

文章编号: 1007-4627(2008)02-0165-06

重离子束辐照育种研究进展及发展趋势*

周利斌, 李文建[#], 曲颖, 李萍

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 相对于低能离子束生物学, 中能重离子束对植物的诱变效应介绍较少。从机理上综述了中能重离子束辐照诱变技术的优点, 简要介绍了粮食作物、经济作物及模式植物的重离子束辐照育种的现状, 最后从转基因、分子辅助标记及航天育种等方面对重离子束辐照育种的发展趋势进行了展望。

关键词: 重离子; 辐照; 诱变; 育种

中图分类号: Q691.5; Q691.8; Q506

文献标识码: A

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, 简称 LET)高的特点。在植物种质诱变育种操作中, 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]。近年来, 重离子束辐照诱变育种工作在国内外蓬勃发展, 获得了许多具有优良性状的植物突变体, 并从各个角度探索其诱变机理。我国的重离子束辐照诱变育种主要集中在粮食作物及经济作物上, 如诱变处理了水稻、小麦、高粱、药材、花卉、水果等材料, 这些研究取得了可喜的成果, 加速了我国辐照育种的研究, 同时也创造了明显的经济和社会效益。本文将简要介绍近两年重离子束辐照诱变技术在植物育种方面的研究现状及今后的发展趋势。

2 重离子束辐照育种的特点及原理

重离子是指一束荷能的质量数大于 4 的带电粒子。它们可以存在于太空中, 也可以通过地面加速器将中性原子剥离掉部分或全部核外电子后加速而成。空间重离子的能量较高, 一般每核子在 GeV 量级甚至更高; 地面上通过加速器获得的重离子, 能量范围很宽, 可以从 keV 量级到 GeV 量级。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, 简称 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]。

生物细胞遭受辐射处理后, 其关键“靶分子”DNA 链将发生各种断裂及交联, 具体包括: 碱基和脱氧戊糖发生的一系列基团改变或丢失等; DNA 单链断裂(Single-strand Break, 简称 SSB)和双链断裂(Double-strand Break, 简称 DSB); DNA 链间交联(DNA-DNA Crosslink, 简称 DDC)和 DNA-蛋白质的交联(DNA-protein Crosslink, 简称 DPC)等。现有研究结果显示, 重离子束辐照与低 LET 射线辐照处理植物材料后, 细胞的 DNA 链断裂方式及重组修复机制有很大的不同。有文献表明, 发生在损伤末端的近距离 DNA 链断裂和碱基损伤的数量随辐照 LET 值的增加而增加, 且 DNA 链断裂处的末端连接过程可能有很大的不同, 可能为 DNA 链的错误修复(Mis-repair)或非同源末端重组(Non-homologous End-joining, 简称 NHEJ)^[3, 4]。另外一些研究发现, C 离子辐照诱发的拟南芥突变体主要为点状突变(point-like mutant)和重组(rearrange-

* 收稿日期: 2008-03-07; 修改日期: 2008-04-08

* 基金项目: 中国科学院西部之光人才培养计划项目(0706100XB0); 中国科学院西部之光联合学者项目(XL050616)

作者简介: 周利斌(1979-), 男(汉族), 陕西富平人, 博士, 从事离子束生物学相关研究; E-mail: libinzhou@impcas.ac.cn

通信联系人: 李文建, E-mail: wjli@impcas.ac.cn

ment), 而电子束等低 LET 辐照则主要诱导点状突变^[5]。还有的研究者使用荧光原位杂交技术(Fluorescence in Situ Hybridization, 简称 FISH)分析不同 LET 辐照后植物细胞染色体的重组情况, 结果显示高 LET 辐照将产生复杂的染色体结构重组, 而低 LET 辐照仅在高剂量条件下产生类似的改变^[6]。因此, 重离子束辐照植物材料诱发其遗传物质突变的机理尚有争议, 还有待进一步研究。

3 重离子束辐照诱变育种现状

1986 年, 我国首先发现重离子注入对水稻的诱变效应^[7], 从此开创了离子束生物技术。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 M_1 代生理损伤轻, M_2 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, 近些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^[8]。

3.1 粮食作物

水稻作为中国最重要的粮食作物, 国家每年在其新品种开发中都给予了很大的支持力度。通过低能重离子注入, 我国先后选育成功了抗虫抗病性强的 S9042、米质优的 D9055 和早粳 14、高产的中粳 63 和晚粳 M3122、高产早熟的晚粳 48 和晚粳 M1148^[9]。仅 1998 年以来, 水稻新品种已在安徽、湖北、江苏、江西等省推广 1×10^6 hm^2 , 增产 9.6×10^8 kg。近年来, 通过重离子束诱变技术获得了新矮源水稻显性半矮秆种质, 从而为水稻籼粳亚种的杂交提供遗传基础^[10, 11]。前期研究表明, 显性半矮秆基因和不育基因、广亲和基因的聚合, 有很强的杂种优势, 可望能够解决水稻生产中矮秆资源利用单一和籼粳交后代株高超亲的问题, 大幅度提高水稻单产, 对新世纪我国水稻生产有重要意义。

小麦作为我国北方地区的重要粮食作物, 一直是国家及北方各省农业发展的重点。中国科学院近代物理研究所与甘肃省张掖地区农业科学研究所合作, 利用兰州重离子研究装置(HIRFL)提供的重离子束选育出矮秆、抗逆、高产、优质的春小麦 M-920 和丰产、高蛋白含量、抗黑穗病的陇辐 2 号^[12, 13]。“陇辐 2 号”具有高产稳产、适应性广、品质优良、矮秆、抗倒伏、耐干旱、抗干热风等显著特点, 每亩单产产量达到 600 kg。截止 2006 年在甘

肃中西部地区推广面积超过 1.3×10^5 hm^2 , 取得了巨大经济效益。

3.2 能源作物

随着石化能源的日益枯竭和环境污染的日益严重, 世界各国开始利用能源作物生产各种能源替代品来减轻能源需求压力。甜高粱和油葵就是两种种植日益广泛的高效能源作物。甜高粱因其秸秆含糖量高, 被誉为生物质能源系统中最有力的竞争者, 已经成为生产燃料酒精的最佳原料。对现有的甜高粱品种改良, 提高含糖量、产量及改良其抗逆性等生理遗传性状, 培育适合在西部种植的优良品种已迫在眉睫。中国科学院近代物理研究所从 2006 年起利用 C 离子束辐照对甜高粱进行诱变处理, 迄今已经选育出生物学产量高、含糖量高并且早熟的突变植株, 某些品种的糖垂度最高达到 24% 以上, 亩产量达 10 t 以上, 目前正在进行 M_2 代遗传稳定性实验。油葵是油用向日葵的简称, 油葵是近 30 年来总产量增长最快的世界三大油料作物之一。油葵的籽实含油率一般在 46% 左右, 高的可达 50% 以上, 出油率在 42% 以上。获取产量更高并且具备抗盐碱性状的新品种是加快西部生物能源基地建设的捷径。中国科学院近代物理研究所从 2005 年起利用 C 离子束辐照诱变油葵干种子, 已得到产量显著提高的突变植株, 目前正在进行 M_2 代的筛选工作。

3.3 花卉

中国科学院近代物理研究所从 20 世纪 90 年代起开始采用中能重离子束辐照矮牵牛花籽, 栽培后使原来的单瓣变为双瓣, 浅红色变为深红色, 得到了有益变异株。2004 年采用 200 kV 注入机提供的低能 N, C 离子束辐照万寿菊(黄、桔), 一串红、矮牵牛、长春花及鸡冠花干种子, 在现代化温室中种植并选育, 当年就发现了万寿菊中不同品种的花卉对离子辐照的敏感性有很大差异, 而且从万寿菊中选出了花盘增大的变异株; 从一串红中选出了叶片变皱变厚, 叶色变深, 植株矮化和花形发生变化的变异株; 从鸡冠花中选出了花色和花叶发生变化的变异株。2005 年与定西市临洮新兴公司合作, 采用重离子辐照大丽花芽, 当代就选出了矮秆、花期提前、花色变异的单株, 最终获得了大丽花新品种“新兴红”和“新兴白”两个品种。

3.4 微生物

中国科学院等离子体物理研究所采用低能离子束注入对花生四烯酸产生菌(*mortierella alpina*)进行诱变选育^[14],取得了很好的成果,改变了花生四烯酸产品的国际竞争格局,使跨国公司退出竞争,我国成为该产品的主要国际供应商。中国科学院近代物理研究所采用中能重离子束辐照技术在庆大霉素的小单孢菌的诱变育种工作上已经取得了很好效果^[15]。近期对酿酒酵母进行了重离子辐照诱变预实验,初步结果表明诱变效果十分明显,菌落形态罕见,诱变菌株的酵母耐酒精能力与原始菌株比较有明显变化^[16]。21世纪是生物农药的世纪,阿维菌素是当今最受关注的生物杀虫杀螨剂之一,被农业部作为推荐使用的高效低毒的农药产品。我国是阿维菌素的生产大国,但长期以来,由于生产过程中发酵效价偏低,导致使用成本较高,影响了其更广泛的应用。中国科学院近代物理研究所与甘肃省药物研究所协作,发挥甘肃省药物研究所在微生物菌种研究和中国科学院近代物理研究所在重离子加速器方面强大的硬件优势和专业实力,通过先进重离子的诱变育种手段,筛选出了高产、稳定的生产菌株,并通过工艺技术优化使阿维菌素的发酵效价得到了大幅度提高,从起始的4 000 $\mu\text{g/ml}$ 提高到了现在的5 500 $\mu\text{g/ml}$ (摇瓶)以上,目前已经进入菌种的中试阶段^[17]。

3.5 模式植物拟南芥

开展拟南芥的重离子束诱变研究,在理论上可以有助于揭示物种的起源、植物的发育、基因的表达和调控等,在实践上还可能利用拟南芥突变体的基因通过同源克隆在重要经济植物中发掘新的基因资源,进一步改良经济植物,以获得更加优良的植物新品种。有文献报道,用 He, C, Ar 和 Ne 离子束辐照处理两种野生型拟南芥干种子,以存活率为生物学终止点的 RBE 值约为 11—12^[18]; DNA 序列分析发现重离子诱发拟南芥 DNA 突变类型为多位点的碱基变异^[19];另外,重离子辐照拟南芥还能引起蛋白质组的差异^[20]。迄今,国外研究机构使用重离子诱变技术获得了许多拟南芥突变体(*ast*, *fr-ll*, *uvil*, *suvl*, *tt18* 和 *tt19*)^[21]。这些突变体的分子诱变机理正在进一步分析之中。

4 重离子束辐照育种的发展趋势

4.1 离子束辐照结合组织培养技术的植物诱变新方法

重离子束辐照结合组织培养技术的植物诱变新方法是重离子束植物诱变技术的延伸,具有操作简单、诱变率高、培育周期短、需求空间小等特点^[22]。近年来,日本使用离子束辐照联合组织培养方法培育出了花色发生变化的玫瑰^[23],以及花型花色发生变化的康乃馨新品种^[24]。这方面国内发展比较滞后,2004年才开始进行^[25],获得了叶绿素完全缺失的非洲紫罗兰突变体。花卉植物,尤其是中高档花卉品种主要是靠无性繁殖进行扩增延续,例如兰花的工厂化生产即是利用组培技术进行高繁殖系数扩增。重离子辐照结合组织培养技术为花卉产业提供了新的育种途径点,相信在不久的将来,国内一定能够使用该方法获取具有自主知识产权的花卉新品种。

4.2 重离子束辐照介导的转基因操作

国外已有报道,先用电离辐射(如 10—15 Gy 的 X 射线)处理受体植物细胞(烟草等)原生质体,然后再施以转基因处理,可以提高转化效率 3—7 倍。这些结果表明,辐照后外源 DNA 整合至植物基因组具有高的整合效率,其原因可能是植物重组和修复机制的激活^[26]。

国内率先开展离子束辐照介导的植物转基因工作的是中国科学院等离子体物理研究所的科学家,他们利用低能重离子辐照植物种子、愈伤组织等材料结合浸泡法来进行转基因操作。利用该方法最早将 β -葡萄糖苷酸酶(β -Glucuronidase, 简称 GUS)基因导入水稻成熟胚细胞^[27],随后又获得了烟草、小麦、拟南芥和西瓜等转基因植株^[28]。近年来,重离子辐照介导的植株总 DNA 转化技术有了很大进展。例如,将几丁质酶基因转入小麦,获得抗病的小麦植株;将 C4 循环玉米全基因转入水稻,获得光合效率比原品种平均高 80% 的水稻新品系;将大豆基因转入小麦,获得高蛋白小麦株系;在西瓜中表达银杏内酯的西瓜品种^[29]。

低能离子束注入水稻愈伤组织可以提高农杆菌转化效率^[30],但是,其辐照操作是在真空条件下进

行的,研究的生物学终止点为抗性愈伤组织生成,而且并未获得转基因植株。中国科学院近代物理研究所从 2005 年开始尝试将农杆菌载体转化法与中能重离子束辐照处理相结合,进行烟草转基因尝试,已取得显著的结果^[31]。该方法可能具有更多的优势,归纳如下:(1)中能重离子射程长,可以穿透 2 cm 厚的生物材料(以 80 MeV/u 的 $^{12}\text{C}^{6+}$ 为例)。从而,可以直接射穿细胞壁、细胞膜,在细胞壁和细胞膜上形成微通道,并造成细胞核 DNA 分子损伤,激活细胞固有的 DNA 分子损伤修复系统,有利于外源 DNA 分子进入细胞核后与受体核基因组

整合;(2)先前的辐射联合浸泡法转基因采用的是质粒提取缓冲液。质粒是环型 DNA 分子,而农杆菌 T-DNA 分子为线性分子,直径仅为 2 nm,这样携有外源基因的 T-DNA 分子更易进入受体细胞;(3)人们知道,农杆菌对酚类化合物具有趋化性^[32],辐射能诱发植物细胞表面微创伤,并释放酚类物质(hydroxybenzene),这些物质能吸引农杆菌贴附,从而便于农杆菌进行转基因操作。其原理图参见图 1。下一步工作的重点是,采用该法将高山藜子芥抗冻基因 COR15 转入紫花苜蓿,最终获得能够稳定遗传抗冻性状的转基因品系。

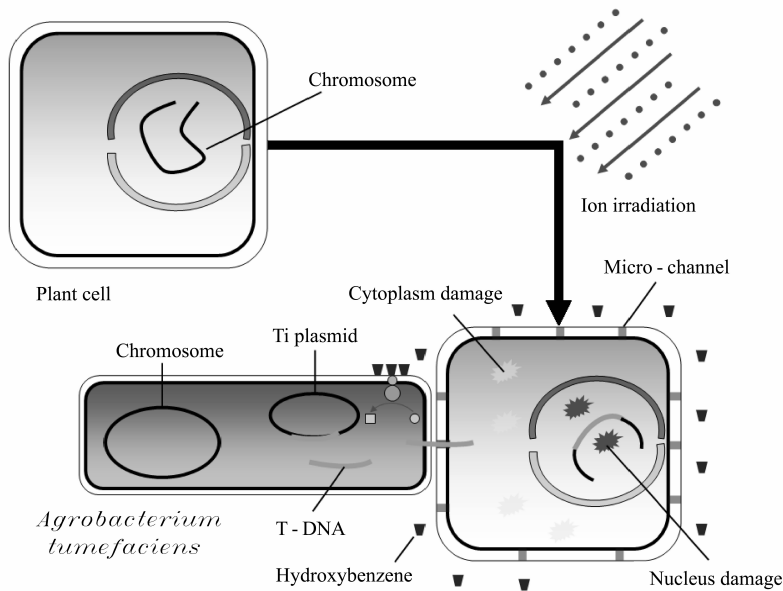


图 1 中能重离子束辐照介导的农杆菌转基因方法的原理图

4.3 重离子束辐照结合分子辅助标记的育种探索

重离子束辐照诱变技术将获得大量性状各异的突变体,如何快速、有效的大样本量筛选是育种工作的关键。利用易于鉴定的遗传标记进行辅助选择是提高选择效率的常用手段。Lande 和 Thompson 提出了分子辅助育种(Molecular Assisted Selection, 简称 MAS)的概念,并介绍了通过分析与目标基因紧密连锁的分子标记来选择有利基因的方法^[33]。分子标记不受基因表达时间、显隐性和环境条件的影响,故可在早期进行选择,同时这种选择不仅针对控制质量性状的基因有效,对多基因控制的数量性状(Quantitative Trait locus, 简称 QTL)也同样有效。这样, MAS 可减少盲目性,缩短育种年限,因此大大提高了选择效率。今后的重离子束辐照育种工作必然将采用随机扩增片段多态性

(Random Amplified Polymorphic DNA, 简称 RAPD)、扩增片段长度多态性(Amplified Fragment Length Polymorphism, 简称 AFLP)、单核苷酸多态性(Single Nucleotide Polymorphism, 简称 SNP),简单序列分析(Simple Sequence Repeats, 简称 SSR)和基因组靶向定位诱导损伤技术(Targeting Induced Local Lesions in Genomes, 简称 TILLING)等先进分子辅助标记技术进行筛选辅助研究。中国科学院近代物理研究所目前已经开展了使用 RAPD 技术对离子束辐照诱变获得的大丽花及甜高粱突变植株进行分子多态性分析工作,并获得了初步成果^[34, 35]。

4.4 重离子束辐照诱变技术在航天育种中的应用

近几十年来,航天诱变育种已成为空间生命科

学研究的重要内容之一。所谓航天诱变育种(Spaceflight Mutation Breeding, 简称SMB)就是指利用卫星、飞船等返回式航天器或高空气球将作物的种子、组织、器官或生命个体搭载到宇宙空间,在强辐射、微重力、高真空等太空诱变因子的作用下,使其发生遗传性状变异,利用有益变异选育出农作物新品种的育种新技术。在机理研究中,空间搭载诱导变异的原因至今是难以回答的问题。以往的研究表明,空间环境中存在的多个特殊因素中,高能电离辐射及微重力被认为对生物系统的生长发育、遗传变异可能有广泛的影响。因此,利用地面中高能重离子加速器,与现有的地面模拟失重环境相结合,从而建立空间辐射模拟实验技术平台,为空间辐射诱变育种的机理研究提供方便。在不久的将来,中国科学院近代物理研究所将联合国内多家科研机构开展这项工作,共同探索航天育种诱变机理。

参考文献(References):

- [1] Shikazono N, Yokota Y, Kitamura S, *et al.* *Genetics*, 2003, **163**: 1 449.
- [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. 原子能物理评论, 2003, **20**(1): 39.)
- [3] Lieber M R, Ma Y, Pannicke U, *et al.* *Nature Reviews Molecular Cell biology*, 2003, **4**(9): 712.
- [4] Karlsson K H, Stenerlöv B. *Radiation Research*, 2004, **161**(5): 517.
- [5] Shikazono N, Suzuki C, Kitamura S, *et al.* *Journal of Experimental Botany*, 2005, **56**(412): 587.
- [6] Naito K, Kusaba M, Shikazono N, *et al.* *Genetics*, 2005, **169**: 881.
- [7] Yu Zengliang. *An Introduction of Ion Beam Biotechnology*. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1998, 216 (in Chinese).
(余增亮. 离子束生物技术引论. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1998, 216.)
- [8] 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. 原子能物理评论, 2007, **24**(4): 294.)
- [9] Guo Gao, Qian Kun. *Anhui Agriculture*, 1998, **5**: 4(in Chinese).
- (郭高, 钱坤. 安徽农业, 1998, **5**: 4.)
- [10] Liu Binmei, Wu Yuejin, Tong Jiping, *et al.* *Acta Agronomica Sinica*, 2006, **32**(3): 449(in Chinese).
(刘斌美, 吴跃进, 童继平等. 作物学报, 2006, **32**(3): 449.)
- [11] Cheng Can, Liu Binmei, Wu Yuejin, *et al.* *Hybrid Rice*, 2006, **21**(2): 74(in Chinese).
(程灿, 刘斌美, 吴跃进等. 杂交水稻, 2006, **21**(2): 74.)
- [12] Wei Zengquan, Xie Hongmei, Liang Jianping, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2003, **20**(1): 38(in Chinese).
(卫增泉, 颜红梅, 梁剑平等. 原子核物理评论, 2003, **20**(1): 38.)
- [13] Zhao Lianzhi, Wang Yong, Zhen Dongsheng. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2005, **19**(1): 80(in Chinese).
(赵连芝, 王勇, 甄东生等. 核农学报, 2005, **19**(1): 80.)
- [14] Yuan Chenglin, Yao Jianming, Wang Ji, *et al.* *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2003, **21**(4): 237 (in Chinese).
(袁成凌, 姚建铭, 王纪等. 辐射研究与辐射工艺学报, 2003, **21**(4): 237.)
- [15] Liu Feng, Fu Wei, Yan Huican. *Chinese Journal of Antibiotics*, 2003, **28**(9): 517(in Chinese).
(刘峰, 傅伟, 颜辉灿. 中国抗生素杂志, 2003, **28**(9): 517.)
- [16] Li Renmin, Wang Jufang, Li Wenjian, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2007, **24**(3): 234(in Chinese).
(李仁民, 王菊芳, 李文建等. 原子能物理评论, 2007, **24**(3): 234.)
- [17] Wu Faju. *Mutagenesis and Screening of Streptomyces Avermitilis Producing Avermectins and the Fermentation Condition Optimization(Master Thesis)*. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007, 6(in Chinese).
(武发菊. 阿维菌素高产菌株的选育及发酵条件优化的研究(硕士论文). 兰州: 甘肃农业大学, 2007, 6.)
- [18] Tanaka A, Shikazono N, Yokota Y, *et al.* *Journal of Radiation Biology*, 1997, **72**(1): 121.
- [19] Chang Fengqi, Li Yinxin, Liu Xuanming, *et al.* *Progress in Natural Science*, 2003, **13**(3): 259 (in Chinese).
(常凤启, 李银心, 刘玄明等. 自然科学进展, 2003, **13**(3): 259.)
- [20] Dong Guijun, Zhang Weidong, Chen Shuangyan, *et al.* *Acta Biophysica Sinica*, 2004, **20**(4): 269(in Chinese).
(董贵俊, 张卫东, 陈双燕等. 生物物理学报, 2004, **20**(4): 269.)
- [21] Tanaka A, Sakamoto A, Ishigaki Y. *Plant Physiology*, 2002, **129**: 64.
- [22] Zhou Libin, Li Wenjian, Qu Ying, *et al.* *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2007, **25**(4): 232(in Chinese).
(周利斌, 李文建, 曲颖等. 辐射研究与辐射工艺学报,

- 2007, **25**(4): 232.)
- [23] Yamaguchi H, Nagatomi S, Morishita T, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **B206**: 561.
- [24] Okamura M, Yasuno N, Ohtsuka M, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2003, **B206**: 574.
- [25] Zhou L B, Li W J, Yu L X, *et al.* International Journal of Radiation Biology, 2006, **82**(7): 473.
- [26] Köhler F, Benediktsson I, Cardon G, *et al.* Theoretical and Applied Genetics, 1990, **79**: 679.
- [27] Yang Jianbo, Wu Lijun, Wu Jiadao, *et al.* Chinese Science Bulletin, 1994, **39**(16): 1 530(in Chinese).
(杨剑波, 吴李军, 吴家道等. 科学通报, 1994, **39**(16): 1 530.)
- [28] Bian Po, Su Mingjie, Qin Guangyong, *et al.* Acta Biophysica Sinca, 2003, **19**(3): 327(in Chinese).
(卞坡, 苏明杰, 秦广雍等. 生物物理学报, 2003, **19**(3): 327.)
- [29] Song Daojun, Chen Ruolei, Yin Ruochun, *et al.* Progress in Natural Science, 2001, **11**(3): 327(in Chinese).
(宋道军, 陈若雷, 尹若春等. 自然科学进展, 2001, **11**(3): 327.)
- [30] Li Hong, Wu Lifang, Yu Zengliang. Acta Laser Biology Sinica, 2000, **9**(1): 19 (in Chinese).
(李红, 吴丽芳, 余增亮. 激光生物学报, 2000, **9**(1): 19.)
- [31] Zhou Libin. Effects of Heavy Ion Beams Irradiation on Plant Tissue Culture and Gene Transfer Operation(Doctoral Dissertation). Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006, 6(in Chinese).
(周利斌. 重离子束辐照对植物组织培养及转基因操作的影响(博士论文). 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2006, 6.)
- [32] Shaw C H, Watson M D, Carter G H, *et al.* Nucleic Acids Research, 1984, **12**: 6 031.
- [33] Lande R, Thompson R. Genetics, 1990, **124**: 743.
- [34] Dong Xicun, Li Wenjian, Yu Lixia, *et al.* Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2007, **25**(1): 62(in Chinese).
(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.)
- [35] Dong X C, Li W J, Liu Q F, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2008, **B266**: 123.

Progress and Tendency in Heavy Ion Irradiation Mutation Breeding*

ZHOU Li-bin, LI Wen-jian[#], QU Ying, LI Ping

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

Abstract: In recent years, the intermediate energy heavy ion biology has been concerned rarely comparing to that of the low-energy ions. In this paper, we summarized the advantage of a new mutation breeding method mediated by intermediate energy heavy ion irradiations. Meanwhile, the present state of this mutation technique in applications of the breeding in grain crops, cash crops and model plants were introduced. And the preview of the heavy ion irradiations in gene-transfer, molecular marker assisted selection and spaceflight mutation breeding operations were also presented.

Key words: heavy ions; irradiation; mutation; breeding

* Received date: 7 Mar. 2008; Revised date: 8 Apr. 2008

* Foundation item: Western Light Talents Training Program of Chinese Academy of Sciences (0706100XB0); Western Light Talents Training Program Co-scholar Program of Chinese Academy of Sciences (XL050616)

Corresponding author: LI Wen-jian, E-mail: wjli@impcas.ac.cn