

火星探测研究结果分析

史建魁, 刘振兴, 程征伟

中国科学院空间科学与应用研究中心; 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

摘要 火星是地球的近邻, 很多方面的特征与地球相似。有观点认为, 火星是地球的未来, 即地球经过长期演化, 其内部机构、地表和空间环境可能会变成火星现在的状况。因而在与地球比较的基础上, 开展火星探测和研究, 不仅对于探索火星及其空间的奥秘, 而且对于认识地球都有重要的意义。本文对空间飞行器所取得的有关火星的探测结果(包括火星内部结构和火星表面、火星大气、火星电离层和磁层, 以及太阳风与火星的相互作用等)进行了分析和概述, 内容涉及火星内部化学成分、火星岩石中的元素、火星表面地形和尘暴, 火星大气的光化学过程、火星大气的季节变化和大气中的同位素, 火星上过去全球尺度的磁场和现在的局域强磁场观测, 火星全球尺度偶极磁场的可能反转, 太阳风与火星电离层相互作用所形成的感应型磁层等科学问题。结合目前火星探测和研究的现状, 对火星研究的主要科学问题和意义进行了简单描述。

关键词 火星; 内部和地表; 大气; 电离层和磁层; 探测

中图分类号 P185.3

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.10.011

An Analysis of Results of the Mars Exploration

SHI Jiankui, LIU Zhenxing, CHENG Zhengwei

State Key Laboratory of Space Weather; Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Mars is our Earth's neighbor with many aspects very much similar to the Earth, Mars is sometimes considered as the future Earth, which means that the Earth's internal structure, surface, and space environment, may evolve in a long period, to those similar to the present Mars. Therefore, based on a comparison with the Earth, to explore and investigate Mars is important not only to the revelation of the universe mystery, but also to better understanding of our Earth. Since the 1960's, the spacecrafts have been sent to explore Mars. There were more than 40 spacecrafts (with some failures) to explore Mars and some important results were obtained in the last more than 40 years. These results help us understand Mars, such as the Martian internal structure and surface, atmosphere, ionosphere and magnetosphere, and so on. This paper analyzes the results of the exploration and investigation on Mars, including the Martian internal structure, surface, atmosphere, ionosphere, intrinsic magnetic field and magnetosphere, as well as the solar wind interaction with Mars. A brief introduction on the main scientific questions and significances of the Mars exploration and investigation is also presented.

Keywords Mars; internal and surface; atmosphere; ionosphere and magnetosphere; exploration

0 引言

火星是我们的近邻, 其特征在很多方面与我们居住的地球相似。早在 20 世纪 60 年代, 人类发射的空间飞行器就开始对火星进行全面的探测和研究, 40 多年来共发射了 40 余枚不同类型的空间飞行器(其中一部分飞行器失败), 获取了一定的科学探测资料, 使人类对火星的内部结构、表面、大气和电离层有了一定的认识。

早期的探测结果表明, 火星上有干涸的河川, 有水曾流过的痕迹, 远古时期, 火星表面大部分地区覆盖着水, 可能存在过生命。近期的探测表明, 火星的极区可能有水存在。火星表面水的消失问题是目前人们比较关注的问题之一。关于火星磁场的探测数据表明, 现在火星的内秉磁场(本底偶极场)很弱, 在火星表面只有局部磁场仍然很强, 说明在远古时期火星的内秉磁场是很强的。有观点认为, 这主要是因为火星

收稿日期: 2011-01-05; 修回日期: 2011-02-28

基金项目: 中国科学院创新方向性项目(KJCX2-YW-T13-3); 国家自然科学基金项目(41074114); 国家重点实验室专项基金项目

作者简介: 史建魁(中国科协所属全国学会个人会员登记号: S090100234M), 研究员, 研究方向为地球电离层、磁层-电离层耦合和地球与行星比较,

电子信箱: jkshi@cssar.ac.cn

的内秉磁场长期以来在一直减弱的缘故。还有观点认为,火星的内秉偶极磁场自古以来发生过反转。火星表面水域的消失可能与两种过程有关,一是水以沉积岩的形式存在于火星表面,一是火星表面的水经太阳辐射蒸发电离成为带电粒子,沿火星的磁力线逃逸出了火星大气。火星上水的消失速度,可能与火星的内秉磁场变化有关。

目前,人类已经取得的火星探测资料涉及火星磁场、火星表面和内部结构,火星大气和电离层,火星磁层以及太阳风与火星相互作用等。本文将从这些方面对火星探测研究进展综述之。

1 火星表面和内部结构

1.1 火星表面

自从望远镜发明后,人类就开始对火星表面进行光学观测。从一开始,探测火星的空间飞行器就对火星表面进行照相探测,还包括红外和雷达遥感等方面的观测。早期海盗1号(Viking-1)和海盗2号(Viking-2)飞船在火星上进行了登陆,并取得了有关火星表面成分的一些样品。近期,美国的勇气号(Spirit)火星登陆器对火星表面进行了登陆探测。欧洲空间局(ESA)的火星探测器火星快车(Mars Express)也对火星表面进行了登陆探测。

火星探测资料的初步分析结果表明,火星表面的大部分区域都覆盖着土壤,在海盗飞船的登陆点发现约7%的土壤是磁化的,表明火星表面的铁元素含量比地球上大得多。但目前仍不清楚这一结论是否在火星上具有全球代表性。图1为美国勇气号火星登陆器观测到的火星表面土壤和岩石的温度谱^[1]。

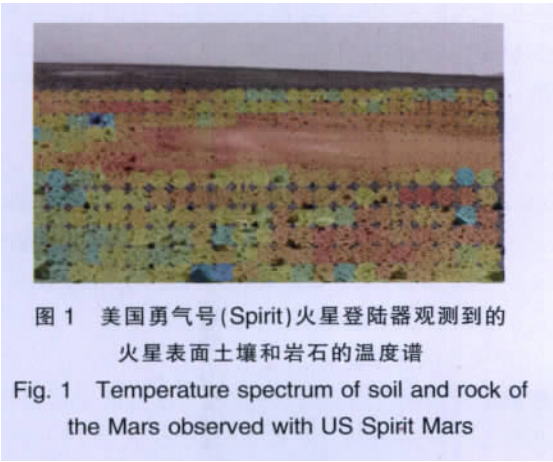


表1给出了根据Viking-1和Viking-2飞船登火星采集的不同样品进行分析得到的火星岩石组成的各化学元素含量^[2]。可以清楚地看出,在火星表面的岩石中,氧元素含量最高,其次是硅、铁、锰、钙和硫等元素。

各探测飞船对火星表面地形的探测发现,火星表面上高原的底部和顶部高差在12—14km之间^[3]。图2给出了飞船上携带的激光高度计探测到的火星表面地形图^[4],图中不同颜色代表不同的高度。火星表面分布有许多火山口,其中有一

表1 火星岩石中的元素含量

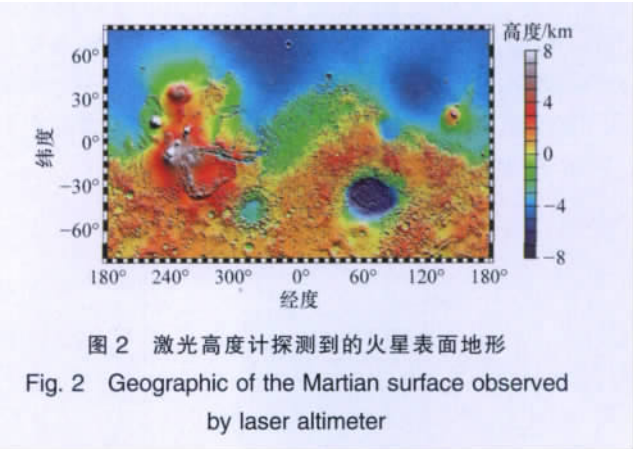
Table 1 Contents of chemical elements of rock in the Martian surface

元素/ $\%$	Viking-1			Viking-2
	样品2	样品1	样品3	
Mg	5.0 \pm 2.5	—	5.2	—
Al	3.0 \pm 0.9	—	2.9	—
Si	20.9 \pm 2.9	20.8	20.5	30.0
S	3.1 \pm 0.5	3.8	3.8	2.6
Cl	0.7 \pm 0.3	0.8	0.9	0.6
K	<0.25	0	0	0
Ca	4.0 \pm 0.8	3.8	0	0
Ti	0.5 \pm 0.3	0	0	0.61
Fe	12.7 \pm 2.0	12.6	13.1	14.2
O	50.1 \pm 4.3	49.7	—	50.4
Pb/ppm	\leq 30	—	—	\leq 30
Sr/ppm	60 \pm 30	—	—	100 \pm 40
Yi/ppm	70 \pm 30	—	—	50 \pm 30
Zr/ppm	30	—	—	30 \pm 20

个被命名为奥林帕斯的火山口高达25km。由于火星上没有海洋,高度测量不能像地球上那样以海平面为基准,而是以火星表面大气压为610Pa的位置为高度基准面。火星表面上还分布着一些大峡谷,探测还发现火星表面有水流过的痕迹。

Mars Express的高分辨率照相探测结果认为,几百万年以前,火星表面覆盖着流水、火山岩和冰^[5]。

火星探测飞船还对火星的两个卫星——火卫一(Phobos)和火卫二(Demos)进行了照相观测^[6]。这两颗火星的卫星都为马铃薯形,Phobos直径约28km,Demos直径约16km。



1.2 火星的内部结构

对火星的初步研究结果认为^[7-8],火星内部的结构与地球的内部结构类似,最中心为核,包在核周围的称为幔,最外层为壳。探测研究认为火星幔中的物质组成如表2所示。表2列举了根据不同火星探测器采集的不同样品进行估计的火星幔中各种组分的含量。可以看出,火星幔中除了Si、O、Fe和

Mg 等元素外,Ca 和 Al 元素的含量较高,而 K 和 Na 元素的含量较低。但这仅仅是一个粗略的估计。火星幔中各成分的含量,还有待于进一步探测和研究确定。

火星的核非常小,从质量上说,可能仅占火星总质量的 12%。由于火星上固有磁场非常弱,可以估计,火星的内核已经死寂,处于固体状态。90%的火星内核成分为金属物质。

表 2 火星幔中各成分含量 (m/m)

Table 2 Contents of components in the Martian mantle

氧化物/%	火星		地球
	样品 1	样品 2	
SiO ₂	41.6	40.04	45.16
TiO ₂	0.33	0.63	0.71
Al ₂ O ₃	6.39	3.14	3.54
CrO ₃	0.65	0.38	0.43
Fe ₂ O ₃	—	0.41	0.46
FeO	15.38	18.48	8.04
MnO	0.15	0.12	0.14
NiO	—	0.18	0.20
MgO	29.78	33.32	37.47
CaO	5.15	2.73	3.08
Na ₂ O	0.10	0.51	0.57
K ₂ O	0.01	0.12	0.13
P ₂ O ₅	—	0.05	0.06
Mg/(Mg+Fe)	0.77	0.67	0.89

2 火星大气

2.1 火星大气的一般状况

探测结果表明,火星大气比地球大气稀薄得多、火星表面的大气压为 5.6mbar(560Pa)、相当于地球大气 37km 高度处的压力。火星表面的温度平均约为 210K,变化范围为 140—300K,南北半球的热状况很不对称,有很大的季节变化和明显的纬度变化^[9-11]。图 3 给出火星大气的温度剖面 and 火星大气的分层情况。作为比较,图 3 同时给出了地球标准大气(1976 年)温度随高度的变化情况。

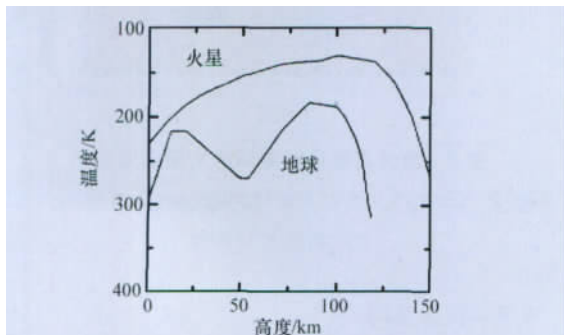


图 3 火星和地球大气温度剖面

Fig. 3 Temperature profile of the Earth and Mars

从图 3 可以看出,在火星的低层大气中(45km 以下),随着高度的增加,火星大气的温度逐渐减小;在火星的中层大

气中(45—110km)、温度基本上是不变的。在火星的高层大气(约 110km 以上,成为热层大气)中,温度随着高度的增高而增高,这与地球热层大气的温度变化是相似的。火星大气的局域性和全球性尘暴,是火星大气的特征之一,它影响火星大气的结构。灰尘能够吸收来自太阳的辐射和来自火星表面的红外辐射,使火星大气的温度增高,大气压力减小。

表 3 给出了探测获得的火星大气的成分。可以看出,火星大气的主要成分是 CO₂,占火星大气的 95.32%;其次是 N₂,占 2.7%;H₂O 含量较低,仅占 0.03%。所以,火星大气非常干燥,这是火星尘暴形成的原因之一。

表 3 火星大气成分

Table 3 Components of the Martian atmosphere

成分	含量/ppm	成分	含量/ppm
CO ₂	0.9532	H ₂ O	0.0003
N ₂	0.027	Ne	2.5
Kr	0.3	Ar	0.016
Xe	0.08	O ₂	0.0013
O ₃	0.04—0.2	CO	0.0007

Seiff、Hanel 等^[11-12]研究了三大行星到太阳的距离和各行星大气质量与行星总质量的比值、行星的表面温度与压力之间的关系。结果表明,金星、地球和火星的表面大气压和温度随着到太阳距离的减小而增加,这 3 颗行星大气总质量与各行星总质量的比值随行星到太阳距离的减小而增加。金星大气总质量与金星总质量的比值比火星大 2300 倍。这似乎是偶然的,目前还不能确切地解释这一观测现象。而最靠近太阳的行星——水星的大气却不符合上述规律,可能是因为水星到太阳的距离太近,温度很高,而水星质量又小,气体容易逃逸的缘故,从而使水星大气非常稀薄(几乎没有大气)。

金星和火星大气的成分非常相似。尽管金星大气和火星大气的演化过程和质量各不相同,但火星大气和金星大气的主要成分都是 CO₂,分别占 95.3%和 96.5%,占第二位的 N₂ 分别为 2.7%和 3.5%。哈雷彗星周围的有机尘埃成分探测发现,C 与 N₂ 之比与火星、金星大气中 C 与 N₂ 之比相同,均约为 30 倍。这些观测事实还有待进一步探测和研究。

2.2 火星大气的季节变化

探测研究结果发现,约占火星大气总质量 25%的 CO₂ 在火星极区有冷凝和升华过程^[13-15],这是火星大气中 CO₂ 变化的主要特征之一。火星极区 CO₂ 的冷凝和升华过程是由极区的辐射收支决定的。当太阳照在南极时,火星大气温度可达 300K,南极的干冰升华、向大气输入 CO₂;同时在北极,大气温度下降到 140K,大气中的 CO₂ 冷凝成干冰,使火星大气质量产生很大的季节性变化。火星大气质量的季节性变化在地球上是没有的。这种过程能产生热量、动量和微量成分沿子午线传输。CO₂ 的巨大变化将引起火星表面大气压的巨变。Viking 飞船还获得了火星表面大气压和大气温度随季节的变

化曲线。火星表面的压力在秋季初最低,在冬季初最大,在春季初有一不明显的极小值,在夏季初有一不明显的极大值。在不同纬度处,火星表面大气的温度随季节有不同的变化现象。

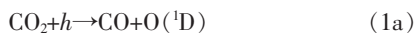
地球上水的蒸发主要发生在亚热带地区,降雨主要发生在赤道和南北半球的中纬度地区。在火星上则完全不同,蒸发主要发生在日照的火星极盖区,并能直接升华为水蒸气;而沉降主要发生在背阳面的极盖区,其中的物理输运过程目前并不很清楚。水蒸气的冷凝取决于大气的相对湿度和温度,而水汽传输取决于水蒸气的水平和垂直分布。

地球上的天文观测很早就已发现火星上存在强烈的尘暴现象。空间飞行器探测表明,火星尘暴也有明显的季节性变化。

水手 9 号 (Mariner 9) 飞行器还发现,火星上冬、夏半球有相差 100 倍的臭氧总量。

2.3 火星大气的光化学过程

由上述可知,火星大气的主要成分是 CO_2 , 其次是 N_2 、 Ar 、 H_2O 、 O_2 、 CO 和 O_3 。在火星的高层大气中(约 100km)探测到氢原子、氧原子及离子成分^[16]。火星大气光化学的核心问题是 CO_2 的稳定性, CO_2 吸收波长小于 2300Å 的紫外辐射而离解:

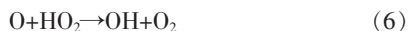


不论反应式(1)中氧原子的初始状态如何,最终的产物总是 CO 和基态 O 。 CO 与 O 的复合是自旋禁戒反应:



反应速率 $K_3 = 6.5 \times 10^{-33} e^{-2148/T} \text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$, 在温度 $T = 220\text{K}$ 时, $K_3 = 3.2 \times 10^{-37} \text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$, 该速率系数非常小。这样,如何解释火星大气中的低 CO 和 O_2 含量就成为问题,因为它们完全有可能在 10^3 年内形成。这个问题的解决在于火星大气中的 H_2O 。

H_2O 光离解产生 OH 和 $\text{H}(\text{H}_2\text{O})$, 它们催化 CO 和 O 的复合反应:



其净反应为

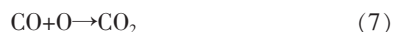


图 4 给出了包括化学循环 I 的光化学模式结果。这里有 3 点值得注意:

(1) 由于 K_3 如此之小, 以致稳定性问题是被化学循环(7)单独地建立。假如 K_3 大到 $1 \times 10^{-31} \text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$, CO 和 O 的直接复合就能解释火星大气层的 CO 和 O_2 含量, 无须引进化学循环 I。

(2) 火星大气中发现的循环 I 在地球中层和热层大气中也是重要的。

(3) 火星大气中 OH 含量仅为 $10^5 \text{mol}/\text{cm}^3$, 但通过催化反应 I, 它却对火星大气成分起着主要的控制作用, 这是光化学过程精巧和强有力的例证。

如下的反应在火星大气中也是非常重要的:



反应速率系数 $K_8 = K_{8a} + K_{8b} + K_{8c} = 8.1 \times 10^{-11}$, 它与温度无关, 误差小于 30%。但是对 (8c) 分支反应知道得很少, $K_{8c}/K_8 = 0.08 \pm 0.04$ 。此分支反应对于火星大气的演化是重要的, 因为它是 H_2 的主要来源, 而 H_2 是从火星表面到外大气层氢逃逸的主要载体(H_2O 在高空需要冷凝, 不能到达大气的顶部)。很好地了解 (8c) 分支反应能够确定氢从火星上逃逸的速率。

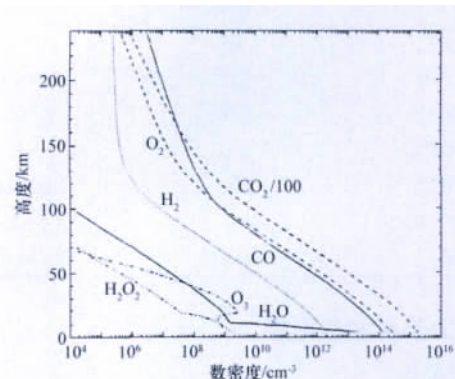


图 4 光化学模式给出的火星大气成分高度分布
Fig. 4 Distribution of components in the Martian atmosphere from a photochemistry model

与地球南极臭氧洞有关的非同相化学反应研究进展, 推动了对火星大气光化学研究的兴趣。冰晶(H_2O)能使火星大气脱氮已经得到确认。平均地说, 火星大气分子每 10^3s 与一个尘粒(以硅酸盐为主)碰撞。所发生非同相反应在火星大气中起着不容置疑的作用。其可能的反应如下:



或者尘粒作为催化剂:



在火星表面是否可能通过化学反应(9)使大量的 NO_2 耗掉的问题。由于火星上灰尘可扩展到高达 60km 大气高度, 化学反应(10)在 CO 和 CO_2 平衡中的作用如何, 这些问题只能通过一系列有关冰晶和尘粒的上述化学反应的动力学实验研究回答。

2.4 火星大气同位素

氘(D)是氢(H)的同位素, 与 H 有着近似的化学性质, 但两者质量不同。这一差别使得我们能够跟踪和检验各行星系统所处的演化状态。根据太阳系各行星 D/H 的比值, 能够估计太阳系不同部分与共同的原始大气紧密相关的程度^[15-18]。通常把太阳系中 D 含量分作 3 种类型, 即原始星云气体(HD), 有机物(HDO)和冰晶(CH_3D)。已知火星上水合硅酸盐中的水接近于地球上的 D/H 比值。从均变假说看, 在太阳系星云中所有冰晶相对于分子氢是储存体, 都以同样的因子(约 10 倍)被富集, 在木星和土星上被大量 H_2 大气稀释。它对

这两个行星没有什么影响。但在有大量岩核的行星上,同位素特征将被保留,在某些情况下,随着行星的演化,这一比值有可能进一步增加。而这种增加在火星上是很明显的,因为在火星上 H 的逃逸优于 D 的逃逸。观测表明,火星的 D/H 值比地球大气的 D/H 的值约大 6 倍,这就意味着火星表面约 99% 的水因 H 的逃逸而消失。自然,火星表面水的消失过程仍是需要研究的重大课题。表 4 给出了火星大气同位素比。

表 4 火星大气同位素比

Table 4 Ratio of isotopes in the Martian atmosphere

同位素比	地球	火星
$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	89	90 ± 5
$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$	272	170 ± 15
$^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$	489	490 ± 25
$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	5.3	5.5 ± 1.5
$^{41}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	296	300 ± 100
$^{129}\text{Xe}/^{132}\text{Xe}$	0.97	$2.5 \pm 2/-1$
D/H	1.6×10^4	$9 \pm 4 \times 10^{-4}$

3 火星的磁层和电离层

3.1 火星磁层

1965 年, Mariner 4 飞船到达离火星中心约 $3.9R_m$ (火星半径 $R_m=3390\text{km}$) 处, 第一次探测到火星磁场、等离子体和磁层顶。此后, 探测火星的空间飞行器 Mars-2、Mars-3、Mars-5 和 Phobos-2 等的探测均表明, 火星磁层顶前方有一个类似地球磁层顶的弓形激波存在, 在火星磁层和弓形激波之间有一过渡区, 且存在两个边界层; 在两个边界层内部, 行星离子起主导作用, 磁场强度达 $10\text{--}20\text{nT}$, 并且磁场有强烈的扰动^[19-21]。

Demos 飞船的观测还发现^[22], 火星弓形激波的位置在不断变化, 它到火星中心的平均距离为 $2.6R_m$, 且随太阳活动有明显的变化。在太阳活动的最大年, 火星日下点处的弓形激波位置靠近火星, 可达火星距离的 $1.5R_m$ 。火星弓形激波的位置与经度无关, 但与上游太阳风的压力有很弱的相关关系。

火星磁鞘区等离子体的主要特征是, 观测到太阳风成分 (H^+) 向火星大气成分 (主要是 O^+) 过渡的变化, 磁鞘区磁场增强, 同时也观测到弱磁场区。

空间飞行器还观测到, 火星磁层顶离火心的距离为 $1.4R_m$, 比地球磁层顶的地心相对距离小得多。

图 5 为根据 Mars-5 飞船观测资料所描绘的火星磁层顶示意图^[23]。图中磁层顶最外侧的曲线为弓激波位置, 向内是磁层顶, 图中阴影区域为磁层顶边界层。从图 5 可以看出, 火星的磁层与地球磁层相似。

Mars-2、Mars-3 和 Mars-5 飞船的观测资料表明, 火星磁尾中磁场相对较强, 且为可压缩型, 随着太阳风压力的增大, 磁场厚度减小。Phobos-2 飞船还发现, 火星背面磁场 B_x 分量显著, 且在 $2.8R_m$ 以外的火星磁尾, 行星际磁场 (IMF) 起控制作用。说明在这一区域中, 有感应磁场存在, 且仍有很弱的固有磁场。火星磁尾瓣区磁场约 14nT , B_x 分量经常变化并改

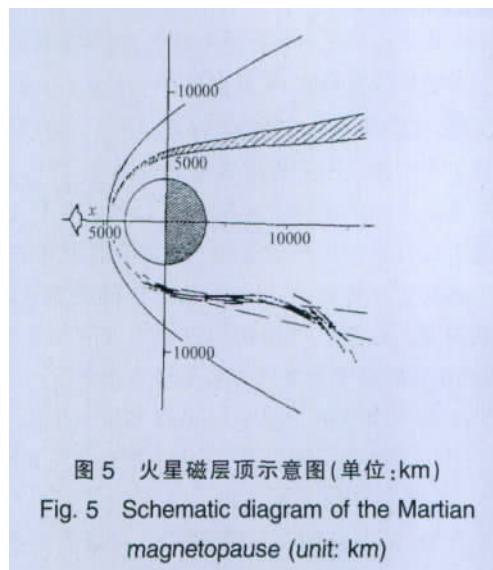


图 5 火星磁层顶示意图 (单位: km)
Fig. 5 Schematic diagram of the Martian magnetopause (unit: km)

变方向, 有时指向太阳, 有时背向太阳。对火星磁尾局地披盖角 (磁场与 x 轴的夹角)、磁尾张开角 (太阳风流与磁尾磁层顶的夹角) 与太阳风动压关系的探测资料表明, 局地披盖角和磁尾张开角随太阳风压力的增大而减小, 资料分析还表明, 在火星磁尾 $2.8R_m$ 处的张开角只有地球磁尾 $17R_e$ 处张开角的 $1/2$ 。

Phobos-2 探测飞船携带的探测仪器资料分析表明^[24], 火星的磁尾有等离子体片存在, 其中的等离子体主要来自火星电离层的 O^+ 组成, 能量为 1keV , 数密度为 1cm^{-3} 。在火星磁尾的等离子体片中, 重离子通量为 $2.5 \times 10^7 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, O^+ 的平均损失率为 $5 \times 10^{24} \text{s}^{-1}$ (相当于 $150\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), O^+ 的损失为火星大气演化的重要因素之一。有观点认为, 火星上水的消失可能与 O^+ 离子的消失有关。图 6 给出了 Phobos-2 飞船上 Aspera 仪器探测到的火星磁层夜侧 O^+ 通量分布^[25]。

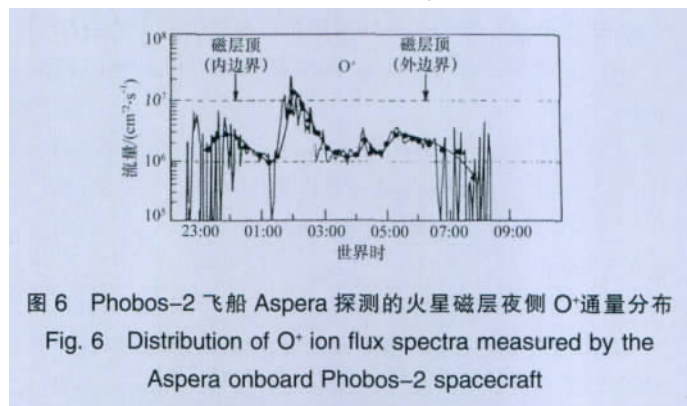


图 6 Phobos-2 飞船 Aspera 探测的火星磁层夜侧 O^+ 通量分布
Fig. 6 Distribution of O^+ ion flux spectra measured by the Aspera onboard Phobos-2 spacecraft

已有学者对火星磁层中的带电粒子分布和逃逸进行了理论研究^[26-28]。逃逸粒子包括 H^+ 离子和 O^+ 离子, 这两种离子的元素是构成水的成分。因此, 研究火星粒子逃逸对研究火星上水的消失过程具有重要意义^[29]。

火星磁尾宽度约为 $4.4R_m$, 其等离子体片宽度约为磁尾宽度的 10% , 约 1000km 。Mars Express 飞船还探测到火星上的极光现象^[30]。

Phobos-2 飞船观测到火星磁场有 $8, 12, 24\text{h}$ 的周期性扰动, 且这些扰动主要由太阳风与火星相互作用所产生, 说明

火星上的固有磁场是非常弱的。Mariner 4 飞船的观测数据分析表明,火星的磁偶极矩上界为 $2 \times 10^{13} \text{T} \cdot \text{m}^3$,此后根据火星 Mars-2、Mars-3 和 Mars-5 飞船的磁场数据,对火星磁矩的估计都偏高。1989 年以来,Phobos-2 飞船的观测数据分析表明,火星磁矩上界约为 $4 \times 10^{11} \text{T} \cdot \text{m}^3$,约比地球磁矩低 3 个量级。

MGS 飞船的探测数据表明,火星的固有磁场更弱,磁矩低于 $1 \times 10^{10} \text{T} \cdot \text{m}^3$,但火星上某些地区仍有很强的局部磁场存在。图 7 为 MGS 飞船探测到的火星表面局部强磁场^[31-33]。

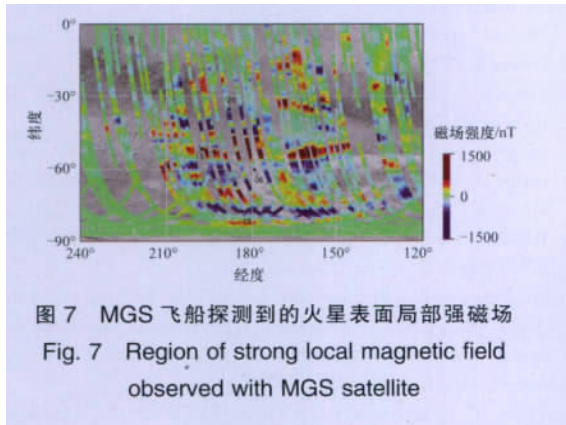


图 7 MGS 飞船探测到的火星表面局部强磁场
Fig. 7 Region of strong local magnetic field observed with MGS satellite

带电粒子运动受磁场约束。火星的内秉磁场越强,带电粒子越难逃逸出火星大气,内秉磁场越弱,带电粒子越易于逃逸。随着火星内秉磁场的减弱,带电粒子的逃逸越来越快^[28]。所以说,火星上水的消失,与火星的内秉磁场变化有关。目前,对火星磁层的观测还仅局限于某些特定情况和特殊位置观测,要认识火星磁层,还需进一步探测和研究。

Phobos-2 飞船还首先获取了火星磁层的电子密度和电场数据,在弓形激波上游探测到电子等离子体震荡现象。

3.2 火星电离层

飞船探测结果表明,火星存在电离层,但其高度较低。过去对火星电离层的了解,主要依据 Mariner 9 飞船和 Viking-1、-2 飞船提供的中性和离子成分浓度及高度剖面探测结果,之后,许多飞船都对火星电离层进行了更为详尽的探测。

早期观测结果表明,火星电离层不像地球电离层那样有着明显的 F、E、D 层结构。火星电离层适合 Chapman 型——包括分子和离子在内的光化平衡而形成的,电子密度峰值约 10^5cm^{-3} ,峰值高度约 140km,电子密度峰值和峰值出现的高度均随天顶角变化。观测还发现,在火星电离层电子密度峰值以下约 25km 处,可能存在一个电离次层。它主要由软 X 射线产生,相当于地球的电离层 E 层^[34-36]。

此后的探测结果认为,火星电离层为双层结构,峰值位于 110—130km。最近, Mars Express 飞船探测发现,火星电离层中存在第 3 层次,峰值位于 65—110km^[37]。

火星电离层中的带电粒子成分为电子、 CO_2^+ 离子、 N_2^+ 离子、 H^+ 离子和 O^+ 离子等,还有一些其他离子如 O_2^+ 离子等^[38], O_2^+ 和 O^+ 在 250km 处起动力学主导作用,在 300km 处温度可达 250K^[39]。火星夜晚侧的电离层很弱,并且多变。火星夜晚侧的磁尾等离子体片中的主要离子为来自火星电离层的 O^+ 离子。

火星电离层还受到太阳周期性变化的影响。火星上常出现大尺度、长时间的尘暴现象,对火星大气和电离层有着严重的影响。

关于火星电离层及其中的带电粒子特性问题,许多学者进行了研究,对带电粒子的分布特点有了一定的认识^[40-42]。

由于火星磁场很弱,太阳风主要是通过火星电离层与火星相互作用^[43]。太阳风与火星相互作用,使得火星电离层结构和动力学变得十分复杂,加之现有的火星飞行器轨道位置的原因,对火星电离层的观测资料很少。中国与俄罗斯合作的萤火一号将对火星的电离层进行进一步的探测。

4 火星探测的主要科学问题展望

人类虽然对火星进行了许多探测,取得了许多相关探测结果,并对火星环境有了一定的认识,但在许多方面对火星的认识还不够或者说不够清楚,需要进一步的探测和研究。探测研究的主要科学问题集中于以下方面。

(1) 探索生命存在的迹象

长期以来,人们一直认为火星上可能存在生命,甚至认为火星上存在“火星”。但随着人类发射的火星飞行器的探测成功,基本打消了火星上存在生命的想法。然而,寻找生命存在的痕迹,仍然是火星探测的目标之一。

(2) 研究火星表面水的消失过程

关于火星表面水的消失过程的理论机制问题,科学界主要有两种观点。一种观点认为,火星表面的水以沉积岩的形式存在于火星的地表以下;另一种观点认为,水通过蒸发和电离变成带电粒子,沿着火星磁力线逃逸出火星大气。关于火星表面水的消失机制问题研究,对于地球的长期演化过程研究有着重要的意义。

(3) 研究火星的大气和气候的演化过程

火星大气和气候研究也是探测火星的主要目标之一。几乎每一个火星飞行器都携带有大气探测仪器,目的是探索火星大气和气候的现状,远古时候气候和大气的状况,以及火星大气和气候长期演变的原因,对于研究火星上生命存在与消失问题同样是非常重要的。

(4) 研究火星本底磁场的长期演变

有研究表明,地球的本底磁场也在逐渐的减弱,也有可能发生反转。因而,研究火星磁场的长期演变对于研究地球磁场的长期演化,也具有的重要意义。

(5) 掌握火星的地貌和地质特征

初步探测资料分析结果是否具有对火星的全球代表性,仍然需要进一步的探测结果印证。研究火星地质和表面成分的长期演化过程,岩石与空气的相互作用,岩石与水的相互作用过程,以及火星地貌的长期变化,都对认识我们所居住的地球具有重要的科学意义。

人类开展火星探测和研究,不仅对探索宇宙的奥秘,寻找宇宙生命,研究太阳系形成和进化具有重要的科学意义,同时对研究我们居住的地球也有着非常重要的意义。国际上

还将有一些火星探测计划,对火星重力场、地表面、大气、电离层和磁层环境进行观测研究,预期会取得一些重要观测新结果。欧洲和俄罗斯正在进行模拟登火星实验,中国也参加了该实验,对于未来的登火星计划将是很好的探索。同时,中国与俄罗斯合作的萤火一号火星探测卫星即将飞向火星,对火星空间进行深入的探测和研究,预期取得有关火星的大气、电离层、磁层以及太阳风与火星的相互作用等有关火星环境的重要的探测数据,为人类认识火星发挥重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Hurowitz J A. In situ and experimental evidence for acidic weathering of rocks and soils on Mars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, E02S19, doi: 10.1029/2005JE002515.
- [2] Toulmin III P. K, Baird A K, Clark B C, et al. Geochemical and Mineralogical Interpretation of the Viking inorganic chemical results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(28): 4625-4634.
- [3] Wu S S C, Schafer F J. Photogrammetry of the Viking lander imagery[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1982, 48: 803-816.
- [4] Johnson J R. Spectrophotometric properties of materials observed by Pancam on the Mars Exploration Rovers: 1. Spirit [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, E02S14, doi: 10.1029/2005JE002494.
- [5] Baker V. Picturing a recently active Mars [J]. *Nature*, 2005, 434(7031): 280-283.
- [6] Bell J F. Solar eclipses of Phobos and Deimos observed from the surface of Mars[J]. *Nature*, 2005, 436(7047): 55-57.
- [7] Binder A B. Internal structure of Mars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(12): 3110-3118.
- [8] Binder A B, Davis D R. Internal structure of Mars [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1973, 7(4): 477-485.
- [9] Owen T, Biemann K. The composition of the atmosphere at the surface of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(28): 4635-4639.
- [10] Barth C A. The atmosphere of Mars [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1974, 2: 333-367.
- [11] Seiff A. Structure of the atmospheres of Mars and Venus below 100 km [J]. *Advances in Space Research*, 1987, 7(12): 5-16.
- [12] Hanel R, Conrath B. Investigation of the Martian environment by infrared spectroscopy on Mariner 9[J]. *Icarus*, 1972, 17(2): 423-442.
- [13] James P B. The Martian hydrologic cycle: Effects of CO₂ mass flux on global water distribution[J]. *Icarus*, 1985, 64(2): 249-264.
- [14] Jakosky B M. The role of seasonal reservoirs in the Mars water cycle: I. Seasonal exchange of water with the regolith[J]. *Icarus*, 1983, 55(1): 1-18.
- [15] Levine J S. Photochemistry of the atmospheres[M]. New York: New York Academic Press, 1974: 337-348.
- [16] Owen T, Maillard J P. Deuterium on Mars: The abundance of HDO and the value of D/H[J]. *Science*, 1988, 240(4860): 1767.
- [17] Nier A O, McElroy M B. Composition and structure of Mars' upper atmosphere: Results from the neutral mass spectrometers on Viking 1 and 2[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(28): 4341-4349.
- [18] Biemann K, Owen T. The atmosphere of Mars near the surface: Isotope ratios and upper Limits on noble gases [J]. *Science*, 1976, 194(4260): 76-78.
- [19] Gringauz K I. A comparison of the magnetosphere of Mars, Venus and the Earth[J]. *Advances in Space Research*, 1981, 1(1): 5-24.
- [20] Dolginov S S, L N Zhuzgov. The magnetic field and the magnetosphere of the planet Mars [J]. *Planetary and Space Science*, 1991, 39(11): 1493-1510.
- [21] Russel C T. The magnetic field of Mars: Mars 3 evidence reexamined[J]. *Geophysical Research Letters*, 1978, 5(1): 81-84.
- [22] Riedler W, Schwingenschuh K, Lichtenegger H, et al. Interaction of the solar wind with the planet Mars: Phobos 2 magnetic field observation[J]. *Planetary and Space Science*, 1991, 39(1-2): 75-81.
- [23] Gringauz K I. What was known about the Martian magnetosphere before Phobos-2 mission[J]. *Planetary and Space Science*, 1991, 39(1-2): 73-74.
- [24] Verigin M, Vignes D, Crider D, et al. Martian obstacle and bow shock: Origins of boundaries anisotropy[J]. *Advances in Space Research*, 2004, 33(12): 2222-2227.
- [25] Lundin R, Barabash S, Andersson H. First measurement of the ionospheric plasma escape from Mar[J]. *Nature*, 1989, 341: 609-612.
- [26] Verigin M I, Gringauz K I, Shutte N M, et al. On the possible source of the ionization in the nighttime Martian ionosphere: Phobos-2 HARP electron spectrometer measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(11): 19307-19313.
- [27] Haider S A. O⁺ escape in the polar ion exosphere of Mars [J]. *Advances in Space Research*, 1995, 16(6): 49-55.
- [28] Shi J K, Liu Z X, Torkar K, et al. Study on the O⁺ ion distribution and escape in Martian atmosphere [J]. *Advances in Geosciences*, 2010, 19: 251-256.
- [29] 史建魁, 刘振兴. 火星探测的科学意义 [M]//2004 科学发展报告. 北京: 科学出版社, 2004: 139-144.
Shi Jiankui Liu Zhenxing. The significance of Mars exploration[M]//2004 Report on Science Progress. Beijing: Science Press, 2004: 139-144.
- [30] Bertaux J L, Leblanc F, Witasse O, et al. Discovery of an aurora on Mars[J]. *Nature*, 2005, 435: 790-794.
- [31] Acuña M H, Connerney J, Wasilewski P, et al. Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars global surveyor mission[J]. *Science*, 1998, 279(5357): 1676-1680.
- [32] Acuña M H, Connerney J, Wasilewski P, et al. Magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(E10): 23403-23408.
- [33] Connerney J E P, Acuña M H, Wasilewski P J, et al. The global magnetic field of Mars and implications for crustal evolution [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(21): 4015-4018.
- [34] Glassmeier K H, Musmann G, Vocks C, et al. Mars-A planet in magnetic transition[J]. *Planetary and Space Science*, 2000, 48(12-14): 1153-1159.
- [35] 吕保维, 叶永恒, 刘振兴. 空间物理学进展: 第 3 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Lu Baowei, Ip W-H, Liu Zhengxing. Advances in space physics: Volume 3[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [36] Lundin R, Barabash S, Andersson H. Solar wind-induced atmospheric erosion at Mars: first results from Aspera-3 on Mars Express [J]. *Science*, 2004, 305(5692): 1933-1936.
- [37] Pätzold M, Tellmann S, Häusler B, et al. A sporadic third layer in the ionosphere of Mars[J]. *Science*, 2005, 310(5749): 837-839.
- [38] Kallio A E, Fedorov A, Budnik E, et al. On the properties of O⁺ and O₂⁺ ions in a hybrid model and in Mars Express IMA/Aspera-3 data: A case study[J]. *Planetary and Space Science*, 2008, 56(9): 1204-1213.
- [39] Hanson W B, Mantas G P. Viking electron temperature measurements: Evidence for a magnetic field in the Martian ionosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(A7): 7538-7544.
- [40] Wang J S, Nielsen E. Wavelike structures in the Martian topside ionosphere observed by Mars global surveyor[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(E7): 5078-5083.
- [41] Zhang M H G, Luhmann J G. Comparison of peak ionosphere pressures at Mars and Venus with incident solar wind dynamic pressure [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(A2): 1017-1025.
- [42] Zou H, Wang J S, Nielsen E. Effect of the seasonal variations in the lower atmosphere on the altitude of the ionospheric main peak at Mars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(A9): 9311-9318.
- [43] 刘振兴, 等. 太空物理学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
Liu Zhenxing et al. Space physics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005.

(责任编辑 朱宇)