

Н. Я. 康德拉捷夫著



利用火箭和人造卫星的 气象研究

利用火箭和人造卫星的气象研究

К. Я. 康德拉捷夫 著

陈耀武 赵明哲 译

科 学 出 版 社

К. Я. Кондратьев
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
С ПОМОЩЬЮ РАКЕТ И СПУТНИКОВ

Гидрометеиздат

1962

內 容 簡 介

本书系統地闡述了利用火箭和人造地球卫星的气象研究方法和所得結果,介紹了有关高层大气基本特性的一些知識,着重討論了高层大气温度、压力、密度、成分等各主要結構參量的测量方法和测量結果,对高层大气中的环流、乱流等动力学問題也做了分析。此外,还詳細地論述了利用卫星研究云、太阳辐射、地球辐射等問題,以及利用人造地球卫星研究对流层和平流层天气形成过程的可能性問題。

本书可供高空气象学和高空物理学方面的研究人員和有关业务工作者、以及高等院校有关专业的师生参考。

利用火箭和人造卫星的气象研究

[苏] К. Я. 康德拉捷夫 著

陈耀武 赵明哲 譯

*

科学出版社出版

北京朝陽門內大街117号

北京市书刊出版业营业許可証出字第061号

上海市印刷五厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1965年4月第一版

开本: 850×1168 1/32

1965年4月第一次印刷

印张: 7 9/16

印数: 0001—2,100

字数: 198,000

統一书号: 13031·2069

本社书号: 3210·13—15

定价: [科七] 1.30 元

序

近几年来，利用火箭和卫星对高层大气的气象研究得到了很大的发展。这种研究的远景将更为宏伟。毫无疑问，例如，在不久的将来，卫星将成为研究行星尺度内对流层气象状况的最有效的工具。但是，到目前为止利用火箭和卫星的气象研究所得到的大量资料，还分散在大量期刊中的许多论文里。无论是在苏联还是在外国，还没有出现编纂一本有关火箭气象研究问题的综合论著的尝试（只有在作者和 O. П. 费里波维奇（Филипович）合写的书*中总结了有关热状态问题的一些资料）。正因为如此，作者才写了本书。但为了尽可能地考虑到广大读者的需要，本书只限于概要的叙述。

必须指出，高层大气气象学的对象尚未足够明确地确定，尽管气象学的这一分支已无疑地被公认了（在国际气象学和大气物理学协会中成立了高层大气气象学专门委员会就是一个证明）。在这里，作者将把研究高层大气成分、气象状况（气压场、风速场、温度场以及其它气象要素场）和决定它们的各种因素的那一气象学分支（大气物理学）理解成高层大气气象学。本书将首先讨论低于 100 公里处的过程和现象。因为本书的目的在于总结气象研究的成果，所以其中还将讨论利用卫星研究对流层气象状况方面的问题。

作者首先简要地汇集了关于高层大气成分和结构方面的基本知识，这对于了解作者所引用的资料是必需的。

第一章讨论了作为高度稀薄气体的高层大气的基本特性。这

* E. Я. 康德拉捷夫等，高层大气热状态，中译本，科学出版社，1964 年出版——译者注。

里研究了在高层大气条件下的統計平衡定律和温度概念方面的問題。还談到了气体动力学中的若干基础知識。討論了在稀薄气体条件下流体靜力学基本方程可用范围的問題。在本章中“高层大气条件下的温度概念和統計平衡定律”和“关于連續介质和稀薄气体的靜力学方程問題”两节,是由 O. II. 費里波維奇写的。

在第二章中,在給出了研究性火箭的一般特征后,概述了現有利用火箭測定各种气象要素(压力、密度、温度、大气成分、輻射)的方法。

在第三章中專門研究了利用卫星进行气象研究的方法。在本章的前一部分,討論了測定高层大气結構参量的方法。第二部分是研究对流层和平流层气象状况的卫星气象計劃的概述。

第四章是討論高层大气成分和結構方面的主要研究結果。这里全面地討論了有关高层大气中主要气象要素場(压力、密度、温度)方面的問題。

第五章是談高层大气动力学方面的問題,其中討論了高层大气中乱流和大尺度环流运动的研究資料。

最后一章,即第六章,包括对輻射状况問題的討論。这里簡短地研究了高层大气中太阳紫外輻射和倫琴輻射的火箭研究結果,同时綜述了地气系統輻射差額的計算結果。

这样,在本书中簡要地討論了利用火箭和卫星进行气象研究的主要方法和結果。气象学的这个新領域当前正处在形成和蓬勃发展的阶段。因此有必要再次強調指出,本书中所叙述的資料有很多是初步的,并且无疑地也是不全面的。但毫无疑问,利用火箭和卫星进行的研究对高层大气气象学的发展有着决定性的意义。为了使其后发展远景变得更为明显,即便在火箭研究的初始阶段,对它做出总结也是必要的。

目 录

序.....	iii
緒論	1
第一章 作为高度稀薄气体的高层大气.....	11
§ 1. 高层大气条件下的温度概念和統計平衡定律	11
§ 2. 气体动力学的若干知識	17
§ 3. 关于連續介质和稀薄气体的靜力学方程問題	21
第二章 火箭气象測量的方法.....	24
§ 1. 研究性火箭的一般特征	24
§ 2. 压力的測定	35
§ 3. 密度的測定	41
§ 4. 温度的測定	46
§ 5. 大气成分的測定	55
§ 6. 风速和乱流的測定	65
§ 7. 太阳輻射的測定	76
第三章 利用卫星的气象研究方法.....	81
§ 1. 根据卫星制动的观测确定大气密度	81
§ 2. 利用在卫星上裝置的仪器确定大气的結構参量和成分	91
§ 3. 卫星和天气	95
§ 4. 云的电视跟踪	99
§ 5. 地气系統輻射差額的測量	111
§ 6. 大气的热探测	122
§ 7. 无綫电气象的研究	131
§ 8. 臭氧垂直分布的測量	134
第四章 高层大气成分和結構的研究	139
§ 1. 高层大气的成分	139
§ 2. 密度	146

§ 3. 压力	152
§ 4. 热状态	155
第五章 高层大气动力学	172
§ 1. 风速随高度的变化	172
§ 2. 高层大气中的乱流	182
§ 3. 高层大气环流	187
第六章 辐射	191
§ 1. 太阳的紫外辐射和倫琴射线辐射	191
§ 2. 地气系统的辐射差额	196
参考文献	208
附录 ARDC-1959 标准大气	222
附表 1 温度和压力	222
附表 2 重力加速度, 密度, 分子量	225
附表 3 均匀大气高度, 质点的浓度和速度, 碰撞频率和自由路程	229
附表 4 声速, 粘滞度, 运动学粘滞度和热导率	232
火箭型号名称中外文对照表	235
人造卫星名称中外文对照表	236

緒 論

火箭气象研究的主要目的是研究到 100 公里高空和更高处的大气結構和成分。这些問題在利用卫星进行气象研究的計劃中也占有重要地位。因为以后将經常需要有关大气結構和成分方面的知識,所以首先給出“平均的”(标准的)大气結構和成分方面現代資料的簡要輪廓。

大气最突出的特点之一是其性质(成分、結構、电的特征)的垂直不均匀性。这种不均匀性的存在表现为:大气有一定的垂直区域性,并且可以把大气分成若干各有特性的层。这种分法取决于构成划分基础的大气性质的不同。

气层特性中最明显的差別表现在温度随高度的分布上。在表 1 中給出了大气各主要气层和过渡气层的名称,这是公认的国际分类^[4]。

表 1 大气各层的名称

气 层			上界和下界的平均高度 (公里)	过 渡 层
对	流	层	0—13	对 流 层 頂
平	流	层	13—25	平 流 层 頂
中		层	25—80	中 层 頂
热		层	80—800	热 层 頂
外		层	800 以上	

也应提到的是众所周知的术语:电离层和流行不广的名詞——混成层(гомосфера)与异成层(гетеросфера)。化学成分不随高度改变的那一层大气(其厚度約为 100 公里)称作混成层。异成层是大气的其余部分(高于 100 公里),在这一层里空气的化学

成分随高度而变化。混成层和异成层的分界称作混成层顶 (гомопауза)。

近几年来，流行着把大气分成低层和高层。低层和对流层是相同的，而高层包括高于对流层的所有大气层。这种划分是以太阳在这两区域的作用所产生的差异为根据的。太阳辐射对低层大气的直接影响非常小。这种影响基本上是间接的；即归结到：地球表面吸收了太阳辐射而加热，然后通过乱流热交换，以及通过从地表面蒸发的水分在大气中凝結等方式，把热量由地面傳遞給大气。

几乎一切在高层大气中发生的、并仅为它所特有的现象正是由太阳作用所引起的。这些现象中有光离解、光电离、电流系统的产生、夜天光现象和极光等。

为了具体地描述大气的结构和成分，必須討論作为建立标准大气模式基础的一些主要原則。甚至在对流层条件下，也并非所討論的一切量全是直接測量到的（例如空气密度）。特别是在高层大气条件下。于是就出现了从一些量的測量資料来計算另一些量的問題。这种計算的基础是两个方程式：流体靜力学平衡方程（靜力学方程）和理想气体的状态方程（克拉珀龙方程）。现在来看看M. 尼古萊(Nicolet)^[1]是如何应用这两个方程式的。

认为大气是連續介质，并設符号 p 为压力， ρ 为密度， g 为重力加速度，則可把靜力学方程写成：

$$dp = -g\rho dr. \quad (1)$$

这里 r 是从所討論的高度到地心的距离。因为大气本身对重力变化的影响很小，所以得到：

$$g_0 a^2 = g r^2, \quad (2)$$

其中附标 a 表示相应量值是距离 $r=a$ 处的。

如果設 m_i 是大气第 i 种成分的分子质量， n_i 是大气第 i 种成分的质点濃度，則这种成分的密度为：

$$\rho_i = n_i m_i. \quad (3)$$

可以由下式得到空气的平均分子量 m 和空气密度 ρ ：

$$m = \frac{\sum n_i m_i}{\sum n_i}, \quad (4)$$

$$\rho = nm. \quad (5)$$

这里的求和遍及所有的大气組成成分。

下面写出理想气体状态方程式(我們注意到这个方程式在实际大气条件下是完全令人满意地成立的):

$$p = nkT, \quad (6)$$

这里 k 是玻尔兹曼常数, T 是温度。

应用(6)式和(2)式把静力学方程(1)改写成:

$$\frac{dp}{p} = \frac{dn}{n} + \frac{dT}{T} = -\frac{g_a m a^2}{kT} \frac{dr}{r^2}. \quad (7)$$

这个方程式是联系压力、温度和密度的总关系式。它对处在重力場中的足够稠密的大气是正确的(与应用本方程式的限制有关的问题将在第一章中討論,还可參見文献[1—3])。

如果大气是等温的 ($T = T_a$), 并且分子量不随高度改变 ($m = \text{常量}$), 积分(7)式便得到:

$$\frac{p}{p_a} = \frac{\rho}{\rho_a} = \frac{n}{n_a} = \exp\left[-\frac{a}{a+z} \frac{z}{H_a}\right]. \quad (8)$$

其中

$$H_a = \frac{kT}{mg_a} \quad (9)$$

是均匀大气高度(высота однородной атмосферы), $z = r - a$ 是由地面算起的垂直坐标。

在混成层中 m 为常量, 并且空气具有如下的成分: 氮为 78.088%, 氧为 20.949%, 氩为 0.934%, 二氧化碳为 0.03% (按容积計算)。这与平均分子量是相符合的 m 为 28.966^[4]。

这样, 在混成层中, 利用静力学方程和状态方程便可得到联系温度、压力、密度、均匀大气高度的简单关系式。由于分子量是个常量, 根据测定到的压力或密度的垂直分布資料, 可以很容易地算出大气中任一組成的濃度。由于同一原因, 在 H 和 T 間存在有相互单值的对应关系。

在异成层中，問題就复杂多了。在这种情况下，应用(9)式可以写出：

$$\frac{dH}{H} = \frac{dT}{T} - \frac{dm}{m} - \frac{dg}{g}. \quad (10)$$

引入符号 $\beta = \frac{dH}{dz}$ ，并考虑(10)式和(7)式，則得到

$$\frac{dp}{p} = -\frac{1}{\beta} \frac{dH}{H}, \quad (11)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dg}{g} = -\frac{1+\beta}{\beta} \frac{dH}{H}, \quad (12)$$

$$\frac{dn}{n} + \frac{dg}{g} = -\frac{1+\beta}{\beta} \frac{dH}{H} - \frac{dm}{m}. \quad (13)$$

作为例証，現在来討論 M. 尼古萊^[1] 和 D. 貝特斯(Bates)^[3] 提出的两个具体的大气模式。

如果象 M. 尼古萊^[1] 所作的那样，假定均匀大气高度的垂直梯度不变($\beta = \text{常量}$)，积分最后几个方程式便得到异成层中压力和密度随高度变化的公式：

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-\frac{1}{\beta}}, \quad (14)$$

$$\frac{\rho g}{\rho_0 g_0} = \frac{nm g}{n_0 m_0 g_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{-\frac{1+\beta}{\beta}}. \quad (15)$$

很明显，因为大气的化学成分是随高度变化的，所以并不能从压力和密度的测定值中算出大气中个别組成成分的濃度。而化学成分的变化只有通过直接实验的途径才能获得。在异成层中，也沒有温度和均匀大气高度間的单值对应关系。在这种情况下决定 H 的变量是比值 $\frac{T}{m}$ 。因此引入了分子温度的概念：

$$T_m = \frac{m_0}{m} T \quad (m_0 \cong 29),$$

在整理高层大气的密度和压力的测量結果时，广泛地应用了这一概念。但是，测定了分子态氮的濃度垂直分布，就可定出温度。因为氮的分子量大致等于空气的平均分子量，所以在这种情况下“准

混成层”的条件总是成立的。

当已知温度的垂直分布时，可以应用 D. 貝特斯得到的近似公式，算出异成层中大气各种成分的浓度随高度的变化^[3]。

引入重力位势 ζ ，

$$\zeta = \int_{z_0}^z \frac{g}{g_0} dz.$$

如果 R 是地球半径，则

$$z - z_0 = \frac{\zeta}{1 - \frac{\zeta}{R + z_0}}$$

(注意到关系式 $z = \frac{R\zeta}{R - \zeta}$, $\zeta = \frac{Rz}{R + z}$ 同样是有用的)。

假定温度和高度的关系式为：

$$T(z) = T(\infty) [1 - a \exp(-\tau \zeta)], \quad (16)$$

其中

$$a = 1 - \frac{T(z_0)}{T(\infty)}, \quad \tau = \frac{1}{T(\infty) - T(z_0)} \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=z_0}.$$

忽略掉热扩散 (термическая диффузия)，并且假定扩散平衡存在，就不难推出下面对大气第 i 种成分的浓度垂直分布的公式：

$$n_i(z) = n_i(z_0) \left[\frac{1-a}{\exp(\tau \zeta) - a} \right]^{1+c_i} \exp(\tau z). \quad (17)$$

这里的 $c_i = \frac{1-a}{\tau H_i(z_0)}$, $H_i(z_0)$ 是在 z_0 水平面处对第 i 种成分的均匀大气高度。

得到了 $n_i(z)$ ，然后可以按下述公式算出大气的密度：

$$\rho(z) = \sum m_i n_i(z). \quad (18)$$

在热层条件下，这里的求和实际上只涉及到三种成分： O ， O_2 和 N_2 。

这些就是联系到确定大气结构和成分的主要原则。现在来讨论有关标准大气结构和成分的相应具体资料。同时指出，标准大气的概念并不是足够固定的。显然，应当把能反映实际大气平均特征的大气模式当作标准大气。通常这种求平均是对整个地球表

面进行的,并且所得到的值具有多年平均的意义,因此最后結果都被整理成大气結構和其他特征与高度关系的样式。对于对流层和平流层來說,所討論特征中的大部分可以通过分析直接观测結果来得到。但是大气的更高层还研究得很不够。所以,在这种情况下,应用前面討論的和某些其他的關係式所做的計算具有重大的意义。在这种計算中,必須根据对尚沒有足够观测資料的量值(例如,在 100 公里以上的大气成分)做出各种假定。这就給标准大气結構中帶來了一定的任意性,这也就是目前存在大量标准大气方案的原因。但是,用一个模式来代替另一个模式的主要准則自然是新的、更全面的和更可靠的实验資料。在近几年来,通过卫星制动观测得到的高层大气密度的知識,就是这种实验的最重要的資料。这样得到的密度数据在量級上比以前所采用的要高,这就提醒了人們重新审查較早期的各种标准大气模式。其中,新的 ARDC-1959 年标准大气* 就是这方面进展的总结,我們将根据文献[4]中借用的資料来討論它。

在对流层中,温度随着高度而减低,温度的平均垂直梯度等于 $6.5^{\circ}/\text{公里}$ 。地表面的平均温度可取做 $T_0 = 273 \pm 20^{\circ}\text{K}$, 而它在对流层頂附近的温度最低值的高度上为 $210 \pm 20^{\circ}\text{K}$ 。对流层頂的高度是 13 ± 5 公里,自赤道向极地递减^[1]。在平流层中温度随高度緩慢增高。在中緯度平流层頂的高度为 25 公里。中层是温度极大的区域,这个温度极大值位于 50 ± 5 公里,温度为 $273 \pm 20^{\circ}\text{K}$ 。中层从 25 公里延伸到 80 公里。以温度随高度加大为特点的热层的起点是中层頂面 (85 ± 5 公里) 温度极小处,这里的温度等于 $190 \pm 25^{\circ}\text{K}$ 。

显然,大气压力是随高度单調地减小的;而且如果給定了在某初始高度的压力值,并且知道了温度的垂直分布,便不难根据压高公式求得压力(着重指出,这是对混成层讲)。此后利用状态方程式(6)不难算出随高度单調减小的密度值。

* ARDC 是美国高空研究和发展部 (Air Research and Development Command) 的縮写——譯者注。

现在来看一看高空资料的特征。在图 1 中根据不同年份的观测资料绘出了空气密度和高度的关系^[5]。图 1 中的实线是参照卫星制动观测得到的密度值画成的。这一曲线是 ARDC-1959 标准大气结构的基础。

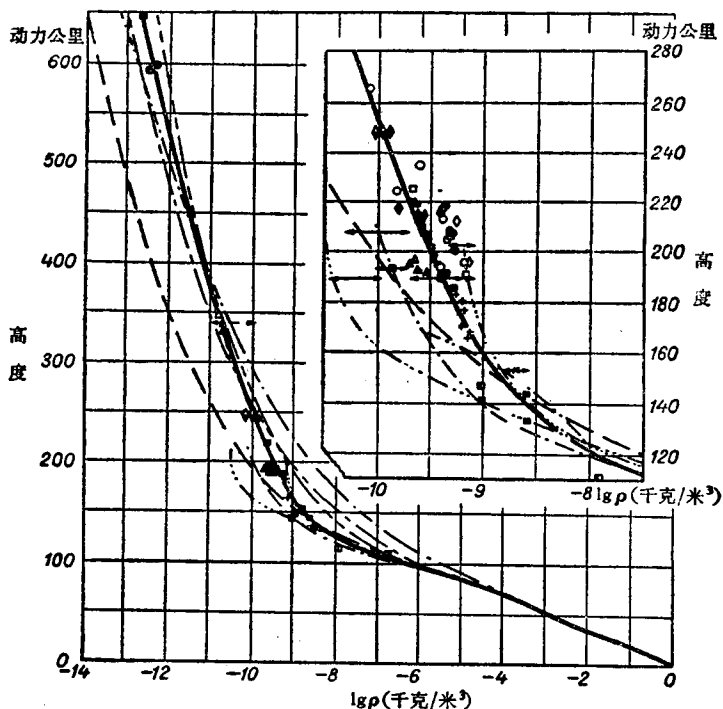


图 1 构成 ARDC-1959 标准大气模式基础的空气密度随高度的平均分布

图 1 中的点线和单个的点子是不同作者根据卫星制动或以火箭测定为基础所得到的“零星”资料。在图 1 的右上角画出了在 200 公里高空附近密度和高度关系的放大图。根据密度的垂直分布资料算出了分子温度随高度的变化。此后就不难计算大气的其他特征值。如果假设分子量随高度的变化由图 2 中给出的曲线来确定，则温度的垂直廓线具有图 3 中所给出的样式。空气压力和

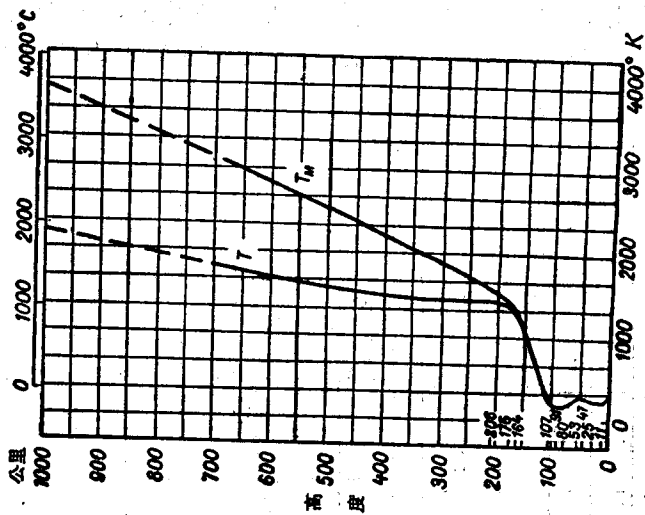


图3 温度随高度的变化

$$\left(\frac{T}{T_m} = \frac{T}{m} \right)$$

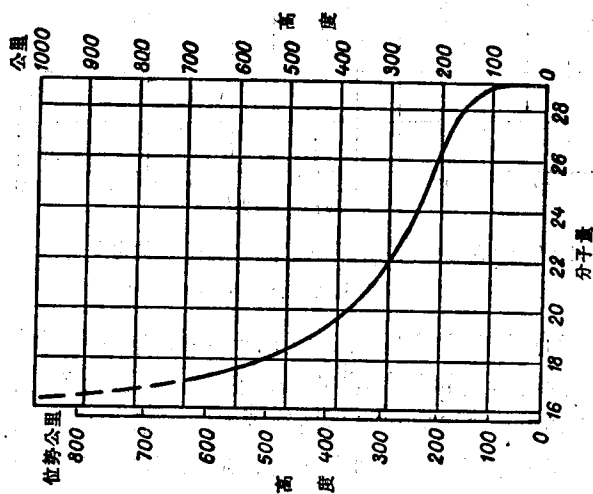


图2 分子量随高度的变化

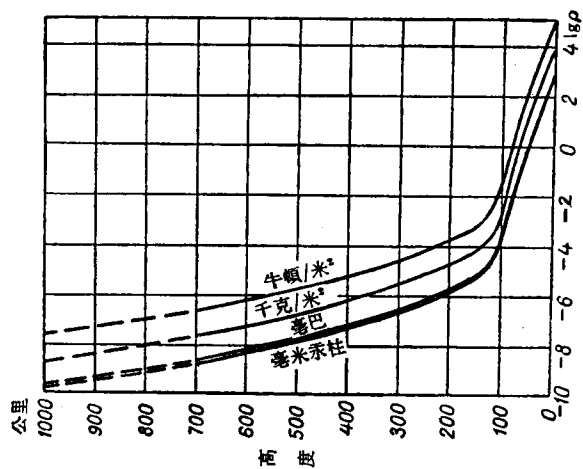


图4 压力随高度的变化

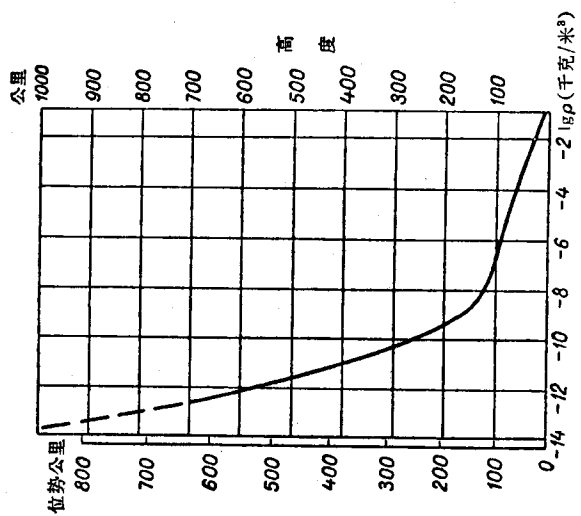


图5 密度随高度的变化

密度随高度的变化给出在图 4 和 5 中，在附录中(附表 1—4)给出了表征 ARDC-1959 标准大气所有量的全部报告。在文献 [2] 中有从前提出的标准大气的较早期的资料。

至于大气的化学成分，目前还只有些十分初步的资料。这将在第四章中讨论。

大量的地面的电离层研究发现，在大气中存在几个被电离的气层。但是在火箭和卫星上的测量彻底地改变了以前所采用的大气电结构。这些资料可以断定：在电离层中只存在一个清晰呈现出的电离极大值，它位于 F 层区域中。电离层的其余各个层次只不过是电子浓度垂直分布微结构的表现而已。

最后提示一下最近所采用的卫星术语。卫星是由发射年份和用来表示在该年中出现顺序的希腊字母来标记的。例如，第一颗和第二颗人造卫星用“1957 α ”和“1957 β ”来代表。如果在轨道上有运载火箭和其他物体(例如，保护用的圆锥体)和卫星同时存在，则它们中间的每一个都得到一个附加的号码 1, 2, 3, ...；并且第一个号码表示最明亮的物体。例如象第一颗卫星的运载火箭被标记为“1957 $\alpha 1$ ”。