	西瓜稻 90-11 抗 Watermelon rice 90-11 kang	8 990.351±49.767 Aa	2 199.835±115.356 Ba	570.473±4.657 Ba	15.986±0.201 Da
	西瓜稻 90-11-6 Watermelon rice 90-11-6	9 967.583±48.376 Aa	2 210.008±108.794 Ba	568.290±4.876 Ba	15.324±0.276 Da
	西瓜稻 90-11 Watermelon rice 90-11	8 979.924±51.084 Aa	2 189.346±154.156 Ca	568.154±5.001 Ba	16.123±0.287 Ca
	湘早 45(CK1) Xiangzao 45 (CK1)	8 686.893±49.873 Ba	3 203.454±108.696 Aa	619.897±4.736 Aa	21.345±0.306 Aa

注:同列数据后标不同大写字母表示同一农艺性状不同品种间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示相同水稻品种不同稻季间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters in the same column indicate significant differences for the same agronomic trait ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences between rice seasons for the same cultivar ($P<0.05$).

由表 2 可见,在早稻,西瓜芝麻稻 17Z2028、西瓜稻 90-11 抗和湘早 45(CK1)的有效穗数显著大于西瓜稻 90-11-6 和西瓜稻 90-11($P<0.05$);在晚稻,西瓜稻 90-11 抗和湘早 45(CK1)的有效穗数显著大于西瓜芝麻稻 17Z2028、西瓜稻 90-11-6 与西瓜稻 90-11($P<0.05$)。在西瓜芝麻稻 17Z2028、西瓜稻 90-11 抗、西瓜稻 90-11-6、西瓜稻 90-11 等 4 个西瓜稻和湘早 45(CK1)中,晚稻的结实率均显著大于早稻($P<0.05$);无论是早稻还是晚稻,4 个西瓜稻品种的产量显著高于湘早 45(CK1)($P<0.05$),晚稻的产量显著高于相同品种的早稻($P<0.05$)。

2.2 土壤改良措施对土壤理化性质和 Cd 含量及稻米 Cd 含量和富集系数的影响

2.2.1 土壤理化性质和 Cd 含量 由表 3 可以看出,以具有典型代表性的西瓜芝麻稻 17Z2028 为例,无论是其早稻还是晚稻,土壤改良处理后,土壤 pH

值、有机质含量和阳离子交换量较常规栽培(CK2)均不同程度增加。与常规栽培(CK2)相比,早稻和晚稻土壤 pH 值的上升幅度分别为 1.897%~24.936% 和 1.953%~24.863%,而施用石灰和石灰+生物炭处理土壤 pH 值显著高于 CK2($P<0.05$);除施用石灰处理外,生物炭、复合肥+矿物肥和石灰+生物炭处理早稻和晚稻土壤有机质含量的增加幅度分别为 6.379%~15.547% 和 6.171%~15.152%,土壤阳离子交换量的增加幅度分别为 8.385%~19.292% 和 8.735%~19.378%,均显著高于 CK2($P<0.05$)。

无论是其早稻还是晚稻,与 CK2 相比,土壤改良处理后,土壤总 Cd 含量不同程度降低,但不明显,而土壤有效 Cd 含量的降低幅度分别为 11.310%~28.082% 和 11.176%~29.452%,达显著水平($P<0.05$)(表 3)。

表 3 不同土壤改良措施对土壤理化性质和 Cd 含量的影响

Table 3 Effects of different soil amelioration measures on soil physicochemical properties and Cd content

处理 Treatment	指标 Index	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
石灰 Lime	pH	6.849±0.524 Aa	6.840±0.600 Aa
	有机质含量/(g·kg ⁻¹) Organic matter content	26.987±1.457 Ca	26.849±2.564 Ca
	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹) Cation exchange capacity	7.142±0.254 Aa	7.134±0.304 Aa
	土壤总 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Total soil Cd content	0.384±0.000 Aa	0.383±0.004 Aa
	土壤有效 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Soil available Cd content	0.146±0.002 Ca	0.147±0.001 Ca
生物炭 Biochar	pH	5.586±0.413 Ba	5.585±0.325 Ba
	有机质含量/(g·kg ⁻¹) Organic matter content	30.413±2.387 Aa	30.339±3.247 Aa
	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹) Cation exchange capacity	6.574±0.547 Ba	6.573±0.603 Ba
	土壤总 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Total soil Cd content	0.379±0.003 Aa	0.378±0.002 Aa
	土壤有效 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Soil available Cd content	0.168±0.000 Ba	0.170±0.001 Ba
复合肥+矿物肥 Compound fertilizer+ Mineral fertilizer	pH	5.700±0.419 Ba	5.694±0.523 Ba
	有机质含量/(g·kg ⁻¹) Organic matter content	28.000±3.475 Ba	27.973±2.649 Ba
	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹) Cation exchange capacity	6.489±0.657 Ba	6.498±0.537 Ba
	土壤总 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Total soil Cd content	0.385±0.004 Aa	0.384±0.002 Aa
	土壤有效 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Soil available Cd content	0.165±0.001 Ba	0.166±0.001 Ba
石灰+生物炭 Lime+Biochar	pH	6.782±0.005 Aa	6.779±0.537 Aa
	有机质含量/(g·kg ⁻¹) Organic matter content	30.127±3.000 Aa	30.000±3.547 Aa
	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹) Cation exchange capacity	7.132±0.542 Aa	7.111±0.428 Aa
	土壤总 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Total soil Cd content	0.378±0.002 Aa	0.379±0.003 Aa
	土壤有效 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Soil available Cd content	0.146±0.001 Ca	0.146±0.000 Ca
常规栽培(CK2) Conventional cultivation (CK2)	pH	5.482±0.346 Ba	5.478±0.275 Ba
	有机质含量/(g·kg ⁻¹) Organic matter content	26.321±2.549 Ca	26.347±2.641 Ca
	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹) Cation exchange capacity	5.987±0.437 Ca	5.976±0.527 Ca
	土壤总 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Total soil Cd content	0.387±0.003 Aa	0.387±0.002 Aa
	土壤有效 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Soil available Cd content	0.187±0.001 Aa	0.189±0.001 Aa

注:同列数据后标不同大写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P<0.05$),同行数据后标不同小写字母表示不同稻季间差异显著($P<0.05$)。表 4 同。

Note: Different uppercase letters in the same column indicate significant differences among treatments for the same index ($P<0.05$). Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between rice seasons ($P<0.05$). See table 4.

2.2.2 稻米 Cd 含量和富集系数 由表 4 可以看出,无论是西瓜芝麻稻 17Z2028 的早稻还是晚稻,各

土壤改良措施均显著降低稻米 Cd 含量。在早稻,石灰、生物炭、复合肥+矿物肥、石灰+生物炭 4 种措

施的稻米 Cd 含量分别比常规栽培(CK2)降低 71.739%,56.522%,59.783%和 67.391%,而晚稻则分别比 CK2 降低 72.115%,59.615%,62.500%和 68.269%。无论是在土壤改良措施还是 CK2 下,晚稻稻米 Cd 含量均显著高于早稻($P<0.05$)。

由表 4 还可以看出,不同土壤改良措施均能显著降低稻米 Cd 富集系数。与 CK2 相比,不同土壤

改良措施早稻和晚稻 Cd 富集系数分别比 CK2 降低 0.254~0.314 和 0.303~0.353,降幅分别为 51.626%~63.821%和 55.091%~64.182%,其中以施用石灰的 Cd 富集系数最低,早稻与晚稻 Cd 富集系数分别为 0.178 和 0.197。无论是在土壤改良措施还是 CK2 下,晚稻 Cd 富集系数均显著高于早稻($P<0.05$)。

表 4 不同土壤改良措施对稻米 Cd 含量和富集系数的影响

Table 4 Effects of different soil amelioration measures on Cd content and enrichment coefficient in rice grains

处理 Treatment	稻米 Cd 含量/(mg·kg ⁻¹) Cd content in rice grains		Cd 富集系数 Cd enrichment coefficient	
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
石灰 Lime	0.026±0.003 Eb	0.029±0.001 Da	0.178±0.007 Eb	0.197±0.003 Ea
生物炭 Biochar	0.040±0.002 Bb	0.042±0.000 Ba	0.238±0.004 Bb	0.247±0.001 Ba
复合肥+矿物肥 Compound fertilizer+Mineral fertilizer	0.037±0.004 Cb	0.039±0.003 Ba	0.224±0.000 Cb	0.235±0.002 Ca
石灰+生物炭 Lime+Biochar	0.030±0.001 Db	0.033±0.002 Ca	0.205±0.001 Db	0.226±0.000 Da
常规栽培(CK2) Conventional cultivation (CK2)	0.092±0.002 Ab	0.104±0.000 Aa	0.492±0.005 Ab	0.550±0.004 Aa

2.2.3 稻米 Cd 含量与土壤理化性质和 Cd 含量的相关性 由表 5 可以看出,稻米 Cd 含量与土壤 pH 值呈极显著负相关,与土壤有机质含量和阳离子交换量均呈显著负相关,而与土壤总 Cd 含量呈显著正相关,与土壤有效 Cd 含量呈极显著正相关;土壤 pH

值与土壤有机质含量呈显著负相关,与土壤有效镉含量呈极显著负相关;土壤有机质含量与土壤总 Cd 和有效 Cd 含量均呈显著负相关;阳离子交换量与土壤总 Cd 含量呈显著正相关;土壤总 Cd 含量与土壤有效 Cd 含量呈极显著正相关。

表 5 稻米 Cd 含量与土壤理化性质和 Cd 含量的相关性

Table 5 Correlation of grain Cd content with soil physicochemical properties and soil Cd content

变量 Variable	土壤 pH Soil pH	有机质 Organic matter	阳离子交换量 Cation exchange capacity	土壤总 Cd Total soil Cd	土壤有效 Cd Soil available Cd
稻米 Cd Grain Cd	-0.60**	-0.42*	-0.43*	0.42*	0.56**
土壤 pH Soil pH		-0.45*	0.29	0.18	-0.53**
有机质 Organic matter			0.20	-0.41*	-0.40*
阳离子交换量 Cation exchange capacity				0.40*	-0.20
土壤总 Cd Total soil Cd					0.53**

注:*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)。
Note: * indicates significant correlation at $P<0.05$, and ** indicates highly significant correlation at $P<0.01$.

2.3 西瓜芝麻稻 17Z2028 的基因检测

2.3.1 西瓜芝麻稻 17Z2028 基因测序情况 测序结果表明,对水稻基因序列,样品比对水稻基因组的平均比率为 84.31%,比对水稻基因集的平均比率为 68.29%,共检测到 31 791 个水稻基因;对西瓜基因序列,样品比对西瓜基因组的平均比率为 0.03%,比对西瓜基因集的平均比率为 0.02%,共检测到父本西瓜芝麻稻 17Z2028 有而母本 Y 两优 900 没有的 68 个来自西瓜的基因。

2.3.2 西瓜芝麻稻 17Z2028 基因测序定位到参考基因组情况 得到 clean reads 之后,将 clean reads 比对到参考基因组序列,参考基因组的比对统计结果见表 6。表 6 结果表明,相对参考物种西瓜而言,Y 两优 900 和西瓜芝麻稻 17Z2028 比对上参考基因组

的 clean reads 比例分别为 0.01% 和 0.05%,唯一比对上参考基因组某一位置的 clean reads 比例分别为 0.01% 和 0.03%;相对参考物种水稻而言,Y 两优 900 和西瓜芝麻稻 17Z2028 比对上参考基因组的 clean reads 比例分别为 84.92% 和 83.70%,唯一比对上参考基因组某一位置的 clean reads 比例分别为 66.52% 和 64.41%,样品间均匀的比对率表明样品之间的数据具有可比性。同时使用 IGV 工具对 clean reads 进行不同尺度下的可视化,查看 reads 在外显子、内含子、UTR、基因间区的分布情况,同时还可以绘制外显子间的 junction 检测与 reads 支持情况,由 IGV 工具比对西瓜芝麻稻 17Z2028 种子,测序定位到水稻和西瓜两个参考基因组,其在水稻和西瓜两个参考基因组样品中外显子间的 junction 检测

信息与 reads 支持数较均匀,说明其测序的随机性均较好。

进一步使用 BWA 将 clean reads 比对到参考基因组序列,之后再使用 RSEM 计算基因和转录本的表达水平,reads 对基因的比对率见表 6。从表 6 可知,相对参考物种西瓜而言,Y 两优 900 和西瓜芝麻稻 17Z2028 的 reads 比对上参考基因组的比例均为 0.02%,reads 比对上参考基因唯一位置的比例均为

0.01%;相对水稻而言,Y 两优 900 和西瓜芝麻稻 17Z2028 的 reads 比对上参考基因组的比例分别为 69.31% 和 67.27%,reads 比对上参考基因唯一位置的比例分别为 63.72% 和 62.15%,样品间均匀的比对率表明样品之间基因和转录本的表达水平具有可比性,为后续的生物信息学分析奠定了坚实基础。

表 6 参考基因组的比对和 reads 对基因的比对率

Table 6 Alignment to the reference genome and alignment rate of reads to genes

水稻品种 Rice cultivar	过滤后的 reads 总数 Total filtered reads	参考基因组的比对 Alignment to reference genome		read 对基因的比对率 Alignment rate of reads to genes		参考物种 Species
		比对上参考基 因组的 clean reads 比例/% Mapped clean reads	唯一比对上参考基 因组某一位置的 clean reads 比例/% Uniquely mapped clean reads	reads 比对上 参考基因组的 比例/% Mapping rate	reads 比对上参 考基因唯一位置 的比例/% Unique mapping rate	
Y 两优 900 Y Liangyou 900	64 645 000	0.01	0.01	0.02	0.01	西瓜 Watermelon
西瓜芝麻稻 17Z2028 Watermelon sesame rice 17Z2028	64 709 634	0.05	0.03	0.02	0.01	西瓜 Watermelon
Y 两优 900 Y Liangyou 900	64 645 000	84.92	66.52	69.31	63.72	水稻 Rice
西瓜芝麻稻 17Z2028 Watermelon sesame rice 17Z2028	64 709 634	83.70	64.41	67.27	62.15	水稻 Rice

2.3.3 西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组的差异 为进一步明确西瓜芝麻稻 17Z2028 与西瓜和水稻的亲缘关系,对西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组开展变异检测,包括 SNP 和 small InDel 检测。SNP 类型变异包括转换和颠换两种类型。西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组西瓜的 SNP 差异位点

数为 1 840 809 个,其中转换数 1 324 658 个,颠换数 516 151 个;西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组水稻的 SNP 差异位点数为 586 121 个,其中转换数 420 973 个,颠换数 165 148;西瓜芝麻稻 17Z2028 与两个参考基因组的转换数/颠换数值分别为 2.566 与 2.549,差异不大(表 7)。

表 7 西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组 SNP 差异位点情况

Table 7 SNP sites between Watermelon sesamerice 17Z2028 and the reference genome

参考基因组 Reference genome	SNP 差异位点数 Number of SNP sites	转换数 Transitions	颠换数 Transversions	转换数/颠换数 Transition/Transversion ratio
西瓜 Watermelon	1 840 809	1 324 658	516 151	2.566
水稻 Rice	586 121	420 973	165 148	2.549

small InDel 包括插入和缺失两种类型,变异位点分析结果见表 8。由表 8 可以看出,西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组西瓜的基因组插入缺失位点数为 395 397 个,其中插入位点数 198 830 个,缺失

位点数 196 567 个;西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组水稻的基因组插入缺失位点数为 129 576 个,其中插入位点数 62 687 个,缺失位点数 66 889 个。

表 8 西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组 small InDel 差异位点情况

Table 8 Small InDel sites between Watermelon sesamerice 17Z2028 and the reference genome

参考基因组 Reference genome	插入位点数 Insertion sites	缺失位点数 Deletion sites	插入缺失位点数 Total small InDel sites
西瓜 Watermelon	198 830	196 567	395 397
水稻 Rice	62 687	66 889	129 576

基因组序列一般通过基因转录成 mRNA 或翻译成蛋白质来行使功能,从而使不同基因组个体表现出差异。进一步分析西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考

基因组间变异导致基因产物变换情况,结果见表 9。由表 9 可以看出,西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组西瓜的 16 626 个 SNP 位点导致基因非同义变化,

6 130 个基因组插入与缺失位点导致基因改变;西瓜芝麻稻 17Z202 与参考基因组水稻的 12 980 个 SNP 位点导致基因非同义变化,4 869 个基因组插入与缺失位点导致基因改变。

表 9 西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组差异导致基因变异情况

Table 9 Genetic mutations resulting from differences between Watermelon sesame rice 17Z2028 and the reference genome

参考基因组 Reference genome	SNP 位点中基因非同义数 Nonsynonymous SNP sites	基因组插入与缺失位点基因数 Genes affected by small InDels
西瓜 Watermelon	16 626	6 130
水稻 Rice	12 980	4 869

3 讨 论

3.1 水稻品种对稻米 Cd 含量差异的影响

由于筛选试验研究的条件即环境因素基本相同,地力条件和农艺操作基本相似,西瓜芝麻稻 17Z2028、西瓜稻 90-11 抗、西瓜稻 90-11-6、西瓜稻 90-11 等 4 个西瓜稻的稻米 Cd 含量远低于湘早 45,其原因在于西瓜芝麻稻 17Z2028 等西瓜稻品种的根长、根体积和根表面积具有遗传性的农艺性状均小于湘早 45,其根系中影响 Cd 吸收的 *OsNramp5*、*OsNramp1*、*OsIRT1* 和 *OsIRT2* 等基因和转运蛋白的表达水平减弱,导致其对土壤 Cd 的吸收力弱于湘早 45^[20-21],同时西瓜芝麻稻 17Z2028 等西瓜稻品种的株高显著大于湘早 45,为 Cd 在水稻茎叶等的积累提供了更多的位点,降低了水稻茎叶木质部装载的 CAL1 和 OsHMA3 等载体蛋白的表达水平,以及 Cd 向籽粒的运输和积累,最终导致西瓜芝麻稻 17Z2028 等西瓜稻稻米 Cd 含量较低^[22-24]。

3.2 不同土壤改良措施对稻米 Cd 含量差异的影响

水稻对 Cd 的吸收取决于土壤有效 Cd 含量,而土壤有效 Cd 含量又受到土壤 pH 值、有机质含量和阳离子交换量(CEC)等土壤理化性质的影响。本研究表明,经过不同土壤改良措施处理后显著提高了土壤 pH 值,增加了土壤养分和阳离子交换量,从而降低了土壤有效 Cd 含量和稻米 Cd 含量。主要原因在于:(1)施用的石灰等本身 pH 值很高,可以中和土壤中交换性酸和活性酸,使土壤 pH 值升高,降低土壤有效 Cd 含量及其生物有效性,诱导升高水稻根部 *OsNramp5* 和 *OsIRT1* 基因和转运蛋白的表达水平,导致稻米 Cd 含量降低^[25]。(2)施用的矿物肥等本身含有 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 等离子,其与土壤溶液的 H⁺ 和 Al³⁺ 发生交换反应,提高土壤 pH 值,使 Cd 毒性降低,抑制 Cd 活性,同时矿物质具有微孔结构,小尺度效应和吸附能力较强,使土壤形成良好的团粒结构,防止土壤板结,有利于增加土壤养分和有机质含量,降低 Cd 的土壤残留,使稻米

Cd 含量降低^[26]。(3)施用的生物炭等具有较大的比表面积、高孔隙度,且本身含有大量碱性物质,通过增加土壤中的 K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 等盐基离子的吸持作用来降低土壤的交换性 H⁺ 和交换性 Al³⁺ 含量,从而使土壤 pH 值升高^[27];同时生物炭能提升土壤有机质含量和阳离子交换量,调控土壤理化性质,促进有益微生物繁殖及活性,对土壤的 C、N、P 等矿质元素循环和形态转化产生影响,改善土壤肥力,从而改变土壤 Cd 的生物有效性,降低稻米 Cd 含量^[28]。

3.3 稻米 Cd 含量的差异受栽培季节的影响

稻米 Cd 的积累是土壤-水稻互作的结果,土壤 Cd 含量和水稻自身的生理活动决定着稻米 Cd 含量^[29-30]。无论是常规栽培还是经过土壤改良处理,西瓜芝麻稻 17Z2028 早稻和晚稻的土壤总 Cd 含量之间,以及土壤有效 Cd 含量之间差异不明显,但西瓜芝麻稻 17Z2028 晚稻稻米 Cd 含量和 Cd 富集系数却显著高于早稻,说明西瓜芝麻稻 17Z2028 早稻和晚稻稻米 Cd 含量的差异不全部来源于土壤总 Cd 和有效 Cd 含量的变化,这可能与西瓜芝麻稻 17Z2028 早晚稻自身生理活动有关,而水稻的生理活动受温度影响较大^[31]。湖南晚稻田间处于高温干燥环境,该环境有利于晚稻细根生长,提高细根表面积和根尖数,导致根系对 Cd 的吸收能力增强^[32];高温干燥环境,水稻叶片蒸腾速率加快,蒸腾拉力促进根系中的 Cd 向茎叶转运,通过再分配,导致稻米 Cd 的高累积^[33];高温干燥环境抑制水稻根系对 Fe 吸收,并促进 Fe 载体蛋白(phytosiderophore)的分泌,间接促进 Cd 积累^[34];高温干燥环境首先促进水稻根系 Cd 向茎叶转运,然后水稻茎叶中的 Cd 向籽粒转运^[35]。综上所述,晚稻稻米 Cd 的治理难度大于早稻,在 Cd 治理过程中应高度重视晚稻稻米 Cd 的治理。

3.4 超远缘杂交在体细胞杂交中创制低 Cd 新种质

本研究取广东海洋大学水稻纲间杂交种西瓜芝麻稻 17Z2028 和母本 Y 两优 900,各产出 64.67 M 数据,定位到西瓜和水稻两个参考基因的均匀比对

率表明,样品之间的基因和转录本的表达水平具有可比性,并且数据可靠。对西瓜芝麻稻 17Z2028 与西瓜、水稻两个参考基因组的 SNP 和 small InDel 差异位点分析表明,西瓜芝麻稻 17Z2028 与水稻的差异位点数较西瓜少,表明西瓜芝麻稻 17Z2028 与水稻基因组的亲缘关系更近,与西瓜基因组的亲缘关系更远,因此在开展超远缘杂交育种的理论研究方面,遗传差异较大的品种容易在群体后代创造较多变异,从而有利于培育大量的变异品种,以筛选大量的低 Cd 品种;而在开展育种应用中,应适当选择遗传关系较近的品种配制组合,避免杂交后代育性差的现象。

除真正的精卵结合型超远缘杂交外,在非精卵结合型超远缘杂交方面,因植株形态、花粉结构、染色体数目等差异,外源 DNA 通常不会整合到受体基因组中,外源花粉与受体的相互作用可能引起受体基因组结构变异,如结构重排、低拷贝序列增加或删除、编码区和非编码区的甲基化及去甲基化等^[36]。本研究通过对西瓜芝麻稻 17Z2028 与参考基因组间变异导致基因产物变换情况的研究发现,亲缘关系较远的西瓜 SNP 位点中基因非同义数与基因组插入缺失位点基因数均高于亲缘关系较近的水稻,即亲缘关系越远,越易产生变异,这一结果与之前相关研究中发现的规律基本一致^[36]。转换相对于颠换更容易保持蛋白的稳定结构,在自然选择过程中转换的变异比率往往高于颠换,这种现象常常被称为转换偏好性^[37-38]。在本研究中,参考基因组西瓜与水稻的转换数/颠换数分别为 2.566 和 2.549,转换数较颠换数高,与之前其他研究结果相似^[39-40]。Chen 等^[41]提出超远缘杂交外源基因渗透学说,认为经过外源基因组的冲击可能会使受体基因组与外源部分同源区段的基因重组。本研究通过超远缘杂交技术,在西瓜芝麻稻 17Z2028 检测到 68 个来自西瓜的基因,所以超远缘在体细胞杂交已成为作物种质资源创新的有效手段,为更高效地使用纲间超远缘杂交创制种质资源提供理论依据。

4 结 论

(1)超远缘杂交新种质有利于降低稻米 Cd 含量,与常规水稻湘早 45 相比,西瓜芝麻稻 17Z2028、西瓜稻 90-11 抗、西瓜稻 90-11-6 和西瓜稻 90-11 等 4 个超远缘杂交品种早稻的稻米 Cd 含量为 0.088~0.095 mg/kg,晚稻的稻米 Cd 含量为 0.100~0.108

mg/kg,均未超过国家标准 0.200 mg/kg,分别显著低于早稻湘早 45 的稻米 Cd 含量(0.578 mg/kg)和晚稻湘早 45 的稻米 Cd 含量(0.589 mg/kg)。

(2)4 个超远缘杂交水稻品种的株高显著大于常规水稻湘早 45,根长、根表面积和根体积则显著小于常规水稻湘早 45。

(3)与常规栽培相比,土壤改良处理能显著降低稻米 Cd 含量和 Cd 富集系数,石灰、生物炭、复合肥+矿物肥和石灰+生物炭 4 种土壤改良处理的早稻稻米 Cd 含量分别比常规栽培早稻降低 71.739%,56.522%,59.783% 和 67.391%,Cd 富集系数降低 0.254~0.314,降幅为 51.626%~63.821%;晚稻稻米 Cd 含量分别降低 72.115%,59.615%,62.500% 和 68.269%,Cd 富集系数降低 0.303~0.353,降幅为 55.091%~64.182%;晚稻品种稻米 Cd 含量和稻米 Cd 富集系数显著高于相同的早稻品种。

(4)稻米 Cd 含量与土壤 pH 值呈极显著负相关,与土壤有机质含量和阳离子交换量呈显著负相关,而与土壤总 Cd 含量呈显著正相关,与土壤有效 Cd 含量呈极显著正相关。

(5)通过超远缘杂交水稻品种的基因测序,说明超远缘杂交有利于培育低 Cd 水稻新种质。

[参考文献]

- [1] Cao F B, Wang R F, Cheng W D, et al. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, lead and copper in rice and approaches for reducing the accumulation[J]. Science of the Total Environment, 2014, 496: 275-281.
- [2] Wei S H, Li Y M, Zhou Q X, et al. Effect of fertilizer amendments on phytoremediation of Cd-contaminated soil by a newly discovered hyperaccumulator *Solanum nigrum* L[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 176(1/2/3): 269-273.
- [3] 傅龙波, 钟甫宁, 徐志刚. 中国粮食进口的依赖性及其对粮食安全的影响[J]. 管理世界, 2001, 17(3): 135-140.
Fu L B, Zhong F N, Xu Z G. Dependence of China's grain import and its impact on food security[J]. Management World, 2001, 17(3): 135-140.
- [4] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 农艺强化措施治理稻田镉污染的效果评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1537-1544.
Xue T, Liao X Y, Wang L Q, et al. Evaluation on effect of strengthening agronomic measures in cadmium-contaminated paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(7): 1537-1544.
- [5] Jiang S L, Shi C H, Wu J G. Studies on mineral nutrition and safety of wild rice (*Oryza L.*) [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2009, 60(Sup1): 139-147.

- [6] 杨春刚,廖西元,章秀福,等. 不同基因型水稻籽粒对镉积累的差异[J]. 中国水稻科学,2006,20(6):660-662.
Yang C G, Liao X Y, Zhang X F, et al. Genotypic difference in cadmium accumulation in brown rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2006, 20(6): 660-662.
- [7] Takahashi R, Ishimaru Y, Shimo H, et al. The OsHMA2 transporter is involved in root-to-shoot translocation of Zn and Cd in rice[J]. Plant, Cell & Environment, 2012, 35(11):1948-1957.
- [8] Uraguchi S, Fujiwara T. Cadmium transport and tolerance in rice: perspectives for reducing grain cadmium accumulation[J]. Rice, 2012, 5(1):5.
- [9] 王一志,曹雪莹,谭长银,等. 不同土壤pH对红壤稻田镉形态及水稻镉积累的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2017, 40(1):10-16.
Wang Y Z, Cao X Y, Tan C Y, et al. Effects of different soil pH on cadmium fractions and cadmium accumulation in rice [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2017, 40(1):10-16.
- [10] 董霞,李虹呈,陈齐,等. 不同母质土壤-水稻系统Cd吸收累积特征及差异[J]. 水土保持学报,2019,33(4):342-348.
Dong X, Li H C, Chen Q, et al. Characteristics and differences of cadmium absorption and accumulation in different parent soil-rice systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4):342-348.
- [11] Zhang Q, Chen H F, Huang D Y, et al. Water managements limit heavy metal accumulation in rice: dual effects of iron-plaque formation and microbial communities[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687:790-799.
- [12] 李磊明. 农艺调控措施对水稻吸收累积镉砷的抑制效果[D]. 合肥:安徽农业大学,2019.
Li L M. Effects of agronomic regulation on inhibition of rice absorption and accumulation of Cd and As[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019.
- [13] 王美娥,彭驰,陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. 环境科学,2015,36(11):4283-4290.
Wang M E, Peng C, Chen W P. Effects of rice cultivar and typical soil improvement measures on the uptake of Cd in rice grains[J]. Environmental Science, 2015, 36(11):4283-4290.
- [14] 张秋梅,王惠明,林小兵,等. 不同土壤钝化剂对农田土壤中镉的钝化效果研究[J]. 江西农业大学学报,2021,43(3):703-710.
Zhang Q M, Wang H M, Lin X B, et al. Remediation effects of different passivators on cadmium passivation in polluted farmland[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition), 2021, 43(3):703-710.
- [15] 窦韦强,安毅,秦莉,等. 稻米镉的生物富集系数与其影响因素的量化关系[J]. 土壤,2021,53(4):788-793.
Dou W Q, An Y, Qin L, et al. Quantitative relationship between the bioconcentration factor of rice cadmium and its influencing factors[J]. Soils, 2021, 53(4):788-793.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- Lu R K. Methods of soil agrochemical analysis[M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] 代子雯,方成,孙斌,等. 地质高背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素[J]. 环境科学,2021,42(4):2016-2023.
Dai Z W, Fang C, Sun B, et al. Cadmium accumulation characteristics and impacting factors of different rice varieties under paddy soils with high geological backgrounds[J]. Environmental Science, 2021, 42(4):2016-2023.
- [18] 周亮,肖峰,肖欢,等. 施用石灰降低污染稻田上双季稻镉积累的效果[J]. 中国农业科学,2021,54(4):780-791.
Zhou L, Xiao F, Xiao H, et al. Effects of lime on cadmium accumulation of double-season rice in paddy fields with different cadmium pollution degrees [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(4):780-791.
- [19] Li F, Shimizu A, Nishio T, et al. Comparison and characterization of mutations induced by gamma-ray and carbon-ion irradiation in rice (*Oryza sativa* L.) using whole-genome resequencing [J]. G3 Genes Genomes Genetics, 2019, 9 (11):3743-3751.
- [20] Liu J G, Zhu Q S, Zhang Z J, et al. Variations in cadmium accumulation among rice cultivars and types and the selection of cultivars for reducing cadmium in the diet [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(1):147-153.
- [21] Yu H, Wang J L, Fang W, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice [J]. Science of the Total Environment, 2006, 370 (2/3):302-309.
- [22] Li Y, Pang H D, He L Y, et al. Cd immobilization and reduced tissue Cd accumulation of rice (*Oryza sativa* Wuyun-23) in the presence of heavy metal-resistant bacteria [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 138:56-63.
- [23] Liu B, Chen L, Chen S B, et al. Subcellular Cd accumulation characteristic in root cell wall of rice cultivars with different sensitivities to Cd stress in soil [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(9):2114-2122.
- [24] Zhang J, Sun W C, Li Z J, et al. Cadmium fate and tolerance in rice cultivars [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2009, 29(3):483-490.
- [25] Yang Y J, Chen J M, Huang Q N, et al. Can liming reduce cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*) in slightly acidic soils? A contradictory dynamic equilibrium between Cd uptake capacity of roots and Cd immobilisation in soils [J]. Chemosphere, 2018, 193:547-556.
- [26] 周利军,武琳,林小兵,等. 土壤调理剂对镉污染稻田修复效果[J]. 环境科学,2019,40(11):5098-5106.
Zhou L J, Wu L, Lin X B, et al. Remediation of cadmium contaminated paddy fields using soil conditioners [J]. Environmental Science, 2019, 40(11):5098-5106.
- [27] 杨惟薇,张超兰,曹美珠,等. 4种生物炭对镉污染潮土钝化修复效果研究[J]. 水土保持学报,2015,29(1):239-243.
Yang W W, Zhang C L, Cao M Z, et al. Immobilization and re-

- mediation of cadmium contaminated soil with four kinds of biochars[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1):239-243.
- [28] Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6):1301-1310.
- [29] 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[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 348-357.
- Shuai Z Y, Gu Z H, Wang Y Y, et al. Effects of soil tillage methods on yield components and cadmium accumulation in panicles of double-cropping rice[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3):348-357.
- [30] 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 等. 改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7):3331-3338.
- Li Y C, Wang Y H, Tang M D, et al. Effects of an amendment on cadmium transportation in the rhizosphere soil-rice system[J]. Environmental Science, 2019, 40(7):3331-3338.
- [31] Peng S B, Huang J L, Sheehy J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(27):9971-9975.
- [32] Ge L Q, Cang L, Yang J, et al. Effects of root morphology and leaf transpiration on Cd uptake and translocation in rice under different growth temperature[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(23):24205-24214.
- [33] Ge L Q, Cang L, Liu H, et al. Effects of warming on uptake and translocation of cadmium (Cd) and copper (Cu) in a contaminated soil-rice system under free air temperature increase (FATI)[J]. Chemosphere, 2016, 155:1-8.
- [34] 邵国胜, 陈铭学, 王丹英, 等. 稻米镉积累的铁肥调控[J]. 中国科学(C辑:生命科学), 2008, 38(2):180-187.
- Shao G S, Chen M X, Wang D Y, et al. Regulation of iron and fertilizer on cadmium accumulation in rice[J]. Scientia Sinica (Vita), 2008, 38(2):180-187.
- [35] Ge L Q, Cang L, Ata-Ul-Karim S T, et al. Effects of various warming patterns on Cd transfer in soil-rice systems under free air temperature increase (FATI) conditions[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 168:80-87.
- [36] Wang Z H, Zhang D, Bai Y, et al. Genomewide variation in an introgression line of rice-*Zizania* revealed by whole-genome re-sequencing[J]. PLoS One, 2013, 8(9):e74479.
- [37] Ossowski S, Schneeberger K, Lucas-Lledó J I, et al. The rate and molecular spectrum of spontaneous mutations in *Arabidopsis thaliana*[J]. Science, 2010, 327(5961):92-94.
- [38] 杨峰, 刘威, 吴楠, 等. EMS 诱导水稻一目惚(Hitomebore)表型和基因组序列变异[J]. 分子植物育种, 2017, 15(10): 4080-4085.
- Yang F, Liu W, Wu N, et al. Variation of phenotype and genomic sequence of hitomebore on rice induced by EMS[J]. Plant Molecular Breeding, 2017, 15(10):4080-4085.
- [39] 敬银钦, 高方远, 刘利平, 等. 离子束诱变体水稻 JD-1 的表型及基因组变异分析[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(5): 1322-1333.
- Jing Y Q, Gao F Y, Liu L P, et al. Phenotype and genome variation analysis of ion-beam induced mutant rice JD-1[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(5):1322-1333.
- [40] 王真慧. 基于全基因组重测序技术分析水稻和菰渐渗系的基因组变异[D]. 长春:东北师范大学, 2013.
- Wang Z H. Genomewide variation in an introgression line of rice-*Zizania* revealed by whole-genome re-sequencing [D]. Changchun:Northeast Normal University, 2013.
- [41] Chen Y, Long L K, Lin X Y, et al. Isolation and characterization of a set of disease resistance-gene analogs (RGAs) from wild rice, *Zizania latifolia* Griseb.: I. introgression, copy number lability, sequence change, and DNA methylation alteration in several rice-*Zizania* introgression lines[J]. Genome, 2006, 49(2):150-158.

(责任编辑:屈李纯)