

中国现代科学全书总编辑委员会

名誉主编 胡 绳 钱伟长 吴阶平 周光召
许嘉璐 罗豪才 季羨林 王大珩
郑必坚

主 编 姜士林 郭德宏 刘 政 程湘清
卞晋平 王洛林 许智宏 白春礼
卢良恕 徐 诚 王洪峻 明立志

(副主编和编辑委员名单容后公布)

空间科学编辑委员会

主 编 王大珩 张厚英

编辑委员 (以姓氏笔画为序)

刘振兴 江丕栋 欧阳自远 黄惠康
潘厚任

序 言

1999年11月我国发射了神舟号飞船,并成功返回,向世界宣告,中国的载人航天计划开始了。飞出地球,进入太空,是人类自古以来梦想,20世纪得以实现,至今世界各国曾在太空飞行过的已超过300人。人们利用空间的特殊条件,进行了大量的科学实验。空间科学和技术的成就,将造福于人类。

宇宙空间是一个特殊的环境,人离开地球,进入太空,怎样才能保障正常的生活和工作?在太空生活,或去过太空以后,对于人类的身体健康和延续后代有何影响?在长期、远距离飞行过程中,怎样才能飞行在飞行器上自己供应食物、空气和饮水?要回答和解决这些问题就必须进行空间生物学的研究工作。生物总是生存在一定的环境里,与环境有着不可分割的联系。生物都是开放系统,它们要从环境中获得物质和能量,从而有生长和繁殖;它们与环境不断交流信息,从而有适应、遗传变异和进化。生物在环境中所经常接触的因素主要有物理因素、化学因素和生物因素三大类。重力是地球上一切生物脱离不了的环境物理因素,无时无刻不影响着地球上的所有生物。关于重力和失重对生物的影响,特别是对人的影响,多年来由于高空生理学以及空间生物学的发展,已积累了不少科学资料。这些资料对于人类的太空飞行起了至关重要的作用。

开展空间环境的物理因素对生命影响的研究,还将有助于加深对生命本质的认识。对于地球和太空的物理因素与化学因素对生物的影响,可进行大量的综合考察,可搜集有关生物学方面所

未有的各种各样的科学资料。对此开展有系统的分析和研究,这对整个生命科学中新的研究领域的开拓,将有启发和推动作用,从而使生物科学的发展向更广阔的道路前进。生物的特征在于有生命。生命与无生命的区别是什么?由什么决定?太阳系里现在只有地球上才有生命,是因地球的条件适宜地球生命的存在和发展。太阳系之外是否有生命,现在还没有证实。如有生命,还要进一步考察,那些生命形式与地球生命是否具有相同的构成法则和基本特征。这对研究环境对生命的影响,认识生命与无生命的本质区别都将具有十分重要的意义。

进行空间生物学研究,地面工作很重要。先要在地面充分地开展对比实验研究。此外还要进行环境模拟实验。生物实验,材料很重要。要对其在地面环境中所具有的特性有很清楚的了解。这样才能够开展深入的空间实验。总之,要有严格的、可靠的实验和对照资料及数据。开展空间生物学的研究,要利用近年来有关物理科学、生物科学等已有的新成果,以及积累的大量飞行实验资料,采用多学科的方法和技术。研究内容还要包含生物结构的所有层次:分子、细胞、器官系统和整体。

凡此种种,从研究内容到研究方法,研究技术,工作在空间生物学研究第一线的科学工作者们,都写入了《空间生物学》一书之中。

我国的空间生命科学实验,开始于 60 年代。1964 - 1966 年,发射了 5 枚生物探空火箭。对于实验动物和多种生物样品分别进行了生理、生化、细菌、免疫、遗传、组织化学、细胞及亚细胞水平的生物医学研究,观察了高级神经活动反应。至 80 年代,利用我国的返回式卫星的剩余空间搭载和利用国外的飞行器,多次进行了多种生物样品的搭载实验和空间医学实验。90 年代,我国又开展了载人航天的大规模工程。我国的空间生物学在此大好形势下,必将获得快速发展。

《空间生物学》一书的问世,使我国有了第一本系统地、全面地介绍空间生物学的书籍。它不仅有助于各界读者了解空间生物学,也将对于我国空间生物学的发展,发挥积极、有益的作用。

贝时璋
2000年8月

目 录

序言	(1)
第一章 绪论	(1)
第一节 空间生物学的概念	(1)
第二节 空间的环境条件	(4)
第三节 空间生物学的发展过程	(13)
第四节 微重力生物效应的一般原理	(15)
第五节 本书内容	(19)
第二章 空间环境对植物的效应	(21)
第一节 引言	(21)
第二节 植物的向重性	(23)
第三节 空间环境对植物组织、细胞和超微 结构的影响	(39)
第四节 空间环境对成年植物的影响	(44)
第五节 电场和磁场对植物的影响	(58)
第六节 空间植物学研究的应用前景	(59)
第三章 空间环境对微生物的效应	(63)
第一节 影响微生物生长的空间环境	(63)
第二节 空间环境中的微生物学实验	(64)
第三节 未来的空间微生物学	(76)

第四章 藻类空间生物学	(80)
第一节 藻类空间生物学的意义	(80)
第二节 空间环境对藻类的生物学效应	(82)
第三节 藻类空间生物技术	(103)
第四节 空间生存环境中的藻类生物学技术	(106)
第五节 附录	(110)
第五章 水生生物空间生物学	(112)
第一节 水生生物空间生物学的意义	(113)
第二节 空间飞行环境对水生生物的生物学效应	(117)
第三节 水生生物空间生物学研究进展	(127)
第四节 水生生物在建立 CELSS 中的作用	(136)
第六章 空间细胞生物学	(146)
第一节 空间细胞生物学导论	(146)
第二节 空间细胞生物学发展概况	(150)
第三节 微重力下的细胞生物学研究	(151)
第七章 动物在空间的生长发育	(174)
第一节 引言	(174)
第二节 研究进展	(176)
第三节 高等动物在空间的神经发育问题	(186)
第四节 展望	(189)
第八章 改变重力环境下的动物生理学	(192)
第一节 空间生物学的发展	(192)
第二节 重力场和生命功能演化	(197)
第三节 地面模拟研究	(203)

第四节	空间飞行试验·····	(206)
第五节	基本的结论和展望·····	(213)
第九章	人体对空间环境的反应和适应·····	(219)
第一节	载人航天推动空间人体功能研究·····	(219)
第二节	地面模拟试验·····	(221)
第三节	空间飞行试验·····	(223)
第四节	对抗失重的措施·····	(244)
第五节	人在空间的工作能力·····	(247)
第六节	关于地外文明的研究·····	(255)
第十章	空间放射生物学·····	(261)
第一节	空间的辐射环境·····	(262)
第二节	空间飞行中放射生物学研究的结果·····	(266)
第三节	重离子辐射的生物学效应·····	(273)
第四节	下世纪初的空间放射生物学研究·····	(281)
第十一章	受控生态生命支持系统·····	(285)
第一节	引言·····	(285)
第二节	CELSS 在空间科学中的地位与作用·····	(286)
第三节	CELSS 的理论基础和功能要求·····	(288)
第四节	面临的任务·····	(290)
第五节	研究进展·····	(297)
第六节	展望·····	(303)
第十二章	地外生物学与生命起源·····	(305)
第一节	生命的本质与生命的起源·····	(305)
第二节	生命起源的各种学说·····	(307)

第三节	细胞的起源	(316)
第四节	研究生命起源有什么用	(318)
第五节	出现生命的先决条件	(319)
第六节	火星探测与地外生命	(320)
第七节	地外生物学	(324)
第十三章	空间生物科学技术中的生物力学问题	(327)
第一节	生物力学与重力生物学	(327)
第二节	空间生物技术与流体物理过程	(330)
第三节	地基模拟的相似性问题	(338)
第四节	空间细胞生长和空间细胞培养中的 生物力学问题	(340)
第五节	连续电泳分离的电流体力学问题	(352)
第十四章	微重力下生物大分子的晶体生长	(360)
第一节	研究的意义及内容	(360)
第二节	空间蛋白质结晶实验	(365)
第三节	研究的历史及进展	(372)
第四节	问题和展望	(377)
第十五章	空间细胞培养	(382)
第一节	空间细胞培养研究的意义	(382)
第二节	空间细胞培养研究概况	(383)
第三节	空间细胞培养的地面模拟	(388)
第十六章	细胞电融合技术在空间的发展潜力和前景	(392)
第一节	引言	(392)
第二节	技术关键	(394)

第三节	细胞电融合应用中的问题	(400)
第四节	空间发展细胞电融合技术的潜力	(403)
第五节	空间细胞电融合技术研究进展	(406)
第六节	展望	(409)
第十七章	空间生物分离	(411)
第一节	制备型空间电泳	(411)
第二节	空间电泳研究的主要内容	(417)
第三节	空间电泳的应用	(428)
第四节	空间电泳的特点和进展	(432)
第五节	空间电泳的展望	(441)
第六节	两相分离	(443)
第十八章	空间生物学实验条件	(451)
第一节	亚轨道飞行	(451)
第二节	近地轨道飞行	(454)
第三节	星际飞行	(470)
第十九章	地面实验条件	(473)
第一节	地面微重力条件	(473)
第二节	超重条件	(475)
第三节	减重力方法(低重力效应的模拟方法)	(475)
第四节	微重力效应模拟	(476)
第五节	其它	(484)
第二十章	空间生物学研究用设备	(486)
第一节	空间生物学实验设备的一般特点	(486)
第二节	生物样品的培养、生长设备	(486)

第三节	生物技术仪器设备·····	(502)
第四节	通用设备;观察、测量、分析用设备·····	(509)
第五节	人体生理研究的硬件·····	(514)
参考文献·····		(518)
后记·····		(541)

第一章 绪论

第一节 空间生物学的概念

一、空间生物学的研究意义和目的

人类长期梦想遨游太空,在经过长期的艰苦探索之后,终于在1961年由苏联航天员尤里·加加林迈开了第一步。至今载人飞行已经过了37个年头,已有20多个国家的300多名航天员,先后到空间去漫游。人类不断地去认识、探索、开发和利用近地宇宙空间,已经登上了月球,在不远的将来还要登上火星和其它星球。人类对宇宙空间的探索是无止境的。

空间技术和载人航天事业是现代科学发展的前沿,是先进技术的代表,是社会生产力高度发达的重要标志,是综合国力的体现,它的发展促进和带动了其它科学技术领域。其成就为人类解决众多科学和经济问题开辟了全新的途径。

载人航天关系到社会的发展,关系到人类的进化和未来。

地球作为一个封闭系统,其稳定性将逐步下降,出现人口、环境、粮食、能源和资源等一系列危机。地球上的资源、能源、水和土地是有限的,而人口的增长是无限的,对物质资源的需求与消耗也是无限的。一个有限的地球,不能满足无限增长的人口需要。有人估计再过1540年左右,世界人口的重量就将等于地球的重量。解决的办法是开拓人类的生存空间,向地球以外找出路,疏散人口,开发地外资源。已有人列出了人类开发和利用宇宙空间的时间表。空间生物学的研究,是实现这一目标的基础。

空间技术和载人航天的发展,对空间生物学提出了迫切的要求。首先是要保证人在空间飞行时的生存、安全、健康,并能有效地工作,还要了解人在返回地球后的再适应过程,以及对于后代会不会有什么影响。其次是要研究空间条件对于人及生物体(作为模式系统)和生命过程的影响。另外还要开展应用研究,包括在航天器内人的生命保障系统的有关生物学问题,动植物在空间的生长发育,作为食物、空气和水的来源,以及利用空间特有的条件来推动生物技术的发展。

二、空间生物学的概念

空间探索的开展,既推动了老学科的发展和融合,也开辟了新的学科——空间生物学。

“空间”的含义,过去指的是宇宙中没有物质的区域。但后来知道在已知的宇宙中所有的部分都有物质,只是有的可能浓度极低。另外在地球大气以外的天体,也是我们要考虑的重要场所。因此,我们可以把空间看作是地球大气以外的领域。

空间,也有称为“外层空间”或“太空”。在本书中沿用习惯用的“空间”,不排除个别处使用“太空”。

但是地球大气就没有一个很明显的边界。不同的判据有不同的结果。在海平面上约 3 km 处人开始出现明显缺氧症状。使用纯氧,人可耐受高到 15 km 时的环境气压。19 km 时水可在人体温下沸腾,使人的组织迅速脱水。48 km 高度时不再能进行空气动力学飞行。192 km 高时物体运动不再受到阻力。但是地球引力的影响可扩展到 160 万 km 高。

至于“生命”,也没有一个被普遍接受的定义,但公认的是有生命的物质具有一些基本性质:(1)是应激的,可以对外界的刺激作出反应;(2)具有新陈代谢过程,其组成可以构成或分解;(3)可由内部生长;(4)会繁殖;(5)由原生质构成,由 C, H, O, N 和其他一些

元素组成。但是如果在地球之外有生命,其性质并不一定完全具备上述性质。有生命物质比无生命物质远为复杂,数学家企图利用信息含量来描述这种复杂性。也可以说宇宙中的生命的特性是能自我复制。

由于“空间”及“生命”两个概念所包含的范围有不同的说法,因此对于空间生物学也暂时不能给出一个严格定义,目前一般认为,空间生物学是对于地球上的或地球以外的生命,当其生存于地球大气层以外时,进行研究的一个学科。附带也考虑大气稀薄条件下出现的生物学问题。也可以说成是研究存在于或可能存在于空间的生物学现象及其规律。但是,地球区域和空间区域没有明显的界线。我们对空间生物学的范围应采取广义的概念,包括发生在地球与空间过渡地带的生物学现象。

三、空间生物学研究内容举例

“空间生物学”涉及很宽的范围,包括微重力对生命体系的效应,增加重力负荷(超重)对动、植物的效应,辐射对机体的效应,以及与航天员临床、健康和安全有关的问题。

空间生物学的研究要解决这样一些普遍问题,例如:在植物和动物的生理过程中,重力起了什么作用?在地球重力场条件下进化的动物和植物,怎样适应空间站上长时间的微重力条件?动、植物在空间条件下能否经历一个完整的发育上的生命周期,例如动物的由卵到卵,植物的由种子到种子?

进一步就要研究回答一些特殊问题,例如:各种植物激素在向重性中起何作用?在空间条件下骨骼去矿化的调节机理是怎样的?微重力条件对于脊椎动物的求偶、交配、子代饲养有何影响?等等。

第二节 空间的环境条件

地球上的生物长期以来适应了地球的环境。空间生物学是研究地球大气层以外的生物现象,因此我们先要知道地球以外和地球在环境条件上有多大的差别,然后才能了解在这些条件下,生物的结构、功能和行为有何改变?并如何与这些条件相适应?

一、地球的环境条件

(一)地球

地球是太阳系的一个行星。它的形状接近于球体,平均半径为 6 370 km,赤道半径 6 378 km,两极处 6 356 km,表面积 5.1×10^8 平方公里。地球的质量是 5.97×10^{24} kg。体积 1.083×10^{21} m³。

(二)大气

地球周围有大气层包围。大气的自身重量形成大气压,它随距地球表面的距离增加而逐渐下降。在海平面处,大气压的标称值是 $P_0 = 101.3$ kPa。大气压随海拔高度增高而下降,它随海拔 a 的变化可表示为(当 $a < 11\,000$ m 时)

$$P = P_0 \left(1 - \frac{0.0065a}{288}\right)^{5.255} (\text{kPa})$$

(三)重力

地球上的物理过程和生物过程都与地球重力场有密切关系。在地球的重力场中,作用于任何质量 m 的重力可表示为其质量 m 与重力常数 g 的乘积: $F = mg$

地球表面($r_0 = 6\,370$ km)的重力常数的平均值为 $g_0 = 9.81$ m/s²。重力常数和距地心距离有关,近似地与到地心的距离 r 的平方成反比。因此对在较高海拔处的物体,有

$$g = g_0 (r_0/r)^2 \quad \text{其中 } r \text{ 是物体距地球中心的距离。}$$

(四)辐射

地球接受到各种辐射,包括电磁辐射和电离辐射。电磁辐射是各种波长的电磁波。电离辐射是能在其经过的路径上打出电子的高能粒子或光子。地球的大气和磁场阻挡住它们的多数有害成分,如电离辐射的多种成分和太阳的电磁辐射的部分。

(五)磁场

地球的磁场屏蔽掉外层空间来的多数电离辐射,使人类能正常生存。当人到达外层空间时会失去这种防护。

二、地外环境

地外环境与地球环境在以下几方面有所不同:(1)辐射。在外层空间和太阳系的其它行星上,有广谱的各种粒子辐射和波辐射。(2)重力。自由飞行器在远离各行星的自由空间内基本上没有重力负荷。在其它行星上的重力加速度则有很大的不同。(3)大气。自由空间内是真空,没有大气。其它行星的大气的结构和行为在物理和化学上都与地球不同。(4)磁场。太阳系中每个行星的磁场在取向和强度上是不同的。也存在行星际磁场。

地外环境的这些不同的和极端的条件,对于任何空间飞行器,特别是对载人航天任务中的生命支持系统的设计,都有重要的影响。下面分述外层空间的不同环境特征。

(一)自由空间的辐射

地球的大气层阻挡了辐射的大多数有害成分,但在外层空间不存在这种防护。因此对于长期载人航天任务,对于进入外层空间的培养的微生物、藻类或植物,辐射都会引起严重问题。

1. 空间的电磁辐射

太阳系中的电磁辐射基本上都由太阳发出。太阳的电磁辐射在近地球处的能量密度约为 $1\ 390\ \text{W/m}^2$ 。星光的能量则小于 10^{-9}W/m^2 。在可见光区域,太阳辐射相当于表面温度为 $5\ 700\ \text{K}$

的黑体。太阳辐射的能量密度与距离的关系可表示为

$I = I_0/r^2$ 。其中 r - 到太阳的距离(AU); $I_0 = 1\,390\text{ W/m}^2$, 是在 1AU 处的辐射能流。

由此可计算出在太阳系内的行星和月球上的太阳辐射强度相当于在地球大气层顶端的倍数, 见表 1.1。

表 1.1 太阳系中行星上的太阳辐射强度

行星	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星	月球	火星卫星	小行星
太阳强度	666	1.91	1	0.43	0.04	0.01	0.003	0.001	0.0006	1	0.43	0.28

太阳电磁辐射的波长范围见表 1.2。能谱见图 1.1。

表 1.2 电磁谱的波长范围

辐射	γ 射线	X射线	紫外	可见光	红外	无线电波
波长(m)	$10^{-14} \sim 10^{-12}$	$10^{-12} \sim 10^{-8}$	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	10^{-7}	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^4$

对于在行星轨道上的飞行器, 还要考虑行星所发射的电磁辐射。地球的平均辐射能量约为 225 W/m^2 , 其在红外波段相当于 290 K 的黑体。

2. 空间的电离辐射源

空间存在三种不同类型的电离辐射。

(1) 太阳宇宙射线(SCR): 有规律成分 - 太阳风, 是由太阳向外喷射的高速低能粒子流。起源于日冕的高温膨胀。无规律成分 - 太阳耀斑, 由太阳磁层发生磁暴所产生, 在很短的时间内(几小时到几天)产生很高(上千倍)的辐射剂量, 在 11 年的太阳周期内发生一至二次。通常在日斑最大的几个月之后出现最大事件。每次的粒子组成、能谱和粒子流不同。其发生基本上不能预报, 预警时间只有几分钟到几小时。

(2) 银河系宇宙辐射(GCR): 由远处星球或更远的星系发生,

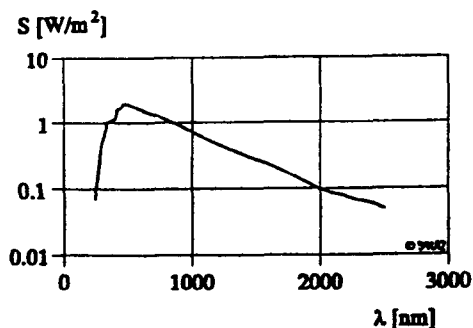


图 1.1 太阳的电磁辐射能谱

通过空间由各方向扩散到太阳系。在太阳极大期间,行星际磁场强度最大,宇宙射线粒子被散射离开地球,GCR 流最小。由于受地球磁场作用,飞行器所接受的 GCR 强度还与飞行高度和倾角有关。

(3) Van Allen 带

Van Allen 辐射带是在地球周围的一个面包圈形的区域。带中包含着被地球磁场捕获的高能(keV 到 MeV)粒子,即质子和电子。分为内带和外带两个同心的区域。

自由空间的电离辐射见图 1.2,包含大量不同能量的粒子。GCR 的能量高,穿透力最强。伴随太阳耀斑的巨大能流有潜在的致命危险。长期停留在 Van Allen 辐射带中也有危险。

(二)重力

人类和各种动、植物始终处于地球的重力场中。空间飞行的最重要的环境特征就是在自由空间的微重力(“失重”),或在太阳系其它行星上的低重力。

1. 行星上和自由空间的重力