

主 编 王振宇
主 审 卢卫红
副主编 程翠林 赵海田

空间营养学

KONGJIAN
YINGYANGXUE



国防工业出版社
National Defense Industry Press

空间营养学

主 编	王振宇		
主 审	卢卫红		
副主编	程翠林	赵海田	王 路
	焦 岩	马立明	樊梓鸾
	白海娜	姚 磊	左丽丽
	贡可力	田双起	

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书重点介绍了空间辐射和微重力对机体的伤害以及营养防御与修复对策,分别揭示了微重力和空间辐射对人体能量代谢系统、心血管系统、骨骼系统、神经系统、免疫系统、肠道微生态系统、细胞生物学及DNA的影响与营养调节机制;同时论述了空间环境对航天员心理的影响及营养对策。空间营养学研究的意义在于发现因高能粒子及重力的改变造成机体改变的机理,进而通过对机理的分析找到有效的营养防护与修复措施。通过营养调节减少航天员在太空中长期工作对身体造成的伤害,以满足载人航天活动的需要,对推动载人航天事业的发展具有重要的作用。

本书主要供从事载人航天生物学、特殊营养学研究的科技工作者以及有关院校相关专业的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间营养学 / 王振宇主编. —北京:国防工业出版社, 2011. 5

ISBN 978-7-118-07454-3

I. ①空... II. ①王... III. ①航天心理学②航天员 - 营养学 IV. ①B845.66②R851.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 077601 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 13½ 字数 326 千字

2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 29.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

随着航天事业的发展,航天员在太空停留的时间越来越长,这就为空间科学提出了严肃的问题。由于太空中辐射强度及重力的改变,使机体长期处于极端状态下,这就不可避免地使机体产生一系列适应性生理变化。这些变化可能危及航天员的健康,因而引起各国航天医学界的重视。随着人类载人航天飞行研究的不断深入,以及登月和空间站的建立,发达国家载人航天战略计划将向着月球基地、火星登陆、外太空远程飞行等方向发展。空间极端环境对航天员身体伤害成为制约航天战略实施的瓶颈,空间辐射及微重力是威胁航天员健康甚至生命安全不可忽视的因素。星际载人航天与低地球轨道飞行有很大的不同,不仅脱离了地球磁场的自然防护条件,而且在深部空间滞留时间很长,同时银河宇宙辐射和太阳粒子事件的影响将加大,一旦遭遇特大太阳粒子事件,将有可能威胁到航天员的生命安全。因此,深入了解空间极端环境特点及其危害程度,并研究防护途径对保证航天员完成任务极为重要。由于受到飞船负荷的限制及航天员出舱工作时单靠屏蔽等物理防护很难实现,所以,应采用营养素、药物及物理等综合措施来提高机体对辐射和微重力环境伤害的抵抗能力,这是对空间极端环境影响的一种积极有效的方法。空间营养学的研究是我国载人航天医学研究中重要的组成部分。

本书重点介绍了空间辐射和微重力对机体的伤害以及营养防御与修复对策,分别揭示了微重力和空间辐射对人体能量代谢系统、心血管系统、骨骼系统、神经系统、免疫系统、肠道微生态系统、细胞生物学及 DNA 的影响与营养调节机制;同时论述了空间环境对航天员心理的影响及营养对策。空间营养学研究的意义在于发现因高能粒子及重力的改变造成机体改变的机理,进而通过对机理的分析找到有效的营养防护与修复措施。通过营养调节减少航天员在太空中长期工作对身体造成的伤害,以满足载人航天活动的需要,对推动载人航天事业的发展具有重要的作用。

编者
2010 年 2 月

目 录

第1章 概述	1
1.1 空间环境特点	1
1.1.1 辐射	1
1.1.2 微重力	3
1.2 空间环境对人体的影响	4
1.2.1 空间辐射损伤的生物效应	4
1.2.2 空间微重力环境对人体的生物效应	7
1.3 空间极端环境伤害的防护	10
参考文献	11
第2章 微重力对人体代谢的影响	14
2.1 微重力对人体能量代谢与利用的影响	14
2.1.1 正常状态下人体能量代谢与利用	14
2.1.2 微重力环境下能量的代谢与利用	17
2.1.3 微重力条件下能量需求和营养保障措施	20
2.2 微重力对蛋白质合成、氨基酸代谢的影响	24
2.2.1 概述	24
2.2.2 微重力对蛋白质合成及氨基酸代谢的影响	31
2.2.3 防护措施	35
2.3 微重力对钙代谢和骨骼系统的影响	37
2.3.1 微重力	38
2.3.2 人体钙的代谢	40
2.3.3 人体的骨骼系统	42
2.3.4 失重对钙代谢和骨骼系统的影响	44
2.3.5 失重性骨质丢失的机理	46
2.3.6 防治对策	47
参考文献	51
第3章 空间微重力对心血管及神经系统的影响	54
3.1 空间微重力对心血管系统的影响	54

3.1.1	心血管结构和功能概述	54
3.1.2	心血管系统的功能	55
3.1.3	空间微重力对心血管系统的影响	55
3.1.4	空间微重力对心血管系统影响的对策	60
3.2	空间微重力对神经系统的影响	61
3.2.1	空间神经生物学	61
3.2.2	微重力和神经细胞、神经系统的关系	67
3.2.3	神经—内分泌—免疫系统的相互作用	70
3.2.4	克服微重力对神经系统影响对策	71
	参考文献	73
第4章	微重力对体液与血液的影响	77
4.1	微重力对体液的影响	77
4.1.1	体液系统的基本结构	77
4.1.2	微重力对人体体液及体液电解质的影响	79
4.1.3	减缓对策	83
4.2	微重力对血液及其组成的影响	85
4.2.1	人体的血液组成	85
4.2.2	微重力对血液系统的影响	85
4.2.3	失重后再适应	97
4.2.4	由失重引起的与血液相关的常见疾病	98
4.2.5	防护措施	98
4.2.6	航天营养学方面的研究	99
	参考文献	102
第5章	微重力对人体肠道微生态的影响	104
5.1	人体肠道微生态概述	104
5.1.1	人体肠道微生态简介	104
5.1.2	人体正常肠道微生态菌群的生理功能	104
5.1.3	人体肠道中的益生菌	105
5.2	空间微重力对人体肠道微生态的影响	107
5.3	饮食因素对肠道微生物菌群的影响	108
5.3.1	酸奶、乳酸产生的细菌对肠道微生物菌群的影响	108
5.3.2	牛奶对肠道微生物菌群的影响	109
5.3.3	大豆对肠道微生物菌群的影响	109
5.3.4	膳食纤维对肠道微生物菌群的影响	109

5.3.5	果蔬饮料对肠道微生物菌群的影响	109
5.4	中药活性成分对肠道微生物菌群的影响	109
5.5	微生态保健食品的研制与应用	110
5.5.1	微生态保健食品的定义和种类	110
5.5.2	以双歧杆菌为主的活菌制品	111
5.5.3	以双歧杆菌促进因子(双歧因子)为中心的保健食品	111
5.5.4	双歧杆菌和双歧因子配伍的合生元制剂	111
5.5.5	微生态保健食品的应用	111
	参考文献	112
第6章	空间辐射对免疫系统的影响	114
6.1	概述	114
6.2	免疫器官和免疫组织	114
6.2.1	免疫的概念	115
6.2.2	免疫系统的组成	115
6.2.3	免疫系统的功能	117
6.3	辐射对免疫系统伤害	117
6.3.1	对免疫组织的辐射损伤	117
6.3.2	辐射对 DNA 的辐射危害	118
6.4	对免疫系统辐射损伤的营养修复	119
6.4.1	多糖类	120
6.4.2	黄酮类	123
6.4.3	多酚类	126
6.4.4	皂甙类	127
6.4.5	植物蛋白	127
	参考文献	128
第7章	辐射对中枢神经系统的影响	131
7.1	神经系统概述	131
7.1.1	神经系统基本结构	131
7.1.2	神经系统的基本活动方式	132
7.1.3	神经系统的区分	132
7.2	辐射对中枢神经系统(CNS)的影响	132
7.2.1	电离辐射对 CNS 的影响	132
7.2.2	电离辐射对血管系统的影响	135
7.2.3	辐射对特定的脑结构区域影响	135

7.3 CNS 的辐射损伤修复..... 135

7.3.1 神经营养因子 135

7.3.2 肌苷对神经细胞死亡的影响 136

7.3.3 体外诱导人 CNS 金属硫蛋白合成对电离辐射的神经防护作用 137

7.3.4 营养物质对 CNS 辐射损伤的防护 137

参考文献 138

第 8 章 代谢组学与辐射损伤..... 140

8.1 代谢组学概述..... 140

8.1.1 代谢组学 140

8.1.2 代谢组学的技术平台 141

8.2 辐射对营养素代谢的影响..... 143

8.2.1 蛋白质代谢 143

8.2.2 脂肪代谢 144

8.2.3 碳水化合物代谢 144

8.2.4 维生素代谢 144

8.2.5 水盐代谢 145

8.3 辐射损伤的营养问题..... 145

8.4 代谢组学与辐射损伤研究..... 147

参考文献 148

第 9 章 辐射对细胞生物学的影响..... 150

9.1 细胞生物学概述..... 150

9.1.1 细胞生物学简史 150

9.1.2 细胞周期调控 151

9.1.3 细胞分化 154

9.1.4 细胞衰老 154

9.1.5 细胞坏死与凋亡 154

9.1.6 肿瘤细胞 155

9.2 空间辐射环境与辐射生物学..... 155

9.2.1 空间电离辐射 155

9.2.2 辐射生物学效应分类 156

9.2.3 影响辐射生物学效应的因素 157

9.3 空间辐射的细胞生物学效应..... 158

9.3.1 细胞的辐射敏感性 158

9.3.2 细胞周期的变化 158

9.3.3	染色体畸变	159
9.3.4	电离辐射对生物大分子的作用	159
9.3.5	细胞损伤的修复	160
9.3.6	辐射引起细胞凋亡的信号通路	161
9.4	辐射伤害的检测	163
9.4.1	DNA 损伤监测及修复相关酶	164
9.4.2	细胞遗传学方法	166
9.4.3	体细胞基因位点突变分析技术	166
9.4.4	电子自旋共振技术	168
9.4.5	单细胞凝胶电泳	168
9.5	辐射的防护	169
9.5.1	细胞因子	169
9.5.2	巯基化合物	169
9.5.3	激素	170
9.5.4	天然产物提取物	170
	参考文献	171
第 10 章	辐射的氧化应激	174
10.1	氧化应激的生物标志物	174
10.2	辐射引起的氧化应激	175
10.2.1	辐射及自由基效应机理	175
10.2.2	辐射氧化应激诱导的生物效应	176
10.3	辐射氧化应激的防护策略	178
10.3.1	抗氧化酶对辐射的防护	178
10.3.2	抗氧化剂在辐射防护中的作用	180
10.3.3	抗氧化物间相互关系	180
10.4	辐射氧化应激防护的营养素条件	181
	参考文献	182
第 11 章	空间环境对航天员心理的影响及对策	185
11.1	航空环境对人心理的影响	185
11.1.1	环境心理学概述	185
11.1.2	航天员可能出现的心理问题	186
11.2	改善航天员心理问题的对策	187
11.2.1	工程设计上的心理保障	187
11.2.2	改善生活条件	188

11.2.3 心理训练 188

11.2.4 成立心理支持小组 189

11.3 饮食营养与心理健康 191

11.3.1 改善睡眠的功能食品 191

11.3.2 改善记忆的功能食品 197

11.3.3 维生素 C 的营养功能 200

11.3.4 抑郁症食疗 201

11.3.5 B 族维生素的保健作用 201

11.3.6 含钙食物的保健作用 202

参考文献 203

第1章 概述

随着航天事业的发展,航天员在太空停留的时间越来越长,这就为空间科学提出了严肃的问题。由于太空中辐射强度及重力的改变,机体长期处于极端状态下,不可避免地会产生一系列适应性生理变化。这些变化可能危及航天员的健康,因而引起各国航天医学界的重视。空间营养学研究的意义在于发现因高能粒子及重力的改变造成机体改变的机理,进而通过对机理的分析找到有效的营养防护与修复措施。通过营养调节减少航天员在太空中长期工作对身体造成的伤害,以满足载人航天活动的需要。

1.1 空间环境特点

1.1.1 辐射

在空间环境中被发现的独一无二的物质因素是来自太阳的电离辐射,这种因素同时也是太阳系的外部资源。长期暴露于穿透性射线中,即使是在相对低的剂量水平下,多年后也会引起癌症的发生。而对于高辐射水平的辐射,如伴随巨大的太阳耀斑,只需短时间暴露就可能引起在数十天或数十小时内的严重损伤,甚至死亡。在太空长期执行任务期间(如一次火星旅行),航天员即使在太空船的保护下,也会受到极高的辐射。所以,为了估计空间射线对健康的潜在损伤,并找到可能减小辐射损伤的防护剂,了解空间放射线的性质是极为必要的。

航天辐射危险主要来源于天然空间电离辐射源,主要包括银河宇宙辐射(亦称银河宇宙线)、太阳粒子事件(亦称太阳质子事件)和地磁捕获而形成范艾伦辐射(亦称地球辐射带)(表1-1)。空间辐射水平要比地球表面的辐射水平高,并且高能带电粒子引起的人体生物学损伤要比X射线和 γ 射线大很多。地球表面辐射水平较低的原因:①地磁场能够使一些带电粒子偏离赤道区域,螺旋下降进入几乎无人居住的极地区域。②地球大气中的空气和水蒸气可以中断、减少或阻止来自宇宙空间的许多带电粒子。

表 1-1 空间辐射环境的特点

射线来源	平均能量/(MeV/u)	粒子类型	相对数量/%
银河宇宙射线	2000	质子	85
		α 粒子	14
		重离子	1
太阳粒子事件	100	质子	90 ~ 95
		α 粒子	5 ~ 10
		重离子	0.08 ~ 0.17
范艾伦辐射带 (内部带)	> 34	质子	> 99
		电子	< 1
范艾伦辐射带 (外部带)	> 0.5	电子	> 99
		质子	< 1

1. 银河宇宙射线

银河宇宙辐射是载人航天必然暴露的重要辐射源之一。近几个世纪以来,物理学家已经对银河宇宙射线进行了广泛的研究,清楚地了解了它的光谱组成。目前贯穿整个宇宙的银河射线包括 98% 的质子和重离子,2% 的电子和正电子。而对于宇宙辐射危害的评价,最重要的能量范围是 $0.1\text{GeV/u} \sim 10\text{GeV/u}$,所有的辐射危害问题都是能量低于 10GeV/u 的宇宙辐射粒子造成的。其中主要成分是约占 87% 的质子、12% 的 α 粒子以及约占 1% 的重离子。目前宇宙空间中存在的各向同性高能射线,是由太阳系外部的一种或多种物质产生的。由于辐射能量低于 0.1GeV/u 的粒子易受太阳风和星际磁场相互作用产生的局部防护效应的影响,使其强度减少,所以,相对于高能粒子而言它更多变。这种减少在太阳 11 年周期性循环中的活跃期间体现得尤为明显,因为这个时候来自于银河宇宙射线的光谱,被太阳发射的物质所改变。这些太阳发射的物质包括来自太阳风的高度离子化且极热的气体,这些气体形成了一个径向的远离太阳的磁区域。随着太阳自转,一系列的作用力使得它的路径发生弯曲,星际空间中银河宇宙射线的强度也在地磁场的作用下削弱,其中较低能量的光谱受到的影响最大。银河宇宙射线的强度也随着太阳的周期性活动而逐渐改变,太阳活动低的时候,这种变化大,太阳活动高的时候则变化小。估计在太阳活动最低的时候,银河宇宙粒中最大粒子的活动为 $4\text{cm}^2/\text{s}$ 。

2. 地磁捕获辐射

围绕地球分布的地磁场捕获了大量来自于银河宇宙射线和太阳的带电粒子,形成了范艾伦辐射带。这些粒子在地磁场的驱动下倒回,在封闭的轨道上分别向两极运动。范艾伦辐射带由内部带和外部带两部分组成,内部带主要是由能量高于 34MeV/u 的捕获质子构成,而外部带则主要由携带高于 0.5MeV/u 的低能量电子构成,因此带电电子相对于质子来说,对载人航天器舱内的影响较弱一些。

地球磁场中不可见的磁力线从南极区域延伸出来,进入太空,再回到北极区域。由于辐射带中的粒子都带有电荷,它们会受到磁力的作用,沿着磁力线盘旋前进,并且在行星磁场最聚集的两极之间不断反弹。这个辐射带内的高能带粒子对载人空间飞行器和卫星、仪器都有一定危害。

由于地球磁场强度不均匀,南非上空的异常情况和产生地磁场地球磁性偶极中心的轻微移位共同形成了粒子强度最高的区域,这个区域位于非洲和南美洲之间的南大西洋地区,那里螺旋上升的质子在到达镜面点之前逐渐下降接近地球。捕获的电子向东漂移,回应由于地磁场受太阳影响而发生的改变。其在极短的时间内强度可以发生极大的改变。

3. 太阳粒子事件

太阳粒子事件的粒子成分主要是低能量的质子和电子,其次是 α 粒子, $Z > 2$ 的粒子较少。太阳粒子事件的发生具有随机性,随着太阳活动的增强而发生粒子事件的概率增加。如果没有合理的防护,一场大的太阳粒子事件可能就是空间旅行中最大的辐射伤害。当太阳加速并放出带电粒子时,伴随太阳耀斑的太阳粒子事件发生,通常太阳表面的温度大约是 5700K ,但是偶尔在有限的表面区域达到 $1 \times 10^6\text{K}$ 。太阳粒子事件有时可转化为耀斑的黑子,但不是所有的耀斑都能产生地球附近的可被探测到的太阳粒子事件,且事件活动的强度和持续时间变化范围很大。据统计,最大的太阳粒子事件可影响每平方厘米的 1×10^{10} 个质子,这里的每个质子都能携带超过 10MeV 的能量在几天内到达地球轨道。

和银河宇宙射线不同,太阳粒子事件极其难以捉摸。一般太阳耀斑发生迅速(几分钟),不可预测,它们的运行周期为 11 年,据统计,太阳耀斑活动的鼎盛时期曾出现在 1948 年,1959

年和1970年,然而在这11年期间太阳耀斑的活动差不多都是以一个最小的限度呈现出来的。但这种循环只是代表一种趋势,并不排除太阳粒子事件随时发生的可能。

对于这些主要的外部辐射,航天器的舱壁可提供充分的屏蔽,因而对载人航天的影响不大。然而,对于航天器舱体物质产生的二级辐射(主要由中子组成),屏蔽这种辐射被认为是很困难的,因为主要辐射的减少通过二级核素的形成而被部分抵消,这在生物学上可能是更加危险的。

1.1.2 微重力

微重力是太空飞行中最重要的环境因素。载人航天器在环绕地球运行或星际空间飞行时即处于持续的微重力状态。产生的根源主要有:残余的大气阻力;航天器变轨机动或姿态调整时产生的推力;航天器绕质心的转动;载人航天器中航天员的走动;重力梯度。其中残余的大气阻力和重力梯度引起的微重力属于长期存在,其他三种情况是瞬时的或短暂作用的微重力。

根据《中国大百科全书·力学卷》关于重力的定义,重力是物体受到的行星或其他天体的引力,在地球附近,重力通常指地球的引力。重力的大小可用重力使物体产生的加速度大小来表示,地球表面的重力加速度 g 为 9.81m/s^2 ,已熟为人知,所以,其他地方、其他天体的重力或重力加速度常常用 g 来作单位。某一点处重力大小是与该点到引力中心(以地球为例,则为地心)距离的平方成反比,离地心越远,重力越小。例如,在离地面 $200\text{km} \sim 1000\text{km}$ 高度范围内,重力是地面的 $94\% \sim 75\%$,即重力加速度为 $0.94g \sim 0.75g$;即使在 10000km 高空,重力还是地面重力的 15% ,即 $0.15g$ 。根据引力摄动理论,地球引力的作用范围是以地心为中心,半径为 92 万 km 的球形区域,只有远离地球几十万千米处重力才会变得微小($10^{-3}g$ 以下)。

通常所说的航天器中的“微重力”显然不是这种由天体产生的微小重力,而是一种环境诱发的“视重力、表观重力”(apparent gravity),或者可称为“伪重力”。

当航天器仅在重力作用下自由飞行时,航天器及其内部的一切物体,都以相同的速度、加速度运动,相互之间没有作用力,所有物体都表现不出有重量。这就是“失重”。其实完全失重是一种理想的情况,在实际的航天飞行中,航天器除受引力作用外,不时还会受到一些非引力的外力作用。例如,在地球附近有残余大气的阻力、太阳光的辐射压力,进入有大气的行星时也有大气对它的作用力。根据牛顿第二定律,力对物体作用的结果,是使物体获得加速度。航天器在引力场中飞行时,受到的非引力的力一般都很小。这种非引力加速度通常只有地面重力加速度的万分之一或更小。为了与正常的重力对比,就把这种微加速度现象叫做“微重力”。其实,航天器即使只受到引力作用,它的内部实际上也存在微重力,这是因为航天器不是一个质点,而是一个具有一定尺寸的物体。

当飞船在调整姿态以及变轨时,它自身携带的小型火箭发动机会对飞船有推力作用,此时飞船的加速度将不等于它所处位置的引力场强度 g ,此时飞船中的人会明显的感受到“重力”(实际上是弹力的作用,他所感受到的力的大小为 $m(g-a)$)。当飞船的火箭发动机不工作,只在引力作用下在太空中正常运行时,仍会受到极其稀薄的空气阻力的作用,还会受到太阳光压、宇宙射线以及高能粒子和太空垃圾的作用,这样飞船的加速度就不可能严格等于当地的引力场强度,于是他就会感受到微重力(其实是微弹力)的作用,微重力的大小也是 $m(g-a)$ 。因为飞船受到的非引力比引力小得多,所以,它的加速度 a 非常接近它所处位置的引力场强度,因此它受到的微重力确实非常小。一般情况下,微重力就是指微弹力,因为飞船中的人受到的实际引力并不小,只有当飞船离地球极其遥远时,他受到的实际引力才会很小。

1.2 空间环境对人体的影响

1.2.1 空间辐射损伤的生物效应

带电粒子的生物学效应与粒子的性质(电荷和电量)、剂量及所研究的生物学终点(如致细胞死亡、特定遗传基因的突变、染色体的畸变、细胞 DNA 损伤和致癌等)有关。辐射对人体所产生的危害分为两种:早期效应和远期效应。一般认为,早期效应主要来自太阳粒子事件,可引起恶心呕吐、腹泻、便血、脱水、虚脱和休克等急性效应,甚至导致人员死亡。当航天员在月面居住舱外活动时间较长又缺乏适当的屏蔽时,就易于受到此效应的困扰。对航天员危害最大的是远期效应。在各种远期效应中又以癌症最危险,其次是中枢神经系统的损伤,第三是遗传效应。辐射可以破坏肌体组织的蛋白质及酶系统,造成神经和内分泌系统的协调障碍,导致体内新陈代谢紊乱,加速衰老过程,导致器官萎缩、毛发变白、晶体混浊、微小血管的内膜纤维增生、细胞染色体畸变等。

目前美国宇航局已开始对航天辐射引起的致癌效应,对中枢神经系统的损伤,辐射与其他航天因素(如微重力、有害气体)的复合作用影响,辐射早期或急期的损伤,辐射对生殖、不育和遗传的危害等辐射生物效应进行了系统的研究。目前关于质子的人体效应或致癌效应可采用的数据资料较少,利用质子加速器进行的动物研究资料也很不充分。重离子的生物效应主要是致癌或遗传效应及对中枢神经系统的损伤。

1. 细胞生物学影响

迄今为止的研究提示,DNA 分子作为生命体的遗传物质基础,是宇宙射线辐射损伤的重要靶分子。辐射会引起细胞内 DNA 分子中连接碱基的氢键发生断裂,但引起这种损伤的机制尚不明确。低辐射剂量可以引起 14 个~15 个氢键断裂,同时也会引起磷酸戊糖二酯键发生断裂,而且随着辐射剂量的增加,磷酸二酯的断裂呈线性增长。在哺乳动物细胞中诱导一个单链断裂需要 30eV~40eV,平均 1rad(拉德)($1\text{rad} = 10^{-2}\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)可引起人类的双重染色体细胞内 10 条~20 条单链断裂,其中在有氧条件下所诱导的单链分子的断裂要比无氧条件下高 4 倍。根据不同的细胞类型和温度,在 10min~40min 范围内正常细胞可以利用修复酶对大多数断裂的单链进行修复和重组,而细胞自发的多数氢键断裂却是不可逆转的 DNA 损伤。

辐射可引起 DNA 分子双链断裂,从而使 DNA 分子部分分离形成若干个少于三个核苷酸短链,这种情况或者发生在两条断裂的单链开始对合时,或者发生在具有高度线性能量转移(高-LET)的粒子切断 DNA 两条链的时候。单粒子需要 600eV 才能切断双链,而一条双链的切断可以使 70 个任意的单链断裂,且低-LET 诱发的每单位辐射剂量 DNA 双链分子的断裂数量是单链断裂数量的 $1/20 \sim 1/8$ 。许多由低-LET 诱发的 DNA 双链断裂是可以修复的或至少在动物细胞内 37℃ 时可以重新组合。经过长时间的潜伏,只有不到 3%~4% 的起始断裂的链仍然保持断裂状态。给予一定的吸收量,高-LET 重离子比低-LET 诱导更多的非重组链断裂。然而,在人体细胞内由给定剂量的高低-LET 辐射分别诱导的初始的断裂数是相似的。

当 DNA 发生单链突变时,它还可以通过酶的作用,自行修复。如果发生了双链突变,就很难正确地重建了,会出现错误的修复,结果导致基因的突变。当辐射引起的 DNA 损伤伴有染色体数目或结构改变时,可以发生染色体畸变。上述变化可以引起两种后果:一种是造成细胞

死亡,特别是一些对辐射敏感的细胞(如精原细胞、卵母细胞和小淋巴腺),影响到生物体的繁殖能力;另一种后果是引起细胞变异,使细胞失去控制,异常增殖,正常细胞转变成恶性细胞,最后形成癌症。细胞变异如果发生在生殖细胞,就可以将它的错误信息传给后代,引起遗传性疾病。辐射的间接作用是产生自由基。自由基缺少配对的电子,是一个十分活跃的物质,它可以使生物体的 DNA、RNA 或蛋白质大分子受到损伤。

2. 免疫系统的影响

暴露在太空飞行条件下,机体各种免疫反应会发生变化。因为营养状况会影响机体对病毒感染的防御能力。根据地面模拟太空飞行的模型实验或太空飞行后,空间辐射对免疫系统的伤害得到了证实,潜在的病毒感染会发生活化,其自然结果就是发生恶化,甚至出现癌变。现在,许多研究已经说明空间辐射至少影响 50% 经历空间飞行航天员淋巴细胞的功能。许多研究采用以细胞作为培养对象的方法,观察飞行后人体或动物体的免疫系统的变化,并证实,空间辐射改变了人体细胞在培养过程中的生理活动(包括白细胞胚芽生殖、细胞生长抑制素的产生以及白细胞的信号传导等)。经典的实验当属 Cogoli 等对经过空间飞行的航天员体内的白细胞所进行的研究:采用分裂素诱导白细胞分裂或胚芽生殖,发现相对于对照组,经过空间飞行的白细胞胚芽生殖戏剧性地降低。但也有一些研究结果彼此矛盾,经过航空飞行的白细胞,其干扰素(α 与 β)的产生亦或明显增强,亦或戏剧性地降低。这是由于体内与体外的白细胞在空间飞行过程中并没有暴露在相同的影响因素下:培养已分离的白细胞并没有接触到飞行过程中产生的神经内分泌信号。因此,虽然细胞培养实验在研究空间飞行对免疫系统的影响中非常有效,但并不能代表体内的状况。

3. 中枢神经系统的影响

已有的地面研究揭示电离辐射影响人体的许多细胞,包括中枢神经细胞。然而,确定辐射的远期作用却是很难的。美国与俄罗斯大量的动物实验证实辐射对神经生理学的影响。这些结果清晰地说明暴露在辐射下大脑确实发生了变化,但还需要进一步的研究以确定空间辐射所引起的行为问题。目前已有的研究揭示,暴露在高能粒子下的辐射与中枢神经细胞之间具有剂量依赖的毒理关系;碳离子与 γ 射线照射后,神经元细胞的变化可能是人体早衰症的标志,因此,空间辐射可能对航天员产生生理影响以及随后脑部软组织的形态变化。这些研究所提及的神经病学的后遗症最终将会导致或来源于神经传递素的活度与浓度。另外,各种神经传递素的活力变化可能影响感受器上下的调控能力,将会导致可逆与不可逆的神经生理学的变化。

IL-1 β 作为中枢神经系统控制各种自律功能(包括食欲、睡眠、生热作用、情绪等)的主要调节物与催化剂,调控着机体的动态平衡,以及各种应力状态下免疫系统的反馈调节,因此许多研究通过测定 IL-1 β 的产生来估计空间辐射对中枢神经系统的反应。另外,IL-1 β 与引发炎症的细胞活性以及脑组织中有毒反应密切相关。在经过空间高能粒子辐射后,会引发早期的中枢神经系统的反应。而且在经辐射后的各种脑部结构中,会出现早期细胞激素(IL-1 β 、TNF α 以及 IL-6)。然而,尽管中枢神经系统对重离子辐射非常敏感,辐射粒子性质的不同会影响中枢神经系统的反应。

4. 代谢系统的影响

机体受电离辐射后引起一系列极为复杂的生化反应,营养素代谢(包括蛋白质代谢、脂肪代谢、碳水化合物代谢等)受到了影响,若不对营养素代谢的改变加以调整,将造成体内某些营养素不足,则可能使机体受辐射损伤更加严重。

机体受电离辐射作用后,蛋白质代谢很快就受到影响。主要是分解代谢增强、合成代谢障碍,体内蛋白质和氨基酸代谢都有变化。小肠吸收氨基酸受到了破坏,破坏的程度依照射剂量的多少而异。在大剂量照射后,动物与人体尿中肌酸排出量增加,尿中肌酸与肌酐的比值增高。一般血清总蛋白质量很少发生变化,但在急性放射损伤后血清蛋白的组成发生了改变,白蛋白减少及球蛋白增加,以致白蛋白与球蛋白的比值下降。

在接受大剂量射线照射后,往往还会表现出脂血症,甘油三酯增加明显,磷脂含量也增高,肝中脂类过氧化物含量上升,胆固醇含量呈波动性变化。但是,碳水化物的代谢变化不太明显。大剂量射线照射后糖原异生作用增强,常出现高血糖症。另外,由于放射损伤时伴有呕吐和腹泻而使水盐代谢发生紊乱。

5. 抗氧化系统的影响

太阳光的组成成分,尤其是紫外线,能够引发细胞内的自由基反应,诱发脂肪过氧化以及由于 DNA 损伤而抑制 DNA 复制合成。具有相似光谱的非自然光和电离辐射也可对人体产生相似的影响效果。

辐射能够引起脂肪的过氧化和类似于环境辐射引起的一系列自由基反应。宇宙空间中的高能带电粒子产生的电离辐射,通过与航天飞船的防护物质相互作用产生了次级辐射(包括 γ 射线和中子)。主要的和次级的辐射能杀死全部细胞或损伤它们的基因物质,在一些例子中还可引发癌症。DNA 损伤是中剂量和低剂量的辐射(如空间环境中的射线)引发的主要生物学效应。主要机理为辐射引起了一系列涉及物质能量转换、自由基生成和 DNA 分子结构发生改变的复杂突变。

空间辐射通过电离除去分子中的电子,形成离子和负电子。而电子不能长期存在,很快就与另一个分子形成负离子。最后的结果是生成了一对离子——正离子和负离子。尽管离子对通常持续不到 10^{-10}s ,但是它们可以通过许多可能反应的一种形成化学反应活性极强的自由基。因为水分子大约占大多数生物反应系统的 70%~90%,同时水分子也是生物反应中主要的离子化物质。所以在水溶液中自由基很容易相互反应生成氢气、水和过氧化氢分子。而这些分子形成的相对可能性,主要依赖于自由基的空间分布。例如,氧分子在水中受到辐射,那么氧分子将很快和羟基自由基生成超氧阴离子,并通过一系列的生物化学反应最终将其转化为过氧化氢。

辐射可引起脱氧核糖与碱基的共价键断裂,造成碱基脱落或改变、DNA 链的断裂或不同程度的蛋白质 DNA 交联等多种 DNA 损伤。其中辐射在水溶液中产生的大约 75% 羟基自由基可以诱发碱基脱落或改变,当羟基自由基碱基攻击嘧啶和嘌呤时,二者都要受到不同程度的影响,但因嘧啶更易受辐射的影响,所以更易产生突变,以胸腺嘧啶尤为明显。羟基自由基主要攻击胸腺嘧啶 5,6 位的双键,在有氧条件这种攻击可以生成胸腺嘧啶羟基过氧化氢,而在厌氧的条件下,则由羟基自由基相互作用生成乙二醇。受到攻击后的尿嘧啶和胞嘧啶会生成极不稳定的羟基过氧化氢产物,这种物质易发生反应,分别生成乙二醇和异构巴比土酸。同样嘌呤受到攻击后,在无氧条件下咪唑环被破坏;在有氧条件下,5,6 位的双键被过氧化。总的来说,辐射对于 DNA 分子而言,已不只是单单的碱基损伤而是整个 DNA 分子的毁灭。DNA 分子中的戊糖受到化学攻击后,糖苷键水解,使得未损伤的碱基得到释放,大约 20% 的自由基会与这种戊糖基团发生化学反应,最终降解了整个 DNA 分子。

紫外线中能引起涉及到人体皮肤改变的光损伤的波长范围为 200nm~400nm。而最普遍最普通的紫外线照射来自于太阳光,近年来日晒机器床已经成为另一种紫外线的来源,其中

UVB(290nm ~ 320nm)是最有能力到达地球表面的紫外线辐射。虽然 UVA(320nm ~ 400nm)的能量要比 UVB 弱 1000 倍,但是它在紫外线中含量却可以达到 UVB 的 100 倍。UVB 被表皮吸收后,穿透进入乳凸状的真皮内;而 UVA 则同时穿透进入乳凸状和网状的真皮内。

长期受太阳光中紫外线的辐射会引起能够导致皮肤癌 DNA 的后天性损伤及其相关突变。以前的研究表明 UVB 能够通过活性氧间接地产生嘧啶二聚体,DNA 链断裂,DNA 与蛋白质交联以及碱基改变。光能不仅可以导致蛋白质和 DNA 的氧化损失,细胞膜的过氧化,而且还可以伤害生物防御系统。UVA 可直接损伤皮肤中的过氧化氢酶和谷胱甘肽还原酶的活性,并且减少皮肤中维生素 E、辅酶 Q、维生素 C 的含量。经过 UVA 和 UVB 照射的人类 keratinocytes 中的过氧化氢酶,超氧化物歧化酶的活性减少。

1.2.2 空间微重力环境对人体的生物效应

当一名航天员进入太空,他或她的身体将会立即开始经历大量的变化,它会引起航天员感觉上的不同,甚至看上去稍有不同!人体是一个特别而复杂的综合系统,当缺少地心引力时,它的各部分之间都在不断地相互联系,彼此相互依赖,会自动地发觉和回应他周围显著的环境变化。当人在地球上时,身体作为一个系统处于一个“正常地球”的条件下;当人在太空上时,身体作为一个系统处于一个“正常太空”的条件下。这两种情况都适于他们各自的环境。本书将对太空微重力状态下机体的应激反应进行详细介绍。

1. 心血管系统的影响

首先举一个简短的例子,来说明心血管系统在太空环境中是怎样变化的。在太空中,身体不再受地心引力的作用,分配血和其他的体液到身体的下半部分,尤其是腿。事实上,血和体液向头移动,这就意味着这些液体被分配到身体的上半部分而远离了较低的末端。这种现象将引起一些有趣的效果。在太空中,航天员甚至看起来不同。他们有一个浮肿的脸,因为他们上半身有过多的液体,装满了正常的脸部的干孔穴,他们的腿的圆周将更小(称为“鸟腿”),因为在下半身有很少的液体。

除以上心血管功能失调的症状外,另一个主要表现即是立位耐力不良。虽经几十年的大量研究,飞行后立位耐力不良的机理至今未得到充分阐明,已有的结果表明任何单一因素都不能圆满解释立位耐力不良的发生机理。目前普遍认为其机理涉及多重机制,是多因素共同作用的结果。如血容量减少、骨骼肌萎缩、静脉顺应性下降、压力感受器反射调节功能改变及动脉系统功能改变等。20 世纪 80 年代后期,Hargens 等提出,失重或模拟失重状态下,不同部位动脉血管的跨壁压力及血流量所发生的改变可能会引起相应的血管重塑及功能改变。随后,Delp 等的研究结果证实失重或模拟失重可导致动脉系统功能改变,且其改变是立位耐力不良的重要原因之一。然而有关失重或模拟失重是如何导致动脉系统功能改变的研究却很少报道。Delp 等认为模拟失重可导致血管平滑肌收缩结构改变,从而引起血管收缩反应性下降,这种改变可能包括钙调素蛋白表达、肌球蛋白轻链激酶活性及肌纤蛋白浓度下降。Kahwaji 等的研究提出,非受体酪氨酸激酶参与了悬吊诱导的大鼠血管对 NE 的低反应性,提示受体下游的信号转导通路异常可能是使悬吊大鼠血管反应性降低的原因之一。

2. 免疫系统的影响

宇宙飞行可影响航天员免疫系统功能,导致细胞免疫功能减低,但是,体液免疫功能变化不明显。目前,对于宇宙飞行导致航天员免疫系统功能改变的可能机制,主要集中于太空复合因素以及由其引起的神经-内分泌系统改变对免疫系统的直接和间接影响。