

空间密闭系统中高等植物生长发育的研究

郑慧琼 魏宁 陈爱地 王六发

(中国科学院上海生命科学研究院植物生理生态研究所)

摘要 通过对“实践八号”育种卫星留轨舱中进行的密闭培养系统中高等绿色开花植物青菜 (*Brassica parachinensis* Bailey) 从种子萌发、幼苗生长到开花授粉各个阶段的实时图像观察, 与地基对比实验的研究, 初步了解到空间微重力对高等植物从营养生长到生殖生长转变, 以及开花等重要生理过程的影响。这是我国首次在空间进行的密闭培养系统中高等植物生长发育过程的实时图像观察实验, 采用显微图像观察技术、空间植物培养技术、培养环境控制技术与生物目标观察固定技术等, 为空间生命支持系统提供重要的技术依据, 并通过显微实时观察装置的研制与空间应用, 加强对空间生命科学实验过程的在线检测和实时监控能力, 为空间生命科学研究的遥科学方式建立技术基础。

关键词 微重力 密闭培养系统 青菜 生长发育

1 前言

人类要探索宇宙奥秘, 实现长期持续地开发和利用空间资源, 首先要解决人类在太空长期生存的诸多问题, 其中受控生态生命保障系统在太空站(或太空基地)的建立, 解决生保系统自给自足或部分自给自足问题是关键。在这一系统中能进行光合作用的绿色植物是能量和物质循环和交换的中心, 因此研究空间密闭生态系统中高等植物的生长发育, 对于建立生保系统有重要意义。

自从 1967 年科学家在生物卫星 II 上进行高等植物生长试验以来的 40 多年中, 人们进行了多次空间植物生长实验, 试验的植物种类包括油菜、胡萝卜、小麦、水稻、拟南芥、生菜等, 但很多植物在空间由营养生长转向生殖生长时便死亡, 不能获得种子^[1,2]。1981 年, 前苏联科学家们在宇宙-1129 生物卫星上培养 1 株开花的拟南芥, 18 天后, 首次结出 6 个果荚, 形成了种子。但可育的种子数仅为地面对照的 55%, 而不育种子和胚死亡的种子分别为对照的 10 和 6.5 倍^[3]。前苏联“礼炮-7 号”的科学研究中, 空间实验的植物培养箱中增加了气流系统, 种子在其中发芽, 生长和开花结荚。69 天后返回地球, 该培养箱中长出 7 株已经结实的植株, 其中 5 株形成 22 个有种子的果荚, 2 株形成 11 个没有种子的空果荚。而地面对照容器中 8 株植物结了 34 个成熟果荚。空

间形成的种子一半以上不能萌发, 其后代在地面种植, 它们的形态与地面对照没有明显差异^[4]。随后, 在国际空间站上又进行过数次拟南芥从种子到种子的生长繁殖实验, 进一步证明空间微重力条件下, 只要栽培措施得当, 植物能够结出种子, 完成其发育的全过程。但是, 对于拟南芥的研究仅限于科学规律的分析, 没有实用价值。经济作物才是人们太空生活的主要粮食来源, 在太空温室中种植小麦引起了人们的极大兴趣。1996 年, 俄国和美国科学家在“和平号”空间站上用超矮化小麦进行生长实验。在 900cm² 面积上生长 97 天, 获得 150 个麦穗, 遗憾的是穗中没有成熟的种子。失败的原因是由于培养条件不理想, 如光照太弱, 没有控制好气体成分, 水和营养液输入系统不完善等。在“和平号”空间站生长的白菜, 通过人工授粉, 成功生长了两代, 但是第二代种子的发芽率和植株生长都不如第一代^[5]。

本研究在“实践八号”育种卫星留轨舱中进行, 主要利用实时图像观察与实时监测来完成此项实验。研究在较小空间封闭培养系统中微重力对高等植物不同发育阶段(包括种子萌发、植物的营养生长与生殖生长等, 其中重点观察花的授粉情况)的影响, 实验材料不回收。青菜还具有耐热、耐阴生环境、生长周期短等优点, 适于小型的空间密闭培养系统的环境条件, 另外, 青菜是优质绿色蔬菜, 是构建空间受控生态生命保障系统的较好的候选材料。

2 空间高等植物密闭培养箱

在“实践八号”育种卫星上进行的高等植物培养实验是在自行研制的培养箱(由中科院上海技术物理所研制)中进行的。空间培养箱由 3 个植物培养单元(图 1)、照明系统与图像系统等部分组成。照明系统由大约 200 个 LED 灯提供 $120 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的光照强度,植物培养基中的水分在发射前加入培养介质中,以保证植物在空间 21 天以上的生长需要。种子萌发实验在 MS 培养基(含琼脂 1% 和蔗糖 2%)中进行,种子排列如图 1A 所示。实时图像观察由两架上海技术物理所研制的数码相机(720×480 pixels)来完成,其中一架相机用来观察 8 粒种子萌发与 1 株幼苗生长的宏观图像,另一架相机与一个显微镜(综合放大倍率为 20 倍)连接用于观察开花与授粉。在轨期间照像频率:入轨后,前 5 天为每 2 小时照像一次,5-21 天期间每 12 小时照像一次。培养箱中光照强度、温度与湿度每 2 分钟记录一次,并实时传回地面。地面培养箱中的实验条件参照空间传回的实时参数进行设置。空间种子萌发试验采用了抗震措施,与气体交换的过滤膜(图 1A)。

3 空间环境中青菜种子萌发与幼苗生长

对“实践八号”传回的图像分析结果表明:在卫星发射升空后培养基保持完好,种子与培养基保持良好的接触。空间环境下种子的萌发速率明显慢于地面对照,地面条件下种子从吸涨到萌发需要 3-4 天,而空间环境中则长达 5-6 天。在空间萌发的幼苗



图 1 “实践八号”育种卫星发射前植物样品及其在空间植物培养箱中的安装。A: 种子; B: 幼苗; C: 空间植物培养箱内部植物培养单元

生长无一定方向,在搭载的 8 颗种子萌发后,有 2 颗植株表现为向光性生长,其余植株有横向与培养基表面平行生长,也有生长到培养基内部(图 2A-D),这是失重引起的。而地面对照幼苗均表现为负向重力性生长,即根向下,茎向上(图 2E-H)。

有报道认为植物在空间微重力条件下的生长走向依种胚所处的位置而定^[1],因此,在太空中栽培植物需考虑到其生长的无定向性,必须采取一定的措施对植物进行引导,使其根、茎与叶维持像在地球上一样定向生长。在地球上,影响植物向性生长的因素很多,其中光与重力是其中最为重要的两个环境因子,植物生理学研究表明,光与重力同时作用于植物的同一器官时,植物的生长走向取决于光照射的方向与强度,当用单侧光照射时,光强大,向光性优先于向重力性,光强度弱,向重力性优先于向光性^[2]。本研究中,“实践八号”上的 8 颗种子没有全部朝向光的方向生长(图 2),说明培养箱中的光照强度还需要增强。另外,光质也影响植物的向光性反应,蓝光增强植物的向重力性反应,而红光则抑制植物的向重力性反应^[3]。地面模拟微重力效应的回转实验表明在抵消向重力性反应情况下,近紫外光不会引起黑曲霉的向光性反应^[3]。重力改变对向光性反应的作用至今见到的研究报道不多,随着空间植物生物学研究的深入,向重力性与向光性反应的作用机理以及两者的相互关系必将得到阐明,为空间植物的栽培提供依据。

图 3 所示的结果表明:空间正常生长的 2 株幼苗(图 3A)与地面对照(图 3B)相比,表现为生长迟缓,其幼叶增加的速度也慢于地面对照(图 3C)。在卫星入轨飞行后的第 18 天,地面对照已有 7-8 片叶,空间样品只有 4-5 片。叶面积也小于对照。已有的空间实验表明植物幼苗生长对空间环境的反应是多样的,莴苣、独行菜、拟南芥的下胚轴和大麦的胚芽鞘在空间微重力条件下比 1g 条件下对照幼苗的下胚轴或胚芽鞘长,而两者根的长度无明显差异^[4]。“和平号”空间站上油菜结出的种子明显小于对照,萌发后的幼苗也比地面对照小^[7,9],这一结果与本研究在“实践八号”上种植的青菜结果相似。Musgrave 等分析“和平号”空间站上油菜种子小的原因发现其子叶的细胞数目明显少于地面对照,但细胞的大小没有差异。从这一结果来看,空间微重力环境可能影响了细胞的分裂。

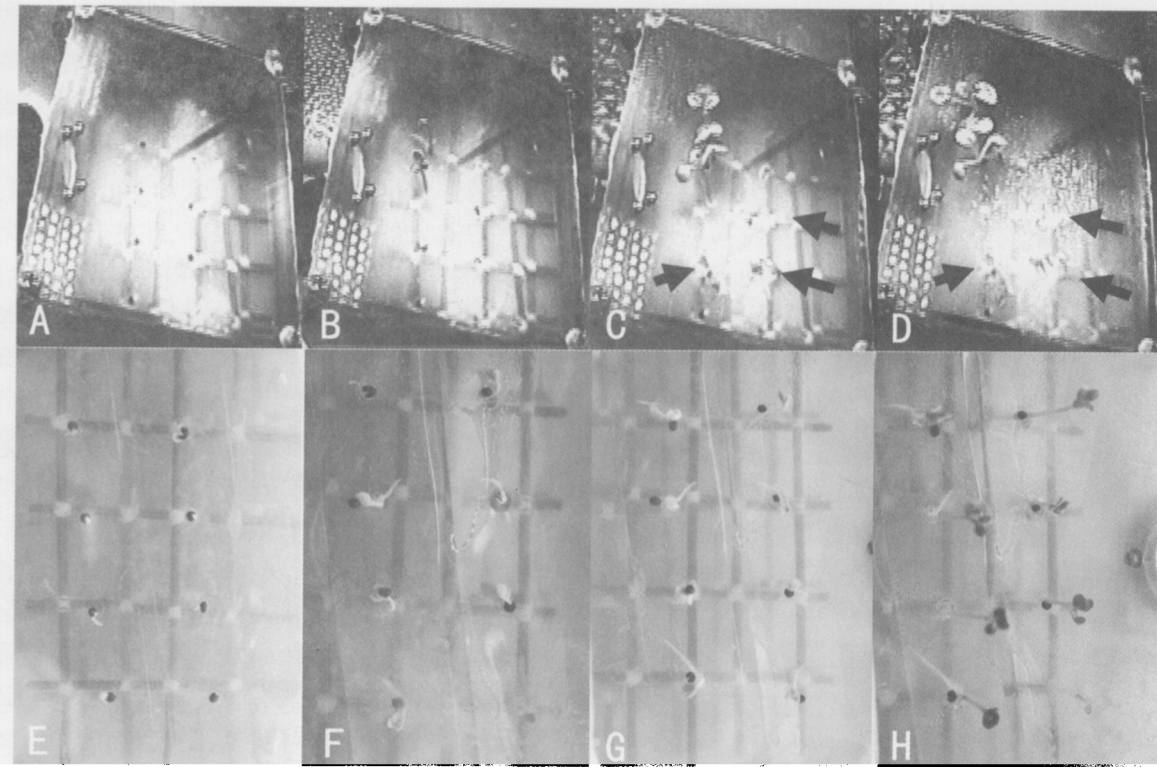


图 2 在“实践八号”育种卫星留轨舱中及地面对照条件下青菜种子萌发与向重力反应。A-D 分别为“实践八号”飞行样品,E-H:地面对照。箭头所示 3 株生长到培养基内部的幼苗

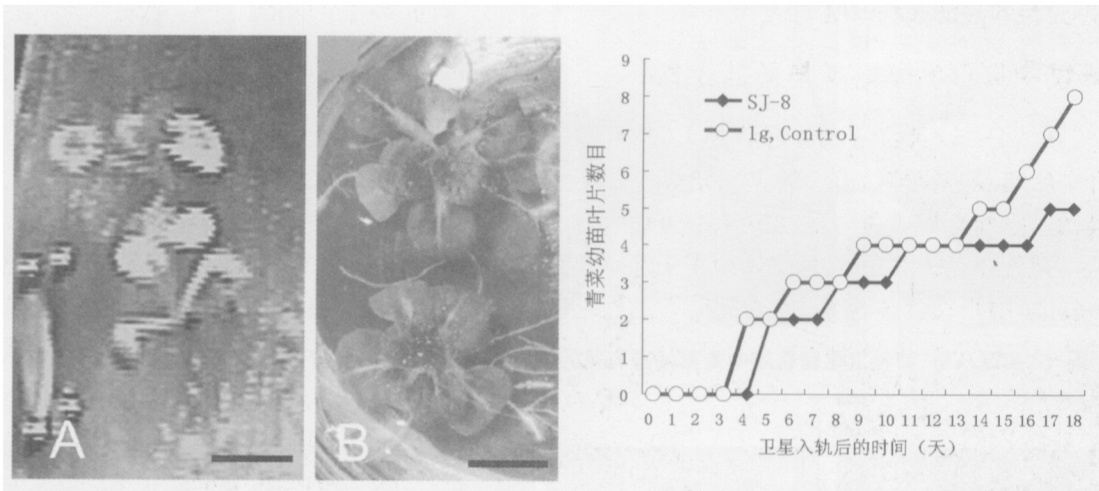


图 3 空间环境对青菜幼苗生长的影响。A:萌发后约 18 天的空间青菜幼苗;B:萌发后约 18 天的地面对照幼苗(B),标线为 1cm。C:空间样品与地面对照增加叶片的数目比较

4 空间环境中青菜花的发育

营养生长与生殖生长是植物生长周期中的两个不同阶段。对于青菜而言,从种子萌发到抽苔是营养生长,从抽苔到开花是营养生长与生殖生长并进时期,而从开花到结实是生殖生长时期。花的发育是植物从营养生长向生殖生长转变的标志,这种转变是植物遗传因子与环境因子相互作用的结果,大多数

植物花的发育都需要一定外界因素的诱导,如光照长短、光质、温度、土壤水分等。重力是地球上重要的环境因子,植物在重力环境经历了亿万年的进化,其形态、生长与繁殖能力已经适应了地球重力环境。空间微重力对植物生殖器官的形成、开花受粉过程、胚胎发育与种子的形成的作用研究很少。在“实践八号”育种卫星的留轨舱中,我们利用了实时图像监测技术对青菜的营养生长与生殖生长阶段进行了观察

分析。与地面对照相比,本次空间实验得到以下几方面的结果:(1)由营养生长到生殖生长转变阶段时间与地面相似。(2)转变过程的发育模式(包括叶片数目,新增加叶片的方向与大小)与地面对照没有明显的区别。(3)花苔的形态,生长方向与生长速率:空间形成的花蕾数目明显少于地面对照,花苔的形态与地面对照差异较大。在整个生长过程中,花苔的生长方向与发射前的生长方向一致,没有改变,但花苔的高度明显低于地面对照(图 4)。

花的发育与传粉是植物发育最重要的环节之一,环境条件对这个过程的影响直接关系到植物的延续以及作物的产量与品质。空间微重力环境中植物是否能够正常开花传粉也直接影响未来空间生命生保系统的建立。为了实际了解这一发育的环节,在“实践八号”育种卫星上对青菜开花的全过程进行实时显微图像观察,结果表明:空间开花过程延长,花药没有正常开裂,散粉、传粉过程受到影响。地面对照花从初开到全开需约 5 小时,花的全开期

约为 2 天,期间花瓣展开呈十字形(最大开度超过 150°),花丝迅速伸长将其中 4 个花药送到高于柱头的位置,花药开裂,花粉散落至柱头上,完成授粉过程,之后大约 2 天花瓣凋落,果荚开始伸长。“实践八号”的青菜花从初开到全开大约 18 小时(图 5A-C),在全开期,花瓣未能成功展开,花的开度为大约 65°,花丝的伸长生长缓慢,花药始终低于柱头的位置,也没有观察到花药开裂现象和柱头上有花粉粒和果荚形成。花瓣萎蔫后一直附着于花托上没有凋落(图 5D)。

“实践八号”生长的青菜花的花药从花蕾期到开花结束始终没有能够开裂,也未观察到花粉释放出来(图 5)。Bubenheim 等 2003 年报道,在“和平号”空间站(the Svet “green house”, 1996)上培养的小麦花药也不能开裂,最后小麦不能结种子。此外,对拟南芥研究也表明空间传粉不能像地面对照那样正常进行^[10]。本研究首次通过实时图像观察证明了这一过程在空间不能正常进行的具体环节与时间过程。这一

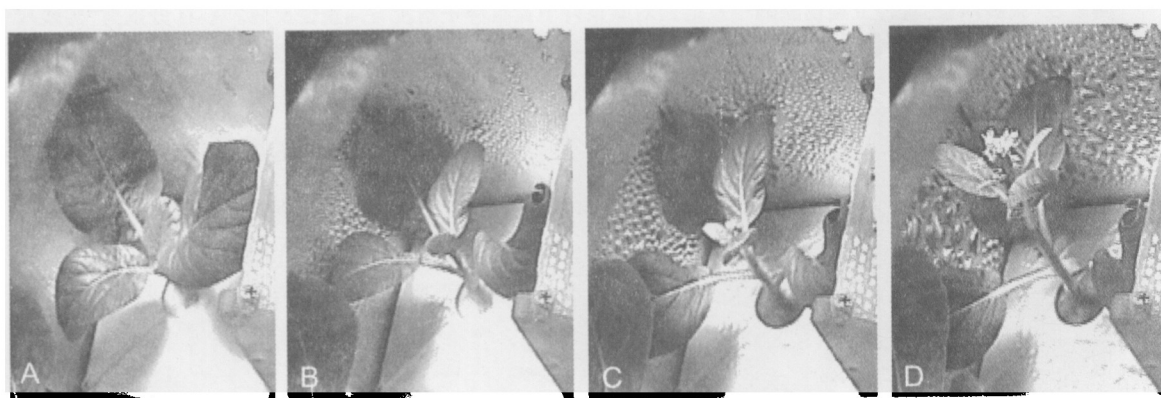


图 4 “实践八号”育种卫星留轨舱中青菜抽苔与花的发育过程图像。A-D:分别为卫星入轨后 4 小时,58 小时,5 天,11 天的实时图像

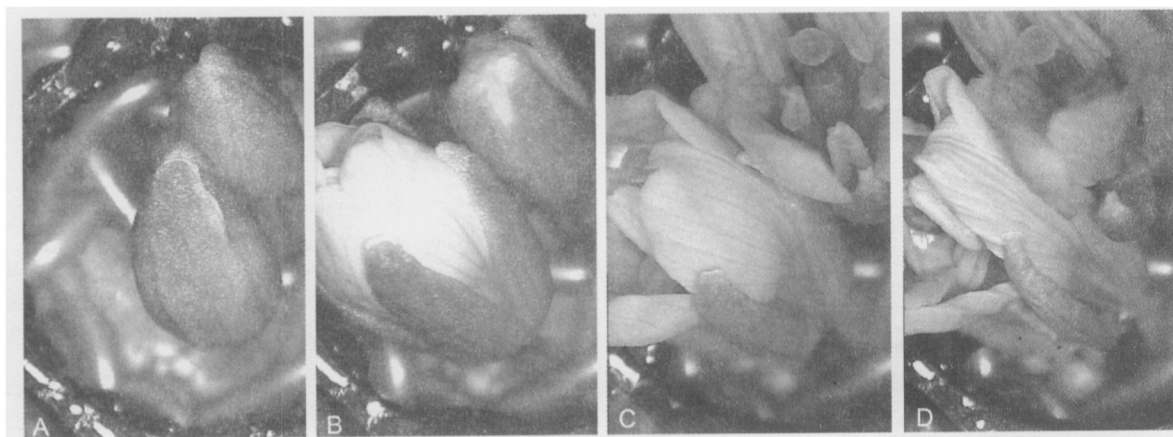


图 5 “实践八号”育种卫星留轨舱中青菜开花过程图像。A-D:分别为卫星入轨后 12 小时,46 小时,82 小时,108 小时的实时图像

结果表明:在未来的空间实验中,需要进一步研究解决空间植物传粉问题,包括如何在空间使花粉正常发育,花药开裂与传粉等,才能从根本上提高植物种子在空间的产量。

5 结论

从上述“实践八号”育种卫星留轨舱青菜生长发育的结果可以看出:本研究研制的植物培养箱能够适应空间环境和卫星总体对硬件的各项技术要求和约束条件,其各项性能技术指标能够满足空间高等植物密闭培养所需要的基本实验环境和条件。获得了从种子萌发,幼苗生长到开花授粉各个阶段的实时图像数据。为了解空间环境中高等植物营养生长,花芽的分化,生殖器官的形成等重要生理过程提供了新依据。本次试验采用的空间显微图像观察技术,空间植物培养技术,培养环境控制技术与生物目标观察固定等技术和方法将成为空间生命科学实验的重要技术手段。本次植物培养箱空间飞行试验的成功为我国空间实验室和空间站生命科学研究与发展奠定了知识与技术基础,也是我国在此领域达到国际先进水平一个标志。

但是,空间微重力在此过程中的作用机制尚需更深入研究,实时图像观察与植物培养等技术尚需进一步改进。需要有更多的空间实验机会,对空间密闭生态系统中高等植物生长发育过程进行更为深入的研究,并对相关实验技术作更进一步的改进与验证,为从本质上研究植物对空间微重力环境的响应,特别是植物在空间微重力环境中的生长发育规律,

提高植物的空间环境适应能力打下基础。 ◇

参考文献

- [1] 刘存德.空间环境对植物的效应. 江丕栋. 空间生物学. 青岛:青岛出版社,2000,21-62.
- [2] Gordon SA, Cohen MJ (eds)(1971) Gravity and the organism. The university of Chicago press, Chicago and London.
- [3] Grolig F, Eibel P, Schimek C, Schapat T, Dennison DS, Galland PA (2000). Interaction between gravitropism and phototropism in sporangiophores of *Phycomyces blakesleeanus*. *Plant Physiology* 123: 765-776.
- [4] Halstead TW, Dutcher FR (1984) Status and prospects. In: Experiments on plants grown in space. *Annals of Botany* 54:3-18
- [5] Hangarter RP (1997). Gravity, light and plant form. *Plant, Cell and Environment* 20:796.
- [6] Kordyum EL (1998). Plant reproduction systems in microgravity: experimental data and hypotheses. *Advance in Space Research* 21: 1111-1120.
- [7] Kuang A, Xiao Y, McClure G, Musgrave S (2000). Influence of microgravity on ultrastructure and storage reserves in seeds of *Brassica rapa* L. *Annals of Botany* 85: 851-859.
- [8] Laurinavičius R, Švegždienė D, Raklevičienė D, Kenstavičienė P (2001). Ontogeny of plants under various gravity condition. *Advance in Space Research* 28:601-606.
- [9] Musgrave ME, Kuang A, Xiao Y, Stout SC, Bingham GE, Braiarty LG, Levinskikh MA, Sychev VN, Posolski IG(2000). Gravity independence of seed to seed cycling. *Planta* 210:400-406.
- [10] Musgrave ME, Kuang A, Matthews SW (1997). plant reproduction during spaceflight: importance of gaseous environment. *Planta* 203:S177-S184
- [11] Nechitailo GS, Mashinsky AL (1993). Space biology: Studies at orbital stations. Moscow: Mir Publishers, pp 141-163: 324-330