



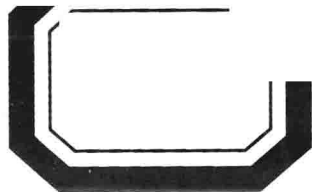
失重生理学基础与进展

□ 主编 沈羨云 副主编 任 维 □



国防工业出版社

National Defense Industry Press



部“1153”人才工程专项经费资助

失重生理学基础与进展

主 编 沈美云

副主编 任 维



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

失重生理学基础与进展 / 沈羨云主编. — 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 978-7-118-05000-4

I. 失... II. 沈... III. 失重生理影响-研究生-教材
IV. B852.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 021491 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)

四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 13½ 字数 380 千字

2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 35.00 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

《失重生理学基础与进展》编写组

主 编 沈美云

副主编 任 维

编著人员

第一篇 沈美云 任 维

第二篇

第1章 沈美云

第2章 王林杰

第3章 袁 明

第4章 李志利

第5章 吴大蔚

第6章 谈 诚

第7章 汪德生

第8章 杨唐斌

第三篇 沈美云

前 言

随着航天技术的发展,载人航天已经不局限于近地轨道飞行,在 21 世纪,人们将向火星、甚至更远的外星进军,航天员在失重环境下停留的时间也会更长,能否克服长期失重对人体的影响已经成为实现星球飞行的关键问题。这项重要的使命摆在航天医学家的面前,不仅需要他们自己付出艰辛的努力,也需要培养新一代的接班人。这些接班人在从事航天医学研究时,首先要掌握有关失重生理学的基础知识和实验方法。因此出版一本适合研究生教学的课本是非常必要的。

失重生理学是随着航空和航天事业发展而逐步形成的一门学科,它是研究失重对人体各生理系统的影响、机理和防护措施的。在国外已经出版了较多这方面的著作,我国在 1990 年出版了《失重生理学》(庄祥昌、裴静琛编),1993 年出版了《重力生理学——理论与实践》(刘光远、沈羨云编),2001 年出版了《航天重力生理学与医学》(沈羨云、薛月英编),这些著作的内容主要是基本知识的介绍,作为从事载人航天专业技术人员的参考读物,目前还没有一本适合研究生教学和研究用的专著。同时,由于国内外航天事业的迅速发展,飞行中和地面医学研究数据的不断积累,原有的著作已不适应当前我国航天事业发展的需要。本书主要从上述目的出发,其中第一篇可作为研究生和航天员的教材,第二篇和第三篇对研究生和从事航天医学研究的技术人员进行课题选定和设计时有一定帮助。

本书由三篇组成,每篇都以生理系统为主线,分别进行阐述。第一篇是“失重生理学基础”,它主要介绍失重对人体各生理系统的影响、机理和防护措施,目的是使研究生和有关科研人员初步掌握失重生理学的基础知识;第二篇是“失重生理学研究进展”,分别介绍各生理系统有关的国内外研究进展和发展方向,以便使研究生和有关的科研人员对本学科

的研究有进一步的了解,可以更好地选择研究课题;第三篇是“失重生理学研究的实验设计和技术”,介绍了在进行失重生理学研究时需要注意的问题和一些主要的实验技术,目的是为了研究生或科研人员进行科研时,可以很快地找到和确定自己的实验方法,做出科学合理的实验设计。本书内容全面,层次分明,是一部有实用价值的教科书和参考书。

本书在编写过程中得到总装备部和航天医学工程研究所领导的关心和支持,得到蒋昌林、李启杰、李维刚、张文正、唐承革同志的帮助,在此一并表示谢意。

书中有不当之处,恳请读者指正。

目 录

第一篇 失重生理学基础

第 1 章 概论	2
1.1 失重生理学的形成和发展	2
1.2 失重时人体生理系统变化的总起因	10
1.3 失重生理学研究的初步结论	13
1.4 失重适应期和再适应期	16
第 2 章 失重对神经系统的影响	19
2.1 失重时感觉功能的变化	19
2.2 失重时平衡—运动系统的变化	24
2.3 航天运动病	27
2.4 脑调节功能紊乱	32
2.5 失重对神经反射的影响	36
第 3 章 失重对心血管系统的影响	40
3.1 心脏	40
3.2 血管	47
3.3 心血管调节功能	49
第 4 章 失重对血液系统的影响	54
4.1 血量	54
4.2 红细胞	57
4.3 血液流变性	62
4.4 血量下降的机理	65

第 5 章 失重对体液调节系统的影响	71
5.1 航天中的研究	71
5.2 失重和模拟失重时水和电解质的变化	74
5.3 失重对肾功能的影响	79
5.4 水盐代谢紊乱的机理	80
5.5 失重水盐代谢紊乱对机体的影响	85
第 6 章 失重对肌肉系统的影响	87
6.1 骨骼肌的结构、分类和功能	87
6.2 失重对骨骼肌的影响	88
6.3 引起失重肌萎缩的原因	99
6.4 失重时肌肉系统改变对机体的影响	101
第 7 章 失重对骨骼系统的影响	104
7.1 失重对骨质代谢的影响	104
7.2 失重时骨丢失机理	114
7.3 失重骨丢失的危害	119
第 8 章 失重对免疫系统的影响	122
8.1 免疫器官	122
8.2 非特异性免疫功能	124
8.3 细胞免疫功能	127
8.4 体液免疫功能	132
8.5 航天免疫功能变化的机理	133
8.6 对机体的影响	135
第 9 章 失重效应的防护措施	138
9.1 航天员的选拔	138
9.2 航天员的生物医学训练	141
9.3 飞行中的一般对抗措施	145
9.4 飞行中的特殊对抗措施	148
9.5 失重骨丢失的防护	157
9.6 飞行后的康复和治疗	160
参考文献	163

第二篇 失重生理学研究进展

第1章 空间医学实验研究的进展	166
1.1 空间人体实验	166
1.2 空间动物实验	170
1.3 国际空间站上的医学实验	181
1.4 航天科学技术对医学发展的贡献	188
第2章 失重神经科学研究进展	205
2.1 空间运动病机理及防护的研究	205
2.2 空间定向机制研究进展	211
2.3 失重脑功能研究进展	214
第3章 航天员立位耐力下降研究进展	219
3.1 立位耐力下降机理的研究	219
3.2 立位耐力下降对抗措施的研究	225
第4章 失重血液学研究进展	231
4.1 失重对血浆容量的影响	231
4.2 失重对红细胞质量的影响	233
4.3 防护和研究方向	240
第5章 失重肌萎缩研究进展	242
5.1 失重性肌萎缩	242
5.2 失重肌萎缩对抗措施研究进展	249
第6章 失重骨骼系统研究进展	252
6.1 生物因子与骨质疏松	253
6.2 重力刺激与骨细胞	256
6.3 骨骼的功能适应性理论	258
6.4 有限元技术在失重骨丢失研究中的应用	260
第7章 失重对肺循环影响研究进展	262
7.1 失重对肺循环的影响	262
7.2 失重对肺功能的影响	269

7.3 变化机理	273
7.4 进行失重肺循环和肺功能研究的意义	274
第8章 航天免疫学研究进展	276
8.1 航天与免疫	276
8.2 内分泌系统、免疫系统和空间飞行	283
参考文献	285

第三篇 失重生理学研究的实验设计和技术

第1章 失重生理学研究的实验设计	304
1.1 失重生理学研究中存在的问题	304
1.2 实验设计中应注意的问题	305
第2章 失重生理学中的模拟技术	309
2.1 建立地面模型的意义	309
2.2 常用的重力模拟方法	310
第3章 航天医学研究中的数学模型	319
3.1 数学模型	319
3.2 航天医学研究中数学模型的应用	322
第4章 前庭功能研究和检测技术	336
4.1 前庭—躯体反射功能检测	337
4.2 前庭功能检查方法	344
第5章 心血管功能研究和检查技术	353
5.1 立位耐力检查	353
5.2 运动耐力检查	360
5.3 人心血管调节功能检测	362
5.4 动物心血管实验研究技术	378
第6章 血液学和水盐代谢研究技术	382
6.1 空间血液和代谢物采集技术	382
6.2 血液学研究技术	385
6.3 水盐代谢研究技术	392

第7章 其他生理系统的实验技术	395
7.1 骨骼系统	395
7.2 肌肉系统	398
7.3 免疫系统	402
参考文献	410
缩略词	417

第一篇

失重生理学基础

- 第 1 章 概论
- 第 2 章 失重对神经系统的影响
- 第 3 章 失重对心血管系统的影响
- 第 4 章 失重对血液系统的影响
- 第 5 章 失重对体液调节系统的影响
- 第 6 章 失重对肌肉系统的影响
- 第 7 章 失重对骨骼系统的影响
- 第 8 章 失重对免疫系统的影响
- 第 9 章 失重效应的防护措施

第 1 章 概 论

1.1 失重生理学的形成和发展

1.1.1 失重生理学的形成

生活在地球上的人,从生命开始到死亡,都是处于 $1g$ 的重力环境中。因此,一般的生理学教科书和研究中都不介绍失重因素对生理系统影响的内容。

20 世纪 60 年代,实现了载人航天。航天员在进入地球轨道后,重力几乎完全消失,处于一种失重(微重力)状态。失重对人体的生理系统有明显的影响,能否克服失重对人体的不利影响已经成为决定载人航天能否实现的关键问题,失重生理学因此而产生,并随着载人航天的发展而发展。失重生理学是生理学中的一个新的学科分支,它主要研究失重对人体的影响,探讨其机理及制定有效的防护措施,目的是保证航天员在太空飞行时的健康和有效地工作。因此,它也是一门应用性很强的学科。

1.1.2 失重生理学的发展

根据航天医学研究的情况,可以将其发展分为 3 个阶段:

航天准备阶段(1945 年—1960 年) 在 20 世纪 40 年代末和 50 年代初,美国和苏联的航空、航天医学家们对人能否在航天失重环境中生存的问题有明显的分歧,一些有名的医学家和生物学家坚持认为是不可能的,他们认为人的心血管、肌肉、骨骼和免疫等系统在太空失重的环境下将失去其功能,失重会危及到航天员的健康和生命。而另一些生物医学专家则认为人的适应能力很强,可以适应失重环境,坚信载人航天是可能的。因此,此阶段失重生理学研究的的主要任务是观察人和

动物在地面模拟失重和短暂的失重飞行中及超失重交替过程中关键生理指标的变化,积累有关的医学和生理学资料,确定人进行太空飞行的可能性和安全性。

在此期间,采用生物火箭和卫星进行动物失重飞行试验。美国在1948年—1959年间,共发射了14枚生物火箭,首先进行了猴失重飞行的研究,失重时间仅2s~3s。苏联1949年开始在火箭上进行一系列研究,至1959年的10年间,进行26次火箭试验,52只狗参加实验,失重时间最长是10min。1957年苏联把小狗莱伊卡送入地球轨道,进行了为期1周的飞行,目的是研究航天失重环境对动物的影响。这是一次具有历史意义的动物太空飞行,宣告了航天生物医学研究新时期的到来。之后,1960年—1961年还成功发射了4艘载狗的卫星。在这些实验中,记录了与生命有直接关系的生理学指标,如心率、血压、呼吸和体温。实验证明动物可以很好地适应失重环境,没有出现危及动物生命现象,这为人进入太空奠定了基础。

飞行试验阶段(1961年—1980年) 1961年4月12日,苏联航天员加加林乘“东方”1号飞船进入太空,开创了载人航天的新纪元。之后,美国和苏联的航天员相继上天。同时,由于载人航天技术的发展,实现了舱外活动和登月。人在航天中生活的时间也由几小时增加到185天。在此期间广泛地积累了航天员在失重飞行前、中、后生理变化的数据,证明了人可以适应失重环境,初步了解了各个生理系统适应失重环境和返回后对重力环境再适应的规律,但也观察到失重对一些生理系统产生不利的影响,尤其是心血管、肌肉和骨骼系统。在此期间,地面也进行了很多有关重力生理学的研究,主要是从整体上观察模拟失重对生理系统的影响,对其变化机理进行初步的研究及制定了一些行之有效的防护措施。

系统试验阶段(1981年—) 此阶段是从1981年至今,并且在继续发展。这个阶段有两个特点:一个是随着航天员在空间停留的时间越来越长及星际飞行的到来,要突破人在空间长期停留的医学问题,其中最突出的是失重、辐射、心理因素对人体的影响,并解决在航天中生育后代问题;第二个特点是针对航天引起的医学问题,进行深入的观察研究。在这个阶段中,空间站的建立为航天中的医学研究提供了条件,不仅可以观

察长时间失重引起的生理变化,而且由于座舱环境增大,可以安装一些实验仪器和设备,进行航天中较深入的医学—生理学研究。同时,一些医学的载荷专家也进入空间站,他们作为太空医学研究的被试者和实验者,会更有利于进行失重环境下的医学—生理学研究。例如,目前飞行时间最长(438天)的苏联航天员就是一名医生,他在太空中进行了大量的医学观察和实验。

美国航天飞机的飞行为医学研究提供了方便条件,它不仅可以使更多的航天员参加航天中的医学实验,而且发射了专门进行生命科学研究的航天飞机,这样排除了其他因素的影响,使失重生理学的研究结果更准确、可靠。例如,美国发射了3次航天飞机,专门进行生命科学的研究,它们是SLS-1(1991年)、SLS-2(1993年)和D-2(1993年)。在这些飞行中进行了失重生理变化的机理性研究,发现了一些与地面实验不一致,甚至与经典的生理学理论相悖的现象,如航天员进入轨道后,中心静脉压不是如预期的那样升高,而是下降;失重时肺泡通气、灌流及通气/灌流比值的不均匀现象没有像预期的那样消失,只是有所减轻;进入失重环境后,抗利尿激素不降低等。对这些问题的深入研究,可能打破一般生理学的一些基本概念,提出新的理论和看法。

1.1.3 载人航天计划

1.1.3.1 苏联/俄罗斯(苏/俄)的载人航天计划

在载人航天的历程中,很多方面苏/俄是早于美国的。尤其是他们第一个将人送上太空、第一个实现太空行走及创造了在太空停留438天的最长记录。苏/俄的载人航天计划分为以下几步。

“东方”号(1961年4月—1963年6月)“东方”号飞船是苏联最早发射的载人飞船,“东方”1号在1961年4月12日将苏联航天员加加林送上天,开创了载人航天的新纪元。“东方”号飞船共发射6次,都是载人飞行。由于它座舱容积小,只可以容纳1名航天员,最短的飞行时间是1h48min,最长是5天。“东方”号飞行的目的是考验飞船及其各系统的可靠性,并了解人在失重飞行时生理系统和工作能力的变化。在这些短暂的飞行中,记录的医学参数有心率、呼吸描记图、心电图、心震图、脑电

图、眼电图、肌电图、体温、皮肤电反应等。通过最长5天的飞行,证明人可以生活在失重环境下,同时,“东方”2号的航天员季托夫第一次出现了运动病症状,这个现象也载入了空间运动病研究的史册。

“上升”号(1964年10月—1965年3月) “上升”号飞船基本与“东方”号相似,只是将内部结构做了一些改动,增加了航天员的座位,使其可以容纳3名航天员。“上升”1号是3名航天员,“上升”2号为了出舱,航天员要穿舱外航天服,故只能乘坐2名航天员。“上升”号飞船发射的目的是试验可以乘载多名航天员的飞船系统、考察航天员舱外活动和相互配合的能力。虽然“上升”号飞行的时间只有一天多,仅发射了2次,但它为苏联在空间竞赛中赢得了几个第一:第一次多人飞行成功,第1次实现了人在太空行走,第一次在航天中有生理学家进行医学检查,研究了失重下的听力、肺功能、前庭功能状态和肌肉强度等人体生理功能的变化。

“联盟”号(1967年4月—) 这是苏联最重要、发射最多的载人航天器。每次可以乘载1名~3名航天员。它的目的是提供一种可以与空间站连接的多用途的飞船,这种飞船可以作为组装空间站的基地,向空间站供应物品及进行航天中独立科学研究的飞行器。“联盟”号飞船由轨道舱、返回舱和服务舱组成。轨道舱分为工作区和生活区两部分,是航天员工作和生活的地方。舱的前端有一个可以与“礼炮”号空间站对接的窗口,航天员可以通过它进出空间站。“联盟”号自飞行以来,为了适应新的空间站进行了不断的改型,改型的“联盟”T号和“联盟”TM号飞船乘载的航天员增加,对接交会系统更完善。“进步”号货运飞船也是由“联盟”号飞船改进的,只是不载人,它不定期地将补给用品送到长期飞行的空间站中,再将空间站上的垃圾等废物装入舱内,在返回大气层时将其销毁。由于参加“联盟”号飞行的航天员多、飞行时间长,所以在“联盟”号计划中对失重时航天员生理系统的变化、机理和失重防护措施进行了广泛的研究,取得大量有用资料。

“礼炮”号空间站(1971年—1990年) 1971年苏联发射了世界第一个载人空间站——“礼炮”1号空间站,从此“联盟”号飞船结束了其独立执行任务的作用,而成为空间站的运输飞船。“礼炮”号空间站的发射

标志着人类的载人航天活动从飞行时间短、规模小的载人飞船,进入到飞行时间长、规模大的空间应用探索和试验阶段。苏联共发射了7个“礼炮”号空间站,其中“礼炮”6号空间站最重要,它容积大、设备全,前后有两个对接口,可以同时与两艘飞船对接。“礼炮”6号先后接纳了16艘飞船、33名航天员,在空间运行了4年10个月。1983年发射的“礼炮”7号,其中的3名航天员创造了当时最长连续飞行的记录——237天。“礼炮”7号的航天员瓦休提恩因患病,飞行了65天就返回地面。由于航天员在“礼炮”号中可以停留很长时间,因此在上面进行了航天员长期失重时生理系统适应性的研究。同时“礼炮”号内部的体积大,安放了很多训练设备,如跑台、自行车功量计、下身负压装置等,可以进行失重飞行期间对抗措施的研究。在航天中还采用了一系列综合的心理保障计划,克服航天带来的心理障碍。

“和平”号空间站(1986年—2001年) 1986年2月,苏联将“和平”号空间站的核心舱送到太空,人们把“和平”号空间站比喻为“太空列车”:它有6个接口,可以与多个航天器对接而成为“人造天宫”,在这个“天宫”中可同时容纳6名航天员。“和平”号空间站原计划运行5年,可是它却超期服役了10年。

“和平”号空间站的生命虽然短暂,但却是辉煌的一生。在15年内,有32艘“联盟”号飞船和62艘“进步”号货运飞船与之连接,先后有28个长期考察组和16个短期考察组在上面进行考察活动,有12个国家的135名航天员在“和平”号上工作过,其中俄罗斯航天员玻利亚科夫创造了在太空连续生活438天的世界记录。“和平”号空间站完成了23项国际科学考察任务,进行了1.65万次科学实验,它不仅为人类开发太空积累了丰富的经验和获得具有重大实用价值的成果,而且为人类在太空生活、征服火星准备了条件。因此,人们对它的离去有着难以割舍的复杂感情。苏/俄在空间站中进行了大量的医学观察和研究,包括从细胞和分子水平上进行的研究。长期飞行的医学研究表明人体是可以适应失重环境的,不同生理系统的适应过程不同。失重首先引起机体内环境机制的紊乱,然后激活特殊的功能系统以适应新环境。但是,长期飞行也引起生理系统出现一定程度的病理学改变,如,抗重力肌萎缩、骨质疏松、立位