

火星气象学

〔苏〕 K. Я. 康德拉捷夫 著
A. M. 布那果娃

科学出版社

火 星 气 象 学

〔苏〕 K. Я. 康德拉捷夫 著
A. M. 布那果娃

王 跃 山 译

科 学 出 版 社

1 9 7 8

内 容 简 介

本书概括了一系列自动星际站的观测结果,并在一定程度上总结了十年来人们对火星气象的分析研究。本书共三章,第一章探讨了火星大气的成分和物理特性,并阐述了火星地形的简要特征;第二章研究了从数值模拟得到的大气环流的规律性;第三章描述了散逸辐射场、行星辐射平衡概念,和通过分析辐射场资料得到的大气成分和结构的一些特点;最后探讨了今后研究的远景。

К. Я. Кондратьев, А. М. Бунакова

МЕТЕОРОЛОГИЯ МАРСА

Гидрометеониздат, 1973

火 星 气 象 学

[苏] К. Я. 康德拉捷夫 著
А. М. 布那果娃

王 跃 山 译

*

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

*

1978年11月第一版 开本: 787×1092 1/32

1978年11月第一次印刷 印张: 2 3/8

印数: 0001—12,900 字数: 47,000

统一书号: 13031·868

本社书号: 1236·13—15

定 价: 0.32 元

译 者 的 话

火星一直是人类最为关心的太阳系行星。对于火星的地形、火星的天气特点和气候特点以及火星上有无生命甚至“人类”的问题,曾经争论过一百多年。早在1877年,意大利的天文学家斯奇厄波若利(Giovanni Schiaparelli)用天文望远镜观察火星,发现了单线和双线的交织网,他认为这是火星上的“运河网”。美国天文学家罗威尔(Percival Lowell)对此也深信不移,他甚至企图证实这是“火星人类”建造的水利工程。按他们的看法,似乎火星上不是有没有“人类”的问题,而是有怎样一种“人类”的问题。这种关于火星生命的第一个猜想和假说,距今已整整一个世纪了。一个世纪以后的今天,人们已经用不着那种神秘的猜想和假说,也不再会去轻信关于“运河网”的奇谈了——所谓“运河网”,不过是火星盆地的巨大裂缝,或者是偶然排列起来的火山口,或者是堆积成线的火星尘。现在,人们完全可以凭借着自动星际站和宇宙飞船,对火星及其大气进行直接观测,从而得到许多极其宝贵的资料。K. Я. 康德拉捷夫所写的这本“火星气象学”,正是概括了一系列自动星际站的观测结果,并且在一定程度上总结了十年来人们对火星气象的分析研究。本书介绍了火星的地形、高低层大气的结构、由数值模拟得到的大气环流以及火星的辐射平衡。书中不但给出了上述问题的研究结果,而且描述了研究的依据和方法。在火星气象这一领域内,该书是一本比较系统、完整的编著。然而,本书对某些研究的细节描述过多,反而使本书的主题——火星的天气和气候特点——显得不够集中。

火星和地球有许多相似之处，火星大气可以看成是地球大气的自然模拟。因此，对火星大气的研究将进一步加深我们对地球大气的认识，提醒我们去考虑过去未曾注意的问题，启发我们更恰当地去处理那些在地球上颇为棘手的问题。

本书可供从事天气预报、大气物理、大气实验模拟以及天体物理等方面工作的人员参考。

因本书涉及领域较宽，加之译者水平有限，谬误之处在所难免，望读者批评指正。

译 者

序*

近些年来,十分注意研究离地球最近的金星和火星。研究这些行星大气和表面的地面方法(首先是红外光谱学方法和射电天文学方法)迅猛发展,使我们得到了一系列重要的结果。但是,毫无疑问,通过自动星际站序列《金星》、《火星》和《水手》所进行的研究,为认识金星和火星做出了决定性的贡献。就是说,通过在大气中释放仪器并在行星的表面着陆,实现了对结构参数和成分的直接测量,使我们对这些近地球行星的属性的看法产生了相当强烈的变化^[1-4]。其中,借助于自动星际站来实现科学研究步骤则起了十分重要的作用,这些自动星际站是在行星的人造卫星条件下工作的。这样的研究方法所具备的优点是,探测仪器环绕在研究对象的四周。

关于行星大气中和表面上现存条件的情报积累,使我们能够有计划地着手研究行星上的天气特点和气候特点。如果说在许多年以前,这种问题的提出只是在科学普及解释的范畴之内才有可能的话^[5],那末,现在已经有了相当丰富的资料,使这样一类的问题能够在足够严肃的基础上进行研究。而对这些行星的大气环流进行数值模拟的理论研究成果,也促进了这一点。

应当强调的是,对于其它行星上天气、气候规律性的研究兴趣,在很大程度上要由那样一类研究,即着眼于行星地球组的《对比气象学》方面研究的重要性来决定^[9,51-53,56,57,59]。在很多关系式中(质量、半径、密度及其它),金星、地球和火星明显

* 序略有删节。——译者注

地具有相似的特点。但是,近些年来在这些行星之间也出现了一系列本质上的差别。例如,由于通过自动星际站《金星》进行直接测量,以及通过自动星际站《水手》得到的无线电折射资料,我们对于金星的看法产生了巨大的、在不少情况下是属意外的变化。另外,金星的高温(高于 600°K)也明显地不同于地球。光谱的资料还证明,在云层以上水汽的含量极少;射电天文测量则指出,在金星的低层大气中也只有极少的水汽含量(就目前探测的情况看,金星大气中的水汽含量比地球生物圈内的小到 $1/10^3$ — $1/10^4$)。金星的另一个不同的特点是绕着自己的轴线作缓慢的旋转(方向和地球相反)。这些行星上云量的变化也很独特,如尘暴对于火星的天气就有着特别重要的意义,它有时甚至包围着火星的整个表面(如1971年末)。

地球大气和火星大气共同特点是,科里奥利力具有重大作用,并存在气象要素的年变化。主要的区别表现在:火星上没有海洋、水汽含量很少和缺乏稳定的云层。火星近表面大气的密度很小以及二氧化碳气体占优势,造成了辐射弛豫常数比地球上大约小 $9/10$ 。这表明,辐射过程作为一个决定大气环流的因素,起着特别重要的作用(这一点与金星和木星的情况正好相反)。

行星的上述区别和共同之处,使人们饶有兴趣地以《对比气象学》的观点来研究行星演变的规律性,和更加深入地研究地球大气中发生的过程,这些过程受着各种因素(动力的、辐射的、行星旋转的影响以及其它因素)复杂的相互作用的制约。其实,比如说,对于火星上的大气环流,辐射效应有着主导的意义,而对于金星和木星则是动力因素起着决定性的作用。金星和木星之间的主要差异是,金星旋转很慢,木星旋转较快。

尘暴的产生和火星大气的“辐射环流”使我们有可能研究大气中气溶胶污染对表征火星天气特点的气象状态的作用。这样一种模式的研究能激起人们更大的兴趣，去分析人类的经济活动对地球上气候的影响^[7,8]。文献[54]中指出的火星尘的“反温室效应”是，在尘暴时期火星表面变冷，并且在火星尘吸收太阳辐射的影响下使大气的温度增高。类似的现象在地球大气中也能观测到^[55]。

金星大气的研究，对于进一步研究至今了解甚少的地球热带环流有密切关系（都处在科里奥利力很小的条件下）。关于金星大气的结构特点和成分，目前还未得到完全符实的解答。例如，表面的高温以温室效应为条件这一点，不能认为是已经证明了的。这个假设要具有可靠的依据，只有在具备了大气中温度的垂直剖面资料、太阳辐射资料以及行星表面的温度场资料等才会成为可能。对于金星表面和核心的性质，目前也只有一些十分零碎的资料。正如雷达观测所表明的那样，金星的表面层是很浅薄的（它的高度在 ± 1.5 公里的范围内变动，只是在个别情况下才会出现高2.5公里的极值），并且具有典型的硅酸盐的介质常数。没有任何资料能够表明，在金星上存在着某种类于地球上的大陆和海洋。金星的大气几乎完全是由二氧化碳气体（ CO_2 ）组成的，只含有极少的 H_2O ， CO ， HCl 和 HF 的混合物（有趣的是，试图发现 H_2S ， COS ， SO_2 ， SO_3 这样的气体，但没有得到肯定的结果）。关于金星是否具有两层云幕的特点，意见十分矛盾。有关低层大气的成分（这需要周详地进行质谱仪的探测）、温度和湿度的垂直剖面这样一些资料以及风场的资料都十分缺乏，因此，妨碍我们揭示金星大气的成分和结构特点。这一切便造成了我们分析金星天气条件的困难。

在自动星际站《火星-2, 3》^[4,11]和《水手-9》^[12]卓有成效地

完成了自己的使命之后，有关火星的资料相对地显得充分多了。虽然火星气象学中的许多问题至今仍不清楚，但是，在温度、气压、云层和其它一些气象参数的分布规律中表现出来的天气基本特征，却已被相当精确地揭示出来了。正因为这一点，我们决定选择了眼前这本小册子的题目，我们的目的是，根据近年来实际探测的资料和数值模拟的结果，来分析火星上的天气特点。

行星上的天气和气候取决于太阳辐射的大小、下垫面的物理属性（和地形）、大气的成分和物理特征。火星的太阳常数已经了解得足够精确，它是 $0.85 \text{ 卡/厘米}^2 \cdot \text{分}$ 。

本书在第一章中讨论了根据自动星际站《火星-2，3》和《水手-9》的资料所得出的火星大气的成分及物理特性，同时论证了火星地形的简要特点。第二章中研究了从数值模拟得到的大气环流的规律性。第三章中描述了有关散逸辐射场、行星辐射平衡的概念，和通过分析辐射场资料得到的大气成分和结构的一些特点。最后探讨了今后研究的远景。

目 录

译者的话	iii
序	v
第一章 自动星际站《火星-2, 3》和《水手-9》的科学实验 结果	(1)
§ 1 火星的地形	(2)
§ 2 低层大气	(7)
§ 3 上层大气	(25)
第二章 根据数值模拟资料得到的大气环流	(35)
第三章 散逸辐射	(45)
§ 1 散逸辐射场和辐射平衡	(45)
§ 2 根据辐射场得到的有关大气结构的一些结果	(51)
研究的远景	(54)
参考文献	(62)

第一章 自动星际站《火星-2,3》和 《水手-9》的科学实验结果

对于在自动星际站上所实施的研究,要总结的内容是极其丰富的,其中包括电视观测、红外光谱、红外辐射、紫外光谱、射电食的测量以及空间力学方面的实验。

上述研究获得了大量有关行星表面、行星大气和行星附近宇宙空间的物理属性方面的科学情报,充分加工这些资料,并从各方面加以分析,这尚需更多的时间。现在发表的只是个初步的总结。

在这一章里,我们简要报告一下从自动星际站《火星-2,3》^[21,54](分别于1971年5月19日和28日发射)和《水手-9》^[12,73,75](1971年5月30日发射)上得到的一些主要结果。

当然,其中最重要的,是关于火星本身的情况。火星地形的研究结果,表面和土壤温度的观测资料以及大气的成分和结构,都属于这一部分的内容。

正如已经知道的,实验是在一种完全意外的气象情况下开始的:自动星际站开始工作的时候,在火星上观测到了一次强大的尘暴。根据地球上的观测,该尘暴始于9月,并在10月末达到最强。尘暴真正减弱开始于12月份的下半月,这以后大约又经过了一个月的时间才完全停止。几次大冲期间都观测到了强烈的尘暴,在这以前,从未发现过这么强的尘暴。

安装在自动星际站上的所有仪器都记录了与尘暴有关的

火星大气特性的变化.在火星的南极冠地区以及某些山区,尘暴显得相当微弱.

§1 火星的地形

为了研究火星的地形,使用了多种探测手段^[4,13-18,54,58,73]:地面无线电定位,自动星际站《火星-2,3》及《水手-9》的无线电折射测量、红外和紫外测量.火星表面的电视摄影给出了火星地形的相当漂亮的照片^[2,12,72].通过加工被火星反射的紫外辐射的测量结果,获得了大量的、十分可信的资料,使我们首先能够得到火星表面的气压场,而后(给出大气中温度的垂直梯度之后)再得到火星的地形.气压的确定是依据着这样一种事实:火星沙漠表面的反射率很小,因此,反射到太空中的辐射(特别是它的变化)能够用大气层的分子散射来确定(此时不考虑大气的含尘程度).而分子散射的强度则依赖于环境的密度.

借助于装置在自动星际站《水手-6,7》上的紫外分光计,我们从火星的太阳光照面上记录了大约400条光谱^[13].波长在1900—4300埃范围内的光谱每隔3秒钟记录一次(光谱的分辨率大约是20埃).分光计的视界($0.23^\circ \times 2.3^\circ$),在火星的边缘附近能够分辨 30×300 平方公里*的范围,对于距离最近的火星部位,则可分辨到 14×140 平方公里的范围(视界的长轴要垂直地对着太阳).

观测表明,在沙漠区域,当 $\lambda < 3500$ 埃时,辐射光谱的分布变化不大(经常观测到反射率随波长的减小而增长的现象),可见,在这种情况下光度学的属性只是极弱地依赖于波

* 此处原文为公里,有误,应为平方公里(下同).——译者注

长。因此，分析资料时我们只局限在中值为 3050 埃、间隔为 100 埃的区域之内，可以把该区域的情况看作 2600—3500 埃整个波段内的情况。反射率 R 的亮度系数的实测资料使我们能够确定米纳尔特函数中的参数，这些资料属于相角在 46° 到 91° 的范围，并且选于火星表面的四个地段，在每一地段内可以认为表面的反射率是不变的。米纳尔特函数的形式如下：

$$R = R_0 \mu_0^k \mu^{k-1} \quad (1)$$

这里， $R = \frac{\pi B}{F}$ (B ——实测亮度； F ——太阳的辐射通量)； μ_0 ， μ ——太阳光线入射角、反射角的余弦； R_0 ， k ——由观测资料来确定的参数。

火星的反射率以两个因子为条件：由公式(1)确定的表面反射率，以及大气的散射。这可以提出 $\frac{p}{4} \frac{\tau}{\mu}$ 的形式 [$p(\phi)$ ——散射的额定值，它依赖于散射角 ϕ ； τ ——大气的光学厚度]。

气压可以提出这样的形式：

$$p = \frac{p_0}{\tau_0} \tau \quad (2)$$

此处(假定大气是由二氧化碳组成的洁净大气)，当 $p_0 = 6.0$ 毫巴时， $\tau_0 = 0.032$ 。

对于波长为 3050 埃的反射率，注意到多次散射的衰减作用，我们将提出如下的表达式：

$$R = f \left\{ \left(\frac{p}{4} \right) \left(\frac{\tau}{\mu} \right) \left[\frac{1 - \exp(-\tau M)}{\tau M} + R_0 \mu_0^k \mu^{k-1} \exp(-\tau M) \right] \right\} \quad (3)$$

式中， $M = \frac{1}{\mu_0} + \frac{1}{\mu}$ ； f ——表征多次散射影响的系数，它依赖于 μ ， μ_0 ， τ 和 ϕ (在火星上，当 R_0 和 τ 很小时，它更多地依赖于 τ)。系数 f 可以用同简单情况下的精确解相比较的方法

来确定。我们考虑取 $f = 1$ 。

计算(2)和(3)得到

$$p = \frac{p_0}{\tau_0} \frac{1}{M} \ln \left[\frac{R_0 \mu_0^k \mu^{k-1} - R_A}{R - R_A} \right] \quad (4)$$

式中, $R_A = \frac{p}{4\mu M}$ 。这个公式根据已知的 $\frac{\tau_0}{p_0}$, R_0 , k 和 $p(\psi)$

可以确定 p 。

为了检验上述方法的可靠性和参数的适合程度, 使用了根据红外光谱资料独立确定的气压结果^[15]。和红外测量结果比较以后的气压资料为我们提供了研究火星地形的重要情报。根据紫外测量(337个点)的资料, 平均气压是 5.8 毫巴; 而按照红外测量的结果, 平均气压是 5.3 毫巴。它们之间的偏差可以用仪器的视界不完全一致来解释。

通过加工 1971 年 11 月 14 日至 1972 年 3 月 1 日这段时间内自动星际站《水手-9》的探测结果, 使我们得到了关于行星表面气压分布的更加丰富的资料, 这些探测结果是指被火星反射的、中心位于 3050 埃、间隔为 100 埃的波段范围内的紫外辐射(当观测距离为 3400 公里时, 自动星际站《水手-9》上改进的分光计其视界包括火星表面上 10×30 平方公里的范围)^[16]。

一直延续到 1972 年 1 月初的尘暴期间, 深厚的灰尘层对太阳辐射的散射, 给反射带来了优势的贡献。但是到了 1 月 23 日, 大气变得十分洁净, 波长为 3050 埃的光谱显得分外清晰。于是, 我们便从这一时刻起, 使用探测的反射资料来确定气压。

在尘暴条件下, 反射率能够很好地表示成公式:

$$R = \frac{p(\psi)\tilde{\omega}_0}{4} \frac{\mu_0}{\mu + \mu_0}$$

式中, $\tilde{\omega}_0$ ——单一散射的反射率。参数 $p\tilde{\omega}_0$ 在 1971 年 11 月

13 日到 1972 年 1 月 1 日的整个时期内等于 0.02。

计算值和实测值之间的偏差只发生在火星盘面边缘附近(小的 μ) 和明暗界限附近(小的 μ_0)，因为当时没有实现平面平行大气的近似。尘暴期间，在南极冠区大气最透明，在这里它的光学厚度大约为 1。

尘暴结束以后，观测条件变得和自动星际站《水手-6, 7》1969 年工作时发生的情况类似。瑞利散射成为反射率变化的主要原因，这使我们能够根据反射的强度、并使用气压的绝对量来解决确定气压的任务，其中气压的绝对量是用无线电折射测量的方法得到的，以便建立反射率和气压之间的对应关系。公式(4)中的四个参数可以根据 56 个点的资料用最小二乘法得到，而 56 个点的气压值则用无线电折射的方法加以确定。在 2.6—8.1 毫巴的气压范围内，“紫外”气压和“无线电折射”气压的均方差是 16%。

在著作[18]中绘制了南纬 50° 至北纬 20° 范围内的气压分布图。在火星的塔西斯 (Тарсис) 区域(大约西经 100° 、北纬 0°) 观测到最多的气压最大值点，明显的极小值出现在火星的黑拉斯 (Хеллас) 区域(西经 290° 、南纬 45°)。

假定高度的尺度为 10 公里，根据气压的结果我们便得到了火星的地形。在这里我们把高度的零点取在 6.1 毫巴层。火星的地形图绘在图 1 中。与电视照片进行比较以后证实了“紫外”地形的真实性。塔西斯区地形的详细剖面证明在这里存在着 0.5—9 公里的高度变化。在所有探测过的火星部分，高度的变化从不足 2 公里到超过 10 公里(根据红外探测^[73]，最大高度达到 14 公里)。这样，按照高度的变化幅度，火星的地形相当接近地球的情况。但是，缺乏海洋，存在大量类似于月球上的火山口，又构成了火星独有的地形特点。

上述结果与自动星际站《火星-2, 3》上的实测资料颇为一致。

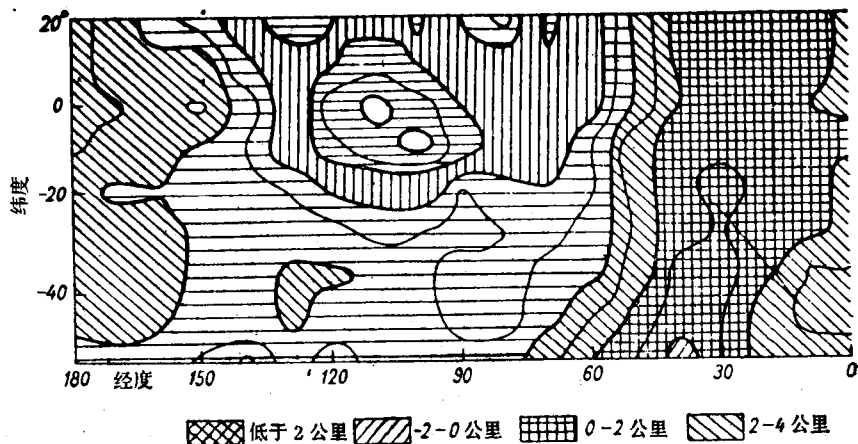


图 1 火星

致^[54]。分析红外光度计的测量结果表明,火星平均层的气压等于 5.5—6.0 毫巴,该光度计是在 2.06 微米的二氧化碳吸收带内测量的。气压在赤道区域的变化说明,在相当大的地段内存在着 12—14 公里的高度变化。分析 1972 年 2 月 16 日的资料时发现,在自动星际站运行的轨道上,例如,在黑列斯本都斯 (Хеллеспонтус) 区域高度高于平均层 2—3 公里,移到黑拉斯区域则降到中间层以下 1 公里。以后到了亚比给亚 (Япигия) 和西尔基斯·莫尔 (Сиртис Майор) 区域的黑暗部分,高度明显上升至 3 公里,而在西尔基斯·莫尔以北,高度又开始下降。

通过红外辐射计 (感应范围为 8—40 微米) 的测量,研究火星表面温度场在空间、时间上的变化特点,得出的结论是,火星土壤的导热率较小,相当于稀薄大气中的干沙或者干尘 (火星的表面在日没以后冷却得很快)。土壤的很大的热惯性和较小的导热率被波长为 3.5 厘米的无线电辐射探测所证实。探测的结果还证明,在土壤 30—50 厘米深处不存在温度的日

