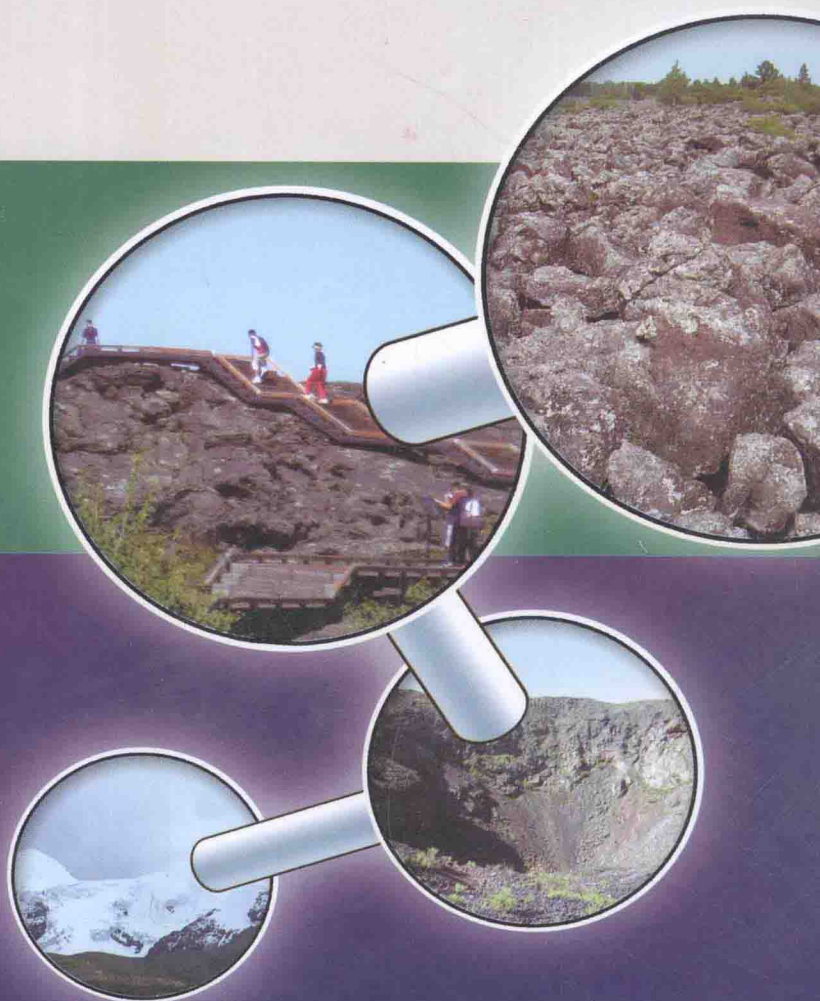


高等院校“十二五”规划教材

极端环境生物学效应与营养

Extreme Environmental Bioeffect and Nutrition

● 主编 卢卫红



哈尔滨工业大学出版社

高等院校“十二五”规划教材

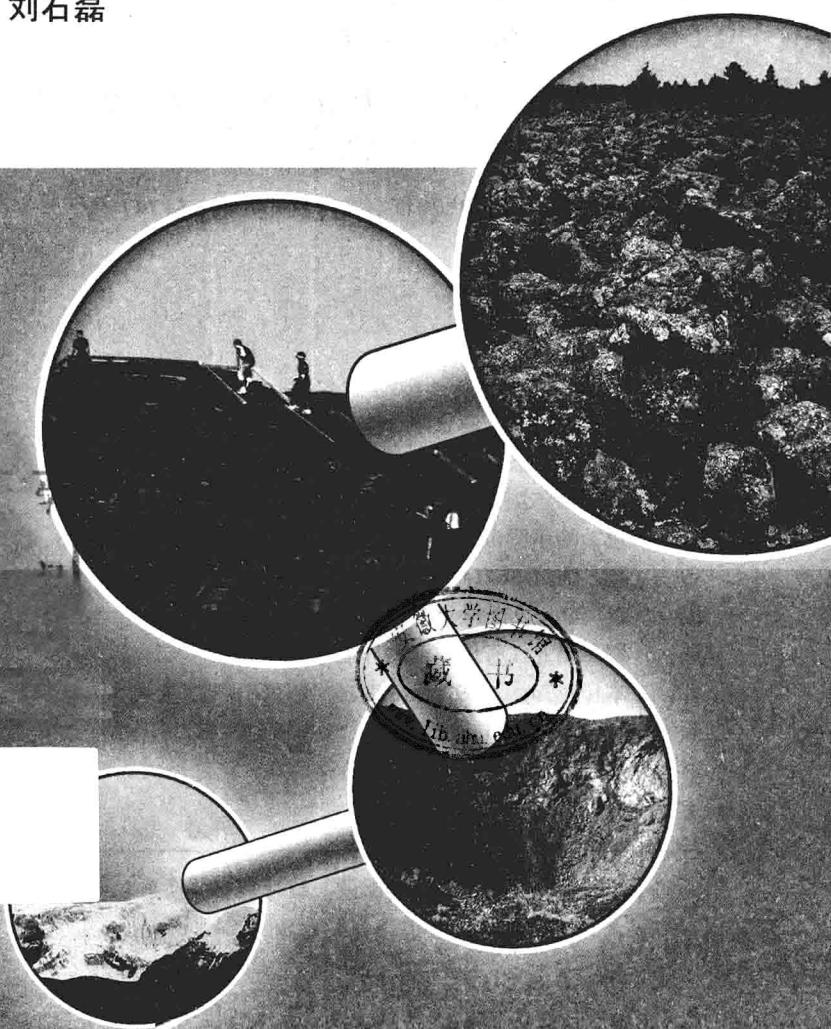
极端环境生物学效应与营养

Extreme Environmental Bioeffect and Nutrition

- 主 编 卢卫红
- 副主编 张树明 李冲伟 唐丽杰
- 参 编 谢海龙 孟 丹 刘石磊
白海玉 王荣春
- 主 审 王振宇



哈尔滨工业大学出版社



内 容 简 介

本书共分10章,系统地介绍了空间、远洋、潜水、野战、灾后、高寒、高温、高原、噪声等极端环境的特点以及对人体的影响,并从营养元素、中医理论、药食同源中药等角度进行了阐述。

本书可作为极端环境营养学科方向的硕士研究生的教材,也适合药学、营养学、食品科学、生物物理学、空间生物学等学科交叉方向的研究生学习使用,同时可供相关研究学科的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

极端环境生物学效应与营养/卢卫红主编. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2013.1

ISBN 978-7-5603-3664-0

I. ①极… II. ①卢… III. ①环境生物学-研究 ②营
养(生物)-研究 IV. ①X17 ②Q493

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 154747 号

策划编辑 杜 燕 赵文斌 李 岩

责任编辑 李长波

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 413 千字

版 次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3664-0

定 价 32.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

随着地球物理化学的变化,人类赖以生存的环境发生了很大的改变,在极端环境中生活或工作的人也日益增多,研究极端环境对人类的影响以及采用生物化学等各种方法进行损伤修复或防御,具有深远的意义。

本书是哈尔滨工业大学食品科学与工程学院在“985”学科建设过程中为极端环境营养学科方向的硕士研究生编写的教材,也是哈尔滨工业大学“十二五”研究生教材建设的立项教材。全书分为10章,分别从空间、远洋、潜水、野战、灾后、高寒、高温、高原、噪声九个方面,对环境特殊性、极端环境下的生物学效应与营养进行了介绍,并从营养元素、中医理论、药食同源中药等角度进行了阐述。

本书由哈尔滨工业大学卢卫红主编。卢卫红负责全书统稿并参与了各章编写;王荣春(哈尔滨工业大学)编写了第1章第1节;李冲伟(黑龙江大学)编写了第1章第2、3节;唐丽杰(东北农业大学)编写了第1章第4节;谢海龙(黑龙江中医药大学)编写了第4、5章;孟丹编写了第7、8、9章;刘石磊(黑龙江中医药大学)编写了第2章;张树明(黑龙江中医研究院)编写了第3、6章;白海玉(黑龙江中医研究院)编写了第10章。全书由哈尔滨工业大学王振宇担任主审。在这里对他们的辛勤劳动表示感谢!

同时,哈尔滨工业大学食品科学与工程学院的老师们对本书提出了宝贵的意见,任佩佩、张浩、赵越、高波等研究生在本书的编写过程中提供了大力帮助,哈尔滨工业大学出版社的编辑也为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢。

本书可作为极端环境营养学科方向的硕士研究生的教材,也适合药学、营养学、食品科学、生物物理学、空间生物学等学科交叉方向的研究生使用,同时可供相关研究学科的研究人员参考。

本书在编写过程中参考了大量的文献,在此对这些文献的作者表示衷心的感谢!

由于时间仓促,书中难免有疏漏之处,敬请广大读者批评指正!

编 者

2012年7月

目 录

第1章 空间环境生物学效应及营养	1
1.1 空间环境条件	1
1.1.1 重力	1
1.1.2 空间辐射环境	2
1.1.3 空间微重力环境	3
1.1.4 航天飞机发射过程中的环境变化	7
1.2 空间辐射生物学效应	11
1.2.1 空间辐射特点	11
1.2.2 辐射损伤机理	12
1.2.3 空间辐射环境下的人体生物学效应	17
1.2.4 空间辐射环境下的细胞效应	23
1.2.5 空间辐射对植物的影响	25
1.2.6 空间辐射环境引起基因突变和修复的特点	28
1.3 空间微重力环境生物学效应	40
1.3.1 微重力对心血管系统的影响	40
1.3.2 微重力环境的细胞水平研究	46
1.3.3 微重力对骨骼的影响	47
1.3.4 微重力条件下细胞水平的变化	51
1.3.5 微重力时的肌肉萎缩	55
1.3.6 心血管系统的功能改变	55
1.3.7 免疫功能和内分泌的变化	58
1.4 空间环境下的营养与修复	63
1.4.1 空间辐射环境损伤的营养与修复	63
1.4.2 空间微重力环境损伤的营养与修复	72
第2章 远洋环境生物学效应及营养	87
2.1 远洋环境特点	87
2.1.1 海洋气候	87
2.1.2 船舱环境	89
2.1.3 远洋环境对人体的影响	92
2.2 远洋环境下的生物学效应	94

2.3	远洋环境下的营养与修复	96
2.3.1	远洋环境下的营养与修复的研究现状	96
2.3.2	药食同源食物与功能性成分	98
第3章	潜水环境生物学效应及营养	105
3.1	潜水环境特点	106
3.1.1	高压	106
3.1.2	寒冷	109
3.1.3	黑暗	110
3.1.4	海洋有害生物	111
3.1.5	淹溺	116
3.1.6	污染水域潜水	117
3.2	潜水环境下的生物学效应	119
3.2.1	高压空气对机体的不利影响	119
3.2.2	水中浸泡对机体的不利影响	120
3.2.3	水下听觉	121
3.2.4	水下视觉	122
3.2.5	水下色觉	123
3.2.6	血液系统功能的变化	123
3.2.7	呼吸系统功能的变化	124
3.2.8	消化系统功能的变化	126
3.2.9	神经系统功能的变化	127
3.2.10	泌尿系统功能变化	128
3.2.11	内分泌功能的变化	128
3.2.12	免疫系统功能的变化	129
3.2.13	水下方位感下降	129
3.3	潜水环境下的营养与修复	130
3.3.1	潜水环境下的营养与修复的研究现状	130
3.3.2	药食同源食物与功能性成分	132
第4章	野战环境生物学效应及营养	144
4.1	野战环境特点	144
4.1.1	噪声	145
4.1.2	电离辐射	145
4.1.3	降雨	147
4.1.4	草原	147
4.1.5	沙漠	148
4.1.6	饥饿	150
4.2	野战环境下的生物学效应	151
4.2.1	高原高寒环境下肢体枪弹伤伤道特点及其对机体的影响	151

4.2.2	激光武器	152
4.3	野战环境对参战人员心理健康的影响	154
4.4	高温军事作业	154
4.4.1	军事作业卫生防护	154
4.4.2	军事作业水盐补充	155
4.4.3	军事作业人员的热习服锻炼	155
4.4.4	军事作业人员的防护	156
4.5	野战环境下的营养与修复	156
4.5.1	野战环境下的营养与修复的研究进展	156
4.5.2	药食同源食物与功能性成分	159
第5章	灾后环境生物学效应及活性成分的应用	164
5.1	灾后环境特点	164
5.1.1	地震	164
5.1.2	火灾	165
5.1.3	洪涝	165
5.1.4	雪灾	166
5.1.5	台风	166
5.1.6	火山	167
5.1.7	瘟疫	168
5.2	灾后环境下的生物学效应	169
5.2.1	地震	169
5.2.2	火灾	170
5.2.3	洪水	171
5.2.4	雪灾	172
5.2.5	火山	173
5.2.6	瘟疫	174
5.3	灾后环境下的营养与修复	175
5.3.1	灾后环境下的营养与修复的研究现状	175
5.3.2	药食同源食物与功能性成分	178
第6章	高寒环境生物学效应及营养	186
6.1	高寒环境特点	186
6.2	低温的生物学效应	187
6.2.1	冷环境对机体的影响	188
6.2.2	体热平衡	189
6.2.3	能量代谢	190
6.2.4	皮肤血管反应性	191
6.2.5	循环和呼吸系统	191
6.2.6	泌尿系统和血液系统	191

6.2.7	作业效率	191
6.2.8	内分泌系统	192
6.3	高寒环境下的营养与修复	192
6.3.1	高寒环境下的营养与修复研究现状	193
6.3.2	药食同源食物与功能性成分	194
第7章	高温环境生物学效应及营养	197
7.1	高温环境特点	197
7.2	高温环境下的生物学效应	198
7.3	高温环境下的营养与修复	202
7.3.1	高温环境下的营养与修复的研究现状	202
7.3.2	药食同源食物与功能性成分	206
第8章	高原环境生物学效应及营养	213
8.1	高原环境特点	213
8.1.1	温度	213
8.1.2	空气	214
8.1.3	气压	214
8.1.4	太阳辐射	215
8.1.5	紫外线	215
8.1.6	其他因素	215
8.1.7	高原缺氧	216
8.2	高原环境下的生物学效应	216
8.2.1	高原辐射生物学效应	216
8.2.2	高原寒冷、风强、干燥对人体影响	217
8.2.3	高原中暑对人体的影响	218
8.2.4	高原低氧对人体生理功能的影响	219
8.2.5	高原环境对人体的有益影响	229
8.3	高原环境下的营养与修复	231
8.3.1	高原环境下的营养与修复的研究现状	231
8.3.2	药食同源食物与功能性成分	233
第9章	噪声环境生物学效应及营养	239
9.1	噪声环境特点	239
9.2	噪声环境下的生物学效应	241
9.2.1	噪声对听觉系统的影响	241
9.2.2	噪声对其他系统生理功能的影响	242
9.3	噪声环境下的营养与修复	244
9.3.1	噪声环境下的营养与修复的研究现状	244
9.3.2	药食同源食物与功能性成分	246
第10章	营养知识	249

10.1	宏量营养素	249
10.2	维生素类	250
10.2.1	维生素 A 的生理功能	252
10.2.2	维生素 B 的生理功能	253
10.2.3	维生素 C 的生理功能	256
10.2.4	维生素 D 的生理功能	258
10.2.5	维生素 E 的生理功能	259
10.2.6	维生素 K 的生理功能	260
10.2.7	维生素 H 的生理功能	260
10.2.8	维生素 P 的生理功能	261
10.2.9	维生素 PP 的生理功能	261
10.2.10	维生素 M 的生理功能	261
10.3	“伪”维生素	262
10.4	矿物质类	263
10.5	药食同源食物及功能性成分	264
参考文献		268

第1章 空间环境生物学效应及营养

1.1 空间环境条件

地球周围有大气层包围,大气的自身重量形成大气压,它随着距地球表面距离的增加而逐渐下降。在海平面处,大气压的标准值是 $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$ 。大气压随海拔高度增高而下降。

地球接收到各种辐射,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多数有害成分,如电离辐射的多种成分和太阳的电磁辐射部分。

1.1.1 重力

重力是地球对地面上物体的万有引力的一个分力,万有引力的另一个分力提供了物体绕地轴做圆周运动所需要的向心力。物体所处的地理位置纬度越高,圆周运动轨道半径越小,需要的向心力也越小,重力将随之增大,重力加速度也变大。国际上将在纬度 45° 的海平面精确测得物体的重力加速度 $g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$ 作为重力加速度的标准值。绕地球轨道飞行的航天器不需要随地球自转,所以它受到的重力就等于它所受到的万有引力。在以后的描述中,根据习惯和场合的不同,有时候仍把在轨航天器或其内部物体受到的地球引力称为重力。

物体受到的重力(地球引力)随着高度而变化,某一点处重力的大小与该点到地心距离的平方成反比。在离地面 $200 \sim 1\,000 \text{ km}$ 高度范围内,重力是地面的 $75\% \sim 94\%$,即重力加速度为 $0.75 g_0 \sim 0.94 g_0$;在 $10\,000 \text{ km}$ 的高空,重力是地面重力的 15% ,即 $0.15 g_0$ 。通常,低轨道卫星的轨道高度为 $200 \sim 2\,000 \text{ km}$;中高轨道卫星的轨道高度为 $2\,000 \sim 20\,000 \text{ km}$;地球同步卫星的轨道高度为 $35\,786 \text{ km}$,位于赤道上空。航天器或卫星轨道的高度不相同,它们受到地球重力的大小也不同。但它们都是在地球引力(重力)的作用下绕地球运转的。

在行星际轨道飞行时,基本上可以假定是为重力条件,对靠近行星表面的卫星轨道,则在径向存在重力梯度。轨道上的卫星或空间站上,基本上受两个力的作用,即离心力和重力。在质心处两力平衡,可以看出在此点重力为零。若用一般方法称重,物体不表现出重量,称为失重。在飞行器上其他点,两力不平衡,在质心的远方,向心力超过重力,而在近端则小于重力。在卫星轨道上飞行器内,还由于设备及乘员的动作、稀薄大气的阻力以及天体的作用,即使在质心处,也有微小的加速度。这就不是对应于零重力,而是称为微重力。

微重力对于人体的生理过程有影响,突出的表现为心血管系统、骨骼和肌肉、感官和神经系统等方面的改变。因此对于在空间长期飞行的人类,如在空间站上或月球、火星基地上,需要引入人工重力。如使一个居住舱或整个空间站旋转,可以由其向心加速度形成人工重力。

人工重力与已知的地球重力有四个方面不同:人工重力的水平,重力的梯度,科里奥利力,交叉偶联角加速度。向心加速度是半径的线性函数,因此旋转舱内不同地点的向心力不同,形成一个线性的重力梯度。旋转舱的最重要的效应是由科里奥利力引起的。在旋转的系统内以线性速度 v 移动的物体所受的力称为科里奥利力。

若在旋转系统内发生一个角运动,轴与系统的旋转轴不平行,还会产生一个科里奥利交叉偶联角加速度。由此会有一个回旋力而使人出现眩晕、定向能力障碍和反胃。这些就是运动病的症状。

1.1.2 空间辐射环境

地球大气和地磁场阻挡了宇宙辐射中的大多数有害成分,只有电磁辐射中的可见光及部分紫外光、红外光和无线电波能到达地球的表面。空间的辐射环境究竟是什么样子呢?根据辐射的来源的不同,可把太空辐射分为三类。

1. 银河宇宙射线

银河宇宙射线(Galactic Cosmic Radiation, GCR)是指来自太阳系以外的能量极高,而通量很低的带电粒子。它们可能起源于超新星的爆炸。据观测,GCR 中的 98% 是质子及更重的离子,2% 是电子和正电子。在重粒子部分,质子占 87%,氦离子占 12%,其他重离子占 1%。在空间辐射研究中,常把这些高原子序数(High Atomic Number)和高能量(High Energy)的粒子简称为 HZE 粒子。银河宇宙射线粒子的能谱范围很宽,为 $10^5 \sim 10^{20}$ eV,而其注入量较大的粒子能量范围为 $10^2 \sim 10^5$ MeV。因为具有很高的能量,因此 GCR 的贯穿能力极强,一般质量厚度如 30 g/cm^2 难以完全屏蔽,反而因粒子与金属的相互作用会产生次级辐射粒子,而增加了其后空间内的辐射强度。它们通过物质时会产生强的电离作用,从而对生物大分子造成较大的损伤,所以这类粒子的生物学效应是空间放射生物学研究的主要内容。重带电粒子中,以碳、氧、氮、硅、铁等粒子对 GCR 总剂量的贡献最大。

银河宇宙射线在整个星际空间基本上是均匀分布的,但它们在星际空间中传播时也会受星际磁场的影响。在太阳系中,它们的时间特性明显受到太阳活动周期的影响。在太阳活动弱的年份,银河宇宙射线强度较高;而在太阳活动强的年份,由于太阳粒子事件增大了星际磁场的强度,使得更多的宇宙射线被星际磁场俘获,从而使其强度明显下降。例如,从已有观测及计算得知,在太阳活动高峰的 1989—1990 年,吸收剂量降至 0.04 mGy/d ,而在太阳活动极小的 1995—1996 年,吸收剂量升至 0.145 mGy/d 。

在地磁场以外,银河系宇宙射线的最大注量率(太阳活动最弱时段)约是:4 个质子 cm^{-2}/s ,0.4 个氦离子 cm^{-2}/s ,0.04 个高能重粒子 cm^{-2}/s 。身体中的一个面积是 $100 \mu\text{m}^2$ 的细胞核,将每三天被质子击中一次,每月被氦核击中一次,每年被 HZE 击中一次。

2. 太阳粒子事件

太阳粒子事件(Solar Particle Events, SPE)是指太阳上发生耀斑(指太阳色球层有时发生局部区域的短暂增亮现象)时发射出大量带电粒子,如质子、氦核及更重的离子。太阳粒子事件的主要成分是质子,因此有时也称为太阳质子事件。这些粒子的能量范围为10~500 MeV。太阳粒子事件的发生具有随机性,目前还无法进行准确预测。统计表明它主要发生在太阳活动的高峰年份,每个太阳周期有30~50次重要的粒子事件。太阳粒子事件一发生,质子通量在数小时内急剧增高(可达到 10^{10} 粒子/cm²)。如和平号空间站上记载了1992年10月发生的一次SPE,数天内吸收剂量从0.4 mGy/d增加到1.6 mGy/d。

由于这种辐射的高通量性和难以预测性,太阳粒子事件成为空间飞行,尤其是星际飞行中威胁性最大的辐射因素。在自由空间飞行中,必须为飞行人员提供由剂量计控制的报警系统。当测出剂量在数小时内达到一定水平时,飞行人员就应躲避到具有一定厚度的屏蔽层内,以保证不受到大的SPE的危害。

3. 俘获带辐射

地球磁场捕获的带电粒子形成俘获带辐射(Trapped Belt Radiation, TBR)。这类辐射是由美国科学家 Van Allen 博士于1958年首先发现的,故地磁场俘获带又称为 Van Allen 辐射带。这一辐射带主要由质子和电子组成,也包括少量的其他离子,如氦、碳和氧的原子核。这类粒子可能有几个来源,例如 GCR 和 SPE 中的带电粒子,或这些带电粒子与大气中的组分作用产生自由中子,自由中子再蜕变生成的质子和电子。

根据电磁学的知识可知,被地球磁场俘获的带电粒子的运动由三部分组成:由于洛伦兹力的作用而产生的绕地球磁力线的旋转,在南北半球的镜像点间的反冲(向着极区及背离极区),及相对于地球纵向(经度方向)的漂移(电子向东而质子向西)。

俘获带分为靠近地球的内辐射带和距离地球远些的外辐射带。内辐射为靠近地球的区域,半径可从地面以上约为6000 km处到地球半径的2.8倍,主要由不同能量的质子组成,能量范围为1~1000 MeV,能量大于30 MeV的质子通量可达 10^4 个cm⁻²。外辐射带为从地球半径2.8~12倍的区域,其主要成分是电子,通量可达内层电子通量的10~100倍。内外带之间是一个低辐射强度区域。

对在低轨道飞行的航天器,来自 Van Allen 带的辐照剂量相当低。然而,在非洲及南美洲间有一个强度最大的区域,延伸范围为西经0°~60°,南纬20°~50°。在那里,螺旋状的质子流在达到其镜像点前下沉到距离地球表面200 km的地方。这一区域被称为“南大西洋近地点”(South Atlantic Anomaly)。在低轨道、低倾角的航天飞机上飞行的人员,他们所受的大部分辐射,都是在200 km以上高度飞经这个地区时遭受到的。

典型的28.5°倾角飞行会使航天器在每天绕地球一周的15次轨道飞行中,有6次经过“南大西洋近地点”。所以,一般把“舱外活动”安排在其余的9次进行,以减少俘获带辐射对飞行人员的危害。

1.1.3 空间微重力环境

生活在地球上,人们每时每刻都处在1 g的重力环境中。重力对陆地上各种生物的

形态产生一定影响,这一研究可以追溯到 1638 年,由伽利略最先提出。他通过观察发现,大型动物的承重骨要厚于小型动物。随着动物体型的增加,其骨骼尺寸和质量也相应增加,这就是众所周知的放缩效应,见表 1.1。这种变化是由重力引起的,正如体型同样大小的海洋哺乳动物由于海水的浮力其骨骼尺寸要小于陆地哺乳动物,因此,相比较而言,大型动物比小型动物更容易受到重力的影响。

表 1.1 骨质量随着体重的增加而增加

动物	体重/kg	骨质量(体重%)
小鼠	0.02	8
狗	5	13 ~ 14
人	75	17 ~ 18

但是,随着科技的发展及载人航天技术的实现,微重力生物学已经成为当前一个非常重要的研究领域。宇航员在进入空间环境后,重力几乎完全消失,这使得宇航员处在一种失重状态,这种失重状态对于宇航员产生的影响和能否保证宇航员顺利进入太空成为人们越来越关注的问题。因此,在人类探索太空的过程中始终伴随着动物实验。回顾历史,为了保证人类在空间环境中的安全,美国和前苏联做了大量的动物实验以检测包括发射系统、辐射、微重力环境、生命保障系统和返回系统对于生物体的影响。最初,为了研究宇宙辐射的效应,一些小的生物体,例如昆虫和植物种子,被送到太空。然后是哺乳动物和灵长类的实验飞行,以检测加速和失重对生理的影响。早期的动物飞行是为了评价短期飞行的危害,为人类进入太空作准备。当研究发现生物体能够在空间的复杂环境中生存,人类顺利进入太空之后,动物搭载成为空间实验的研究对象。随着人类在太空中停留的时间越来越长,更多的生物学样品被送入太空,以研究空间环境中微重力和辐射对于生物样品长期处在太空环境下的生理效应。可以说,空间微重力生物学是随着航天技术的发展而建立起来的。

根据航天学的发展情况,可以将微重力生物学的发展分为准备阶段和系统研究阶段。

1. 准备阶段

准备阶段又可分为亚轨道飞行和轨道飞行。

(1) 亚轨道飞行

在这一期间,主要是进行近地实验,采用生物火箭和生物卫星模拟失重,以检测微重力环境对于生物体造成的影响。在飞行器制造史上,动物往往先于人类被送入太空。1783 年,一只鸡、一只鸭子和一只羊乘坐热气球升到约 450 m 高的空中,成为第一批乘坐热气球的“乘客”。飞行约 8 min 后,三只动物顺利降落在 3 km 外的森林中。在动物实验证明高空环境能够生存后,人类开始搭乘热气球并首次经历了缺氧状态。

1946 年 6 月,V-2 火箭带着果蝇和玉米种子被发射到太空中,这是生物体首次被送入太空中。不久,更多的物种被 V-2 火箭带入太空中,甚至包括苔藓。1946—1949 年间,美国先后发射了 8 枚生物火箭,里面装有植物种子、细菌芽胚和果蝇等生物。1948

年,美国首次进行了猴失重飞行研究,搭载的是一只4 kg被麻醉的叫艾博的恒河猴,飞行高度62 km,失重时间仅为2~3 s,可惜由于太空舱过于狭小导致艾博在着陆前就因为呼吸困难而死亡。1949年,美国对太空舱进行改进后再次将恒河猴送入太空,遗憾的是由于降落伞系统失火导致其受冲击而死亡。所幸,它的各项生理数据包括呼吸和心率等已经被记录并且传回地面,这些数据证实恒河猴在整个飞行过程中(飞行高度133 km,起飞中加速度为5.5 g,降落时为13 g)能够生存。工程学的飞速发展使得在飞行中监测各项生理指标得以实现。接下来的V-2飞行实验(1950年)搭载的是小鼠,搭载小鼠的目的是为了研究重力改变后在清醒状态下小鼠的反应。基于这个目的,小鼠的飞行舱内安装有可以定时拍摄照片的照相机。遗憾的是,由于返回系统出现了问题,小鼠在着陆时受冲击而死亡。传回来的照片显示,在极短的微重力时间内,小鼠的骨骼肌肉并没有出现问题。

1951年和1952年发射的“空蜂”号火箭比以前的V-2火箭在技术上有了极大的改进,数次“空蜂”号火箭实验搭载了大量的动物和植物飞入太空并将它们安全地带回地面,同时“空蜂”号火箭上安装有可以记录心跳、呼吸、血压的设备。1951年,美国“空蜂”号火箭将1只猴子和11只小鼠发射到71 km的高空,其中,9只小鼠仅仅用于观察暴露在空间环境的各种辐射的影响,另外2只小鼠用于观察短期微重力的影响,小鼠和猴子都顺利地回到地面,不过,猴子在着陆2 h后死亡。

1958年12月,“木星”号弹道飞弹在美国佛罗里达发射升空,其上搭载了由美国海军训练的南美松鼠猴,遗憾的是返回地面时降落伞系统出现问题而无法打开,最终导致松鼠猴的死亡。自动测量记录仪传回的数据显示,在飞行过程中,松鼠猴可以承受发射时的10倍重力。同年,美国利用生物火箭进行了3次飞行高度为224 km的载小鼠亚轨道飞行实验,以研究动物在20~30 min失重时间内的生理反应。1958—1959年期间,美国又利用“丘比特”火箭进行了3次搭载动物飞行实验。1959年,一只恒河猴和一只松鼠猴搭载“木星”号飞行并成为最先能够在空间飞行中存活的猴子。它们在短短16 min的飞行过程中承受了38倍重力和9 min的微重力后安全返回地面,各项数据显示它们状态良好。

当时苏联空间动物实验领先于美国,在1949年以前,苏联就曾用A-3和A-4系列火箭将狗送入空间。1949—1959年间共进行了26次火箭实验,共有52只狗参加实验。1959年,苏联将两只狗和一只兔子发射到160 km以上的高空,发射总质量为2 kg,创造了发射质量最高的纪录。除了美国和苏联,还有其他国家相继将动物送到亚轨道进行飞行实验,1961年和1962年,法国将大鼠送入太空,1963年又将两只猫送入太空,猫的脑中植入电极以检测神经冲动。第一只猫顺利地活着返回地面,第二只却没有那么幸运。1967年3月,法国最后用生物火箭送入太空的动物是两只猴子。1964年和1965年,我国用生物火箭将大鼠和小鼠送入太空进行亚轨道飞行,1966年又搭载了两只狗。

1948—1952年期间,美国共发射了8枚生物火箭,搭载的动物包括7只猴子和14只小鼠,生物火箭的飞行高度为58~134 km。

(2) 轨道飞行

世界上第一颗生物卫星是由苏联在1957年发射的,该卫星称为“人造地球卫星2

号”,搭载有一条名为莱卡的雌性猎狗(见图 1.1),它是由地球进入太空的第一只动物,卫星在轨道上飞行了 6 天。1960—1961 年两年间,苏联利用返回式飞船先后进行了 5 次实验,后 4 艘飞船上都载有动物,包括狗、大鼠、小鼠、豚鼠、蛙和果蝇等。美国的卫星实验主要是以黑猩猩作为研究对象,1961 年一只叫哈姆的黑猩猩在“水星”号飞船的座舱内完成了 16 min 32 s 的亚轨道飞行实验(见图 1.2),同年 11 月,另一只黑猩猩搭乘“水星”号完成了 3 圈轨道飞行。生物卫星的优势在于比生物火箭飞行的时间要长,因而具有较长时间的失重环境,可以获得更多的实验资料。



图 1.1 莱卡在加压密封舱内



图 1.2 哈姆返回地面后进行体检

在发射到高空后,对这些小动物的脉搏、呼吸、动脉压等进行记录,同时记录心电图,拍下它们的活动,以观察失重条件对生物体生理机能和行为反应的影响。

2. 系统研究阶段

通过之前生物火箭和生物卫星的搭载证实,人类可以在微重力环境中生存,1961 年 4 月,苏联航天员加加林成为第一个进入太空的人。在这之后,进入太空中的动物数量有所减少,研究也集中在人的身上。虽然之前包括小鼠在内很多动物都曾进入太空,但空间环境对动物的基本生物学反应的系统性研究始于 1966 年美国的生物卫星计划。生物卫星 1 号和生物卫星 2 号计划是研究微重力环境对于生物体的生长发育、形态、生化反应等影响。这期间搭载的生物体包括植物、细菌、果蝇、蛙卵等。

1960—1972 年间,“阿波罗”计划共进行了 16 次发射,大部分飞行并没有搭载动物,阿波罗 16 号搭载了线虫,阿波罗 17 号搭载了 5 只囊鼠,目的是为了研究空间辐射的危害。苏联从 1970 年开始发射以“宇宙”命名的一系列生物卫星,之后还邀请各国参加。20 世纪 70 年代发射的“宇宙”系列卫星中携带的哺乳动物主要有大鼠,后来还增加了猴子。1971 年苏联发射了世界上第一个载人空间站——“礼炮 1 号”空间站。1973 年美国发射了“天空号”空间站作为其实验性空间站。1986 年苏联又将“和平号”空间站送入太空。空间站的发射为研究长期微重力环境对生物体影响提供了条件。

苏联在“礼炮号”空间站与“和平号”空间站中都进行过动物实验。动物实验研究的范围很广,包括遗传学、胚胎学、细胞学、组织学、形态学、解剖学、生理学、生物化学、行为学、放射生物学等。研究的结果不仅证实了以前短期航天飞行时所观察到的一些生物现象,而且还获得了一些新的发现。美国在“天空号”空间站中研究过空间环境对小鼠昼夜节律的影响及微重力环境对蜘蛛织网能力的影响。除此之外,美国还和欧洲空间局联合专门在航天飞机上设置空间实验室进行动物实验,研究细胞生物学、发育生物学和生理

学等以及失重环境对动物生长、血液、免疫、心血管、肌肉、骨骼等方面的影响。

我国空间微重力生物学研究始于20世纪60年代,在1964—1966年间,我国发射的T7A-S1和T7A-S2生物探空火箭,其上搭载有狗、大白鼠和小白鼠等动物及多种生物样品试管,试管内分别放有果蝇、细胞、多种微生物和多种酶,发射高度为70~80 km,目的在于研究火箭发射过程中的主动段、失重段和返回段对动物机体的影响。

20世纪80年代以后,我国利用返回式卫星进行了多种生物样品的搭载和一些生物学实验,其中包括动物细胞搭载、空间蛋白质结晶实验、微生物培养箱实验以及二元和三元生态系统的搭载实验。1996年利用返回式科学实验卫星(JB-1号)进行了一次较大规模的空间生物学效应实验,搭载了包括动物、植物和微生物在内的33种科学样品。在我国发射的“神舟”系列飞船上搭载了通用生物学培养箱、蛋白质结晶装置、动植物细胞融合装置等空间生命科学实验设备,进行了大量的空间生物学实验研究。

1999年11月,我国成功发射“神舟一号”返回式飞船,其上搭载的植物种子包括青椒、甜瓜、番茄、西瓜、豇豆、萝卜等品种以及甘草、板蓝根等中药,此外,还搭载了有利于心脑血管疾病药物开发的 *Monascus* 生物活性菌株。“神舟二号”是我国第一艘无人航天飞船,它所进行的空间生物效应研究,是我国航天领域首次进行多物种综合性生物学研究。飞船上携带有空间通用生物培养箱,箱内装有石刁柏、圆红萝卜种子,蛋白核小球藻、鱼腥藻、螺旋藻、果蝇、小型动物龟心肌组织,灵芝大肠杆菌,大鼠心肌细胞、胚胎、腿部肌肉等19类25种植物、动物、水生生物、微生物、细胞和细胞组织,此外还有15种蛋白质和其他生物大分子。

2002年发射的“神舟三号”飞船上搭载的生物样品包括蛋白质和细胞,除此之外,“神舟三号”飞船首次成功地搭载了植物的试管苗。其目的是为了了解太空环境对于胚胎发育、遗传和繁殖的影响,为载人航天提供依据。“神舟四号”飞船于2002年12月30日在酒泉卫星发射中心成功发射,它是中国“神舟”飞船在无人状态下考核最全面的一次飞行实验。其上进行了空间细胞电融合实验,将纯化的乙肝疫苗病毒表面抗原免疫的小鼠B淋巴细胞和骨髓细胞进行动物细胞电融合;将有液泡的黄花烟草原生质体和脱液泡的“革新一号”烟草原生质体进行植物细胞电融合。此外,还进行了生物大分子和细胞的空间分离纯化实验等空间科研项目。“神舟四号”飞船还搭载了甜瓜、番茄、西瓜、向日葵、蝴蝶兰、烟草、雅安黄连槐、水稻、小麦、棉花、玉米、大豆、蔬菜、水果、药材、花卉等上百种农作物和植物的种子或样品。

2003年10月15号,“神舟五号”载人飞船在酒泉卫星中心发射升空,中国航天第一人杨利伟飞行21 h、14圈后顺利返回,这标志着我国载人航天新纪元的开始。2005年发射的“神舟六号”返回式飞船上搭载了花卉种子、普洱茶、微生物菌种、农作物种子、鸡蛋、蚕卵等。

1.1.4 航天飞机发射过程中的环境变化

航天器在太空的飞行环境与地球环境在诸多方面都有所不同,航天器内部的环境与其外部环境也有着很大的不同,下面分别介绍舱内环境的这些不同特征。

1. 舱内辐射环境

航天器内部的辐射环境不仅与其所处轨道的空间辐射环境有关,同时也与航天器壳体材料及其厚度相关。虽然航天器壳体能阻止宇宙射线中的部分粒子进入舱内,并可对进入舱体内的粒子起到能量衰减的作用,但是,航天器壳体也可导致次级粒子的产生,如电子在壳体材料中受阻止产生韧致辐射等。现在的航天器上主要的舱壁材料除了铝合金外还有其他复合材料。实验证明,依靠增加壳体金属层厚度来减少宇宙射线对航天器内部的辐射是不可行的。目前这方面的研究主要集中在对壳体加适当涂层,以减少宇宙射线对航天器内部的辐射。

对于近地飞行的航天器,如果航天器的壳体材料及其厚度、飞行的轨道和倾角、飞行所处的太阳活动周期时段等不同,它们内部的辐射环境也就不同。即使在同一航天器的同一次飞行中,位于航天器不同位置的地方,它们的辐射环境也不尽相同。对于不同的地球轨道,航天器内部的辐射剂量率在 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ Gy/s 之间,对于近地高倾角地球轨道,0.5 cm 厚的铝壳体内年辐射剂量少于 10 Gy。而在辐射环境最为恶劣的地球轨道(约为地球同步轨道的高度一半的 18 000 km 的地方),航天器内部的年辐射剂量可达 10^4 Gy。

为了考察和研究空间辐射对宇航员和舱内仪器设备的影响,在每次飞行中,都应对航天器内的辐射吸收剂量进行探测。实际的测量表明了剂量对轨道参数的明显依赖关系,如前苏联“和平号”空间站的轨道倾角为 51.6° ,轨道高度为 300 ~ 400 km。利用组织等效计数器进行的连续 12 天的监测结果表明,吸收剂量率变化范围为 0.1 ~ 0.8 mGy/d,与太阳的活动期明显相关;前苏联在轨道倾角为 $53^\circ \sim 70^\circ$,高度为 210 ~ 410 km 的飞行中,测出的舱内平均剂量率为 0.1 ~ 0.3 mGy/d;美国的航天器,在轨道飞行倾角为 $28^\circ \sim 57^\circ$,高度为 280 ~ 528 km 的飞行中,测得的舱内平均剂量率为 0.04 ~ 1.072 mGy/d,最大剂量率出现在最高飞行高度为 510 km 的航天飞机飞行中;我国的多次返回式卫星飞行也都带回了辐射剂量的探测结果,如 1987 年的两颗卫星的辐射水平为 0.21 ~ 0.3 mGy/d。从每次飞行的总剂量来说,美国登月的阿波罗飞行及近年航天飞机飞行中的平均总剂量为 10 mGy,而 20 世纪 70 年代飞行时间较长的天空实验室总剂量略低于 80 mGy。

对于远离地球的载人深空探测,传统的航天器长时间地暴露在宇宙辐射环境下,各种高能粒子直接或间接引起的舱内辐射环境会使其内部设施的功能失效,特别是会严重地威胁航天员的身体健康。进行深空探测时,航天器内部的辐射环境问题已成为制约载人深空探索进一步发展的瓶颈。与此相关的空间环境辐射致生物损伤和变异机理的研究,已是目前各宇航大国在空间生命科学领域里资金投入最多的研究方向。其主要目的是在不可能完全屏蔽空间辐射的条件下,尽可能地降低舱内器件及航天员所接受的辐射剂量。

2. 舱内微重力环境

航天器在近地轨道绕地球飞行时,其内部存在着持续的、较长时间的微重力环境。为了能在航天器中工作和生活,需要进行微重力研究;同时,这些空间飞行器也为微重力科学的发展提供了实验条件。

失重的概念:如果以绕地球轨道飞行的航天器为参照系,则根据牛顿力学,它是个非