

火星及其环境

欧阳自远¹, 肖福根²

(1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵阳 550002; 2. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 火星环境类似于地球, 而探索其生命存在是重大的科学任务。在火星探测中, 对火星及其环境的了解与研究是重要的任务目标, 事关探测任务的成功实施。文章对国外火星探测已发布的成果进行收集和整理, 其中包含大量的相关数据。这些知识和数据是火星探测任务设计的输入条件, 可为我国火星探测计划的制定提供参考依据。

关键词: 火星环境; 火星探测; 火星着陆器; 火星车; 火星重力场; 火星地面形貌

中图分类号: V476.6; V529.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)06-0591-11

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.06.001

0 引言

从距离太阳由近至远的角度而言, 火星是太阳系中第 4 个行星。火星轨道的外侧邻近的是小行星带和木星, 内侧最靠近它的行星是地球。由于火星与地球的某些物理特性类似以及其独特的地形地貌, 引起了人类对火星探测的浓厚兴趣。迄今为止, 人类执行了 40 多次火星飞行探测任务, 取得了大量的探测成果^[1]。

火星究竟是一颗什么样的星球? 有许多出版物结合火星探测的成果系统地介绍了火星。美国 NASA 于 1969 年出版的《火星之书》(The Book of Mars) 综合地介绍了火星, 书中列出了大量的火星数据, 是火星探测实施初期的指南。美国普林斯顿大学于 1976 年出版了《火星地质学》(The Geology of Mars), 书中收集了“水手九号”探测任务的成果。美国海军天文观测台于 1980 年发布的《美国天文年历和航海年历》(American Ephemeris and Nautical Almanac) 列出了火星特性数据。美国地球物理学研究期刊《Journal of Geophysical Research》不定期地刊载火星飞行探测及地面研究成果。

作者通过资料调研, 将收集到的火星及其环境数据整理出来, 以供从事火星探测的科研人员作参考。

1 火星周边的小游星及火星的卫星

1) 小游星

在火星和木星之间的星际空间中, 即在距太阳 2.8 AU 处约有 500 000 块岩石绕太阳旋转, 其中尺寸最大的是直径 1 000 km 的 Ceres 小行星, 最小的只有沙粒般大小。

2) 火星的卫星

火星有 2 颗卫星——Phobos 和 Deimos, 它们的特性参数如表 1 所示^[2]。Phobos 距离火星约 9 300 km, Deimos 距离火星约 23 500 km。当火星自转时, 这 2 个卫星也以相同的方向绕火星旋转。

Phobos 卫星的轨道正好位于火星洛希极限 (Roche limit: 指卫星运行轨道与主星之间的理论临界距离, 此处卫星是火星, 主星是太阳) 的外侧、静止轨道 (类似于地球静止轨道) 的内侧。站在火星表面可以看到 Phobos 从西边升起、又从东边降落, 在轨道上其几何形状对火星的阴影角为 12'

(而月球-地球的阴影角为 30')。探测发现 Phobos 的表面坑化严重, 有两个最大的坑: Stickney 和 Hall 坑, 它们的直径分别为 10 km 和 5 km。

Deimos 卫星的轨道正好在静止轨道的外侧, 其表面也坑化严重。有证据表明这两颗卫星上存在约 5 km 厚的风化层。

收稿日期: 2012-10-31; 修回日期: 2012-11-02

作者简介: 欧阳自远 (1935—), 男, 中国科学院院士, 绕月探测工程首席科学家, 月球探测领导小组高级顾问。联系电话: (010) 64865834。

表1 Phobos 和 Deimos 的特性参数
Table 1 Characteristic parameters of Phobos and Deimos

参数名称	Phobos	Deimos
轨道半主轴/km	9 378 ($2.76 R_M$)	23 459 ($6.90 R_M$)
轨道偏心率	0.015	0.000 52
轨道倾角/(°)	1.02	1.82
轨道周期	7 h 39 min 13.85 s	30 h 17 min 54.87 s
星体	最长轴/km	13.5
几何	中间轴/km	10.7
参数	最短轴/km	9.6
	密度/(g·cm ⁻³)	1.9
	质量/kg	9.8×10^{15}
	反照率	0.05
	表面重力加速度/ (cm·s ⁻²)	1.0
		0.5

注: R_M 为火星半径。

2 火星的组成及特性参数

2.1 火星的结构

火星的内部构造主要由火星壳、火星幔和火星核组成。火星壳位于火星结构的最外层, 其厚度约为 10~50 km。火星核位于火星结构最内层, 其半径约为 1 500 km, 是一个由铁、镍成分构成的核。火星幔位于火星壳和火星核之间, 其厚度或深度达 2 000 km, 靠近火星壳一端主要由橄榄石、辉石、石榴石等组成; 靠近火星核一端主要由尖晶石、镁铁榴石等组成。基于火星表面的火山喷发特征, 认为火星核曾经为熔化状态。根据火山喷发特征这个证据, 有人对火星内核的尺寸进行了估算: 在半径小于 $0.4R_M$ (R_M 为火星半径) 的区域为纯 Fe 内核; 在半径大于 $0.4R_M$ 且小于 $0.6R_M$ 的区域为纯 FeS 层。火星的形状中心或轮廓中心位于 (272°W , 62°S) 点, 偏离其质心位置 2.5 km。

2.2 火星重力场

火星的质量为 6.578×10^{23} kg, 约为地球质量的 11%。火星表面的平均重力加速度为 $372.52 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-2}$, 相当于地球表面平均重力加速度的 38%。和其他行星一样, 火星的质量分布也存在不均匀现象, 由此导致火星重力场的异常, 这种异常对火星轨道上飞行航天器的控制来说是一个扰动。为此, 需要开展火星重力场的研究。

行星重力场的描述模型常用球谐函数表示, 而阶数为 12×12 的火星重力场模型曾发表于《Journal of Geophysics Research》杂志^[3]。

表2列出了阶数为 6×6 的火星重力场归一化球谐函数的系数。除了非常特殊的场合需要用到其他系数之外, 一般情况只需用到 C_{20} 和 C_{22} 两个系数。

表2 火星重力场归一化球谐函数的系数
Table 2 Coefficients of normalized spherical functions for the Mars' gravity field

n	m	$C_{nm}/\times 10^{-7}$	$S_{nm}/\times 10^{-7}$
2	0	-8 746±2	—
2	2	-850±3	497±2
3	0	-126±9	—
3	1	34±3	243±6
3	2	-157±3	80±3
3	3	352±4	250±4
4	0	61±3	—
4	1	44±3	33±4
4	2	-9±2	-88±3
4	3	68±2	-1±3
4	4	-2±4	-121±5
5	0	-23±4	—
5	1	-2±4	25±3
5	2	-44±3	-7±4
5	3	30±3	0±3
5	4	-48±6	-36±4
5	5	-50±6	31±5
6	0	20±6	—
6	1	24±4	-1±4
6	2	14±5	20±3
6	3	9±4	-7±4
6	4	23±4	31±5
6	5	21±5	2±6
6	6	28±5	2±5

注: 非归一化的 $C_{20}=(-1.955 7 \pm 0.000 4) \times 10^{-3}$

2.3 火星的物理参数

地球至太阳的距离为 1.5×10^8 km, 称之为一个天文单位 (AU); 而火星至太阳的距离为 2.49×10^8 km。火星自转 1 周的时间是 24 h 37 min, 其轨道面和赤道面的夹角是 $25^\circ 11'$, 有一个类似于地球的内部构造^[1]。

火星及其轨道的特性参数分别见表 3^[4] 和表 4^[4]。

表3 火星的特性参数
Table 3 Characteristic parameters of the Mars

参数名称	数 值	
火星半径/km	赤道半径	3 397.2
	极地半径	3 375.5
与太阳的质量比	3.23×10^{-7}	
平均密度/(g·cm ⁻³)	3.933	
表面重力加速度/(cm·s ⁻²)	372.52	
逃逸速度/(km·s ⁻¹)	5.024	
扁 率	运动扁率	0.005 22
	光学扁率	0.006 12

续表 3

参数名称		数值
引力常数 $GM/(km^3 \cdot s^{-2})$		42 828.32
球谐系数 J_2		0.00196
惯性矩因子 I/MR^2		0.365
磁偶极矩/(G·cm ³)		小于 10^{22}
旋转轴	赤经	317.340 ± 0.003
方向/(°)	赤纬	57.710 ± 0.002
法向反照率		0.1~0.4
表面极限温度/K		130~300
表面大气压力/kPa		0.59~1.5

表 4 火星轨道特性参数

Table 4 Orbit parameters of the Mars

参数名称		数值
轨道的平均半主轴/km		2.2794×10^8
轨道的近日点距离/km		2.0665×10^8
轨道的远日点距离/km		2.4918×10^8
轨道的偏心率		0.093387
轨道倾角		$1^{\circ}50'59.28''$
平均轨道速度/(km·s ⁻¹)		24.129
恒星年(指绕太阳转1周)/d		686.97964
恒星日(指自转1周)		24h37min
太阳日(solar day)		24h39min35.238s
地球与火星会合周期/d (synodic period)		779.94657
旋转轴的倾斜角/(°)		25
近日点与春分点之间的经度/(°)		253
地球-火星冲的 距离/km	最大	1.01×10^8
	最小	5.6×10^7

太阳、地球与火星在空间的相对位置关系是变化的, 从一个太阳冲(opposition)到另一个太阳冲, 将影响探测器的发射窗口。所谓太阳冲是指地球位于太阳与火星连线之间; 所谓太阳合是指太阳位于地球与火星连线之间。

另外还需要强调的是: 由于火星存在以 10^5 年为周期的振荡, 旋转轴的倾斜角和轨道偏心率在整个地质时期发生了很大变化, 倾斜角的变化范围为 $10.8^{\circ} \sim 38^{\circ}$; 轨道偏心率的变化范围为 0.004~0.141。表 4 中旋转轴倾斜角和轨道偏心率的数据给出的参照时间为 1980 年左右。

3 火星表面形貌特征

火星表面严重坑化, 形貌特征的多样性很丰富, 有高山、峡谷、大坑、小坑、盾形火山、河床、平地等, 起伏跌宕, 变化很大; 表面严重风化, 有各种沙丘; 另外还有独特的极地形貌。

火星的南北半球形貌特征有很大差异, 北半球地势比较平坦, 南半球地势变化巨大, 绝大多数形

貌特征分布在南半球。在火星的赤道南北附近, 地势更加陡峭, 巨大凸起的形貌特征多聚集在该区域。

3.1 火星坑及坑地形

火星表面有大量的火星坑, 在南北半球的分布很不均匀: 南半球的 2/3 区域坑化严重, 绝大多数大坑集中分布在南半球; 而北半球的火星坑较少, 其 1/3 区域上的火星坑相对较浅, 意味着这些火星坑比较年轻。火星的多坑形貌特征, 主要归因于撞击、火山和与水冰活动相关等各个过程相互作用的结果。火星坑不如月球坑那样陡峭, 但相当丰满, 意味着在火星上存在严重的风侵蚀。

1) 南半球火星坑的特征

火星上最大的撞击坑是位于南半球的 Hellas Planitia 盆地, 其中心位于 (290° W, 40° S)。该盆地的直径为 1600 km, 平均深度为 6 km, 最低点深度达 10 km 之多。Hellas Planitia 的形状近似为一个圆形, 无疑是一个撞击原始坑, 可能由于风蚀原因, 有些特征已严重退化。位于南半球 (40° W, 50° S) 点处有一个大型撞击坑即 Argyre Planitia 盆地, 其特征类似于 Hellas Planitia 盆地。

另外, 还有许多中型(直径小于 100 km)的火星坑, 这些坑具有比较独特的特征。可以看到这些坑上有喷射物覆盖层, 而这些喷射物明显不同于月球或水星上的。喷射物覆盖层为层状结构, 每层的外边缘都有凸起的壁垒或山脊, 称其为壁垒坑。这些壁垒坑的形成原因是坑形成之后喷射物呈径向喷射流出所致, 或可能是由火星表面冰或永久冻结带溶化后水冲刷所致。表 5 列出了已编号的坑径小于 1 km 的部分火星坑^[5]。

严重坑化的南半球形貌已演变成混乱无序的、锐蚀的、多丘陵的地形。表面分布着大量无规则形状的、拥挤不堪的凸起石堆, 如图 1 所示。据当前理论推断, 混乱无序的地形可能是次表面冰层融化之后地面发生塌陷所致。

在坑致密的高地和坑稀疏的洼地的交界处有锐蚀地形, 在锐蚀地形和坑稀少的平地之间的过渡区可以看到丘陵地形。有人认为这种形貌特征的成因是火星尘的风蚀作用所导致的复杂凸起。

表5 坑径小于1km的部分火星坑及其估计年龄
Table 5 A list of Martian craters with a diameter less than 1 km and their estimated ages

坑名	编号	坑的估计年龄/亿年		
		最小值	最可能值	最大值
Lunae Planum	2400	17	35	38
Chryse Planitia	2100	12	30	38
Sinai Planum	970	4	14	30
Hellas Planitia	2640	29	38	39
Mare Acidalium	830	2	12	17
Amazonis Planitia	1940	10	28	37
Noachis	1740	9	25	36
Hesperia Planum	2710	30	39	39
Utopia Planitia	1270	6	18	23
Syrtis Planitia	2053	12	29	37



图1 火星混乱无序的表面形貌
Fig. 1 Irregular terrain of the Martian surface

2) 北半球火星坑的特征

除了北半球赤道附近有显著的形貌特征之外，其他北纬地区地势平坦，火星坑相对较少。在北纬 $30^{\circ}\sim70^{\circ}$ 地区发现了一种奇特的形貌特征，即圆台式的火星坑。该类火星坑一般由一个不高的近似圆形平台所包围，据认为是坑的平台因受到喷射物覆盖层的保护而不被风蚀的结果。在北半球地区到处可看到这种形貌特征，它们相当古老，约有30亿~40亿年的历史。

3) 火星坑的分布统计

坑的分布与其尺寸相关。图2所示的是一个双统计模式的坑分布，图中的直线代表的是直径大于5km的坑分布，折线代表的是直径较小的坑分布。图3所示的是“海盗一号”和“海盗二号”着陆场的凸起石堆统计分布^[6]。

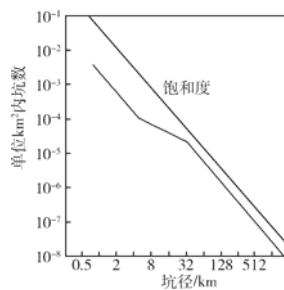
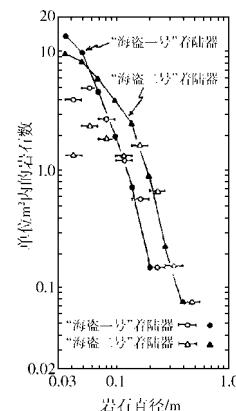
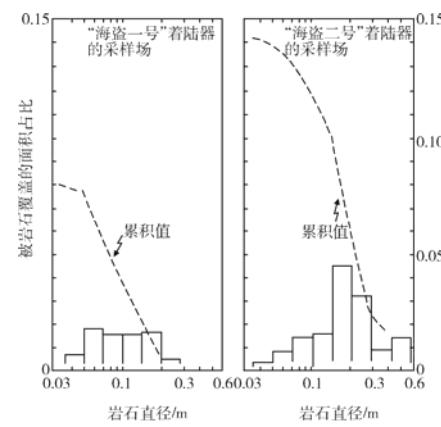


图2 火星坑的双统计模式分布
Fig. 2 Bimodal crater distributions on the Mars



(a) 岩石大小的分布



(b) 被岩石覆盖的面积占比

图3 “海盗一号、二号”着陆场采样区的岩石尺寸分布
Fig. 3 Distributions of rocks in sampling field of Viking-1 and Viking-2 landing sites

3.2 高地/山和峡谷^[5]

1) 高地/山

与地球相比，目前的火星处于地震不活动期，但仍看到大量的地质证据证明火星过去的地质活动情况，最明显的证据是高地。其中最著名的是中心位于($101^{\circ}\text{W}, 14^{\circ}\text{S}$)点处的Tharsis Bulge高地，其面积约占据着整个火星表面的 $1/4$ ，近似圆形特征，高地的最高点达11km(高于火星地平面)。在高地的顶端可以看到大量的大型盾形火山，其周围是呈放射状的断层。这些断层也保留着火星最古老的地质信息，由此可以推断Tharsis Bulge高地是形成于火星地质年代的早期。另一个著名的高地是Elysium Bulge高地。

2) 峡谷

峡谷是火星表面的另一个显著特征。在赤道区域有一巨大的峡谷即Valles Marineris大峡谷，非常陡峭，从Tharsis Bulge高地的脚下向南延伸，长度达4500km，宽度达600km，深度为7km之多。

峡谷中有断层悬崖, 但没有侵蚀堆积物, 似乎可以证明峡谷的形成与地质断层作用相关, 或与 Tharsis Bulge 高地的形成相关。

3.3 火山^[5]

火星上有许多火山特征。大型盾形火山主要聚集在 Tharsis Bulge 高地和 Elysium Bulge 高地。其中最大的火山为位于 (133°W , 18°N) 的 Olympus Mons 火山, 其宽度达 $500\sim 600\text{ km}$, 高度比周围的平原高出 22 km , 比火星地平面高出 27 km 。在 Tharsis Bulge 高地还有 Arisia Mons、Pavonis Mons 和 Ascraeus Mons 3 个大型盾形火山, 它们的平均高度约为 6 km , 平均直径约为 700 km 。

而在 Elysium Bulge 高地上也有 Elysium Mons、Hecates Thalus 和 Albor Thalus 3 座火山, 其中最大的火山为 Elysium Mons, 高度为 14 km , 宽度为 170 km , 其侧面非常陡峭 (斜坡角度达到 $78^{\circ}\sim 80^{\circ}$)。

3.4 河道

火星表面可看见许多河道形貌, 似有河流冲刷的痕迹, 如图 4 所示。河道特征主要有锐蚀、溢流和冲刷 3 种。这些河道的形成原因可能是地质断层, 或火山熔岩流、风蚀, 或者火星过去某个时期出现了异常的气候条件等引起。

锐蚀河道是一些弯曲的平底型河谷或流域, 绝大多数分布在两个纬度带: 40°N 和 45°S , 这些河道在每个纬度带的占宽约为 25° 。溢流河道的横截面呈 V 字形特征, 河道的起始段较窄又浅, 下游区的宽度和深度都明显加大, 几乎都分布在多坑地形区域, 并交织在一起形成一个河道网络。冲刷河道分布在混乱无序地形的区域, 似乎是特大洪涝灾害冲刷的结果, 河道非常深, 其宽度通常达数十 km , 长度达数百 km 。

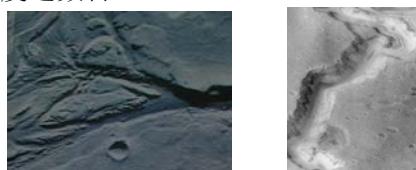


图 4 火星表面的河道特征
Fig. 4 The riverways on the Martian surface

3.5 沙丘特征

众所周知火星每年都发生大型尘暴, 在火星风的冲刷作用下, 形成了大量的沙丘, 如图 5 所示。有一条近乎连续的沙丘带围绕北极; 而在南极也有

沙丘, 只是这些沙丘被局限在大坑内。关于火星上沙子及沙丘的形成机制至今未搞清楚, 有人推断火星沙子的成因是细细的岩屑, 因为火星表面分布了一层薄薄的细岩屑 (厚度仅有数 mm 至数 cm), 这些岩屑不断地被吹起又沉降, 形成了沙丘。但在“海盗号”的着陆场看到了另一种奇特的现象: 被风吹起的沙尘沉降后没有形成沙丘。这说明火星沙丘形成机制非常复杂。

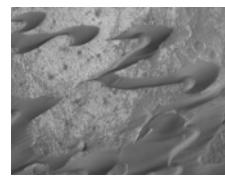


图 5 火星表面沙丘分布
Fig. 5 Distribution of sand hills on the Martian surface

3.6 火星极地形貌^[7]

1) 两极极冠

在地球上借助天文望远镜可以看到火星两极的极冠, 两个极冠是不对称的而且也是动态变化的。北极冠最大时, 向南延伸至 $50^{\circ}\sim 64^{\circ}\text{N}$, 最小时底界为 87°N ; 南极冠最大时向北延伸至 40°S , 春季又快速向南撤退, 夏季几乎消失。两个极冠不一样的原因可能是它们的物质构成: 南极冠可能是干冰 (CO_2), 北极冠可能是水冰和干冰的混合物。引起两个极冠不同的动态变化的原因可能有多重因素, 包括: 由于火星轨道的偏心, 致使南半球夏至与近日点的靠近交汇, 引起南半球的太阳照度增加; 在南半球夏季期间, 因大规模的尘暴活动而产生了大气等温剖面, 致使南半球表面温度均匀化; 两个极地的周围地形和海拔高度不同。

2) 层积地形^[8]

两极冠随季节的动态变化, 说明存在大量的活动性积聚物, 这些积聚物可能是水冰或气载尘埃。在这些活动性积聚物的冲刷作用(扬起与沉降)下, 形成了火星极地独特的层积地形。

极地的层积地形已经被刻蚀成像阶梯式的峡谷和缓坡度的山崖 (高为 $100\sim 1000\text{ m}$, 宽为 $3\sim 10\text{ km}$, 长为数百 km), 如图 6 所示。

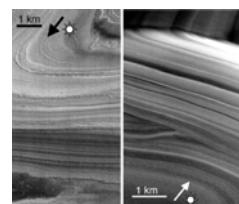


图 6 火星北极的层积地形
Fig. 6 Layered deposit terrain of the Martian north pole

3) 冻结带

由于火星表面温度长年较低, 年平均温度不到273 K, 有人由此推测在火星上覆盖了一层厚厚的永久冻结带, 尤其是极地区域可能有厚度达数km的冻结带。但是, 到目前为止的所有火星探测任务对火星表面的探测均未发现有水存在的证据: 对表面向下延伸至1 m的土壤探测证明无水, 而1 m以下的土壤是否真有水还有待于人类对火星的继续深度探测。

4 火星表面成分及特性

4.1 火星表面化学成分

火星着陆器和火星车对火星表面进行了较深度的探测, 尤其开展了着陆场表面样品的实验分析, 取得了许多分析数据。实际上, 在地面实验室也开展了火星陨石的矿物实验分析。“海盗一号”着陆器曾用X射线荧光分析实验对着陆场表面样品的元素成分进行了分析, 得到的数据结果如表6和表7所示^[9-10]。基于当时的技术能力所限, 本次分析实验不能用于原子序数小于12的元素探测分析; 由于X射线荧光信号被S和Si的信号所覆盖, P也没有分析结果, 所以在表6中没有列出P元素和其他轻元素。

表6 “海盗一号”着陆场的样品元素质量分数
Table 6 Element contents of the samples collected in the landing site of Viking-1

元素	质量分数/%	元素	质量分数/%
Mg	5.0±2.5	Fe	12.7±2.0
Al	3.0±0.9	L*	50.1±4.3
Si	20.9±2.5	X**	8.4±7.8
S	3.1±0.5	Rb	<2.5×10 ⁻⁷
Cl	0.7±0.3	Sr	(6.0±3.0)×10 ⁻⁵
K	<0.25	Y	(7.0±3.0)×10 ⁻⁵
Ca	4.0±0.8	Zr	<3.0×10 ⁻⁵
Ti	0.51±0.2		

注: “L*”表示未被直接鉴别的全部元素含量总和; “X**”表示当探测到的元素(Cl除外)全部以氧化物存在时, 其未被直接鉴别的成分含量总和。

表7 “海盗一号”着陆场样品的化合物构成
Table 7 Compound contents of the samples collected in the landing site of Viking-1

化合物	质量分数/%	化合物	质量分数/%
SiO ₂	44.7	K ₂ O	<0.3
Al ₂ O ₃	5.7	TiO ₂	0.9
Fe ₂ O ₃	18.2	SO ₃	7.7
MgO	8.3	Cl	0.7
CaO	5.6	合计	91.8

“海盗号”还进行了其他采样分析实验, 结果为: 岩屑可能由富含Fe的黏土所构成, 在黏土中探测到含有少量的硫酸镁石(MgSO₄·H₂O)、方解石(CaCO₃)和金红石(TiO₂); 对火星表面材料探测到含有吸附挥发物, 当被加热时, 这些样品释放出质量分数约1%的水, 约5.0×10⁻⁶~1.00×10⁻⁵的CO₂, 另外还含有微量的氧气(<7×10⁻⁷ mol/g)和其他气体; 对风化层的最外层样品分析, 探测到材料中吸附了400 g/cm²的CO₂, 意味着要维持这个CO₂吸附量则需要有10 kPa的表面气压进行平衡。

“海盗号”的风化层生物学实验, 结果发现风化层的最外层含有大量氧化物, 其中包括过氧化物和超氧化物。由于火星大气中没有臭氧层保护, 这些过氧化物和超氧化物可能是由于紫外线辐照作用的结果。

4.2 土壤的特性

“海盗号”轨道器的红外热成像仪对火星表面进行了全面探测, 获得了火星表面的热学特性数据, 包括火星的热惯性数据等, 探测结果发现火星表面的热学特性变化很大。

“海盗一号”对着陆场风化层顶部土壤进行了实验分析, 得到了土壤的光学、热学和力学的特性, 如表8所示^[11]。为了与月球风化层土壤的特性进行对比, 表9还列出了月球风化层土壤的特性^[12]。

表8 火星风化层顶部的特性
Table 8 Regolith characteristics of the Martian upper surface

特性参数	数值
热导率/(×10 ⁻² J·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.837~8.37
比热容/(×10 ⁻³ J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.628~0.795
发射率	0.90~0.98
热惯性/(cm ² ·s ^{0.5} ·K·cal ⁻¹)	100~600
反照率	0.2~0.4
辐射热反照率	0.43~0.93*
介电常数	2.3~3.5
体密度(多孔性)/(g·cm ⁻³)	1~1.8
穿透阻力/(N·cm ² ·cm ⁻¹)	0.3
内聚力/(N·cm ⁻²)	0.01~0.1
黏合力/(N·cm ⁻²)	10 ⁻⁴ ~10 ⁻³
滑动摩擦系数	0.55~0.65
密度/(g·cm ⁻³)	3.933

注: 角标“*”表示赤道地区。

表9 “海盗一号”着陆场风化层土壤与月球土壤的特性比对

Table 9 Comparison of characteristics between the regolith soil in the landing site of Viking-1 and the lunar soil

特性参数*	“海盗一号”着陆场		月球风化层	
	沙质平地	岩石平地	深度 0~0.01 m	深度 0.1~3 m
体密度(多孔性)/(g·cm ⁻³)	1~1.6	1.8	1.0~1.3	1.5~2.1
粒子尺寸 分布/%	10~100 μm	60	30	30~60
	100~2000 μm	10	30	30~35
内部摩擦角/(°)	20~40	40~45	35~50	
穿透阻力/(N·cm ⁻² ·cm ⁻¹)	0.3	6	3	
内聚力/(N·cm ⁻²)		$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10^{-1}	
黏合力/(N·cm ⁻²)		$10^{-4} \sim 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	
滑动摩擦系数	0.55~0.65		0.5~1	

注: 角标“*”表示为由“海盗一号”数据推导出的土壤特性。

4.3 火星表面温度

由于火星大气层很薄, 难以通过大气运动传递表面的热量, 所以其表面温度变化较大。“海盗号”的两个着陆点夏季的平均温度为-60 °C, 昼夜的温度变化约 50 °C; 冬季平均温度达-120 °C, 日温度变化达 100 °C。整个冬季温度低于-123 °C, 使得 CO₂ 冻结成白色沉积物, 形成极冠。由于极冠的季节性循环, 表面总气压波动达 30%。

“海盗号”着陆器对着陆场的大气温度(指距离火星地表面 1.6 m 高处的大气, 因为大气温度低于表面土壤温度)进行了测量, 图 7 为“海盗号”着陆场的大气温度日变化, 其中图 7(a)所示的是着陆场夏季 1 个太阳日的大气温度; 图 7(b)所示的是着陆场在赤道春分条件时日温度变化^[13]。

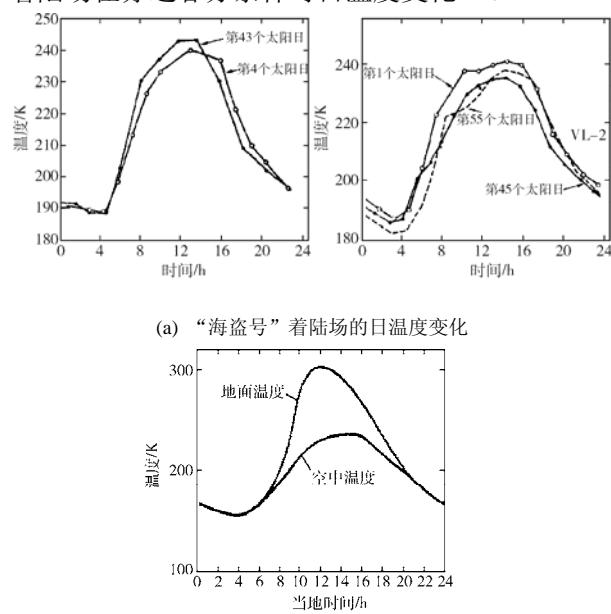


Fig. 7 Diurnal temperature variations at Viking landing sites

5 火星大气的特性

5.1 低层大气

5.1.1 大气成分

“海盗号”着陆器利用所携带的质谱仪对火星低层大气的成分进行了探测鉴别, 探测结果如表 10 所示^[14], 可以看出火星大气的主要成分是 CO₂。在一个火星周年里 CO₂ 的体积分数会发生变化, 最高变化幅度达 26%。为了与地球大气进行比对, 表 11 给出了火星大气元素同位素的占比。由表 11 可以看到 N 和 Ar 的同位素占比与地球的相比有很大差异, 我们可以利用这个差异去理解火星大气的变化。

表 10 火星低层大气成分
Table 10 Composition of the Martian lower atmosphere

气体种类	体积分数/%
CO ₂	95.32
N ₂	2.7
Ar	1.6
O ₂	0.13
CO	0.07
H ₂ O	0.03
Ne	2.5×10^{-6}
Kr	3×10^{-7}
Xe	8×10^{-8}

表 11 火星和地球大气元素同位素的占比
Table 11 Elemental isotope ratio for the Martian and earth atmosphere

同位素占比	火星	地球
¹² C/ ¹³ C	90	89
¹⁶ O/ ¹⁸ O	500	499
¹⁴ N/ ¹⁵ N	165	277
⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	3 000	292
¹²⁹ Xe/ ¹³² Xe	2.5	0.97

“水手九号”探测器已探测到火星大气中有微量臭氧。据有关文献报道, 在标准温度和压力条件下, 火星极区上空在冬季臭氧层厚度最大达到 57 μm

的水平(一般认为火星极区上空臭氧层正常水平在夏季为 $3\mu\text{m}$, 冬季可达 $16\mu\text{m}$)。

5.1.2 低层大气温度与气压^[15]

图8为火星大气的温度剖面图。图9为火星低层大气在夏季中纬度地带上的名义平均温度剖面。

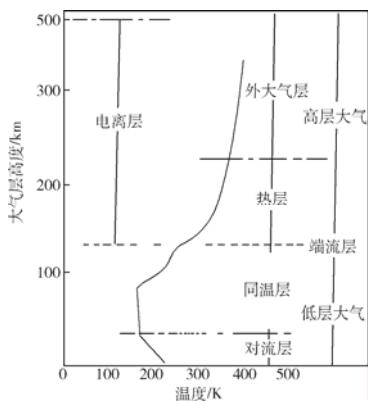


图8 火星大气的温度剖面

Fig. 8 General temperature profile of the Martian atmosphere

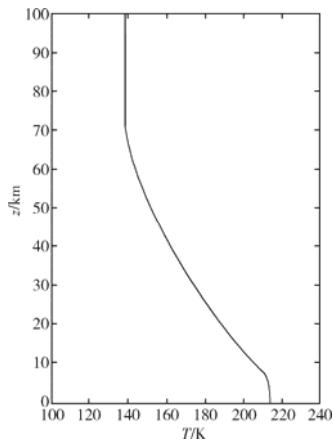


图9 火星低层大气在夏季中纬度地带上的名义平均温度剖面

Fig. 9 Nominal mean temperature profile of the Martian lower atmosphere at middle latitude in summer

由火星冷低压大气模型和暖高压大气模型给出的火星夏季中纬度日平均大气条件如表12所示, 表中的温度允差为 $\pm 10\text{ K}$ 。

表12 由火星大气模型给出的火星夏季中纬度日平均大气条件

Table 12 Diurnal mean atmosphere conditions at middle latitude in summer given by Martian Atmosphere Model

高度 z/km	冷低压大气模型				暖高压大气模型			
	T/K	p/Pa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	p/p_0	T/K	p/Pa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	p/p_0
0	204	590	1.51×10^{-2}	1.000	224	780	1.82×10^{-2}	1.000
4	204	403	1.03×10^{-2}	0.683	224	551	1.29×10^{-2}	0.706
8	199	274	7.20×10^{-3}	0.464	219	409	9.77×10^{-3}	0.524
12	191	184	5.04×10^{-3}	0.312	211	285	7.07×10^{-3}	0.366
16	185	122	3.45×10^{-3}	0.207	205	197	5.01×10^{-3}	0.252
20	178	79.6	2.34×10^{-3}	0.135	198	134	3.54×10^{-3}	0.172
24	173	51.3	1.55×10^{-3}	8.70×10^{-2}	193	90.3	2.45×10^{-3}	0.116
28	168	32.7	1.02×10^{-3}	5.54×10^{-2}	188	60.3	1.68×10^{-3}	7.73×10^{-2}
32	163	20.6	6.60×10^{-4}	3.49×10^{-2}	183	39.9	1.14×10^{-3}	5.11×10^{-2}
36	158	12.8	4.23×10^{-4}	2.17×10^{-2}	178	26.1	7.67×10^{-4}	3.35×10^{-2}
40	152	7.81	2.69×10^{-4}	1.32×10^{-2}	172	16.9	5.13×10^{-4}	2.16×10^{-2}
44	148	4.70	1.66×10^{-4}	7.96×10^{-3}	168	10.8	3.36×10^{-4}	1.38×10^{-2}
48	144	2.79	1.01×10^{-4}	4.73×10^{-3}	164	6.83	2.18×10^{-4}	8.75×10^{-3}
52	140	1.64	6.12×10^{-5}	2.78×10^{-3}	160	4.28	1.40×10^{-4}	5.48×10^{-3}
56	137	0.949	3.62×10^{-5}	1.61×10^{-3}	157	2.65	8.84×10^{-5}	3.40×10^{-3}
60	134	0.544	2.12×10^{-5}	9.22×10^{-4}	154	1.63	5.55×10^{-5}	2.09×10^{-3}
64	132	0.309	1.22×10^{-5}	5.23×10^{-4}	152	1.00	3.44×10^{-5}	1.28×10^{-3}
68	130	0.174	7.01×10^{-6}	2.95×10^{-4}	150	0.608	2.12×10^{-5}	7.79×10^{-4}
72	129	9.76×10^{-2}	3.96×10^{-6}	1.65×10^{-4}	149	0.368	1.29×10^{-5}	4.72×10^{-4}
76	129	5.47×10^{-2}	1.22×10^{-6}	9.27×10^{-5}	149	0.223	7.83×10^{-6}	2.86×10^{-4}
80	129	3.07×10^{-2}	1.24×10^{-6}	5.20×10^{-5}	149	0.135	4.75×10^{-6}	1.73×10^{-4}
84	129	1.72×10^{-2}	6.99×10^{-7}	2.92×10^{-5}	149	8.21×10^{-2}	2.88×10^{-6}	1.05×10^{-4}
88	129	9.70×10^{-3}	3.94×10^{-7}	1.64×10^{-5}	149	4.99×10^{-2}	1.75×10^{-6}	6.39×10^{-5}
92	129	5.46×10^{-3}	2.23×10^{-7}	9.26×10^{-6}	149	3.03×10^{-2}	1.07×10^{-6}	3.89×10^{-5}
96	129	3.08×10^{-3}	1.26×10^{-7}	5.22×10^{-6}	149	1.85×10^{-2}	6.49×10^{-7}	2.37×10^{-5}
100	129	1.74×10^{-3}	7.06×10^{-8}	2.95×10^{-6}	149	1.13×10^{-2}	3.96×10^{-7}	1.44×10^{-5}

由表12可以看到冷低压大气模型给出的气压随高度下降很快。为了定义冷低压大气模型, 需要

从火星表面气压中选定一个最低值(如表12中的590 Pa), 该值对应的表面点位于太阳经度 160° 、

北纬 45°的附近; 同样, 暖高压大气模型也需要选定一个最高表面气压, 如 780 Pa, 该值对应的表面点位于太阳经度 280°、南纬 25°的附近, 发生在初夏太阳垂直照射的中午。

在模型中, 火星表面温度和气压的组合选定原则是不致引起表面大气密度的过大变化, 大气密度的变化范围一般为 $0.015\text{1} \sim 0.018\text{2 kg/m}^3$, 即平均大气密度为 $0.016\text{6 kg/m}^3 \times (1 \pm 9.3\%)$ 。通过最低温度值与最大表面气压或最高温度值与最低表面气压的组合, 可以获得表面大气密度的最大变化范围为 $0.013\text{7} \sim 0.020\text{0 kg/m}^3$, 其中小值可能发生在太阳经度 160°、太阳赤道纬度处; 而最大值可能发生在太阳经度 280°、南纬 45°处。

5.1.3 气压变化

图 10 给出了“海盗号”两个着陆场在整个火星年的气压变化^[16], 清楚地显示出两个极区的气压不对称, 即北极冠的质量交换与南极冠的质量交换不一样多, 主要原因是火星轨道偏心率 (0.093) 的影响, 即由于近日点 (位于太阳经度 253°) 和北半球冬至 (太阳经度 270°) 的靠近交汇, 导致南半球的极端季节。图 10 中变化曲线出现部分中断, 其原因是数据丢失。

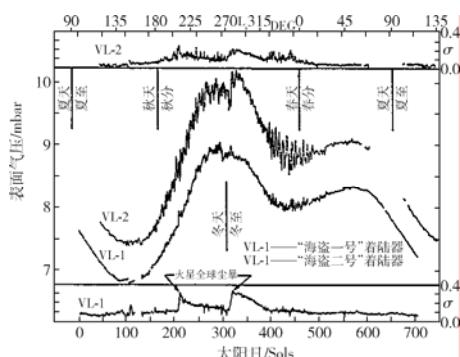


图 10 “海盗号”两个着陆场的表面气压在整个火星年里的变化

Fig. 10 Surface pressure variation over one Martian year for two Viking landing sites

5.2 高层大气

5.2.1 大气成分及其温度

高层大气的成分随着高度的增加而发生变化: 在低于 120 km 的空间, 火星大气是一种混合物; 在高于 120 km (湍流层) 的高空, 大气成分将根据构成气体的分子质量而变化, 分子质量大者在上。

在考虑外大气层中大气演变时, 气体逃逸是重要因素。氢气的逃逸速率在 $10^8 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级上, 是

氧气的 2 倍。如果按氢气逃逸速率来对大气逃逸时间进行预估, 则大气云层中 10 μm 的水蒸气持续逃逸时间仅为 1 万年。在火星外大气层发生了氧和氮的同位素分离, 也可以从表 11 的同位素占比的数据得到印证。氧的同位素占比反映了火星存在一个大型的可交换氧库。

利用氩气和氮气的高度剖面来测定 120 km 处大气的涡流扩散系数, 则得 $5 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。

高层大气的温度剖面很复杂, 也是变化的。两个“海盗号”探测器探测到的火星高层大气平均温度约为 200 K, 而“水手六号”、“水手七号”和“水手九号”探测器探测的温度为 300~350 K, 产生如此之大的差异原因尚不明确。

5.2.2 电离层

高于 120 km 的上空是火星大气电离层。在该高度以上的大气主要成分是 CO₂, 通过光致电离作用产生自由电子。火星上空没有 E 型或 F₂ 型电离层, 但在 20~90 nm 的波段内, 在太阳紫外辐照单位光学深度附近形成了一个 F₁ 型离子峰。就在 130 km 高度的下方, F₁ 型的离子浓度达到一个近似 10^5 cm^{-3} 的峰值 (其中 90% 的是 O₂⁺, 10% 的是 CO₂⁺); 在更高的上空, 在 225 km 处有一个 10^3 cm^{-3} 的 O⁺ 浓度峰值。“海盗一号”探测到: F₁ 型峰值附近 (130 km) 的离子温度约为 150 K; 175 km 高度附近表观外大气层温度达到 210 K; 在 175 km 上方, 出现了中性气体; 在 250 km 的高度, 离子温度快速上升到 1000 K。

“海盗一号”探测器对不同大气层高度的离子密度进行了探测, 在地面也用大气模型进行了计算分析, 图 11 所示的是两种情形下不同大气层高度所对应的离子密度剖面对比^[17]。

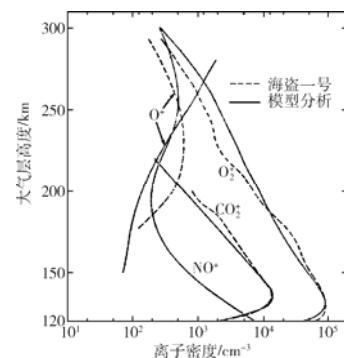


图 11 “海盗一号”探测结果和大气理论模型所获得的火星大气离子密度对比

Fig. 11 A comparison of the ion concentration between the Viking-1 detector result and that obtained by a theoretical model of the Mars' ionosphere

5.3 火星气象

5.3.1 火星云

从轨道器拍摄到的照片里可以看到火星云。火星云一般可分为两类：尘云和冷凝雾。尘暴兴起时弥漫整个火星表面上空，形成一层不透明的黄色尘云。轨道器在火星的高空（甚至在 80 km）观测到由水和 CO₂ 组成的白色冷凝雾。在火星的北纬 65°~81° 区域 6~7 km 上空，“海盗号”轨道器还观测到螺旋式云层。在坑、山脉及山脊上空还看到了由气流所致的地形云，它与 Tharsis 峰密切相关。

从轨道器拍摄到的峡谷照片中可看到早晨的霜和雾；着陆器在两个着陆场的夏季早晨也探测到雾；在两个极地晚冬时期，也会看到霜和雾。

5.3.2 火星风及尘暴^[18]

1) 火星风

火星风是火星上的一种常见天气。火星的风速是地球风速的 10 倍，而其空气的密度比地球的小 120 倍。火星各个区域的风速存在较大差异，着陆场的风速为 2~7 m/s，而在地形交界处的风速高达 50 m/s。火星风的强度和方向随季节而剧烈变化着，甚至在一天里也会发生巨大改变。关于火星风产生的原因有不同说法，有说是 CO₂ 在两个极地之间转移所致，也有说是宇宙气象扰动所致。

2) 尘暴

剧烈的火星风伴随着巨大的尘暴，这也是一种常见天气。大的尘暴将持续数月，弥漫整个大气，严重影响光学观测的可见度，对光学可见度的阻挡将达 5 个光学深度。即使在晴朗的天气里，空气的不透明度将超过 0.18（即能见度小于 0.82）。为了有效地对火星进行探测，需要了解掌握尘暴空气中粒子的分布特性。

5.3.3 气象参数

表 13 列出了火星气象参数^[13,16]。

表 13 火星气象参数

Table 13 The Martian weather parameters

参 数	名 义 值	备 注
气压/Pa	800	700~900
温 度/K	215	130~290
气温下降速率/(K·km ⁻¹)	2	
绝热温度下降比/(K·km ⁻¹)	4.5	
均质大气高度/km	11	
对流层高度/km	40	
湍流层高度/km	120	

续表 13

参 数	名 义 值	备 注
风速/(m·s ⁻¹)	0~50	边界层上方
太阳辐照度/(W·m ⁻²)	平均值 近日点 远日点	590 718 493 在 1 AU 处的太阳辐照常数为 1371±5
反照率	平均 冰帽	0.2~0.4 0.7
太阳紫外辐照度/(W·cm ⁻²)	10 ⁻³	火星位于近日点时其大气层顶端处

5.3.4 季节的时间长短变化

表 14 列出了火星南北半球季节长度。

表 14 火星季节的天数

Table 14 The number of days of Martian seasons

季 节		太 阳 日 数/d	
北半球	南半球	北半球	南半球
春	秋	199	194
夏	冬	183	178
秋	春	147	143
冬	夏	158	154
合计		687	669

6 结束语

进入到 21 世纪，又迎来了火星探测的高潮，许多航天大国或机构相继制定了或正在酝酿制定火星探测计划。

火星探测计划的成功实施需要火星及其环境知识的支撑，因为这些知识是火星探测任务设计的输入条件，所以了解并深入研究火星及其环境是十分必要的。本文经过资料调研，系统地收集了火星及其环境的数据，以期为我国火星探测计划的制定提供服务。

参考文献 (References)

- [1] 欧阳自远, 肖福根. 火星探测的主要科学问题[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(3): 205-217
Ouyang Ziyuan, Xiao Fugen. Major scientific issues involved in Mars exploration[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(3): 205-217
- [2] Veverka J, Burns J A. The moons of Mars[J]. Annual Review of Earth Planet Science, 1980, 8: 527-558
- [3] Christensen E J, Balmino G. Development and analysis of a twelfth degree and order gravity model for Mars[J]. Journal of Geophysics Research, 1979, 84: 7943-7945
- [4] Johnson D H, Toksoz M N. Internal structure and properties of Mars[J]. ICARUS, 1977, 32: 73-84

- [5] Carr M H. The morphology of the Martian surface[J]. *Space Science Reviews*, 1980, 25: 231-284
- [6] Moore H J, Spitzer C R, Bradford K Z, et al. Sample fields of the Viking Lander: physical properties and aeolian processes[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1979, 84: 8365-8377
- [7] Murray B C, Soderblom L A, Cutts J A, et al. Geological framework of the south polar region of Mars[J]. *ICARUS*, 1972, 17: 328-345
- [8] Dzurisin D, Blasius K R. Topography of the layered deposits of Mars[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1975, 80: 3286-3306
- [9] Clark B C, Baird A K, Rose H J, et al. The Viking X-ray fluorescence experiment: analytical methods and early results[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1977, 82: 4577-4594
- [10] Toulmin P III, Baird A K, Clark B C, et al. Preliminary results from the Viking X-ray fluorescence experiment: the first sample from Chryse Planitia, Mars[J]. *Science*, 1976, 194: 81-84
- [11] Kieffer H H, Chase S C, Miner E D, et al. Infrared thermal mapping of Martian surface and atmosphere: 1st results[J]. *Science*, 1976, 193: 780-786
- [12] Shorthill R W, Moore H J, Scott R F, et al. The soil of Mars (Viking I)[J]. *Science*, 1976, 193: 91-97
- [13] Hess S L, Henry R M, Leovy C B, et al. Meteorological results of the surface of Mars: Viking I and II[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1977, 82: 4559-4574
- [14] Owen T, Biemann K, Rushneck D R, et al. The composition of the atmosphere at the surface of Mars[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1977, 82: 4635-4639
- [15] Barth C A. The atmosphere of Mars[J]. *Annual Review of Earth Science*, 1974, 2: 333-367
- [16] Hess S L, Ryan J A, Tillman J E, et al. The annual cycle of pressure on Mars measured by Viking Lander I and II[J]. *Geophysics Research Letter*, 1980, 7: 197-200
- [17] Hanson W B, Sanatani S, Zuccaro D R. The Martian ionosphere as observed by the Viking retarding potential analyzers[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1977, 82: 4351-4363
- [18] Hunt G E. On the opacity of Martian dust storms derived by Viking IRTM spectral measurement[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1979, 84: 8301-8310

The Mars and its environment

Ouyang Ziyuan¹, Xiao Fugen²

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
 2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Martian environment is very similar to that of the Earth. The life in the Mars is a major scientific issue. The study of the Mars and its environment is important in this respect and is the critical task of the successful implementation of the Martian exploration missions. This paper reviews the published results of the Martian exploration. These data can be used as a reference for the design of Martian exploration missions in China.

Key words: Martian environment; Martian exploration; Martian lander; Martian rover; Martian gravity field; Martian surface morphology