

# 宇航空间环境 手册

中国科学院空间科学与应用研究中心 编

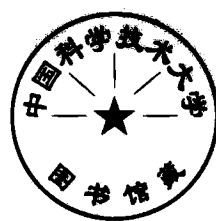


中国科学技术出版社



# 宇 航 空 间 环 境 手 册

中国科学院空间科学与应用研究中心 编



中国科学技术出版社

• 北 京 •

**图书在版编目(CIP)数据**

宇航空间环境手册/中国科学院空间科学与应用研究中心编.

-北京:中国科学技术出版社,2000.6

ISBN 7-5046-2691-0

I. 宇航… II. 庄… III. 宇航空间环境-手册 IV. V 52-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 26026 号

中国科学技术出版社出版

北京海淀区白石桥路 32 号 邮政编码:100081

电话:62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

**中国科学院印刷厂印刷**

\*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 34.5 字数:800 千字:

2000 年 10 月第 1 版 2000 年 10 月第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 100.00 元

---

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、  
脱页者,本社发行部负责调换)

## 内 容 提 要

本手册尽可能定量而系统地给出了宇航空间环境中的中性大气粒子、等离子体粒子、高能带电粒子、微流星体和轨道碎片、磁场、电场、引力场和光辐射场等 8 个方面独立参量的平均空间分布状况、随时间变化、以及在一些特殊地球物理事件发生期间的状况,也给出了电磁波在宇航空间环境中传播的特性参量。本手册是一本对宇航空间环境现有知识的定量综述。其主要目的是为卫星和卫星应用方面进行工程设计、科学研究、教育和计划管理等部门及与宇航有关的活动提供宇航空间环境的知识。

# 宇航空间环境手册撰写组

|     |           |     |     |     |
|-----|-----------|-----|-----|-----|
| 组 长 | 庄洪春       |     |     |     |
| 组 员 | (按姓氏笔划排列) |     |     |     |
|     | 马瑞平       | 尹 宏 | 古士芬 | 田葆宁 |
|     | 庄洪春       | 朱文明 | 吴 健 | 吴永富 |
|     | 宋礼庭       | 张明高 | 陈培仁 | 周国成 |
|     | 林国成       | 高怀保 | 廖怀哲 | 潘厚任 |

## 各章主要撰写人

|     |     |     |  |
|-----|-----|-----|--|
| 主 编 | 庄洪春 |     |  |
| 第一章 | 马瑞平 | 吴永富 |  |
| 第二章 | 古士芬 | 宋礼庭 |  |
| 第三章 | 周国成 | 廖怀哲 |  |
| 第四章 | 田葆宁 |     |  |
| 第五章 | 庄洪春 |     |  |
| 第六章 | 高怀保 |     |  |
| 第七章 | 尹 宏 | 宋礼庭 |  |
| 第八章 | 潘厚任 |     |  |
| 第九章 | 张明高 | 吴健  |  |

|      |     |     |  |
|------|-----|-----|--|
| 策划编辑 | 朱桂兰 |     |  |
| 责任编辑 | 张春荣 |     |  |
| 特邀编辑 | 高林生 |     |  |
| 封面设计 | 王铁麟 |     |  |
| 正文设计 | 高林生 |     |  |
| 责任校对 | 孟华英 | 刘红岩 |  |
| 责任印制 | 李春利 |     |  |

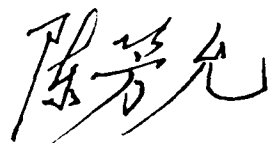
## 序

宇航技术和空间科学的发展已经到了这样一个地步,人类的视野转向太空,并主动采取行动。发射各种应用目的的卫星已经变成了工业和商业行为。一些国家的宇航工业已经成为国家的支柱产业之一。载人飞行、建空间站、太空旅行、登月、探测火星和太阳系也已经成为一些国家的科学和开发事业。我国作为航天技术大国在下世纪人类进入太空的各种活动中定会有更大发展。为此,除了要求我们的宇航技术进一步提高和完善外,也要求对宇航活动进入的空间环境有更大范围和更深入的了解。

经过四十多年的探测、分析和研究,人类已经对地球外空乃至行星际空间的环境有了相当的认识。这些知识为各种应用卫星的设计和运行提供了基本的环境参数。但是到目前为止,仍有不少空间飞行器因外空环境的原因产生故障,甚至报废,例如卫星高充电、高能粒子辐射损伤等。因此,在大规模进入太空的各种活动中,对环境的认识 and 了解不可缺少。就是在这样的需求背景上,《宇航空间环境手册》撰写成功,实在是令航天界欣慰的大事。

这本手册收录了描述宇航环境的主要独立参量,包括中性大气、空间等离子体带电粒子、高能粒子、轨道碎片和微流星体、磁场、电场、引力场、光辐射等,还包括了应用卫星和卫星应用最常用的无线电传播参量。手册主要以图表等数据形式给出这些参数的大小,重要处还给出理论模式。很明显,这本手册内容十分丰富,收录数据量大,信息全面系统,既有科学的基本概况,也有统一格式的图、表、模式,可以适应各不同领域用户的需要。另外,这本手册不光是收集了国际上最新的数据和研究成果,而且也包括撰写者自身及他们所在研究集体的数十年研究成果。内容全面,系统,简明,实用,因而具有重要的应用价值。

我们都知道,地球的空间环境有地面到数十个地球半径远的空间跨度,各环境参量可变化好几个数量级,而且还受太阳活动干扰,变得十分复杂。各不同用户使用的参量又五花八门。而更远的行星际空间环境更各有其特点。这本手册不光给出了空间平均的环境状况,也力图把环境的变化状况以及在特殊地球物理事件时的状况反映出来。可以看出,撰写者精心细致地作出了很大的努力。我十分高兴看到这本手册出版,相信它一定能对我国宇航事业作出贡献。



# 前 言

20 世纪科技的贡献,有力地推动了世界经济和社会的发展。科学技术的发展,使人类实现了遨游太空的梦想,获得了认识自然、认识宇宙的新基点和新条件,这是人类文明史上的又一次飞跃。

航天技术的飞速发展及其广泛应用,对解决信息、生态、环境、资源以及其他经济和社会发展方面的问题,已经并能继续发挥积极作用,以和平开发与利用空间资源为宗旨的宇航事业,是造福于人类的伟大壮举。空间开发的成果已成为人类文明的重要内容,空间开发即将成为世界范围的巨大产业,深刻地改变着人类生活的面貌。宇航空间环境已成为人类环境的重要组成部分。

经过 40 多年,利用数千个宇航器对空间环境的探测研究,人类对地球空间的环境状态的了解已比较清楚,正在向太阳系的其他行星和卫星周围环境进行探测,并一直向太阳系外的环境延伸。为了能有效地利用空间资源,使宇航器更好地为人类服务,对宇航空间环境,特别是地球空间环境的探测结果作一总结是十分有益的。本手册就是一本对宇航空间环境现有知识的定量综述,其主要目的是为卫星和卫星应用方面进行工程设计、科学研究、教育和计划管理等部门及与宇航有关的一切活动提供宇航空间环境的定性和尽可能定量的描述。

对宇航空间环境的描述,不同用户使用着不同的参量。但可完整地宇航空间环境进行定量描述的独立参量,则不外粒子和场两类参量,主要有中性大气粒子、等离子体粒子、高能带电粒子、微流星体和轨道碎片、磁场、电场、引力场和光辐射场等 8 个方面的参量。本手册收集和整理了宇航空间环境中这些方面参量的平均空间分布状况、随时间变化、以及在磁暴等特殊地球物理事件发生期间的状况,前 8 章对这 8 个方面参量分别作了较全面和系统的叙述。各类用户对宇航空间环境的描述所用的不同参量一般都可以从上述 8 个独立参量推算出来。本手册提供了一些推算公式,但由于篇幅所限不可能给出这些导出参量的完整的数值图表。由于电波传播在卫星和卫星应用的各方面都广泛的涉及到,因此最后在第 9 章对用户有兴趣的电波传播方面的导出参量作了叙述。

作为一本手册工具书,本书内容要求系统、简明、实用,因此本书取材尽量从“模型”的层次出发,比较世界各国曾出现过的模型,选取最新的、为大家最普遍采用的模型推荐给读者。由于宇航空间环境的时空变化剧烈,在实际应用这些模型时,有时还应参照相似时间(如同一季节)、相似条件(如太阳黑子数相近)、和相近位置的原始探测数据进行修正,才能得到更切合实际的环境参数值。

本手册的编撰和出版得到了总装备部(原国防科工委)有关业务机关的指导和资助。在本手册撰写过程中,还得到有关专家、领导的指导和帮助,以及一些宇航空间环境研究的后起之秀的积极协助,许多专家和科研工作者对本手册的撰写工作作了直接的和大量的贡献与帮助,他们包括孙景群,郇鸿生,陈建都等。另外,吴中华和师立勤协助完成了第 2 章和第 4 章,张天华的协助和席如青提供有关资料对完成第 8 章的撰写工作给予了很大帮助。谨在此向他们表示衷心的感谢。

本手册撰写过程中广泛听取了各设计、研制、使用各部门的意见,进行选材和撰写,并按国家标准的评审程序和要求进行了修改和定稿。撰写组成员是来自我国相应领域里长期工作的科学家和工程专家。尽管如此,仍然难免存在不足和缺点。热忱希望广大读者批评指正。

“宇航空间环境手册”撰写组

2000 年 4 月

# 目 录

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 第 1 章 地球大气 .....                            | 1  |
| 1.1 地球大气的概况 .....                           | 1  |
| 1.1.1 大气的范围 .....                           | 1  |
| 1.1.2 大气成分的混合和扩散分离 .....                    | 1  |
| 1.1.3 大气的分层 .....                           | 1  |
| 1.1.4 大气的运动 .....                           | 2  |
| 1.1.5 大气的电离 .....                           | 2  |
| 1.2 大气模式 .....                              | 3  |
| 1.2.1 国外的大气模式 .....                         | 3  |
| 1.2.2 我国制订的大气模式 .....                       | 4  |
| 1.2.3 美国标准大气 1976 .....                     | 5  |
| 1.2.4 国际参考大气 CIRA 1986 .....                | 7  |
| 1.3 大气的热力学性质 .....                          | 8  |
| 1.3.1 主要热力学参数 $T, P, \rho$ 和主要成分的平均状态 ..... | 8  |
| 1.3.2 主要热力学参数 $T, P, \rho$ 和主要成分的变化特征 ..... | 10 |
| 1.3.3 大气的微量成分 .....                         | 16 |
| 1.3.4 常用大气参数表 .....                         | 18 |
| 1.4 大气风场 .....                              | 50 |
| 1.4.1 地面和近地面层内大气风场 .....                    | 50 |
| 1.4.2 1~120km 风场 .....                      | 51 |
| 1.4.3 热层大气风场 .....                          | 62 |
| 第 2 章 空间等离子体 .....                          | 73 |
| 2.1 基本的等离子体特征参数和几个重要现象 .....                | 74 |
| 2.1.1 德拜长度与准中性 .....                        | 74 |
| 2.1.2 等离子体频率 .....                          | 74 |
| 2.1.3 能量和温度 .....                           | 74 |
| 2.1.4 数通量和密度 .....                          | 74 |
| 2.1.5 分布函数 .....                            | 74 |
| 2.1.6 等离子体不稳定性 .....                        | 74 |
| 2.1.7 等离子体注入 .....                          | 75 |
| 2.1.8 等离子体漂移 .....                          | 75 |
| 2.2 太阳风等离子体 .....                           | 75 |
| 2.2.1 几个重要概念简介 .....                        | 75 |
| 2.2.2 平均特征 .....                            | 76 |
| 2.2.3 变化特征 .....                            | 78 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| <b>2.3 弓形激波和磁鞘等离子体</b> ..... | <b>80</b>  |
| 2.3.1 平均特征 .....             | 81         |
| 2.3.2 扰动特征 .....             | 83         |
| <b>2.4 磁层及其边界层等离子体</b> ..... | <b>84</b>  |
| 2.4.1 磁层顶等离子体 .....          | 84         |
| 2.4.2 等离子体边界层 .....          | 85         |
| 2.4.3 等离子体片 .....            | 88         |
| 2.4.4 地球同步轨道等离子体 .....       | 90         |
| <b>2.5 等离子体层</b> .....       | <b>99</b>  |
| 2.5.1 基本参量及其特征 .....         | 100        |
| 2.5.2 选用模式 .....             | 101        |
| <b>2.6 沉降等离子体</b> .....      | <b>106</b> |
| 2.6.1 极光带等离子体 .....          | 107        |
| 2.6.2 极盖区等离子体 .....          | 112        |
| 2.6.3 其他沉降区 .....            | 116        |
| <b>2.7 电离层等离子体</b> .....     | <b>116</b> |
| 2.7.1 特征和变化规律 .....          | 116        |
| 2.7.2 国际参考电离层(IRI) .....     | 119        |
| <b>2.8 空间等离子体波</b> .....     | <b>121</b> |
| 2.8.1 等离子体波的基本特征 .....       | 122        |
| 2.8.2 地磁微脉动 .....            | 127        |
| 2.8.3 磁流体力学波 .....           | 131        |
| <b>第3章 高能带电粒子辐射环境</b> .....  | <b>138</b> |
| <b>3.1 地球辐射带</b> .....       | <b>138</b> |
| 3.1.1 (L,B)磁坐标系及其计算方法 .....  | 139        |
| 3.1.2 辐射带电子模式 .....          | 140        |
| 3.1.3 辐射带质子模式 .....          | 145        |
| 3.1.4 卫星轨道积分通量或注量 .....      | 149        |
| <b>3.2 太阳宇宙线</b> .....       | <b>182</b> |
| 3.2.1 太阳宇宙线能谱 .....          | 189        |
| 3.2.2 空间分布和地磁效应 .....        | 189        |
| 3.2.3 太阳宇宙线预定模式 .....        | 203        |
| 3.2.4 卫星轨道上的太阳宇宙线通量谱 .....   | 204        |
| <b>3.3 银河宇宙线</b> .....       | <b>208</b> |
| 3.3.1 成分 .....               | 208        |
| 3.3.2 能谱 .....               | 208        |
| 3.3.3 银河宇宙线分析模式 .....        | 210        |
| 3.3.4 银河宇宙线的空间分布和地磁效应 .....  | 212        |
| 3.3.5 卫星轨道上的银河宇宙线通量谱 .....   | 213        |

|                                                          |     |
|----------------------------------------------------------|-----|
| 第 4 章 空间磁场 .....                                         | 224 |
| 4.1 地球空间磁场的表示、组成和源 .....                                 | 224 |
| 4.1.1 地磁场要素和单位 .....                                     | 224 |
| 4.1.2 常用坐标系和单位 .....                                     | 225 |
| 4.1.3 地球空间磁场的组成 .....                                    | 227 |
| 4.1.4 内源 .....                                           | 227 |
| 4.1.5 外源 .....                                           | 227 |
| 4.2 主磁场及其长期变化 .....                                      | 228 |
| 4.2.1 主磁场的解析表达 .....                                     | 228 |
| 4.2.2 主磁场的长期变化 .....                                     | 230 |
| 4.3 变化磁场 .....                                           | 231 |
| 4.3.1 静日变化 .....                                         | 231 |
| 4.3.2 主要的扰动场 .....                                       | 231 |
| 4.4 定量磁场模式 .....                                         | 237 |
| 4.4.1 主磁场模式 .....                                        | 237 |
| 4.4.2 磁层磁场模式 .....                                       | 237 |
| 4.5 地球空间磁场分布 .....                                       | 240 |
| 4.5.1 近地面空间磁场 .....                                      | 240 |
| 4.5.2 地球同步轨道高度的磁场 .....                                  | 258 |
| 4.5.3 磁层顶磁场 .....                                        | 258 |
| 4.5.4 磁尾磁场 .....                                         | 258 |
| 4.5.5 平均磁层磁场位形 .....                                     | 260 |
| 4.6 地磁活动性—地磁活动指数、国际磁静日和磁扰日 .....                         | 260 |
| 4.6.1 磁情记数 $C$ 和国际磁情指数 $C_i$ .....                       | 260 |
| 4.6.2 $K$ 指数、 $K_p$ 指数; $a_p$ 、 $A_p$ 指数; $C_p$ 指数 ..... | 260 |
| 4.6.3 $Dst$ 指数 .....                                     | 285 |
| 4.6.4 极光电急流指数 $AU$ 、 $AL$ 、 $AO$ 和 $AE$ 指数 .....         | 285 |
| 4.6.5 磁静日 .....                                          | 285 |
| 4.6.6 磁扰日 .....                                          | 285 |
| 4.7 行星际磁场 .....                                          | 285 |
| 4.7.1 行星际磁场的方向特性 .....                                   | 285 |
| 4.7.2 行星际磁场大小的统计特性 .....                                 | 286 |
| 第 5 章 空间电场 .....                                         | 288 |
| 5.1 基本概念 .....                                           | 290 |
| 5.1.1 电导率 .....                                          | 290 |
| 5.1.2 宇航空间的四种电场 .....                                    | 293 |
| 5.1.3 电场源 .....                                          | 294 |
| 5.2 平均状况 .....                                           | 294 |
| 5.2.1 平均极化电场 .....                                       | 294 |

5.2.2 平均对流电场 ..... 316

5.2.3 平均感应电场 ..... 320

5.2.4 平均映射电场 ..... 322

**5.3 空间电场的时间变化 ..... 333**

5.3.1 极化电场的时间变化 ..... 333

5.3.2 对流电场的时间变化 ..... 344

5.3.3 感应电场的时间变化 ..... 344

**5.4 特殊事件下的空间电场形态 ..... 344**

5.4.1 气象事件 ..... 344

5.4.2 太阳活动 ..... 348

5.4.3 磁暴 ..... 349

**第6章 空间引力场 ..... 352**

**6.1 概述 ..... 352**

6.1.1 天体的引力特性 ..... 352

6.1.2 引力位 ..... 352

6.1.3 引力的计算 ..... 353

6.1.4 引力场模型 ..... 354

**6.2 地球引力场 ..... 355**

6.2.1 固体地球引力场模型 ..... 355

6.2.2 潮汐修正 ..... 389

6.2.3 地球引力位的宗量 ..... 394

**6.3 月球引力场 ..... 395**

**6.4 火星引力场 ..... 398**

**6.5 金星引力场 ..... 400**

**第7章 空间光辐射 ..... 406**

**7.1 辐射传输量与辐射定律 ..... 406**

7.1.1 表示辐射能量传输的物理量 ..... 406

7.1.2 热辐射定律 ..... 407

**7.2 太阳及太阳辐射 ..... 408**

7.2.1 大气外太阳辐照度谱 ..... 408

7.2.2 太阳发射的紫外、微波与射电辐射 ..... 413

**7.3 气体吸收辐射的规律 ..... 416**

7.3.1 气体吸收带和吸收线 ..... 416

7.3.2 气体吸收线的形状 ..... 416

7.3.3 指数和模式 ..... 418

7.3.4 吸收线参数汇编 ..... 419

7.3.5 大气中气体对太阳辐射吸收的特性 ..... 419

7.3.6 地球和大气长波辐射区气体的吸收特点 ..... 426

**7.4 大气中的散射过程 ..... 427**

|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 7.4.1      | 粒子对电磁波的散射与吸收 .....          | 427        |
| 7.4.2      | 大粒子散射的性质 .....              | 429        |
| 7.4.3      | 浑浊大气的散射与吸收参量 .....          | 430        |
| 7.4.4      | 大气气溶胶成分与尺度谱的数值模拟 .....      | 430        |
| 7.4.5      | 各种气溶胶的折射率 .....             | 432        |
| 7.4.6      | 大气气溶胶的垂直分布 .....            | 435        |
| 7.4.7      | 云、雾的吸收与散射参量 .....           | 437        |
| <b>7.5</b> | <b>空间辐射场的观测值及数值模拟 .....</b> | <b>438</b> |
| 7.5.1      | 地面对太阳辐射的反射率 .....           | 438        |
| 7.5.2      | 地面对长波辐射的反射率和吸收率 .....       | 440        |
| 7.5.3      | 空间太阳短波辐射场 .....             | 440        |
| 7.5.4      | 地气系统长波射出辐射场 .....           | 444        |
| <b>7.6</b> | <b>地球大气的光辐射 .....</b>       | <b>446</b> |
| 7.6.1      | 气辉 .....                    | 446        |
| 7.6.2      | 极光 .....                    | 446        |
| <b>第8章</b> | <b>微流星体与轨道碎片 .....</b>      | <b>454</b> |
| <b>8.1</b> | <b>微流星体 .....</b>           | <b>455</b> |
| 8.1.1      | 起源 .....                    | 455        |
| 8.1.2      | 组分 .....                    | 456        |
| 8.1.3      | 速度分布 .....                  | 456        |
| 8.1.4      | 质量/通量的空间分布 .....            | 456        |
| 8.1.5      | 遭遇概率 .....                  | 458        |
| 8.1.6      | 时间变化 .....                  | 458        |
| 8.1.7      | 以流星雨名称命名的微流星体群 .....        | 459        |
| <b>8.2</b> | <b>轨道碎片 .....</b>           | <b>460</b> |
| 8.2.1      | 来源 .....                    | 460        |
| 8.2.2      | 组分 .....                    | 461        |
| 8.2.3      | 速度分布 .....                  | 461        |
| 8.2.4      | 质量/通量的空间分布 .....            | 463        |
| 8.2.5      | 长期变化 .....                  | 465        |
| 8.2.6      | NASA 的低轨道通量模型及碰撞几率 .....    | 466        |
| 8.2.7      | 穿透深度 .....                  | 470        |
| <b>8.3</b> | <b>微流星体与轨道碎片的异同 .....</b>   | <b>473</b> |
| <b>8.4</b> | <b>数学模型与在轨实测 .....</b>      | <b>474</b> |
| 8.4.1      | 数学模型的最新发展 .....             | 474        |
| 8.4.2      | 几种常用轨道的通量估算 .....           | 475        |
| 8.4.3      | 在轨实测结果 .....                | 476        |
| 8.4.4      | 数学模型与实测结果的比较 .....          | 477        |

第 9 章 空间电波传播 ..... 481

9.1 概述 ..... 481

9.1.1 各种环境对空间电波传播的影响 ..... 481

9.1.2 不同频段所受的环境影响 ..... 482

9.1.3 空间无线电系统性能评估 ..... 482

9.2 非电离大气对地空传播影响 ..... 483

9.2.1 大气折射 ..... 483

9.2.2 对流层闪烁 ..... 490

9.2.3 大气吸收 ..... 491

9.2.4 降水影响 ..... 494

9.2.5 地、海面影响..... 497

9.3 电离层地空传播影响 ..... 501

9.3.1 电离层闪烁 ..... 502

9.3.2 电离层吸收 ..... 506

9.3.3 法拉第旋转效应 ..... 510

9.3.4 多卜勒效应 ..... 511

9.3.5 传播时延、色散和卫星视在仰角..... 512

## 表 目 录

|            |                                         |    |
|------------|-----------------------------------------|----|
| 表 1-3-1    | 大气成分 .....                              | 10 |
| 表 1-3-2    | 地面和对流层的微量成分浓度 .....                     | 17 |
| 表 1-3-3    | 全球各大气参数平均值随高度的分布 .....                  | 19 |
| 表 1-3-4    | 全球主要大气成分数密度平均值随高度分布 .....               | 23 |
| 表 1-3-5(1) | 1 月份南半球纬向平均温度 .....                     | 25 |
| 表 1-3-5(2) | 1 月份北半球纬向平均温度 .....                     | 27 |
| 表 1-3-5(3) | 4 月份南半球纬向平均温度 .....                     | 29 |
| 表 1-3-5(4) | 4 月份北半球纬向平均温度 .....                     | 31 |
| 表 1-3-5(5) | 7 月份南半球纬向平均温度 .....                     | 33 |
| 表 1-3-5(6) | 7 月份北半球纬向平均温度 .....                     | 35 |
| 表 1-3-5(7) | 10 月份南半球纬向平均温度 .....                    | 37 |
| 表 1-3-5(8) | 10 月份北半球纬向平均温度 .....                    | 39 |
| 表 1-3-6    | 宁静地磁和低太阳活动下温度和各主要成分数密度的经纬和时间平均值随高度分布... | 41 |
| 表 1-3-7    | 宁静地磁和中太阳活动下温度和各主要成分数密度的经纬和时间平均值随高度分布... | 43 |
| 表 1-3-8    | 宁静地磁和高太阳活动下温度和各主要成分数密度的经纬和时间平均值随高度分布... | 45 |
| 表 1-3-9    | 纬向平均总臭氧含量的纬度月份分布 .....                  | 47 |
| 表 1-3-10   | 1 月份不同地区的臭氧密度垂直分布 .....                 | 47 |
| 表 1-3-11   | 不同地区的水汽密度垂直分布 .....                     | 48 |
| 表 1-3-12   | 大气中微量吸收气体的体积 .....                      | 49 |
| 表 1-4-1    | 全国 567 个测站中稳定风速单站记录极值较大的测站及数值 .....     | 50 |
| 表 1-4-2    | 全国 91 个测站中瞬时风速单站记录极值较大的测站和数值 .....      | 50 |
| 表 1-4-3    | 10m 高度处不同设备最短水平尺寸和稳定风速极值的阵风因子 .....     | 51 |
| 表 1-4-4    | 各月风速全国记录极值(几何高度) .....                  | 52 |
| 表 1-4-5    | 1 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                   | 54 |
| 表 1-4-6    | 2 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                   | 54 |
| 表 1-4-7    | 3 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                   | 55 |
| 表 1-4-8    | 4 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                   | 55 |
| 表 1-4-9    | 5 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                   | 56 |
| 表 1-4-10   | 6 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                   | 56 |
| 表 1-4-11   | 7 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                   | 57 |
| 表 1-4-12   | 8 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                   | 57 |
| 表 1-4-13   | 9 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                   | 58 |
| 表 1-4-14   | 10 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                  | 58 |
| 表 1-4-15   | 11 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                  | 59 |
| 表 1-4-16   | 12 月纬向风随高度和纬度分布值 .....                  | 59 |
| 表 1-4-17   | 各月风的垂直切变全国记录极值(几何高度) .....              | 60 |

|          |                                                                              |     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 表 2-2-1  | 太阳风的长时间平均特征 .....                                                            | 76  |
| 表 2-2-2  | 太阳风低速流的平均特征 .....                                                            | 77  |
| 表 2-2-3  | 太阳风高速流的平均特征 .....                                                            | 77  |
| 表 2-3-1  | 磁鞘中近磁层顶处等离子体密度极大值的观测结果 .....                                                 | 81  |
| 表 2-4-1  | 等离子体片中等离子体的平均特征 .....                                                        | 88  |
| 表 2-4-2  | 地球同步轨道等离子体的平均参量 .....                                                        | 92  |
| 表 2-4-3  | 地球同步轨道等离子体参量起伏的标准偏差 .....                                                    | 93  |
| 表 2-4-4  | 最恶劣的地球同步轨道等离子体环境 .....                                                       | 94  |
| 表 2-4-5  | 日照条件下地球同步轨道最恶劣等离子体环境 .....                                                   | 94  |
| 表 2-4-6  | Stevens 模式用于设计的地球同步轨道环境(单麦氏分布下) .....                                        | 94  |
| 表 2-4-7  | 地球同步轨道等离子体头四个矩计算中多级回归系数 .....                                                | 96  |
| 表 2-4-8  | 地球同步轨道等离子体头四个矩计算中的模式误差 .....                                                 | 96  |
| 表 2-4-9  | $\sum A_p=56$ 条件下地球同步轨道区不同地方时的主要等离子体参量 .....                                 | 97  |
| 表 2-4-10 | $\sum A_p=656$ 条件下地球同步轨道区不同地方时的主要等离子体参量 .....                                | 98  |
| 表 2-4-11 | $\sum A_p=2240$ 条件下地球同步轨道区不同地方时的主要等离子体参量 .....                               | 98  |
| 表 2-4-12 | $\sum A_p=2500$ 条件下地球同步轨道区不同地方时的主要等离子体参量 .....                               | 99  |
| 表 2-5-1  | 磁纬 $\theta=0^\circ$ 处不同高度不同地方时的等离子体层等离子体密度 .....                             | 102 |
| 表 2-5-2  | 磁纬 $\theta=10^\circ$ 处不同高度不同地方时的等离子体层等离子体密度 .....                            | 103 |
| 表 2-5-3  | 磁纬 $\theta=20^\circ$ 处不同高度不同地方时的等离子体层等离子体密度 .....                            | 103 |
| 表 2-5-4  | 磁纬 $\theta=30^\circ$ 处不同高度不同地方时的等离子体层等离子体密度 .....                            | 104 |
| 表 2-5-5  | 磁纬 $\theta=40^\circ$ 处不同高度不同地方时的等离子体层等离子体密度 .....                            | 104 |
| 表 2-6-1  | 中等扰动( $K_p \approx 5,  D_{st}  \approx 70$ )条件下,夜沉降带的主要特征 .....              | 106 |
| 表 2-6-2  | 能通量 Epstein-Fourier 系数 .....                                                 | 108 |
| 表 2-6-3  | 数通量 Epstein-Fourier 系数 .....                                                 | 109 |
| 表 2-8-1  | 磁性等离子体波模特性 .....                                                             | 124 |
| 表 2-8-2  | 规则型地磁微脉动符号和周期 .....                                                          | 128 |
| 表 2-8-3  | 不规则型地磁微脉动符号和周期 .....                                                         | 128 |
| 表 2-8-4  | 地磁微脉动的一般特性 .....                                                             | 129 |
| 表 2-8-5  | 角向振荡基本周期 .....                                                               | 130 |
| 表 2-8-6  | 不同密度的角向振荡周期 $T(s)$ .....                                                     | 130 |
| 表 2-8-7  | 不同模型的角向振荡基本周期 .....                                                          | 131 |
| 表 2-8-8  | 空间等离子体波总汇 .....                                                              | 131 |
| 表 3-1-1  | AE-8MAX 的电子磁赤道全向积分通量 .....                                                   | 141 |
| 表 3-1-2  | AE-8MIN 的电子磁赤道全向积分通量 .....                                                   | 143 |
| 表 3-1-3  | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 150n. mi. ( $\approx 278\text{km}$ ) .....   | 150 |
| 表 3-1-4  | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 300n. mi. ( $\approx 556\text{km}$ ) .....   | 150 |
| 表 3-1-5  | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 450n. mi. ( $\approx 834\text{km}$ ) .....   | 151 |
| 表 3-1-6  | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 600n. mi. ( $\approx 1112\text{km}$ ) .....  | 151 |
| 表 3-1-7  | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 800n. mi. ( $\approx 1483\text{km}$ ) .....  | 152 |
| 表 3-1-8  | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 1000n. mi. ( $\approx 1853\text{km}$ ) ..... | 152 |

|          |                                                                          |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 表 3-1-9  | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 1250n. mi. ( $\approx 2317\text{km}$ )   | 153 |
| 表 3-1-10 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 1500n. mi. ( $\approx 2780\text{km}$ )   | 153 |
| 表 3-1-11 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 1750n. mi. ( $\approx 3243\text{km}$ )   | 154 |
| 表 3-1-12 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 2000n. mi. ( $\approx 3706\text{km}$ )   | 154 |
| 表 3-1-13 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 2250n. mi. ( $\approx 4170\text{km}$ )   | 155 |
| 表 3-1-14 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 2500n. mi. ( $\approx 4633\text{km}$ )   | 155 |
| 表 3-1-15 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 2750n. mi. ( $\approx 5096\text{km}$ )   | 156 |
| 表 3-1-16 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 3000n. mi. ( $\approx 5560\text{km}$ )   | 156 |
| 表 3-1-17 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 3500n. mi. ( $\approx 6486\text{km}$ )   | 157 |
| 表 3-1-18 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 4000n. mi. ( $\approx 7413\text{km}$ )   | 157 |
| 表 3-1-19 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 4500n. mi. ( $\approx 8339\text{km}$ )   | 158 |
| 表 3-1-20 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 5000n. mi. ( $\approx 9266\text{km}$ )   | 158 |
| 表 3-1-21 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 5500n. mi. ( $\approx 10193\text{km}$ )  | 159 |
| 表 3-1-22 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 6000n. mi. ( $\approx 11119\text{km}$ )  | 159 |
| 表 3-1-23 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 7000n. mi. ( $\approx 12972\text{km}$ )  | 160 |
| 表 3-1-24 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 8000n. mi. ( $\approx 14826\text{km}$ )  | 160 |
| 表 3-1-25 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 9000n. mi. ( $\approx 16697\text{km}$ )  | 161 |
| 表 3-1-26 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 10000n. mi. ( $\approx 18532\text{km}$ ) | 161 |
| 表 3-1-27 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 11000n. mi. ( $\approx 20385\text{km}$ ) | 162 |
| 表 3-1-28 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 12000n. mi. ( $\approx 22238\text{km}$ ) | 162 |
| 表 3-1-29 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 13000n. mi. ( $\approx 24092\text{km}$ ) | 163 |
| 表 3-1-30 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 14000n. mi. ( $\approx 25945\text{km}$ ) | 163 |
| 表 3-1-31 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 15000n. mi. ( $\approx 27798\text{km}$ ) | 164 |
| 表 3-1-32 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 16000n. mi. ( $\approx 29651\text{km}$ ) | 164 |
| 表 3-1-33 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 17000n. mi. ( $\approx 31504\text{km}$ ) | 165 |
| 表 3-1-34 | 由 AE-8MAX 算得的 4 种倾角圆轨道电子注量,轨道高度 18000n. mi. ( $\approx 33358\text{km}$ ) | 165 |
| 表 3-1-35 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 150n. mi. ( $\approx 278\text{km}$ )         | 166 |
| 表 3-1-36 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 300n. mi. ( $\approx 556\text{km}$ )         | 166 |
| 表 3-1-37 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 450n. mi. ( $\approx 834\text{km}$ )         | 167 |
| 表 3-1-38 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 600n. mi. ( $\approx 1112\text{km}$ )        | 167 |
| 表 3-1-39 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 800n. mi. ( $\approx 1483\text{km}$ )        | 168 |
| 表 3-1-40 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 1000n. mi. ( $\approx 1853\text{km}$ )       | 168 |
| 表 3-1-41 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 1250n. mi. ( $\approx 2317\text{km}$ )       | 169 |
| 表 3-1-42 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 1500n. mi. ( $\approx 2780\text{km}$ )       | 169 |
| 表 3-1-43 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 1750n. mi. ( $\approx 3243\text{km}$ )       | 170 |
| 表 3-1-44 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 2000n. mi. ( $\approx 3706\text{km}$ )       | 170 |
| 表 3-1-45 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 2500n. mi. ( $\approx 4633\text{km}$ )       | 171 |
| 表 3-1-46 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 3000n. mi. ( $\approx 5560\text{km}$ )       | 171 |
| 表 3-1-47 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 3500n. mi. ( $\approx 6486\text{km}$ )       | 172 |
| 表 3-1-48 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 4000n. mi. ( $\approx 7413\text{km}$ )       | 172 |
| 表 3-1-49 | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 5000n. mi. ( $\approx 9266\text{km}$ )       | 173 |

|            |                                                                      |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 表 3-1-50   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 6000n. mi. ( $\approx 11119\text{km}$ )  | 173 |
| 表 3-1-51   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 7000n. mi. ( $\approx 12971\text{km}$ )  | 174 |
| 表 3-1-52   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 8000n. mi. ( $\approx 14826\text{km}$ )  | 174 |
| 表 3-1-53   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 9000n. mi. ( $\approx 16679\text{km}$ )  | 175 |
| 表 3-1-54   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 10000n. mi. ( $\approx 18532\text{km}$ ) | 175 |
| 表 3-1-55   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 11000n. mi. ( $\approx 20385\text{km}$ ) | 176 |
| 表 3-1-56   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 12000n. mi. ( $\approx 22238\text{km}$ ) | 176 |
| 表 3-1-57   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 13000n. mi. ( $\approx 24092\text{km}$ ) | 177 |
| 表 3-1-58   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 14000n. mi. ( $\approx 25945\text{km}$ ) | 177 |
| 表 3-1-59   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 16000n. mi. ( $\approx 29651\text{km}$ ) | 178 |
| 表 3-1-60   | AP-8MIN 的 4 种倾角圆轨道质子注量,轨道高度 18000n. mi. ( $\approx 33358\text{km}$ ) | 178 |
| 表 3-2-1    | 太阳宇宙线核成分的相对丰度(以氧为 1 归一化)                                             | 183 |
| 表 3-2-2    | 太阳宇宙线事件的分类表                                                          | 184 |
| 表 3-2-3    | 典型太阳质子事件表                                                            | 185 |
| 表 3-2-4(1) | 倾角 $0^\circ$ 高度为 200~5000km 卫星圆轨道上各种磁刚度的粒子透过率                        | 191 |
| 表 3-2-4(2) | 倾角 $30^\circ$ 高度为 200~5000km 卫星圆轨道上各种磁刚度的粒子透过率                       | 194 |
| 表 3-2-4(3) | 倾角 $60^\circ$ 高度为 200~5000km 卫星圆轨道上各种磁刚度的粒子透过率                       | 197 |
| 表 3-2-4(4) | 倾角 $90^\circ$ 高度为 200~5000km 卫星圆轨道上各种磁刚度的粒子透过率                       | 200 |
| 表 3-2-5    | 1972 年 8 月和 1989 年 10 月特大太阳质子事件积分谱                                   | 204 |
| 表 3-2-6    | 太阳宇宙线中各元素核离子相对于质子的含量                                                 | 204 |
| 表 3-2-7(1) | 倾角 $50^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上 1972 年 8 月特大质子事件积分通量谱                 | 205 |
| 表 3-2-7(2) | 倾角 $60^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上 1972 年 8 月特大质子事件积分通量谱                 | 205 |
| 表 3-2-7(3) | 倾角 $70^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上 1972 年 8 月特大质子事件积分通量谱                 | 205 |
| 表 3-2-7(4) | 倾角 $80^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上 1972 年 8 月特大质子事件积分通量谱                 | 206 |
| 表 3-2-7(5) | 倾角 $90^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上 1972 年 8 月特大质子事件积分通量谱                 | 206 |
| 表 3-3-1    | 银河宇宙线的组成及其与宇宙物质组成的比较                                                 | 209 |
| 表 3-3-2    | 太阳活动高年和低年的银河宇宙线分析模式常数表                                               | 211 |
| 表 3-3-3    | 相对于氦的各种元素核的比例                                                        | 211 |
| 表 3-3-4    | 相对于铁的 Ca、Co、Ni 元素核的比例                                                | 212 |
| 表 3-3-5    | Li、Be、B 相对于综合谱的比例                                                    | 212 |
| 表 3-3-6    | Mg、Si、S 相对于综合谱的比例                                                    | 212 |
| 表 3-3-7    | 相对于铁的 Cl 等元素核的比例                                                     | 212 |
| 表 3-3-8    | 相对于铁的 Cu 等元素核的比例                                                     | 213 |
| 表 3-3-9(1) | 倾角 $30^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上银河宇宙线微分能谱                              | 214 |
| 表 3-3-9(2) | 倾角 $40^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上银河宇宙线微分能谱                              | 215 |
| 表 3-3-9(3) | 倾角 $50^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上银河宇宙线微分能谱                              | 216 |
| 表 3-3-9(4) | 倾角 $60^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上银河宇宙线微分能谱                              | 217 |
| 表 3-3-9(5) | 倾角 $70^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上银河宇宙线微分能谱                              | 218 |
| 表 3-3-9(6) | 倾角 $80^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上银河宇宙线微分能谱                              | 219 |
| 表 3-3-9(7) | 倾角 $90^\circ$ 高度 1000km 卫星圆轨道上银河宇宙线微分能谱                              | 220 |
| 表 4-3-1    | 1979~1995 年中等以上磁暴表                                                   | 233 |