

# 离子束诱导小偃 81 突变系麦谷蛋白和醇溶蛋白遗传变异分析

石立旗, 焦 滇, 张鲁军, 秦广雍

(郑州大学河南省离子束生物工程重点实验室, 河南郑州 450052)

**摘要:** 为给离子束诱变技术在小麦品质育种方面的应用提供理论依据, 以  $N^+$  (30Kev) 注入诱导获得的小偃 81 突变系  $M_4$  代种子为材料, 采用 SDS-PAGE 和 A-PAGE 技术对其高分子量麦谷蛋白亚基和醇溶蛋白进行系统分析。结果表明, 在供试材料中, 检测到 3 个高分子量麦谷蛋白亚基缺失系: 1Ax1 缺失系、1Bx14 + 1By15 缺失系和 1Dx2 + 1Dy12 缺失系, 出现频率由大到小依次为  $1Ax1 > 1Bx14 + 1By15 > 1Dx2 + 1Dy12$ 。检测到 5 种醇溶蛋白变异类型, 其中, 1Ax1 缺失系有 3 种突变类型, 1Bx14 + 1By15 缺失系和 1Dx2 + 1Dy12 缺失系各有 1 种突变类型,  $\omega$  区变异类型最多, 其次是  $\alpha$  和  $\gamma$  区,  $\beta$  区没有发现变异类型, 在 5 种变异类型中有一条相同的变异谱带。以上结果说明,  $N^+$  离子束注入能有效地诱导小麦种子高分子量麦谷蛋白亚基和醇溶蛋白的变异, 并能够在后代中稳定遗传。

**关键词:** 小麦; 离子束诱导; 高分子量麦谷蛋白; 醇溶蛋白

中图分类号: S512.1; S336

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2010)06-1029-05

## Analysis of HMW-GS and Gliadin of Xiaoyan 81 Variation Line Induced by Ion Beam Mutagenesis

SHI Li-qi, JIAO Zhen, ZHANG Lu-jun, QIN Guang-yong

(Henan Provincial Key Laboratory of Ion Beam Bioengineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China)

**Abstract:** This experiment systematically analyzed high-molecular-weight subunits of glutenin and gliadin proteins in  $M_4$  generation seeds of Xiaoyan 81 variation line by SDS-PAGE and A-PAGE techniques, seeds of Xiaoyan 81 were implanted with  $N^+$  (30 Kev) ion-beam. Three kinds of HMW-GS deletion lines are detected: 1Ax1 deletion line, 1Bx14 + By15 deletion line and 1Dx2 + Dy12 deletion line, frequency of the above deletion lines occurrence is descending as  $1Ax1 > 1Bx14 + By15 > 1Dx2 + Dy12$ . Five kinds of mutant phenotypes have detected in gliadin proteins, three of them in 1Ax1 deletion line, 1Bx14 + By15 deletion line and 1Dx2 + Dy12 deletion line have one respectively. The  $\omega$  block has the most variations, next is  $\alpha$  block and  $\gamma$  block, no mutant phenotype is detected in  $\beta$  block. There was one same band in the five kinds of mutation types. The results showed that  $N^+$  (30 Kev) ion beam implantation can make the high-molecular-weight subunits of glutenin and gliadin proteins mutated effectively and can be stably inherited in the offspring.

**Key words:** Wheat; Ion beam induction; HMW-GS; Gliadin protein

小麦是我国重要的粮食作物之一。近年来, 随着人民生活水平的提高和膳食结构的变化, 人们对优质专用小麦的需求量不断增加, 小麦品质

改良成为小麦育种的重要目标之一。醇溶蛋白和麦谷蛋白是小麦种子贮藏蛋白的重要组成部分, 是构成面筋的主要成分, 其中醇溶蛋白赋予面团

\* 收稿日期: 2010-03-15 修回日期: 2010-06-04

基金项目: 农业部农业公益性行业科研专项(200803034)。

作者简介: 石立旗(1984-), 男, 在读硕士, 主要从事小麦遗传育种研究。E-mail: shiliqi.888@163.com

通讯作者: 焦 滇(1976-), 女, 博士, 副教授, 主要从事小麦遗传育种研究。E-mail: jiaozhen@zzu.edu.cn

延展性,麦谷蛋白赋予面团弹性<sup>[1]</sup>。因此筛选编码优良高分子量麦谷蛋白和醇溶蛋白的基因,应用于小麦品质改良成为小麦育种方面的一个热点。离子束诱变技术具有损伤轻、突变率高、突变谱广等优点<sup>[2]</sup>,对作物性状的改良效应优于传统诱变技术<sup>[3-4]</sup>。国内已有许多科研机构开展了离子束诱变育种的研究,在美、日、英等国也成为一个新的研究热点。随着低能离子与生物体相互作用研究的深入,离子束生物技术已从基础理论研究阶段进入到理论与实际应用相结合的阶段,一些科学家提出的能量沉积、质量沉积和电荷转移引起生物效应的假说<sup>[5]</sup>,注入离子在作物干种子内长程穿射的假说<sup>[6]</sup>以及细胞近旁效应假说<sup>[7]</sup>等理论不断得到实验的证实,并为离子束诱变技术的发展奠定了理论基础。虽然离子束诱变技术在水稻<sup>[8]</sup>、玉米<sup>[9]</sup>、小麦<sup>[10]</sup>等作物育种中的应用研究已取得了很好的结果,但这些研究主要集中在对农艺性状的改良效应上,而在作物品质改良方面的研究较少,对小麦醇溶蛋白和高分子量谷蛋白遗传变异情况的分析更少。本实验对离子束诱导产生的小偃81突变系M<sub>4</sub>代种子的高分子量麦谷蛋白和醇溶蛋白进行了系统分析,探索了离子束诱变技术对小麦贮藏蛋白的诱变作用,鉴定亚基突变类型,以期能为离子束诱变技术在小麦品质育种方面的应用提供一定的依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

本实验选用离子束诱导获得的小偃81突变家系M<sub>4</sub>代种子为实验材料。原生态小偃81由中国科学院遗传与发育生物学研究所王道文研究员提供,其高分子量麦谷蛋白亚基组合为1Ax1、1Bx14+1By15、1Dx2+1Dy12。2005年在郑州大学河南省离子束生物工程重点实验室将N<sup>+</sup>(能量为30 Kev,剂量为 $8 \times 10^{17}$  N<sup>+</sup>/cm<sup>2</sup>)注入原生态小偃81种子中,2006—2009年间按完全随机设计的方法种植于河南省温县农科所试验田,种子成熟后单株收获,次年从单株收获的种子中随机选取20粒种子繁殖成株系。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 高分子量麦谷蛋白 SDS-PAGE 电泳分析

溶液配制参照栗站稳<sup>[11]</sup>、李学军<sup>[12]</sup>的方法。采用不连续 SDS-PAGE 凝胶缓冲系统(12% 分离胶和 5% 浓缩胶)结合“半粒”法对突变系种

子进行分析。电泳设备为北京六一仪器厂的 DYY-6B 型稳压稳流电泳仪和 DYCZ-24DN 型垂直电泳槽。直流电压 120 V,电泳 2.5 h。小心取胶放进染色液,于水平摇床上染色 4~5 h,然后脱色至条带清晰,照相记录。谱带照片用 Photo-shop 处理为灰度照片。以中国春和原生态小偃81为对照。

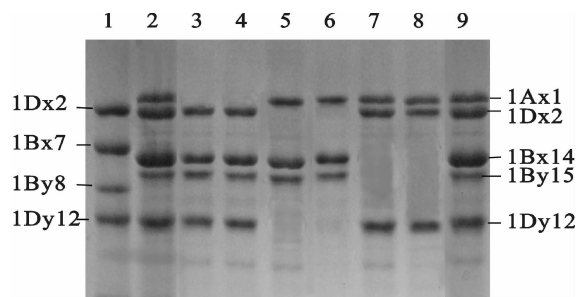
#### 1.2.2 醇溶蛋白 A-PAGE 电泳分析

从通过 SDS-PAGE 方法鉴定过的单株群体中随机选取三种缺失纯合体(1Ax1、1Bx14+1By15、1Dx2+1Dy12)各10株,每个单株随机选取5粒种子为材料。试验方法采用1986年ISTA颁布的酸性聚丙烯酰胺凝胶电泳(A-PAGE, pH=3.2)标准程序<sup>[13]</sup>。电泳设备为北京六一仪器厂的 DYY-6B 型稳压稳流电泳仪和 DYCZ-24A 型垂直电泳槽。选用 16% 凝胶溶液和 Fe-SO<sub>4</sub>-Vc-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 催化系统<sup>[14]</sup>。直流电压 300 V,电泳 5 h。小心取胶放进染色液,在水平摇床上染色 3~5 h,然后转移至脱色液中,脱色至条带清晰,照相记录。谱带照片用 Photoshop 处理为灰度照片。以中国春和原生态小偃81为对照。

## 2 结果与分析

### 2.1 离子束诱导后小麦高分子量麦谷蛋白亚基(HMW-GS)的变异

以中国春和原生态小偃81为对照,利用 SDS-PAGE 技术对小偃81突变家系进行分析,得到三个缺失突变系:1Ax1 缺失系、1Bx14+1By15 缺失系和 1Dx2+1Dy12 缺失系(图1)。通



泳道1代表中国春;泳道2、9代表小偃81;泳道3、4代表1Ax1缺失系;泳道5、6代表1Dx2+1Dy12缺失系;泳道7、8代表1Bx14+By15缺失系

Lane 1: Chinese Spring; Lane 2 and 9: Xiaoyan 81; Lane 3 and 4: Ax1 deletion line; Lane 5 and 6: 1Dx2+Dy12 deletion line; Lane 7 and 8: 1Bx14+By15 deletion line.

图1 高分子量麦谷蛋白亚基电泳图谱

Fig. 1 HMW-GS electrophoretic patterns

过对各缺失体在  $M_4$  代群体中出现的次数进行统计, 各突变系出现频率由高到低依次为  $1Ax1 > 1Bx14 + 1By15 > 1Dx2 + 1Dy12$  (表 1), 说明在  $M_4$  代群体中  $1Ax1$  缺失系的遗传稳定性较高, 其次是  $1Bx14 + 1By15$  缺失系,  $1Dx2 + 1Dy12$  缺失系

的遗传稳定性最低。从遗传变异系数上来看,  $1Ax1 > 1Bx14 + 1By15 = 1Dx2 + 1Dy12$ , 说明  $N^+$  离子对高分子量麦谷蛋白亚基位点的诱变效应不尽相同,  $Glu-A1$  位点对  $N^+$  离子最敏感,  $Glu-B1$  和  $Glu-D1$  位点对  $N^+$  离子的敏感性没有差异。

表 1 高分子量麦谷蛋白统计分析情况

Table 1 Situation of the HMW-GS statistical analysis

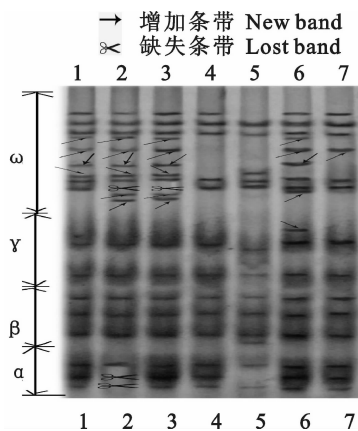
位点 Loci	缺失系类型 Type of deletion line	出现次数 Present time	出现频率 Present frequency / %	变异系数 Coefficient of variation
<i>Glu-A1</i>	1Ax1	124	82.7	0.759
<i>Glu-B1</i>	1Bx14+By15	117	78.0	0.711
<i>Glu-D1</i>	1Dx2+Dy12	104	69.3	0.711

出现频率 = (出现次数 / 150) × 100%, 每个缺失系共检测 150 粒。变异系数 =  $1 - \sum P_i^2$ ,  $P_i$  为某一特定位点特定等位基因的出现频率。

Present frequency = (present time / 150) × 100%. Each deletion line was detected in 150 grains. Coefficient of variation =  $1 - \sum P_i^2$ ,  $P_i$  is the specific allele's present frequency in some gene locus.

## 2.2 离子束诱导后小麦醇溶蛋白的变异

通过 A-PAGE 电泳分析, 共检测到 5 种醇溶蛋白变异类型, 其中  $1Ax1$  缺失系有 3 种变异类型 ( $1Ax1a$ ,  $1Ax1b$  和  $1Ax1c$ ),  $1Dx2 + 1Dy12$  缺失系和  $1Bx14 + 1By15$  缺失系各有一种变异类型 (图 2)。  $1Ax1a$  电泳出 17 条带,  $1Ax1b$  电泳出 16 条带,  $1Ax1c$  电泳出 18 条带,  $1Dx2 + 1Dy12$  电泳出 18 条带,  $1Bx14 + 1By15$  电泳出 14 条带。与原生态小偃 81 相比, 在  $\omega$  区,  $1Ax1a$  增加 4 条带,  $1Ax1b$  和  $1Ax1c$  相同, 都有 7 条变异条带 (6 条增加带, 1 条缺失带),  $1Dx2 + 1Dy12$  增加 4 条带,  $1Bx14 + 1By15$  增加 1 条带; 在  $\gamma$  区, 仅  $1Dx2 + 1Dy12$  增加 1 条带; 在  $\beta$  区, 都没有出现变异条带; 在  $\alpha$  区, 仅  $1Ax1b$  缺失 2 条带。  $1Bx14 + 1By15$  仅有 1 条增加带, 并且此条带在 5 种变异类型中都有出现。



1:  $1Ax1a$ ; 2:  $1Ax1b$ ; 3:  $1Ax1c$ ; 4: 小偃 81; 5: 中国春; 6:  $1Dx2 + 1Dy12$ ; 7:  $1Bx14 + 1By15$

1:  $1Ax1a$ ; 2:  $1Ax1b$ ; 3:  $1Ax1c$ ; 4: Xiaoyan 81; 5: Chinese Spring;  $1Dx2 + 1Dy12$ ; 7:  $1Bx14 + 1By15$ .

图 2 醇溶蛋白电泳图谱

Fig. 2 Gliadin proteins electrophoretic patterns

表 2 醇溶蛋白统计分析情况

Table 2 Situation of the gliadin protein variation

缺失系类型 type of deletion line	谱带总数 Total bands	变异带数 Variation bands	出现次数 Present time	出现频率 Present frequency / %	遗传相似系数 Genetic similarity coefficient
$1Ax1a$	17	4 ( $\omega$ 区)	12	24	0.869
$1Ax1b$	16	7 ( $\omega$ 区) 2 ( $\alpha$ 区)	8	16	0.690
$1Ax1c$	18	7 ( $\omega$ 区)	20	40	0.774
$1Dx2 + 1Dy12$	18	4 ( $\omega$ 区) 1 ( $\gamma$ 区)	24	48	0.813
$1Bx14 + 1By15$	14	1 ( $\omega$ 区)	36	72	0.963

出现频率 = (出现次数 / 50) × 100%, 每种缺失体共检测 50 粒; 遗传相似系数指各变异材料与原生态小偃 81 的遗传相似系数。

Present frequency = (present time / 50) × 100%. Each deletion line was detected in 50 grains. Genetic similarity coefficient refers to the relation between the variation of materials and Xiaoyan 81.

从表2可以看出,5种变异类型的出现频率有差异,1Ax1缺失系各变异类型的出现频率之和为80%,出现频率最大,其次是1Bx14+1By15缺失系变异类型的出现频率,1Dx2+1Dy12缺失系变异类型的出现频率最低,说明离子束对编码醇溶蛋白的基因有诱变效应,但各种变异类型出现的频率不同。在1Ax1缺失系中,3种变异类型的出现频率 $1Ax1c > 1Ax1a > 1Ax1b$ ,它们共同变异条带在 $M_4$ 代1Ax1缺失系群体中出现频率高达80%,说明编码这些变异条带的基因可能与编码1Ax1的基因有密切的相关性。从各变异材料与原生态小偃81之间的遗传相似系数来看,1Bx14+1By15缺失系遗传相似系数最大,变异最小,与原生态小偃81最相似,相反,1Ax1b代表的1Ax1缺失系,遗传相似系数最小,变异最大,与原生态小偃81差异最大,说明离子束诱导基因出现变异位点的数量不同。

### 3 讨论

自辐射诱变育种技术出现以来,人们尝试了多种诱变手段(X射线、 $\gamma$ 射线、中子束、电子束等),20世纪80年代中期,余增亮<sup>[15]</sup>首先把离子注入技术应用到水稻诱变育种上,开辟了离子束技术在辐射诱变育种上的新领域。目前的研究报道中,利用离子注入技术进行诱变育种研究,所用的元素离子多为 $N^+$ 、 $C^+$ 、 $O^+$ 、 $Ar^+$ 、 $Ne^+$ 、 $Fe^+$ 等,其中应用最多的是 $N^+$ 离子<sup>[16]</sup>。张利华<sup>[17]</sup>利用 $N^2$ 激光、 $N^+$ 离子注入和 $^{60}Co$ - $\gamma$ 射线处理小麦辐36,通过比较 $M_3$ 代突变株农艺性状,认为 $N^+$ 离子注入小麦对诱发高产性状突变比较有效。张怀渝<sup>[18]</sup>认为, $N^+$ 离子注入对小麦农艺性状的影响主要表现在生育期(抽穗期)、株高、穗型和产量性状上,对抗病性改善不大。王卫东<sup>[19]</sup>认为离子束注入对麦苗生长有明显的抑制作用。虽然离子束诱变技术在小麦育种方面取得很大成就<sup>[20]</sup>,但以往对离子束诱变效果研究主要集中在农艺性状的改善上,而在作物品质改良方面的应用研究较少。廖平安<sup>[21]</sup>用 $N^+$ 离子束处理小麦种子,发现 $M_1$ 代蛋白质含量的平均值高于对照, $M_2$ 代出现高蛋白株。郭春强<sup>[22]</sup>认为,适当的能量和剂量下,离子注入对农作物当代的产量和品质,有明显的改善。他们也只是在品质指标方面做了简单的分析,并没有对高分子量麦谷蛋白和醇溶蛋白的遗传变异情况进行系统分析,不能为离子束诱变技

术在有效改良小麦品质性状方面提供科学依据。本实验通过SDS-PAGE电泳,仅检测到三种缺失突变系:1Ax1突变系、1Bx14+1By15突变系和1Dx2+1Dy12突变系,而检测不到其他单亚基缺失系(如单1Bx14缺失系)、三个及以上亚基缺失系。说明 $N^+$ 离子注入能使原生态小偃81染色体位点上编码高分子量谷蛋白亚基基因发生变化,并形成新的亚基组合,同一位点上的基因缺失突变时是紧密连锁的,而不同位点基因之间没表现出相关性。在检测过程中发现个别图谱与原生态小偃81图谱不一致,也有一些杂株出现,可能是回复突变造成的。通过对高分子量麦谷蛋白遗传变异的情况分析可知, $N^+$ 离子对高分子量麦谷蛋白亚基位点具有诱变效应,并且突变体基因在后代中能稳定遗传。本实验检测到三种缺失突变系与原始品种小偃81形成多对近等基因系,可为研究各亚基在小麦品质中的作用提供了理想材料。

许多研究认为,离子束注入植物材料主要表现为点突变,以碱基的转换或颠换为主<sup>[23-25]</sup>。聂利红<sup>[26]</sup>认为离子束介导大豆DNA转入普通小麦后代中的高蛋白含量植株在醇溶蛋白和麦谷蛋白基因位点上可能出现了变异。姬磊<sup>[27]</sup>利用离子束注入小麦,发现后代群体的农艺性状发生了改变,同时有 $\omega$ 区醇溶蛋白的缺失和增加,SSR位点也有扩增的缺失、延长和缩短。焦焯<sup>[28]</sup>对离子束诱变小麦 $M_4$ 代高蛋白稳定株系的醇溶蛋白和氨基酸组分进行了分析,发现在 $\omega$ 区醇溶蛋白谱带数目明显增多。本实验通过A-PAGE电泳(图2),检测到每种缺失体在 $\omega$ 区都有变异,进而说明控制 $\omega$ 区编码的基因位点对 $N^+$ 离子敏感程度比较高,更容易发生显性突变。 $\beta$ 区没有发现变异类型,说明控制 $\beta$ 区编码的基因位点最不敏感。在1Ax1缺失系中,三种材料出现的频率 $1Ax1c > 1Ax1a > 1Ax1b$ ,表明相同剂量下,1Ax1c中控制编码变异条带的基因更容易受到影响,1Ax1b出现频率相对较低,可能是由于编码 $\omega$ 区和 $\alpha$ 区变异条带的基因同时发生变异的几率低。然而,同一高分子量麦谷蛋白亚基(1Ax1)缺失体中醇溶蛋白电泳图谱的丰富多态性,正好反映出了编码醇溶蛋白的基因位点在遗传上的多态性和复杂性。唯独在1Dx2+1Dy12缺失系中, $\gamma$ 区增加一条谱带,估计是控制编码该变异条带的基因与*Glu-D1*位点编码1Dx2+1Dy12亚基的基因连锁

缺失造成的。在1Bx14+1By15缺失系中仅出现一条变异谱带,说明控制该谱带编码的基因只能编码出这一条谱带,有可能是受一对等位基因控制。可以认为, $N^+$ 离子束对编码醇溶蛋白的基因是有诱导效应的,但是各基因位点的具体变异情况以及发生突变时HMW-GS基因和醇溶蛋白亚基基因之间的相互关系还不清楚,需要做进一步的研究。

离子束作为一种新的诱变源,具有传统诱变技术无法比拟的优点,但是有益突变频率仍然较低,变异的方向和性质尚难控制。因此探索所用剂量和能量,提高诱变效率,结合现代生物技术,迅速筛选出符合育种目标的突变类型,是当前研究的重要课题。本实验研究结果表明,用 $N^+$ 注入,注入能量为30 Kev,注入剂量为 $8 \times 10^{17} N^+ / cm^2$ ,以SDS-PAGE技术和A-PAGE技术,结合“半粒子”法,能迅速有效地鉴定和筛选出小麦突变体。

#### 参考文献:

[1]刘东涛,冯国华,谢佩松,等.黄淮麦区小麦品种高分子量谷蛋白亚基组成[J].麦类作物学报,2007,27(4):645-648.

[2]余增亮,何建军,邓建国,等.离子注入水稻诱变育种机理初探[J].安徽农业科学,1989,39(1):12-16.

[3]杨赞林,甘斌杰,余增亮,等.离子注入小麦诱变育种的回顾与展望[C].第一次国际离子束生物工程学术研讨会论文集.2002.62-65.

[4]辛庆国,刘录祥,于元杰,等.离子注入技术及其在小麦育种中的应用[J].麦类作物学报,2007,27(2):354-357.

[5]Yu Zengliang. Ion beam Application in Genetic Modification [J]. IEEE. Transactions on Plasma Science,2000,28(1):128-132.

[6]Wang X F,Zhou H Y. Penetration depth and concentration distribution for implanted heavy ions with low energies in plant seeds by SEM and EDS[J]. Nuclear Sci & Tech,2001,12(1):22-26.

[7]吴李君,黑国庆,许安.从GD59基因的变化比较细胞核、细胞质辐射损伤的生物效应差异[J].中国科学(C辑),2001,31(1):84-88.

[8]乔中英,王建平,朱勇良,等.离子注入技术在水稻育种上的应用研究[J].浙江农业科学,2006,(5):557-559.

[9]余丽霞,李文建,董喜存,等.离子束生物技术及其在玉米育种中的应用[J].同位素,2008,21(4):235-240.

[10]宣云,王会峰,黄群策,等.离子束生物技术在小麦遗传改良中的应用[J].农业生物技术学报,2004,20(1):32-34.

[11]栗站稳,阎旭东,卢少源,等.适于分析小麦高分子量麦谷蛋白亚基的SDS-PAGE方法[J].河北农业大学学报,1994,17(2):19-23.

[12]李学军,曹丽华,王辉,等.半子粒小麦高分子量麦谷蛋白亚基的SDS-PAGE分析方法[J].河南农业大学学报,2003,37(3):209-212.

[13]Draper S R. ISTA committee report of the working group for biochemical of test for cultivar indetification [J]. Seed Science and Technology,1987,(15):431-434.

[14]王祖华,杨瑞先,姬少波,等.小麦醇溶蛋白酸性聚丙烯酰胺凝胶电泳方法的优化及应用[J].中国农学通报,2009,25(20):54-57.

[15]余增亮,霍裕平.离子注入生物学研究述评[J].安徽农业大学学报,1994,21(3):221-225.

[16]梁前进,胡玉连,张根发.拟南芥氮、碳离子注入诱变效应分析[J].生物物理学报,2002,18(2):251-255.

[17]张利华. $N_2$ 激光和氮离子注入对小麦一些性状的影响[J].种子,1999,3:15-17.

[18]张怀渝,宋云,任正隆,等.低能 $N^+$ 离子束诱导小麦农艺性状变异的细胞学基础[J].四川农业大学学报,2005,23(2):147-151.

[19]王卫东,王燕,王雪青,等.离子注入对小麦当代形态生理影响的初步研究[J].激光生物学报,2003,12(5):360-363.

[20]韩微波,刘录祥,郭会君,等.小麦诱变育种新技术研究进展[J].麦类作物学报 2005,25(6):125-129.

[21]廖平安,郭春强,靳文奎.小麦离子束诱变后代蛋白质含量的变化[J].安徽农业科学,2005,23(4):569.

[22]郭春强,靳文奎,廖平安,等.离子束生物技术在小麦育种上的应用及影响[J].农业与技术,2004,24(6):61-63.

[23]常凤启,刘选明,李银心,等.低能 $N^+$ 辐照拟南芥诱导基因组DNA碱基变异分析[J].中国科学(C辑),2003,33(2):117-124.

[24]李永红.离子束的生物效应及诱变机理研究进展[J].河南农业大学学报,2002,36(2):159-163.

[25]Li Ke,Nie Yanli,Zhang Dongzheng,*et al.* AFLP analysis of *Arabidopsis thaliana* treated by low-energy ion beam [J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2007,35(2):454-459.

[26]聂利红,崔党群,闻捷,等.离子束介导大豆DNA转入普通小麦后代的麦谷蛋白和醇溶蛋白分析[J].麦类作物学报,2005,25(3):125-127.

[27]姬磊,李文义,王成社,等.氮离子束注入诱变小麦的研究[J].遗传学报,2005,32(11):1176-1183.

[28]焦演,史艳芹,秦广雍,等.离子束诱变对 $M_1$ 代小麦醇溶蛋白和氨基酸组分的影响[J].河南农业科学,2009,(6):25-27.