

航天生保医学

SPACE LIFE SUPPORT MEDICINE

张法泉 徐国林 著

国防工业出版社

09904906

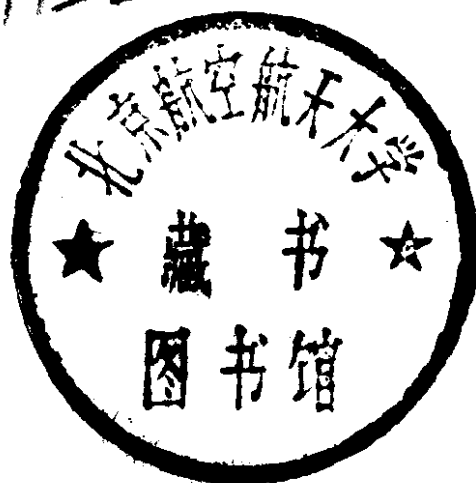
V7
11

航天生保医学

SPACE LIFE SUPPORT MEDICINE

张汝果 徐国林 著

HK59/22



国防工业出版社



C0469491

图书在版编目(CIP)数据

航天生保医学/张汝果, 徐国林著. —北京: 国防工业出版社, 1999.6

ISBN 7-118-02058-3

I. 航… II. ①张… ②徐… III. 航空航天医学 IV. R85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 00527 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 6¼ 157 千字

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 14.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

11k59/22 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开

放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘书长	崔士义			
委 员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

航天生保医学是航天医学的重要组成部分,主要内容是创造适宜人生活和工作的乘员舱环境、舱外活动和防护救生的医学问题。我们两位作者在这一领域工作了三四十年,积累了一些知识和实践经验。现将目前国内外主要资料和研究我们的研究成果及实践经验系统地加以总结,撰成此书,相信对我国载人航天事业的发展有一定的意义。

作为一本专著,不能像教科书一样面面俱到地论述,而是突出重点,扬己之长,对讨论的问题有自己的观点。本书包括绪论和六章,自始至终以保障航天员的生命安全和身体健康为重点。绪论主要讨论航天生保医学的研究内容、技术途径、航天生保系统医学评价的基本准则。有些内容是从科研实践中提炼出来的,有创新。第一~三章包括载人航天器大气环境选择的医学基础、乘员舱异常减压、舱内航天服医学问题和高空减压病等内容,将国内外资料同我们的研究成果融为一体,具有医工结合的特点和实用价值。第四章舱外活动是载人航天的重要内容,我们尚无实践经验,其生保医学问题主要是消化吸收国外资料,从中找出规律,加以系统整理。第五章指出了长期航天生保医学的发展方向,其中几点思考只是我们的创议,有待实践充实和检验。第六章是我们科研实践经验的总结,对今后的实践有一定的参考价值。绪论和第四~六章由张汝果撰写,第一~三章由徐国林撰写。由于本书内容涉及面广,我们的知识和学术水平有限,难免有错误和不当之处,希望读者给予批评指正。

著 者

1998年6月

目 录

绪论	1
第一节 航天生命保障系统简介	2
第二节 航天生保医学的主要研究内容	4
第三节 生保医学实验与装备评价的基本准则	8
第一章 载人航天器大气环境选择的医学基础	12
第一节 乘员舱大气压力及组成	12
第二节 低氧和高氧对人体的影响	18
第三节 二氧化碳分压增高对机体的影响	25
第四节 乘员舱微小气候的医学问题	28
第五节 乘员舱压力变化对机体的影响	32
第六节 航天员的能量代谢问题	37
第七节 乘员舱大气环境的医学评价	41
第二章 乘员舱异常减压和舱内航天服的医学问题	46
第一节 乘员舱异常减压的危害和生理限值	46
第二节 异常减压防护的基本原则和方法	48
第三节 异常减压防护措施的现状	51
第四节 弹射供氧	54
第五节 舱内航天服的医学问题	56
第六节 舱内航天服的医学评价	69
第三章 高空减压病	72
第一节 高空减压病的症状和分类	72
第二节 减压病的机理	75
第三节 高空减压病的预测	76
第四节 高空减压病的防治	78

第四章 舱外活动的医学问题	88
第一节 舱外活动装备的发展	89
第二节 出舱活动对机体的影响	95
第三节 舱外航天服的医学问题	99
第四节 出舱活动的安全措施	105
第五章 长期航天生保医学	108
第一节 空间站 ECLSS 的发展现状	110
第二节 航天环境因素的影响	113
第三节 乘员舱大气环境选择的几点思考	131
第四节 医疗保健和救护措施	136
第六章 环境模拟舱人体实验技术概述	141
第一节 常用的试验设备	141
第二节 模拟舱压力变化的影响	152
第三节 常见的呼吸异常反应	162
第四节 循环代偿功能障碍	174
第五节 低压变温舱试验中应注意的问题	177
第六节 航天服低压舱人体实验概述	181

CONTENTS

INTRODUCTION	1
§ 1 Brief Introduction of Space Life Support System	2
§ 2 Main Contents of Space Life Support Medicine	4
§ 3 Basic Criteria of Life Support Medicine Experiments and Equipment Evaluation	8
Chapter 1. Medical Foundation of Selecting Atmospheric Environment for Manned Spacecrafts	12
§ 1 Pressure and Constituents of Atmosphere in Space Cabins	12
§ 2 Effects of low – Oxygen and High – Oxygen envir onment on Human Body	18
§ 3 Effects of High CO ₂ environment on Human Body	25
§ 4 Medical Problems of Microclimate in Space Cabins	28
§ 5 Effects of Pressure Change in Space Cabin on Human Body	32
§ 6 Problems of Energy Metabolism of Astronauts	37
§ 7 Medical Evaluation of Atmospheric Environment in Space Cabins	41
Chapter 2. Medical Problems of Unwanted Decompression of Space Cabin and Intravehicular Spacesuit	46
§ 1 Harm and Physiological Limit of Unwanted Decompr- ession of Space Cabins	46
§ 2 Basic Principles and Measures of Protection Against Unwanted Decompression of Space Cabins	48

§ 3 Status of Protective Measures of Unwanted Decompression of Space Cabins	51
§ 4 Oxygen Supply during Ejection Escape	54
§ 5 Medical Problems of Intravehicular Spacesuit	56
§ 6 Medical Evaluation of Intravehicular Spacesuit	69
Chapter 3. Altitude Decompression Sickness	72
§ 1 Symptoms and Categories of Altitude Decompr- ession Sickness	72
§ 2 Mechanism of Decompression Sickness	75
§ 3 Forecast of Altitude Decompression Sickness	76
§ 4 Prevention and Cure of Altitude Decompression Sickness	78
Chapter 4. Medical Problems of Extravehicular Activities(EVA)	88
§ 1 Development of EVA Equipments	89
§ 2 Effects of EVA Conditions on Human Body	95
§ 3 Medical Problems of Designing EVA Spacesuit	99
§ 4 Safety and Rescue Measures for EVA	105
Chapter 5. Life Support Medicine of Long Term Space Flight	108
§ 1 Status of ECLSS for Space Station	110
§ 2 Effect of Space Environmental Factors	113
§ 3 Some Considerations of Selecting Atmospheric Environments	131
§ 4 Medical Support and Rescue	136
Chapter 6. Outlining Techniques of Human Experiments in Simulated Environmental Chambers	141
§ 1 Common Used Simulated Chambers	141
§ 2 Effects of Pressure Change on Human Body	152
§ 3 Categories of Abnomal Respiratory Reaction	162

§ 4 Compensatory Function Disorders of Cardiovascular System	174
§ 5 Worth Attentive Problems during Experiments in Hypobaric Thermal Chamber	177
§ 6 Outling Spacesuit Experiments in Hypobaric Chambers	181

绪 论

1961年4月12日苏联航天员加加林首次遨游太空,吹响了人类向太空进军的号角。30多年来人类在航天的征途中,克服了一个又一个困难,取得了重大进展,到目前为止已进行了300余人次载人航天活动(manned spaceflight)。除美、俄外,德、英、法、日、加等30多个国家都有了自己的航天员。持续在空间生活和工作最长时间已达438天,表明人类可以在空间长期生存,为下一步行星际航行奠定了基础。

载人航天技术是航天技术的重要组成部分和发展的新阶段。载人航天器与通常的人造卫星的不同点在于必须创造适宜人生活和工作的密闭舱,有确保人的安全和健康的防护措施,有再入大气层的防热和返回地面的安全着陆措施等。它和无人航天器相比,由于有一整套保障人的生活、工作和健康的硬件系统,结构重量增大;由于要确保人的安全,对航天器的设计制造、运载工具的推力和可靠性等都提出了更高的要求。载人航天技术比一般人造卫星技术更复杂,难度更大,人力、物力、财力的耗费更多。但是人类进入外层空间,向宇宙的深度和广度进军是历史的必然。地球外层空间的高真空、强辐射和航天中的微重力环境都是人类重要的环境资源。载人航天技术的发展及其应用对国家的政治、军事、经济和科学技术均有重要的影响,是一个国家综合国力的象征。

航天器乘员舱环境控制和生命保障系统(environment control and life support system, ECLSS)是载人航天器保障人在空间环境里生存、生活和工作的基础设施。它涉及许多环境医学问题,我们把它概括为“航天生保医学”。因为人暴露于真空环境里生存时间只有150s,所以,航天生保医学的核心是维持人体周围环境一定

压力和供氧,这是救生和防护的最关键问题。航天中的低压、缺氧和供氧研究是从高空生理和航空供氧装备医学研究的基础上发展起来的,是航天生保医学的重点。

第一节 航天生命保障系统简介

随着载人航天事业的发展,在航天医学的基础上逐步形成一门综合性应用性边缘学科——航天医学工程(space medico-engineering),在现代科学体系中属技术科学范畴。它把许多互相联系的学科知识、技术方法汇集于一体,旨在研究和解决载人航天全过程中人的安全、身心健康和工作效率有关的医学与工程问题,寻求航天器乘员舱人一机—环境系统的最佳组合方案,以便使工程系统达到安全、高效和经济的总体目标。航天 ECLSS 医学工程是航天医学工程的重要组成部分,通过医工结合、多学科合作,创造在航天中适宜人生活和工作的人工环境,保障航天员生命安全和身心健康。医学数据和要求是工程设计的依据,医工协商确定方案和各参数合理组合是工程实施的必要途径,医学鉴定和评价是确保安全的必要步骤。

自载人航天发展以来,航天器的 ECLSS 不断地完善,从保障短期载人航天,发展到满足长期载人航天的需要(和平号空间站自 1986 年 2 月发射至今,在轨道上仍正常运行)。航天服(space suit)从舱内应急救生用,发展为出舱活动(extravehicular activities, EVA)装备。航天生保医学研究的目的是为 ECLSS 和个人救生装备等产品的工程设计提供所需的医学数据,从人的使用和安全角度对装备和设施提出医学要求,并对工程研制产品进行医学评价,以保障航天员的安全健康和工作效能。对于任何一件航天产品来说,安全性、可靠性总是第一位的,特别是保障航天员的安全和健康的设施和装备,安全性和可靠性尤为重要。航天生保医学研究人员不仅需要有航空航天医学(主要涉及有关环境医学)的基础知识,针对可能出现的问题开展实验研究,寻找医学防护措

施,同时也要对工程实现的可行性及工程发展有所了解,因此必须理论联系实际,走医学与工程相结合的道路,才能使工程研制达到安全高效和经济的总目标。

一、ECLSS 的主要功能

ECLSS 是人在空间生活和工作的基本设施。随着载人航天时间的不断延长,ECLSS 的功能越来越完善,可以概括为以下 8 个方面:

1. 乘员舱环境控制功能:密闭舱压力和气体成分控制;舱内环境的大气温度和湿度及空气流速控制;乘员舱漏气补偿,舱壁温度控制以及大气监测等。

2. 大气循环和净化功能:供氧(储存氧或物理化学再氧等);惰性气体(氮)的补充; CO_2 的去除和处理;大气污染物(气态、微粒、微生物)的去除或控制。

3. 水处理功能:水储存或回收;水的消毒;水的温控;水的质量保障和监测;废水储存或处理。

4. 废物处理功能:尿和便的收集和处理;生活废物的处理。

5. 食物供给功能:食品的供给与储藏;食品加工;进食方式、用具及卫生;饮用水的调配(加热或冷却)。

6. 个人卫生与健康设施:衣物、家具及床上用品;乘员舱的清洁与卫生;运动与娱乐设施;乘员舱环境医学卫生标准。

7. 安全措施:防火和可能出现的应急情况的防护措施。

8. 出舱活动设施:过渡舱(空气锁);航天服;便携式生命保障系统;舱外活动机动装置(MMU)等。由于飞行任务和航行时间不同,对上述各种功能的要求是有差异的,如无 EVA 任务,载人航天器可以不具备第 8 项功能。

二、环境控制系统的分类

由于航行时间长短,ECLSS 也采用不同方式,按照向航天器补给生活物质的方式可划分为:

1. 开放式系统。其物质补给主要依靠航天器上贮存或由天地往返运输系统输送。代谢产物不回收再生,而是抛出舱外或封

存带回地面。这种系统结构简单,适用于短期载人航天。

2. 半再生式系统。能将航天中乘员产生的废水和 CO_2 全部或大部分回收处理,生成水和氧气供乘员们再使用,地面只需补充食品及部分饮用水和氧气。目前空间站上 ECLSS 基本达到这种要求。

3. 再生式系统,又称密闭生态生保系统,可控生态生保系统和生物生保系统。生物和非生物以闭路形式在系统内进行质量交换,连续地给航天乘员供给氧、水和食物(无需从系统外补充),维持人和动物的生存,并保持系统的平衡与稳定的生态环境。目前,美、俄等国均对这个系统的关键性技术开展研究,它将适用于长期载人航天和行星际航行。

第二节 航天生保医学的主要研究内容

前面所论述的航天 ECLSS 8 项功能以及个人救生装备工程设计所需的医学数据和要求都是生保医学研究的内容。医学家重点研究各种航天环境因素对机体影响的规律,确定各种生理界限值,制定 ECLSS 工程设计医学要求和报警及防护措施医学问题。

一、确定生理界限值

环境因素变化直接影响到人体的各种主客观反应。医学家常用需要保持某种机能状态(functional states)来要求和评价座舱环境控制系统的控制水平,即从生理学角度对环境各种参数提出控制界限值,它是评价环境因素对机体影响,预测人体机能状态的重要依据。生理界限值可划分为:

1. 阈限值(threshold limit value, TLV)是指某种外界因素变化到一定程度开始引起机体生理反应发生明显改变(显著增加或降低)或出现特异性代偿反应,此点以下称为无反应区。生理学上有各种反应阈值,如缺氧的视反应阈值、通气反应阈值等。毒理学把 TLV 定义为空气中含有某种有毒物质,每日 8h 接触不会对人体产生有害影响的平均浓度。

2. 耐受限度(tolerance limit)是指环境参数继续变化,机体的代偿反应不能维持稳定水平,出现明显的症状,继续坚持会发生功能障碍。耐受限度受刺激强度和时间两个因素制约。在某一强度下有严格的暴露时间限制,超过给定时间就可能给机体带来危害。因此,必需在此时间内采取防护措施或消除该种因素影响。

3. 生理极限值(physiological critical value)是指环境极端恶劣,直接危及人体的生命安全。如严重缺氧(暴露于 7000m 以上高度),肺泡氧分压(P_{AO_2}) ≤ 4.0 kPa,可能发生意外意识丧失;又如在高温环境里,人的体温 $\geq 38.6^{\circ}\text{C}$;在无体力负荷和无紧张因素影响下心率(HR) ≥ 140 bpm 等都是生理极限值。一旦发生必需立即采取有效的救护措施。

从环境生理学观点出发,机能状态是指机体适应外环境变化,保持机体内环境稳定能力(即代偿能力)和工作能力(也有作者称为机能储备)的状况。俄罗斯学者为了便于操作,把航天中的机能状态概括为三种:正常、临界和病理,并在医监台上分别以绿、黄和红色醒目地表示出来。我们分析各方面的资料,在俄罗斯学者划分的基础上做一些补充,便于医学和工程的掌握,原则上划为四种状态,即:

1. 正常状态:各环境参数控制在正常范围,即生理的无反应区,人体感到舒适。在有一定负荷条件下(体力或脑力),无不适感,生理参数比静息高而稳定。航天员可以保持良好的工作能力和效率。

2. 代偿状态:乘员舱环境控制系统个别或少数参数偏离正常范围,机体出现代偿反应,如安静状态体温、心率、呼吸率有某些改变。航天员有轻度不适感,工作效率下降,但仍能坚持正常工作。这表明某个或某些环境参数已达到或超过 TLV。机体的机能储备下降,存在着某些潜在性功能障碍。医监人员需密切注视各种环境参数和生理参数变化,需减轻航天员的工作负荷。如果已明确影响因素,一定设法排除。

3. 耐限状态:当环境参数继续恶化,已达到或超过机体能代