

# 植物空间诱变

▪ 刘 敏 主编

▪ 鹿金颖 薛 淮 潘 毅 副主编

# 植物空间诱变

刘 敏 主编

鹿金颖 薛 淮 潘 毅 副主编

中国农业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

植物空间诱变/刘敏主编. —北京: 中国农业出版社,  
2008. 6

ISBN 978-7-109-12459-2

I. 植… II. 刘… III. 诱变育种 IV. S335

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 033342 号

中国农业出版社出版  
(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)  
(邮政编码 100125)  
责任编辑 舒 薇

---

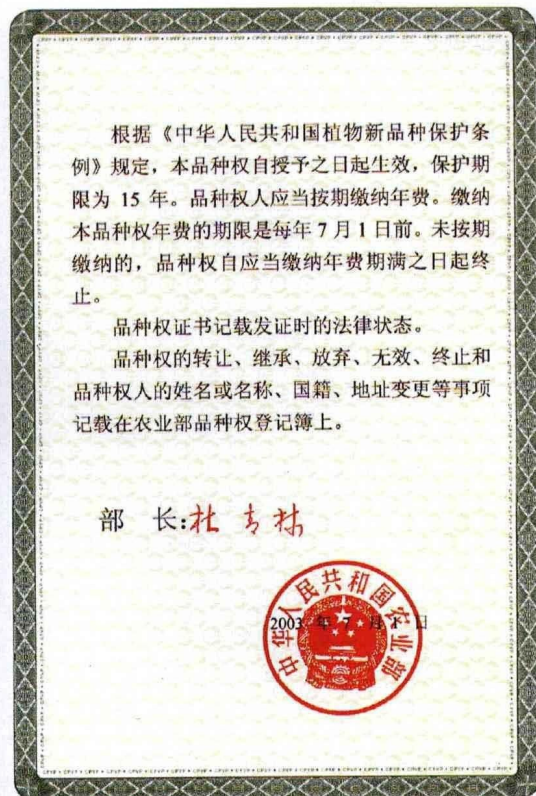
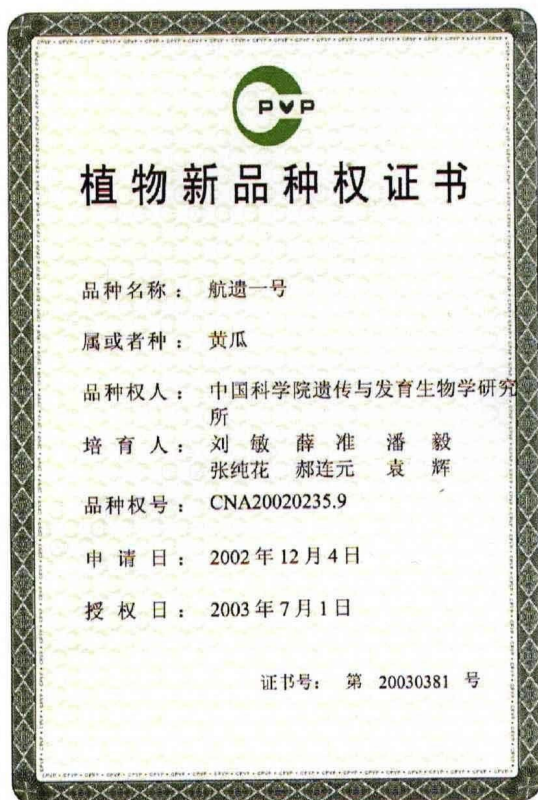
中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行  
2008 年 9 月第 1 版 2008 年 9 月北京第 1 次印刷

---

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 10.25 插页: 2  
字数: 228 千字 印数: 1~1 000 册

定价: 80.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)



空间诱变的黄瓜获得国家新品种证书



在俄罗斯空间站搭载的番茄种子交接仪式





太空兰花试管苗开花



宇青1号茄子硕果累累

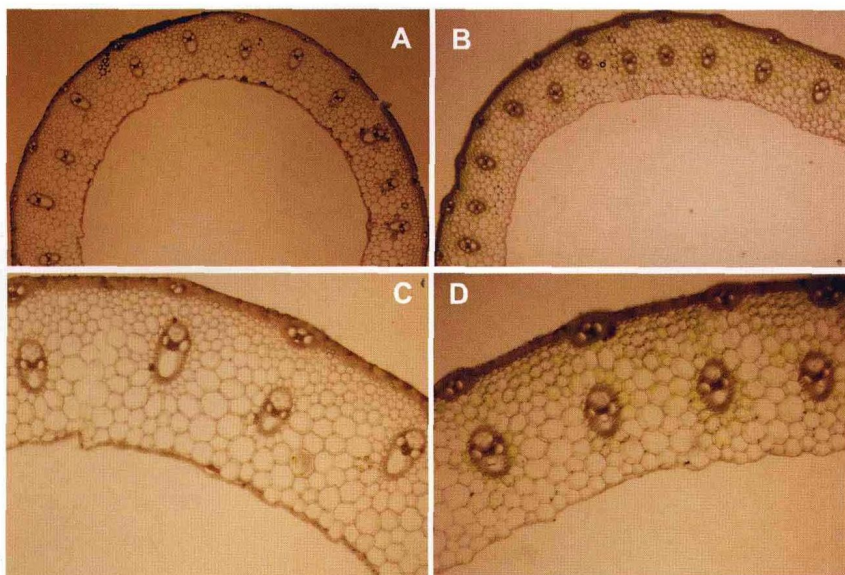


航豇1号豇豆长势喜人



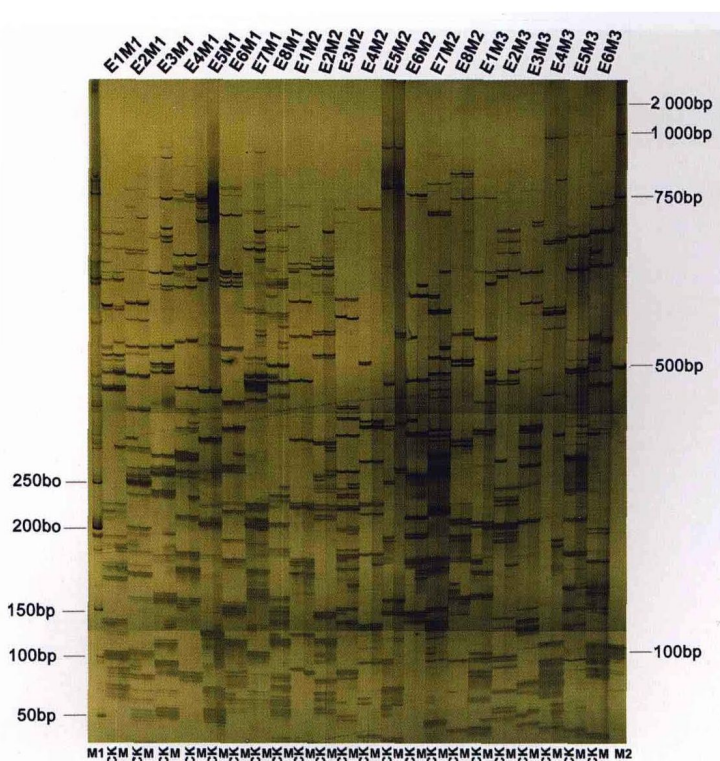
第二章彩图1 水稻DH7对照及其突变体在幼苗期(A)、成熟期(B)及第二茎秆(C)的形态学观察  
Morphological analysis of seedling (A), maturity (B) and the second stem (C) between the control and the mutant of rice DH7 species





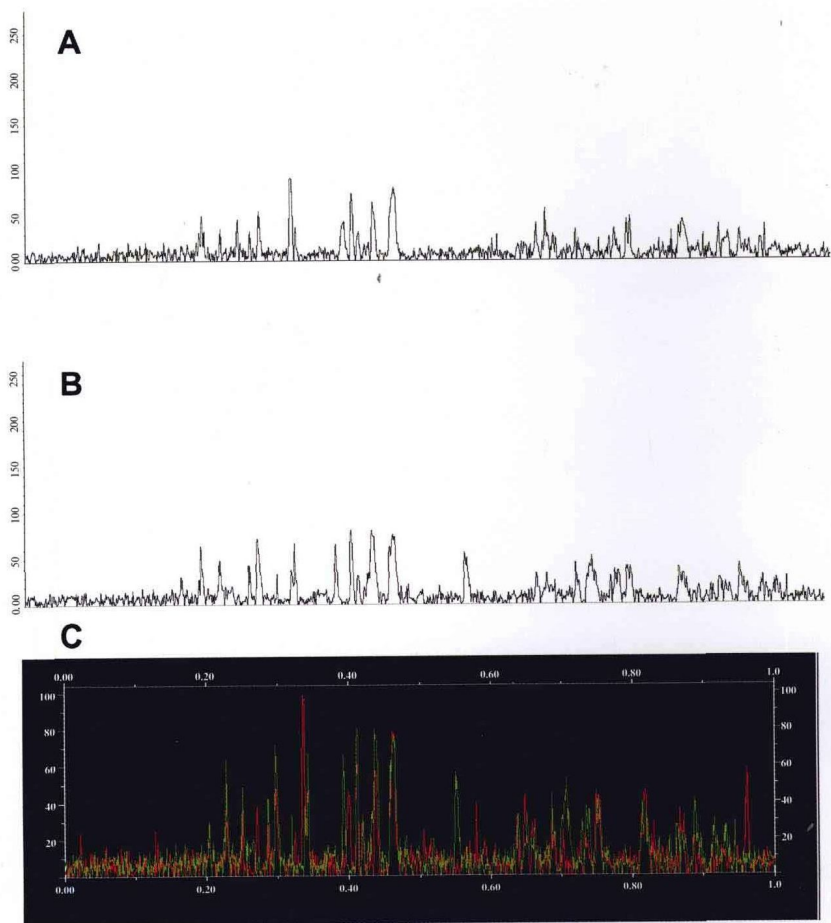
第二章彩图2 水稻 DH7 对照 ( A、C ) 及其突变体 ( B、D ) 的第二茎秆的横切面的显微解剖学形态分析。其中 A 与 B 的放大倍数为 40，C 及 D 的放大倍数是 100

Comparison of micro dissection morphology cut transversely of the second stem between the control and the mutant of rice DH7 species. Among the above images, amplification of A and B is 40, and amplification of C and D is 100



第二章彩图3 水稻 DH7 对照及其突变体的基因组 DNA 的 AFLP 扩增结果。其中 M1 及 M2 为标准 DNA 分子量，其条带大小如图所示。EM 分别为 *Eco*R1 及 *Mse*1 的选扩增引物组合，其序列如表 2-2 所示，CK 与 M 分别表示地面对照和突变体

Results of AFLP amplification using genomic DNA of controls (CK) and mutants (M) as template. M1 and M2 represented standard DNA molecular weight and band sizes were indicated in the Fig. 2-3 respectively. Letter EM represented combination of amplification primer of *Eco*R 1 and *Mse* 1 digest enzymes and their primer sequences were showed in the table 2-2



第二章彩图4  $E_1M_1$  引物组合的 AFLP 扩增条带的 Bandscan4.0 软件的扫描分析结果, A 及 B 分别对应对照及突变体的扫描曲线, C 为 A (红色) 及 B (绿色) 扫描曲线的合成图

Results of AFLP DNA bands amplified by  $E_1M_1$  primer pair scanned automatically by software bandscan 4.0. A and B indicated curves derived from the scan results of controls and mutants, respectively. C, represented merge image of curve of A (red color) and B (green color)



第五章彩图1 神舟4号飞船返地后月季试管苗与地面对照生长情况。CK为地面对照的月季试管苗, SP为经空间处理的月季试管苗

Phenotypes of the ground control (left) and space-flight treated (right) rose tissue cultural seedlings



第五章彩图2 神舟4号飞船葡萄试管苗(左和中)返地后与地面对照(右)生长情况

The ground control (left & middle) and space-flight treated (right) blackberry tissue cultural seedlings

# 前 言

我国载人航天事业的发展，提出了建立空间生命保障系统的重要问题。人类在太空中生存需要氧气和食品，植物是重要的食品和制造氧气的来源，这个问题正日益受到各国科学家的重视。神秘的宇宙有许多未知的现象亟待我们去探索，和平利用空间，研究空间环境对植物生长发育及遗传的影响，是空间生命科学研究的重要部分。

空间环境中特殊的高能粒子辐射、超真空以及微重力环境，正在引起各国科学家的关注。和平利用空间环境，造福人类是我们的共同理想。

自开始空间探索以来，人们一直致力于研究空间特殊的环境条件，如微重力、辐射等对各种生物系统的影响。其原因不仅仅是因为这些研究的结果可增加人类对空间环境因素特点的了解，从而有助于解决一些生物学上的基本问题，更重要的是，这些结果将为保障宇航人员的安全和健康提供必要的生物学基础和依据。20 世纪 60 年代以来，国内外纷纷把动物、植物、微生物置于卫星、飞船、航天飞机中，以观察其变化。在众多的材料中，处于休眠状态的植物干种子由于具有携带方便、可长期贮存、抗逆性强、在经历各种恶劣环境中仍能发芽生长等优点成为搭载最多的一类研究材料。美国、前苏联及欧洲一些国家等多以拟南芥、烟草等种子为材料，观察空间飞行对当代植株生长发育的影响及其下一代的变化，目前进行系统的遗传学分析的研究报道较少。

我国在这方面的研究则有与之不同的特色。1986 年在邓小平同志的支持和推动下，中共中央、国务院批准了国家高技术研究发展计划。在航天领域，为了解空间环境因素对宇航人员的可能影响，在“863 计划”航天领域支持下，中国科学院的科学家们于 1987 年利用我国发射的两颗返回式卫星搭载了 30 多种植物种子、无性繁殖材料等生物样品，返地观察后，初步发现了一些变化。考虑到农业新技术对我们这样一个农业大国有特别重要的价值及早期工作的基础，1988 年在“863 计划”航天领域空间科学有关专家的提议下，设立了“空间条件下植物突变类型研究”的专门课题，组织有关专家探讨空间环境诱导突变的可能及应用前景，空间搭载了多种种子，返地后进行种植、选择。

由于空间环境中特殊的高能离子辐射、超真空、微重力的环境，引起植物诱变，这一现象正日益受到各国科学家的关注。但是空间诱变的遗传机理，尤其是细胞学、生理学及分子水平的遗传机理至今仍然是一个需要探索的研究领域。

我国自 1987 年以来利用返回式地面卫星和飞船进行了多次植物种子搭载，研究空间环境对农作物的空间诱变作用。据不完全统计，现已有 30 余个品种通过了国家审定，近 60 个品系在农业生产中推广应用。中国科学院遗传与发育生物学研究所自



20 世纪 90 年代以来,开始对空间搭载的水稻、番茄、甜椒、黄瓜等在进行地面选育的同时也进行了系统的细胞学、生理学以及分子生物学的研究。

作者通过空间诱变获得的太空黄瓜“航遗 1 号”已获得农业部的新品种权证书,而且经中国食品检测中心检测,维生素 C、铁和可溶性固形物含量均有所提高。空间诱变的番茄突变体其番茄红素高于普通番茄 3 倍,目前正在大面积推广。

在获得这些航天育种优良品种(系)的同时,作者还对上述水稻、番茄、黄瓜、辣椒等品种的每一代都进行了细胞学、生理学及分子生物学的检测,初步研究表明,空间诱变会使植物细胞器如叶绿体结构、线粒体结构发生改变,从而影响了植物的光合作用、营养传导及新陈代谢。空间诱变还会使植物酶的活性发生改变,从而影响植物的生长发育。同时更重要的是空间诱变使部分植物基因发生了改变。通过地面多年的选育,这些改变是可以稳定遗传给后代的。但是太空环境使植物基因发生改变的原因究竟是什么?太空环境是高能粒子辐射与微重力条件共存的,太空中高能粒子及微重力对高等植物会产生什么样的影响?如产生基因改变有没有变异规律?基因的变异位点在哪里?这些问题都值得我们去探索和研究。

我国的空间诱变育种工作从 1987 年开始,已经有 20 年的历史,品种涉及粮食、蔬菜、花卉及经济作物,本书仅以作者从事的科研内容为主,重点介绍了水稻、蔬菜、花卉的空间诱变研究进展。书中的工作绝大部分是著作者自己的工作。希望能将这些实验数据提供给从事空间生命科学及农业育种的科教人员参考,尤其是我国已发射一颗农业卫星,这将意味着我国将在“十一五规划”期间加强空间生命科学研究及空间诱变育种工作,作者希望献上此书作为我们的工作小结和汇报,同时也将空间诱变的探索进展奉献给读者。

空间诱变现象虽然早已被人们发现,但是由于其机理不清楚,一直是一个有争议的学术问题。但是用空间微重力学、空间辐射生物学是可以逐步揭示空间诱变实质的,书中的科学实验和结论是作者们自己的工作,建立在反复实验的基础上,虽然离彻底揭示空间诱变的机制、诱因及分子遗传机理的深度还有一段距离,但就目前国内研究现状而言,具有一定的学术价值。我们的研究表明,空间诱变会影响到植物细胞器如叶绿体、线粒体以及光合作用和新陈代谢。影响细胞间的信号传导及生长素的分布甚至基因序列的改变,通过地面多年选育,有些变异是会遗传给后代的,从而为航天育种提供了科学的数据。同时作者通过 20 多年从事空间诱变机理研究,已培育出了通过空间诱变、优良性状已稳定的番茄、黄瓜、水稻等新品种和新品系,其中黄瓜和番茄新品种已获国家新品种权,而空间诱变的番茄、黄瓜、水稻的选育过程中均采用了田间观察和分子标记相结合的方法,因此具有可操作性。配合我国已发射的农业育种卫星和正在开展的空间诱变选育工作,这本书将对这项工作的开展有一定应用价值。

空间环境中微重力对植物生长发育的影响,国际国内进行了卓有成效的研究,都有过许多研究报道,但是关于空间环境对植物引起诱变的报道却很少,空间环境中微重力与辐射条件是并存的,人类终究要征服太空,太空中的生命保障系统中重要的是

食物和氧气来源，因此在太空中种植植物是未来空间生命科学必须解决的问题，而解决这一问题，首先要了解空间环境对植物生长发育及遗传的影响，而这其中植物空间诱变是重要的研究内容，同时空间诱变还能作为辐射诱变育种的一种方式，并开辟一条新的育种途径。该书把基础研究和农业育种结合起来，是其特点之一；书中在阐述空间诱变对植物细胞学、生理学以及分子生物学方面影响，探索空间诱变机理的同时，还介绍了将田间选育与分子标记检测相结合选育黄瓜、番茄、辣椒优良品种的方法，这是该书特点之二。同时该书还将作者从事空间微重力研究方面的工作以及微重力条件对植物生长发育及遗传的影响介绍给读者，是该书的又一特点。

本书读者对象以从事空间生命科学的科研人员和从事农业育种的技术人员以及大专院校师生为主。由于该书既有空间诱变机理研究及微重力研究的理论部分，又有如何将田间选育与分子标记相结合的空间诱变育种选育部分，所以适应面比较广泛，读者的层面也更宽一些。此书的内容配合国家“十一五”期间重大科技项目的需求，并适应我国空间生命科学的飞速发展形势，尤其是结合我国发射的农业育种卫星，在“十一五”期间加大农业高科技育种这一现状，作者希望该书将会对空间诱变育种工作提供帮助。

本书在写作中参考了一些从事空间生命科学的专家论著和从事空间诱变育种实际工作的实践经验，甘肃天水的包文生同志在空间诱变育种方面做了大量田间选育工作，中国空间技术研究院的郝连元、袁辉同志给我们的工作提供了帮助，中国科学院遗传与发育生物学研究所的研究生张文利、王亚林、张赞、阚晟、韩新运、杜亮、李金娥、李华盛同学都参加了这本书的实验工作，在此向他们表示深深的谢意。

由于空间飞行条件有限，一些实验不能有多次重复，同时我们的研究工作还有许多不足之处，受到水平的限制，这本书难免会有许多不完善甚至错误的地方，希望各位读者批评指正，不胜感激。

作 者

2007年7月31日于北京

# 目 录

## 前言

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 植物空间诱变的概况与发展趋势 .....     | 1   |
| 第一节 空间环境中的诱变因素 .....         | 1   |
| 第二节 空间环境对植物生长、发育与生殖的影响 ..... | 4   |
| 第三节 植物空间诱变的细胞学效应 .....       | 6   |
| 第四节 空间环境对植物生理生化特性的影响 .....   | 7   |
| 第五节 空间环境对植物遗传物质的影响 .....     | 8   |
| 第六节 空间诱变在植物育种研究中的应用 .....    | 9   |
| 第七节 植物空间诱变的发展趋势 .....        | 10  |
| 参考文献 .....                   | 11  |
| 第二章 植物空间诱变的机理研究 .....        | 14  |
| 第一节 植物空间诱变的概念 .....          | 14  |
| 第二节 植物空间诱变的诱因及机理初探 .....     | 16  |
| 第三节 水稻空间诱变育种及机理研究 .....      | 16  |
| 第四节 园艺植物空间诱变育种及机理研究 .....    | 24  |
| 参考文献 .....                   | 53  |
| 第三章 空间诱变与农业育种 .....          | 58  |
| 第一节 航遗 1 号黄瓜空间诱变育种选育 .....   | 58  |
| 第二节 航遗 2 号番茄空间诱变育种选育 .....   | 62  |
| 第三节 太空菜豆 1 号品种选育总结 .....     | 66  |
| 第四节 航椒 6 号辣椒一代杂种选育技术 .....   | 71  |
| 第五节 航椒 5 号辣椒一代杂种选育技术 .....   | 83  |
| 第六节 航椒 4 号辣椒一代杂种选育技术 .....   | 94  |
| 第七节 航椒 2 号辣椒品种选育 .....       | 106 |
| 第八节 航椒 1 号辣椒品种选育 .....       | 111 |
| 第九节 航豇 2 号豇豆品种选育 .....       | 116 |
| 第十节 航豇 1 号豇豆品种选育 .....       | 121 |
| 参考文献 .....                   | 125 |



|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第四章 微重力环境对植物生长发育及遗传的影响 .....      | 127 |
| 第一节 地面模拟微重力的方法 .....              | 128 |
| 第二节 模拟微重力对植物生长、发育的影响 .....        | 129 |
| 第三节 模拟微重力效应时植物生长发育研究实验 .....      | 131 |
| 参考文献 .....                        | 144 |
| 第五章 空间环境与模拟微重力环境对高等植物试管苗的影响 ..... | 147 |
| 参考文献 .....                        | 153 |
| 第六章 利用植物空间诱变育种技术应注意和防止出现的问题 ..... | 154 |

# 第一章 植物空间诱变的概况与发展趋势

自 1961 年 4 月 12 日苏联首次实现人类在太空中飞行以来,人们探索太空的热情日益增长,随后形成了空间生命科学这一新的学科。空间生命科学有三个命题:研究生命起源、寻找地外生命、研究地球生物在太空中的变化。为此世界航天大国投入大量人力、物力在其他星体寻找生命的痕迹,这项工作至今还没有突破性的进展。但地球生物在太空环境下会产生变化,这是各国试验的共同结果。世界植物空间诱变育种和研究工作始于 20 世纪 60 年代,前苏联是第一个开展此项研究工作的国家,他们最早以风干种子作为研究对象,进行空间环境对植物生长发育影响方面的研究,随着空间植物学试验方法和技术设备的不断完善,开始用生长发育的植物进行研究。1984 年美国将番茄种子送上太空飞行器中,取回后获得了变异的番茄。同时还进行了小麦种子放入空间站,完成在空间站整个生育期的过程。中国于 1987 年发射返回式卫星,将蔬菜等植物种子和昆虫、微生物搭载到空间进行试验,到目前已成功进行了 10 多次空间搭载育种研究。相继进入空间的植物达 50 多种,500 多个品种,涉及水稻、小麦、玉米、棉花、大豆、青椒、番茄、牧草、花卉等植物种子,育成了一批优质、高产、多抗、早熟的作物新品种或新品系。同时,还筛选了一些罕见的具有利用价值的突变体材料,有的已在生产中发挥了积极作用。

## 第一节 空间环境中的诱变因素

太空和地面物理环境主要差别是重力、辐射、粒子和磁场。重力随距地面高度增加而变小,是一个精确值。磁场是指地磁场,也随高度增加而下降,但随着经纬度不同,地脉动、太阳日变化、磁暴干扰是一个变动值。空间辐射主要来源有地球磁场捕获高能离子产生的俘获带辐射(Geomagnetically Trapped Particle Radiation,简称 GTPR)、太阳外突发性事件产生银河宇宙辐射(Galactic Cosmic Radiation,简称 GCR)及太阳爆发产生的太阳粒子辐射(Solar Particle Radiation,简称 SPR)。

### 一、微重力

地球上的动植物都是经过亿万年在地球的重力场中进化而来,一切生命活动都与已有的环境条件严格相适应。对于近地空间来说,由于航天飞行器内的惯性离心力与地球重力接近平衡,处于微重力条件。

落塔是实现自由下落的建筑,利用落塔所能获得的失重时间可有数秒钟  $10^{-5}$  g 的微

重力；利用经过特别改装的失重飞机进行抛物线飞行会产生  $30\text{s } 10^{-2}\text{g}$  的微重力；利用火箭可获得数分钟到一小时的微重力持续时间，平均微重力水平可以达到  $10^{-1}\sim 10^{-2}\text{g}$ ；利用航天飞机的空间实验室可获得数日  $10^{-4}\sim 10^{-3}\text{g}$  的微重力；卫星上获得的微重力水平在  $10^{-4}\text{g}$  以下，时间较长；空间站上可获得  $10^{-7}\sim 10^{-6}\text{g}$  的微重力，时间有数月至数年。

空间的重力环境明显不同于地面，未及地球上重力十分之一的微重力是影响空间搭载生物生长发育的重要因素。例如，与重力条件下相比，植物体内的液体流动在微重力条件下会发生很大变化，这些变化对水分的运输、营养成分在体内的分配以及叶面的蒸腾作用均会产生影响，甚至对细胞膜及亚显微结构水平的运输也会产生影响（Dutcher 等，1994）。

## 二、磁 场

地球和近地空间存在的磁场，来源于地球内部，只有小部分起源于外层空间。地球磁场可近似看作在地心附近的，与地球自转轴的倾角为  $11.5^\circ$  的一个磁偶极子所产生。

地球磁场有各种复杂的变化。磁场位置在缓慢移动，磁场倾角在变化，磁场强度不断下降，还常有短期的磁暴。在太阳风的作用下，地球磁场分布显著偏离偶极子磁场，被局限在一定范围内，称为磁层。

地球的磁场（约  $50\text{nT}$ ），是活有机体生活环境的自然状态。在近地空间，地球磁场的方向与其相对于地磁的北、南磁极及赤道的位置有关，其强度大约随距地心距离的三次方成反比。粗略估计，在  $300\text{km}$  的近地空间的磁场约为地面的  $87\%$ 。银河系的磁场约为  $0.1\sim 1\text{nT}$ ，在太阳附近约  $0.21\text{nT}$ ，金星表面  $3\text{nT}$ 。

地球重力场和磁场是生物有机体的重要环境物理因素。在空间飞行时代，人类有了改变重力影响的实验条件。在行星际飞行时，又将有改变地磁影响的实验条件，连同在地球上形成亚磁环境（地磁场）的技术，以及使重力矢量和地磁矢量随机化的 3D 回转器技术，将使得我们能够改变重力场和磁场，更深入地研究这些重要环境因素对于包括人类在内的生物效应。

## 三、空间的辐射环境

空间的辐射环境中，有多种来源的电子、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。根据辐射来源的不同，可把空间电离辐射分为三类：银河系宇宙射线（Galactic Cosmic Rays，简称 GCR）；太阳粒子事件（Solar Particle Event，简称 SPE）；俘获带辐射（Trapped Belt Radiation，简称 TBR）。

### （一）银河系宇宙射线（GCR）

银河系宇宙射线来自太阳系之外，其成分包括了从电子、质子到铀核的各种带电粒

子。其中 98% 为质子及更重的离子, 2% 为电子和正电子。在重粒子中, 质子占 87%,  $\alpha$  粒子 (氦核) 占 12%, 更重的粒子仅占 1%。空间辐射研究中, 常把这些重带电粒子称为 HZE 粒子, 即高原子序数、高能粒子。通量较大的 HZE 粒子所带能量可从数百兆电子伏每粒子到数千电子伏每粒子。由于它们具有很高能量, 通过物质是会产生强的电力作用, 从而对生物大分子造成较大的损伤。重带电粒子中, 以碳、氧、氮、硅、铁等粒子对 GCR 总剂量的贡献最大。GCR 的流量与太阳活动的周期相关, 在太阳活动弱的年份, 银河宇宙射线强度较高; 反之, 在太阳活动强的年份, 宇宙射线的强度明显下降。

## (二) 太阳粒子事件 (SPE)

太阳粒子是太阳上发生耀斑时发射出的高能带电粒子, 它的绝大部分成分为质子, 也有极少量的  $\alpha$  粒子及其他重粒子。这些粒子的能量范围主要为 10MeV 至 500MeV。太阳粒子事件的发生是偶发性的, 目前还无法在事前作准确预测, 但统计结果表明, 它主要发生在太阳活动的高峰年份。由于此类辐射的高通量及难以预测性, 使它成为空间飞行、特别是星际飞行中威胁性最大的辐射因素。

## (三) 俘获带辐射 (TBR)

在近地空间被地球磁场捕获的高强度、高能粒子, 构成了俘获带辐射。根据其空间分布, 可分为内层带和外层带。内层带为靠近地球的区域, 半径可达地球半径的 2.8 倍, 由质子和电子, 主要是不同能量的质子组成, 能量范围从数兆电子伏到数百兆电子伏。外层带则离地球较远, 空间范围从地球半径的 2.8 倍到 12 倍, 成分主要为高强度的电子流, 通量可达内层电子通量的 10~100 倍。

干植物种子耐逆性强, 在一些相当极端的环境条件, 如低温、干燥等条件下能保存相当长的时间, 而不影响发芽生长, 故成为数十年来空间环境生物学效应研究的最普遍的材料。美国、前苏联以及欧洲航天局在空间飞行中搭载拟南芥、烟草、莴苣、甘露草、玉米、大麦、水稻等种子, 并利用把种子固定并和径迹探测器贴合的装置, 检测了穿击装置的 HZE 粒子并研究其引致的效应。Nevzgodina 等 (1982) 和 Maksimova 等 (1985) 用核径迹探测片观察到莴苣种子在空间飞行中被高能重离子击中后染色体畸变率大量增加, 说明空间飞行引起的染色体损伤与空间辐射有着很大的关系。在 1975 年美国、苏联联合的历时 9.1d 的 ASTP 飞行中, 曾搭载装在夹层核径迹探测器中的玉米种子, 其中一粒种子胚中央部位受到两个原子序数大于或等于 20, 传能线密度为  $100\sim 150\text{keV}/\mu\text{m}$  的重粒子的轰击, 种出的植株表现明显的体细胞突变: 从第二到第七片叶子上出现大的黄色条纹, 而在地面对照中未发现类似现象。由于所用种子是在第一染色体上具有隐形柠檬白基因的杂合体 ( $LW_1/Lw_1$ ), 胚细胞内  $LW_1$  的变异才会导致叶片上黄/白条纹的出现, 这一形态变异可作为 HZE 粒子对遗传物质作用的依据。用同一类种子, 梅曼彤等也观察到装置于长期辐照装置中, 经空间飞行 69 个月后生长发育异常, 在当代及第二代植株中, 发现了叶片或叶鞘上出现黄/白条纹、植株变矮、叶鞘颜色改变或全生育期株色改变等形态变异。在地面对照中没有发生类似的变化, 且不同容器中放置的种子变异率出现明显差异。由于空间辐射的随机性及不均匀性, 这种置于不同容器中的种子所长出植株其变异程



度有差异,更能说明空间辐射是产生这些变异的主要原因。

空间诱变育种是利用空间环境中的宇宙射线、微重力、高真空等综合因素诱使种子出现某些在地球上难以获得的变异。我国返回式卫星的运行轨道高度在 180~480km,返回式卫星所处空间的真空度在  $10^{-6}\sim 10^{-3}$ Pa,卫星所提供的微重力在  $10^{-6}\sim 10^{-3}$ g。空间辐射粒子能量高、射线成分复杂是空间环境的特点之一,而空间环境中宇宙射线辐照对种子影响分析是空间诱变育种研究的热点之一。返回式卫星回收舱外壳对空间中的宇宙射线有一定的屏蔽作用,但返回式卫星的回收舱内仍然有一定的宇宙射线存在,一般平均剂量为 0.1~0.3mGy/d。根据以往返回式卫星空间诱变育种的经验和对回收舱内宇宙射线的测量,可以确认回收舱内宇宙射线的分布式是不均匀的,卫星朝向宇宙空间的方向射线辐射强度比卫星朝向地面的部位的射线强度高,同时卫星受到粒子的辐射剂量同卫星的轨道高度、卫星所经过的区域以及卫星的姿态指向等因素有关。

## 第二节 空间环境对植物生长、发育与生殖的影响

### 一、空间环境对植物种子萌发的影响

大量的实验研究表明(刘录祥等,2004),空间环境条件影响植物种子的萌发。不同植物或同一植物不同品种对空间飞行的敏感性存在差异。经空间飞行的小麦、大麦、玉米、棉花、向日葵、大豆、黄瓜和番茄等种子在地面发芽活力增加,发芽率明显提高;水稻、谷子、豌豆、青椒、莴苣、烟草等植物种子,其发芽率与地面对照无明显差异;而高粱、西瓜、茄子、萝卜、丝瓜等植物种子经空间飞行后,种子的萌发受到抑制,发芽率降低。

闫文义等(1996)报道了经航天处理后,春小麦种子发芽势提高了 10%~15%,发芽率提高 2%~6%。 $M_1$ 代田间出苗率提高 8.5%,与对照相比达到显著水平。高文远等(1997)根据红花种子经空间飞行后平均发芽率高于地面对照组及过氧化物酶活性高于地面对照组这一结果指出,微重力和辐射对红花种子发芽均有影响,但它们在种子发芽阶段对基因表达影响不十分明显。失重可能与造成过氧化物酶活力升高的重要因素有关。吴岳轩等(1998)指出空间飞行提高番茄种子活力和促进初期生长与其提高种子及体内活性氧防御酶系统的活性、增强种子抗氧化能力和延缓种子衰老有关。

### 二、空间环境对植物生长的影响

空间环境可以促进植物生长,如独行菜在空间条件下形成侧根的数多于对照(赵林妹等,1998)。也有相反的例子,如礼炮-6上的兰花迅速凋谢及礼炮-7上棉花立即死亡(Halstead T W 等,1987)。经过空间飞行的小麦幼苗生长显著高于地面对照组及 $\gamma$ 射线处理组,而高粱种子的幼苗生长则受到强烈抑制,同时出现生育期延迟现象。大豆种子经空间飞行显著影响其生长习性及其成熟期(刘录祥等,2004)。J. Cowles 等报道在空间飞行的松树幼苗的茎平均比对照少 10%~12%的木质素;空间飞行的绿豆幼苗的茎平均比对

照少 25% 的木质素；空间飞行的燕麦幼苗茎的木质素也比对照少。因此我们认为空间环境对植物生长影响是多方面的，是一个复杂的综合因素，必须进行大量的重复实验，还需进一步深入探索。

### 三、空间环境对植物向性的影响

空间环境下由小麦、豌豆种子长成的植株，其空间向性与胚的类型及种子相对于培养基的位置有关，只有在照明条件下，且种子胚向下放置时，才具有正常的空间向性：即茎向空中生长，根向培养基中生长；光可以部分补偿重力的缺乏，培养基中的营养物质却不能补偿重力缺乏（赵林姝等，1998）。Halstead 等（1987）认为，空间环境下光完全可以决定单子叶植物胚芽鞘及茎的生长方向，但对双子叶植物具有局限性。

### 四、空间环境对植物发育的影响

太空环境可导致植物体内细胞分裂降低或抑制等细胞分裂紊乱现象。在失重时，向日葵、橡树及菜豆其根部细胞分裂活性下降（Krikorian A D，1999），莴苣细胞分裂活性降低（Halstead T W 等，1987）。太空百合 2 号染色体部分同源区域缺失（Krikorian A D 等，1999）。另外，飞行材料中出现多核细胞及核型异常等纺锤体紊乱，而染色体损伤率增加或染色体修补能力的降低，以及太空低氧环境对单链 DNA 损伤的修复的负面效应等均可影响细胞有丝分裂速率（Levine H G 等，1990）。Kuang A（1996）认为如补充充分的 CO<sub>2</sub>，可有助于轨道生物发育过程的正常完成。

### 五、空间环境对植物生殖的影响

经空间处理的洋葱鳞茎提早生根，唐菖蒲鳞茎提早开花，而太空拟南芥在子叶期能生长和开花（Musgrave M E 等，1997）。超矮秆小麦营养生长期大为延长，生殖生长受抑。在空间环境中引起植物生殖异常与空气对流以及 CO<sub>2</sub> 浓度有关（Musgrave M E 等，1997）。Miyamoto K 等（1999）发现空间环境中引起植物生殖异常还与生长素的极性运输有关，在模拟微重力条件下，拟南芥种子的生殖能力以及花序轴的生长降低与花序轴生长素的极性运输活性下降具有相关性。

### 六、空间环境对植物抗性的影响

太空环境可改变植物的抗性反应，视植物不同种类而定。例如：李忠娴等（1996）利用卫星搭载小麦种子，经地面种植后发现后代小麦赤霉病发生率明显下降 1%~50%。而太空搭载的大豆感染疫霉菌的根比对照表现出更多疾病症状，且根部组织更适于寄生（Rhba-White M 等，2001）。Jan E L 等（2001）也报道生长在空间飞行条件下的植物更易感染植物病原体。