

文章编号: 1007-4627(2008)03-0287-07

离子束辐照拟南芥生物学效应及其分子机理研究进展^{*}

吴大利¹, 侯岁稳^{1, 2, #}, 李文建²

(1 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, 甘肃 兰州 730000)

2 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 综述了离子束辐照拟南芥种子生物学效应、生长发育变化、向重力性等研究的最新进展。阐释了离子束辐照拟南芥染色体 DNA 碱基变化、DNA 断裂或损伤、染色体重组、突变遗传性等分子机理。探讨了离子束介导外源基因转化拟南芥的有效性和机理。同时展望了辐照拟南芥分子机理研究中的辐射原初效应传递、信号转导等其他机理研究及重离子辐射生物学效应的应用前景。

关键词: 拟南芥; 离子束; 辐照; 生物学效应; 诱变分子机理

中图分类号: Q691.5; Q506

文献标识码: A

1 引言

19 世纪末, 随着 X 射线和天然放射性物质的发现, 生物界便开始了辐射对生物有机体作用的研究。在以后的数十年间较多地进行了辐射诱变改良作物品种的方法技术以及辐射生物学效应等基础性研究, 为辐射诱变改良作物品种的理论和技术奠定了良好的基础。辐射诱变育种研究经过一个世纪的发展, 取得了巨大的成就。利用诱发突变育成的品种数量明显增多, 而且利用价值提高, 促进了农业生产, 取得了显著的经济效益^[1, 2]。

在我国经济持续稳定发展的背景下, 国家通过各种研究计划(如 973 计划、863 项目、NSFC 等)和国家知识创新体系等形式大力支持具有国家战略需求的基础研究, 使植物科学研究飞速发展^[3]。特别是在当前人民生活水平提高、自然灾害频繁、可耕作土地面积迅速下降等因素影响下, 利用辐射诱变手段培育出品质好、抗性强、产量高等优良特点的新品种, 显得十分必要。离子辐射育种具有突变率高、突变范围广、操作简单等特点。而培育新品种的前提条件, 就是必须对离子诱变机理进行深入研究, 拟南芥作为一种极佳的模式植物, 因而也就顺理成章将其作为目标植物来研究离子束诱变机

理, 为下一步育种工作奠定坚实的理论基础。

2 拟南芥的特点和辐射研究应用的辐射源

2.1 拟南芥的特点

拟南芥(*Arabidopsis thaliana*), 属被子植物, 双子叶分纲, 属十字花科。它在生物学研究上具有以下优点^[4, 5]:

(1) 生命周期短, 仅为 28—35 d, 而且其长短还可通过培养过程中的光照时间来调节。种子萌发后 3—5 d, 长出 8—10 片莲座叶。16 d 后从营养生长迅速过渡到生殖生长。

(2) 产种率高, 每科植株能产生 50 000 左右粒种子, 可为子代性状分析提供足够的群体。

(3) 典型的自花授粉植物。基因高度纯合, 易于建立稳定的遗传品系。

(4) 核基因组小, 结构简单。拟南芥仅有 5 对染色体, 其核基因组约为 120 Mb, 是高等植物中基因最小的物种之一, 适用于分子生物学研究。

鉴于上述特征特性, 拟南芥菜已被称为植物中的“果蝇”, 被公认为从事植物生物学的理想材料。长期以来, 它一直是植物细胞遗传学研究的经

* 收稿日期: 2007-12-25; 修改日期: 2008-01-09

* 基金项目: 中国科学院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项目; 甘肃省农业生物技术专项基金资助项目(GNSW-2006-16)

作者简介: 吴大利(1981-), 男(汉族), 安徽怀远人, 硕士, 从事细胞工程和辐射生物学研究。

通讯联系人: 侯岁稳, E-mail: housw@lzu.edu.cn

典模式材料,同时,也是植物胚胎学的重要研究对象。现在拟南芥整个基因组测序已经完成,它所包含的信息为理解开花植物的进化和农作物的遗传学信息提供了巨大的资源。近年来,欧洲、美国、日本的植物学家对拟南芥进行了广泛的人工诱变,分离和鉴定出各种各样的突变体,在分子水平上研究其基本生命现象、发育和分化、形态发生和遗传传递等。

2.2 拟南芥辐射源及其引起效应的差异

拟南芥在辐射生物学研究中受到广泛重视,尤其是离子束辐射生物学效应研究。对 81 例拟南芥辐照生物学研究所采用的辐射源进行了初步统计表明,有质子、中子、空间辐射、紫外线、电磁辐射(γ 和 X 射线)和离子束(α 离子和重离子)等,各辐射源所占比率分析显示在拟南芥诱变分子机理研究中离子束更多为研究者所采用,占 61.8%(见表 1)。这是由于离子束辐照具有很多优点,如:传能线密度(linear energy transfer,简称 LET)大、相对生物效能(relative biological effectiveness,简称 RBE)高、损伤后修复效应小等^[6,7]。另外,拟南芥种子的厚度仅为 μm 级,对于研究 LET 的效应非常适合。目前,离子束按能量大体可以划分为低能(10—100 keV/u)、中能(100—1 000 keV/u)和高能(大于 1 MeV/u)3 种^[8,9]。

不同离子辐射源所产生的差异效应表现在许多方面。通过对 N^+ 和 C^+ 离子注入拟南芥种子的比较发现,一定范围内同等剂量 C^+ 离子注入的突变频率高于 N^+ 离子注入^[10]的。在 N^+ 离子和 γ 射线实验中,发现注入合适剂量的 N^+ 离子可以促进拟南芥的发芽率,而一定剂量 γ 射线辐射对发芽率起抑制作用^[10,11]。通过对可溶性蛋白、酶的活性和同工酶的分析表明,两种处理的剂量-效应关系明显不同, N^+ 离子注入的剂量-效应关系呈特有的类“马鞍型”, γ 射线辐射的剂量-效应关系呈“直线型”^[11]。

低能和高能离子束产生的生物学效应也在一些方面表现出差异。低能离子注入诱导生物体高的诱变效率、后代可遗传的当代变异、“反常辐照损伤”(即在低剂量段,生物存活与注入离子量的关系呈现先降后升再降的“马鞍型”曲线)等^[12]。而高能重离子则诱变效率更高、高致死性,其“反常辐照损

伤”表现为低剂量段的生物存活与剂量关系是先升后降的“抛物线”曲线等^[13]。

表 1 81 例中不同辐射源所占比率

辐射源	样例数	比率(%)
紫外线	14	17.3
质子	1	1.2
中子	1	1.2
太空辐射	3	3.7
X 和 γ 射线	12	14.8
离子束	50	61.8

3 离子束辐照拟南芥的生物学效应

目前国内外对拟南芥辐射生物学正在开展广泛而且深入的研究,对其研究主要集中在生物学效应、生长和发育的影响等方面。

3.1 离子束对拟南芥损伤效应的影响

3.1.1 离子束对拟南芥种子表皮的影响

应用扫描电镜观察了低能 N^+ 离子注入拟南芥干种子后表层细胞表皮的变化。结果表明,拟南芥种子的 N^+ 离子注入区域与未注入区域相比,离子注入区在一定程度上发生种皮形态变化并伴随有表层细胞的损伤。随着离子剂量的增大,离子对种子细胞的损伤程度增大,且种子表面有裂痕生成。另外,经注入的种子表面分布有许多散在的固体颗粒状物质,其密集程度也随离子剂量的增加而增大^[14]。

3.1.2 离子束对拟南芥存活的影响

离子束辐照拟南芥引起处理当代种子的萌发率和存活率降低,并且降低的幅度随剂量的升高而增大。各剂量辐射对种子的发芽率都产生了一定的影响,合适的离子束剂量可以促进种子的发芽率;离子束辐照对种子产生了一定的损伤,影响了种子发芽速度,但合适剂量也可以保持一定大小的发芽势。经离子注入后 M_1 植株的不同营养器官表现为株高降低、叶片长度变短和叶片宽度变窄。对于不同剂量间对植株生长形态的影响的比较可见,随剂量的增加,各形态性状的数量指标并不随剂量的增高而下降,而是有一定的波动。营养器官的损伤率-剂量关系为先降后升的趋势,并且剂量间各性状差

异极显著^[10, 11, 15, 16]。另外, 拟南芥种子含水量直接影响了存活率, 实验结果显示干种子和含水种子存活曲线均成肩形下降趋势, 而且含水种子下降注量点明显低于干种子^[17]。

3.1.3 离子束对拟南芥茎、胚根向重力性的影响

植物根向重力性的研究是一个新的领域, 但是离子辐照对其影响报道不多, 尤其是对其具体机理研究还未见报道。国外研究利用重离子辐照拟南芥初生根顶端组织后发现拟南芥根冠失活并抑制根的生长, 引起根的向重力性发生变化; 根尖区域对离子束敏感, 其中根尖特定区域(α)最为敏感。推测由于生长素后者细胞间信号的传导造成这种现象^[18]。国内则采用了 α 离子研究了拟南芥胚根向重力性, 在 0—100 Gy 辐照剂量范围内, 引起的根弯曲与剂量存在正相关($r=0.98$), 并且通过实验验证了活性氧在胚根向重力性变化方面扮演了重要角色^[17]。影响植物茎、胚根向重力性的机理各不相同, 植物茎、根的组织结构、成分和 pH 等都向重力性存在影响^[19—22]。

3.1.4 离子束对拟南芥生长、发育的影响

Shikazono 等^[23—25]采用 C^+ 离子束处理拟南芥种子, 筛选得到一些特殊的拟南芥突变体: *tt*(叶和茎缺失色素的突变体)、*gl*(没有毛状体的叶突变体)。回交突变体的分离比率是 0.25, 表明大多数情况下配子体活力降低的大 DNA 缺失片段不能够遗传。碳离子诱导的 M_2 代分离出 2 种新类型的类黄酮突变体(*tt18*, *tt19*)。分析显示 3 个 *tt18* 突变体等位基因中有 2 个是 LDOX 基因丢失了小片段, 另一个是染色体重组。

国内使用剂量为 1.5×10^{17} ions/cm² 30 keV Ar^+ 离子束辐照拟南芥, 获得两株表型相似的雄性不育株系(*tc243-1* 和 *tc243-2*), *tc243* 在叶片、株高、顶端优势、花序、花的发育和花粉活力都存在验证缺陷。证明了雄蕊的缺陷直接导致了不育, 及 *tc243* 是 *axr1* 等位基因的突变体。实验结果显示 AXR1 调节的茉莉酮酸酯信号通路调控花的发育和生长, 而且 AXR1 的失活降低了茉莉酮酸酯信号通路的效率^[26]。

3.2 拟南芥生物学效应研究

3.2.1 离子束对拟南芥 LET 效应和 RBE 的研究

日本学者的深入研究表明, LET 和剂量对拟南

芥存活率存在着抑制影响, 且随着剂量增加抑制作用增强。另外在同一存活率条件下, LET 越大所需要的辐照剂量越小。C 离子(221 keV/ μ m)、N 离子(354 keV/ μ m)、Ar 离子(396 keV/ μ m)存在最小的“肩”和最大的 RBE, 表明较大的离子质量数和 LET, 其 RBE 越大。N 离子(354 keV/ μ m)要比 C 离子(221 keV/ μ m)产生更大的不育性和 RBE^[27]。Hirono 等^[28]研究了 4He , 7Li , ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Se 和 ^{40}Ar 辐照拟南芥干种子后其瘤状物诱导、生长抑制作用和体细胞突变诱导, 经调整使布喇格(Bragg)峰刚好落在种子内最敏感的茎分生组织区内, 同时采用了两种低 LET 的辐射 4He 和 X 射线作为参考。结果探测到拟南芥分生组织中 LET 分布范围在 72—1 890 keV/ μ m (4He — ^{40}Ar)之间。在几 Å 到几十 Å 敏感位点范围内, 其生长抑制作用、瘤状物和体细胞突变诱导效应表现了数量增倍、结构复杂(具有不同有效剖面区域和厚度的 2 个或多个靶区)的特点。与 X 射线的 RBE 相比, 每种效应随 LET 的变化趋势相同, 即在 18 keV/ μ m 最低, 在 72—174 keV/ μ m 最高, 而且在 409—1 890 keV/ μ m 的 LET 范围内逐渐下降。最大 RBE 大约是 30。

3.2.2 离子束对拟南芥生理生化及遗传性的影响

通过对 N^+ 离子注入处理后的拟南芥可溶性蛋白含量、 M_1 和 M_2 代拟南芥淀粉酶(AMY)、酯酶(EST)、过氧化物酶(POD)的活性、过氧化物同工酶(CAT)电泳图谱分析, 拟南芥叶片组织中可溶性蛋白含量的变化呈类“马鞍型”趋势; AMY 活性变化也呈现类“马鞍型”特点; 在低剂量的 EST 活性与对照材料的无明显差别, 但随着剂量的增加, EST 活性急剧上升; 过氧化物酶(POD)酶活性在一定剂量范围内增强。总体来看, 低剂量辐照使酶活性增加, 高剂量辐照酶活性降低。酶谱的变异体现在谱带强弱的变化而不是谱带增减上。同时发现, 离子束与电离辐射的诱变效应具有可遗传性^[10, 11, 29, 30]。

4 离子束诱变拟南芥的分子机理

拟南芥诱变的分子机理研究刚刚起步, 许多机理仍然不是非常清楚, 而且更多集中于离子束对染色体 DNA 的研究。至于离子束原初损伤效应的分子机理、植物机体内相应细胞信号传递机理等研究甚少。目前国内外对离子束诱发的染色体 DNA 碱

基变化、DNA 断裂或损伤、染色体重组、遗传性等进行了深入的研究，DNA 碱基变化、单链断裂 (single-strand breaks, 简称 SSB) 或双链断裂 (double-strand breaks, 简称 DSB)、DSB 错配等是离子束引起植物发生突变的重要原因^[31, 32]。

低能离子束辐照拟南芥后，在 M_1 代中获得一株典型的矮化变异体。以它的一个稳定的 M_6 代矮化突变体 T80II 为材料，对其中 1 个与 GRF 基因有部分同源性的 712 bp 片段序列进行分析，平均每 16.8 个碱基出现 1 个碱基变异位点，表现出较高频率的碱基突变。碱基突变类型包括碱基的颠换、转换、缺失、插入等。在检测到的 275 个碱基突变中，主要是单碱基置换 (97.09%)，碱基缺失或者插入的比例较小 (2.91%)。在碱基置换中，转换的频率 (66.55%) 高于颠换的频率 (30.55%)。此外，构成 DNA 的 4 种碱基均可以被离子束辐照诱发变异，而且每一种碱基都可以被其他 3 种碱基所替换，但是胸腺嘧啶 (T) 的辐射敏感性要高于其他 3 种碱基^[33]。在 C 离子诱变拟南芥研究中，通过对 *gl1-3*、*gl1-4* 及 *tt4* 三株突变体 PCR 和 Southern 杂交分析，揭示了离子束辐照后染色体的变化特点。在 *gl1-3* 突变体中，外显子 3 处发生断裂，推测引物 1 上游 (或引物 7 下游) 产生断裂结果引起染色体 DNA 片段反转，也可能是裂点之间的区域发生转座或裂点上游 (或下游) 区域作为染色体片段进行转座。然而，在 *gl1-4* 突变体中，离子束诱发整个基因缺失。在 *tt4* 突变体中，裂点发生在内含子 2 的引物 7 和 8 之间，也就是在内含子 2 的 EcoRI 位点上游，同样发生了反转或者转座，而且结果显示 *tt4* 是一个类点突变^[34]。

离子束诱发 DSB 重组是近年研究比较集中的方面。Shikazono 等研究了 C 离子和电子辐照对拟南芥基因组的影响，结果发现 C 离子辐照后类点突变频率和染色体重组频率相差不大，然而电子辐照更多是类点突变。序列分析表明 C 离子诱导的类点突变大多数是短缺失类型；在染色体重组中，发现了染色体片段的缺失、反转、插入和转座现象。C 离子缺失频率与快中子的相当。染色体裂点分析显示 C 离子在裂点周围造成一小段区域缺失，而电子辐照却经常是复制这些区域。C 离子和电子辐照后的同源断裂末端经常重新连接在一起。裂点和断裂末端分析说明非同源末端连接 (Non-homologous

end-joining, 简称 NHEJ) 造成 DSB 重新连接 (见图 1^[25, 35])。NHEJ 是离子束诱导染色体重组的主要方式，此外，微同源调节的末端连接 (Micro-homology mediated end joining, 简称 MMEJ) 也可能参与了这一过程。目前在拟南芥中发现多个蛋白质参与染色体重组 (见表 2)^[36]。

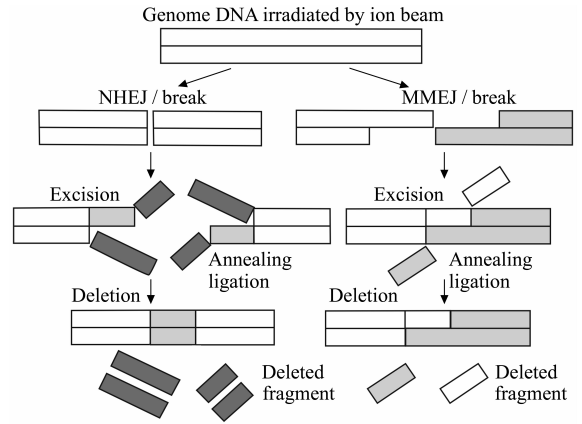


图 1 DSB 非同源重组模型 (依据文献^[25, 35, 36]总结绘制)

表 2 拟南芥中参与非同源重组的蛋白质^[36]

类别	功能
AtKu70	DSB 末端并列
AtKu80	DSB 末端并列
At1g50030	DSB 末端并列
AtRad50	DSB 末端并列, DSB 末端处理
AtMre11	DSB 末端并列, DSB 末端处理
At3g02680?	DSB 末端并列, DSB 末端处理
AtSnm3?	
AtLig4	DSB 末端连接
AtXrcc4	DSB 末端连接

LET 对染色体诱导效应及染色体重组具有重要的影响。低 LET 单位离子轨迹传递能较低，有效辐射距离较大；高 LET 单位离子轨迹传递能较高，有效辐射距离较短。这种差别造成了对染色体 DNA 的损伤的不同。高 LET 辐射对染色体结构发生了复杂的重组，而低 LET 仅仅在较高剂量的时候才产生复杂的改变^[32]。

早期遗传研究表明，大多数离子辐照后诱导的突变是不能遗传的。但是最近的研究显示离子辐照诱导的突变具有可遗传性。采用 C 离子对拟南芥花粉辐照突变的遗传性进行研究的结果表明，虽然 C

离子(40—150 Gy)可以造成多达 6 Mbp DNA 片段丢失, 而且大部分不能够传递到下一代。但是 1—4 bp 的丢失片段通常可以传递到下一代。据不可遗传性推测, 丢失的大片段是由于配子发育或活力基因的特定区域丢失所造成的^[37]。

5 离子束介导外源 DNA 转化拟南芥

离子束介导外源 DNA 转入是我国学者开创的一个新领域, 并且取得了一定的成绩。30 keV 的 Ar⁺ 离子束在 1.5×10^{17} ions/cm² 的辐射剂量下介导外源甘蓝全 DNA 导入模式植物拟南芥, 在 94 株转导的当代植株中, 有 6 株表型产生变异。以其中的一株(T-5)作为研究对象, 用随机引物对该株及其子代变异株基因组作随机扩增的多态性 DNA 分析, 引物 S176 在 T-5 和其变异子代 T-5-2 中扩增出了相同分子量的变异新条带 T-SS176-620。T-SS176-620 的碱基序列和拟南芥菜基因组序列进行同源比对, 结果表明该片段不属于拟南芥基因组, Southern 杂交实验证明该片段来自供体甘蓝基因组^[38]。利用 4.0 MeV C 离子束同样可以有效介导质粒 pCAMBIA130 转移, 在拟南芥种子和幼芽中均成功实现 GUS 基因瞬时表达^[39]。此外, 研究了不同离子剂量介导外源全 DNA 转入的合适剂量。在“鞍桥”上选择 0.5×10^{17} , 1.5×10^{17} 和 2.5×10^{17} ions/cm² 3 个有代表性的剂量介导薄荷全 DNA 转入拟南芥, 依据 3 个转导的当代群体的出芽、成苗长势以及表型变异情况筛选了 1.5×10^{17} ions/cm² 为离子束介导外源全 DNA 转入拟南芥的合适剂量^[40]。

6 问题与展望

以拟南芥为辐照对象, 人们利用离子束对其剂量效应、LET 效应已经进行了系统研究, 但是对分子诱变机理的研究仍处于一个探索阶段。随着生物学各类新型技术的出现和发展, 可以采用生物芯片技术、蛋白组学、基因组学等各种手段对离子束辐照拟南芥后的基因转录、基因调控、蛋白质表达、信号通路等进行深入研究, 进而阐明拟南芥诱变分子机理。不同组织之间、细胞之间和细胞内部存在着辐射损伤信号的传导过程, 继而引发非辐照细胞变异的旁观者效应也需要借助拟南芥进行详细研

究。此外, 不同特征的离子束造成不育性表现出很大差异的原因, 可能是引发的 DNA 修复机制不同, 又或可能对 DNA 周围的化学物质产生了不同效应, 这种现象需要深入研究。在基因组靶向定位诱导损伤技术(targeting induced local lesions in genomes, 简称 TILLZNG)基础上发展的自然群体中等位基因变异的技术(Ecotilling)是一种更加先进的研究反向遗传学的方法, 除了具有通量高、成本低、定位准确等优点外, 还允许待测片段较长, 对于一段长度在 1 kb 左右的基因序列, 只需一次便可以覆盖全长。因此可以更好地在大规模群体中检测突变, 加速拟南芥诱变分子机理的研究进程。近年来, 人类不断进行的太空探索和开发、核能源的大规模利用等活动都需要对离子辐射效应进行深入研究。有关机理的研究对于人类在太空栽种作物以及避免人类自身受到各种辐射伤害具有十分实际而且重要的意义。

参考文献 (References):

- [1] Yu Zengliang. Introduction to Ion Beam Biotechnology. Hefei: Anhui Sci Tech Press, 1998, 223—240(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, 223—240.)
- [2] Wen Xianfang, Wang Xunqing. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2004, **18**(3): 164(in Chinese). (温贤芳, 汪勋清. 核农学报, 2004, **18**(3): 164.)
- [3] Zhong Kang, Qu Lijia, Yuan Ming, et al. Chinese Bulletin of Botany, 2007, **24**(3): 253(in Chinese). (钟康, 瞿礼嘉, 袁明等. 植物学通报, 2007, **24**(3): 253.)
- [4] John B H. DNA Repair, 2002, **1**: 579.
- [5] Zhou Libin, Li Wenjian, Qu Yin, et al. J Radiat Res Radiat Process, 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.)
- [6] Wei Zengquan, Xie Hongmei, Liang Jianping, et al. Nuclear Physics Review, 2003, **20**(1): 38(in Chinese). (卫增泉, 颀红梅, 梁剑平等. 原子核物理评论, 2003, **20**(1): 38.)
- [7] Feng Huiyun, Yu Zengliang, Paul K C. Materials Science and Engineering, 2006, **R54**: 49.
- [8] Tang Zhangxiong, Liu Zhifang, Shao Junming, et al. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2005, **19**(4): 312(in Chinese). (唐掌雄, 刘志芳, 邵俊明等. 核农学报, 2005, **19**(4): 312.)

- [9] Yuan Chengling, Yu Zengliang. *J Radiat Res Radia Process*, 2004, **22**(1): 1(in Chinese).
(袁成凌, 余增亮. 辐射研究与辐射工艺学报, 2004, **22**(1): 1.)
- [10] Liang Qianjin, Hu Yulian, Zhang Genfa. *Acta Biophysica Sinica*, 2002, **18**(2): 251(in Chinese).
(梁前进, 胡玉连, 张根发. 生物物理学报, 2002, **18**(2): 251.)
- [11] Zhang Genfa, Shi Xiaoming, Nie Yanli, *et al.* *Hightech Communication*, 2005, **15**(2): 84(in Chinese).
(张根发, 石小明, 聂艳丽等. 高技术通讯, 2005, **15**(2): 84.)
- [12] Yu Z L, Yang J B, Wu Y J, *et al.* *Radiat Phys Chem*, 1994, **43**(4): 349.
- [13] Qian Pingping, Hou Suiwen, Wu Dali, *et al.* *Res Radiat Process*, 2007, **25**(4): 211(in Chinese).
(钱平平, 侯岁稳, 吴大利等. 辐射研究与辐射工艺学报, 2007, **25**(4): 211.)
- [14] Wang Weidong, Wang Yan, Wang Xunqing, *et al.* *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2004, **23**(2): 148 (in Chinese).
(王卫东, 王 燕, 王雪青等. 电子显微学报, 2004, **23**(2): 148.)
- [15] Wang Weidong, Liu Leian, Wang Yan, *et al.* *J of Northwest Sci-Tech Univ of Agri and For (Nat Sci Ed)*, 2004, **32**(5): 45 (in Chinese).
(王卫东, 刘磊安, 王 燕等. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, **32**(5): 45.)
- [16] Tanaka A, Shikazono N, Yokota Y, *et al.* *International Journal of Radiation Biology*, 1997, **72**(1): 121.
- [17] Mei Tao, Tan Huaili, Xue Jianming, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2007, **24**(2): 129(in Chinese).
(梅 韬, 覃怀莉, 薛建明等. 原子核物理评论, 2007, **24**(2): 129.)
- [18] Tanaka A, Kobayashi Y, Hase Y, *et al.* *Journal of Experimental Botany*, 2002, **53**(369): 683.
- [19] Ren Jie, Wang Rongfu. *Res Radiat Process*, 2007, **25**(4): 221(in Chinese).
(任 杰, 王荣富. 辐射研究与辐射工艺学报, 2007, **25**(4): 221.)
- [20] Hensel W, Sieversl A. *Planta*, 1981, **153**(4): 303.
- [21] Morita M T, Kato T, Nagafusa K, *et al.* *Plant Cell*, 2002, **14**(1): 47.
- [22] Fasano J M, Swanson S J, Blancaflor E B, *et al.* *Plant Cell*, 2001, **13**(4): 907.
- [23] Kitamura S, Shikazono N, Tanaka A. *The Plant Journal*, 2004, **37**(1): 104.
- [24] Shikazono N, Yokota Y, Kitamura S, *et al.* *Genetics*, 2003, **163**(4): 1 449.
- [25] Shikazono N, Suzuki C, Kitamura S, *et al.* *Journal of Experimental Botany*, 2005, **56**(412): 587.
- [26] Bian P, Xu M, Yu Z L. *Surface & Coatings Technology*, 2007, **201**: 8 014.
- [27] Shikazono N, Tanaka A, Kitayama S, *et al.* *Radiation and Environmental Biophysics*, 2002, **41**(2): 159.
- [28] Hirono Y, Smith H H, Lyman J T, *et al.* *Radiation Research*, 1970, **44**(1): 204.
- [29] Shi Xiaoming, Li Ke, Nie Yanli, *et al.* *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, **41**(2): 185 (in Chinese).
(石小明, 李 珂, 聂艳丽等. 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, **41**(2): 185.)
- [30] Wang Yan, Wang Weidong, Qin Guangyong, *et al.* *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2004, **19**(1): 82(in Chinese).
(王 燕, 王卫东, 秦广雍等. 华北农学报, 2004, **19**(1): 82.)
- [31] Hefferina M L, Tomkinson A E. *Dns Repair*, 2005, **4**(6): 639.
- [32] Sachs R K, Hlatky L R, Trask B J. *Trends in Genetics*, 2000, **16**(4): 143.
- [33] Chang Fengqi, Liu Xuanming, Li Yinxin, *et al.* *Science in China*, 2003, **C33**(2): 117(in Chinese).
(常凤启, 刘选明, 李银心等. 中国科学, 2003, **C33**(2): 117.)
- [34] Shikazono N, Yokota Y, Tanaka A, *et al.* *Genes & Genetic Systems*, 1998, **73**(3): 173.
- [35] Shikazono N, Tanaka A, Watanabe H, *et al.* *Genetics*, 2001, **157**(1): 379.
- [36] Bleuyard J Y, Gallego M E, White C I. *Dan Repair*, 2006, **5**(1): 1.
- [37] Naito K, Kusaba M, Shikazono N, *et al.* *Genetics*, 2005, **169**(2): 881.
- [38] Bian Bo, Su Mingjie, Chen Linhai, *et al.* *Acta Laser Biology Sinica*, 2003, **12**(5): 332(in Chinese).
(卞 坡, 苏明杰, 陈林海等. 激光生物学报, 2003, **12**(5): 332.)
- [39] Yuan Shibin, Xue Jianming, Wang Yugang, *et al.* *Acta Laser Biology Sinica*, 2003, **12**(5): 327(in Chinese).
(袁世斌, 薛建明, 王宇刚等. 激光生物学报, 2003, **12**(5): 327.)
- [40] Bian Bo, Su Mingjie, Qin Guangyong, *et al.* *Acta Biophysica Sinica*, 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.)

Recent Advances in Biological Effect and Molecular Mechanism of *Arabidopsis thaliana* Irradiated by Ion Beams^{*}

WU Da-li¹, HOU Sui-wen^{1, 2, #}, LI Wen-jian²

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

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

Abstract: Newly research progresses were summarized in effect of ion beams on seed surface, biological effect, growth, development, gravitropism and so on. Furthermore, mutation molecular mechanism of *Arabidopsis thaliana* was discussed, for example, alteration of DNA bases, DNA damage, chromosomal recombination, characteristics of mutant transmissibility, etc. Meanwhile, the achievements of transferring extraneous gene to *Arabidopsis thaliana* by ion beams were reviewed in the paper. At last, the future prospective are also discussed here in mutation molecular mechanism and the potential application of biological effect of heavy ion beams.

Key words: *Arabidopsis thaliana*; ion beam; irradiation; biological effect; molecular mechanism

* Received date: 25 Dec. 2007; Revised date: 9 Jan. 2008

* Foundation item: Western Light Co-scholar Program of Chinese Academy of Sciences (XL050616); Program for New Century Excellent Talents in University; Special Program of Gansu Province Agricultural Bio-technology (GNSW-2006-16)

Corresponding author: Hou Sui-wen, E-mail: housw@lzu.edu.cn