

文章编号: 1007-4627(2016)04-0488-06

$^{12}\text{C}^{6+}$ 离子束诱变水稻籽粒 Cd 低积累突变体的研究

林园园, 陈慧茹, 刘斌美, 叶亚峰, 刘 瓚, 吴跃进

(中国科学院合肥物质科学研究院离子束生物工程学重点实验室, 技术生物与农业工程研究所, 合肥 230031)

摘要: 筛选低 Cd 积累水稻品种是控制稻米 Cd 含量的最直接有效的办法之一。本研究对重离子辐照的中粳 9311(*Oryza sativa* L) 后代, 利用石墨炉原子吸收光谱法检测, 对曝露在不同 Cd 含量(含 Cd 量为 $19.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 镉池和含 Cd 量为 $2.721 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的污染农田) 中进行 M2 代 Cd 低吸收突变单株筛选, 研究重离子辐照水稻籽粒 Cd 吸收的突变率以及比较不同 Cd 含量曝露下的筛选效率。结果显示: 重离子辐照可以诱发水稻籽粒 Cd 积累量的变异, 其突变频率为 $3.398\% \pm 0.009$ ($P < 0.05$); 初筛获得 78 株籽粒较 WT Cd 吸收差异显著的突变体, 进一步对其种植, 分析 M3 代籽粒 Cd 含量。结果表明, 重离子辐照诱变水稻突变体突变率高, 遗传稳定, 高 Cd 含量曝露下筛选效率更高, 突变体水稻籽粒中 Cd 的积累存在着明显的差异, 产生 Cd 积累差异的基因型丰富; 相关性分析表明, M2 代和 M3 代糙米中 Cd 含量存在显著相关性 $r = 0.8210$ ($P < 0.01$), M3 代获得 23 株遗传性良好且 Cd 含量差异显著的突变体水稻, 其中 Cd 含量低于国家标准 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 突变体 3 株。表明筛选出的水稻突变体, 在吸收转运 Cd 的过程中, 存在差异且能稳定遗传, 可供进一步研究培育籽粒 Cd 低积累的水稻品种。

关键词: 碳离子; 水稻; Cd; 突变体

中图分类号: Q691.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/ NuclPhysRev.33.04.488

1 引言

重离子束作为一种新兴的辐射诱变源, 具有传能线密度 (Linear Energy Transfer, LET) 高的特点。在植物种质诱变育新种操作中, 其单位剂量的诱变效率较 X 射线、 γ 射线、电子束等低 LET 的诱变效率要高出 10 倍^[1], 与 X 射线、 γ 射线及电子束等相比, 重离子束在穿过生物介质时, 将大量能量沉积在其径迹上, 所以具有高 LET, 进而能引起高密度的电离事件, 造成细胞核中 DNA 分子损伤显著增加, 表现出局部损伤程度比较严重, 所以具有更高相对生物学效应 (Relative Biological Effectiveness, RBE)。因此, 离子束用于诱变育种有可能在损伤轻时获得较高的突变效率^[2]。

Cd 是土壤中最主要的重金属污染物之一, 在土壤中大量累积, 并能够通过食物链进入人或动物体内, Cd 主要富集在肾脏中, 导致肾功能下降^[3]。在全球有一半以上的人以水稻作为主要粮食, 但随着耕地面积 Cd 污染的持续增加, “镉大米” 事件逐年增多, 水稻重金属 Cd 污染问题亟待解决。

现已明确植物对 Cd 吸收存在显著差异, 农作物中豆科植物 Cd 吸收能力最低, 禾本科和十字花科的作物则吸收 Cd 能力强^[4]。水稻不同品种间对 Cd 的吸收也有差异, 王凯荣等^[5]的研究表明杂交晚稻比常规稻对 Pb、Cd 的富集能力强; 谭周磁^[6]通过对 8 个早稻品种和 10 个晚稻品种累积重金属的研究, 筛选出了对重金属较为钝感的湘早粳 19 号和晚稻 V46, 以及对重金属较为敏感的潭早粳 1 号和师大 1911。

研究显示 Cd 吸收与基因调控有关, Wu 等^[7]以拟南芥为实验材料发现, 当 FIT 与 AtbHLH38 或者 AtbHLH39 基因共表达时, 能够增加拟南芥对 Cd 的耐受性^[7-8]; 在水稻中, 相关分子表达的研究主要针对 Nramps 蛋白家族。Nramps 蛋白家族是植物吸收转运矿质离子的重要离子通道蛋白^[9], Satoru^[10]获得了 3 株低吸收 Cd 水稻突变体 (lcd-kmt1, lcd-kmt2, lcd-kmt3), 并发现其相关的基因 OsNARMP5, 该基因编码有缺陷的细胞耐受性相关蛋白, 导致水稻吸收 Cd 含量显著低于对照组, 由此可见, Nramp5 基因与调控水稻吸收 Cd 有关^[10-11]。此外研究也发现, 水稻

收稿日期: 2015-10-27; 修改日期: 2015-11-20

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 A(XDA08040107); 国家自然科学基金资助项目(31301297)

作者简介: 林园园(1990-), 女, 在读研究生, 从事生物物理研究, E-mail: wtlinyy@163.com

通信作者: 吴跃进, E-mail: yjwu@ipp.ac.cn。

中OsHMA3基因的表达也与水稻根部吸收转运Cd相关^[12]。所以通过创建新的基因型材料,培育Cd低吸收水稻新品种是减少Cd大米危害的有效途径。

在Cd污染治理的方法中生物治理一直受到重视,利用不同品种对Cd吸收差异筛选低吸收的品种以及生物改良,均可获得事半功倍的效果。日本科学家利用物理诱变创建Cd低吸收水稻^[13]在种质方面取得长足进展,为低Cd吸收品种选育开辟新途径,但是如何实现Cd低吸收水稻突变体的高效选择以及突变体的Cd吸收机制等方面仍然缺乏。

本实验旨在利用重离子辐照技术创建水稻籽粒低Cd积累突变体,建立低Cd积累突变体高效筛选方法,以期筛选出低Cd的水稻基因型品种,为水稻吸收转运Cd机制研究和实际应用提供参考。

2 实验材料和方法

2.1 材料与试验设计

重离子辐照籼稻品种(*Oryza sativa* L)中粳9311籽粒,辐照实验在兰州重离子研究装置(HIRFL)生物辐射终端进行。所用碳离子束 $^{12}\text{C}^{6+}$ 初始能量为80 MeV/u,辐照剂量80 Gy,剂量率10 Gy/min。

2012年在合肥种植辐照的中粳9311种子,单株收种,将收获的3000粒M1代种子于2013年分别种植在Cd含量高的镉池和Cd含量低的铜陵试验田中,每种植一行突变体植株,间隔种植一行野生型中粳9311种子;在水稻成熟期收获M2代生长状况良好、结实

率高的水稻作为本实验初筛材料检测水稻籽粒Cd含量;2014年筛选出材料在合肥试验田繁殖M3代,水稻成熟后对突变体地上部分和籽粒中Cd含量进行检测;WT籽粒均取五行籽粒混样检测。

2.2 取样与重金属含量分析

水稻种植前采集土壤样品,水稻成熟期,采集土壤、籽粒和水稻地上部分样品。

土样采用对角线采样法,用不锈钢土钻采取10~15个点0~20 cm的耕层土壤,充分混合后采用四分法留取1000 g土壤样品。土样经自然风干,挑出石块、稻根等杂物,105 °C烘干后研磨过100目筛,土壤Cd全量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 消解。

籽粒自然干燥后加工成糙米,将糙米于70 °C烘干,再研磨成细粉,过100目筛,称重然后置入混合酸($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=4:1$)中加热消解。

水稻地上部分检测过程:首先将地上部分用去离子水冲洗干净,浸泡于0.05 mmol/L NaEDTA中20 min,再用一级水冲洗3次,之后于烘箱内105 °C,烘干至恒重,研磨,过100目筛,称重然后置入混合酸($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=4:1$)中加热消解^[14],

土壤、籽粒及地上部分的消解液Cd含量检测参照石墨炉原子吸收光谱法国标法^[15],均进行石墨炉原子吸收光谱法检测,重复3次。本实验石墨炉原子吸收光谱仪型号(WFX-210/200)。

土壤理化性质按照参考文献^[16]的方法测定,其理化性质见表1。

表1 供试土壤的基本理化性质

栽培地点	有机质 /(g·kg ⁻¹)	pH	种植前含Cd量 /(mg·kg ⁻¹)	种植后含Cd量 /(mg·kg ⁻¹)	全氮 /(g·kg ⁻¹)	全磷 /(g·kg ⁻¹)	速效钾 /(mg·kg ⁻¹)
Cd池	20.0	6.8	19.8	10.212	0.95	1.32	101.46
铜陵试验田	17.5	6.3	2.721	1.311	3.01	2.23	110.54
合肥试验田	38.7	6.7	2.135	1.026	1.30	2.45	98.11

2.3 数据统计与分析

本次试验数据利用SPSS软件进行统计分析,应用Origin 8.0软件作图。

2.3.1 数据处理

变异系数 $C\cdot V=(\text{标准偏差SD}/\text{平均值Mean})\times 100\%$;

富集系数=植株Cd含量/土壤全Cd含量;

Cd含量均值=平均值±标准偏差;

相关系数 $r_{AB}=\frac{\sum[(A_i-\bar{A})(B_i-\bar{B})]}{\sqrt{\sum(A_i-\bar{A})^2}\times\sqrt{\sum(B_i-\bar{B})^2}}$ 。

3 结果与分析

3.1 籽粒Cd低积累突变体筛选

为了比较重离子产生水稻突变体对Cd吸收累积的差异以及不同Cd暴露条件对突变体筛选的效率,在Cd池和铜陵试验田进行了高、低Cd含量暴露突变体筛选试验,通过对土壤和单株水稻籽粒中Cd的含量的分析获得以下结果。

3.1.1 高Cd暴露筛选突变体

经检测,223株Cd池水稻突变体籽粒中Cd的含量频次分布如图1所示,不同水稻突变体籽粒中Cd

含量不同籽粒中 Cd 累积量频次分布基本遵循正态分布规律。Cd 含量在 $0.6330 \sim 2.678 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间标准差 $0.2902 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均值 $1.186 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 变异系数 24.5%，WT 籽粒 Cd 含量为 $1.161 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cd 含量在 $1.0413 \sim 1.4121 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，标准差为 0.1583)，Cd 的高累积量 ($> 1.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和低累积量 ($< 0.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的水稻突变体分别占样本总数的 13%，6.8%，

Cd 的低累积量最低 Cd 含量为 $0.6330 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，高累积量 $2.678 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是 Cd 低累积量的 4.23 倍，结果表明，重离子辐照产生不同 Cd 积累突变体的基因型丰富，Cd 低积累材料对 Cd 表现出极强的耐受能力，高积累材料对 Cd 表现出极强的积累能力。可见不同突变体对 Cd 吸收机制存在差异。

对突变体 M2 代 Cd 含量差异分析 (表 2)，Cd 含量

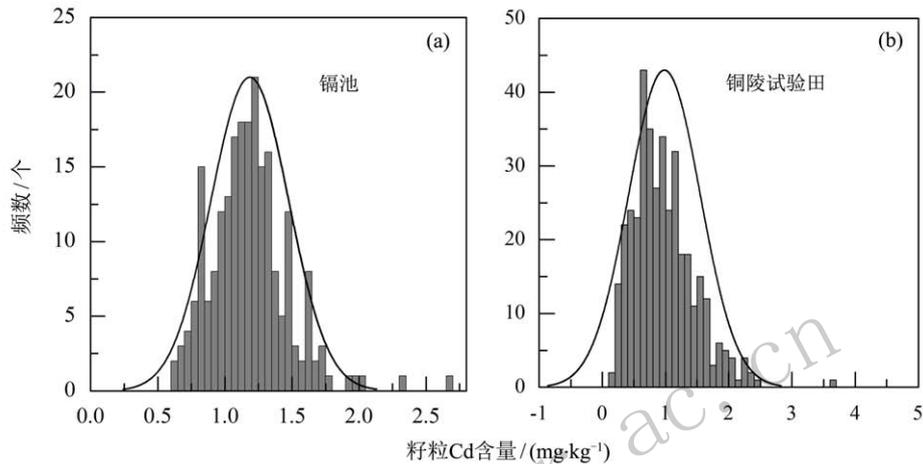


图 1 水稻突变体 M2 代籽粒 Cd 含量频次分布

在置信水平为 0.95 时，11 株差异显著 ($P < 0.05$)，突变率为 4.93%，置信水平为 0.99，4 株差异显著 ($P < 0.01$) 突变率为 1.79%，结果显示重离子辐照诱变水稻产生突

变体的突变率高^[17]，能够产生大量水稻突变体。其中选取 35 份 Cd 的低累积量和 12 份高累积量水稻突变体，在合肥试验田繁殖 M3 代。

表 2 重离子束辐照突变率*

栽培地点	Cd 平均值 /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差 /($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	置信水平 95%			置信水平 99%		
			置信区间	差异显著	突变率/%	置信区间	差异显著	突变率/%
Cd 池	1.186	0.2902	[0.61, 1.755]	11 株	4.93	[0.437, 1.93]	4 株	1.79
铜陵试验田	0.9819	0.5679	[-0.131, 2.09]	16 株	4.20	[-0.4741, 2.447]	9 株	2.40

* 重离子辐照 M1 代，种植后获得 M2 代突变体，根据 M2 代突变群体获得突变体率。

3.1.2 低 Cd 暴露筛选突变体

被检测的 382 株水稻突变体，籽粒 Cd 含量频次分布如图 1 所示，基本遵循正态分布规律，Cd 含量平均值 $0.9819 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，变异系数 57.8%。WT 籽粒 Cd 含量 $0.9746 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cd 含量在 $0.7131 \sim 1.2075 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，标准差为 0.1728) Cd 低累积量 ($< 0.6873 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和高累积量 ($> 1.276 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 突变体水稻分别占 31%、24%。Cd 的最低累积量为 $0.1782 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最高累积量 $6.817 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 是低累积量的 38.25 倍，说明试验田低 Cd 暴露下也能致使水稻突变体籽粒对 Cd 的积累产生显著差异，且 Cd 积累突变体的基因型丰富，实验结果分析发现重离子辐照突变随机且不定向，能够产生多种基因型的突变体，为培育

优良水稻品种提供大量材料。

如表 2 所示，在 0.95 的置信水平上，Cd 含量差异显著 ($P < 0.05$) 时，突变率是 4.2%，在 0.99 的置信水平上，Cd 含量差异显著 ($P < 0.01$) 时，突变率 2.40%，结果显示高低浓度 Cd 暴露下突变率基本一致，说明重离子辐照初筛产生突变率与 Cd 浓度没有直接相关性。

筛选出 23 株 Cd 含量差异显著的突变体水稻在合肥试验田繁殖 M3 代。

3.2 突变体遗传性检验

收获 M3 代，经检测，WT 籽粒 Cd 含量 $0.6782 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cd 含量在 $0.6753 \sim 0.6811 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，标准差为 0.0024) 突变体籽粒 Cd 含量在 $0.1522 \sim 1.078$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为50%, 对地上部分检测均值为 $(1.234\pm 0.3222)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 富集系数范围在22.92%~85.48%之间, 平均富集系数57.80%。M2、M3代相关性分析表明, 水稻突变体M3代糙米中Cd含量与M2代相关系数为0.8210, 达极显著水平 ($P < 0.01$)(图2)。

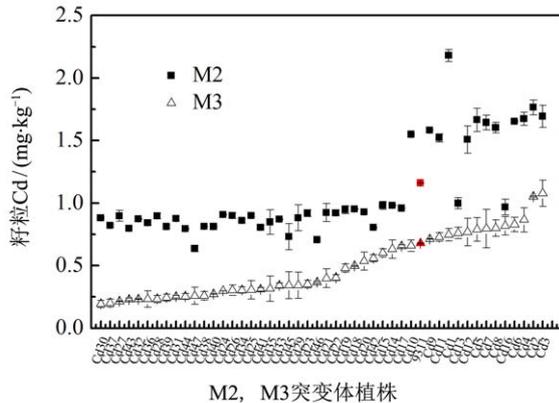


图2 (在线彩图) 突变体M2代和M3代籽粒Cd含量相关性 Cd30~Cd3为突变体编号, 中籼9311为WT。

结果显示籽粒Cd含量差异显著, 地上部分对土壤中Cd富集系数高, Cd含量由地上部分转移至籽粒中受到限制, 且筛选突变体遗传性良好。

筛选遗传稳定且Cd含量差异显著16株突变体, 再次检测突变体株系单株(5株)籽粒Cd含量, 同一株系平均值与上一检测结果大体一致, 大部分单株间差异不大。对Cd吸收较稳定, 筛选出23株单株突变体继续繁殖M4代。其中L1, L2, L3, L4遗传性稳定, 且Cd含量均低于WT的30%, L19, L20, L21四株突变体Cd含量分别为0.152, 0.186, 0.189 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 均低于国家标准0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [18]。

4 讨论

1986年我国首先发现重离子注入对水稻的诱变效应[19], 从此开创了离子束生物技术应用的先河。与X射线、 γ 射线等诱变源相比, 重离子束辐照植物材料后, 其M1代生理损伤轻, M2代突变率较高和突变谱较广, 并且其变异性状易于稳定。因此, 近年来越来越多的国内外科研机构对各种植物展开了重离子束辐照诱变育种工作[20]。

本实验通过重离子辐照M1代水稻, 获得M2代突变体, 并利用两种不同的筛选方法, 获得70株低(高)积累Cd水稻突变体, 且M2、M3代突变体结实率及表型均无明显变化。在Cd池高Cd含量曝露下, 初筛由223粒突变体种子时获得11株差异显著 ($P < 0.05$) 突变体, 重离子辐照水稻产生突变体的变异率为4.93% ($P <$

0.05), 繁殖M3代筛选出9株遗传稳定的突变体, 即产生遗传稳定的基因突变突变率4.04%。

铜陵试验田中, 382株水稻筛选出16株显著差异 ($P < 0.05$) 的突变体, 初筛重离子辐照突变率为4.20% ($P < 0.05$), 繁殖M3代后获得7株稳定遗传的突变体, 即产生遗传稳定的基因突变率1.83%。由镉池和铜陵试验田M3代稳定遗传突变率, 计算出重离子辐照产生M3代稳定遗传的突变率为 $3.398\% \pm 0.009$ ($P < 0.05$)。

分析结果显示重离子辐照技术能够诱发水稻对重金属Cd吸收能力的突变, 实验发现重离子辐照突变具有双向性, 且随机均匀, 能够产生Cd低积累水稻突变体, 通过筛选水稻对Cd低吸收累积的、或者是Cd向糙米低迁移的突变体可有效地减少或降低稻米的Cd污染; 产生的高积累Cd水稻突变体生物富集系数高达57.8%, 将Cd高积累水稻材料用于土壤修复具有良好的应用前景, 高积累材料对Cd有更好的富集能力有利于Cd污染土壤修复的实现。实验表明利用重离子辐照是选育Cd低积累水稻新品种的有效途径。

比较两种筛选体系, 为了防止Cd污染, 高浓度Cd筛选体系需在Cd池中种植, 种植规模小, 筛选范围较低浓度试验田小, 但是Cd池易于管理水分及光照, 能够减少外界影响, 使突变体遗传性更稳定, 选择效率高。在高浓度Cd曝露下突变体促使突变体自身抵御机制的变异更加显著, 吸收Cd的浓度差异大其中3株能够稳定遗传的突变体Cd吸收含量达到国家标准0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

铜陵试验田Cd浓度小, 种植面积大, 筛选范围广, 且能够很好地模拟自然条件下水稻的生长, 获得的突变体性状不会在大规模种植后改变, 但是试验田自然条件无法控制, 导致初筛时外界影响因素较大, 出现假性突变, 稳定性不高, 突变体植株M2与M3对比稳定性稍差, 低浓度Cd曝露下植株胁迫力度低, 水稻籽粒Cd积累量差异显著性稍低。

初步研究发现低(高)Cd吸收的突变体在Cd吸收有显著的差异, 已经认证其稳定性, 可进一步研究其耐受机制, 通过基因定位与克隆, 选育出优良的水稻品种, 且通过杂交能够很容易地将两个遗传背景相同的Cd积累有利基因聚合在一起, 使获得不同Cd吸收机制的优良水稻品种更加便利。

5 结论

$^{12}\text{C}^{6+}$ 离子束与生物体相互作用时, 传能线密

度 (LET) 大, 其生理生化作用强, 作用到生物分子、细胞所造成的损伤通常不易修复, 突变体稳定较快, 而且具有较高的突变率。实验获得 $^{12}\text{C}^{6+}$ 离子束在 M3 代产生稳定遗传的突变体突变率为 $3.398\% \pm 0.009$ ($P < 0.05$) 重离子辐射能够提高诱变育种效率, 对定向育种具有重要意义。随着重离子辐照技术的完善, 重离子生物技术必将会为农业创造出更丰富的种质资源。

通过将突变体在不同 Cd 含量曝露下繁殖筛选, 发现两种筛选机制均有优点, 高 Cd 含量镉池易于控制管理水分等自然条件的影响, 对植株胁迫力度大, Cd 含量差异大, 突变体遗传性较好; 试验田种植规模大, 筛选范围广, 与常规育种自然条件相符。不同筛选条件下在 M3 代获得 23 株遗传性良好, 对 Cd 吸收差异显著的水稻突变体, 可供下一步耐受机制及育种研究。

参考文献:

- [1] ZHOU Libin, LI Wenjian, QU Ying, *et al.* Nuclear Physics Review, 2008, **25**(3): 335. (in Chinese)
(周利斌, 李文建, 曲颖, 等. 原子核物理评论, 2008, **25**(3): 335.)
- [2] WEI Zengquan, XIE Hongmei, LIANG Jianping, *et al.* Nuclear Physics Review, 2003, **20**(1): 39. (in Chinese)
(卫增泉, 颜红梅, 梁剑平, 等. 原子核物理评论, 2003, **20**(1): 39.)
- [3] European Food Safety Authority Scientific Opinion on Tolerable Weekly Intake for Cadmium. EFSAJ, 2011, **9**(2): 1975.
- [4] ZHOU Zhong, QIAN Xiaoyu, LUO Ancheng, *et al.* 1996, **18**(6): 19. (in Chinese)
(周众钱, 肖余, 罗安程, 等. 环境污染与防治, 1996, **18**(6): 19.)
- [5] WANG Kairong. Rural Eco-Environment, 1996, **12**(3): 18. (in Chinese)
(王凯荣. 农村生态环境, 1996, **12**(3): 18.)
- [6] TAN Zhouci. Hunan Agricultural Sciences, 1999, (5): 26. (in Chinese)
(谭周磁. 湖南农业科学, 1999, (5): 26.)
- [7] BESSON A, GRAVOT A, RICHAUD P, *et al.* Plant Physiol, 2009, **149**(15): 1302.
- [8] WU Huilan, CHEN Chunlin, DU Juan, *et al.* Plant Physiology, 2012, **158**(2): 790.
- [9] AKIMASA Sasaki, NAOKI Yamaji, KENGO Yokosho, *et al.* Plant Cell, 2012, **24**(5): 2155.
- [10] SATORU I, YASHIHIRO I, MASATO I, *et al.* PNAS, 2012, **109**(47): 19166.
- [11] UENO D, YAMAJI N, KONO I, *et al.* PNAS, 2010, **107**(38): 16500.
- [12] KARBLANE H. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Ecology, 1994, **6**: 52.
- [13] SATORU I, YASUHIRO I, MASATO I, *et al.* PNAS, 2012, **109**(49): 19166.
- [14] SIEDLECKA A, BASZYNSKY T. Physiologia Plantarum, 1993, **87**(2): 199.
- [15] GB/T 5009. 15-2003, 食品中 Cd 的测定[S]2003.
- [16] BAO Shidan. Soil Agrochemistry Analysis[M]. (Third Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30. (in Chinese)
(鲍士. 土壤农化分析(第三版)[M]3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30.)
- [17] CHEN Qiufang, WANG Cailian, TONG Weiyu. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 1988, **2**: 59. (in Chinese)
(陈秋方, 王彩莲, 童渭渔. 不同辐射因子对水稻诱变效应的比较[J]. 浙江农业科学, 1988, **2**: 59.)
- [18] GB2762-2012, 食品中污染物限量[S].
- [19] YU Zengliang. An Introduction of Ion Beam Biotechnology[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1998, 216. (in Chinese)
(余增亮. 离子束生物技术引论[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1998, 216.)
- [20] QU Ying, LI Wenjian, ZHOU Libin, *et al.* Nuclear Physics Review, 2007 **24**(4): 294. (in Chinese)
(曲颖, 李文建, 周利斌, 等. 2007, **24**(4): 294.)

Study on Low-cadmium Rice Mutants Induced by $^{12}\text{C}^{6+}$ Ion Beam

LIN Yuanyuan, CHEN Huiru, LIU Binmei, YE Yafeng, WU Yuejin

(Key Laboratory of Ion Beam Bio-engineering, Institute of Technical Biology and Agricultural Engineering, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Screening low-cadmium rice cultivar is the most directly and effective way to control cadmium content in rice grain. We screened low-cadmium rice mutant of M2 generation exposed in different Cd concentration (the pool contaminated with $19.8 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the paddy field contaminated with $2.721 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$) from rice mutants (9311, *Oryza sativa L*) induced by $^{12}\text{C}^{6+}$ ion beam, and explored the mutation rate of $^{12}\text{C}^{6+}$ ion beam irradiation and the screening efficiency of different Cd concentration exposed, all of the detections were carried out by Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrum (GFAAS). The results showed that the mutation rate is $3.398\% \pm 0.009$ ($P < 0.05$) and high Cd concentration exposed has more efficiency in screening low-Cd rice mutant. Correlation analysis show significant correlation of Cd in rice grain between M2 and M3 generations, $r = 0.8210$ ($P < 0.01$); We obtained 23 mutant strains with significant Cd concentration difference and they had a great genetic stability. Among them, three strains' Cd concentrations were lower than the national standard ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). They can be used for further study on cultivating new rice varieties of low Cd accumulation in rice grain.

Key words: carbon ion; rice; cadmium; mutant

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 27 Oct. 2015; **Revised date:** 20 Nov. 2015

Foundation item: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences A(XDA08040107); Natural Science Foundation of China (31301297)

Corresponding author: WU Yuejin, E-mail: yjwu@ipp.ac.cn.