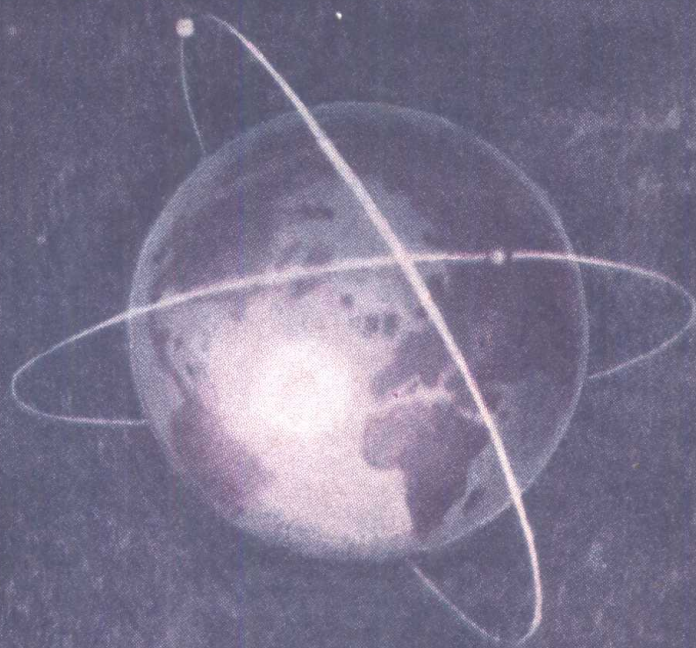


人造卫星 环境手册

F. S. 约翰逊 编著



56.421
2243

人造卫星环境手册

F. S 约翰逊 编著
阮忠家 李再琨 译
刘 庆 令 校

科学出版社

1973

T66/23
2166

内 容 简 介

本书较全面地论述了高空物理学的各个方面,广泛总结了人造卫星所遇到的地球物理环境的重要资料,讨论了卫星环境的主要因素,并且对提出的资料作了评价,内容表达简明扼要,而又具有一定深度。

全书共分八章,即高层大气结构、电离层结构、贯穿粒子辐射、太阳辐射、微流星、无线电噪声、地面热辐射和地磁,分别由上述领域内的科学家执笔写成。各著者都具有相当高的专业水平。

本书可供从事空间系统的工程设计和科研人员参考,亦可供高空大气物理学、气象学、地球物理学以及其他有关学科的科研工作者和教学人员参考。

Edited by Francis S. Johnson

SATELLITE ENVIRONMENT HANDBOOK

Second Edition

Stanford University Press, Stanford, California 1965

人造卫星环境手册

F. S. 约翰逊编著

阮忠家 李再琨译

刘 庆 令校

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1973年11月第一版 开本:787×1092 1/16
1973年11月第一次印刷 印张:7 1/2
印数:0001—21,850 字数:166,000

统一书号:13031·115

本社书号:229·13—15

定价: 0.75 元

第二版序言*

编纂本手册的第一版,是为了在各方面适应空间工程计划对最有用的人造卫星环境资料的需要。第一版是在宇宙年代的早期编的,那时人们刚开始以飞快的步伐增进对自然环境的了解,因此当时就认识到不久将需要对书中许多资料加以修改。

在编纂第一版以来的三年半时间中,资料蜂拥而来,迅速增加,令人不知所措,因此第二版的编纂任务较第一版更为困难。第一版中提出的想法只有很少被证明是不正确的,这一点已经够意外了。尤其令人感到意外的是,更改的旧观念竟如此之少,说得更确切一些,只是加上了新的概念和新的现象。例如,把氢离子层加进电离层的模式,但是并没有对电离层的其他参数作什么重要的变动。又如,把 ~ 1 兆电子伏特的质子带加进范阿伦辐射的外区,但是也没有对原来估计的通量作什么重要的变动。第一版中不清楚的大多数现象,特别是极光和范阿伦辐射带,仍然没有搞清楚。虽然现在我们能够对这些现象阐述得更准确和完善一些,但是依然不知其基本起因。我们只能希望,在今后的几年中将会弄明白造成这些现象的原因。

在这个新版本中,对卫星环境的叙述有许多重要的改进和增加。例如,提出了三种大气模式,来表示太阳黑子周中典型的两个极端情况和一个中间情况,后者的密度分布类似于1962年美国标准大气,但是一些物理参数被认为比标准大气更近乎实际情况。“百灵鸟”人造卫星的数据和改进的理论概念使得能更详细地描述电离层上部。对带电粒子运动和磁坐标系统的叙述都有扩充,同时对地磁捕获辐射,包括“星鱼”辐射带在内,作了更加细致的描述。太阳光谱中的极端紫外线部分的许多新资料已经可用,并且在文中也提出来了。根据宇宙探测器的测量结果,对微流星的数据作了重要的修正。无线电噪声这一章完全是重写的。现在的叙述包括了已经成为太阳紫外放射重要指标的10.7厘米太阳射电噪声。地磁活动的叙述也有了扩充,并且给出了太阳风对地磁场影响的修正图。

为了使本书篇幅保持在合理的限度之内,我们设法在处理每一个题目时,尽可能写得象手册那样简单和明了。我们深信,当研究工作者发觉他们的专业本身有许许多多的内容被压缩成一、二页的时候,他们是会有所谅解的。

F. S. 约翰逊

1964年11月

* 本序言略有删节。——译者

第一版序言*

有关人造卫星环境要素的资料正以很快的速率被人们所获得，但是我们在这个领域内的知识仍有很大的缺陷，并且这种缺陷至少还要继续存在若干年。卫星环境方面的知识增长得如此之快，以致于我们可以说它是一个正在爆炸的学科领域。本书中叙述的许多现象在三年以前还是不知道的，或者甚至是怀疑的。我们现在的一些观念毫无疑问在今后一、二年内也必然会有不同程度的改变。可能还会发生一些使我们感到非常惊奇的事情。

我们对空间环境的观念是正在迅速的发展和变化着，在这样一种情况下，企图把现有资料全部汇编和发表出来，这似乎是愚蠢之举。然而，现在迫切需要对空间环境的性质作出最佳的估计。空间系统的工程设计特别需要这些估计量，但是空间物理领域的迅速发展也需要这样的资料。

本手册的卫星环境资料主要是适应各界向洛克希德导弹和空间公司空间物理研究机构提出的工程设计中的许多问题而汇编的。但是也必须承认，许多研究活动也由于把各领域里获得的材料组织起来而得到裨益。因此，我们希望本书提出的资料和分析在空间系统发展的各个研究和工程设计中、在地球物理学和气象学以及其他学科中将是有益的。

本书广泛地总结了人造地球卫星所遇到的物理环境的有用资料。书中讨论了卫星环境的主要因素——高层大气结构、电离层、贯穿粒子辐射、太阳辐射、微流星、无线电噪声、地球热辐射和地磁，并且评估了现有资料。甚至在实验资料不足的情况下，只要有一个从任何可用资料外推的物理基础，作者也尽力全面地描述这些因素。不用说，由于获得了更多的测量结果，书中的许多资料将需要修正。

F. S. 约翰逊

加利福尼亚州

1961年3月

* 本序言略有删节。——译者

目 录

第一章 高层大气结构 弗朗西斯·斯·约翰逊(Francis S. Johnson)	1
第一节 引言.....	1
第二节 大气关系.....	1
第三节 大气层数据.....	3
第四节 大气变化.....	8
第二章 电离层结构 W. B. 汉森 (Hanson)	11
第一节 引言.....	11
第二节 D层.....	12
第三节 E层.....	13
第四节 F ₁ 层.....	14
第五节 F ₂ 层.....	14
第六节 外电离层.....	17
第七节 电离层电导率和碰撞频率.....	21
第三章 贯穿粒子辐射 A. J. 德斯勒(Dessler) 和 B. J. 奥布赖恩(O'Brien)	28
第一节 引言.....	28
第二节 地磁捕获辐射.....	28
第三节 太阳耀斑宇宙辐射.....	44
第四节 银河的宇宙辐射.....	46
第五节 沉降粒子和极光粒子.....	49
第四章 太阳辐射 弗朗西斯·斯·约翰逊	55
第一节 引言.....	55
第二节 太阳辐照资料.....	55
第三节 太阳风.....	59
第四节 太阳变化.....	59
第五章 微流星 J. F. 维德 (Vedder)	62
第一节 引言.....	62
第二节 环境对微流星的影响.....	62
第三节 微流星通量的直接测量.....	64
第四节 微流星通量的间接征兆.....	67
第五节 流星雨.....	68
第六节 贯穿.....	69

第六章 无线电噪声 H. C. 郭 (Ko)	73
第一节 引言.....	73
第二节 天电干扰.....	74
第三节 大气热噪声.....	74
第四节 电离层热噪声.....	75
第五节 甚低频(VLF)发射.....	75
第六节 宇宙射电噪声.....	76
第七节 月球和行星射电噪声.....	76
第八节 太阳射电噪声.....	78
第九节 人为噪声和干扰.....	79
第十节 接收机噪声.....	80
第七章 地面热辐射 弗朗西斯·斯·约翰逊	82
第一节 引言.....	82
第二节 太阳加热的分布.....	82
第三节 地面热辐射.....	84
第四节 气晖.....	85
第八章 地磁 A. J. 德特勒 (Dessler)	87
第一节 引言.....	87
第二节 主地磁场.....	87
第三节 主要磁场的球谐分析.....	94
第四节 地球上空的主要磁场.....	98
第五节 地磁场的变化.....	101
第六节 磁流体波的传播.....	105
附录: 太阳系的数据	108
换算因子.....	109
有用的物理常数.....	110
英汉词汇对照表	111

第一章 高层大气结构

弗朗西斯·斯·约翰逊

(德拉斯西南高级研究中心)

第一节 引言

气象学家对低层大气不同位置 and 不同时间的结构都已经有了相当详尽的研究。然而,要了解愈来愈高的大气层,数据却愈来愈少。虽然如此,仍有大量关于直至最外层边缘的大气结构的有价值资料。在这篇文章中,我们将把注意力集中在更高的大气层,并且几乎完全不顾气象学上所感兴趣的各层。

根据热结构,大气可分成若干层。最低的一层即对流层,伸展至两极上空约 10 公里的高度和赤道上空 16 公里的高度,这是气象学上感兴趣的主要层。对流层的上界叫做对流层顶。对流层的上面是平流层,它的上界叫做平流层顶。平流层顶的定义有些混淆,但是把它当作在 50 公里附近出现的温度最大值,可能是很令人满意的。平流层顶之上是中层,该层上界在 80 公里附近温度达最小值(通常,如上面所说的那样,中层代表温度极大值附近的一大片,而不是只指它的上面一半)。中层顶(中层的上界)之上是热层,该层温度直至 200 公里的高度是迅速上升的,超过 200 公里后上升得稍慢一些,到了 400 公里以上基本上就是等温了。另一层常被提到的便是外大气圈,该层是热层的上部,那儿大气是如此之稀薄,以致于中性粒子之间的碰撞一般可以忽略不计。外大气圈底部的高度变化范围,在一太阳黑子周期间由 350 到 700 公里。

已经公布许多大气模式,其中最为广泛利用的是 ARDC-1959 大气模式(空军地球物理研究委员会,1960)和美国标准大气模式,1962。下面提出的中等密度大气,在密度分布方面与 1962 标准大气相似,但是它的物理参数被认为比标准大气的参数更为近乎实际[约翰逊(Johnson),1962]。下面还给出另外两种大气模式(低密度的和高密度的),以代表大气中接近极端的情况。

第二节 大气关系

由于太阳使大气不均匀受热,大气的物理性质就有空间和时间方面的变化。说明这些物理性质的有几个方程。其中,首先就是控制压力垂直分布的流体静力学关系。这种流体静力学关系用微分的形式表示如下:

$$dp = -\rho g dh, \quad (1-1)$$

式中 p 是在 h 高度的压力, ρ 是大气密度, g 是重力加速度。这个方程也可以用下面的形式表示出来

$$\frac{dp}{p} = \frac{-mg}{kT} dh = \frac{-dh}{H}, \quad (1-2)$$

其中 m 是平均粒子质量, T 是 h 高度的温度, k 是玻耳兹曼常数, H 是标高。如果 m , g 和 T 都是常数, H 就是垂直距离, 在这段距离上压力变化是 e (自然对数的底), 它由下式来表示:

$$H = kT/mg_0. \quad (1-3)$$

把方程 (1-2) 积分, 我们就得出

$$p/p_0 = \exp\left[-\int_0^h (mg/kT) dh\right], \quad (1-4)$$

这里的 p_0 是 h 值定为零的任选参考面上的压力。如果知道任何两高度面之间的温度分布和平均粒子质量, 用方程 (1-4) 可以求出任何两高度面的压力比。

如果温度和平均粒子质量不随高度变化, 那末, 不计 g 随高度的变化, 方程 (1-4) 就简化为

$$p/p_0 = \exp(-h/H) = \exp(-mgH/kT). \quad (1-4')$$

又 $\rho/\rho_0 = n/n_0 = p/p_0$, ρ 和 n 分别为 h 高度的大气密度和粒子浓度, ρ_0 和 n_0 是 $h=0$ 的参考面上的相应量。当考虑到 g 随高度变化时, 我们得到的不是方程 (1-4''), 而是

$$p/p_0 = n/n_0 = \rho/\rho_0 = \exp[-mg_0 R_0 h / (R_0 + h) kT], \quad (1-4'')$$

式中 R_0 是地心至参考面的距离, g_0 是参考面上的重力加速度。方程 (1-4'') 是广义的流体静力学方程之一种形式。

当温度和平均粒子质量随高度变化时, 方程 (1-4) 就必须用来代替方程 (1-4') 和方程 (1-4'')。密度和粒子浓度的相应方程如下

$$\rho/\rho_0 = (mT_0/m_0T) \exp\left[-\int_0^h (mg/kT) dh\right] \quad (1-5)$$

和

$$n/n_0 = (T_0/T) \exp\left[-\int_0^h (mg/kT) dh\right]. \quad (1-6)$$

在方程 (1-4)、(1-5) 和 (1-6) 中, 必须知道有关高度区上的温度和平均粒子质量的变化, 并且利用关系

$$g = g_0 R_0^2 / (R_0 + h)^2 \quad (1-7)$$

来考虑 g 随高度的变化。这些就是表示高度和大气物理性质之间关系的最普通的方程式。

压力可以垂直变化, 也可以水平变化。当存在水平气压梯度的时候, 大气有发生一种使压力平衡的水平运动的趋势。因为地球在自转, 也会有一种科里奥利力, 使运动方向偏转到这样一种程度, 以致于压力平衡流终于被阻止。在这种极限的情况下得到一个平衡环流, 环流中的科里奥利力及与环流有关的离心力刚巧与水平气压梯度力平衡。由于粒子轨迹的曲率而生的环流离心力略而不计时, 则通过使科里奥利力与气压梯度力相等的办法就可以计算出平衡环流。以这种方式计算的风就是大家所知道的地转风。它的速度大小可由下面的方程来表示:

$$v = \frac{1}{2\rho\Omega \sin \lambda} |\nabla_{Hp}|, \quad (1-8)$$

其中 $|\nabla_{Hp}|$ 是水平气压梯度的量值, Ω 是地球自转的角速率, λ 是纬度。也可以用下面

形式来表示:

$$v = \frac{g s}{2\Omega \sin \lambda}, \quad (1-8')$$

式中 s 是经过该点的等压面斜率。如果空气运动是沿着一条曲径进行的,那末方程(1-8)中应该加上一个离心力的项,考虑这种力所计算出的风就是大家所知道的梯度风。

虽然地面上存在着压差,而平衡环流又阻碍压力平衡风消除压差,但是地面上的压力变化仍然不是很大的。最大偏差相当于平均值的 $\pm 5\%$ 左右(假设没有龙卷风存在)。在高至 100 公里和更高一些的地方,压力分布和风场用梯度风方程来表示。从所观测到的风的强度来看,很明显,一定高度的压力相对说来是常数,但是相对变化比地面观测到的 $\pm 5\%$ 要大得多。在远远超过 100 公里的高度,粘滞力起着重要的作用,并且倾向于阻碍平衡环流的出现(约翰逊, 1960),纵然在这个高度也必然会出现不均匀加热现象。结果,在地面上空近 200 公里高度的压力是相对不变的(也就是说,在一个小于 2 的因子以内的常数),因为压力平衡流大大地减少了本来要出现的压力变化。

第三节 大气层数据

大气温度和压力是用气球携带的仪器在对流层直接测量的,并且利用流体静力学方程(方程 1-1)确定观测高度。但是,在对流层以上高得多的地方,就很难直接测量温度了,因为与其说测温元件与它们的邻近周围环境形成传导平衡,不如说与它们的遥远周围环境形成辐射平衡。因此,在较低的火箭高度,通常的做法是测量不同高度的压力,或者利用探空火箭携带的榴弹爆炸声源,从声速实验中测定温度。在 100 公里以上的高度,很难测到压力,声音也传播不佳,因此更普通的方法是观测不同高度的密度,一般情况下,或者用探测气体密度的真空计,或者用可观测其轨道衰变率的人造卫星来进行测量。

图 1 指出了在太阳黑子周的两个极端时的大气温度分布和与 1962 年美国标准大气模式采用的密度分布近似一致的平均大气温度分布。在 100 公里以下,没有看到有随太阳黑子周变化的现象,但是在高度大的地方有显著的季节变化。图 1 中的最低温度分布,代表接近太阳黑子周最小值时典型的夜间分布状况,并且比图示温度低得多的温度是不易遇到的。中间的分布与 1962 年美国标准大气模式选择的密度分布完全一致(约翰逊, 1962),它基本上适用于太阳黑子周最大值时的夜间情况或太阳黑子周中期的白天情况。最高温度分布代表接近太阳黑子周最大值时白天的分布情况;只有当接近太阳黑子周最大值时出现

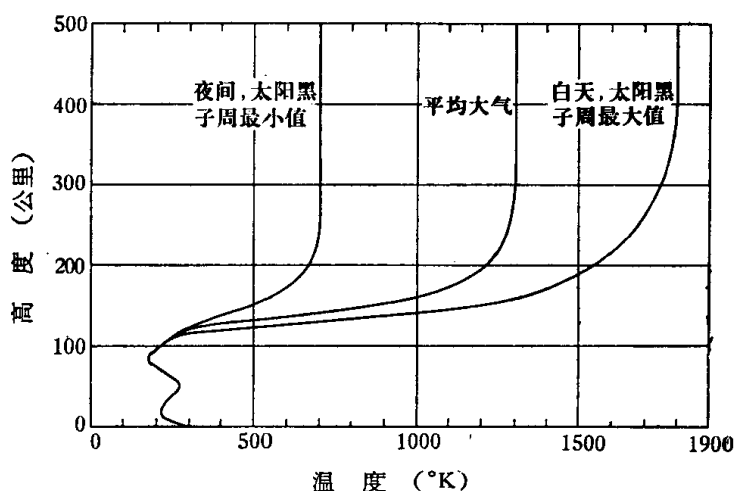


图 1 接近太阳黑子周最大值时白天典型大气温度分布和接近太阳黑子周最小值时夜间典型大气温度分布以及两者的平均状况。

异常的太阳扰动的时候,更高的温度才易于遇到。雅克夏 (Jacchia, 1963)、哈里斯和普里斯特 (Harris 和 Priester, 1963) 以及雅克夏和斯洛威 (Jacchia 和 Slowey, 1964) 主要根据人造卫星轨道衰变率导出图 1 中的极端温度曲线。100 和 200 公里之间温度的急剧上升以及 300 或 400 公里以上的等温分布,与施皮策 (Spitzer, 1952) 提出的、并由贝茨 (Bates, 1951) 和约翰逊 (1956, 1958) 进一步发展的理论是一致的。近几年来,其他的研究工作者或根据理论分析 [尼科雷特 (Nicolet), 1960], 或根据实验情况 [卡尔曼 (Kallmann), 1961] 也都采纳了这种想法。图 1 曲线上部所表示的等温情况适用于直至几千公里的高度。在这个高度以外,平均粒子能量由于一些能量更强的粒子从大气中逃逸而下降。

图 2 说明从 0 到 500 和 0 到 2500 公里范围内选定情况的密度数据。这里有三条曲线,一条是接近太阳黑子周最大值时的白天情况,一条是接近太阳黑子周最小值时的夜间情况,

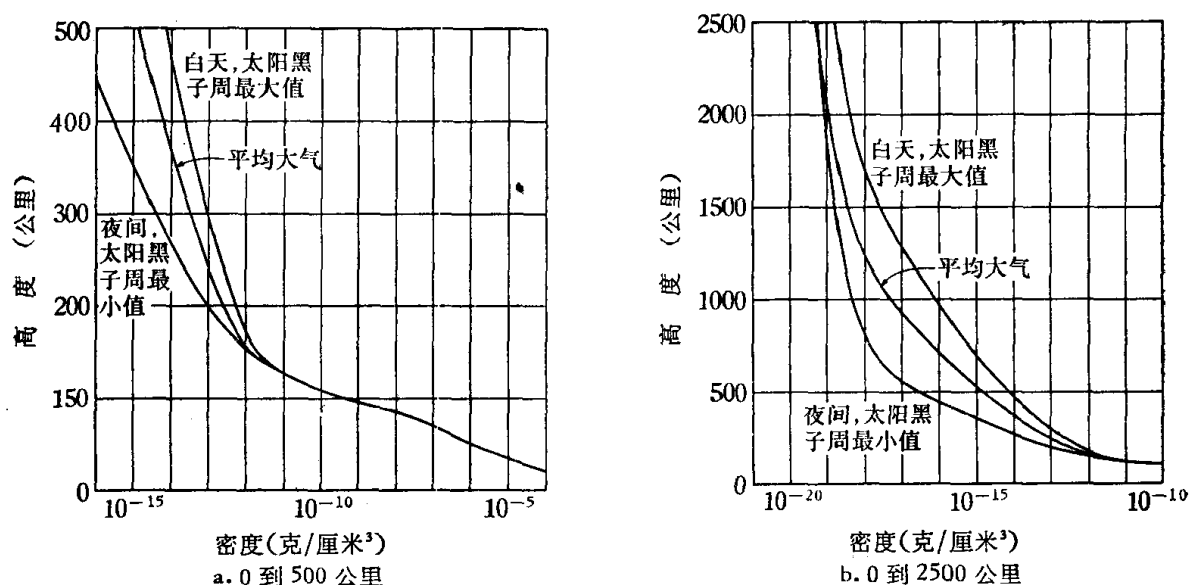


图 2 接近太阳黑子周最大值时白天典型大气密度分布和接近太阳黑子周最小值时夜间典型大气密度分布以及两者的平均状况。

情况,还有一条是非常近似于 1962 年美国标准大气模式的平均大气曲线。

图 3 说明了接近太阳黑子周两个极端时各种大气成分的浓度。图 4 所示浓度与图 1 的中间温度分布联合时,同 1962 年美国标准大气模式采用的密度分布相当一致。关于高层大气的组成,在定量问题上,还很不肯定。但是有一点很清楚,那就是在高层扩散进行得很快,足以使重力场中的扩散平衡在某一高度以上占优势。尼科雷特 (1961) 首先认定,在接近太阳黑子周最大值时 1500 公里以上的高度有氦存在,并且是那儿主要的大气成分。这一情况说明,扩散平衡分布必然在一直低到 105 公里的高度占据优势,至少对某些大气成分是如此。梅多斯和汤森 (Meadows 和 Townsend, 1960) 进行的第一次质谱仪测量指出,约在 110 公里高度以上存在氦、氮之间的扩散平衡。直接测量分子氧 [皮拉姆 (Byram) 等, 1955]、原子和分子氧 [谢菲尔 (Schaefer), 1963] 以及大气成分 [尼尔 (Nier) 等, 1964], 也提供了有用的资料,指出了扩散平衡分布约在 105 公里高度以上占据优势。在扩散平衡存在的情况下,每一种成分不依赖于其他成分而独立地分布,并且各种成分的垂直分布,正好在其他成分不存在的情况下,和图 1 指出的温度分布没有矛盾。因此,图中指出的每一条曲线的形状可以分别利用流体静力学方程计算出来。

已经有人在接近太阳黑子周最大值时用分光镜测定了地球周围原子氢的浓度〔珀塞尔 (Purcell) 和屠塞 (Tousey), 1960〕。在接近太阳黑子周中期时, 汉森 (Hanson, 1963)

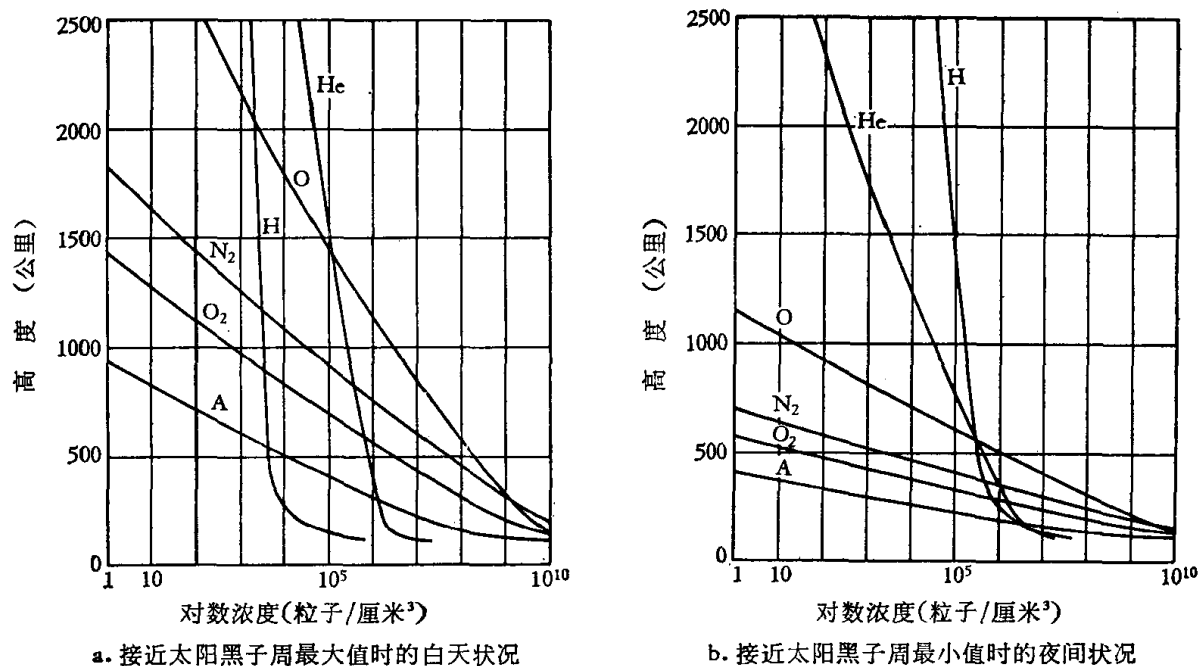


图 3 主要大气成分的浓度。

等人根据泰勒 (Taylor, 1963) 等进行的离子测量, 确定了 500 公里高度的浓度, 这个浓度比珀塞尔和屠塞测量到的要大。在接近太阳黑子周最小值时, 如图 3 和 4 所示, 浓度必然还要大。在接近太阳黑子最小值时浓度增加的原因在于, 进入大气层的原子氢的供应率和离开大气层的原子氢的逃逸率在一个太阳黑子周期间几乎都是一个常数。但是, 在接近太阳黑子最小值时, 高层大气较冷, 较大的原子氢浓度必然出现, 以维持一个逃逸通量常数。汉森和帕特森 (Patterson) (1963) 曾指出, 氢原子浓度的昼夜变化相对说来是小的, 白天和夜间的浓度主要由热层上部在白天达到的最高温度所控制。图 3b 所示的氢原子浓度, 在近似接近太阳黑子最小值时适用于 700°K 的夜间温度, 这是根据在白天期间达到的近似最高温度 930°K 计算出来的。图 3a 和 4 中的氢原子浓度是根据 1800°K 和 1300°K 确定的, 因为这些曲线表示白天的情况。400 公里以下的氢分布与扩散平衡分布有本质上的不同, 因为氢的扩散流向上穿过大气层(贝茨和帕特森, 1961)。

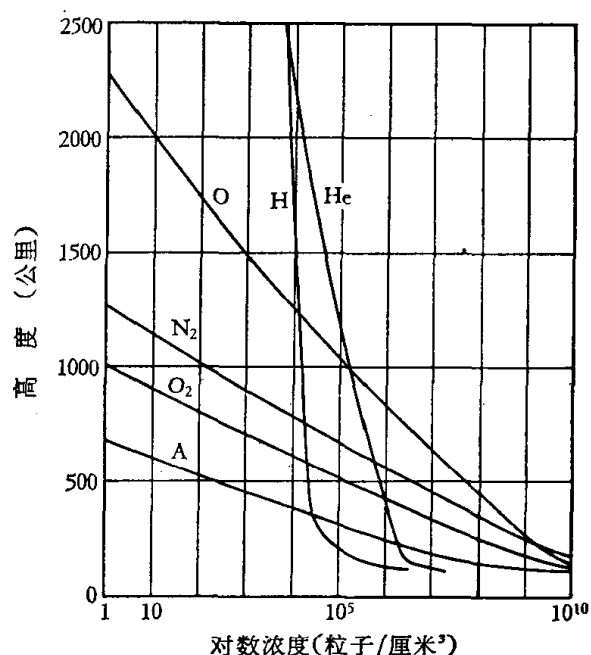


图 4 外大气圈温度为 1300°K 时主要大气成分的浓度。

图 5 表示了在离地面更远处所预期的原子氢浓度。图所示的浓度是以下面的概念为基础的, 那就是, 与从外大气圈底部沿弹道轨道上升的数字相比较, 只有很少一部分不足的原子存在于围绕地球的轨道上。如果绝大多数原子仍然留在轨道上, 实际浓度就要

比图示的(例如,于5个地球半径的地方为三倍)高得多,这种可能性是存在的;但是,由日光引起电离的机率似乎使得这种情况未必发生。虽然外大气圈下部的浓度在接近太阳黑子周最小值时比接近太阳黑子周最大值时要大,但是在接近太阳黑子周最小值时占优势的较低的温度下,这个浓度随着高度更为迅速地下降。因此在一个太阳黑子周期间,在5个地球半径以外的浓度比外大气圈下部的浓度更为接近常数。

图 6 表明高层大气的平均分子重量与至 2500 公里高的高度的关系。 在太阳黑子最

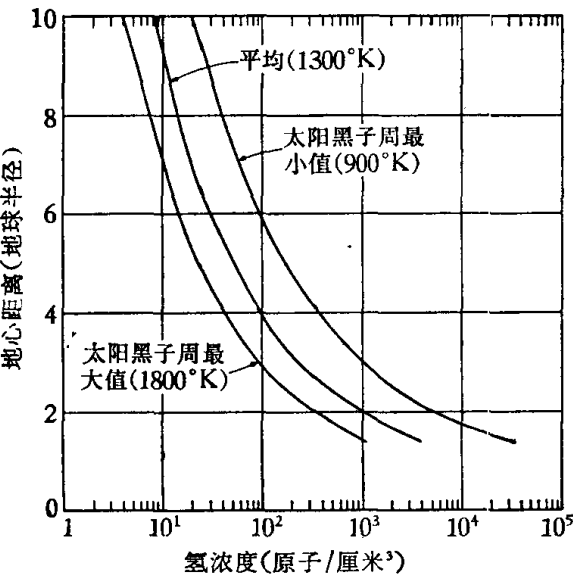


图 5 接近太阳黑子周最大值、最小值和其间平均状况时白天原子氢的分布。

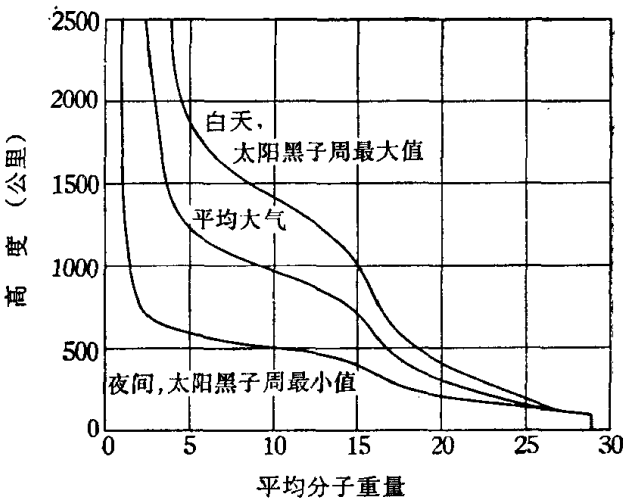


图 6 接近太阳黑子周最大值时白天典型的平均分子重量分布, 接近太阳黑子周最小值时夜间典型的平均分子重量分布以及两者之间的平均状况。

小值时 500 公里高度和在太阳黑子最大值时 1400 公里高度出现的分子重量突然减小的现象,是由于大气层中存在原子氢和原子氦的缘故。在 100 公里以下,分子重量迅速接近 80 公里以下适用的 29.0 的值。

表 1, 2, 和 3 分别给出了图 1 到图 6 描述的低、中、高密度大气参数的某些选值,同时也给出了标高、压力、总粒子浓度以及分子氮、原子氧和分子氧的浓度。

表 1 大气参数作为低密度大气高度的函数(夜间,接近太阳黑子最小值)

温度 T , 粒子浓度 n , 密度 ρ , 压力 p , 分子重量 M , 标高 H , 原子氧浓度 $n(O)$, 分子氧浓度 $n(O_2)$ 和分子氮浓度 $n(N_2)$ 作为高度 h 的函数

h (公里)	T (°K)	n (粒子/厘米³)	ρ (克/厘米³)	p (达因/厘米²)	M	H (公里)	$n(O)$ (粒子/厘米³)	$n(O_2)$ (粒子/厘米³)	$n(N_2)$ (粒子/厘米³)
105	224	4.59×10^{12}	2.14×10^{-10}	1.42×10^{-1}	28.07	7.00	2.80×10^{11}	7.93×10^{11}	3.48×10^{12}
110	243	2.14×10^{12}	9.86×10^{-11}	7.18×10^{-2}	27.73	7.69	1.74×10^{11}	3.34×10^{11}	1.62×10^{12}
120	290	5.51×10^{11}	2.47×10^{-11}	2.20×10^{-2}	26.96	9.47	7.33×10^{10}	7.04×10^{10}	4.05×10^{11}
130	350	1.76×10^{11}	7.64×10^{-12}	8.51×10^{-3}	26.12	11.84	3.42×10^{10}	1.85×10^{10}	1.23×10^{11}
140	425	6.83×10^{10}	2.87×10^{-12}	4.01×10^{-3}	25.27	14.90	1.76×10^{10}	5.98×10^9	4.46×10^{10}
150	490	3.21×10^{10}	1.30×10^{-12}	2.17×10^{-3}	24.45	17.81	1.03×10^{10}	2.36×10^9	1.94×10^{10}
160	548	1.71×10^{10}	6.70×10^{-13}	1.29×10^{-3}	23.66	20.65	6.52×10^9	1.05×10^9	9.46×10^9
180	625	6.25×10^9	2.30×10^{-13}	5.39×10^{-4}	22.19	25.26	3.11×10^9	2.74×10^8	2.86×10^9
200	664	2.80×10^9	9.71×10^{-14}	2.57×10^{-4}	20.87	28.71	1.69×10^9	8.55×10^7	1.03×10^9
220	688	1.40×10^9	4.57×10^{-14}	1.33×10^{-4}	19.72	31.67	9.66×10^8	2.90×10^7	3.97×10^8
240	699	7.47×10^8	2.33×10^{-14}	7.21×10^{-5}	18.77	34.02	5.73×10^8	1.04×10^7	1.61×10^8

续表 1

h (公里)	T (°K)	n (粒子/厘米 ³)	ρ (克/厘米 ³)	p (达因/厘米 ²)	M	H (公里)	$n(O)$ (粒子/厘米 ³)	$n(O_2)$ (粒子/厘米 ³)	$n(N_2)$ (粒子/厘米 ³)
260	700	4.21×10^8	1.26×10^{-14}	4.07×10^{-5}	17.99	35.75	3.47×10^8	3.82×10^6	6.72×10^7
280	700	2.43×10^8	7.02×10^{-15}	2.35×10^{-5}	17.38	37.24	2.12×10^8	1.42×10^6	2.82×10^7
300	700	1.44×10^8	4.02×10^{-15}	1.39×10^{-5}	16.89	38.55	1.29×10^8	5.29×10^5	1.19×10^7
350	700	4.11×10^7	1.09×10^{-15}	3.97×10^{-6}	15.97	41.37	3.82×10^7	4.61×10^5	1.41×10^6
400	700	1.28×10^7	3.19×10^{-16}	1.24×10^{-6}	14.99	44.73	1.15×10^7	4.17×10^5	1.72×10^5
450	700	4.46×10^6	9.88×10^{-17}	4.31×10^{-7}	13.33	51.06	3.51×10^6	3.91×10^5	2.16×10^4
500	700	1.85×10^6	3.26×10^{-17}	1.79×10^{-7}	10.61	65.11	1.09×10^6	3.79×10^4	2.81×10^3
600	700	6.34×10^5	5.07×10^{-18}	6.13×10^{-8}	4.82	147.60	1.11×10^5	3.93×10^{-1}	5.16×10^1
700	700	3.93×10^5	1.67×10^{-18}	3.80×10^{-8}	2.55	286.40	1.21×10^4	4.65×10^{-3}	1.06×10
800	700	2.93×10^5	9.37×10^{-19}	2.83×10^{-8}	1.93	390.41	1.40×10^3	6.22×10^{-5}	2.44×10^{-2}
900	700	2.32×10^5	6.36×10^{-19}	2.24×10^{-8}	1.65	468.71	1.72×10^2	9.36×10^{-7}	6.20×10^{-4}
1000	700	1.90×10^5	4.64×10^{-19}	1.84×10^{-8}	1.47	540.85	2.23×10^1	1.58×10^{-8}	1.74×10^{-5}
1500	700	9.20×10^4	1.67×10^{-19}	8.89×10^{-9}	1.09	829.94	1.80×10^{-3}	1.02×10^{-16}	1.19×10^{-12}
2000	700	5.34×10^4	9.04×10^{-20}	5.16×10^{-9}	1.02	1004.78	4.45×10^{-7}	6.27×10^{-24}	5.83×10^{-18}
2500	700	3.35×10^4	5.60×10^{-20}	3.24×10^{-9}	1.00	1144.91	2.81×10^{-10}	2.50×10^{-30}	1.46×10^{-24}

表 2 大气参数作为中密度大气高度的函数

温度 T , 粒子浓度 n , 密度 ρ , 压力 p , 分子量 M , 标高 H , 原子氧浓度 $n(O)$, 分子氧浓度 $n(O_2)$ 和分子氮浓度 $n(N_2)$ 作为高度 h 的函数

h (公里)	T (°K)	n (粒子/厘米 ³)	ρ (克/厘米 ³)	p (达因/厘米 ²)	M	H (公里)	$n(O)$ (粒子/厘米 ³)	$n(O_2)$ (粒子/厘米 ³)	$n(N_2)$ (粒子/厘米 ³)
105	224	4.59×10^{12}	2.14×10^{-10}	1.42×10^{-1}	28.07	7.00	2.80×10^{11}	7.93×10^{11}	3.48×10^{12}
110	245	2.13×10^{12}	9.80×10^{-11}	7.20×10^{-2}	27.73	7.76	1.73×10^{11}	3.33×10^{11}	1.61×10^{12}
120	295	5.47×10^{11}	2.45×10^{-11}	2.23×10^{-2}	26.97	9.63	7.25×10^{10}	7.01×10^{10}	4.02×10^{11}
130	466	1.51×10^{11}	6.58×10^{-12}	9.71×10^{-3}	26.25	15.68	2.79×10^{10}	1.64×10^{10}	1.06×10^{11}
140	693	6.09×10^{10}	2.60×10^{-12}	5.82×10^{-3}	25.71	23.88	1.37×10^{10}	5.86×10^9	4.12×10^{10}
150	880	3.33×10^{10}	1.40×10^{-12}	4.05×10^{-3}	25.28	30.94	8.57×10^9	2.92×10^9	2.18×10^{10}
160	997	2.18×10^{10}	9.00×10^{-13}	3.00×10^{-3}	24.89	35.70	6.25×10^9	1.76×10^9	1.37×10^{10}
180	1140	1.14×10^{10}	4.58×10^{-13}	1.80×10^{-3}	24.17	42.30	3.91×10^9	7.90×10^8	6.70×10^9
200	1213	6.85×10^9	2.67×10^{-13}	1.15×10^{-3}	23.47	46.63	2.72×10^9	4.06×10^8	3.72×10^9
220	1251	4.39×10^9	1.66×10^{-13}	7.58×10^{-4}	22.78	49.85	1.98×10^9	2.22×10^8	2.18×10^9
240	1275	2.91×10^9	1.07×10^{-13}	5.13×10^{-4}	22.11	52.68	1.47×10^9	1.25×10^8	1.32×10^9
260	1286	1.99×10^9	7.10×10^{-14}	3.54×10^{-4}	21.44	55.11	1.11×10^9	7.17×10^7	8.09×10^8
280	1294	1.39×10^9	4.80×10^{-14}	2.48×10^{-4}	20.81	57.48	8.43×10^8	4.16×10^7	5.02×10^8
300	1299	9.83×10^8	3.30×10^{-14}	1.76×10^{-4}	20.21	59.77	6.43×10^8	2.43×10^7	3.14×10^8
350	1300	4.41×10^8	1.38×10^{-14}	7.90×10^{-5}	18.91	64.88	3.33×10^8	6.54×10^6	9.94×10^7
400	1300	2.09×10^8	6.23×10^{-15}	3.76×10^{-5}	17.92	69.52	1.75×10^8	1.79×10^6	3.20×10^7
450	1300	1.04×10^8	2.97×10^{-15}	1.87×10^{-5}	17.19	73.55	9.23×10^7	5.01×10^5	1.05×10^7
500	1300	5.36×10^7	1.48×10^{-15}	9.62×10^{-6}	16.66	76.99	4.92×10^7	1.42×10^5	3.50×10^6
600	1300	1.54×10^7	4.05×10^{-16}	2.76×10^{-6}	15.90	83.04	1.44×10^7	1.22×10^4	4.06×10^5
700	1300	4.82×10^6	1.21×10^{-16}	8.65×10^{-7}	15.09	89.99	4.36×10^6	1.12×10^3	5.02×10^4
800	1300	1.68×10^6	3.85×10^{-17}	3.02×10^{-7}	13.80	101.26	1.36×10^6	1.09×10^2	6.58×10^3
900	1300	6.79×10^5	1.32×10^{-17}	1.22×10^{-7}	11.74	122.29	4.41×10^5	1.14×10^1	9.11×10^2
1000	1300	3.30×10^5	5.05×10^{-18}	5.93×10^{-8}	9.20	160.42	1.47×10^5	1.27×10	1.33×10^2
1500	1300	5.95×10^4	3.57×10^{-19}	1.07×10^{-8}	3.61	465.77	9.16×10^2	4.94×10^{-5}	1.84×10^{-2}
2000	1300	2.40×10^4	1.17×10^{-19}	4.31×10^{-9}	2.93	648.58	1.05×10^1	6.46×10^{-9}	7.38×10^{-6}
2500	1300	1.24×10^4	4.91×10^{-20}	2.23×10^{-9}	2.38	896.66	1.98×10^{-1}	2.31×10^{-12}	7.13×10^{-9}

表3 大气参数作为高密度大气高度的函数(白天,接近太阳黑子最大值)

温度 T , 粒子浓度 n , 密度 ρ , 压力 p , 分子重量 M , 标高 H , 原子氧浓度 $n(\text{O})$, 分子氧浓度 $n(\text{O}_2)$ 和分子氮浓度 $n(\text{N}_2)$ 作为高度 h 的函数

h (公里)	T (°K)	n (粒子/厘米 ³)	ρ (克/厘米 ³)	p (达因/厘米 ²)	M	H (公里)	$n(\text{O})$ (粒子/厘米 ³)	$n(\text{O}_2)$ (粒子/厘米 ³)	$n(\text{N}_2)$ (粒子/厘米 ³)
105	224	4.59×10^{12}	2.14×10^{-10}	1.42×10^{-1}	28.07	7.00	2.80×10^{11}	7.93×10^{11}	3.48×10^{12}
110	246	2.12×10^{12}	9.78×10^{-11}	7.21×10^{-2}	27.73	7.79	1.73×10^{11}	3.32×10^{11}	1.60×10^{12}
120	435	4.41×10^{11}	1.98×10^{-11}	2.65×10^{-2}	27.10	14.14	5.44×10^{10}	5.83×10^{10}	3.26×10^{11}
130	705	1.58×10^{11}	7.00×10^{-12}	1.54×10^{-2}	26.67	23.35	2.43×10^{10}	1.88×10^{10}	1.14×10^{11}
140	985	7.90×10^{10}	3.46×10^{-12}	1.07×10^{-2}	26.35	33.12	1.40×10^{10}	8.76×10^9	5.61×10^{10}
150	1190	5.00×10^{10}	2.16×10^{-12}	8.21×10^{-3}	26.08	40.55	9.84×10^9	5.22×10^9	3.48×10^{10}
160	1324	3.56×10^{10}	1.53×10^{-12}	6.51×10^{-3}	25.84	45.69	7.67×10^9	3.52×10^9	2.44×10^{10}
180	1455	2.15×10^{10}	9.05×10^{-13}	4.32×10^{-3}	25.36	51.46	5.40×10^9	1.92×10^9	1.41×10^{10}
200	1545	1.39×10^{10}	5.76×10^{-13}	2.97×10^{-3}	24.88	56.03	4.01×10^9	1.12×10^9	8.79×10^9
220	1605	9.50×10^9	3.85×10^{-13}	2.11×10^{-3}	24.40	59.71	3.08×10^9	6.91×10^8	5.72×10^9
240	1656	6.65×10^9	2.64×10^{-13}	1.52×10^{-3}	23.92	63.24	2.41×10^9	4.35×10^8	3.80×10^9
260	1690	4.79×10^9	1.86×10^{-13}	1.12×10^{-3}	23.43	66.28	1.92×10^9	2.81×10^8	2.58×10^9
280	1721	3.50×10^9	1.33×10^{-13}	8.31×10^{-4}	22.94	69.35	1.54×10^9	1.84×10^8	1.78×10^9
300	1745	2.60×10^9	9.70×10^{-14}	6.27×10^{-4}	22.46	72.27	1.24×10^9	1.22×10^8	1.24×10^9
350	1785	1.31×10^9	4.64×10^{-14}	3.24×10^{-4}	21.29	79.14	7.48×10^8	4.52×10^7	5.19×10^8
400	1799	7.09×10^8	2.38×10^{-14}	1.76×10^{-4}	20.21	85.27	4.64×10^8	1.75×10^7	2.26×10^8
450	1800	4.02×10^8	1.29×10^{-14}	9.98×10^{-5}	19.27	90.81	2.93×10^8	6.98×10^6	1.01×10^8
500	1800	2.35×10^8	7.22×10^{-15}	5.85×10^{-5}	18.48	96.08	1.86×10^8	2.82×10^6	4.57×10^7
600	1800	8.73×10^7	2.51×10^{-15}	2.17×10^{-5}	17.33	105.49	7.65×10^7	4.77×10^5	9.66×10^6
700	1800	3.50×10^7	9.65×10^{-16}	8.70×10^{-6}	16.59	113.33	3.23×10^7	8.49×10^4	2.13×10^6
800	1800	1.49×10^7	3.97×10^{-16}	3.70×10^{-6}	16.08	120.30	1.40×10^7	1.59×10^4	4.91×10^5
900	1800	6.63×10^6	1.72×10^{-16}	1.65×10^{-6}	15.61	127.41	6.17×10^6	3.10×10^3	1.18×10^5
1000	1800	3.10×10^6	7.73×10^{-17}	7.70×10^{-7}	15.04	135.90	2.79×10^6	6.34×10^2	2.94×10^4
1500	1800	1.84×10^5	2.63×10^{-18}	4.57×10^{-8}	8.61	270.46	7.13×10^4	4.14×10^{-1}	4.80×10^1
2000	1800	5.41×10^4	4.04×10^{-19}	1.34×10^{-8}	4.50	585.20	2.82×10^3	6.50×10^{-4}	1.69×10^{-1}
2500	1800	2.60×10^4	1.66×10^{-19}	6.45×10^{-9}	3.86	766.96	1.61×10^2	2.11×10^{-5}	1.12×10^{-3}

第四节 大气变化

大气是动态的,大气变化是经常发生的,这些已为大家所承认。发生的变化有几种,与太阳黑子周、昼夜效应、太阳活动性、磁活动性和季节有关。

太阳黑子周的变化已经描述过了,至少已经指出了它的大约极限。这是最大的变化,它大概是由于太阳远紫外辐射的变化所致。图7说明了雅克夏和斯洛威(1964)指出的外大气圈温度的长期变化;白天温度最高值和夜间温度最低值是10.7厘米的太阳射电噪声通量的27天平均值的函数。噪声通量(是太阳活动性的有效指示量)的变化,由接近太阳黑子周最小值时的 70×10^{-22} 瓦/米²·赫增加到接近太阳黑子周最大值时的250(见图53)。

另一个最大的变化大概是昼夜变化。雅克夏和斯洛威(1964)指出,外大气圈温度的白天最高值是夜间最低值的1.33倍。在地方时约1400时,温度达最高值,亦即最高值在经度上比太阳落后约30°。比最高值平坦得多的最低值约出现在地方时0500时。昼夜变化几乎是对称的,在纬度上,它明显地跟随着太阳。在极区还没有很好地探测过,但是,显

然那儿的大气密度与纬度较低的地方差不多，大概与夜间状况相似。温度的昼夜变化似乎是太阳紫外辐射的结果。

外大气圈温度逐日出现或多或少的不规则变化，10.7 厘米的太阳射电噪声通量的每日值能够有效地指出这些变化的大小。图 7 指出，外大气圈温度随太阳射电噪声的长期变化而变化；短期变化不是像标出的情况那样明显（雅克夏，1963）。图 7 中的夜间曲线的斜率是 $dT/dS = 4.5$ ，而短期变化的斜率却以等于 2.5 合适些。所以，用图 7 可以确定 27 天周期的平均温度，用下面的数来校正从图 7 中得出的温度，可以估计出任何一天的温度

$$\Delta T = 2.5(S - \bar{S}), \quad (1-9)$$

式中 S 是 10.7 厘米太阳射电噪声通量的 27 天平均值， $\bar{S}$ 是该天的值。这些日复一日的变化大概就是太阳紫外辐射变化的结果。

外大气圈温度也随着磁活动性变化。雅克夏和斯洛威（1964）指出，在低纬度增温数值与全球 a_p 指数相等，但是在冬天的极区，温度增大到 4 或 5 倍。这些变化大概是由于吸收磁流体波能量的结果[德斯勒（Dessler），1959；弗朗西斯（Francis，1960）和卡普勒斯（Karplus），1960]，虽然高能带电粒子在使加热效应非常显著的极区加热过程中也起着作用。

外大气圈温度的年变化和半年变化已被观测到[彼特召得（Paetzold），1963]。其中，半年变化已更为清楚地得到证实；它的幅度在接近太阳黑子周最大值时约为 200°K ，在接近太阳黑子周最小值时约为其半；半年变化的最高值出现在 4 月初和 10 月初。年变化的最高值出现在 1 月，最低值出现在 7 月。这些效应的起因还没有完全搞清楚。地磁活动性有一种在位相上与大气变化一致的半年变化，但是大气变化太大了，不能被看作为磁变化的结果。在位相上，年变化随着地球到太阳的距离变化，但是这个效应也太大了，不能以这种方式来解释。

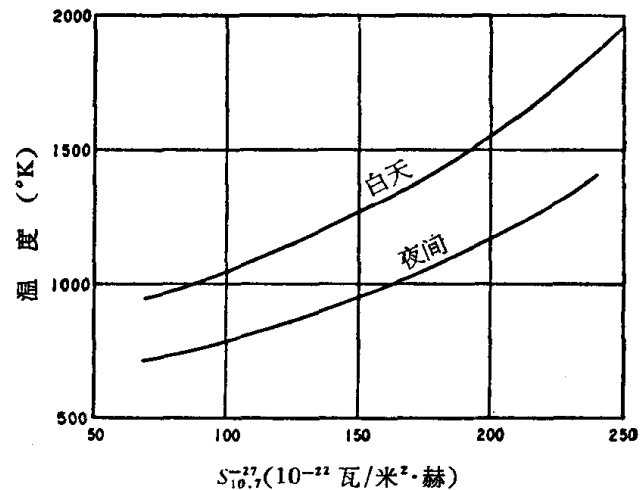


图 7 外大气圈平均昼夜温度作为 10.7 厘米的太阳射电噪声通量 27 天平均值的函数。

参 考 文 献

- Air Force Geophysics Research Directorate. 1960. *Handbook of Geophysics*. Macmillan, pp. 1—1 to 1—43.
- Bates, D. R. 1951. "The Temperature of the Upper Atmosphere," *Proc. Phys. Soc. (London)*, B, 64, 805—21.
- Bates, D. R., and T. N. L. Patterson. 1961. "Hydrogen Atoms and Ions in the Thermosphere and Exosphere," *Planet. Space Sci.*, 5, 257—73.
- Byram, E. T., T. A. Chubb, and H. Friedman. 1955. "Dissociation of Oxygen in the Upper Atmosphere," *Phys. Rev.*, 98, 1594—97.
- Dessler, A. J. 1959. "Upper Atmosphere Density Variations Due to Hydromagnetic Heating," *Nature*, 184, 261—62.
- Francis, W. E., and R. Karplus. 1960. "Hydromagnetic Waves in the Ionosphere," *J. Geophys. Research*, 65, 3593—3600.
- Hanson, W. B., and T. N. L. Patterson. 1963. "Diurnal Variation of Hydrogen Concentration in the

- Exosphere," *Planet. Space Sci.*, 11, 1035—52.
- Hanson, W. B., T. N. L. Patterson, and S. S. Degaonkar. 1963. "Some Deductions from a Measurement of the Hydrogen Ion Distribution in the High Atmosphere," *J. Geophys. Research*, 68, 6203—5.
- Harris, I., and W. Priester. 1963. "Heating of the Upper Atmosphere," in W. Priester, ed., *Space Research III*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, pp. 53—75.
- Jacchia, L. G. 1963. "Electromagnetic and Corpuscular Heating of the Upper Atmosphere," in W. Priester, ed., *Space Research III*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, pp. 3—18.
- Jacchia, L. G., and J. Slowey. 1964. "Atmospheric Heating in the Auroral Zones: A Preliminary Analysis of the Atmospheric Drag of the Injun 3 Satellite," *J. Geophys. Research*, 69, 905—10.
- Johnson, F. S. 1956. "Temperature Distribution of the Ionosphere under Control of Thermal Conductivity," *J. Geophys. Research*, 61, 71—76.
- Johnson, F. S. 1958. "Temperatures in the High Atmosphere," *Ann. Geophys.*, 14, 94—108.
- Johnson, F. S. 1960. "Pressure and Temperature Equalization at 200-km Altitude," *J. Geophys. Research*, 65, 2227—32.
- Johnson, F. S. 1962. "Atmospheric Structure," *Astronautics*, 7, No. 8, 54—61.
- Kallmann Bijl, H. K. 1961. "Daytime and Nighttime Atmospheric Properties Derived from Rocket and Satellite Observations," *J. Geophys. Research*, 66, 787—95.
- Meadows, E. B., and J. W. Townsend. 1960. "IGY Rocket Measurements of Arctic Atmospheric Composition above 100 km," in H. Kallmann Bijl, ed., *Space Research*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, pp. 175—98.
- Nicolet, M. 1960. "Les variations de la densité et du transport de chaleur par conduction dans l'atmosphère supérieure," in H. Kallmann Bijl, ed., *Space Research*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, pp. 46—89.
- Nicolet, M. 1961. "Helium, an Important Constituent in the Lower Exosphere," *J. Geophys. Research*, 68, 2263—64.
- Nier, A. O., J. H. Hoffman, C. Y. Johnson, and J. C. Holmes. 1964. "Neutral Composition of the Atmosphere in the 100- to 200-Kilometer Range," *J. Geophys. Research*, 69, 979—89.
- Pactzold, H. K. 1963. "Solar Activity Effects in the Upper Atmosphere Deduced from Satellite Observations," in W. Priester, ed., *Space Research III*. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, pp. 28—52.
- Purcell, J. D., and R. Tousey. 1960. "The Profile of Solar Hydrogen-Lyman- α ," *J. Geophys. Research*, 65, 370—72.
- Schaefer, E. J. 1963. "The Dissociation of Oxygen Measured by a Rocket-Borne Mass Spectrometer," *J. Geophys. Research*, 68, 1175—76.
- Spitzer, L., Jr. 1952. "The Terrestrial Atmosphere above 300 km," in G. P. Kuiper, ed., *Atmospheres of the Earth and Planets*. University of Chicago Press, pp. 211—47.
- Taylor, H. A., Jr., L. H. Brace, H. C. Brinton, and C. R. Smith. 1963. "Direct Measurements of Helium and Hydrogen Ion Concentrations and Total Ion Density to an Altitude of 940 Kilometers," *J. Geophys. Research*, 68, 5339—47.