

\* 学科发展 \*

# 空间生命科学研究进展

汤章城\*

(上海植物生理研究所 200032)

**提要** 随着空间技术的发展,空间生命科学已成为空间科学与应用中极其重要的组成部分,深受各空间大国政府、研究机构和科学家的重视。自我国实施高技术发展计划以来,也开始全面而有计划地开展了这方面的研究。本文概要地评述了空间生命科学的前景和意义,国际上对这一重大问题的研究现状和发展趋势,以及目前我国的组织和研究状况。

当前,世界的文明在一定程度上是建立在人类对生物(包括动物、植物、微生物)的重要功能的控制和创造性地利用生物学的事实和原理的能力上。生命科学研究的目的在于认识、改造和利用各种重要的生命现象和过程,从而为人类生产和生活提供有重要实用价值的手段和材料。目前,地球上生存着的生物都是在地球重力场中经长期的自然选择和进化的结果。空间条件,特别是空间的微重力条件是地球上生物从未遇到过的。随着空间科学和技术的发展,人类和地球上生物进入空间已成为现实,由此带来了许多新的希望,也面临着诸多新的挑战。空间生命科学的任务是:一方面要把空间条件作为一种新的环境或手段去认识、改造和利用生命过程,造福人类;另一方面要克服空间条件的若干限制,为人类和地球生物在空间长期生存创造条件。因而空间生命科学已成为当前空间科学及其利用的非常重要的组成部分。空间生命科学研究的活跃展开主要起因于各国政府和科学家对它的前景及其意义的深刻认识。

## 一、前景和意义

### (一) 征服空间的需要

自人类能进入空间以来,征服空间就成为各发达国家追求的目标,它们既合作又竞争。人类的太空活动将从地基航天技术发展为空基航天技术,从短期停留发展到永久居住。要达到这个目标,对人类而言不仅要能生存,还要生存得好,即要保持健康和足食(广义地包括食物、水、空气)。将再供给型生命支持系统和物理化学再生型生命支持系统相比,物理化学生物再生型生命支持系统更经济。因此,科学家在重视航天医学或空间医学的同时,也在努力研究全封闭的受控生态生命系统。这个系统包括两个主要方面,一是全封闭系统内的环境控制,涉及气体和水的再循环和废物管理;二是全封闭系统内的食物生产和供应,涉及糖、蛋白质、脂肪、

---

\* 上海植物生理研究所所长。

维生素和矿物元素等的供应。这两方面都要有生物参与,并要达到内部的平衡。空间食物标准、物种选择、生长条件、栽培技术、生物共居性等构成的受控生态生命支持系统中包含着空间生命科学的重要研究内容。如前苏联科学家研究了在生命支持系统中氢细菌的利用,当系统中电解水放出氧,同时放出氢时,氢细菌可利用放出的氢。德国科学家研究出一种称为“Aquarack”的系统,在该系统中培养了一种鱼和一种蜗牛,它们分别作为脊椎动物和无脊椎动物的代表,从它们身上得到了在空间条件下所发生的形态和生理变化的参数,可作为以后空间研究的某些基础。日本科学家曾研究一种受控生态生命系统的营养系统,该系统引入四种植物,即水稻、大豆、莴苣和草莓,为了弥补该系统中钙、钠、维生素 B 和 A 的不足,后来又研究培育蜗牛在空间所能起的作用,蜗牛不但能提供给人钙和维生素,还能吃掉人所不能食用的植物部分。保加利亚和前苏联科学家合作在空间培育出“空间蔬菜”——萝卜和中国大白菜。它们在空间温室生长 54 天。这一研究表明所设计和装配的空间温室是可用的。尽管观察到植物种子萌发和生长受到某些抑制,但组织分化、形态和功能都是正常的。前苏联科学家基于对火星探索长期飞行的需要,研究了“人-微生物-人工条件”生态系统中的微生物,指出了在这种条件下潜在致病菌活化的危险性,提出要建立动态的生态系统的平衡。上述研究反映出主要空间大国的科学家已开始把注意力瞄准长期飞行的目标,探索更大的空间范围。空间生命科学作为征服空间的需要就是要研究人和生物在空间条件下的保护和稳定,甚至平衡。

### (二) 地面应用的需要

地球重力场是地球的重要环境条件之一,它既给人类的活动带来好处,也造成一些活动上的障碍。而空间给人类提供了一个有别于地球的特殊环境条件,如微重力、强辐射、高真空和超洁净。特别是微重力和空间辐射的生物学作用已被证明对生物制品的生产会带来诸多好处。蛋白质工程是生物技术中的一个重要方面,改造蛋白质首先要认识蛋白质结构。测定蛋白质结构的一大障碍是蛋白质单晶的培养,有时因得不到合格的晶体,研究也就无法开展,更谈不上应用。空间却为晶体生长提供了一个得天独厚的条件。德国科学家于 1984 年发表了第一个空间蛋白质晶体生长试验结果,将地面不易长大的蛋白质晶体体积长大许多倍。自 1983 年以来,美国、德国、前苏联、日本、中国等国家进行了约 30 次左右的空间蛋白质晶体生长试验。90 年代以来,中国科学家利用我国的返地卫星和自制的装置又进行了两次成功的试验。许多科学家还报道了空间飞行会诱发植物染色体突变,并看到空间飞行能诱发一些地面诱变处理所不能产生的突变类型,因此有可能为培育农作物新品种提供种质资源。目前,一个值得注意的动向是在空间进行细胞电融合试验。细胞融合是细胞工程中一个重要部分,细胞电融合又是细胞融合的一个重要技术途径。通过不同细胞的融合可创造新种细胞,或有效地获得细胞内源性活性物质。地面细胞融合率低,其原因之一就是重力影响,空间可为提高细胞融合率提供机会。空间生命科学作为地面应用的需要,主要是利用空间条件进行生物加工和诱导突变。

### (三) 基础研究的需要

地球上所有生命体都是生长在重力条件下,它们在某些方面表现出很强的重力影响,如植物根的向地性是十分明显而顽固的。在微重力条件下,植物根向地性的消失以及内部结构、代谢、物质分布的变化,可使人们对这一重要的生命现象本质有一个深刻了解。前苏联科学家研究了微重力对植物细胞质膜的影响,观察到在空间模拟(回转器)条件下细胞质膜结构和成分

的变化,其表现为质膜体积的增加,细微结构的改变,饱和与不饱和脂肪酸比例、磷脂组分、膜势的变化等。法国科学家研究了微重力和超重力对草履虫的生长速率和 ATP 含量的影响。这些研究侧重于空间条件下细胞水平的反应以及微重力条件和重力条件可互为参照等问题。地球生命的起源和地球外是否存在生命也是生命科学的一重要命题。美国空间生命科学的三大目标中就包含生命起源和地球外生命的分布,德国也把寻求地外生命作为空间生命科学四项目标之一。从某种意义上讲,对地球外生命的研究也是为了更加深刻认识地球上生命的起源。日本科学家在模拟的长期星际条件下研究了地球有机体,如病毒、细菌、酵母、真菌和藻的存活率。他们看到在低温、高真空、空间辐射条件下有机体存在的可能性。空间生命科学作为基础研究就是要深入了解地球或宇宙生命的本质。

## 二、国际研究现状和趋势

在发达国家中,美国、前苏联、德国、法国和日本等在空间生命科学研究方面都是很活跃的。

### (一) 美国

美国多年前就制定了空间生命科学研究的两项目标:航天医学,研究空间环境对人类的影响;空间生物学,利用空间的特殊环境,开展基础生物学和基础医学的研究;生命起源和地球外生命的分布,了解生物如何适应宇宙进化等问题。目前正在发展的载人航天器,由于有人的参加,生命科学一直是重要的一部分。美国曾宣布过 1991—1994 年入选的 29 项生命科学实验项目,其中包括:航天生理学和航天医学研究,如在零重力下心血管的调节,太空运动病的机理 失重环境中的肺功能等;细胞学研究,如细胞在太空环境中的增殖,植物细胞结构变化和组织增殖;生物学研究,如微重力下大麦的发育过程,植物种子的反应,太空飞行对鼠早期胚胎发生的作用等。

### (二) 前苏联

1961 年前苏联首次载人空间飞行的成功,标志着空间生命科学研究进入一个新阶段。由于载人的需要,空间生命科学着重研究空间环境飞行因素对人体的影响,寻找保障人在空间健康生活和有效工作的措施。在生物学方面研究地球生物在空间条件下的生命活动和行为,探寻宇宙中有生命物质的存在、分布、出现和进化,拟定在宇宙飞船内及行星上建立居民环境的原则和方法。前苏联 1966 年来已发射了 10 颗“宇宙号”系列生物卫星,其中 6 颗为国际生物卫星,参加的除东欧国家外,还有美国和法国。所谓生物卫星是指整个卫星的结构、装星的科学设备以及整个飞行和生命保障系统都要服从于生物学实验的需要,而不仅仅装有生物体。

### (三) 德国

德国是空间强国之一,在空间活动方面十分活跃。1993 年进行的 D-2 飞行是德国近年来最大的一次空间活动,其中空间生命科学项目占研究项目总数的 40%。德国航天局受德国联邦政府研究和技术部之托管理德国的空间活动。航天局管理着约 500 个项目,联系着约 130 个单位。研究技术部每年拨数亿德国马克发展空间科学和技术的应用。空间生命科学主要由生物学和医学两部分组成。生物学方面的研究有:(1)重力生物学:重力在生长、发育、运动、生殖、向性和其它生理过程中的作用;重力感受和信号传递;复合因素调节过程中的重力作

用;适应和补偿机理。(2)生物再生生命支持系统:作为发展生命支持系统基础的生理学研究;高等植物生长单元;藻类反应器;水生动物系统;微生物废物处理系统的发展;研究植物和动物之间的组合系统,包括系统的理论问题。(3)辐射生物学:宇宙辐射对生物材料的作用;宇宙辐射和微重力的相互作用。(4)外星生物学:极端环境条件下的生命;生命起源。(5)生物加工:细胞的生物化学和生物物理;细胞培养;细胞融合和杂种产生;生物加工技术(特别是分离技术);蛋白质晶化。德国空间实验室 D-2 计划从 280 个申请项目中选出 92 个项目,生命科学研究包括:生物加工,如不同细胞的培养方法,植物、动物细胞的电融合,以提高不同细胞的融合率和杂交得率,杂交细胞的选择和培养;细胞生物学,如微重力对单细胞和细胞团(细胞结构、分裂、生产和物质分泌)的影响;重力生物学,如单细胞中、植物和动物整体中重力感应和重力刺激过程等。1972—1993 年,德国为此进行了 142 次飞行试验,其中近半数为人操作的试验。

#### (四) 日本

日本的空间生命科学研究始于 70 年代,制定了三个计划目标:空间医学、空间生物学、生物工艺学。日本积极参加国际合作项目的开展。日本为参加第二次国际微重力合作研究,提出了 15 个研究项目,其中 11 项属空间生命科学研究,占总研究项目的 73% 以上,如微重力下鱼前庭器官适应的机制,舱内重粒子的生物效应,线虫染色体 DNA 的分离,微重力下蛋白质的结晶,空间条件下鱼的交尾和产卵等。

“SPACELAB 1983—1993”一文总结了空间实验室十年的情况。这是由 26 个国家(奥地利、澳大利亚、比利时、加拿大、丹麦、法国、德国、印度、意大利、西班牙、日本、瑞典、瑞士、挪威、英国、美国等)的 148 个研究所和大学的 323 名主要科学家参加的空间合作活动,合计有 116 个主要载荷,387 个实验,在空间总时间为 73 天 5 小时 11 分钟。其中大部分研究涉及空间生命科学。德国 INTOSPACE 公司曾对受益于微重力条件的主要的生命科学研究领域作过分析,并根据不同的空间实验条件和时间作出过建议和安排。

为了适应空间条件,并能较好地开展空间生命科学研究,设计和制造用于空间研究的设备也是十分重要的。安装在 1993 年升空的德国空间实验室 D-2 上的生物实验器(Biolabor)就是一种进行综合空间生物研究的设备。它的主要构成有:四个保温器;一个细胞电融合工作台;大培养容器(可培养植物整体)匹配的阈值离心机,可测定 0.6—1.6g 范围内的重力敏感性阈值;两个 4—6℃ 的储存用冷室;一个温度为 37℃ 的储存室;许多新发展的实验专用硬件,如细胞电融合小室、培养容器等,这样一种双排架的生物实验器主要用于研究重力生物学、细胞生物学和生物加工。美国宇航局爱姆斯研究中心研制出一种生物空间研究装置,它将用于自由号空间站,使用期为 30 年,可为生物学家研究重力作用创造一个十分良好的条件。它装有 0.01—2g 重力范围的离心机,因而可用于微重力生物学、生物的重力阈值及超重力生物学研究。该装置的硬件包括:直径为 2.5 米的离心机,并可对植物、动物同时提供生命支持;生物培养器的固定系统,可容纳不同的小动物和植物的培养器,并具有支持生命系统的能力;两种不同类型的培养器,它们可分别用于培养小动物(兔、鼠)和植物,以及与之相匹配的监视和数据测量系统。目前,为了开展空间蛋白质晶体生长研究,美国和德国根据不同的工作原理已设计生产了多种反应器,如蒸汽扩散法的蒸汽扩散反应器(Vapour Diffusion Reactor);液/液扩散法的自由介面扩散反应器(Free Interface Diffusion Reactor)和透析反应器(Dialysis Reactor)等。



这些反应器结构各异,各具特色,并已用于 TEXUS 和 MAXUS 微重力火箭、返地卫星、航天飞机 D-2、IML-1 等研究中。为了进行空间生物大分子分离研究,德国 MBB/ERNO 公司制造了用于 TEXUS 的小型电泳实验模型。

为了从局部开始以完成整个受控生态生命支持系统的研究,当前从生物生命支持系统或小型生态系统入手做了若干研究。在硬件方面,德国科学家提出了两种用于美国宇航局零星搭载项目(GAS)或航天飞机中部舱柜(MDL)的设备,分别称为 Biomaus 和 Aquazelle。后者是一种专用的水生生物的生命支持系统。美国科学家提出了一个很有意思的设想,即利用航天飞机的外储箱作为研究受控生态生命支持系统(CELSS)的轨道设备。众所周知,微重力条件下植物的行为非常重要,分析植物的生长周期要有较长期的空间飞行资料,单独构建 CELSS 实验设备是非常复杂而昂贵的,因而将航天飞机外储箱(空的液氮储箱)略加改造,不失为一个好的解决办法。

### 三、我国的研究现状

早在 60 年代,我国就开始了若干空间生物学的研究,但较全面而有计划地开展空间生物科学和技术的研究是在 80 年代,是随着回地卫星发射成功和高技术发展计划即“863”计划的实施开始的。

我国是一个发展中的大国,基于经济发展的需要和有限的经费投入,在空间生物科学和技术的研究方面选定有限的目标是十分必要的。目前,主要的研究方面有:空间蛋白质晶体生长;动、植物细胞的培养和电聚焦融合;空间生物材料(细胞和生物大分子物质)的电泳分离;空间生物效应,包括动物、植物、微生物以及水生生物的效应。上述研究内容同时包括了:基础研究和应用研究;科学研究和硬件研制;空间研究和地面模拟研究。我国空间生命科学研究可利用的机会包括:高空气球、回地卫星、航天飞机搭载桶;地面或地面模拟研究的落塔和回转器等等。参加研究的单位主要有中国科学院的有关研究所和一些大学,另外,目前正在筹建的国家微重力实验室也包含有微重力生命科学的研究。这些单位既有科学研究单位,又有硬件研制单位。研究得到了国家高技术发展计划和国家自然科学基金委员会的资助以及我国航天系统的支持。

我国在这一领域的研究是有进展的。在蛋白质晶体生长方面,中国科学院生物物理研究所和上海技术物理研究所的科学家合作,并在其他有关单位参与下,于 1992 年首先成功地利用我国研制的空间蛋白质晶体生长装置,在空间一次试验成功,长晶成功率达 50% 以上,空间生长的晶体形态优于地面生长的,X 射线衍射的分辨率也高,结果已发表在《中国科学》上。1994 年的卫星搭载试验获得了更好的结果。在细胞的空间效应方面,中国科学院动物研究所和上海植物生理研究所的科学家利用空间搭载机会和地面模拟条件研究了动植物细胞的效应。动物研究所的科学家利用合作单位研制的恒温细胞培养装置进行了动物细胞的空间飞行试验,返地后细胞存活,并对细胞代谢和结构变化作了初步观察。1994 年,动物研究所的科学家还利用与力学研究所和上海技术物理研究所合作研制的动态细胞培养系统(DCCS)成功地进行了卫星搭载试验。上海植物生理研究所的科学家利用按重力补偿原理研制的脉宽调制式回转器研究了烟草愈伤组织细胞的模拟微重力效应,研究结果已发表在《Microgravity Quar-

terly》上。在植物的空间效应方面,中国科学院遗传研究所、上海植物生理研究所、植物研究所的科学家曾对水稻、小麦等多种粮食和蔬菜作物种子的空间效应作过研究。他们与高能物理研究所的科学家合作,在搭载试验的小麦种子上盖上核径迹探测片,能标定出受空间重粒子击中的种子以及击中的次数和部位。种植被击中的种子,其第二代出现诸多的变异,这些变异具有一定的利用价值。科学家们还研究了空间飞行前用辐射保护剂或敏化剂处理搭载的小麦种子的效果,观察到一些有趣的现象。在动物的空间效应方面,中国科学院动物研究所和上海昆虫研究所的科学家利用返地卫星研究了白纹伊蚊(*Aedes albopictus*)和家蚕对空间条件的反应。在微生物的空间效应方面,中国科学院微生物研究所、遗传研究所和上海植物生理研究所的科学家研究了一些有实用价值的微生物菌种和基因工程菌种,如产邻苯二酚 1,2-双加氧酶的菌种,产纤维素酶的康氏木酶和黑曲酶菌株,抗生素产生菌诺卡氏菌株和处于休眠期的头孢霉素酰化酶基因工程菌等对空间飞行的反应。在藻和二元封闭生态系统的空间效应方面,中国科学院水生生物研究所的科学家研究了藻类在空间的适应性和水生生物的空间环境反应,研制了自带光源的卫星搭载生物试验盒,带光源的二元和三元生物系统搭载试验装置等。研究结果已部分发表在《科学通报》上。随着我国航天事业的发展,中国科学院已有更多的研究所在参与这方面的研究。

当前,我国空间生命科学研究的首要的任务,是要在原有的基础上加强研究实践,给予较多的空间研究机会,并建立一支较高水平的、学科间相互交叉、相互渗透的研究队伍。在研究中应该特别注意和加强硬件研制,从一定的意义上讲,它是涉及能否上天做研究的前提之一。为了做好硬件的研制工作,生物学家和技术专家之间的相互学习和密切配合是十分重要的。另外,国际合作也是很重要的。各个国家都有各自的优势,通过国际合作可取长补短,并可增加空间科学研究的机会和提高研究的成功率。随着中国经济和科学技术的快速发展以及国际合作和交流的不断加强,中国空间生命科学研究会得到越来越多的支持和机会,并取得越来越多的成果。