

$^{12}\text{C}^{6+}$ 重离子辐照胡麻种子初步研究

侯岁稳^{1,2} 吴大利^{1,2} 张颖聪^{1,2} 孙兰弟^{1,2} 李文建¹

颀红梅¹ 梁凯² 张彦萍² 程曦² 秦倩倩² 贾瑞玲²

¹ (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

² (兰州大学生命科学学院 干旱与草地生态教育部重点实验室 兰州 730000)

摘要 本文研究了 $6\times 10^8\text{ cm}^{-2}$ 、 $1.8\times 10^9\text{ cm}^{-2}$ 和 $3.6\times 10^9\text{ cm}^{-2}$ 的 $^{12}\text{C}^{6+}$ 重离子束辐照对胡麻种子 M1 代生物学性状和 DNA 分子多态性等方面的影响。 $6\times 10^8\text{ cm}^{-2}$ 辐照处理可引起胡麻发芽率提高, 促进植株株高, 增强花粉活力。同时辐照处理使胡麻种子千粒重和含油量有不同程度提高, 辐射剂量越高, 两者数值越大, $3.6\times 10^9\text{ cm}^{-2}$ 辐射剂量的胡麻种子千粒重和含油量与对照组的相比分别高出了 16.5% 和 19.9%, 此外在此剂量处发现了花粉发生了形态变化。辐照处理对胡麻 DNA 分子也产生了影响, 筛选出的 14 个随机引物可以扩增出清晰、稳定、重复性好的 DNA 片段, 有 52 个是多态性 DNA 片段, 比率为 52.5%。

关键词 $^{12}\text{C}^{6+}$ 重离子, 胡麻种子, 生物学效应, RAPD(Randomly amplified polymorphic DNAs)分析

中图分类号 Q691.2, Q691.8, Q319⁺.3

胡麻(*Linum usitatissimum* L.), 又称为油用亚麻, 属于亚麻科(Linaceae), 一年生草本植物, 是世界十大油料作物之一, 其产量占第七位。油用亚麻主要产于加拿大、中国、阿根廷、美国。我国胡麻主要分布在华北和西北地区, 为我国五大油料作物之一, 含油 30%~40%, 其中 α -亚麻酸含量在 50% 以上。亚麻全身都是宝, 从根、原茎到种子都可以加工利用。除了作为高品质的食用油之外, 还具有保健、防病、治病等多项功能^[1, 2]; 而且胡麻油也可以广泛用于油漆等工业领域^[3, 4]。胡麻在我国主要分布于西北, 多为干旱少雨地区, 极大地限制了其推广种植, 如何提升胡麻的种植收益是发展地方经济、调整产业结构, 特别对偏远贫困地区的农民生产和生活, 具有深远影响。当前胡麻实际生产中存在着抗病性差、产量低、油脂品质有待提高等诸多问题, 因此需要选育出产量高、品质优良或者抗性强的胡麻新品种^[5, 6]。

与 γ 射线和中子相比, 重离子在诱变生物学方面有着许多独特的优势, 比如: 具有较高的突变率; 可以选择辐照位置; 注入情况下, 除能量转移和电荷交换外, 还有质量沉积^[7-9]。从 20 世纪 80 年代中期就开始出现了重离子诱变育种相关试验。国内目前重离子在小麦、花卉和油料作物等良种繁育方

面已经取得了较大的成功, 如已经培育出的“陇辐 2 号”小麦品种, 得到了大丽花花色突变体, 在油料作物上也同样得到了高油酸油菜品种^[10-12]。本实验首次采用重离子辐照的方法系统研究了 $^{12}\text{C}^{6+}$ 重离子束对胡麻的形态特征、种子品质性状、花粉形态和活力及 DNA 分子多态性等方面的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

实验材料为兰州当地市售的胡麻种子。

1.2 辐照处理方法

胡麻种子是在兰州重离子加速器国家实验室(NL-HIAL)重离子研究装置(HIRFL)TL2 终端上进行辐照的。兰州重离子研究装置加速的重离子 ^{12}C , 经过束流管道的镍窗、电离室、空气、降能片后抵达样品(植物种子), 用空气电离室监测注量, 样品更换和数据获取由计算机控制, 全部过程在室温和大气环境条件下进行。照射在胡麻干种子上的离子能量为 80.55 MeV/u, LET 为 40 keV/ μm , 辐照注量分别为 0 (CK)、 6×10^8 、 1.8×10^9 、 $3.6\times 10^9\text{ cm}^{-2}$ 。

“西部之光”联合学者项目(XL050616)、教育部新世纪优秀人才支持计划和甘肃省农业生物技术专项(GNSW-2006-16)资助

第一作者: 侯岁稳, 1969年3月出生, 2004年于兰州大学获得博士学位, 中国科学院近代物理研究所博士后, 硕士生导师, E-mail: housw@lzu.edu.cn

收稿日期: 初稿 2007-09-18, 修回 2007-10-29

1.3 检测指标

1.3.1 发芽势和发芽率测定 每个辐照剂量各播种2000粒。发芽以子叶展开为标准,第5天对发芽率进行统计,发芽势按下列公式进行计算:

$$\text{发芽势} = \frac{\text{某天发芽的种子数}}{\text{当天的天数}}$$

1.3.2 株高 对大田中生长的胡麻株高进行3次统计,每个处理组各统计30株。

1.3.3 花粉形态观察和活力测定 对胡麻花粉形态的观察的方法是采用卡宝品红浸染花粉5 min,之后压片观察形态。采用改良氯化三苯基四氮唑(TTC)法检测胡麻花粉活力。方法为:取已成熟尚未开放的花药5~10个,切断花药两端,放入 eppendorf 管中,加入100~400 μL 0.2%TTC溶液,要完全浸没花药。在30 $^{\circ}\text{C}$ 左右染色30~60 min。取出花药,置于载玻片上,用解剖针压出花粉,去掉花药药壁组织,盖上盖玻片。取10个视野镜检观测。凡花粉变红说明有活力,染色越深活力越强;染不上色则没有活力。花粉活力按下列公式进行计算:

$$\text{花粉活力} = \frac{\text{染上色的花粉粒个数}}{\text{总花粉粒个数}} \times 100\%$$

1.3.4 单株蒴果数、单株产量和千粒重 在大田中从每个辐照梯度各随机选取30株,统计各株的蒴果数,并分别装袋,标记。于实验室内晾干种子之后,分别脱粒,称取产量,统计单株产量。之后再统计各个辐照梯度的千粒重。单株蒴果数和单株产量分别按照下列公式进行计算:单株蒴果数 = $\frac{\text{蒴果数}}{\text{株数}}$;

$$\text{单株产量} = \frac{\text{种子重量}}{\text{株数}}$$

1.3.5 油脂含量测定 将各个辐照梯度的胡麻种子洗净晾干,分别称取10g,加入一药勺石英砂(约2g),充分研磨。用石油醚(30~60 $^{\circ}\text{C}$)在40 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中浸泡过夜。第2天滤去沉渣,收集石油醚混合液,重新用石油醚提取沉渣中残留的油脂。前后两次石油醚提取液放在一起,用2%硫酸钠溶液洗涤,

进行萃取。加入1~2g无水硫酸钠脱去残留水分。之后于80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中挥发石油醚,称量所提取的油脂重量。实验重复3次。

$$\text{种子含油量} = \frac{\text{每10g种子含油量}}{10\text{g种子}} \times 100\%$$

1.3.6 RAPD(Randomly amplified polymorphic DNAs)分析 (1) DNA提取方法 取两周左右幼苗的嫩叶,每个参试材料取20株。参照Doyle等^[13]报道的方法,采用改良的CTAB法提取胡麻基因组总DNA。(2) RAPD反应 对65个10碱基随机引物(购自上海生工生物工程技术服务有限公司S系列)进行筛选,将扩增条带清晰、重复性好的14个引物复选出来,用于本试验的PCR扩增。PCR反应体系(30 μL)含有3 μL 10 \times buffer, 2.4 μL MgCl_2 (2 mmol/L), 0.6 μL dNTPs (0.2 mmol/L), 0.6 μL 引物 (20 $\mu\text{mol/L}$), 0.2 μL Taq酶(1U), 模板DNA 20ng, 20.2 μL 双蒸水。PCR反应在Eppendorf Mastercycler Gradient 扩增仪上进行,反应程序为:94 $^{\circ}\text{C}$ 变性5 min; 95 $^{\circ}\text{C}$ 45 s, 32 $^{\circ}\text{C}$ 45 s, 72 $^{\circ}\text{C}$ 1 min, 40循环, 72 $^{\circ}\text{C}$ 延伸10 min。扩增产物于1.0%的琼脂糖凝胶上,80V电泳40 min,溴化乙锭染色,凝胶成像系统拍照、保存图像用于进一步分析。

2 结果与分析

2.1 发芽率和发芽势

$^{12}\text{C}^{6+}$ 重离子辐照后的三个梯度的种子的第10天发芽率和相对发芽率远远高于对照组, 6×10^8 、 1.8×10^9 和 $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 的相对发芽率分别为1.43、1.42、1.25,这说明 $^{12}\text{C}^{6+}$ 重离子辐照有助于提高胡麻种子的发芽率,而且低剂量的重离子辐照要比高剂量更有利于胡麻种子的发芽。但是从发芽势和相对发芽势方面来说,三个处理组的第10天发芽势比对照组要低了许多, 6×10^8 、 1.8×10^9 和 $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 相对发芽势分别是0.77、0.47和0.34,随着辐照剂量的增大,发芽势和相对发芽势呈现显著下降的趋势(见表1)。重离子辐照后发芽率和发芽势表现出负相关性。

Table 1 Germination assay of linseed seeds

Irradiation dose / cm^{-2}	Germination rate /%	Relative germination rate	Germination vigor / plants \cdot day $^{-1}$	Relative germination vigor
CK	51.57 \pm 0.57	1	17.17 \pm 1.58	1
6×10^8	73.90 \pm 0.92*	1.43	13.33 \pm 0.99*	0.77
1.8×10^9	73.40 \pm 0.80*	1.42	8.23 \pm 1.57*	0.47
3.6×10^9	64.67 \pm 2.23*	1.25	5.93 \pm 0.36*	0.34

Note: *The mean difference is significant at the 0.05 level compared with CK

2.2 株高

重离子辐照对胡麻株高影响随着时间的推移表现出很大差异。在第10天 $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 的和 $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 的胡麻株高都显著高于对照,尤其是第23天的处理组各个梯度株高都显著高于对照,但是

第30天仅仅 $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 的株高显著低于对照,第40天之后各个处理组和对照的株高之间就没有了显著差异(见表2)。总体看来,重离子对胡麻株高的促进作用不是很理想,仅仅在 $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 低剂量处存在稍微的促进作用,另外高剂量的重离子辐照对其株高的抑制作用也是不明显。

Table 2 Effects of $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions on the height of linseed

Irradiation dose / cm^{-2}	10d	23d	30d	40d
CK	4.63±0.18	20.67±0.86	36.53±0.97	52.50±1.47
6×10^8	5.83±0.18*	27.67±0.89*	36.13±0.97	54.17±1.36
1.8×10^9	5.44±0.19*	24.53±1.05*	34.40±0.93	53.73±1.22
3.6×10^9	4.40±0.26	23.43±0.91*	33.90±0.79*	49.43±1.00

Note: *The mean difference is significant at the 0.05 level compared with CK

2.3 花粉形态观察和活力测定

重离子辐照对胡麻花粉活力有着非常明显的影响,变化趋势表现为抛物线趋势。 $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 剂量的胡麻花粉活力比对照增加了3.5%。 $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 和 $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 两个剂量胡麻花粉活力与对照相比分别下降了8.2%和14.0%。试验结果表明,低剂量的重离子辐照可以促进胡麻花粉活力的提高,高剂量的辐照则明显地抑制了胡麻花粉活力,而且辐照剂量越大,抑制作用越强(见图1)。很有意思的一个现象是,通过对胡麻花粉形态的观察,发现剂量为 $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 的胡麻花粉与对照相比,大小不一致。而 $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 和 $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 处理的小孢子大小变化不明显(见图2)。

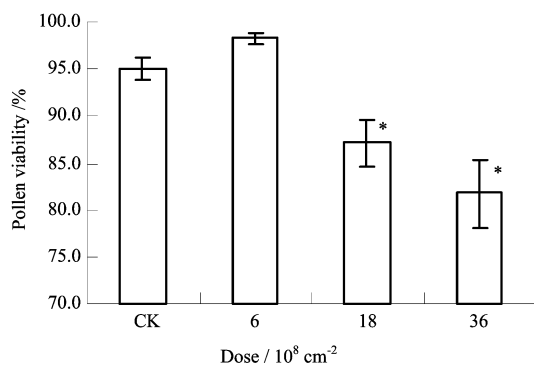


Fig. 1 Pollen viability of linseed induced by $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions (* $P < 0.05$ compared with CK)

2.4 单株蒴果数、单株产量和千粒重

胡麻的单株蒴果数和单株产量均呈现出波浪式的跳跃变化趋势。这与上面的发芽率、株高和花粉活力的抛物线趋势表现出了不一样。单株蒴果数和单株

产量在 $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 低剂量处分别为 105.5 个/株和 3.5g/株,高出对照组的这两个指标约 25.7%和 52.2%。然而当辐照剂量升高到 $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 的时候,其单株蒴果数要比对照组的蒴果数低了 20.7%,单株产量仅仅低了 0.1%,大体上与对照组持平。但是辐照剂量达到 $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时,又呈现出上升趋势,单株产量比对照上升了 19.1%,单株蒴果数也略微上升了 1.3%(见图3和图4)。此外胡麻的千粒重随着辐照剂量的提高而逐渐增加。相对于对照组的千粒重来说, $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 和 $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 辐照梯度的千粒重分别提高了 3.1%、10.2%和 16.5%(见图5)。

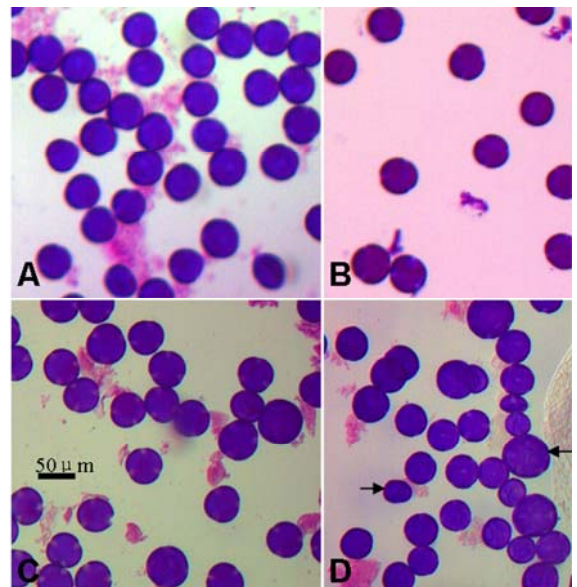


Fig. 2 Cytological observation of pollens of linseed
A: CK; B: $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$; C: $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$;
D: $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$; Arrows refer to abnormal pollens

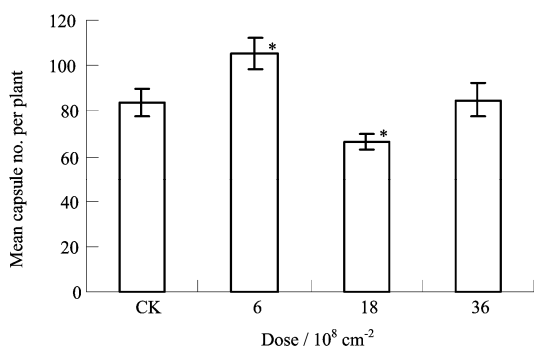


Fig. 3 Effects of $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions on mean capsule per single linseed (* $P < 0.05$ compared with CK)

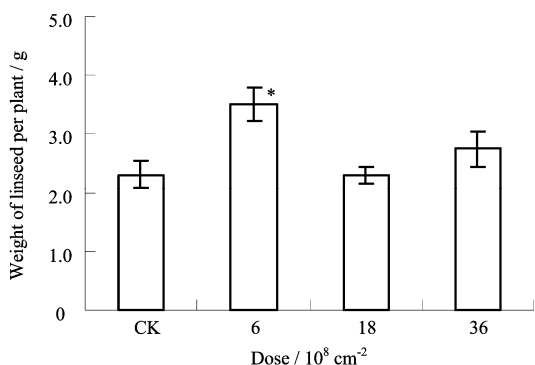


Fig. 4 Effects of $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions on yield per single plant of plant of linseed (* $P < 0.05$ compared with CK)

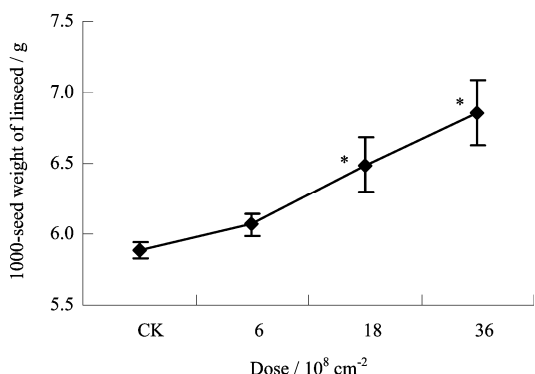


Fig. 5 Effects of $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions on weight of 1000 linseed seed(* $P < 0.05$ compared with CK)

2.5 油脂含量测定

重离子辐照对胡麻的含油量的提高作用是极其明显的, 正如对胡麻千粒重的增加的影响, 而且是辐照剂量越高, 含油量越大, 呈现不断上升趋势。对照组和各个辐照处理组的胡麻种子含油量分别为 3.26 g、3.36 g、3.69 g 和 3.91 g。 $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 和 $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 三个辐照梯度的含油量分别高出对照组 3.1%、13.2%和 19.9% (见图 6)。另外在室温条件下 (约 20°C) 分别对 3 个辐照处理组和对照组进行密度测定, 测定的结果分别是 $(0.92 \pm 0.01) \text{ g/mL}$ 、 $(0.91 \pm 0.02) \text{ g/mL}$ 、 $(0.90 \pm 0.02) \text{ g/mL}$ 和 $(0.91 \pm 0.01) \text{ g/mL}$ 。胡麻在 20°C 的密度大约为

0.92 g/mL , 四个组所测定的密度值基本上与常规胡麻密度接近, 说明所得到的含油量值是具有可靠性的。

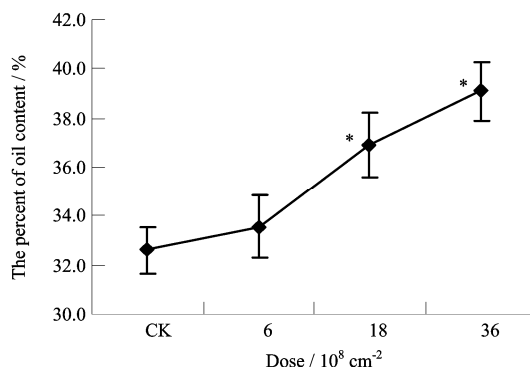


Fig. 6 Effects of $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions on the percent of oil content of linseed(* $P < 0.05$ compared with CK)

2.6 RAPD分析

RAPD 分析总共使用了 65 个引物, 从中选择了 14 条重复性好、条带清晰、较为稳定的引物作为试验分析 (见图 7)。每个引物扩增的条带数为 2~18 条, 平均每个引物大约扩增了 7.1 条 DNA 片段, RAPD 带的大小在 100~2000 bp 范围之内。其中对照、 $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 、 $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 和 $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 分别扩增了 13 条、28 条、30 条、28 条 DNA 片段 (见表 3)。对辐照处理组的多态性分析表明, 在 $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 处理组 28 条 DNA 片段有 17 条是多态性条带, 其多态性比率达到了 60.7%; $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 处理组中 16 条 DNA 片段是多态性的, 多态性比率是 53.3%; $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 处理组扩增出的 28 条 DNA 片段 中有 19 条是多态性带, 多态性比率上升到 67.9%, 高于其他两个处理组的多态性比率 (见表 4)。

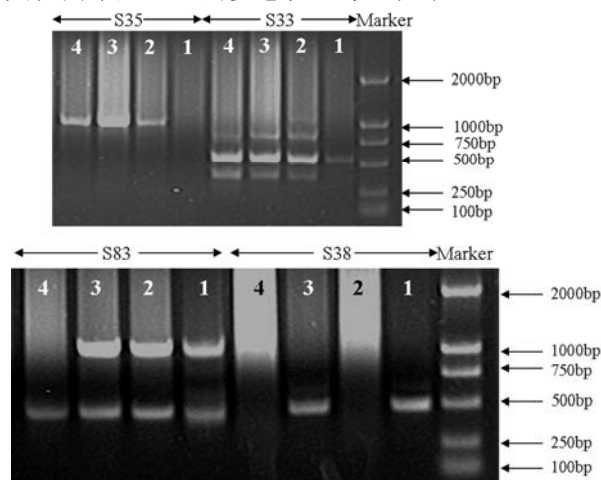


Fig. 7 The RAPD patterns of primers S33, S35, S38 and S83 1:CK; 2: $6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$; 3: $1.8 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$; 4: $3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$

Table 3 Primers of RAPD and the amplification of PCR

primer	Primer sequence	No. of RAPD band	primer	Primer sequence	No. of RAPD band
S23	AGTCAGCCAC	18	S39	CAAACGTCGG	3
S27	GAAACGGGTG	3	S40	GTTGCGATCC	13
S29	GGGTAACGCC	6	S72	TGTCATCCCC	8
S31	CAATCGCCGT	3	S83	GAGCCCTCCA	7
S33	CAGCACCCAC	11	S86	GTGCCTAACC	2
S35	TTCCGAACCC	3	S88	TCACGTCCAC	6
S38	AGGTGACCGT	7	S97	ACGACCGACA	9

Table 4 Band patterns analysis of RAPDs

Dose/ cm ⁻²	Total No. of bands	No. of polymorphic bands	Ratio of polymorphic bands/%	No. of bands per assay unit
CK	13	—	—	0.93
6×10 ⁸	28	17	60.7	2
1.8×10 ⁹	30	16	53.3	2.14
3.6×10 ⁹	28	19	67.9	2

3 讨论

3.1 ¹²C⁶⁺重离子辐照对胡麻生物学效应的影响

¹²C⁶⁺重离子辐照对胡麻的发芽状况、株高、花粉形态和活力都产生了显著的影响。重离子辐照对这些生物学性状影响的总体表现趋势为低剂量辐照有促进作用，高剂量的辐照则显现出了抑制作用，而且剂量愈大抑制作用愈加强烈。说明低辐照剂量要比高辐照剂量更加能够促进胡麻生物学性状改善。重离子辐照后的玉米试验中体现出来类似的结果，但是采用低能离子辐照后的小麦在低剂量没有显著促进作用^[14,15]。

重离子对胡麻小孢子大小和性状均产生影响，发现了除常规的圆形小孢子之外，还产生了纺锤形、不规则圆形等形状。通过对卫星搭载后凤仙花小孢子的研究，发现大多数小孢子与对照株的小孢子的形状相似，呈长型圆柱状，但有的小孢子呈圆形、椭圆形、五角形、多角形等多种形状。而且诱导后的小孢子大小不一致，特别是出现了许多体积较小的小孢子。而未经处理的小孢子大小基本一致，仅有极个别的微小孢子。在小孢子育性方面，对照组大多数花粉可育，但是处理组有部分植株具有育性，另外部分植株的育性显著降低，不到30%^[16]。小孢子大小不等的现象可能是由于减数分裂时两极的染色体分配不均，则围绕染色体所形成细胞核的大小不一致，细胞核外部的细胞质的多少也不相等，因此细胞的大小出现差异。同样由于重离子破坏了胡

麻的相关染色体或基因结构，进而干扰基因的正常表达，降低了花粉活力，进而使得产量下降。

与¹²C⁶⁺重离子辐照对胡麻生物学性状的影响相比，重离子辐照对胡麻农艺学性状的影响有些不同之处。单株蒴果数和单株产量两个指标虽然表现出在低剂量时增高了，但同时高剂量时表现出先下降又爬升的现象。另外对胡麻千粒重和胡麻种子含油量的影响大体上随着辐照剂量的升高，也都在逐步攀升。3.6×10⁹ cm⁻²辐照剂量的胡麻每克种子含油量较其他三组要高，其中比对照组的含油量高了将近20%。由此说明采用¹²C⁶⁺重离子方法，培育出产量或含油量高的胡麻新品种具有很大的可能性。

此外发现3.6×10⁹ cm⁻²辐照剂量的胡麻的第一朵花开花时间比其他三组提前了3 d，其成熟期比对照组提前了大约一个星期，这说明了在一定程度上较高剂量的辐照可以缩短胡麻的生育期，进而选育胡麻的早熟品种。而且在株高上也比对照组要低了约6%，有利于提高胡麻的抗倒伏性。

3.2 ¹²C⁶⁺重离子辐照后的RAPD分析

当高频电磁辐射或者重离子辐照生物体之后，大量的能量分散在生物体的细胞内，这可能会使细胞内的某些物质激活或者发生离子化，并进一步释放二次电子。此外，由于离子化水分子的作用会造成如羟自由基类的活性氧物质，这些自由基导致了不同类型的化学物质的改变。就DNA来说，会产生单链DNA或双链DNA的断裂、DNA合成等现象^[17-19]。在DNA水平上RAPD是一种有效的检测基因差异的技术^[20,21]。

对胡麻对照组和三个辐照处理组基因组 DNA 进行分析, 结果显示其多态性程度较高, 说明三个辐照处理组的基因组结构的确发生了变化。14 个引物共产生 99 条 DNA 片段, DNA 片段分子量分布在 100~2000 bp 之间, 14 个引物共产生了 52 条多态性 DNA 片段, 比率为 52.5%。对重离子辐照后大丽花的突变体和野生型进行 RAPD 分析初步研究表明: 10 个引物共产生了 78 条 DNA 片段, 多数片段分子量范围为 250~1000 kb, 多态性 DNA 比率为 69.2%^[11]。DNA 片段的多态性比率和重离子辐照剂量之间存在着正相关性, 重离子辐照剂量增大, DNA 片段的多态性比率随之上升。

4 结论

本文利用 $^{12}\text{C}^{6+}$ 重离子辐照, 初步探讨了胡麻诱变育种机制, 许多生物学性状和农艺学性状, 例如发芽状况、单株蒴果数、单株产量、含油量等都受到了重离子辐照的深刻影响。产生这些变化的原因可以归结为辐照引起的胡麻 DNA 的改变。在本研究的 $6 \times 10^8 \sim 3.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ $^{12}\text{C}^{6+}$ 重离子辐照处理情况下, 更多地表现为对胡麻生长发育的刺激作用, 引起的变异还不太大, 不够广泛。因此, 对胡麻作物而言, 应加大 $^{12}\text{C}^{6+}$ 重离子辐照剂量, 才能产生更多的变异, 扩大突变谱。

参考文献

- Berry E M, Hirsch J. *Am J Clin Nutr*, 1986, **44**(3): 336-340
- Kelley D S, Branch L B, Love J E, *et al.* *Am J Clin Nutr*, 1991, **53**(1): 40-46
- 陈海华. *中国油脂*, 2004, **29**(6): 72-75
CHEN Haihua. *China Oils Fats*, 2004, **29**(6): 72-75
- 史高峰, 荆浩冉, 陈学福, 等. *安徽农业科学*, 2006, **34**(10): 2179-2181
SHI Gaofeng, JING Haoran, CHEN Xuefu, *et al.* *J Anhui Agri Sci*, 2006, **34**(10): 2179-2181
- 郑玉彬, 齐士发, 石书兵, 等. *新疆农业科技*, 2007, 2: 40
ZHENG Yubin, QI Shifa, SHI Shubing, *et al.* *Xinjiang Agr Sci Tech*, 2007, 2: 40
- 秦爱红, 安维太, 岳国强. *甘肃农业科技*, 2002, 12: 5-7
QIN Aihong, AN Weitai, YUE Guoqiang. *Gansu Agr Sci Tech*, 2002, 12: 5-7
- 顾红梅, 王浩瀚, 王菊芳, 等. *原子核物理评论*, 2001, **18**(3): 174-176
XIE Hongmei, WANG Haohan, WANG Jufang, *et al.* *Nucl Phys Rev*, 2001, **18**(3): 174-176
- Yu Zengliang, Translated by Yu Liangdeng, Thiraphat Vilathong and Ian Brown. *Introduction to Ion Beam Biotechnology*. New York: Springer-Verlag, 2006. 62-65, 72-74
- Huiyun Feng, Zengliang Yu, Paul K. Chu. *Materials Science and Engineering*, 2006, **54**(3-4): 49-120
- 李雁民, 赵连芝, 王勇, 等. *麦类作物学报*, 2004, **24**(2): 137
LI Yanmin, ZHAO Lianzhi, WANG Yong, *et al.* *J Triticeae Crops*, 2004, **24**(2): 137
- 董喜存, 李文建, 余丽霞, 等. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2007, **25**(1): 62-64
DONG Xicun, LI Wenjian, YU Lixia, *et al.* *J. Radiat. Res. Radiat. Process*, 2007, **25**(1): 62-64
- 官春云, 刘春林, 陈社员, 等. *作物学报*, 2006, **32**(11): 1625-1629
GUAN Chunyun, LIU Chunlin, CHEN Sheyuan, *et al.* *Acta Agronomica Sinica*, 2006, **32**(11): 1625-1629
- Doyle J, Doyle J L. *Phytochem Bull*, 1987, **19**: 11-15
- 罗红兵, 赵葵, 郭继宇, 等. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2004, **30**(4): 385-388
LUO Hongbing, ZHAO Kui, GUO Jiyu, *et al.* *J Hunan Agr Univ (Natural Sciences)*, 2004, **30**(4): 385-388
- Wu Lifang, Yu Zengliang. *Radiat Environ Biophys*, 2001, **40**: 53-57
- 汤泽生, 杨军, 刘平, 等. *西南农业学报*, 2006, **19**(3): 476-481
TANG Zesheng, YNAG Jun, LIU Ping, *et al.* *Southwest Chin J Agr Sci*, 2006, **19**(3): 476-481
- 冯岩, 卫增泉, 李文建, 等. *激光生物学报*, 2002, **11**(1): 19-22
FENG Yan, WEI Zengquan, LI Wenjian, *et al.* *Acta Laser Biology Sinica*, 2002, **11**(1): 19-22
- Bassing C H, Chua K F, Sekiguchi J, *et al.* *PNAS*, 2002, **99**(12): 8173-8178
- Tusell L, Latre L, Ponsa I, *et al.* *J Radiat Res*, 2004, **45**(3): 415-422
- Isabel N, Beaulieu J, Theriault P, *et al.* *Mol Ecol*, 1999, **8**(2): 91-99
- Merilä J, Crnokrak P. *J Evolutionary Biol*, 2001, **14**(6): 892-903

Preliminary study of *Linum usitatissimum* seed irradiated by $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions

HOU Suiwen^{1,2} WU Dali^{1,2} ZHANG Yingcong^{1,2} SUN Landi^{1,2} LI Wenjian¹
XIE Hongmei¹ LIANG Kai² ZHANG Yanping² CHENG Xi² QIN Qianqian² JIA Ruiling²

¹ (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

² (Key Laboratory of Arid And Grassland Ecology, Ministry of Education, School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT The study of heavy ion beams as a new irradiation resource on seeds of linseed (*Linum usitatissimum* L.) was reported. After irradiated by $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions (with irradiation dose: $6\times 10^8\text{ cm}^{-2}$, $1.8\times 10^9\text{ cm}^{-2}$ and $3.6\times 10^9\text{ cm}^{-2}$ respectively), the biological characters, agricultural traits, pollens and polymorphic DNA of sample was studied in *Linum usitatissimum* L.. The results showed that $6\times 10^8\text{ cm}^{-2}$ of $^{12}\text{C}^{6+}$ could promote the linseed germination rate, plant height and pollen viability. The 1000-seed weight and the oil content of seed irradiated by $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions was increased with augment of irradiation dose respectively. It has been found that $3.6\times 10^9\text{ cm}^{-2}$ is the most effective dose for increment both of seed weight and oil content with 16.5% and 19.9%, respectively. Cytological observation reveals that the highest dose ($3.6\times 10^9\text{ cm}^{-2}$) can also induce alteration of pollen shape of linseed. Furthermore, RAPD(Randomly amplified polymorphic DNAs) analysis shows that 99 DNA fragments are amplified by 14 primers and the polymorphic ratio is 52.5%.

KEYWORDS $^{12}\text{C}^{6+}$ heavy ions, *Linum usitatissimum* L., Biological effect, RAPD(Randomly amplified polymorphic DNAs) analysis

CLC Q691.2, Q691.8, Q319+.3