



紫花苜蓿 空间诱变研究及其应用

任卫波 孔令琪 武自念 / 著



紫花苜蓿

中国农业科学技术出版社

紫花苜蓿 空间诱变研究及其应用

任卫波 孔令琪 武自念 / 著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

紫花苜蓿空间诱变研究及其应用 / 任卫波, 孔令琪, 武自念著. — 北京: 中国农业科学技术出版社, 2017.9

ISBN 978-5116-2899-2

I. ①紫… II. ①任… ②孔… ③武… III. ①紫花苜蓿—诱变育种—研究
IV. ①S541.035.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 311862 号

责任编辑 李冠桥

责任校对 马广洋

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电话 (010) 82109705 (编辑室) (010) 82109704 (发行部)

(010) 82109709 (读者服务部)

传真 (010) 82106625

网址 <http://www.castp.cn>

经销者 各地新华书店

印刷者 北京科信印刷有限公司

开本 710mm × 1 000mm 1/16

印张 11.25

字数 190 千字

版次 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

定价 35.00 元

—— 版权所有 · 侵权必究 ——

资助项目

国家自然科学基金项目“紫花苜蓿空间诱变多分枝突变体遗传分析与基因定位研究”(31201846)；

国家科技支撑计划课题“重点牧区草原‘生产生态生活’配套保障技术及适应性管理模式研究”(2012BAD13B07)；

中国农业科学院科技创新工程草种质资源与育种团队；

中央公益性科研机构基本科研业务费项目（中国农业科学院草原研究所）(1610332011005)。

《紫花苜蓿空间诱变研究及其应用》

著者名单

主 著 任卫波 孔令琪 武自念

参 著 张继泽 解继红 李西良 王照兰 郭慧琴

胡宁宁 臧 辉 常 春 赵海霞 胡海红

前 言

空间诱变是近 20 年来新兴的诱变技术和方法，因其具有变异频率高、变异幅度大、且可获得地面难以获得的突变体等特点，并在重要作物和经济植物育种中得到广泛应用，展现出广阔的发展前景。

我国的紫花苜蓿空间诱变研究工作始于 1994 年，在国家科技支撑计划、国家自然科学基金、中央公益性科研机构基本科研业务费、中国农业科学院科技创新工程、内蒙古自然科学基金等各类项目的大力支持下，取得了长足的发展，并在搭载苜蓿材料选择、诱变方法、诱变机理、有益突变体鉴定筛选及新品种选育等方面成效显著。本书旨在系统梳理我国在紫花苜蓿空间诱变方面取得的成就，总结前期经验和不足，分析未来的发展趋势，对今后从事紫花苜蓿空间诱变研究及应用工作的相关人员具有参考价值。

全书共 8 章。第一章介绍了空间诱变的主要因素、诱变的基本特点及其在植物育种中的应用情况。第二章围绕紫花苜蓿种子种皮结构、生化组分、种子萌发能力及其活力等方面，详细介绍了空间诱变对紫花苜蓿种子的影响。第三章从紫花苜蓿植株个体株高、茎粗、分枝数、生物量、营养品质、抗逆性等入手，阐述了空间诱变对紫花苜蓿重要农艺性状的影响及其遗传规律。第四、第五、第六章分别从细胞学效应、生理生化特征、遗传多样性及表观遗传特征等 4 个层面系统阐释了紫花苜蓿空间诱变变异产生的机理机制。第七章

介绍了空间诱变在紫花苜蓿新品种选育中的应用情况。第八章分析了当前紫花苜蓿空间诱变研究存在的关键问题，并对该领域未来的研究热点和趋势进行预测分析。

本书在撰写过程中参阅了大量的文献资料，并选用了部分图表和结果，在此向相关作者致以诚挚的谢意。

鉴于成书时间比较仓促，加之作者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，望各位读者批评指正并提出宝贵意见。

任卫波

2016年12月12日

目 录

第一章 空间诱变的基本原理与特点·····	1
第一节 空间诱变的主要因素 ·····	1
第二节 空间诱变的机理 ·····	4
第三节 空间诱变的主要特点 ·····	10
第四节 空间诱变在植物育种上的应用 ·····	11
参考文献 ·····	15
第二章 空间诱变对紫花苜蓿种子的影响·····	21
第一节 空间诱变对紫花苜蓿种子种皮结构的影响 ·····	21
第二节 空间诱变对苜蓿种子萌发及其活力的影响 ·····	24
第三节 空间诱变对紫花苜蓿种子化学成分的影响 ·····	37
参考文献 ·····	39
第三章 空间诱变对苜蓿表型性状的影响·····	42
第一节 空间诱变对苜蓿产草量相关性状的影响 ·····	42
第二节 空间诱变对苜蓿品质性状的影响 ·····	47
第三节 空间诱变对苜蓿抗逆性状的影响 ·····	51
第四节 空间诱变变异性状的遗传规律 ·····	61
参考文献 ·····	64

第四章 紫花苜蓿空间诱变的细胞学效应·····	67
第一节 空间诱变对紫花苜蓿染色体行为的影响 ·····	67
第二节 空间诱变对紫花苜蓿细胞结构的影响 ·····	78
参考文献 ·····	87
第五章 空间诱变对紫花苜蓿生理生化特性的影响·····	90
第一节 空间诱变对紫花苜蓿同工酶的影响 ·····	90
第二节 空间诱变对紫花苜蓿生理特性的影响 ·····	98
第三节 空间诱变对紫花苜蓿呼吸和光合特性的影响 ·····	110
参考文献 ·····	114
第六章 紫花苜蓿空间诱变分子机理研究·····	116
第一节 空间诱变对紫花苜蓿遗传结构的影响 ·····	116
第二节 空间诱变对紫花苜蓿基因位点多态性的影响 ·····	122
第三节 紫花苜蓿空间诱变变异基因定位与功能分析 ·····	129
第四节 紫花苜蓿空间诱变变异的表观遗传学分析 ·····	135
参考文献 ·····	142
第七章 空间诱变在苜蓿育种中的应用·····	146
第一节 空间诱变苜蓿变异材料的筛选与鉴定 ·····	146
第二节 紫花苜蓿新品种选育 ·····	152
参考文献 ·····	155
第八章 紫花苜蓿空间诱变的存在问题与发展趋势·····	156
第一节 紫花苜蓿空间诱变的存在问题 ·····	157
第二节 紫花苜蓿空间诱变的发展趋势 ·····	162

第一章 空间诱变的基本原理与特点

第一节 空间诱变的主要因素

近地空间环境与地面环境差异显著，其具有微重力、高真空、弱磁场和强烈空间辐射等特点。以上种种特殊条件对处于该环境中的生物材料有复杂的诱变作用。因此，“航天育种”就是基于这种原理，利用多种多样的返回式空间飞行器（包括卫星、航天舱及航天飞机等）将生物种质材料送入空间环境，通过空间环境中的物理因素诱变，使得搭载的生物材料产生变异，返回后经过多年发育，从而获得新品种。现有研究表明，航天育种具有许多特殊优势，包括诱变变异频率高、幅度大、优质性状较快稳定等，而且某些变异材料拥有地面生物材料不具备的优良性状。因此，我国越来越重视对于航天育种技术的研究工作，为农业产业发展提供了重要的契机，在和平利用空间技术和资源方面意义重大。

一、高真空

高真空指植物种子或植物组织等搭载于高空气球或返回式卫星，在缺氧情况下进行近地空间飞行处理，由于受空间各种物理因素影响，植物处在特殊环境条件下（高空和缺氧等）产生突变后，再返回地面种植，从中选育出特异种质或育成新品种。

二、空间辐射

地球俘获带由地球磁场捕获周围空间的高能粒子产生。高能粒子的来源主要有银河宇宙射线（GCR）（太阳外突发性事件产生）、太阳粒子（SPE）（太阳爆发产生）。俘获带主要包括内区和外层带，分别主要由质子和电子组成；其中质子及重离子占据 GCR 总量 98%，电子和正电子只占 2%，重离子中，

主要是质子(87%),其次为氯离子(12%)和其他重离子(1%)。空间辐射和空间粒子的相互作用可引发多种生物效应,低量和中量的空间辐射引起的原始损伤集中于DNA分子,其损伤形成较为复杂,射线能量作用于生物体,引起生物体原子和分子的激发与电离,该过程为 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ s。局部能量的作用可形成某些新化学物质,电离作用形成的自由基,通过与生物体的相关作用具有改变某些分子结构的功能。空间辐射引起的其他类型DNA损伤还包括碱基变化、碱基脱落、单键断裂、两键间氢键断裂、双链断裂、螺旋内交联、与其他蛋白质和DNA分子交联,另外辐射造成的DNA链断裂可导致染色体结构变化(王乃彦,2002)。空间重粒子高能量的特点,使其具有比X射线和 γ 射线更强的相对生物学效应。生物体被单个高能粒子穿过时,可蓄积大量能量,直接造成损伤,如果该粒子停留在体内,导致的损伤加剧(樊秋玲等,2002)。这种损伤可进一步形成强烈的诱变效应,导致细胞死亡和突变。研究表明,空间辐射导致的损伤主要影响生物系统遗传物质,可造成突变、细胞失活、发育异常、染色体畸变和肿瘤形成等(Horneck,1992)。Nevzgodina(1982)等和Maksimova(1985)等,发现卫星搭载飞行中的莴苣(*Lactuca dolichophylla* Kitam.)种子被高能粒子击中后其染色体畸变率增加数倍。Chatterjee(1992)等证明,空间辐射造成的细胞内DNA双链断裂及细胞膜结构改变的效率较高,特别是非重接性断裂。

三、微重力

宇宙空间的重力仅为地球的百万分之一到十万分之一,即 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ g,由于地球重力场的存在,地面生长的植物均具有向重性,当植物处于空间环境时,重力大大降低,使得植物失去了在地面时的向地性生长反应,导致其对重力的感受、转换、传输、反应发生变化,引起不同的效应(直接效应和间接效应)(蒋兴村,1996)。多数高等植物利用特殊的重力敏感器官识别重力矢量的改变,做出相应系统反应,诱发信号,调节生理功能,该过程为微重力的直接效应(王雁等,2002)。微重力信号作用于植物感受器官,通过质膜调节胞内 Ca^{2+} 水平及磷脂/蛋白质的排列顺序等,引起多种酶类的活性变化(如ATP酶、蛋白质激酶、NAD氧化还原酶等),从而作用于细胞分裂期微管的组装与去组装、染色体移动、微丝的构建、光系统的激活,影响植物体内的诸多生理生化过程(如细胞分裂、细胞运动、细胞间信息传递、光合作用和生长发育

等), 导致细胞遗传进程的改变(包括细胞核酶变、分裂紊乱、浓缩的染色体增加、核小体数目减少等)(朱壬葆, 1987)。另外, 生物体细胞形态受微重力影响形态发生改变, 使其对诱变的敏感性增强, 加剧了染色体 DNA 损伤和变异的发生率(蒋兴村, 1996)。Anikeeva (1983) 等也认为微重力可干扰 DNA 损伤修复系统, 影响 DNA 断链修复, 提高变异率。

四、复合效应

空间辐射中的高能重离子以及微重力环境均可引起 DNA 双链的损伤和修复障碍, 二者的协同作用造成植物种子出现强烈的突变现象。另外, 空间环境的一些其他特征, 如大气结构、气温、超真空、压力和地磁强度等。以上因素与微重力和空间辐射综合引起生物体内遗传物质的结构发生变化而产生变异。

五、转座子活化

转座子是一类位置可移动遗传因子, 能在宿主基因组中变更插入位点, 而变更插入位点的过程被称为转座(杨欢欢等, 2010)。采用基因组序列测定发现, 植物中具有大量转座子和逆转座子序列, 这些转座子在太空环境中可被激活(樊秋玲等, 2002), 其活化后通过移位、插入和丢失, 引起基因和染色体的变异。比如, 某操纵子的前半部分插入转座子, 就可能形成极性突变, 致使后半部分基因表达失活。宿主 DNA 原点附近如发生复制性转座, 经常造成转座子两个拷贝之间的同源重组, 两个正向重复转座子发生同源重组, 导致宿主染色体 DNA 缺失; 如果两个反向重复转座间发生重组, 则引起染色体 DNA 倒位(朱玉贤等, 1997)。该发现为空间诱变机理研究增添了新内容, 使得空间诱变育种机理的研究进程大大提速(密士军等, 2002)。

六、弱地磁生物学效应

地球生物不仅受重力作用, 还受到生活环境中永久性磁场的影响。磁生物学证明, 植物除具有自己的磁场外, 体内还存在电位和电流。弱磁场是空间环境的重要组成部分之一, 植物体内水分子在电场和磁场作用下发生变化, 直接影响植物的生理生化活动, 如呼吸强度加强、酶含量增加、细胞有丝分裂指数上升、侧根和不定根形成受到刺激等(任卫波等, 2006)。有研究证明, 小麦(*Triticum aestivum* L.) 种子萌发和幼苗生长受零磁空间处理明显受到抑制, 而

对小麦花药愈伤组织诱导过程中进行周期性零磁空间处理后,愈伤组织和绿苗获得率有效增加(刘录祥,2002)。水稻干种子经过零磁空间处理后,出现以下结果:当代细胞染色体畸变频率提高,畸变类型以染色体桥和微核为代表;对苗期生长的生物损伤效应不明显,但促进了当代发芽率、成苗率、苗高和分蘖;其 SP_2 代变异类型丰富,早熟类型发现相对较高的突变频率(虞秋成,2002)。室温下利用弱磁空间处理紫花苜蓿(*Medicago sativa*)品种龙牧803风干种子6个月,经过系统选择最终培育出紫花苜蓿新品种农菁1号(张月学,2006)。若干大(小)麦种子受零磁空间处理后发现,大(小)麦种子的发芽势和出苗率均显著提高,其中某些材料的生育期及若干农艺性状均出现大幅变异(李忠娴等,2003)。通过零磁场空间处理结合人工及试管离体授粉回交转育,虞秋成(2006)等获得了水稻(*Oryza.sativa* L.)新型不育系。虽然上述结果是地面模拟条件下取得,但充分证明,空间环境的弱磁场同样是诱发植物遗传性状变异的因素之一。

第二节 空间诱变的机理

与地面环境不同,空间环境许多特征发生变化,如空间辐射、重力、磁场等,对植物的生长、发育和表观遗传性状等产生不同程度的影响,具体表现在显微结构、亚显微结构及分子水平都受到了影响。

一、形态学变异

目前研究表明,通过空间处理后植物体的营养器官和生殖器官的形态均出现显著变异。其中营养器官变异包括:扁豆(*Dunbaria villosa*)经飞行处理25 d后发现,虽然根的生长与对照无显著差别,但下胚轴生长比对照增加15%;豌豆(*Pisum satium*)空间处理194 d后,根的生长速度出现不同程度减慢(1%~39%);与地面对照相比,和平号空间站生长的小麦(107 d)直立,株高及节间数显著降低(石铁松等,2003);黄瓜(*Cucumis sativus*)种子经空间处理后,其后代叶子出现明显展开度差异(李社荣等,1998);玉米(*Zea mays* L.)叶片发生较宽的黄色条斑变异,小麦发现超绿突变体植株(虞秋成等,2001);草地早熟禾(*Poa pratensis*)的平均叶片数增多(韩蕾等,2004)。

生殖器官变异包括：空间处理后，单瓣花的白莲（*Nelumbo nucifera*）变为半重瓣花或重瓣花（刘光亮等，1996）；露地菊花（*Dendranthema morifolium*）出现的花径变小，明显改善了其观赏价值（张枝芳等，1996）。而穗部的变异表现为单株有效穗数、每穗粒数、穗长等性状以正向变异为主且呈现正态分布，对选择十分有利。另外还出现了小麦的无芒到有芒及大豆（*Glycine max*）的亚有限结荚习性到有限结荚习性变异（李社荣等，1998）。毛百合（*Lilium dauricum*）经空间处理后，其千粒重增加（杨利平等，1999），粒型变异包括小粒到大粒，长粒到短粒和落粒性由难到易等（李社荣等，1998）。水稻经空间处理后，其后代在穗粒数、穗长、分蘖数、粒形和千粒重等发生了变异（李源祥，1998）。李金国等（2000）的研究表明，番茄（*Lycopersicon esculentum* Miller）SP1 代的形态学变异表现包括幼苗生长旺盛、主根增长、花期提前、株高增加和抗病性增强。大麦空间处理后的变异表现在抗寒性好、分蘖力强、叶片深绿青秀、株型紧凑、苗期长势壮、成穗率高、综合抗病性较优及抗灾能力较强（雷振生等，2004）。利用空间育种获得的芝麻（*Sesamum indicum* Linn.）新品种“航芝一号”拥有高产、优质、抗病、适应性广的优良品质，具体表现为生长势强、高大、粒大色白商品性好（张秀荣等，2003）。

二、生长发育影响

Rasmussen（1994）的研究证明，原生质体的细胞壁在微重力状态下合成延缓，同时出现细胞聚体中细胞数量减少现象。还有研究表明，在微重力状态下，原生质体再生过程中纤维素合成速度降低，而果胶酶合成速度升高和单糖合成多糖速度也有微小变化，说明重力因素作用于细胞壁合成并进而影响植株发育。尽管有研究发现在微重力条件下与对照相比，根的长度无明显变化（Legue 等，1992）；但也有研究指出，在微重力状态下植物愈伤组织的生长发生改变，如豌豆幼苗，在微重力条件下其外植体的生物量相对愈伤组织水浓度和生长指数均比对照低。

某些植物材料经空间搭载处理后，其物候期随之发生改变，主要包括开花期和生育期的变化。空间处理后绿菜花（*Brassica oleracea* ver. *italica*），其抽薹开花比对照提前（李金国等，1999）；水稻品种“包选 2 号”经卫星搭载后，在 SP2 代获得了生育期大大缩短（比对照缩短 18 d 以上）的早熟突变体，有望从中选育出早熟水稻品种（蒋兴村等，1991）；水稻恢复系“明恢 63”干

种子经返回式卫星搭载后,从 SP4 代中选育出 4 个早熟突变体系(比对照缩短 11~12 d)(李源祥等,1995);大豆种子经高空气球搭载后,从选育的后代中获得了极早熟和极晚熟的变异植株(贾淑芹等,1995)。

三、细胞学效应变化

许多研究证明,细胞结构在高空条件下处于被胁迫状态,出现不适应性和异常变化。

模拟微重力环境导致植物处于非正常条件下生长,出现植物逆境条件的变化特点尤其是细胞壁和细胞器的变化。由于长期处于重力条件作用,植物已经形成一系列生长发育规律,而微重力对植物的胁迫作用造成植物细胞出现各种不适应性,有些甚至表现细胞迅速衰老。有研究证明,许多植物在经过空间处理后,其叶片细胞出现变薄、凹凸不平、细胞大小不等、表面不规则,导致细胞间接触面减少,部分细胞退化消失,仅留残壁。刘敏等对马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)和香石竹(*Dianthus caryophyllus*)在微重力条件下进行研究,实验结果发现叶绿体片层结构扭曲、断裂、线粒体边缘模糊,内含物溢出以及嵴不明显;细胞壁收缩,呈现多角形式、折皱形。这说明细胞壁及细胞器在重力条件下形成了一定模式,一旦失去了重力,细胞壁及细胞内含物的排列顺序也受到了干扰,呈现出无序的状态。

细胞水平的植物空间诱变效应主要是染色体变异。空间诱发突变是诱变剂通过击中细胞中某条染色体上的一个特殊位点或片段而引发的变异。植物空间诱变效应研究中常用细胞染色体畸变类型及频率和微核细胞率作为衡量诱变敏感性的指标。许多研究表明,经空间飞行后,植物叶片表现出细胞大小不等、表面积不规则和部分细胞退化消失,细胞壁变薄且凹凸不平变化(李社荣等,1998);空间条件使黄瓜、茄子(*Solanum melongena*)和豌豆种子细胞膜的透性增加(苗德全等,1989);一些植物的叶绿体基质解体或被破坏,线粒体膨胀,基粒堆膜皱缩,染色质浓缩;空间条件影响内质网的完整性,改变内质网在细胞中的排列与分布(刘录祥等,1997);另外还发现多核仁细胞核和粗糙内质网与核糖体消失的变异细胞(刘光亮等,1996)。

经过空间飞行后的植物体,细胞有丝分裂过程中 G1 期延长,有丝分裂指数有不同程度的提高和降低(赵林妹等,1998);染色体变异中常见的是染色体结构和数量的变异,常见染色体结构变异有染色体桥、断片和微核、染色体

倒位和易位等变化。卫星搭载过的大麦 (*Hordeum vulgare*)、小麦种子当代可诱导出比地面更多的染色体桥 (李金国等, 1996); 绿菜花出现染色体倒位和易位等变化 (李金国等, 1994)。经空间诱变后的植物体细胞有丝分裂中期不沿赤道板排列, 后期不分离或不均等分离到两极。染色体畸变多发生在染色体桥、断片、微核, 并可产生超倍体、亚倍体等数目的改变。刘中申 (1998) 等对中药黄芪 (*Leguminosae*) 的普通与航天种子进行染色体形态的对比实验, 发现染色体类型发生了畸变, 出现了染色体裂片、染色体桥、落后染色体、先行染色体。赵燕 (2004)、汤泽生 (2004) 等对卫星搭载处理后的凤仙花 (*Impatiens balsamina*) 小孢子母细胞减数分裂的研究表明, 航天搭载的凤仙花种子在第一代 (SP1) 植物的小孢子母细胞减数分裂中出现了染色体桥、落后染色体和分散染色体; 四分孢子时期易出现多分孢子及四分孢子不分离等现象, 而对照组则很难发现染色体畸变和小孢子异常现象。

染色体数目的变化有超倍体、亚倍体数目的改变。西华师范大学对神舟四号搭载的 100 多粒凤仙花种子进行培育, 再从这些发育良好的植物中选取了长势良好的 20 株开展研究时, 发现其中一株凤仙花在减数分裂中发生了不规则变异, 其染色体数由正常的 7 对变成不规则数量, 最少的只有 1 对, 最多的达到 28 对。王彩莲 (1996) 用 5 个水稻品种的干种子搭载返回式卫星做试验材料, 研究结果表明空间诱变细胞学效应有它自身的特点, 空间环境既对水稻根尖细胞染色体具有一定的致畸作用, 同时又较明显地促进根尖细胞有丝分裂活动。许多植物种子经空间飞行后在地面发芽, 其染色体畸变频率有较大幅度的增加, 表明遗传物质的载体受到损伤。

中国科学院遗传研究所和黑龙江大学于 1987 年和 1994 年用卫星搭载绿菜花, 使搭载后的绿菜花抽穗开花提前, 观察到花粉母细胞减数分裂的终变期的染色体数目不均等分离; 有 $n=6.7$ 及 $n=11$ (正常的染色体数为 $n=9$), 并出现倒位和易位染色体; 在花粉母细胞减数分裂后期和末期出现落后染色体 (蒋兴村, 1996)。周有耀等于 1988 年和 1990 年通过返地卫星, 分别搭载了棉花 (*Gossypium arboreum*) 脱绒的干种子, 在外层空间飞行 8 d 返地后进行了细胞学观察, 发现通过空间诱变的材料叶肉细胞排列明显比对照疏松, 诱变材料 SP1 的栅栏细胞形状明显细长, 叶绿体数量少, 细胞间隙大, 海绵组织细胞比对照更不规则; 压片观察表明搭载种子后代的染色体显得细弱。顾瑞琦 (1989) 等通过首次返地卫星搭载小麦干种子进行了细胞学研究, 结果发现空

间飞行的小麦根尖的畸变细胞数高于地面对照组；飞行前用 5 mmol/L 半胱氨酸处理小麦种子，能促进小麦生长，减少畸变细胞数。

四、生理生化特性

空间条件对植物发芽特性的影响具有种的特异性，同一植物的不同品种对飞行的敏感性也存在差异。有些植物的种子如小麦、大麦、玉米、大豆和黄瓜经过空间飞行后活力增加，发芽率明显提高；水稻、谷子（*Setaria italica*）、豌豆和青椒（*Capsicum frutescens*）无明显差异；而高粱（*Sorghum saccharatum*）、西瓜（*Citrullus lanatus*）、茄子和丝瓜（*Luffacyl indrica*）发芽率明显降低（刘录祥，2001）。高文远（1997）等根据红花（*Carthamus tinctorius*）种子经空间飞行后平均发芽率及过氧化物酶活性均高于地面对照组。这一结果指出，微重力和辐射对红花种子发芽均有影响；吴岳轩（1998）等指出空间飞行可提高番茄种子活力和促进初期生长，这与其提高种子及幼苗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。1994 年用同一卫星搭载的辣椒（*Capsicum annuum*）品种 KL₉₄₋₁~KL₉₄₋₆，返回后发芽试验表明，KL₉₄₋₁~KL₉₄₋₅ 的发芽率均比对照高，而 KL₉₄₋₆ 的发芽率则比对照低（郭亚华等，2003）。

经过空间搭载过的植物材料，其同工酶的谱带形式也会发生变化。小麦、大麦胚乳的过氧化物同工酶和酯酶同工酶的谱带比地面对照相应减少（李金国等，1996）；而番茄（*Lycopersicon esculentum*）、青椒酯酶同工酶的谱带比地面对照增加（李金国等，1999）。郭亚华（2003）等研究了卫星搭载过的“龙椒 2 号”SP1 代幼苗和突变系 87-2 果实及叶片同工酶的变异，发现 SP1 代幼苗过氧化物同工酶比对照增加了 2 条谱带；87-2 SP9 代叶片过氧化物同工酶比对照少了 2 条带，而增加了 1 条新带；其果实的过氧化物同工酶比对照少了 2 条带，而增加了 5 条新带。韩东（1996）等对空间处理 3 株同工酶有变异的番茄植株群体进行分子生物学分析，结果表明，在 50 个供试引物中，有 18 个扩增出 DNA 带，共有 166 条，其大小在 200~2 000 bp 之间，与地面对照比，空间处理的植株的 DNA 在 5 个引物出现差异，其突变的程度分别为 4.5%、1.3%、3.2%（韩东等，1996）。

空间条件也会影响植物的光合特性和叶绿素含量。荧光动力学测定表明，空间条件可使叶绿体的光合作用光系统 II 活性降低。经空间飞行后黄瓜和