

重力生理学

——理论与实践——

刘光远 沈葵云 陈涤明 编著



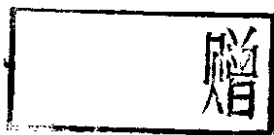
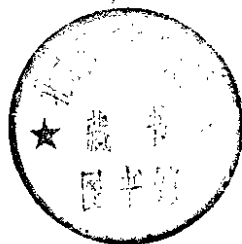
33631001

重力生理学

——理论与实践——

刘光远 沈羨云 陈藻明 编著

HK60/07



国防工业出版社



C0443945

✓

(京)新登字 106 号

内 容 提 要

本书是一种关于重力生理学的专著,它从重力增加和减小(即超重和失重)两个方面来阐述重力对生物和人体的生理影响。其主要内容包括:重力生物效应的基本概念;重力增加或减小对生物的生长、发育、遗传和进化的影响;超重对机体的影响和机体对它的反应,以及航空、航天中的超重防护措施;失重对机体的影响及其防护措施;重力与前庭器官的关系以及空间运动病等。

本书可以作为航空航天医学的科研和教学人员、高等院校生理专业的教师和高年级学生以及研究生的参考书。对于空军部队中的航空医生以及对航空和航天医学感兴趣的人也有参考价值。

重力生理学

——理论与实践——

刘光远 沈震云 陈泽民 编著

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)

新华书店经售

北京市飞龙印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 印张11³/₈ 296千字

1993年 9月第一版 1993年 9月第一次印刷 印数: 001— 800·册

ISBN 7-118-01084-7/V·90 定价: 12.60 元

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，内容明确、具体、有突出创见，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的高科技内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科学技术现代化和国防现代化需要的新技术、新工艺内容的科技图书。

4. 填补目前我国科学技术领域空白的薄弱学科的科技图书。

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评审工作，职责是：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
第一届评审委员会组成人员

主任委员： 邓佑生

副主任委员： 金朱德 太史瑞

委 员： 尤子平 采英贤 刘琮德
(按姓氏笔画排列)

何庆芝 何国伟 张汝果

范学虹 金 兰 柯有安

侯 迁 高景德 莫梧生

曾 铎

秘 书 长： 刘琮德

序

重力生理学是一门新学科，其理论基础属于生理学范畴，其应用则和航空航天实践密切相联。为了适应航空航天事业发展的需要，从50年代起我国也开展了这方面的研究工作，本书作者等都是最早的参加者。30多年来进行了大量的科研工作，形成了自己的学术思想，为我国这一学科的创建奠定了基础。他们利用工余时间将国内外有关数据加以整理写成此书，是一件值得提倡的事。

本书的特点是把超重和失重的生理影响从理论上联系起来，形成一个整体概念，这是一种新的尝试。另外，作者等在横向超重对心血管功能影响的机制，重力改变时心血管压敏反射的机制，机体对失重状态适应的整体性等方面根据自己的经验作了阐述，颇有独到之处。书中还结合航空航天实践中对重力改变的防护问题介绍了一些自己的研究成果，例如侧管式抗荷服的实效动态体表压概念，中医中药理论在失重和空晕病防治中的运用等也都是其它有关著作中未曾见到的。

本人作为我国航空航天医学最早的组织者之一，多年来深感国内有关学科的专著太少，与我国航空航天事业的飞速发展极不适应。本书的出版或可聊补空缺。还希望能看到更多的有关著作陆续出版，使我国航空航天医学文献宝库丰富起来。

蔡 翘 1990.3.15

前 言

重力生理学是随着航空和航天事业的发展而逐步形成的一门新学科。早期的航空生理学著作中一般只包括“加速度”、即超重生理影响的内容。50年代开始为载人航天作准备，逐渐开展了失重生理方面的研究，有关著作中才逐渐增加了失重生理影响的内容，但二者缺少系统的联系。我国从50年代后期起也开展了这方面的工作，历时30余年，然而至今国内尚无一本系统介绍这一学科的专著，这与我国航空、航天事业的飞速发展极不适应。我们将国内外有关资料以及自己的研究成果加以整理写成此书供与此学科有关者参考。

60年代初，我国著名生理学家蔡翘教授提出超重与失重实际上是一个问题的两个方面，应该将它们的生理影响从理论上系统地联系起来，统称为“重力生理学”。本书就是以这种学术观点为指导思想进行撰写的。书中还将重力生理学的理论与现代航空和航天中遇到的重力改变（即超重和失重）问题及其解决办法联系起来，以实现理论与实践相结合。

本书在编写过程中得到国防科工委航天医学工程研究所领导的关心和支持，又得到我国航空航天医学的创始人，著名生理学家蔡翘教授在学术上的指导，黄治平、杨光华、史之桢、马文华等同志协助搜集资料，从德全、梁宝林同志协助整理文稿，我们在此一并致以谢意！

书中不当之处，恳请读者指正。

作 者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 重力的基本概念	2
一、力学上的简单分析	2
二、几种典型的重力状态	4
第二节 重力生理研究中常用的模拟方法	7
一、 $G = 1$ 的模拟方法	7
二、 $G > 1$ 的模拟方法	7
三、 $G < 1$ 的模拟方法	10
第三节 重力的生物效应及其机制	14
一、重力生物效应的基本概念	14
二、个体大小与重力的影响	16
第四节 生物对重力的感知	17
一、单细胞生物	17
二、植物生长的向地性	17
三、动物对重力的感知	20
第五节 重力对动物的生长、发育、遗传和进化的影响	21
一、重力对生长和发育的影响	23
二、重力对动物身体质量的影响	23
三、重力对动物体型的影响	25
四、重力对动物代谢和身体组成的影响	26
五、重力对遗传和进化的影响	28
第二章 超重对机体的影响及机体的反应	30
第一节 超重的形成	30
一、人的日常活动	30
二、现代航空中的超重问题	31

三、航天中可能遇到的超重问题	33
四、超重的数值、作用方向 and 变化模式	37
第二节 超重对心血管系统的影响	39
一、 $+G_x$	39
二、 $-G_x$	57
三、 $+G_z$	62
四、 $-G_z$	68
五、 $\pm G_y$	69
第三节 超重对呼吸功能的影响	69
一、 $+G_x$	69
二、 $+G_z$	73
三、其它方向的重力对呼吸功能的影响	77
第四节 超重对视觉功能的影响	78
一、 $+G_x$	78
二、其它方向的超重	82
第五节 超重对高级神经活动的影响	82
一、一般表现	82
二、脑功能变化	83
第六节 超重作用下的工作效率	86
一、肢体动作	86
二、动作协调	87
三、操纵效率	88
第七节 人对超重的耐力	90
一、人对 $+G_x$ 的耐力	90
二、人对 $+G_z$ 的耐力	103
三、人对其它方向超重的耐力	105
四、超重作用的累积效应	106
第三章 超重的防护	116
第一节 现代航空中的超重防护措施	116
一、主动对抗动作	117
二、防护服装	119

X

三、改变座椅后仰角度	127
四、正加压呼吸	131
五、其它措施	132
六、综合性防护	132
第二节 航天中的超重防护	134
一、躺椅构型	135
二、合理体位	136
三、对抗动作	138
四、航天技术的提高	139
第四章 飞行人员的选拔和训练	142
第一节 高性能歼击机驾驶员的选拔和训练	142
一、选拔	142
二、训练	149
第二节 航天员的选拔和训练	150
一、选拔	150
二、训练	152
第五章 失重的生理影响	154
第一节 失重对血液的影响	154
一、血浆容量	155
二、红细胞	157
三、白细胞	172
四、血液粘度	174
第二节 失重对心血管系统的影响	177
一、失重时影响心血管系统的主要因素	177
二、失重和模拟失重时心血管系统的变化	183
三、失重心血管功能失调的机理	202
第三节 失重对肌肉系统的影响	211
一、失重和模拟失重对肌肉功能的影响	211
二、失重和模拟失重时肌肉形态学和生物化学的变化	222
三、失重时肌肉系统改变对机体的影响及其机理	230

第四节 失重情况下的骨质代谢	233
一、失重情况下的骨质代谢	234
二、模拟失重时的骨质代谢	241
三、骨质变化的危害及机理	249
第五节 失重对水和电解质平衡的影响	256
一、失重和模拟失重时水和电解质的变化	257
二、水和电解质紊乱对机体的影响	266
三、失重时水和电解质平衡紊乱的机理	268
第六节 失重对免疫系统的影响	272
一、免疫器官变性(萎缩)	273
二、细胞免疫功能降低	276
三、体液免疫功能的变化	279
四、对非特异性免疫功能的影响	281
五、航天时免疫功能变化的机理	283
第七节 防护措施	285
一、合理的作息制度	286
二、饮食和营养	286
三、药物	287
四、锻炼	288
第八节 生理系统的适应和再适应过程	296
一、生理系统的适应和再适应	296
二、影响因素	299
第六章 重力与前庭	304
第一节 前庭感觉系统的构造	304
一、前庭器官	304
二、前庭神经节和前庭神经	312
三、前庭神经核	312
四、前庭神经核的纤维联系	313
第二节 正常重力下的前庭生理	316
一、前庭器官感受刺激的机理	316
二、前庭反应类型	320

三、前庭功能检查方法	321
四、运动病	334
五、空间定向障碍	339
第三节 失重下的前庭生理	342
一、航天飞行中前庭反应的实验研究	342
二、航天运动病	344

第一章 绪 论

自从地球表面出现最原始的生命直到进化成为现在的高级动物——人，整个过程都是在地球的引力场中完成的。地球的引力使地壳保持完整，使地表的水流向低处形成河流、湖泊和海洋，使大气笼罩在地球表面而不致散入宇宙空间……，这些都给生命的形成提供了必要的条件，而生命一经形成，它的发展和进化又无一不受地球引力的影响。人作为地球表面生物进化的最高阶段，它的全部生理特点的形成都与地球表面的重力状态密切相关，并与之高度适应。不难想象，如果这种重力状态发生变化，必将引起人体相应的反应。变化不大时，可以通过反应面达到新的适应，变化过大则可能产生不利的影响，甚至造成损伤或导致死亡。幸运的是，自从生命在地球表面形成以来，这种重力状态没有发生过太大的变化。人自己的活动中有时会出现一时性的重力变化，但由于变化不大和持续时间不长，不足以对人体产生明显的影响。然而，自上个世纪末叶以来，情况发生了变化。莱特兄弟制成了飞机，人类开始飞向天空。后来的高性能飞机更可以由于机动飞行时的各种加速度而使重力剧烈增加，严重地影响着飞行人员的健康。本世纪60年代又实现了载人的绕地球轨道飞行，这可以使重力几乎完全消失，又从另一个方面对人的生理机能造成影响。为了弄清由于重力改变而引起的一系列生理现象，并找出有效的防护措施，以保证航空和航天任务的顺利完成，生理学家在这方面进行了大量的研究工作，并逐渐形成了一门崭新的学科——“重力生理学”。如果只从人类活动中出现这些明显的重力变化并引起生理学家注意开始计算，重力生理学的历史只不过50~60年，但是，如果把早期的生物学家们对于重力（那时主要是地球引力）引起的一些生物效应的初步观察也包括在内的话，它的历史或许

可以上溯到17世纪末叶，至今已有大约300年之久了。

从本世纪30年代后期开始，国外出版了一些关于航空和航天的书，其中大都包括“加速度”或“失重”等有关内容。也有一些著作是专门论述航空或航天中“超重”或“失重”问题的。它们大都是从航空或航天中的具体问题出发而讨论其生理影响和防护措施，而未能在理论上形成一个整体。现在看来，有关“超重”或“失重”生理方面的研究成果已经越来越清楚地表明“超重”和“失重”实际上是一个问题的两个方面。60年代初，我国著名生理学家蔡翘教授倡导将它们纳入一个范畴，统称为“重力生理学”。这样，可以在理论上和概念上提供一个系统性和统一性的基础，使对于许多理论问题的阐述得以更加清楚和明确，对于航空和航天中具体的重力问题及其防护的研究也可以提供更加深入的理论基础。

基于上述考虑，本书将把重力生理学的整体概念贯穿于各个章节之中。但由于篇幅有限，对于早期的侧重于重力生物学方面的基础研究只作一些概括性的介绍，而将重点放在与近代航空和航天关系比较直接的重力生理学方面，并对其在航空和航天实践中所起的作用作一些具体介绍。

第一节 重力的基本概念

一、力学上的简单分析

在经典力学著作中，一般常把一个物体的重量归因于地球对它的引力，可用

$$W = mg \quad (1-1)$$

来表示。式中 W ——物体的重量， m ——物体的质量， g ——地球的引力。有时，甚至把地球的引力就直接称为重力。对于受地面承托而静止于地球表面的物体来说，这种提法或许没有明显的矛盾。但是，对于一个处于复杂的运动状态，或者远离地球而与其它星体接近的物体来说，就显得过于简单而难于说明问题了。

这里不准备进行复杂的力学分析，只就一些最基本的概念作简单的讨论。

在著名的牛顿力学中已经明确指出了一个物体只有在外力的作用下才能改变其原有的运动状态。但是，外力与一个物体之间的相互作用可以有不同的方式。引力也是来自外部的力，它是作用于物体内部的每一个质点，并与该质点的质量成正比。而以机械接触的方式从外部施加的力则只作用于该物体表面的某些部分，通过物体内部无数质点而传布于整个物体。前者是均匀地作用于整个物体中每一质点的，故各质点之间不会因此而产生相互作用的力。后者则不同，它是可以引起物体内部各质点之间相互作用的力。所以在分析重力问题时对于这两种外力必须区别对待。

哈伯(H. Haber)引用的古老的达蓝贝尔(d'Alembert)法则认为作用在一个物体上的各种力的矢量和必然为零。这些力归结起来不外三种，即引力、机械外力和惯性力⁽¹⁾。它们的关系为

$$F_g + F_i + F_e = 0 \quad (1-2)$$

式中 F_g 为引力， F_i 为惯性力， F_e 为机械外力。该式表明不论在何种状态下，作用在一个物体上的三种力必然是平衡的。可以看出，在这里他是把引力和机械外力区分开的。惯性力则具有和引力相似的性质，是存在于物体内部每个质点，并与该质点的质量成正比的。所以三种力中只有机械外力是可以引起物体内部各质点之间相互作用的力。从这种概念出发，可以把式(1-2)改写为

$$W_s = F_g + F_i = -F_e \quad (1-3)$$

而以 $-F_e$ 来表示一个物体的“视重”即 W_s ，这种表达方式就比 $W = mg$ 更加全面了。这说明，使一个物体具有“视重”，即表现出重量的关键因素是机械外力，而该物体的重量实际上就是该物体对于这种机械外力的反作用力。

从力学的原则来看，这种解释是合理的，可以适用于任何运动状态，但是这种所谓机械外力的概念不大容易被一般人接受。我国著名科学家钱学森提出了一种更为简单而直接的解释⁽²⁾。他

的概念是直接以物体的运动状态为依据，用形成物体运动的加速度的力的负值，即 $-F_g$ 来代替惯性力 F_i 。这样，(1-3)式就可以改写为

$$W = F_g - F_i = mg - ma \quad (1-4)$$

从中可以看出，引力和惯性力是形成重量的基本因素，因而可以称为重力。这种提法和人们的传统习惯比较接近，就比较容易被人接受了。

由于地球表面的各种生物，有史以来都是生活在地球引力场中的，故尔一般将静止于地球表面的重力状态看作是正常的标准重力状态。当重力条件改变时，为了描述上的方便，人们常常把改变后的重力状态与静止于地球表面的重力状态进行比较而加以标准化，并用 $G^{\oplus}$ 代表标准化重力状态，即

$$G = (mg - ma) / mg = (g - a) / g \quad (1-5)$$

$G = 1$ 时称为标准重力状态； $G > 1$ 时称为超重状态； $G < 1$ 时称为失重状态。

二、几种典型的重力状态

按照前述的概念，可以对几种典型的重力状态作一些简单的分析。

1. 静止于地球表面的重力状态 (图1-1)

这是我们日常最熟悉的标准重力状态。这时 g 以其原有的数值和方向存在，由于物体受地而承托（机械外力）而没有运动，故 $a = 0$ ，按(1-5)式计算

$$G = |g - a| / g = (g - 0) / g = 1$$

即该物体处于标准重力状态。

2. 在近地空间向地面自由降落时的重力状态 (图1-2)

假设周围环境为真空，物体下落时没有空气的阻力。此时加速度 $a = g$ ， $-a$ 与 g 数值相等而方向相反。

● 为了与地球引力 g 相区别而使用 G ，此处的 G 不是牛顿的万有引力常数。