

空间辐射对植物的诱变效应

魏力军¹, 钱宇¹, 孙野青^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学生命科学与工程系, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 大连海事大学环境系统生物学研究所, 辽宁大连 116026)

摘要: 空间环境具有强辐射、高真空、微重力、变化的磁场等特点, 与地球环境有所不同, 对进入其中的生物具有诱变作用。自从 20 世纪 60 年代开始进行空间生物学实验以来, 空间环境的生物学效应一直受到科学家的关注, 许多国家进行了大量植物种子的搭载实验, 获得了作物的优良品种, 并研究了空间辐射环境引起植物种子变异的特点、规律和机制。综述了空间辐射对植物学性状、细胞学效应、生理生化特性、蛋白质组和基因组的影响, 以及空间诱变育种等方面的研究进展。

关键词: 空间辐射; 植物; 诱变效应

中图分类号: Q345.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-2767(2009)04-0001-06

Space Radiation Effects on Plants

WEI Li-jun¹, QIAN Yu¹, SUN Ye-qing^{1,2}

(1. Life Science and Engineering Department of Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001; 2. Environmental System Biology Institute of Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026)

Abstract: The space environment is different from global environment, featured as strong radiation, high vacuum, microgravity and changeable magnetic fields, which can induce mutations on organisms entered into the space. Since the beginning of space biology experiments in 1960s, the biological effects of the space environment has been concerned by scientists, and a large number of onboard experiments of plant seeds were carried out in many countries. The superior varieties of crops were gained, and the characteristics and mutation mechanisms of the space radiation environment were studied at the same time. The effects of space radiation on plant traits, cytological, physiological, biochemical, proteomic and genomic characteristics were reviewed in this paper, and the research progresses of space breeding were also concerned.

Key words: space radiation; plant; mutagenic effects

“空间”是指地球大气以外的领域, 空间环境具有强辐射、高真空、微重力、变化的磁场等特点, 与地球环境有所不同, 对进入其中的生物具有诱变作用^[1]。空间生命科学是伴随人类的载人航天活动所产生和发展的, 研究在空间环境条件下生物体的生长、发育和演变规律的一门科学^[2]。

自从 20 世纪 60 年代开始进行空间生物学实验以来, 空间环境的生物学效应一直受到科学家的关注, 各国进行了大量的植物种子的搭载研究, 美国和前苏联的研究主要集中在空间条件下植物生长发育规律如植

物对引力的感受和反应^[3], 旨在最终开发出适于太空旅行的植物, 建立宇航员生命保障系统, 为宇航员的空间作业和人类的太空旅行做准备。我国育种家利用返回式卫星搭载种子选育了一批农作物的优良品种, 近年来还开展了空间环境诱发植物种子变异的特点、规律和机制的研究。本文拟从空间辐射条件、国内外在空间辐射对植物的诱变效应研究进展等方面进行综述。

1 空间辐射条件

空间的辐射环境中有多种不同来源的电子、质子、重离子等电离辐射, 也有来自太阳等处的可见光、红外光、紫外光、无线电波等电磁辐射。电磁辐射对飞行器内的生物不会产生重要的影响, 而电离辐射却会造成不同程度的损伤。根据辐射的来源不同, 可将空间电离辐射分为三类: 银河宇宙射线、太阳粒子事件和俘获带辐射。

收稿日期: 2009-03-09

基金项目: 中国博士后基金资助项目(20080430920); 黑龙江省自然科学基金资助项目(LBH-Z07172); 哈尔滨工业大学科研创新基金资助项目(HIT-NSRIF-2008-14)

第一作者简介: 魏力军(1970-), 女, 天津人, 博士, 副教授, 从事空间生物学研究。E-mail: weilijun@hit.edu.cn.

银河宇宙射线来自太阳系之外,包括2%的电子和正电子、98%的从质子到铀核的各种带电粒子。它们通过物质时会产生强的电离作用,从而对生物大分子造成较大的损伤。

太阳宇宙射线包括由太阳向外喷射的高速低能粒子流所组成的有规律的太阳风和由太阳磁层发生磁暴所产生的无规律的太阳耀斑(即太阳粒子事件)。太阳发生耀斑时发射出高能带电粒子,它的绝大部分成分是质子,也有少量的 α 粒子及其它重离子。因为太阳粒子事件的发生是偶发性的,且质子通量可在短短数小时内急剧增高,所以它成为空间飞行、特别是星际飞行中威胁性最大的辐射因素。

俘获带辐射又称为 Van Allen 带,是由近地空间被地球磁场捕获的高强度、高能粒子构成的辐射带。可分为内层带和外层带。内层带由电子和不同能量的质子组成;外层主要成分为高强度的电子流。对飞行高度仅为数百公里的低轨道飞行,俘获带辐射的影响并不大。

2 国内外植物空间辐射的生物学效应早期研究

国外的空间生物学效应研究始于 1960 年左右。以美国和前苏联为主,他们在各种类型空间飞行器上进行了许多植物学试验,来观察空间条件下各种类型的植物材料发生的变化。

前苏联在空间环境对植物生长发育影响方面的研究始于 20 世纪 50 年代末,最早以干种子为材料发现搭载后葱、黑种草、小麦、大麦、黄瓜、胡萝卜、西红柿、芥菜、雪松、莴苣、四季豆和大蒜种子的发芽势和发芽率提高,羽衣甘蓝和四季萝卜的生长发育没有变化,而小麦和烟草种子的发芽势和发芽率降低。在对种子幼根染色体畸变的研究中发现同种作物不同批次搭载,同次搭载不同作物间表现不尽相同^[4]。可见进行空间环境实验的偶然性和复杂性。1984 年 Nevzgodina 等将莴苣种子搭载于“礼炮”7 号空间站飞行 40 d 后种子萌发率降低,同时空间飞行也导致发生染色体畸变的细胞比例较高^[5]。美国在 1984 年将番茄种子送上太空,逗留时间达 6 a 之久,返回地面后科研人员获得了变异的番茄,其对人体无毒,可以食用^[6]。对植物 *Crepis capillaris*、拟南芥和番茄种子的研究表明空间环境可以损伤细胞并产生可遗传的变异^[7-9]。

早期的研究主要以植物干种子为材料,采用不同的搭载时间,返回地面后观察出现的生物学变异,其变异的主要诱因来自空间辐射。随着实验方法和技术设备的完善,人们可以将植物活体带入太空,植物体不仅受到空间辐射的影响,还受到持续存在的微重力的影响,空间复合条件的生物学效应更为复杂。例如 20 世纪 80 年代初,前苏联采用独行菜所做的实验未观察到

空间环境下形态异常,也有空间环境下幼苗生长速度加快、减慢和与对照相似的报道。对根分生组织有丝分裂活动的研究表明,小麦、豌豆、莴苣、大麦、向日葵、燕麦和豇豆有丝分裂指数有不同程度的降低,而扁豆则表现为升高。空间环境下生长 8 昼夜的燕麦幼苗分生组织的有丝分裂正常,而在燕麦、豇豆和豌豆的试验中发现细胞器的超微结构与对照相比有不同程度的差异。空间环境下叶序及叶片的组织分化正常,只是叶子形态和解剖结构发生一些变化,叶肉细胞和叶绿体结构的变化程度随飞行时间的延长而增大。空间环境下生长的豌豆蛋白质、氨基酸、糖类和矿质元素的含量发生改变,小麦的叶绿素和类胡萝卜素的含量降低。空间环境下种子萌发长成的豌豆黄化苗根细胞质膜的粘性降低,丙二醛含量降低,抗氧化剂含量增加^[4]。

中国空间生命科学研究始于 20 世纪 60 年代初,曾利用火箭和高空气球等运载工具研究动物在空间条件下生存、心理和生理的变化。空间植物学研究则始于 1987 年国家 863 高科技计划开始运行的时候,早期的尝试主要是借助高空气球和返回式卫星搭载植物种子,以育种为目的。发现 SP₁ 代发芽率、发芽势明显低于对照,且品种间存在明显差异,在单株株高、抽穗期、结实率等均存在明显差异^[10];花粉母细胞发生染色体畸变和花粉败育^[11],SP₂ 代多数性状均出现分离,出现的变异在 SP₃ 和 SP₄ 代可以遗传下去^[10, 12-14]。

通过早期的研究证明了空间环境对进入其中的植物种子可以产生诱变效应,不同物种对空间环境的反应不同(即敏感性不同),不同性状的改变规律也不同;此外空间环境还可以作为一种诱变育种的条件加以利用。进入 20 世纪 90 年代后,越来越多的育种家和科研人员对空间环境的诱变效应产生了兴趣,进而对空间环境的诱变效应从不同方面进行了广泛的研究。

3 空间辐射对植物学性状的影响

3.1 高空气球搭载的诱变效应

高空气球搭载植物种子时间一般为 8 h,飞行高度 30~38 km。徐建龙等 1992 和 1994 年两次将水稻干种子搭载高空气球^[15-16],同时进行了⁶⁰Co γ 辐照处理^[17]。陈芳远等利用高空气球搭载水稻干种子回收种植,发现 SP₁ 代出现种子的发芽率、发芽势降低,中后期生长不整齐,抽穗期不一致,结实率降低等现象,对 SP₂ 代群体的农艺性状,出现广幅的分离,并获得基因突变株^[10]。由于高空气球搭载的植物种类有限,尚无法总结规律,但可以看出高空气球搭载能够对植物种子产生诱变效应(如株高、生育期、叶绿素缺失等),但和地面 γ 辐射育种处理存在差异,且不同性状的反应不同。

3.2 返回式卫星搭载的诱变效应

在高空气球搭载实验的基础上的研究者又利用返回式卫星搭载了植物种子,返回式卫星为低轨道飞行,

轨道高度范围为 200 ~ 500 km, 飞行时间从 3 ~ 5 d 至 15 ~ 17 d 不等。因此, 与高空气球所处空间环境相比, 返回式卫星所在的空间环境的空间辐射能量和剂量都要高出许多。

许多研究人员利用 20 世纪 90 年代初的 JB-1 (空间飞行 15 d) 及其他返回式卫星搭载了涉及粮食、蔬菜、中药和花卉等大量物种^[18-29], 进行了空间辐射粒子和剂量的检测^[21], 同时设立地面不同剂量的 γ 射线辐照, 比较了空间辐射与 γ 射线辐照的差异^[27]。大量搭载试验表明, 空间辐射条件主要是剂量极低而能量很高的高能重离子, 它能够对植物种子产生诱变作用, 对秧苗的生理损伤比地面 γ 射线处理的轻得多, 许多性状上出现了较大的分离, 并能够稳定遗传给后代。

3.3 “神舟”飞船搭载的诱变效应

随着航天技术的发展, 我国载人航天工程的实施, 开始发射“神舟”号飞船, 从 1999 年 11 月到 2008 年 9 月共发射七艘“神舟”号飞船, 飞行 1 ~ 6 d 轨道高度与返回式卫星相似也为低轨道, 分别进行了种子搭载和科学实验。由于载人航天的要求, 神舟 5 号到 7 号搭载种子重量有限, 因此种子搭载主要通过神舟 3 号和 4 号(飞行 6 d 18 h)完成。

韩蕾等将草地早熟禾干种子搭载“神舟”3 号飞船^[30], 孙野青等将不同基因型水稻种子搭载“神舟”3 号和 4 号飞船, 同时采用地面不同剂量的 γ 辐照处理, 从处理 1 ~ 3 代考察了水稻性状的遗传变异规律和特征。结果发现植株表型性状发生了变化, 有些变化能遗传给后代; 同地面不同剂量的 γ 辐照处理比较表明, 对 γ 辐照不敏感的品种大多数对空间诱变也不敏感, 而对 γ 辐照敏感的品种约有一半对空间诱变表现敏感, 另一半表现不敏感。M₂ 代诱变效应研究表明, 两种诱变处理均能诱发株高和抽穗期突变, 但不同性状的突变频率差异较大^[31], 表明空间环境诱变因素的复杂性, 其诱变的机制与地面单一 γ 辐照是不完全相同的, 还有待进一步深入研究^[32]。尹淑霞等将多年生黑麦草的干种子搭载于“神舟”4 号飞船, 同时进行不同剂量 (0Gy、50Gy、100Gy、150Gy、200Gy) 的 ⁶⁰Co γ 射线辐照^[33], “神舟”4 号飞船同时还搭载了蔬菜、花卉种子和红豆杉树苗等。

从“神舟”5 号发射 (2003 年 10 月 15 日) 开始, 实现了载人航天的突破, 太空飞行 21 h, 同时还搭载了来自台湾的农作物种子和总计 1 000 g 花卉、蔬菜、水果种子。“神舟”6 号 (2005 年 10 月 12 日发射) 首次完成“多人多天”(航天员 2 人, 太空飞行 115 h) 的飞行任务, 搭载了植物种子并携带细胞培养盒, 开始太空活细胞实验。“神舟”7 号于 2008 年 9 月 25 日晚 9 时 10 分发射, 乘坐 3 名航天员, 太空飞行 68 h 27 min, 首次进行了出舱活动, 搭载了 6 类 36 种物品, 其中包括微生物菌种、

农作物、植物种子等, 研究内容涉及许多学科领域。

4 空间辐射的细胞学效应

空间搭载后在观察植物学性状改变的同时, 研究人员还对细胞学效应进行了观察。李群、顾瑞琦等卫星搭载小麦种子 8 d, 发现空间飞行可引起根尖细胞染色体畸变率的增加。种子经辐射保护剂芥子碱和半胱氨酸预处理能显著降低空间飞行诱发的根尖细胞染色体畸变率, 而经辐射敏化剂咖啡因预处理的情况则相反^[34]。

李金国等经 JB-1 号返回式卫星搭载, 选育出玉米不育突变体, 不育性状呈现出由隐性单基因控制的核不育的遗传特点^[35]。王彩莲等用 JB-1 号搭载了 5 个水稻的干种子, 同时用氮离子束、质子、同步辐射处理, 并与 γ 射线 (150、300 和 450Gy) 处理, 比较表明几种诱变因素均能诱发各类染色体结构变异, 染色体畸变率明显高于对照。与 γ 射线和质子处理相比较, 空间环境对染色体的致畸效应较低, 而有丝分裂指数大于质子和 γ 射线处理, 且差异极显著^[36]。陈忠正和梅曼彤等研究发现无花粉型雄性不育水稻新种质败育机理是花药中层在小孢子母细胞早间期开始液泡化, 过早降解, 引起绒毡层过早退化, 使绒毡层无法正常行使功能, 导致小孢子母细胞粘连并在二分体时期解体, 无法形成花粉^[37]。

孙野青等多次利用返回式卫星和“神舟”号飞船搭载水稻种子, 同时在地面进行不同剂量的 γ 辐照处理或加速器重离子 (C、Ne 和 Fe) 模拟空间低剂量 (2.0 mGy) 辐照处理, 比较了空间辐射与地面 γ 辐照和加速器重离子辐照的异同。“神舟”4 号搭载结果表明, 所有品种空间搭载的根尖细胞有丝分裂指数 (MI) 和染色体畸变率均明显高于地面对照^[38]。2004 年 9 月第 20 颗返回式科学与技术实验卫星搭载水稻品种 (系) 的干种子 18 d, 并平行进行地面三种不同 LET 值 ($13.3\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, $31\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $500\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 的重离子 (C、Ne 和 Fe) 加速器模拟空间低剂量 (2.0mGy) 的辐射处理, 结果表明, 空间环境和重离子辐照可以影响细胞的生长并诱发细胞产生不同类型的染色体畸变, 包括微核、染色体桥、断片和落后染色体, 染色体畸变率随重离子 LET 值的增大而提高。空间搭载后细胞有丝分裂指数最高^[39]。

细胞学研究表明, 空间搭载对有丝分裂和减数分裂均能产生影响。根尖细胞有丝分裂指数提高, 表明空间搭载刺激了有丝分裂的进行或使有丝分裂中期阻滞。染色体畸变率提高, 但致畸效应低于 γ 辐照、质子和重离子处理, 提示地面 γ 辐照、重离子辐射和空间环境诱变的机制可能不同。

5 空间辐射对植物生理生化反应的影响

中科院李金国等将番茄的干种子分别于 1987、

1994 和 1997 年 3 次搭载返地卫星,发现当代幼苗过氧化物同工酶产生明显差异^[40]。黑龙江省农业科学院园艺分院将青椒和番茄种子搭载返回式卫星,筛选出的高产、抗病和品质好的太空椒和番茄,其过氧化物同工酶、酯酶同工酶、维生素 C 和可溶糖含量等指标发生改变^[41-42]。

徐云远等将亚麻干种子搭载于我国 940703 返地卫星,第二代幼苗经组织培养筛选得到了抗旱性愈伤组织^[43]。李社荣等利用 JB-1 号搭载了玉米种子,发现空间诱变后叶绿素 a+b 的含量比对照明显降低,其中叶绿素 b 的下降幅度远大于叶绿素 a,同时叶绿体的外形和内部结构也发生了变化^[44]。孙野青等利用 JB-1 号卫星搭载得到的水稻稳定突变品系,在抗逆性、产量、发芽率、发芽势、呼吸强度等多方面都发生了变异^[23 24]。

2002 年郑少清等利用“神舟”3 号宇宙飞船搭载了烤烟 SP₂ 株系 3 真叶期幼苗的叶长、宽、叶绿素含量,单位叶面积重和抗坏血酸含量均发生了不同程度的变异,其中部分变异在地面对照与 SP₂ 间达到显著或极显著水平^[45]。韩蕾等通过“神舟”3 号飞船搭载筛选得到的草地早熟禾快速生长突变植株、皱叶矮化突变植株和叶绿素缺失突变体的叶片表面、叶肉细胞超微结构、光合作用光响应曲线、CO₂ 响应曲线及叶绿素含量和叶片中表达的蛋白质与对照相比在各方面均发生了不同程度的变化^[46-48]。

尹淑霞等将多年生黑麦草干种子搭载于“神舟”4 号飞船同时进行不同剂量(0Gy、50Gy、100Gy、150Gy、200Gy)的⁶⁰Coγ 射线辐射处理发现,随着辐射剂量的加大,植株高度及分蘖数呈下降趋势,过氧化物酶同工酶(POD)和酯酶同工酶(EST)的活性都是先升高后降低^[32]。

以上结果表明,种子经空间搭载,可影响其后代生理上的变化,主要表现在叶绿素含量、叶绿素缺失突变、光合速率和呼吸速率改变,与代谢相关的过氧化物酶同工酶和酯酶同工酶活性改变。

6 空间辐射对植物基因组和蛋白质组的影响

李金国等对经空间搭载后选育出的番茄突变体进行了 RAPD 分子标记检测,表明空间飞行可诱导番茄 DNA 突变^[4]。徐建龙将水稻农垦 58 种子搭载“8885”返地卫星,经 6 代选育得到稳定遗传的大粒型突变体,遗传学性状分析发现其籽粒大小表现为多基因控制的数量性状^[49]。邢金鹏运用 140 个随机引物对大粒型突变体及其亲本进行了 RAPD 分析,在检测的 2 000 多个染色体位点上仅有 5 个位点有差异,差异率为 0.25%,并将其中一个片段定位于第 11 号染色体上,位于分子标记 CDO520 和 PTA 818 中间^[50]。

4
黑龙江农业科学

徐建龙对晚香糯 ZR9 干种子高空气球搭载选育出的“航育 1 号”,和卫星搭载选出的香粳 10 号突变系的矮生性等位测定表明,航育 1 号和香粳 10 号的半矮生基因是等位的,等位于加 23 的 *sd1* 基因。运用 50 个随机引物进行多态性分析表明,ZR9 与航育 1 号之间的多态性为 6.46%,与香粳 10 号为 4.05%。研究显示,空间诱变变异是一种 DNA 多位点的突变,而非点突变^[51]。

易继财、梅曼彤等卫星搭载特粳占 13 干种子,经 5 代选出的 6 个突变体及 2 个优良品系,采用了 RAPD 和 AFLP 分子标记,对基因组 DNA 进行扫描结果显示:不同的突变体与原种 DNA 之间存在不同程度的多态性差异,为 6%~12%^[52]。

孙野青等采用 DD-PCR 法从水稻稳定突变品系 972-4 及其地面对照品系中寻找差异表达基因,从 20 个差异片段中共找到 6 个阳性片段,其中两个是新的 EST,且这两个 EST 在抗稻瘟病水稻品系 972-4 中高表达,可能是抗瘟性相关新基因^[53]。神舟 3 号搭载不同基因型水稻种子后,对 M₂ 代突变体通过 AFLP 方法进行了突变位点的检测,发现 DNA 位点突变率为 1.67%~5.97%,表明 M₂ 代 DNA 序列发生了一定的改变^[54]。

韩蕾等利用蛋白质组学技术发现“神舟”3 号飞船搭载筛选到的草地早熟禾皱叶突变株系(PM2)叶片中表达基本保持不变的蛋白点有 181 个,上调表达蛋白点有 15 个,下调表达蛋白点有 15 个,失去表达蛋白点有 116 个。并对其中的 19 个蛋白点进行肽质谱分析^[48]。

分子水平的研究结果显示,空间环境确实对植物种子存在诱变作用,且空间诱变变异是一种 DNA 多位点的突变,而非点突变。此外还影响了蛋白质的表达。

7 空间辐射诱变的育种应用

我国自 1987 年开始利用发射返回式卫星、高空气球等,广泛开展农作物、微生物、抗生素、酶制剂生产菌、昆虫等空间诱变育种研究,在全国范围内取得了一系列应用成果^[55-56]。

中国科学院遗传研究所 1987 年与广西农业大学合作,选育出杂交优势强、结实率高、种子饱满好的粳粳亚种间的杂交稻新组合^[57];1988 年与宜丰县农科所合作,选育出优质稻新品系,1992 年通过中国科学院成果鉴定^[55, 58]。李金国 1992 年培育成赣早粳 47 新品种,其农艺性状、抗病性、丰产性、米质和过氧化物同工酶都产生了明显的变化,认为空间环境诱变可以作为一种新的诱变育种方法^[39]。华南农业大学陈志强利用高空气球、返回式卫星和飞船 6 次搭载几十份水稻种子,育成的优质稻新品种华航 1 号、培杂航 7 号、金航丝苗、华航丝苗等^[60]。

浙江省农业科学院徐建龙将晚香糯 ZR9 干种子 1992 年搭载高空气球 (30 ~ 38 km, 8 h) 和返地卫星, 在高空气球搭载的变异后代中, 选育出高产、优质、早熟晚糯新品种航育 1 号; 从卫星搭载的第 6 代中选出香粳 10 号突变系^[51]; 1996 年将特早熟晚粳丙 95-503 搭载 JB-1 返回式卫星, 在 SP₂ 代鉴定出 1 株多穗矮突变体, 经系普选育至 SP₄ 代, 综合性状稳定, 定名为 R955^[61]; 2006 年又育成优质特早熟晚粳新品种航天 36 水稻新品种^[62]。俞法明等将早籼浙 9248 经卫星搭载诱变处理, 经病区多代筛选培育成高抗稻瘟病兼抗白叶枯病的水稻突变体浙 101, 在熟期、抗病性和产量等性状上比亲本有明显改良, 抗病性比原亲本和对照有显著提高^[29], 该品种 2005 年 11 月通过浙江省农作物品种审定委员会审定^[63]。

李源祥等选育出了赣早籼 47、V5121、卫紫香糯和 VR 系列恢复系^[64]。方金梁等选育出了糙米粗蛋白质达 12.8% 的水稻新品种^[65]。谢华安等筛选出特优航 1 号和 II 优航 1 号水稻, 其稻米品质得到了显著的改良, 其蛋白质含量分别比对照提高了 1.9 和 2.0 个百分点^[66]。王慧等从籼稻品种特粳占 13 突变品系中选出了在株高、熟期、产量、外观品质和抗性性状同时得到明显改良的新品种和新种质^[67]。

此外, 中科院植物研究所搭载的小麦、高粱等, 都获得了稳定的优良品种^[57,67]。莱阳农科院 1991 年利用高空气球搭载谷子的种子, 经多年选育获得了大穗型、多穗型、雄性不育型等多个新品系, 培育出性状相对稳定、穗长超过 5.8 cm, 穗重比对照增加 3.7 g 的丰产优质品系, 籽粒中铁的含量比对照提高 69.1%^[68]。黑龙江省农业科学院园艺分院与中科院合作将青椒和番茄种子多次搭载返回式卫星, 选育出了高产、抗病和品质好的太空椒和番茄 (宇番 1 号和 2 号)^[13-14, 69]。安徽省农业科学院作物所 1994 年卫星搭载的油菜种子后代中, 获得了一株大英型突变体, 其英比对照长一倍^[70]。黑龙江省农垦科学院作物所利用高空气球搭载大豆种子, 获得生育期一致, 能自封顶有限花序和有色素的突变体后代^[56, 67]。棉花、亚麻、红麻等也通过空间诱变育种获得了许多新品系^[61-62]。白莲、百合等花卉也经搭载产生了不同性状^[71]。中科院遗传所刘敏等利用我国的返回式卫星和俄罗斯和平号空间站搭载了多种花卉和作物, 培育出了百合、月季、番茄、青椒等新品种^[72-73]。

综上所述, 空间环境对进入其中的生物有诱变作用, 可以引起各种各样的变异, 且有的变异是可以遗传的。空间环境条件可以被利用来进行育种研究。2006 年 9 月 9 日 15 时, 我国成功发射“实践 8 号”育种卫星, 卫星上装载了粮、棉、油、蔬菜、林果花卉等 9 大类 2 000 余份约 215 kg 农作物种子和菌种, 搭载数

量和种类是我国自 1987 年开展航天育种研究以来规模最大的一次, 主要用于航天育种试验和研究。

参考文献:

[1] 江丕栋. 空间生物学[M]. 青岛: 青岛出版社, 1999.

[2] 任维, 魏金河. 空间生命科学发展的回顾、动态和展望[J]. 空间科学学报, 2000, 20(增刊): 48-54.

[3] 刘录祥, 郑成成. 空间诱变与作物改良[M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 1-10.

[4] 赵林妹, 刘录祥. 俄罗斯空间植物学研究进展[J]. 核农学报, 1998, 12(4): 252-256.

[5] Nevsgodian V, Gaulin Y, Kovalev E E, et al. Changes in developmental capacity of artemia cyst and chromosomal aberrations in lettuce seeds flown aboard Salyut-7 (Biobloc III experiment)[J]. Adv. Space Res., 1984, 4(10): 71-76.

[6] Helstead T W. Plants in space[J]. Ann Rev Plant Physiol, 1987, 38: 317-345.

[7] Kranz A R. Genetic and physiological damage induced by cosmic radiation on dry plant seeds during space flight[J]. Adv. Space Res., 1986, 6(12): 135-138.

[8] Pickert M, Gartenbach K E, KRANZ A R. Heavy Ion induced mutations in genetic effective cells of a higher plant[J]. Adv. Space Res., 1992, 12(2): 69-72.

[9] Vaulina E, Anikeeva I, Kostina L. Radiosensitivity of higher plant seeds after space flight[J]. Adv. Space Res., 1984, 4(10): 103-107.

[10] 陈芳远, 蒋兴村, 卢升安, 等. 空间环境对水稻遗传性的影响[J]. 中国水稻科学, 1994, 8(1): 1-8.

[11] 李金国, 王培生, 张健, 等. 空间飞行诱导绿菜花的花粉母细胞染色体畸变研究[J]. 航天医学与医学工程, 1999, 12(4): 246-248.

[12] 蒋兴村, 李金国, 陈芳远, 等. “885” 返地卫星搭载对水稻种子遗传性的影响[J]. 科学通报, 1991, 36(23): 1820-1824.

[13] 李金国, 刘敏, 王培生, 等. 空间条件对番茄诱变作用及遗传的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2000, 13(2): 115-118.

[14] 韩栋, 李金国, 梁宏健, 等. 利用 RAPD 分子标记检测空间飞行诱导的番茄 DNA 突变[J]. 航天医学与医学工程, 1996, 9(6): 412-416.

[15] 徐建龙, 林贻滋, 奚永安, 等. 水稻空间诱变育种的研究[J]. 核农学报, 1997, 11(1): 9-14.

[16] 徐建龙, 林贻滋, 奚永安, 等. 高产优质早熟晚糯航育 1 号的选育、特征特性及其栽培技术[J]. 浙江农业科学, 1999(2): 74-76.

[17] 徐建龙, 奚永安, 蒋兴村, 等. 空间条件对水稻诱变效应研究[J]. 空间科学学报, 1996, 16(增刊): 89-93.

[18] 李源祥, 蒋兴村, 李金国, 等. 水稻空间诱变育种的研究[J]. 航天医学与医学工程, 1998, 11(1): 21-25.

[19] 李源祥, 李国良, 邱慧, 等. 水稻空间诱变育种及遗传变异规律的研究第 I 报[J]. 遗传, 1998, 20(增刊): 82-85.

[20] 李源祥. 空间条件对水稻种子的诱变研究初报[J]. 航天医学与医学工程, 1995(3): 212-219.

[21] 施巾帼, 范庆霞, 王琳清, 等. 太空环境诱发红小豆大粒突变[J]. 核农学报, 2000, 14(2): 93-98.

[22] Mei M, Sun Y, Qiu Y, et al. Morphological and Molecular Changes of Maize Plants after Seeds Been Flown on Recoverable Satellite[J]. Adv. Space Res., 1998, 22(12): 1691-1697.

[23] 李常银, 孙野青, 杨谦. 空间生物学研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(4): 385-388.

[24] 李常银, 杨谦, 孙野青, 等. 抗稻瘟病新基因 *pi-h1* 的克隆与功能研究[J]. 高技术通讯, 2004, 14(10): 21-26.

[25] 赵淑平, 赵力强, 薛岚, 等. 高能重离子辐射对药用植物藿香的影响[J]. 中国中药杂志, 1997(12): 17-20.

[26] 赵玉锦, 赵琦, 白志良, 等. 空间诱变高粱突变体的研究[J]. 植物学通报, 2001, 18(1): 81-89.

[27] 吴关庭, 金卫, 陈锦清, 等. 空间诱变和 γ 射线辐照与离体培养相结合对水稻生物学效应的研究[J]. 核农学报, 2000, 14(6): 347-35.

[28] 徐建龙. 空间诱变因素对不同粳稻基因型的生物学效应研究[J]. 核农学报, 2000, 14(1): 56-60.

[29] 严文潮, 孙国昌, 徐建龙, 等. 空间诱变育成抗稻瘟病和白叶枯病水稻突变体浙 101[J]. 中国水稻科学, 2004(5): 41-45.

[30] 韩蕾, 孙振元, 钱永强, 等. “神舟” 三号飞船搭载对草地早熟禾生物学特性的影响[J]. 草业科学, 2004(5): 19-21.

[31] 魏力军, 杨谦, 骆荣挺, 等. 水稻空间搭载与地面 γ 辐照诱变效应的比较研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1306-1312.

[32] 王俊敏, 徐建龙, 魏力军, 等. 空间环境诱变和地面 γ 辐照对水稻诱变的差异[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 1006-1010.

[33] 尹淑霞. 空间飞行与 γ 射线辐射对草坪草诱变效应研究[D]. 北京: 北京林业大学博士学位论文, 2005.

[34] 李群, 郭房庆, 顾瑞琦, 等. 外空飞行后小麦根尖细胞的染色体畸变[J]. 植物生理学报, 1997(3): 274-278.

[35] 李金国, 潘光堂, 曹墨菊, 等. 卫星搭载玉米雄性不育突变系的遗传稳定性研究[J]. 航天医学与医学工程, 2000, 15(1): 51-54.

[36] 王彩莲, 慎玖, 陈秋方. 空间环境对水稻的细胞学效应研究[J]. 核农学报, 1998, 12(5): 269-273.

[37] 陈忠正, 刘向东, 陈志强, 等. 水稻空间诱变雄性不育新种质的细胞学研究[J]. 中国水稻科学, 2002(3): 2-8.

[38] Wei L J, Qian Y, Yang Q, et al. Cytological Effects of Space Environment on Different Genotype Rice[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (English Edition), 2007, 16(2): 220-225.

[39] Wei L J, Yang Q, Xia H M, et al. Analysis of cytogenetic damage in rice seeds induced by energetic heavy ions on-ground and after spaceflight[J]. Journal of Radiation Research, 2006, 47(3-4): 273-278.

[40] 李金国, 刘敏, 王培生, 等. 空间条件对番茄诱变作用及遗传的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2000, 13(2): 115-118.

[41] 孙野青, 李玉芬, 陈岩, 等. 空间环境对青椒和番茄遗传诱变研究[J]. 植物研究, 1997, 17(2): 184-189.

[42] 孙野青, 李玉芬, 陈岩, 等. 空间环境对青椒和番茄遗传和变异的影响[J]. 空间科学学报, 1996, 16(增刊): 162-164.

[43] 徐云远, 牛炳韬, 贾敬芬. 卫星搭载亚麻后代中 PEG 和 NaCl 抗性系的初步筛选[J]. 西北植物学报, 2000, 20(2): 159-163.

[44] 李社荣, 刘敏, 汪永祥, 等. 空间条件对玉米叶片光合色素和叶绿体超微结构的影响[J]. 航天医学与医学工程, 1998, 11(6): 396-400.

[45] 郑少清, 叶定勇, 杨俊. 航天条件对烟草几个性状变异的影响[J]. 中国烟草科学, 2004(1): 1-4.

[46] 韩蕾, 孙振元, 巨关升, 等. 空间环境对草地早熟禾诱变效应研究突变体叶片解剖结构变异观察[J]. 核农学报, 2005(6): 4-7.

[47] 韩蕾, 孙振元, 巨关升, 等. 空间环境对草地早熟禾诱变效应研究 II 光合特性和叶绿素含量[J]. 核农学报, 2005(6): 8-11.

[48] 韩蕾, 孙振元, 巨关升, 等. 太空环境诱导的草地早熟禾皱叶突变体蛋白质组学研究[J]. 核农学报, 2005(6): 12-15.

[49] 徐建龙, 王俊敏, 骆荣挺, 等. 空间诱变水稻大粒型突变体的遗传育种研究[J]. 遗传, 2002, 24(4): 431-433.

[50] 邢金鹏, 陈受宜, 朱立煌, 等. 水稻种子经卫星搭载后大粒型突变系的分子生物学分析[J]. 航天医学与医学工程, 1995, 8(2): 109-112.

[51] 徐建龙, 林贻滋, 奚永安, 等. 空间条件诱发水稻突变体[J]. 浙江农业学报, 1999, 11(2): 63-66.

[52] 易继财, 庄楚雄, 姚涓, 等. 空间搭载诱导水稻种子突变的分子标记多态性分析[J]. 生物物理学报, 2002(4): 103-108.

[53] 李常银, 杨谦, 孙野青, 等. 抗稻瘟病新基因 *pi-hit-1* 的克隆与功能研究[J]. 高技术通讯, 2004, 14(10): 21-26.

[54] Yu X, Wu H L, Wei L J, et al. Characteristics of phenotype and genetic mutations in rice after spaceflight[J]. Advances in space research, 2007, 40, 528-534.

[55] 李忠娴. 航天育种研究动态与展望[J]. 江西农业科技, 2000(3): 43-44.

[56] 李金国, 王培生, 张健, 等. 中国农作物航空航天诱变育种的进展及其前景[J]. 航天医学与医学工程, 1999, 12(6): 464-468.

[57] 蒋兴村. 863-2 空间诱变育种进展及前景[J]. 空间科学学报, 1996, 16(增刊): 77-82.

[58] 蒋兴村, 李金国. “8885” 返地卫星搭载对水稻种子遗传的影响[J]. 科学通报, 1991, 36(23): 1820-1824.

[59] 李金国, 李源祥, 华育坚, 等. 利用搭载卫星水稻干种子选育出籼早籼 47 号的研究[J]. 航天医学与医学工程, 2001(4): 52-56.

[60] 殷华, 杨冬庚, 赵林, 南稻也有春天[J]. 世界农业, 2008(10): 71-72.

[61] 徐建龙, 李春寿, 王俊敏, 等. 空间环境诱发水稻多穗矮秆突变体的筛选与鉴定[J]. 核农学报, 2003, 17(2): 90-94.

[62] 王俊敏, 骆荣挺, 鲍根良, 等. 采用空间诱变技术选育特早熟晚粳新品种航天 3q[J]. 核农学报, 2007, 21(4): 323-327.

[63] 俞法明, 严文潮, 吴伟, 等. 早籼稻浙 101 的选育、特征特性及栽培技术[J]. 浙江农业科学, 2006(4): 405-407.

[64] 李源祥, 蒋兴村, 李金国, 等. 水稻空间诱变性状变异及育种研究[J]. 江西农业学报, 2000, 12(2): 17-23.

[65] 方金梁, 曾国基, 李九如. 选育高蛋白超高产水稻新品种[J]. 空间科学学报, 1996, 16(增刊): 157.

[66] 王慧, 陈志强, 杨祁云, 等. 水稻空间诱变突变品系主要农艺经济性状及稻瘟病抗性变异[J]. 华南农业大学学报(自然科学版), 2004(4): 6-10.

[67] 赵玉锦, 赵琦, 白志良, 等. 空间诱变高粱突变体的研究[J]. 植物学通报, 2001, 18(1): 81-89.

[68] 姜国勇, 李秀贞, 刘培利. 平流层辐射对谷子生长发育及后代性状的影响[J]. 核农学报, 1996, 10(2): 79-83.

[69] 郭亚华, 毕宏文, 王雪, 等. 利用空间诱变育种技术培育番茄新品种宇番 2 号[J]. 黑龙江农业科学, 2006(4): 63-65.

[70] 赵成松, 赵仁渠, 李强生, 等. 空间条件对双低油菜农艺性状的影响[J]. 空间科学学报, 1996, 16(增刊): 132-135.

[71] 张效方, 杨利平, 丁冰. 卫星搭载对毛百合的影响[J]. 空间科学学报, 1996, 16(增刊): 165.

[72] 鹿金颖, 潘毅, 薛淮, 等. 空间诱变番茄新品种航遗 2 号的选育[J]. 科技导报, 2005, 23(8): 60-61.

[73] 鹿金颖, 刘敏, 薛淮, 等. 俄罗斯 “和平” 号空间站搭载的番茄随机扩增多态性 DNA 分析[J]. 航天医学与医学工程, 2005, 18(1): 72.

[74] 薛淮, 刘敏, 鹿金颖, 等. 空间环境对月季组培苗生物学特性的影响[J]. 自然科学进展, 2005, 15(2): 173-178.

[75] 鹿金颖, 韩新运, 梁芳, 等. 空间诱变育成辣椒新杂交种航椒 6 号及其 RAPD 分析[J]. 核农学报, 2008, 26(3): 265-270.