

图书在版编目(CIP)数据

航天医学细胞分子生物学 / 李莹辉主编.
北京: 国防工业出版社, 2007. 6
总装备部研究生教育精品教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 04921 - 3

I. 航... II. 李... III. 航空航天医学 - 细胞生物学: 分子生物学 - 研究生 - 教材 IV. ①R857②Q7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 153957 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 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 15 1/4 字数 455 千字

2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 40.00 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

目 录

第 1 篇 绪 论

第 1 章 空间环境	2
1.1 地球环境	2
1.1.1 地球环境条件	2
1.1.2 空间环境	3
1.2 月球与火星环境	6
1.2.1 月球	6
1.2.2 火星	6
1.3 与运载器相关的环境条件	7
1.3.1 加速度	7
1.3.2 噪声	7
1.3.3 震动和冲击	7
1.3.4 飞行器内的约束条件	8
第 2 章 航天医学发展概况	9
2.1 航天医学概念	9
2.1.1 载人航天	9
2.1.2 航天医学	10
2.2 航天医学的发展	12
2.2.1 航天医学发展简史	12
2.2.2 航天环境导致的主要医学问题	12
第 3 章 空间生物学与航天医学细胞分子生物学	17
3.1 空间生物学与空间细胞生物学	17

3.1.1 空间生物学的概念	18
3.1.2 空间生物学的进程	18
3.1.3 空间细胞生物学发展概况	20
3.2 航天医学细胞分子生物学	21
3.2.1 航天医学细胞学发展简况	22
3.2.2 航天医学细胞分子生物学发展目标	23
第4章 航天医学实验概述	26
4.1 基本概念	26
4.2 目的意义	26
4.3 特点	26
参考文献	28

第2篇 细胞微重力效应

第5章 航天免疫细胞分子生物学	32
5.1 免疫系统的细胞分子生物学基础	32
5.1.1 免疫的概念和免疫系统的组成	32
5.1.2 免疫应答	40
5.1.3 神经内分泌免疫网络调节	41
5.2 航天环境中免疫系统功能特点	43
5.2.1 细胞免疫	43
5.2.2 体液免疫	47
5.2.3 潜伏病毒再活化	47
5.2.4 在空间飞行中和飞行后影响免疫参数变化的因素	53
5.3 微重力与免疫细胞信号转导	54
5.3.1 微重力条件下细胞间以及细胞与基质的接触	55
5.3.2 蛋白激酶C	57
5.3.3 免疫细胞与细胞骨架	58
5.3.4 免疫细胞基因表达	58
5.4 免疫功能防护研究	59

5.4.1 药物	59
5.4.2 营养	59
5.4.3 其他	60
思考题	61
参考文献	62
第6章 微重力影响心血管功能的细胞分子生物学基础	68
6.1 心血管系统的细胞分子生物学基础	68
6.1.1 心血管系统的组织学基础	68
6.1.2 心血管系统的细胞学基础	74
6.2 空间环境中心血管系统功能特点	111
6.2.1 微重力与心脏功能	111
6.2.2 微重力与血管功能	112
6.3 微重力与心脏细胞	113
6.3.1 微重力与心肌细胞	113
6.3.2 微重力与心肌成纤维细胞	114
6.3.3 心肌组织工程	116
6.4 微重力与血管	121
6.4.1 血管内皮细胞	121
6.4.2 血管平滑肌细胞	122
思考题	125
参考文献	125
第7章 微重力与呼吸功能	129
7.1 呼吸系统的细胞分子生物学基础	129
7.1.1 肺的组织学基础	129
7.1.2 肺的细胞学基础	130
7.2 航天环境中呼吸功能特点	135
7.2.1 微重力对肺功能的影响	135
7.2.2 微重力对肺循环的影响	136
7.3 微重力与肺细胞	137
7.3.1 肺泡上皮细胞	137

第 1 篇

绪 论

第 1 章 空间环境

第 2 章 航天医学发展概况

第 3 章 空间生物学与航天医学细胞分子生物学

第 4 章 航天医学实验概述

第 1 章 空 间 环 境

空间环境通常是指地球环境以外的环境。地球环境对地球生物圈内的生物起到很好的保护作用,而空间环境则大不相同,其条件较为苛刻,包括零重力、辐射、极端温度和真空等。地球上的生物在漫长的进化旅途中适应了地球的环境(大气圈、适宜温度、 $1g$ 重力)条件。

1.1 地 球 环 境

1.1.1 地球环境条件

1. 地球

地球是太阳系行星之一,形状接近于球体,平均半径为 6370km ,赤道半径为 6378km ,两极半径为 6356km ,表面积约为 $5.1 \times 10^8 \text{km}^2$ 。地球质量是 $5.97 \times 10^{24} \text{kg}$,体积为 $1.083 \times 10^{21} \text{m}^3$ 。

2. 大气

地球周围有大气层包围。大气的自身重力形成大气压,其压值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 $P_0 = 101.3 \text{kPa}$ 。随海拔高度增高而降低,其变化可表示为

当 $a < 11000\text{m}$ 时,

$$p = p_0(1 - 0.0065a/288)5.25 \text{ (kPa)}$$

3. 重力

地球上的物理过程和生物过程都与地球重力场密切相关。在地球重力场中,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,即

$$F = mg$$

地球表面重力常数的平均值 $g_0 = 9.81 \text{ m/s}^2$ ($r_0 = 6370 \text{ km}$)。重力常数与距地心距离相关,与地心距离 r 的平方成反比。

4. 辐射

地球接受的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。电离辐射是能够通过直接或间接过程使作用物质产生电离的辐射,如各种带电粒子(质子、电子、 α 粒子等)能够直接使作用物质电离,而中性粒子如中子、X 射线和 γ 射线可间接地使作用物质电离,在其经过的路径上打出电子的高能粒子或光子。生活在地球上的人类,由于有地球磁场和稠密大气层的保护,受到来自外层空间电离辐射的影响很小。

5. 磁场

地球磁场可屏蔽来自外层空间的多数电离辐射,使人类能正常生存。当人到达外层空间时会失去这种防护。

1.1.2 空间环境

空间或太空通常是指地球及其大气层以外的辽阔宇宙。空间环境与地球环境存在以下几方面的不同:① 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。在其他行星上根据其重力加速度不同而不同。② 辐射。在外层空间和太阳系的其他行星上,存在广谱的各种粒子辐射和波辐射。③ 大气。地外环境没有大气包围,处于真空状态。其他行星的大气层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层在取向和强度上不同;也存在有行星际磁场。

1. 重力

空间飞行中最重要的环境特征就是在空间微重力(失重)或太阳系其他行星上的低重力。重力的实质是万有引力,因此重力无处不在。在地球表面或远离地表某处的物体,受到的地球引力(重力)大小为

$$F = GMm/R^2$$

在任何一个非惯性系中,物体的惯性力与所在天体对它的引力近似

平衡,使得其剩余加速度——惯性加速度与引力加速度之差远小于地面处重力加速度,就称该物体处于微重力作用状态。

在行星际轨道飞行时,基本上可以认为是微重力条件。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,基本上受两个力的作用:离心力和重力。在质心处两力平衡,可以看作在此点重力为零。对轨道飞行器而言,重力与离心力在其质心处保持平衡。此时,用一般方法称重,物体不表现出重力,称为“失重”。实际在卫星轨道上的飞行器内,由于设备和乘员的动作、舱外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。因而,在轨飞行器及其内部所有物体实际处于微重力条件($10^{-5} \sim 6g$)下,而非零重力条件。

2. 空间辐射

地球大气层阻挡了宇宙辐射中的绝大部分,屏蔽了来自太阳和宇宙的紫外线、 γ 射线、X射线和重离子辐射,对地球生物圈起到很好的保护作用。在外层空间则不存在这种保护作用。

1) 空间的电磁辐射

太阳系中的电磁辐射基本上都源于太阳。太阳的电磁辐射在近地球处的能量密度约为 $1390\text{W}/\text{m}^2$ 。星光能量则小于 $10^{-9}\text{W}/\text{m}^2$ 。在可见光区域,太阳辐射相当于表面温度为 5700K 的黑体。

2) 空间的电离辐射

空间存在三种类型的电离辐射。

(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1次~2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,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:地球周围的一个面包圈形的区域。包含被地球磁场捕获的高能(千电子伏到兆电子伏)粒子,即质子和电子。分为内带和外带两个同心的区域。

3. 真空、高低温与磁场

1) 真空与高低温

空间的物质极为稀薄,接近真空,但并不是绝对的空无一物。地外空间是一种真空状态,在真空状态中,各种材料也会受到影响,出现放气、挥发、扩散等现象。此时热传导只能通过辐射方式进行。空间飞行器轨道的近地点一般在 160km 以上,此时大气温度虽已达到 1000K 以上,但由于大气密度只有地面的十亿分之一,气温对于飞行器的影响甚小。

地球大气层的范围是从海平面起至 700km 高度,分为对流层、平流层和电离层。700km 以上称为外大气层,可以视为空间开始的地方。实际从 300km 高度开始,已有较多的航天器活动。

对流层最贴近地球表面,其范围从海平面起,赤道地区上至 17km ~ 18km,两极地区上至 8km ~ 9km,中纬度地区上至 10km ~ 12km。温度随海拔高度升高而降低,该层空气对流运动强烈。

平流层是下起对流层,上至 60km ~ 80km 的高空。在平流层存在特殊的气温分布。11km ~ 25km 高度范围内,气温基本恒定在 -56.5°C ,故又称为“同温层”。在 25km ~ 50km 范围内,臭氧在紫外线作用下不断生成又不断破坏,反应激烈,产生热量,使该层气温随高度增加而升高,此层又称为“暖层”。在 50km ~ 80km,气温又随高度升高而降低。电离层的高度范围是 80km ~ 700km,该层能反射无线电波,具有良好的导电性能,在紫外线和宇宙射线作用下,大气分子被分解为原子,又被电离成带电荷的离子,故称为“电离层”。80km ~ 100km 范围内大气温度最低,为 -100°C ,200km 以上温度急剧升高达 $1000^{\circ}\text{C} \sim 2000^{\circ}\text{C}$ 。

在 700km 以外属于外大气层。主要特点是:大气极为稀薄,大气粒子间相距甚远,航天器在此范围飞行没有什么阻力。

2) 磁场

地球和近地空间存在地磁场,来源于地球内部,只有小部分起源于外

层空间。地球磁场可近似看作由在地心附近的,与地球自转轴的倾角为 11.5° 的一个磁偶极子所产生。

地球磁场有各种复杂的变化。磁场位置在缓慢移动,磁场倾角在变化,磁场强度不断下降,还常有短期的磁暴。

在太阳风的作用下,地球磁场分布显著偏离偶极子磁场,被局限在一定范围内,称为磁层,结构形似彗星。

1.2 月球与火星环境

1.2.1 月球

月球是地球的卫星,绕地周期约 28 天,其自转周期与之相同,因此向地面是不变的。月球表面受到的太阳辐射与地球大气的上方相同。月球基本上没有大气(小于 10^{-13} bar (1 bar = 100 kPa))。在赤道处月球一天内的温度变化范围为 80K ~ 390K。月表面下 1m 深处的温度可假定恒定在 230K。

月球的紫外辐射约为地表的 2 倍。月球没有大气,电离辐射没有自然屏蔽,月球自身磁场可忽略。

月球土壤主要含 O, Si, Fe, Ca, Al, Mg。其热惯性小、热导率低,比热为水的 1/5。

1.2.2 火星

火星是太阳系的第四颗行星,是一个小而冷的干燥行星,有稀薄的大气,也是人类长期探索太空时驻足建基的首选地。

火星表面的太阳辐射平均为 615 W/m^2 。标称大气压为 7 mbar,主要为 CO_2 。表面温度有很大反差,标称温度为 215K,温度范围在 130K ~ 300K。

总太阳紫外线辐射流为 $10 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。电离辐射受到大气层的屏蔽和磁场的影响。

已测得的火星表面土壤的主要元素有 Si, Fe, Mg, Ca, Al, S。

1.3 与运载器相关的环境条件

航天环境特殊条件还包括运载器发射和返回时的环境条件。

1.3.1 加速度

飞行器在上升阶段中,最大加速度可接近 $10g$ 。加速度作用下,人体内部的体液和组织会发生位移。过度的加速度会引起胸痛、呼吸困难、肌肉紧张、身体极端受压、流泪、黑视甚至死亡。为防止或减轻加速度的影响,航天员在飞船上升过程中要保持适当的体位。

1.3.2 噪声

载人飞船上升及再入大气层时,运载火箭的喷气和飞船再入大气层时飞船周围紊流边界层造成的气动是飞船发射和返回时的主要噪声来源。噪声和舱外噪声约为 140dB 。采取措施后,航天员经受的噪声峰值约 120dB 。噪声影响听觉,干扰休息。当噪声频率与人体腹部自然频率接近时还可引起内脏移位,导致肠胃紊乱,出现头晕和呕吐等症状。

1.3.3 震动和冲击

在发射台上和发射阶段,震动主要来自火箭发动机。点火抖动时,低频震动最大。火箭上升过程中,由发动机燃烧室内的燃烧过程和喷气管出口处膨胀气体造成的紊流,引起运载火箭震动。气动力矩等也会使火箭引起横向弯曲和纵向震动。各级发动机点火与熄火,会出现瞬时的纵向震动;在级间分离的瞬间,火箭的震动频率会突然改变。一般火箭结构的固有震动频率范围约在 $2\text{Hz} \sim 15\text{Hz}$ 。

火箭再上升,速度迅增,气动力引起火箭震动。随着大气密度减小,气动声振也渐减。冲击是震动的特殊形式。在飞船应急事件中航天员弹出座舱时,短时承受的加速度可达 $20g$ 。再入大气层,开伞也带来冲击力。着陆时,飞船还会产生 $40g \sim 60g$ 的瞬时冲击加速度。采取逐次开伞、缓冲等措施,可减小上述冲击力。

1.3.4 飞行器内的约束条件

长期生活在地球表面昼夜节律周期中的人,心理生理功能逐渐形成与此相适应的人体内环境的平衡,存在着与昼夜节律的同步变化。人在空间飞行器中,处于相对封闭的高应激环境,活动空间十分有限;外界感官刺激减少,昼夜节律也与在地球上不同。地球自转的 24h 周期,决定其昼夜节律。而载人的轨道飞行器一般以约 90min 的周期绕地球运行,进入地球阴影区时,飞行器上就相当于黑夜。特别是人类还将面对长期应激造成的免疫功能持续低下,孤独焦虑引发的心理障碍进而导致的生理功能失调,长期失重导致的神经系统认知变化等一系列变化,这些均可能成为未来空间飞行任务的关键影响因素。

第 2 章 航天医学发展概况

2.1 航天医学概念

2.1.1 载人航天

载人航天是人类驾驶和乘坐载人航天器在太空中从事各种探测、研究、实验、生产和军事应用的往返飞行活动。其目的在于突破地球大气的屏障和克服地球引力,把人类的活动范围从陆地、海洋和大气层扩展到太空,更广泛和更深入地认识整个宇宙,并充分利用太空和载人航天器的特殊环境进行各种研究和实验活动,开发太空极其丰富的资源。

根据飞行和工作方式的不同,载人航天器可分为载人飞船、载人空间站和航天飞机三类。载人飞船是一种用火箭发射到地球轨道上作短期飞行,在完成特定任务后再返回地面的载人航天器,一般为一次性使用,可载 1 人~3 人。

航天飞机为短期在太空飞行的载人航天器,只有美国成功使用,最大可载 7 人。载人空间站是一种在近地轨道长时间运行,可供多名航天员在其中生活工作和巡访的载人航天器。

目前在空间运行的国际空间站,设计寿命为 10 年~15 年,总质量 400 余 t,长 108m,宽(含太阳能电池翼)88m,运行轨道高度为 397km。载人舱内的气压与地表面相同,按原设计可载 7 人。由基础桁架、功能货舱、服务舱、节点舱和多个实验舱构成。国际空间站在组装阶段,其主要设施由俄罗斯“质子”号火箭、欧空局“阿里安”5 号火箭以及美国航天飞机运送。组装完成后的运输工作由美国航天飞机、俄罗斯联盟 TM 飞船及“进步”号货运飞船完成。美国还计划研制一种升力体式救生飞船。按“哥伦比亚”号失事前的安排,全站建设工作要到 2008 年

才能完成。

2.1.2 航天医学

航天事业的发展催生了航天医学的形成与发展。航天医学是以载人航天任务为背景,适应我国载人航天领域研究和研制需要,形成和发展起来的一门综合性应用与应用基础学科,是医学学科的一个分支;是在基础医学、临床医学、预防医学、生理学、心理学、工效学等多学科基础上发展起来的。它以系统论为指导,利用现代科学的技术理论和方法,研究载人航天活动对人体的影响规律及其防护方法,以确保航天活动中航天员的安全、健康和高效工作。围绕确保航天员健康这项最具载人航天特征的研究任务,在关键技术预先研究、国内外先进技术跟踪研究和医学技术工程化实施的实践中,逐步形成了以航天医学为主线的综合多学科体系,由航天实施医学、航天环境医学、航天基础医学等学科组成。

1. 航天实施医学

航天实施医学是基于预防医学、临床医学、心理医学和航空航天医学等多学科知识、原理和方法的应用医学学科,它承担航天员医学选拔,飞行前、中、后期保障航天员安全、健康相关医学措施的实施与研究。即以入选航天员为对象,全面实施不间断医学保障,预防和消除不良因素对航天员健康的影响,维护航天员身心健康,使之能适应于航天特殊环境因素的训练和航天飞行,顺利完成航天任务;建立各类航天员(指令长、随船工程师、载荷专家)的医学选拔方法和标准,对预备航天员进行医学选拔;训练期间及航天前、中、后期实施航天员医学监督与医学保障;航天飞行过程中的医学救援等。

我国航天实施医学的雏形诞生于1958年军事医学科学院宇宙医学研究所的医学保障室,1968年航天医学工程研究所的成立正式揭开了航天实施医学的序幕。20世纪90年代,伴随国家载人航天工程的发展,航天实施医学进入快速发展期:根据我国载人航天任务特点,成立专门的航天实施医学研究队伍,建立了方向设置更加系统、责任分工更为明确的航天实施学科体系,涉及医学监督、医学保障、航天药物、消毒检疫等方向,

在成功完成的“神舟”五号、“神舟”六号载人航天任务中突破了多天在轨的航天员医学健康保障技术,确保了多人多天飞行任务中航天员的健康,成为实现载人航天突破、确保航天员健康的重要组成部分。

2. 航天环境医学

航天环境医学的主要任务是开展航天环境有害因素(低压缺氧、舱内污染物、高低温、震动、噪声、电离辐射和非电离辐射等)的人体效应及其防护研究,制定环境医学标准,提出舱内环境工程设计的医学要求,开展医学评价。伴随我国载人航天预研、“曙光”号任务、人—机—环研究和国家载人航天工程任务的发展与实施,建立了行之有效的飞船环境的医学评价体系,根据不同飞行任务特点实施针对性评价;建立了一系列满足医学要求的国标、军标,为后续飞行器的研制提供重要设计依据;制定了一系列国家标准和国家军用标准,成为实施载人航天工程相关任务必备的技术保证。

3. 航天基础医学

航天重力生理学和航天细胞与分子生物学,属于航天医学的应用基础研究领域。针对航天环境(特别是微重力、辐射等)严重影响航天员的健康、安全和工作能力这一问题,利用当前生物医学领域先进的研究思路和技术手段,从生理、细胞和分子水平研究航天因素特别是中长期飞行对机体的影响,并探讨其发生、发展的内在机理,提出和制定有针对性的有效防护措施。基于对空间环境导致的基因、细胞和组织水平损伤机理的认识不断深入,发展航天员健康的在线监测、在线诊断和在线治疗修复战略和关键技术。

我国的失重生理效应及对抗措施研究起步于20世纪60年代,90年代开始航天细胞与分子生物学研究。曾参与动物生物火箭实验,创建了人体卧床、秋千、转椅等失重相关实验室,建立了人体卧床、大鼠尾吊、视动刺激等模拟失重方法,构建了我国航天医学基础研究的特色技术平台。具备模拟航天特殊环境和实时空间飞行条件下进行人体、动物、细胞、分子生物学的实验条件和技术力量;建立了良好的国际合作关系,多次参与国际空间飞行实验研究。

2.2 航天医学的发展

2.2.1 航天医学发展简史

航天医学是在航空医学的基础上发展起来的,是航空医学的延伸和深化。首先预见到航天医学发展趋势者是美国空军的 H. G. 阿姆斯特朗将军。1948 年他在美国航空医学院组织了一次题为“空间飞行的航空医学问题”的专题研究小组会议,并在会议上宣读了他的论文,这次会议被认为是医学领域内一门新兴学科——航天医学的开始。

1950 年,美国航空学会的第 21 届年会,批准建立了航天医学学科,航天医学学科在医学界中也得到正式承认。美国海军和空军所属的航空医学学院及一些实验室很快承担了解决人进入空间的实验研究项目,主要是研究空间飞行对航天员的影响。

20 世纪 40 年代到 50 年代末,美、俄等国开始了一系列的空间生物学实验,揭开了载人航天的序幕,为实现载人航天突破奠定了坚实基础。自 1961 年 4 月 12 日人类首次进入太空至 70 年代,对短期载人航天的医学问题进行了大量研究;从 70 年代至今,随着空间站的运行,航天医学研究进一步向纵深发展,开始了中长期载人航天的医学问题研究。

我国的载人航天医学探索起步于 20 世纪 60 年代,为探讨飞行因素对生物有机体的影响,开展生命保障和回收的医学、工程研究,于 1964 年至 1966 年先后 5 次成功地将狗、大白鼠等生物样品发射到 70km 的高空,并安全回收。1968 年正式成立航天医学工程研究所,开始了航天医学的系统研究。2003 年 10 月在“神舟”五号载人航天飞行任务中,中国航天员杨利伟遨游太空安全返回并自主出舱,标志着我国载人航天技术的突破,航天医学作为重要的支撑技术在圆千年飞天梦中做出了重要贡献。

2.2.2 航天环境导致的主要医学问题

载人航天飞行具有较大风险,航天员所面对的是与地面不同的恶劣太空环境,如震动、冲击、噪声、失重、超重、宇宙辐射、高真空、昼夜节律变

化、剧烈的温度变化、超负荷的心理和工作压力等,这些环境因素可能导致航天员出现一系列的生理、病理变化,即航天特因症。失重导致的相关生理、病理变化表现见表2-1。

表2-1 失重与人体生理病理变化

环境因素	生理病理效应	
	系 统	变 化
短期失重		与体液转移有关的症状
		感觉系统间相互作用变化,感觉紊乱
		前庭器官动态兴奋性升高,静态兴奋性降低
		航天运动病
		运动协调改变
长期飞行	运动系统	抗重力肌出现萎缩性变化,质量和力量下降
		本体感受器传入冲动和脊髓反射发生改变
		运动调节效率下降
	骨骼系统	承重骨骨密度降低
		钙、磷代谢异常
	心血管系统	部分航天员出现较频繁的心电T波降低和心律不齐
		立位耐力和负荷耐力下降
	血液系统	功能性红细胞减少,异型红细胞增多
	免疫系统	免疫功能降低
	体液—电解质平衡	失水、血浆容量和细胞内液减少
		许多电解质出现负平衡
	机体代谢	负氮平衡,分解代谢大于合成代谢
		许多内分泌激素分泌出现变化
		飞行时间超过3月~4月时,糖代谢利用减慢

由重力消失引起的航天员生理系统变化的起因可归纳为以下三方面:

(1) 流体静压消失,血液头向分布。地球上生活的人,受地心引力的作用,血管中存在流体静压,大约500mL血液滞留在下肢静脉中;失重