

太空放射生物学

杨垂绪 梅曼彤 编著

中山大学出版社

1995年·广州

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

太空放射生物学/杨垂绪, 梅曼彤 编著. —广州: 中山大学出版社, 1995.7

ISBN 7-306-00925-7

I. 太… II. ①杨… ②梅… III. ①太空科学 ②太空辐射
③生物学 IV. Q·15

中山大学出版社出版发行

(广州市新港西路 135 号)

南海印刷公司印刷 广东省新华书店经销

*

850×1168 毫米 32 开本 7 625 印张 3 插页 20 万字

1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1-1500 册 定价: 15.00 元

内 容 提 要

本书第一作者杨垂绪是美国航空航天局约翰逊航天中心特级科学家和放射保健主管。1993年应邀到意大利那不勒斯大学物理系任访问教授，讲授太空放射生物学。本书集作者数十年教学的经验 and 科研的结果。

全书包括：太空的辐射环境、辐射损伤的机制、重离子辐射对不同生物系统的效应、太空辐射对人体健康的影响及辐照限值等内容；书末附有专用名词英汉对照表、物理常数、单位及转换系数、粒子辐射的吸收剂量与LET的关系、带电粒子的LET与射程的计算、中英文主题索引以及大量的参考文献。

本书适合从事太空科学研究、放射医学、放射生物学的专业人员阅读和参考。

目 录

作者简介	(I)
序	(III)
前言	(V)
第一章 太空的辐射环境	
一、俘获带辐射	(1)
二、银河宇宙射线	(7)
三、太阳粒子事件	(13)
第二章 辐射损伤的机制	
一、物理能量的转移	(19)
二、自由基的形成	(22)
三、辐射对细胞中 DNA 的损伤	(23)
四、辐射对染色体的效应	(30)
第三章 重离子辐射对不同生物系统的效应	
一、对微生物的致突效应	(33)
二、对高等植物的影响	(45)
三、对体外培养哺乳动物细胞的效应	(59)
四、对哺乳动物整体及组织水平上的效应	(81)
第四章 太空辐射对人体健康的影响和辐照限值	
一、太空辐射对人体的效应和健康的影响	(97)

二、辐照限值·····	(104)
第五章 太空飞行中的放射生物学研究	
一、太空飞行中辐射的探测·····	(109)
二、研究太空辐射生物学效应的方法·····	(110)
三、太空辐射生物效应的实验结果·····	(111)
四、太空飞行环境对辐射效应的影响·····	(126)
第六章 太空飞行中的辐射及其防护	
一、在太空飞行中宇航员所遭受到的辐射·····	(130)
二、月球和火星上的辐射环境·····	(132)
三、月球或火星探索中的辐射监测和屏蔽防护·····	(136)
四、辐射物理和辐射生物学中的测不准性·····	(138)
五、预防医学及治疗学上的措施·····	(140)
第七章 太空的辐射环境与生物演化	
一、重离子辐射的诱变效应·····	(150)
二、月球及火星上的辐射所引起的遗传性突变·····	(151)
三、辐射对火星上生命演化可能起的作用·····	(155)
参考文献 ·····	(157)
附录 ·····	(191)
I 专用名词英汉对照表·····	(191)
II 物理常数·····	(198)
III 单位和转换系数·····	(199)
IV 一些基本的物理公式 (CGS 及 MKS 制) ·····	(200)
V 粒子辐射的吸收剂量与 LET 的关系 ·····	(202)
VI 带电粒子的 LET 与射程的计算 ·····	(203)

Ⅶ 与重离子径迹有关的参数····· (204)

索引

中文主题索引····· (209)

English Subject Index ····· (218)

图版

作者简介

杨垂绪 (Tracy Chui - hsu Yang) 原籍山东省禹城县。1938年出生于湖南省长沙市。大学时主修生物学, 副修化学。1959年毕业于台湾省东海大学, 随后赴美国就读于德克萨斯州北德克萨斯州立大学 (North Texas State University), 1963年获硕士学位, 1967年获伊利诺斯大学 (University of Illinois) 生物物理学博士学位, 后获阿贡国家实验室 (Argonne National Laboratory) 奖学金, 在该室从事博士后研究, 以中子和 γ 射线对生物发育和寿命的损伤及修复作用为主要内容。1969~1990年在加利福尼亚大学劳伦斯伯克莱研究所 (Lawrence Berkeley Laboratory, University of California) 从事无重力条件下辐射对生物发育的影响和重离子辐射对生物的作用, 特别是重离子引起动物和人体细胞癌化机制等方面的研究。1990年起任美国国家航空和航天局约翰逊航天中心 (NASA Johnson Space Center) 特级科学家和放射保健主管, 负责放射生物物理学、太空飞行人员的辐射安全和未来宇航计划中各种放射生物学问题研究。1993年应邀往意大利那不勒斯大学 (University of Naples) 物理系任访问教授, 讲解太空放射生物学。有关的主要论著见参考文献 (T. C. Yang 条)。

梅曼彤 (Mantong Mei) 原籍广东台山县。1942年生于广东省广州市。1965年毕业于华南农学院农业生物物理专业; 1983年公派赴美国加利福尼亚大学劳伦斯伯克莱研究所进修, 参加重离子辐射对哺乳动物细胞诱发突变及致癌效应的研究;

1985年回国后主要从事高能重离子辐射对作物的诱变效应及分子遗传学方面的研究。现为华南农业大学遗传工程研究室教授。有关主要论著见参考文献（M. Mei 条）。

序

随着太空计划的发展，太空飞行从小型卫星的发射演进到巨型太空站的建造；由几小时的飞行增加到数月的居留。在愈来愈多的太空人参加飞行和长期居留太空时，太空辐射逐渐变为令人注目的问题。

太空辐射包括环绕地球的辐射带，太阳爆炸时放出的辐射、以及弥漫太空中的宇宙射线。因为大气层和地球磁场的保护作用，在地球表面的人们不会受到这些种类射线的损害。因此，虽然宇宙射线、太阳辐射和地球辐射带很早就已经被发现，但是研究这些射线对生物的效应却很少。一直到近几十年，这个问题才被正式重视。

人类征服太空，包括长期居留月球和飞向火星，将是人类在生活上和精神上发展不可避免的结果。太空和其它星球为人类提供了无限的天然资源、新的知识领域和研究生命现象全然不同的条件。在作这些长期飞行之前，人们必须彻底了解和解决太空辐射可能造成的问题。

作者有幸在近几十年中参与和太空放射生物学有关的研究。由于这方面研究的工作一向不多，所以有关太空放射生物学方面的书非常少。为了有系统地介绍这方面的知识给广大的科研工作者和对太空科学有兴趣的读者，作者从近些年来研究的结果选取材料，编写成这本书。书内包括太空辐射环境、辐射的物理作用、化学变化、重离子对细胞、动物和植物的杀伤、突变和致癌效应、辐射对生理上的影响、辐射防护、太空中辐射生物研究的实验结果、太空辐射对生物演化的可能影响。因为包括的面比较

广泛，各方面也就只能作简略的介绍。国内在放射生物学方面已有许多专著如《辐射生物学》及《分子放射生物学》等，有兴趣的读者可以从这些专著及本书的参考文献中进一步作深入地了解。

在编写和出版这本书的过程中，作者受到许多同行们的热心支持和帮助。特别是武汉大学丘冠英教授对本书的英汉专用名词对照表作了审订；中山大学出版社李玉杏女士负责本书的责任编辑，朱霭华女士负责封面设计，中山大学生物系梁莉明女士负责部分图谱的描绘，李嘉女士为本书的责任校对，华南农业大学庄楚雄、胡维民两位先生参与书稿的校订及索引的编排，作者在此对他们致以最深切的谢意。

杨垂绪 [美国]

梅曼彤 [中国]

1994年5月

前 言

在太空，存在着比地球上强得多的天然辐射。要保证人类对太空的开发获得成功，就必须对太空的辐射环境及这类辐射的生物学效应有深入地了解。

太空辐射的主要来源包括三个：地球磁场捕获高能粒子产生的俘获带辐射，太阳外突发性事件产生的银河宇宙射线（GCR）及太阳爆发产生的太阳粒子事件（SPE）。俘获带主要由质子（内区）及电子（外层带）组成；GCR中则含相当量的高能重离子，以至在太阳活动极小时，在自由空间无防护的条件下，可造成达0.8 Sv/a的造血器官剂量当量。SPE的主要成份为质子，其中重粒子占总剂量的10%，SPE重离子的能量一般低于GCR中的重离子，突发性的SPE能产生高达数Sv的剂量，对太空飞行人员身体有严重的威胁。本书第一章介绍了这几类辐射的产生及组成成份。

电离辐射对生物系统的作用，经历了能量的传递（物理过程）、化学键的断裂、自由基的形成（化学过程）乃至DNA的损伤、染色体结构的改变（生物学过程）。第二章对这些过程作了简要的分析。应当指出的是：太空辐射，特别是其中的GCR中含有高能重离子，这些具高传能线密度（LET）的重离子，它们与低LET辐射，如X射线、 γ 射线等有不同的物理性质，通过物质时有完全不同结构的电离径迹，在第二章中介绍了这一径迹结构的特点，有兴趣的读者还可从书末附录中查出计算这类辐射的LET、射程、剂量等所用的有关公式。

目前，许多估计GCR的生物学效应的资料主要是来自用地

面加速器产生的粒子所进行的研究。已有的实验结果表明，与低 LET 辐射相比，具高 LET 的重离子能诱导 DNA 分子中出现更多的非重接性链断裂，更有效地杀伤细胞，诱发突变及引致癌肿发生。第三章就是根据国内外有关报道和作者多年的研究工作，综合介绍重离子辐射对微生物、植物、体外培养的动物细胞、哺乳动物等不同生物系统的主要效应及其作用机制，同时也着重比较重离子与低 LET 辐射产生效应的异同，这些为太空辐射危险性的估计提供了生物学上的依据。

人们现在已经认识到：太空飞行人员所受的辐照剂量可以降低，但不可能全部排除。因此，宇航人员现在已被列入放射性工作人员的行列。第四章根据现有的流行病学观察资料，描述了各种剂量的低 LET 辐射引致的放射病症状，并讨论了美国有关部门为宇航人员制定的辐照限值标准、及其制定标准所遵循的限制到可合理达到的最低水平（ALARA）原则。

自人类开始探索太空以来，把各种类型的生物样品放在飞行器内飞行，待飞行完回收后观察这些生物的生理、生化、遗传等方面指标的变化，一直是太空飞行任务的重要内容，而这些生物学研究中很重要的一部分是观察太空辐射的影响。第五章对太空放射生物学试验结果的综述，可帮助读者了解真正的太空辐射生物效应的复杂性。

实际上，美国已进行的航天飞行中，宇航人员受到的辐照剂量很低，一般少于 1 cGy。未来的开拓月球或探索火星的飞行中，宇航人员受到来自 GCR 或 SPE 的辐射的可能性会大大增加。第六章根据作者掌握的一些资料，分析了已进行的载人飞行中宇航员受辐照的情况及新的太空探索中可能遇到的辐射问题，并讨论了用各种方法减轻太空中辐射危害的可能性。例如使用适当厚度的防护屏，研究新的化学辐射防护药物，复合使用各类型药物，包括合理补给营养品和维生素等，都对减轻辐射损伤有一

定的效果。

由于月球和火星上的辐射水平远高于地球，在这些星球上，辐射对生命进化能起什么作用的问题已引起了科学界的兴趣，本书最后一章对此提出了作者的一些观点。

虽然在未来的太空探索，特别是星际航行中，太空辐射会成为危及宇航人员健康的一个主要因素。然而，通过进一步研究重离子辐射的生物学效应、构成防护层的新物质、辐射防护药物、重离子物理学及粒子探测器等，可以发现最佳的对策，以对太空辐射进行适当的防护。这些研究的结果还将为核物理学提供有价值的资料，增加人们对致癌、致突变及发育基本机制的了解，为临床医学提供可应用的新技术。希望本书的出版，能引起国内放射生物学工作者、及对太空放射生物学问题感兴趣的读者的注意，并为其发展和问题的解决做出贡献。

第一章 太空的辐射环境

太空中的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，其中质子占的比例最大。在地球上，由于有大气层和地球磁场的屏蔽，人类不会受到太空辐射的影响。来自太阳及太空深处的辐射中，仅有两类可以穿过大气层抵达地球表面；一类是可见光及部分紫外光、红外光，另一类为无线电波（频率约为 10^9 Hz）的辐射。在太空飞行中，上述各种电离辐射成份的相对重要性与飞行的诸多因素有关，如飞行轨道、倾角、高度、飞行持续的时间、飞行任务执行时在太阳周期所处的时期、飞船外壳的防护程度等都有影响。一些不确定的物理因素，如大的太阳粒子发射的机会、俘获辐射成份的空间及时间涨落等，也有很大的影响。在计划每次飞行任务及确定其轨道时，都必须对辐射的影响作充分的估计。

根据辐射来源的不同，可把太空辐射分为三类：（1）俘获带辐射（trapped belt radiation）；（2）银河宇宙线（galactic cosmic rays，简称 GCR）；（3）太阳粒子事件（solar partical events，简称 SPE）。由于来源不同，粒子的能谱范围也不同。如俘获粒子和 SPE 离子的能量最高为数百兆电子伏特/核子（MeV/u）；GCR 离子的能量则可高达数千亿电子伏特/核子（GeV/u）。图版 I - 2, 3 及表 1 - 1 简要总结了太空中的各类辐射。

一、俘获带辐射（Van Allen belt）

地球磁场捕获的高能粒子，形成俘获带辐射。这类辐射是 Jan Van Allen 博士领导的一组科学家于 1958 年发现的，故又被称为 Van Allen 带。这一辐射带主要由质子和电子组成，也包括

表 1-1 太空中的电离辐射

类 型	所带电荷 (Z)	品质因素 (Q)	来 源
γ 射线	0	1.0	俘获带辐射、太阳辐射及太空中核反应产生的次级辐射
电 子			俘获带辐射
1.0 MeV	1	1.0	
0.1 MeV	1	1.0	
质 子			宇宙射线、内层俘获带、太阳宇宙射线
100 MeV	1	1~2.0	
1.5 MeV	1	8.5	
0.1 MeV	1	10.0	
中 子			由于核相互作用而产生,在接近行星、太阳处发现
0.05 eV (热)	0	2.8	
0.0001 MeV	0	2.2	
0.005 MeV	0	2.4	
0.02 MeV	0	5.0	
0.5 MeV	0	10.2	
1.0 MeV	0	10.5	
10.0 MeV	0	6.4	
α 粒子			宇宙射线
5.0 MeV	2	15.0	
1.0 MeV	2	20.0	
重离子	≥ 3	见正文	宇宙射线

少量的其它离子，如氦、碳和氧。这类粒子可能有几个来源，例如：GCR 与大气中的组分作用产生自由中子，自由中子的蜕变，生成在各个大气高度都可观察到的质子和电子。

环绕地球的俘获带可以被分为两个区域：内层带和外层带（图1-1）。内层带的半径在地球赤道达到 $2.8 R_e$ (R_e - 地球半径, $1 R_e = 6371.2 \text{ km}$)。外层带为从半径 $2.8 R_e$ 到 $12 R_e$ 的区域。外层带的电子流强度可达到内层带的 10 倍，它们的能谱也延伸到能量较高的区段。在内层带，辐射的主要来源是俘获质子，而不是电子。在过去的几十年中，科学家们已从环绕地球轨道的太空飞行中获得了大量关于俘获电子和质子能谱的数据，并提出了计算在太阳“静止”或“活动”时粒子能谱的模式。图 1-2 显示出在太阳活动极小期，在 450 km , 28.5° 倾角轨道上一天内质子的积分谱（Curtis 等，1986）。从图可见，能量 $> 30 \text{ MeV}$ 的质子显得相当重要。图 1-3 是在与地球同步旋转的轨道（倾角为 0° , 高度为 35790 km ）上，一整天的电子积分谱（基于 6 个月的平均数）。图中所用的“最坏情况”，指固定在西经 160° 。应指出的是：这些曲线都是静止模型的环境数据，仅适用于对长于 6 个月飞行任务的辐射环境的估计，有明显的不准确性。

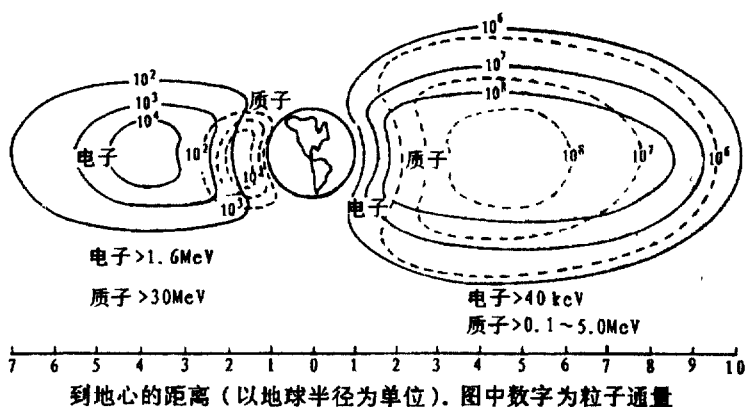


图 1-1 俘获带辐射强度和能量及与地球表面距离的关系

俘获粒子的运动由三部分组成：由于洛伦兹力的作用而产生的绕地球磁力线的旋转；在南北半球的镜像点间的反冲（向着极区及背离极区）；及相对于地球的纵向（经度方向）漂移：电子向东而质子向西。这三种运动的图解示于图 1-4。由于粒子带电荷，它的电场可以和地球的磁场起作用。这一相互作用的结果是：带电粒子旋绕着地球的磁力线，向地球的两个磁极运动，地球磁力线通过这粒子旋绕圈的中心点。粒子的运动方向和磁力线之间的角度称为“仰角”（pitch angle）。图 1-4 描绘了电子在赤道附近的“仰角”，和它在地磁场所作的旋绕运动。“仰角”在赤道为最小，在磁极的镜像点为 90° 。电子除了旋绕地球磁场运动外，也向地球东面浮动。带正电的粒子的运动方向则和电子正好相反。

带电粒子顺着磁力线流向地球磁极，在愈接近地磁极时，磁

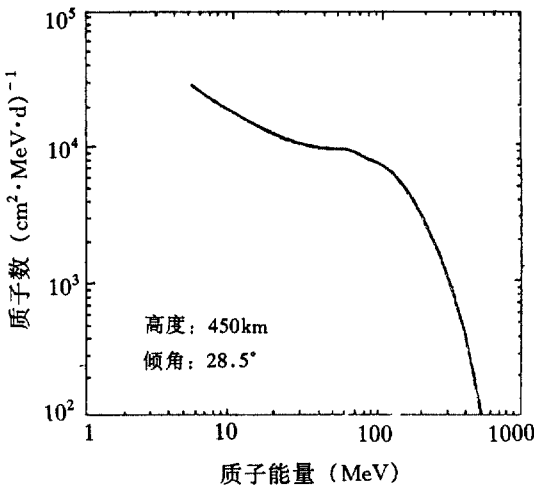


图 1-2 在太阳活动极小期，在倾角为 28.5° ，高度为 450 km 的轨道上计算出的俘获质子积分能谱