

近地空间飞行器搭载微生物及植物的研究进展

郭宇鹏 向青 综述 唐劲天* 杨鸿生 审校

[关键词] 宇宙飞行;失重;宇宙辐射;诱变;植物;细菌;综述

中图分类号:R85 文献标识码:A 文章编号:1006-9771(2004)11-0654-03

[本文著录格式] 郭宇鹏,向青,唐劲天,等.近地空间飞行器搭载微生物及植物的研究进展[J].中国康复理论与实践,2004,10(11):654-656.

人类研究和探索外层空间的愿望自古有之。随着空间技术的进步,人类已经进入外层空间,并开始在那里进行科学研究。在地球稠密大气层(大约距离地球表面 100 km)之外的外层空间,有着高真空、长期微重力及宇宙射线辐射和高能重粒子辐射等地球上没有的环境因素,为进行生命科学的研究提供了独特的条件。空间飞行器搭载实验是生物空间效应研究的重要手段。通过研究空间条件下各种生物体的多种变化,可以进一步揭示生命的奥秘,进而为人类征服空间服务。迄今为止,绝大部分航天搭载实验是在较低的地球轨道(低于 1 000 km)进行的。在近地轨道飞行时,由于地磁场的屏蔽,高能重粒子辐射强度大为减小,真空度也远不及星际空间高,但仍远高于地面水平。近地轨道长期的微重力和多种辐射的共同作用能对生物体产生多方面的影响。下面就从微生物和植物两个方面叙述空间搭载实验的研究进展。

1 微生物

空间搭载微生物在技术上较容易实现,这方面的实验开始较早,进行的次数也较多。早在 20 世纪 60 年代,美国科学家为研究微生物对空间环境的抵抗力就进行了一系列的实验。他们将多种微生物直接暴露于高度在 60 - 460 km 的空间环境,发现一些微生物存活可以超过 17 h,隔离非贯穿性辐射后可全部存活^[1]。

1.1 病毒 空间搭载病毒的研究较少。有学者进行了地面和空间环境下的多瘤病毒衣壳蛋白的自组装实验^[2],让组成病毒衣壳的 3 种蛋白在不同条件下自组装。他们发现,地面实验形成的壳体与病毒相比大小不同,形状相似,能够形成类似病毒形态的 20 面体衣壳;而空间实验组形成与原病毒大小类似但形状完全不同的衣壳。大肠杆菌噬菌体 T1 完全暴露于近地空间的紫外线辐射和真空环境,死亡率比地面照射组高 100 倍;T7 噬菌体混悬液暴露于宇宙辐射后的失活率与地面对照相比也显著增大^[3-4]。还有研究表明,T4Br⁺噬菌体经空间搭载有明显损伤,重粒子在其中起主要作用,高能强子和高能离子对噬菌体的生物学效应高于 γ 射线^[5-6]。

1.2 细菌 大肠杆菌是基因工程中常用的受体细胞,空间搭载细菌的实验很多都是以大肠杆菌为实验对象。大肠杆菌在空间的生长迟滞期变短,对数生长期延长,同等条件下细菌数比地面对照多 25%,而且和地面对照消耗相同量的葡萄糖^[7-8],菌体终密度达到地面对照的近 2 倍^[9]。有人做了重力条件下的摇动培养实验,发现大肠杆菌摇动培养比静止培养产量高 43%^[10],提示液体失重状态(无沉淀效应)形成的特殊的营养、

代谢废物运输方式是空间搭载培养效率提高的原因^[11]。还有研究显示,经小生物舱搭载的大肠杆菌 A3 菌株主要受空间辐射的影响,产生 LacI⁻突变体的频率是地面对照的 67 倍;小铅罐中搭载的大肠杆菌 CSH108 菌株主要受微重力的影响,产生 Arg⁺的回复突变频率是地面对照的 10 倍,而且回复体中无义抑制基因的突变频率明显增加,提示宇宙辐射可以作为得到突变菌株的工具^[12-13]。也有部分空间搭载培养研究没有发现大肠杆菌性状的改变。

空间环境对质粒 pZI89 DNA 和大肠杆菌染色体 DNA 突变率无影响,推测卫星搭载舱内的宇宙射线并不造成有统计学意义的 DNA 损伤^[14-15]。产生超氧化物歧化酶(SOD)的枯草芽孢杆菌 314 菌株经过返回式卫星搭载之后,生长速度加快,酶活性提高。搭载后的菌株 SOD 产量(1 260 U/g 细胞)是出发时菌株产量(560 U/g 细胞)的 2 倍多^[16]。趋磁性细菌在微重力下培养失去对磁场的趋向能力,经过观察是因为细胞完整性的缺失引起的,菌体内由铁磁化物形成的纳米磁性颗粒——磁小体不能在微重力下形成^[17]。

耐辐射异常球菌(*Deinococcus radiodurans*)能在 1.5×10^4 Gy 离子放射线下生存,而 10 Gy 就已经是其他生物的致死剂量了。有学者将耐辐射异常球菌在飞行前被给予 2 - 12 kGy ⁶⁰Co γ 射线辐射,实验发现,在空间飞行中进行 DNA 修复的细菌生存率与地面对照相比显著提高,表明在微重力条件下这种细菌对辐射损伤的修复作用显著增强^[18]。

空间环境能增加数种细菌在液体培养基中对抗生素的抵抗力,似乎与细菌胞壁结构改变有关。这种对抗生素的抗药性在返回地球后很快消失,而在固体培养基中庆大霉素的效力不变^[19-20]。搭载双歧杆菌筛选出 1 株具有生长速度快,对高温、过氧化氢、乙醇耐受性明显提高,无耐药性质粒,对动物无毒副作用等良好生产性的空间变异菌株 Space BbNC-8^[21]。乳酸杆菌广泛用于工业、食品、医药、兽医等领域,李芳等通过搭载 LG-1 菌株发现,菌株死亡数高于对照菌 100 倍以上,但存活的菌株,有一个明显延长的生存期,并筛选出 2 株乳糖、半乳糖发酵缺陷株^[22]。这表明,空间环境不利于乳酸杆菌生存,且容易导致其性状变异,这也为筛选出有重要应用价值的生产菌株提供了可能。具有有机废水净化功能的紫色非硫光合细菌经卫星搭载后,其存活力、除有机废水中的 BOD₅ 和水中的亚硝酸盐能力以及对酚的降解、合成染料的脱色作用均有提高,对药物的遗传抗性亦基本稳定^[23]。利用空间诱变的方法,使微生物性状产生变异,进而筛选出优良菌株是切实可行的。

1.3 真菌(酵母和霉菌) 啤酒酵母经空间飞行后随机观察的芽痕比地面对照有明显提高,细胞周期、超微结构、细胞体积、酒精产量和葡萄糖消耗无明显变化^[24]。酿酒酵母经 40 d 空间飞行后,部分样品核糖体蛋白 L 基因(*rpsL*)的突变率比地面对照高 2 - 3 倍,核苷酸序列分析表明,在点突变率上无明显差异,但是空间组有更大的或全部的 *rpsL* 序列缺失,提示空间辐射包含更高的传能线密度(LET)辐射,导致染色体的缺失突变^[25]。经过空间飞行后,脉孢菌(*Neurospora crassa*)的代谢率

基金项目:国家科技部“973”前期[2003(CA04200)];国家自然科学基金(No.30371324)。

作者单位:1. 650032 云南昆明市,昆明医学院第一附属医院胸外科(郭宇鹏、杨鸿生);2. 100029 北京市,中日友好医院临床医学研究所生化-分子生物研究室(向青、唐劲天)。作者简介:郭宇鹏(1979-),男,河南洛阳市人,硕士研究生,主要研究方向:肿瘤治疗新方法、新技术。通讯作者:唐劲天。

增加,细胞节律正常,但细胞周期延长。

骆爱群等通过空间诱变使 *NIKKO* 霉素产生菌的抗生素效价提高约 13% - 18%^[26]。空间飞行搭载红曲霉菌获得高产菌株,突变性状稳定^[27]。放线菌属中的庆大霉素产生菌——棘孢小单孢菌(*M. Echinopora*)经搭载后,菌株生长周期发生变异,出现生长周期缩短或延长的超亲类型,经自然分离得到一些稳定的生长周期短的突变体;菌株产抗生素能力变异幅度较大,平均水平提高,高产菌株数增加,产量正突变率为 27.27%,负突变率不高;在卫星搭载后的菌株中,补筛选时最优菌株比对照增产 27.55%,复筛最优菌株效价比对照提高 18%,与对照相比有非常显著性差异;菌株发酵液由棕红色浅化为黄色,在产品脱色时可简化工艺和降低成本;卫星搭载前后的理化处理和卫星搭载在诱变效果上有协同作用^[28]。也有报道,酵母菌经 152 h 的微重力和空间辐射后,与地面对照相比,诱导和修复 DNA 双链断裂的水平无明显差异,可以认为微重力不能提高酵母菌的突变频率,也不影响酵母 DNA 的复制和修复^[29-30]。

2 植物

早在 20 世纪 60 年代初期,前苏联学者就研究和报道了空间飞行条件对植物种子的影响。此后,许多实验研究表明,当植物种子经空间搭载后,其形态、生理、遗传特性等均会发生不同程度的变化。这种变化是多向性的,正向的可促进植物生长、发育、丰产、增强抗病性及抗倒伏等。植物空间生物学试验不仅可以探索空间环境对生物体影响的机理,在植物诱变育种方面也有广阔的应用价值。1987 年以来,我国科研工作者将 60 多种植物,1 000 多个品种的植物种子搭载于返回式卫星和高空气球,不但探索了空间环境影响植物生长发育的规律,而且富有独创性利用空间技术进行农作物遗传育种,已培育出多种作物的新品种供生产利用,获得良好的社会效益,表明空间技术是选育农作物新品种有效途径之一。

2.1 孢子植物 20 世纪 60 年代末,前苏联学者对几个品系的小球藻(*LARG-1*, *LARG-3* 等)进行空间搭载后没有发现可见的突变发生频率变化。随后,又有前苏联学者报道,发现了小球藻搭载后的生存率比地面对照低,发育延迟,突变率增加^[31-32]。中国学者通过空间搭载,分离出高固氮酶活性的稻田鱼腥藻返地克隆株,进行了回复再搭载及返地样品的单克隆实验,发现空间飞行环境能导致该藻株再次出现性状分离现象,部分单克隆株仍保持高固氮酶活性,而另一部分单克隆株则回复到原始出发株的固氮酶活性水平,并发现高固氮酶活性的性状是可以遗传的;进行 DNA 进行多态性研究发现,在扩增出的 500 多条带中,有 4 条带在和原始出发株之间表现出了多态性^[33]。空间搭载的蕨类植物配子体生长极性是随机的,与地面对照相比,基因型表达改变了 5%^[34]。表明空间飞行环境中存在导致藻类和蕨类遗传特性变化的环境因素。

2.2 种子植物 经空间飞行的药用植物红花的种子平均发芽率高于地面对照组,过氧化物酶活性也高于地面对照组;与地面材料的同工酶和蛋白质电泳图谱显示,绝大多数谱带一致,但在种子发芽阶段略有变化;各重粒子贯穿组的过氧化物酶活性普遍高于地面对照组,飞行失重组(未被空间重粒子击中)的过氧化物酶活性略低于地面对照组;飞行失重组的过氧化物酶和蛋白质电泳图谱与地面对照组接近,贯穿各组的过氧化物酶和蛋白质的电泳图谱则与地面对照组差异较大,失重组和 1 次以下贯穿组的蛋白质含量高于地面对照组,而 2 - 3 次贯穿组的蛋白质含量则低于地面对照组。对红花搭载实验的结果可总结为:空间环境的微重力主要影响植物的生理状况,而重粒子则不仅影响植物的生理状况,还影响植物的遗传基因^[35-36]。

在药用植物藿香种子搭载返回式卫星的试验中,经高能重离子贯穿辐射的种子发芽率低,但发芽时间提前 2 d,出现第一片真叶的时间提前 4 - 5 d,植株长势明显增快。染色体核型出现变异,挥发油出油率略有增加,且空间环境对藿香叶绿体的超微结构有一定的影响^[37-38]。微重力能引起曼陀罗一定程度

的基因变异,微重力和高能离子辐射的复合效应大于微重力本身对植物的影响^[39]。

有人先将红豆草种子搭载于返回式卫星,经田间繁殖得后代种子,然后将种子在 1.5% NaCl 上筛选,并在该盐浓度下诱导愈伤组织和筛选,在无盐培养基上恢复生长后,再在 1.2% NaCl 上筛选得到了红豆草耐盐变异系^[40]。有实验表明,空间搭载番茄种子发芽早于地面对照,且有更高的生长速度。通过空间诱变,李金国等培育出番茄新品系 TF873^[41-42]。法国学者研究发现,经过长期搭载的水稻种子生长率高于地面对照^[43]。

1992 年以来,我国多次利用返回式卫星搭载水稻干种子,返地种植,考察后代的性状表现及遗传变异情况,选择优良的突变体,定向培育成新品种,供生产应用。李源祥等研究搭载后的水稻种子发现,经空间飞行后的 SP1 代主要性状与地面对照组 CK 差异不明显,而 SP2 代群体单株间性状出现强烈的广谱分离,各种性状变异均向有利和不利两相反方向突变,其中有些优异性状可稳定地遗传下去,经 SP3 代传至 SP4 代,开始出现稳定株系,SP5 代、SP6 代即可进入品系比较试验、品种区域试验或示范种植推广,从中筛选出新的优良品系,培育出品系优良,性状稳定的赣早籼 47 号^[44-45]。为了探索水稻空间诱变的本质,易继财等选出由空间诱变得到的 6 个突变体及 2 个优良品系,选用了 130 个 10-mer 随机扩增多态性 DNA(RAPD)引物和 17 对扩增片段长度多态性(AFLP)引物组合,分别对其基因组 DNA 进行多态性位点扫描分析,两种方法的结果均显示,不同的突变体与原种 DNA 之间存在不同程度的多态性差异,且由两法得到的结果较接近,为 6% - 12%^[46]。从分子水平上进一步证明了空间环境确实对植物种子存在诱变作用。

利用高空气球搭载谷子的干种子,在高空飘游 8 h 后回收种植,种子发芽率比对照低 5.2%,发芽势比对照高 21.1%;SP1 代植株高度比对照低 6.8 cm,旗叶面积比对照高 25%,穗重比对照高 15.9%;SP3 代大穗型株系性状相对稳定,其中 SP3-2 的种子蛋白质和脂肪含量均高于对照;SP3-5 的平均穗长比对照长 5.8 cm,种子铁元素含量比对照高 61.5 mg/kg;SP4 代大穗株系在穗部性状、叶绿素含量和光合速率上表现出显著的差异,4 个大穗株系在生长前期和后期的叶绿素含量、光合速率显著高于对照,特别是旗叶的光合速率,比对照高 27.9%。说明经高空气球搭载有可能选育出高产、蛋白质和脂肪含量高新品(系)种,这些新品种的性状变异在后代中能够表达,可以遗传^[47]。

雄性不育植物具有栽培条件下的育种价值和自然条件下的生殖潜力,是遗传研究和育种利用的宝贵资源,对杂种优势普及起巨大的推动作用,在作物群体改良和多基因的聚合等方面可以作为遗传改良工具。四川农业大学玉米研究所搭载川单 9 号玉米杂交种,从中获得一株雄性不育突变体,育性表现稳定,是一个由隐性单基因控制的可遗传的“无花粉型”核不育^[48]。经卫星搭载处理的绿菜花,抽苔开花提前,叶片的蜡质减少,其花粉母细胞的染色体产生畸变^[49]。通过空间诱变育种试验还选育出了高产、优质和抗病能力强的青椒,产量增加 25%,维生素 C 含量提高 15% - 20%,病情指数减轻 55%,并且口味好^[50]。中国利用空间诱变选育出的优良作物品系还有:大英型油菜新类型,果大 1 倍的白莲种子和百合鳞等。空间育种对于培育新型良种,提高农作物产量和质量起到了积极的推动作用,展示出了良好的应用前景,有望成为一个重要的遗传改良工具。

综上所述,近地空间环境对微生物和植物的影响是多方面的,在已进行的实验中,关于生物生长方式、遗传性状的改变均有报道,变化也多种多样。空间搭载实验可以产生地面实验难以产生的效果,是一种进行生命科学研究的很好方法。中国作为世界上第 3 个独立掌握返回式卫星技术和载人航天技术的航天大国,在空间技术上有着一一定的优势。利用技术优势进行空间科学实验,为世界科技发展和全人类的健康做出应有的贡献。

献是我们义不容辞的责任。中国的生物科学家已经利用本国的空间技术进行了很多搭载实验,并取得了一些达到国际先进水平的结果。借鉴这些结果和国际上一些成功的经验,继续进行新的探索,空间生物搭载实验一定会有更加广阔的前景。

[参考文献]

- [1] Hotchin J, Lorenz P, Hemenway CL. The survival of terrestrial microorganisms in space at orbital altitudes during Gemini satellite experiments[J]. Life Sci Space Res, 1968, 6:108 - 114.
- [2] Chang D, Paulsen A, Johnson TC, et al. Virus protein assembly in microgravity[J]. Adv Space Res, 1993, 13(7): 251 - 257.
- [3] Lorenz PR, Hemenway CL, Hotchin J. The biological effectiveness of solar electromagnetic radiation in space[J]. Life Sci Space Res, 1968, 6:100 - 107.
- [4] Spizizen J, Isherwood JE, Taylor GR. Effects of solar ultraviolet radiations on *Bacillus subtilis* spores and T7 bacteriophage[J]. Life Sci Space Res, 1975, 13:143 - 149.
- [5] Yurov SS, Akoev IG, Akhmadieva AK, et al. Genetic effects of cosmic radiation on bacteriophage T4Br + (on materials of biological experiment "Soyuz-Apollo") [J]. Life Sci Space Res, 1979, 17:129 - 132.
- [6] Yurov SS, Akoev IG, Leont'eva GA. Effect of HZE particles and space hadrons on bacteriophages[J]. Adv Space Res, 1983, 3(8): 51 - 60.
- [7] Brown RB, Klaus D, Todd P. Effects of space flight, clinorotation, and centrifugation on the substrate utilization efficiency of *E. coli* [J]. Microgravity Sci Technol, 2002, 13(4): 24 - 29.
- [8] Thevenet D, D'Ari R, Bouloc P. The SIGNAL experiment in BIO-RACK: *Escherichia coli* in microgravity[J]. J Biotechnol, 1996, 47(2-3): 89 - 97.
- [9] Klaus D, Simske S, Todd P, et al. Investigation of space flight effects on *Escherichia coli* and a proposed model of underlying physical mechanisms[J]. Microbiology, 1997, 143(Pt2): 449 - 455.
- [10] Kacena MA, Manfredi B, Todd P. Effects of space flight and mixing on bacterial growth in low volume cultures[J]. Microgravity Sci Technol, 1999, 12(2): 74 - 77.
- [11] Kacena MA, Leonard PE, Todd P, et al. Low gravity and inertial effects on the growth of *E. coli* and *B. subtilis* in semi-solid media[J]. Aviat Space Environ Med, 1997, 68(12): 1104 - 1108.
- [12] 翁曼丽, 李金国, 高红玉, 等. 肠杆菌菌种空间变异的研究[J]. 航天医学与医学工程, 1998, 11(4): 245 - 248.
- [13] Ermolenko ZM, Martovetskaia VA, Chugunov VA, et al. Effect of space flight conditions on properties of hydrocarbon oxidizing bacteria [J]. Prikl Biokhim Mikrobiol, 2000, 36(6): 647 - 651.
- [14] Harada K, Ohiya Y, Nakano T, et al. Cancer risk in space due to radiation assessed by determining cell lethality and mutation frequencies of prokaryotes and a plasmid during the Second International Microgravity Laboratory (IML-2) Space Shuttle experiment[J]. Oncol Rep, 1997, 4(4): 691 - 695.
- [15] Bouloc P, D'Ari R. *Escherichia coli* metabolism in space[J]. J Gen Microbiol, 1991, 137(Pt12): 2839 - 2843.
- [16] 贾士芳, 许怡, 郭兴华, 等. 空间条件对芽孢杆菌的超氧化物歧化酶和其他性质的影响[J]. 航天医学与医学工程, 1995, 8(1): 12 - 14.
- [17] Urban JE. Adverse effects of microgravity on the magnetotactic bacterium *Magnetospirillum magnetotacticum* [J]. Acta Astronaut, 2000, 47(10): 775 - 780.
- [18] Kobayashi Y, Kikuchi M, Nagaoka S, et al. Recovery of *Deinococcus radiodurans* from radiation damage was enhanced under microgravity [J]. Biol Sci Space, 1996, 10(2): 97 - 101.
- [19] Juergensmeyer MA, Juergensmeyer EA, Guikema JA. Long-term exposure to spaceflight conditions affects bacterial response to antibiotics [J]. Microgravity Sci Technol, 1999, 12(1): 41 - 47.
- [20] Kacena MA, Todd P. Gentamicin effect on *E. coli* in space[J]. Microgravity Sci Technol, 1999, 12(3-4): 135 - 137.
- [21] 贾士芳, 兴华, 周志宏, 等. 利用返回式科学卫星选育优良双歧杆菌[J]. 航天医学与医学工程, 1996, 9(6): 407 - 411.
- [22] 李芳, 邓庆东, 刘秉阳, 等. 空间条件对乳酸菌遗传学及生物学特性的影响[J]. 中国微生物学杂志, 2002, 14(3): 138 - 139.
- [23] 杨惠芳, 黄志勇, 张德民, 等. 紫色非硫光合细菌的空间生物学效应[J]. 航天医学与医学工程, 1999, 12(1): 46 - 50.
- [24] Walther I, Bechler B, Muller O, et al. Cultivation of *Saccharomyces cerevisiae* in a bioreactor in microgravity[J]. J Biotechnol, 1996, 47(2-3): 113 - 127.
- [25] Fukuda T, Fukuda K, Takahashi A, et al. Analysis of deletion mutations of the *rpsL* gene in the yeast *Saccharomyces cerevisiae* detected after long-term flight on the Russian space station Mir[J]. Mutat Res, 2000, 470(2): 125 - 132.
- [26] 骆爱群, 高春宵, 宋幼新, 等. NIKKO 霉素产生菌的空间生物学效应研究[J]. 航天医学与医学工程, 1998, 11(6): 411 - 414.
- [27] 印红, 谢申义, 章光明, 等. 空间飞行对红曲霉菌产量的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2003, 16(5): 374 - 376.
- [28] 李金国, 蒋兴村, 段留生. 空间条件对棘孢小单孢菌的诱变效应[J]. 航天医学与医学工程, 1995, 8(2): 113 - 116.
- [29] Pross HD, Casares A, Kiefer J. Induction and repair of DNA double-strand breaks under irradiation and microgravity[J]. Radiat Res, 2000, 153(5 Pt 1): 521 - 525.
- [30] Takahashi A, Ohnishi K, Takahashi S, et al. The effects of microgravity on induced mutation in *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Adv Space Res, 2001, 28(4): 555 - 561.
- [31] Antipov VV, Delone NL, Nikitin MD, et al. Some results of radiobiological studies performed on Cosmos-110 biosatellite[J]. Life Sci Space Res, 1969, 7:207 - 208.
- [32] Vaulina EN, Anikeeva ID. The influence of spaceflight on *Chlorella* [J]. Life Sci Space Res, 1970, 8:12 - 8.
- [33] 胡章立, 宋立荣, 刘永定. 空间飞行对稻田鱼腥藻遗传特性的影响[J]. 航天医学与医学工程, 1998, 11(6): 406 - 410.
- [34] Roux SJ, Chatterjee A, Hillier S, et al. Early development of fern gametophytes in microgravity[J]. Adv Space Res, 2003, 31(1): 215 - 220.
- [35] 高文远, 赵淑平, 薛岚, 等. 空间条件对红花种子发芽的影响[J]. 中国药理学杂志, 1997, 32(3): 135 - 138.
- [36] 高文远, 赵淑平, 肖培根, 等. 空间环境对红花生理状况的影响[J]. 中国中药杂志, 1999, 24(2): 77 - 79.
- [37] 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, 22(12): 721 - 724.
- [38] 高文远, 赵淑平, 薛岚, 等. 太空飞行对药用植物藿香叶绿体超微结构的影响[J]. 中国医学科学院学报, 1999, 21(6): 478 - 482.
- [39] 高文远, 赵淑平, 刘世华, 等. 卫星搭载药用植物曼陀罗遗传变异的随机扩增多态性 DNA 分析[J]. 中国医学科学院学报, 2000, 22(1): 44 - 47.
- [40] 徐云远, 王鸣刚, 贾敬芬. 卫星搭载红豆草后代中耐盐细胞系的筛选及鉴定[J]. 实验生物学报, 2001, 34(1): 11 - 15.
- [41] 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): 114 - 118.
- [42] Hammond EC Jr, Bridgers K, Berry FD. Germination, growth rates, and electron microscope analysis of tomato seeds flown on the LDEF [J]. Radiat Meas, 1996, 26(6): 851 - 861.
- [43] Planel H, Gaubin Y, Pianezzi B, et al. Influence of a long duration exposure, 69 months, to the space flight factors in *Artemia* cysts, tobacco and rice seeds[J]. Adv Space Res, 1994, 14(10): 21 - 32.
- [44] 李源祥, 李金国, 刘汉东, 等. 水稻空间技术育种的研究[J]. 遗传, 2002, 24(4): 434 - 438.
- [45] 李源祥, 李金国, 杨新喜, 等. 赣早粳 47 号亲本空间诱变的性状变异研究[J]. 航天医学与医学工程, 2002, 15(2): 127 - 131.
- [46] 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, 18(4): 478 - 483.
- [47] 李金国, 姜国勇, 王培生, 等. 谷子种子经高空气球搭载后的遗传变异研究[J]. 航天医学与医学工程, 1999, 12(5): 346 - 350.
- [48] 曹墨菊, 荣廷昭, 潘光堂. 首例航天诱变玉米雄性不育突变体的遗传分析[J]. 遗传学报, 2003, 30(9): 817 - 822.
- [49] 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): 244 - 248.
- [50] 李金国, 王培生, 韩东, 等. 高空气球飞行对水稻、青椒的诱变效应[J]. 航天医学与医学工程, 1997, 10(2): 79 - 83.

(收稿日期: 2004-10-13)