



主编 刘雪梅 宋兴舜
主审 杨传平

HANGTIAN YUZHONG
GAILUN

航天育种概论



东北林业大学出版社

航天育种概论

主编 刘雪梅 宋兴舜
主审 杨传平

东北林业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

航天育种概论/刘雪梅, 宋兴舜主编. —哈尔滨: 东北林业大学出版社,
2009. 8

ISBN 978 - 7 - 81131 - 415 - 1

I. 航… II. ①刘…②宋… III. 航天—技术—应用—育种—概论
IV. S33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 149798 号

责任编辑: 任 俐

封面设计: 彭 宇



NEFUP

航 天 育 种 概 论

Hangtian Yuzhong Gailun

主编 刘雪梅 宋兴舜

主审 杨传平

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

东 北 林 业 大 学 印 刷 厂 印 装

开本 787 × 960 1/16 印张 12.75 字数 229 千字

2009 年 8 月 第 1 版 2009 年 8 月 第 1 次 印 刷

印数 1—1 000 册

ISBN 978 - 7 - 81131 - 415 - 1

定价: 23.00 元

前 言

航天育种是航天技术、生物技术和育种技术相结合的产物，是近几十年来产生的一种崭新的育种技术。我国作为目前世界上仅有的三个掌握返回式卫星技术的国家之一，在航天育种领域取得的一系列开创性的研究成果，受到世界著名的《自然》和《科学》杂志的专题报道，并首次在美国休斯顿举办的第三次世界空间大会参展，吸引了世界科学家的关注。

2008年9月25日，“神舟七号”载人航天飞船在酒泉卫星发射中心发射升空。清华大学在“神舟七号”飞船上，搭载了主要用于工业生物技术研究的新型生物材料、生物燃料、医药和食品等重要微生物菌种，中科院搭载了南芥、番茄等植物，其实验结果将为今后载人航天事业的空间保障系统提供依据；中国林科院搭载了多种林草类种子，其研究成果将对恶劣生态环境的生物恢复等有着广泛的应用前景；卫生部搭载了用于研制抗恶性肿瘤的纳米药物生物原料等多种重要植物，可望筛选出具有更高活性和合成能力的抗恶性肿瘤的优良菌株。可见，浩瀚的太空已成为中国科学家培育生物新品种的实验室和育种基地。

20年来，中国在航天育种方面已取得一系列开创性的研究成果和令人瞩目的成就，已审定水稻、小麦、棉花、大豆、油菜、黄瓜、芹菜、番茄、大葱、西瓜、白莲等作物品种513个，累计示范推广面积超过13.33万 hm^2 ，有的品种初具产业化规模。我国育成的太空稻新品种可增产20%，小麦可增产10%~15%，育成的粮食作物新品种在生产上大面积推广后，每年可为我国增产粮食30亿~40亿kg。

随着科学技术的突飞猛进，航天育种的研究将提高到一个新的水平。航天诱变往往变异幅度大，频率高，并且稳定性好，作为一种提高突变频率，促进基因重组，创造新类型的有效手段在当今育种中正发挥着重要的作用。因此，航天育种研究必须向深度和广度发展，实现植物空间诱变育种的重大突破，使之在现有技术和水平上有所提高，促进人类社会的经济发展。

本书主要介绍航天育种的基本原理和特点，空间辐射生物学原理，航天育种常用生物学实验技术及航天育种在动物、农作物、花卉、药用植物、草、林木和微生物等各生物领域的研究方法和成果。本书既可作为相关专业研究生和高年级本科生的航天育种技术的入门教材，也可供从事这一领域研

究及生产的科研和技术人员参考。

全书由东北林业大学刘雪梅博士、宋兴舜博士任主编，东北农业大学成栋学院任静博士、东北林业大学宋福南博士任副主编，由东北林业大学杨传平教授主审。编写分工：刘雪梅负责全书结构设计、统稿，并编写第八章；宋兴舜编写第一章、第三章；任静编写第二章、第四章、第七章、第九章；宋福南编写第五章、第六章；韩春华编写第十章。在此感谢马双、尹贇鹏、刘长莉、吴迪、邢磊、周菲、陈鹏飞、闻可心、戴超几位研究生在本书资料搜集、整理过程中给予的帮助。

航天育种涉及领域广阔，发展迅速，限于作者教学与科研的局限性，遗漏、错误和不妥之处在所难免，恳请读者指正。

编者

2008年10月

目 录

1 概述	(1)
1.1 航天育种概念	(1)
1.2 航天育种的任务	(2)
1.3 航天育种的系统构成及过程	(2)
1.4 航天育种生物学实验的发展	(3)
1.5 航天育种的空间环境	(6)
2 空间辐射生物学原理	(14)
2.1 空间辐射生物学基础	(14)
2.2 空间辐射的生物学效应特点	(17)
2.3 空间辐射的生物学效应	(23)
2.4 空间辐射生物学效应分类	(33)
2.5 空间辐射生物学效应的影响因素	(35)
3 航天育种的基本原理与特点	(37)
3.1 航天育种诱变机理	(37)
3.2 航天育种的特点	(40)
4 航天育种常用生物学实验技术	(45)
4.1 细胞生物学技术	(45)
4.2 分子生物学技术	(50)
5 航天育种在动物领域的应用	(56)
5.1 美国、前苏联的动物航天实验	(56)
5.2 中国动物的航天实验	(59)
6 航天育种在农作物领域的应用	(64)
6.1 农作物航天育种概述	(64)
6.2 水稻的航天育种	(69)
6.3 小麦航天育种	(79)
6.4 玉米的航天育种	(85)
6.5 高粱航天育种	(90)
6.6 棉花航天育种	(92)
6.7 园艺作物的航天育种	(96)

2 航天育种概论

6.8	油料作物的航天育种	(116)
6.9	农作物航天育种发展所面临的问题	(121)
7	航天育种在花卉领域的应用	(123)
7.1	花卉空间诱变的特点与生物学效应	(123)
7.2	花卉航天育种的研究成果	(128)
8	航天育种在药用植物、草及林木上的应用	(138)
8.1	药用植物的航天育种	(138)
8.2	草航天育种	(142)
8.3	林木航天育种	(149)
9	航天育种在微生物领域的应用	(158)
9.1	微生物航天育种的研究现状及机理	(158)
9.2	微生物空间诱变效应	(160)
9.3	几种微生物的航天育种	(161)
9.4	微生物航天育种的技术瓶颈和展望	(167)
10	航天育种的发展及基地	(168)
10.1	航天育种是生命科学研究的重要组成部分	(168)
10.2	中国航天育种基地建设	(172)
	参考文献	(182)

1 概 述

1.1 航天育种概念

航天诱变育种也称空间诱变育种，是将作物种子或诱变材料搭乘返回式卫星或高空气球送到太空，利用太空特殊的环境诱变作用，使种子产生变异，再返回地面选育新品种、新材料，培育作物新品种的作物育种新技术。它是航天高科技与农业遗传育种技术相结合的产物，是综合了宇航、遗传、辐射、育种等跨学科的高新技术（图 1-1）。

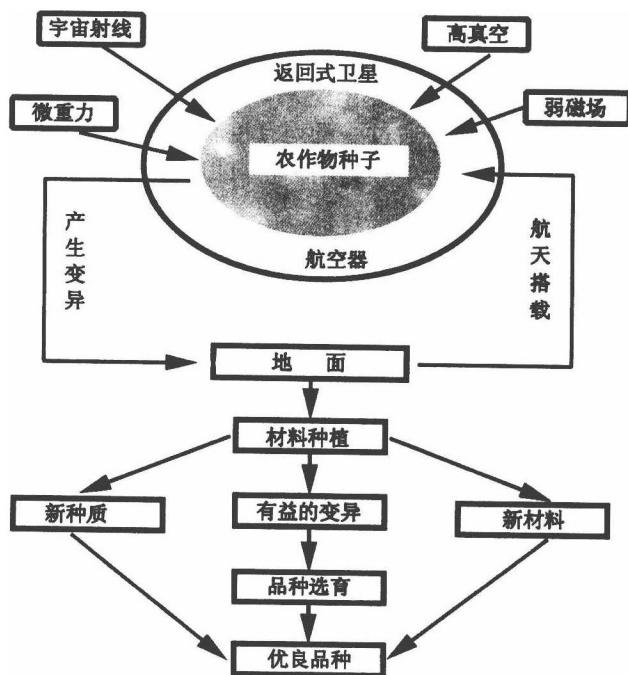


图 1-1 航天育种模式

航天育种可以缩短育种周期，正常的农业育种一般需要 8 年时间才能推广，而太空育种只需要 4~5 年，明显缩短了育种年限。太空育种培育出

2 航天育种概论

的蔬菜和粮食不仅优质高产，更具有广阔的市场前景。先进的航天技术为快速培育优良品种及特异种质资源开辟了一条新途径，为人类进入太空农业时代展示了美好前景。利用和开发太空环境，这是人类文明史上的一次伟大的飞跃，它必将促进人类社会的发展。

1.2 航天育种的任务

1.2.1 创造植物种质资源

遗传性变异是生物进化获得新种质的基础，突变是有机体变异性的源泉。利用航天诱变因素能够有效地诱发遗传基因突变、染色体突变、核外突变，获得用一般常规方法难以得到的各种突变类型，经过后续培育鉴定和选择，育成具有某一（或某些）优良特征特性的新种质，丰富基因库，为育种提供宝贵的原始材料。

1.2.2 选育新品种

利用航天诱发获得突变，通过一系列有机联系的育种环节和程序，选育出综合性状优良的新品种直接生产利用；也可以利用航天诱变获得的优异新种质作亲本材料，通过杂交或其他育种方法选育新品种。

1.2.3 拓宽诱发突变的应用范围

扩大应用诱发突变创造新品种的作物种类。除应用于主要农作物外，还可扩大应用于多年生果树、经济价值高的植物、药用植物、观赏植物，以及饲料作物等。

扩大渗透应用于其他育种领域。利用航天诱变技术解决育种中的某些特殊问题，例如，克服自交不孕性和杂交不亲合性，促成远缘杂交，实现外源基因转移，开拓创造新种质的途径等。

1.3 航天育种的系统构成及过程

航天育种是把普通种子或者其他材料送往太空，使其在太空中特有的环境下进行变异的育种方法，简单地说，其过程主要由“天上”和“地下”两部分构成。

1.3.1 种子筛选

种子筛选是航天育种的第一步，这一程序非常严格，需要专业技术。带上太空的种子必须是遗传性稳定、综合性状好的种子，这样才能保证太空育种的效果。

1.3.2 天上诱变

利用卫星和飞船等太空飞行器将植物种子带上太空，再利用其特有的太空环境条件，如宇宙射线、微重力、高真空、弱地磁场等因素对植物的诱变作用产生各种基因变异，再返回地面选育出植物的新种质、新材料、新品种。种子诱变表现得十分随机，在一定程度上是不可预见的。航天育种不是每颗种子都会发生基因诱变，其诱变率一般为百分之几甚至千分之几，而有益的基因变异仅为3‰左右。即便是同一种作物，不同的品种，搭载同一颗卫星，其结果也可能有所不同。航天育种是一个育种研究过程，种子搭载只是走完万里长征的一小步，不是一上去就“变大”，整个研究最繁重和最重要的工作是在后续的地面上完成的。

1.3.3 地下攻坚

由于这些种子的变化是分子层面的，想分清哪些是我们需要的，必须先将它们统统播种下去，一般从第二代开始筛选突变单株，然后将选出的种子再播种、筛选，让它们自交繁殖，如此繁育三四代后，才有可能获得遗传性状稳定的优良突变系。期间还要进行品系鉴定、区域化试验等。这样，每次太空遨游过的种子都要经过连续几年的筛选鉴定，其中的优系再经过考验和农作物品种审定委员会的审定才能称其为真正的“太空种子”。

1.4 航天育种生物学实验的发展

1.4.1 我国航天育种的发展

航天育种的最大优势在于能够在较短的时间内，创造出目前地面诱变育种方法难以获得的罕见基因资源，培育出有突破性的优良品种。我国是世界上最早开展航天育种研究的国家之一，在太空诱变育种方面进行了大量的实验，不论广度和深度，品种与成果均位于国际先进水平。

1.4.1.1 探索阶段(1987~1995年)

我国在1986年制定的“863”计划中,将空间植物学研究列入空间生命研究计划。并确定我国实施航天育种工程的策略为:加强航天育种,追踪国际发展趋势,提高我国作物育种水平。国务院批准了“航天育种工程”的重大项目,计划发射返回式农业科研卫星。这为促进我国航天农业技术进步起到巨大推动作用,也将加速我国航天农业高科技项目的产业化进程。在中国高科技产业化研究会常务理事扩大会议上,我国决定将用航天育种技术为西部地区的防沙、治沙培育优良草种,以支援西部地区的生态建设。专家们认为,用航天育种技术培育草种,很可能在草种的防沙、治沙功能上取得突破性成果,为西部地区的生态建设做出意想不到的贡献。

1987年8月5日,一批农作物种子、菌种和昆虫等“搭载”我国第9颗返回式科学试验卫星升入太空,拉开我国航天育种序幕。1991年,“航天效益工程”提出,航天技术要为国民经济建设服务,成为航天事业发展的重要原则。1995年,专家建议将航天育种工程列入国家重大科技工程计划。

1.4.1.2 立项阶段(1996~2005年)

1996年1月16日,第一次全国航天育种技术交流研讨会召开。王淦昌院士等7位专家学者联名给中央写信,建议把航天育种工程列入国家计划并发射一颗农业卫星。2000年10月,《航天育种工程项目可行性研究报告》通过了有关部委评估。2000年11月16日,杨凌航天育种基地建成。主要选育适宜西部生态环境的农作物、蔬菜、果树、林业、草业新品种,在杨凌航天育种基地进行育植,为西部农业发展和生态环境建设提供优良品种。2003年4月22日,国务院批准《关于审批航天育种工程项目可行性报告的请示》。航天育种卫星项目正式立项。

1.4.1.3 发展阶段(2005年至今)

2005年7月26日,国防科工委正式批准《航天育种系统工程研制总要求》,工程开始实施。2006年7月22日,我国首颗育种卫星和运载火箭研制成功,装载种子完成筛选和初步分析。9月9日,“实践八号”育种卫星在酒泉卫星发射中心升空,这颗专事农业科技的科学实验卫星使航天育种从搭载卫星的“配角”成为“主角”。9月24日,在四川遂宁成功返回。9月26日,国防科工委将返回的种子正式移交农业部,航天育种进入实质性研究阶段(见图1-2、图1-3)。

航天育种技术开辟了有效培育新品种及特异种质资源的新途径,为人类进入航天农业时代展示了美好的前景。开展空间育种技术研究和探索,是发展现代农业的一项全新尝试,是当今世界农业领域中最尖端的科学技术课题

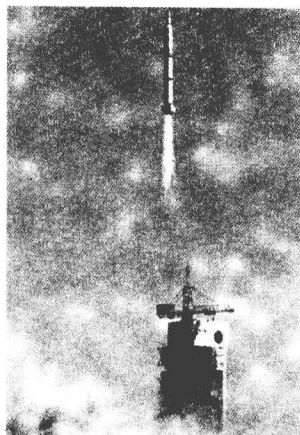


图 1-2 我国在酒泉成功发射
“实践八号”航天育种卫星
(引自 <http://www.96116.net/news/nongyeyao wen/2006/9/70050.shtml>)



图 1-3 “实践八号”育种卫星
返回舱装载的农作物种子
(引自 <http://www.csp.net.cn/zhtf/ht/htz/sj8/200703/1368.html>)

之一。

1.4.2 世界航天育种的发展

早在 20 世纪 60 年代初,前苏联及美国的科学家开始将植物种子搭载卫星上天,在返回地面的种子中发现其染色体畸变频率有较大幅度的增加。1977 年, PETERSON 等报道了美国阿波罗飞行中具有特殊遗传标记 (LW1/IW1) 的玉米种子受宇宙射线中高能重离子轰击后体细胞突变在 2~9 片叶子上均出现黄色条纹。美国“巨棉 1 号”抗虫棉是美国农业专家由美棉 1 号抗虫棉经太空辐射变异获得的一个抗虫棉超高产新品种。20 世纪 80 年代中期,美国将番茄种子送上太空,在地面试验中也获得了变异的番茄,种子后代无毒,可以食用。1996~1999 年,俄罗斯等国在“和平号”空间站成功种植小麦、白菜和油菜等植物。目前国外根据载人航天的需要,搭载的植物种子主要用于分析空间环境对于宇航员的安全性,探索空间条件下植物生长发育规律,以改善空间人类生存的小环境,其目的在于要使宇宙飞船最终成为“会飞的农场”,最终解决宇航员的食物自给问题。迄今为止,国外尚未见到有关专门利用航天诱变进行农作物育种的研究报道。

1.5 航天育种的空间环境

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，而地球生物去太空漫游所产生的各种变化，人类正在积极地探索。

1.5.1 地球环境

1.5.1.1 地球

地球是太阳系行星之一，形状接近于球体，平均半径 $r_0 = 6\,370\text{ km}$ ，赤道半径为 $6\,378\text{ km}$ ，两极半径为 $6\,356\text{ km}$ ，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 $1.083 \times 10^{21}\text{ m}^3$ 。

1.5.1.2 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，大气压的标准值是 $P_0 = 101.3\text{ kPa}$ 。随海拔高度升高而降低，其变化可表示为

$$P = P_0 (1 - 0.006\,5 \alpha / 288)^{5.25} \text{ (kPa)}$$

式中： P ——大气压， kPa ；

P_0 ——大气压标准值， kPa ；

α ——扩散系数。

1.5.1.3 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 $g_0 = 9.81\text{ m/s}^2$ 。重力常数与距地心距离相关，与地心距离 r 的平方成反比。

1.5.1.4 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。生活在地球上的生物，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。

1.5.1.5 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。

1.5.2 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性质上都与地球不同。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。

1.5.2.1 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

$$F = GMmR^2$$

式中: F ——地球引力, N;

G ——引力常量;

M ——天体质量, kg;

m ——地球质量, kg;

R ——两球心间的距离, m。

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,可以看做在此点重力为零。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($10^{-5} \sim 10^{-6}g$)下,而非零重力条件。

1.5.2.2 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 $1\ 390\text{ W/m}^2$ 。星光的能量则小于 10^{-9} W/m^2 。在可见光区域,太阳辐射相当于表面温度为 $5\ 700\text{ K}$ 的黑体。

(2) 空间的电离辐射。空间存在三种类型的电离辐射。

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1~2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。

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。

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。分为内带和小脂两个同心的区域。

1.5.2.3 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。地外空是一种真空状态,在真空状态中,各种材料都会受到影响,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 160 km ,此时大气温度虽已达到 $1\ 000\text{ K}$ 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 700 km 高度,分为对流层、平流层和电流层。 700 km 以上称为外大气层,可以视为空间开始的地方。实际从 300 km 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 $17\sim 18\text{ km}$,两极地区上至 $8\sim 9\text{ km}$,中纬度地区上至 $10\sim 12\text{ km}$ 。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 $60\sim 80\text{ km}$ 的高空。在平流层存在特殊的气

候分布。11~25 km 高度范围内,气温基本恒定在 -56.5°C ,故又称为“同温层”。在25~50 km 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50~80 km 范围内,气温又随高度升高而降低。电离层的高度范围是80~700 km,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”。80~100 km 范围内大气温度最低,为 -100°C ,200 km 以上温度急剧升高为1 000~20 000 $^{\circ}\text{C}$ 。

在700 km 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。

1.5.3 与运载器相关的环境条件

航天特殊环境还包括运载器发射和返回时的环境条件。

1.5.3.1 加速度

飞行器在上升阶段中,最大加速度可接近10 g。在加速度作用下,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。

1.5.3.2 噪声

载人飞船上升及进入大气层时,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140 dB。采取措施后,航天员经受的噪声峰值约为120 dB。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。

1.5.3.3 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在 $2 \sim 15$ 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 20 g。进入大气层,开伞也带来冲击力。着陆时,飞船还会产生 $40 \sim 60$ g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。

1.5.3.4 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 24 h周期,决定其昼夜节律。而载人的轨道飞行器一般以约 90 min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,这些均可能成为未来空间飞行任务的关键影响因素。

1.5.4 辐射环境

随着载人航天事业的发展,人类迈向太空的脚步更加坚定,与此同时,人类不可避免地曝露于外层空间的辐射环境,其对载人航天活动安全的影响不容忽视。虽然目前人们对空间辐射的效应研究已深入到细胞分子水平,但这一辐射环境的极其特殊性,使我们距离深刻认识空间辐射引起的一系列生物学效应、作用机制及其生物学意义仍有较长的路。

空间飞行中,辐射是仅次于失重的危害因素。由于缺乏大气层和地球磁场的屏蔽,太空存在着比地球高得多的天然辐射,辐射场的性质也与地面不同,特别是存在高能重离子。由于受质量限制,航天器和航天服不能屏蔽所有的空间辐射,加上航天员为执行任务还要出舱活动,所以不可避免地要受到空间辐射。空间辐射是载人航天主要关注的问题,同时也是星际飞行任务的潜在限制因素。

空间电离辐射包括了多种高能带电粒子,如电子、质子、氦核及更重的离子(High Charge and Energy Ion, HZE),其中质子占的比例最大。空间飞