评述

基于无线电掩星观测的火星电离层观测研究进展

张素君^{①*}, 王明远^②, 简念川^①, 韩婷婷^③, 平劲松^②, 李金岭^①

① 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

② 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

③ 鄂州职业大学建筑工程学院, 鄂州 436000

*联系人, E-mail: sjzhang@shao.ac.cn

收稿日期: 2012-11-08; 接受日期: 2012-12-19

国家自然科学基金(批准号: 11103063, 11178008)和国家上海市空间导航与定位技术重点实验室基金(编号: 201003)资助项目

摘要 火星电离层早期的观测数据非常少, 除了 Viking 登陆器对火星电离层的在位测量外, 火星电离层的主要物理信息是通过掩星观测方法得到的. 近年来, Mars Global Surveyor 和 Mars Express 轨道器通过掩星观测的方法对火星的上层大气和电离层进行了长期的观测, 得到了大量的火星电离层电子密度廓线资料. 火星电离层受到来自太阳 EUV 和 X 射线辐射、太阳风、太阳耀斑、中性大气、表面壳磁场、宇宙射线、流星等多种因素的影响, 使其结构发生瞬态或季节性的变化. 本文介绍了行星无线电掩星探测的基本原理和技术特点, 回顾了国内外科学家们基于已有的火星掩星观测数据(主要是 Mars Global Surveyor 和 Mars Express)在火星电离层研究中的一些最新科学成果, 并详细介绍了火星电离层的结构和火星夜间电离层的主要特征.

关键词 火星电离层, 掩星, MGS, MEX, 电离层结构, Chapman 模型

PACS: 94.20.D, 94.20.Tt, 94.20.W, 96.30.Gc, 95.10.Gi

doi: 10.1360/132012-920

1 引言

火星是目前太阳系探测中的一个探测和研究热点. 历史上对火星电离层进行探测的任务非常多, 如 Mariner 4, 6, 7, 9, Mars 2, 3, 4, 6, Viking 1, 2, 及最近的 Mars Global Surveyor (MGS)和 Mars Express (MEX). 火星的空间环境是一个多因素相互影响的复杂系统, 如火星电离层就受到太阳辐射(主要是 EUV 和 X 射线辐射), 宇宙射线, 流星, 表面壳磁场

和中性大气等的影响. 火星电离层的等离子体密度比地球的小一个量级, 总电子含量(Total Electron Content, TEC)是地球的 1/50. 火星夜间电离层的形状类似彗星, 向外延长几千公里, 电子密度非常低, 小于 $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ [1].

目前已有的行星电离层探测方法大致可以分为在位测量和遥感测量两种. 在位测量是指利用火箭和卫星等将探测仪器携带到电离层中, 测量电离层介质对仪器的直接作用, 以获得如离子成分、离子密

引用格式: 张素君, 王明远, 简念川, 等. 基于无线电掩星观测的火星电离层观测研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 903–916
Zhang S J, Wang M Y, Jian N C, et al. A review on the study of Martian ionosphere based on Radio Occultation observations (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 903–916, doi: 10.1360/132012-920

度、离子温度和磁场等电离层参数的特性^[2]。电离层在位测量的仪器包括: 郎缪尔探针, 磁力计, 雷达, 质谱仪, 电场测量仪和能量粒子计数器等。Pioneer 金星轨道器上就携带了中性气体质谱仪, 离子质谱仪, 等离子体分析仪和电子温度探针等仪器对金星电离层进行在位观测。MEX 和 VEX 上也携带了等离子探测包(Analyser of Space Plasmas and Energetic Atoms, ASPERA)分别对火星和金星电离层进行在位观测。在位测量法的测量精度高, 有较高的空间分辨率, 可以探测电离层精细结构, 但造价高, 观测受空间位置的限制。遥感测量方法通过接收穿过待测目标介质的无线电信号的变化来反演待测介质的特征, 如雷达探测和无线电掩星测量的方法。在 Viking 时代之前, 人们对火星电离层的了解非常少, 主要通过掩星观测的方法得到了火星电离层的一些基本信息。早期的理论研究和实验室测量得到的几个重要的火星上层大气的物理参数都与实测数据相差甚远^[3]。1965 年, Mariner 4 飞掠火星时首次对火星大气和电离层进行了掩星观测实验, 探测到了火星大气的突变特征, 得到了火星大气的垂直结构和电离层的电子密度廓线^[4]。Viking 1, 2 轨道器对火星电离层也进行了掩星观测, 登陆器的延迟相位分析仪(Retarding Potential Analyzers, RPA)首次得到了火星电离层主要离子成分的含量, 这是首次在地球以外的其他行星上进行电离层的在位测量。

目前普遍认为, 火星没有显著的内禀磁场, 最大的壳磁场异常区集中在西经 120°至西经 210°, 南纬 30°至南纬 85°的 Terra Sirenum 地区, 在南半球有多个类似磁极尖区(Cusp)的强壳磁场区域, 其磁场线可以延伸到火星表面以上 1000 km^[5]。太阳风对火星电离层的结构及动力学特性的影响非常大, 太阳风动压的强度决定了电离层顶的高度。火星电离层与太阳风相互作用的模式与金星电离层的情况类似^[6], 太阳风可以直接与火星的上层大气相互作用。太阳风动压将行星际磁场(Interplanetary Magnetic Field, IMF)向火星电离层压缩, 可到达 180 km 的高度, 磁场的强度也增加了几倍^[7]。MGS 磁强计(Magnetometer/Electron Reflectometer, MAG/ER)的在位测量结果表明, 火星电离层上层受到太阳风引起的磁场的影响, 同时在某些区域会受到地面壳磁场的影响^[5]。

1996 年 11 月 7 日 MGS 探测器发射升空, 1997 年 9 月 11 日到达火星, 它携带了超稳星载晶体振荡

器(Ultra Stable Oscillator, USO), 可以同时入掩星和出掩星阶段得到精确的火星大气和电子密度廓线^[8]。1998 年 12 月到 2005 年 6 月期间, MGS 的无线电(Radio Science, RS)掩星观测共得到了 5600 多条电子密度廓线, 而从 1965 年到 1980 年的 15 年间, 通过掩星方法得到的电子密度廓线总数只有 443 条^[9]。MGS 的轨道周期是 2 h, 每天最多可以获得 8–12 条廓线, 每条廓线对应的太阳天顶角(Solar Zenith Angle, SZA), 当地时间和当地纬度几乎不变, 对应的当地经度不同。MGS 的掩星观测主要集分布在北半球的 60°–86°和南半球的 64°–70°范围之间, SZA 的变化范围是 71°–89°。

MEX 是欧洲的第一个行星探测任务, 于 2003 年 12 月 15 日进入环绕火星轨道, 从 2004 年 4 月, MEX 开始了常规 RS 观测。由于 MEX 上没有携带 USO, 所以只能得到入掩星阶段的观测数据^[10]。MEX RS 掩星观测的空间覆盖比较均匀, 通过多次轨道调整, 几乎覆盖了所有的纬度范围, 但其轨道周期是 6.75 h, 每天最多可得到 1–2 条廓线。MEX 上面还搭载有一个低频雷达(Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding, MARSIS), 通过测量垂直向下发射的扫频无线电波(0.1–5.4 MHz)的回波时延来获得火星顶部电离层的电子密度信息。另外从电子等离子体频率和回旋周期也可以推出当地的电子密度和磁场强度的大小^[11]。MARSIS 对火星电离层的观测有效地弥补了掩星探测方法存在的不足(得到的是飞行器 and 地球视线方向上的平均电子密度值), 其更高的时间和水平分辨率可以用来研究火星电离层的瞬变现象。

2011 年 11 月 8 日, 中国第一颗火星探测器萤火一号(YH-1)与俄罗斯的采样返回探测器 Phobos-Grunt 一起发射升空, 后来 Phobos-Grunt 变轨失败, 导致了该任务的结束。YH-1 的重要科学任务之一就是星-星和星-地掩星测量对火星的大气和电离层(尤其是火星赤道区域)进行深入研究^[12]。星-星掩星探测由空间科学与应用研究中心承担。孙越强等人^[13]介绍了 YH-1 采用的星-星掩星观测的原理背景, 掩星接收机的指标以及地面测试结果。胡雄等人^[14]采用三维射线跟踪方法对火星电离层掩星事件进行了模拟计算, 并利用模拟的掩星观测数据进行了电子密度廓线的反演。星-地掩星观测由上海天文台承担, 他们开发了行星无线电掩星观测资料处理系统, 并

利用 MEX 的 RS 掩星电离层观测数据验证了软件系统的可靠性^[15,16]. 尽管 YH-1 未能成功实施, 中国也在加快深空站的建设, 提高对火星飞行器的测控能力, 为未来的独立火星和其他行星的探测做准备.

NASA 将于 2013 年末发射 Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission (MAVEN), 它是首次以探测火星上层大气为主要任务的飞行器, 也是继 Viking 系列任务后第二次对火星电离层进行在位观测的飞行器 (<http://lasp.colorado.edu/home/maven/science/>). 该任务的主要目的是研究: 火星大气中易挥发物随时间的损失机制; 火星的上层大气和电离层的状态以及太阳风的相互作用; 火星上层大气中的中性和离子成分的逃逸速率及其物理机制; 火星大气中同位素的丰度等.

2 行星无线电掩星探测技术

无线电掩星技术的研究最早可追溯到 20 世纪 60 年代初, 斯坦福大学的 von Eshleman 在 1962 年首先提出了这种方法. da Cain 领导的 JPL 团组也进行了地球大气折射对多普勒记数准确度影响的研究, 验证了利用多普勒相位测量进行行星大气和电离层研究的可行性. 无线电科学探测的优势在于它不需要专门的星载科学仪器, 仅利用飞行器和地面天线传感器之间的无线电信号的相位、振幅和极化特性的变化来反演信号链路上各种因素的变化, 如行星的引力场、形状、行星大气和电离层、历表、太阳日冕、行星际磁场、行星环、彗尾, 并可以验证广义相对论范畴的引力波和引力红移^[17].

行星无线电掩星探测技术是一种几何光学测量方法, 图 1 给出了星-地无线电掩星观测的几何构型示意图. 配备了无线电科学接收机(Radio Science Receiver, RSR)的地面站接收被一个行星或它的一个卫星的大气遮掩后的无线电信号, 测量信号链路上的相位、频率和振幅的变化. 基于 Abel 反演方法或射线跟踪方法可以计算下降或上升掩星阶段的大气折射率廓线, 然后通过折射率公式、流体静力学方程和理想气体方程得到低层大气的分子数密度、温度、压强廓线和电离层的电子密度廓线. 如果是行星环掩星, 可以得到行星环周围的粒子大小分布的信息^[18], 具体的反演方法和计算流程可参考文献[19].

开展无线电科学观测一般需要稳定的时钟标准

图 1 (网络版彩图)通过星-地无线电掩星方法探测行星大气和电离层的几何构型示意图

其中 r_0 是信号路径距离行星表面最近的距离, 行星大气引起信号的弯曲角变化 α 与碰撞参数 a 和大气的折射系数 $n(r)$ 相关

Figure 1 (Color online) Geometry of the earth-based radio occultation measurement in the planetary atmosphere and ionosphere. Ray path closest approach distance is r_0 , bending angle α is related to impact parameter a and index of refraction $n(r)$.

(尤其是在开环模式中需要在星上配备超稳晶体振荡器), 同时地面接收天线后端安装有无无线电科学接收机, 它具备多通道, 高比特量化, 可变采样, 多观测量的数据采集能力. 目前 NASA 和 ESA 都有专门的 RSR 来支持行星无线电科学观测, 上海天文台和东南大学也研发了无线电观测接收设备, 并已经对火星快车和金星快车进行了多次试观测, 确认了该接收机进行行星无线电观测的能力.

影响无线电掩星实验观测精度的一个重要指标是其所采用的时间和频率标准. 根据无线电信号的产生端和接收端之间相对位置的不同, 无线电科学实验可分为双程闭环, 单程和三程开环的观测模式. 在双程和三程观测模式中, 由地面测站的氢原子钟提供非常稳定的时间和频率标准, 其 100–1000 秒积分的阿仑方差大约为 1×10^{-15} , 相应地可以达到 0.1 mm/s 的速度测量精度. 单程开环模式中, 由飞行器上携带的 USO 来控制产生下行信号, 如 MGS 上携带的超稳晶振, 1–1000 秒积分的阿仑方差为 1×10^{-13} ^[8]. 通过无线电掩星观测最终反演得到的廓线的精度除了受时间频率标准的影响外, 还受到地面测站的仪器热噪声, 量化误差, 路径延迟等的影响.

在闭环模式的出掩星阶段中, 如果航天器上没有携带 USO, 则航天器需要几秒的时间来锁定地面的上行信号, 然后再向地面转发相干下行信号. 在这几秒的时间内, 信号路径经过的大气状态未知, 而且火星大气对信号的影响也不稳定, 所以在这种情况

下的掩星观测精度会降低. MEX 上虽然有温控晶体振荡器(Temperature Controlled Crystal Oscillator, TCXO), 但它的稳定度不能达到开展无线电科学实验的要求, 所以只能获得双程和三程入掩星阶段的掩星观测数据^[10].

3 火星电离层的基本物理信息

因为火星和金星的电离层都没有显著的内禀磁场, 所以它们的性质最相似. 但火星上存在零星分布的表面壳磁场, 使得火星电离层与太阳风的相互作用比金星要复杂的多. 火星电离层的主要中性成分是 CO_2 , 受到太阳辐射后生成 CO_2^+ , 然后进一步转化成 O_2^+ . 火星电离层中的主要化学过程是^[20]

图 2 给出了 Viking 1,2 登陆器的延迟相位分析仪在位测量得到的火星电离层主要离子成分(O_2^+ , CO_2^+ , O^+ , 和 NO^+)随高度的分布情况, 除此之外所有关于火星电离层物理特性的信息都来自于美国和苏联的

几次火星任务的掩星观测实验. 从图 2 可以看出, 火星电离层的主要离子成分是 O_2^+ , 而不是其主要中性成分 CO_2 相应离子的 CO_2^+ . 250 km 以上, O^+ 和 O_2^+ 的含量很接近, 这一结果和光化学过程理论是一致的, 但理论估计的上层电离层的电子密度比 RPA 的测量结果要大得多^[3]. Mahajan 和 Mayr^[21]通过比较金星的电子密度廓线, 离子成分和 Viking 1, 2 登陆器的测量结果, 指出是太阳风和火星电离层的相互作用直接导致了火星上层电离层的等离子体逃逸. 根据 MEX 的 ASPERA-3 离子质谱仪的测量结果得到火星上层电离层中三种离子的总逃逸速率分别是^[22]

$$Q(\text{O}^+) = 4 \text{ g/s} = 135 \text{ t/yr},$$

$$Q(\text{O}_2^+) = 8 \text{ g/s} = 250 \text{ t/yr},$$

$$Q(\text{CO}_2^+) = 6 \text{ g/s} = 185 \text{ t/yr}.$$

火星电离层 100 km 处的电子温度 T_e , 离子温度 T_i 和中性大气的温度 T_n 相当, 大约为 200 K. 随着高度的增加, $T_e > T_i > T_n$, 到 200–250 km 高度时, T_e 和 T_i 超过 1000 K^[3]. 图 3 给出了火星电离层中性气体、离子和电子温度相对于高度的变化情况. 光化学反应的时间周期是 $1/\alpha N$, 扩散过程的时间周期是 H^2/D , 其中, α 是分解复合系数, N 是电子密度, H 是中性大气标高, D 是扩散系数. α 与 T_e 成反比, $D = k_B(T_e + T_i)/m_i f_{in}$, 与 T_e 和 T_i 成正比, 与离子质量 m_i , 离子和中性

图 2 Viking 1, 2 登陆器 RPA 在位测量得到的火星电离层主要离子成分(O_2^+ , CO_2^+ , O^+ 和 NO^+)随高度的分布廓线^[3]
Figure 2 Concentrations of the major ions of Martian ionosphere (O_2^+ , CO_2^+ , O^+ and NO^+) measured by RPA on the Viking 1, 2 landers [3].

图 3 火星电离层中性成分、离子和电子温度相对于高度的变化, 以及 Viking1, 2 登陆器测量到的离子温度值^[24]

Figure 3 Plots of neutral atmosphere, ion and electron temperatures of Martian ionosphere versus height, and the measured values of ion temperature by Viking 1, 2 landers [24].

成分的碰撞频率 f_{in} 成反比. 随着高度的增加, T_e 和 T_i 升高, 离子质量和碰撞频率呈指数衰减, 这就导致分解复合系数 α 减小, 扩散系数 D 增加, 扩散过程的时间周期相对缩短, 在电离层上层的作用也越来越重要^[23].

火星电离层中的大部分等离子体是 90 nm 以内的太阳光子对 CO_2 的光电离产生的^[25], 其中 20–90 nm 的太阳超紫外光子辐射是火星电离层主层的主要产生源, 20 nm 以内的太阳 X 射线光子是次层的主要产生源. 火星电离层的主层主要被光化学过程控制, 传输过程可以忽略. 主层以上, 扩散过程的时间周期远小于光化学过程的时间周期, 控制了电离层上层的主要结构.

4 火星日间电离层的结构

关于火星日间电离层的分层, Withers^[26]利用早期 Viking 登陆器, 以及 MGS 和 MEX 飞行器的火星日间电离层观测数据, 将火星日间电离层大概分为: M2 层、M1 层、M1 层以下部分和 M2 层以上部分. 因为火星两个主要分层和地球上 F1 层和 E 层的产生机制类似^[27], 也有人将火星电离层的两个主要分层分别称为 F1 和 E 层. Haider 等人^[28]首次给出了 0–220 km 高度范围内比较精确的火星日间电离层理论模型,

参考地球电离层的分层方法, 该模型主要包含 D、E 和 F 层. 但是火星上主峰的主要离子成分是分子离子 O_2^+ , 扩散特性比较弱, 地球 F1 层的主要离子是原子离子 O^+ , 扩散特性很强^[29], 所以直接沿用地球电离层的分层方法不是很合适. 这里我们采用了 Withers 的分层方法, 图 4 给出了火星日间电离层的分层结构示意图.

火星电离层的结构比地球电离层要简单的多^[26], 原因是: (1) 火星大气只有一种主要中性成分 CO_2 决定了火星大气对 EUV 的吸收状况, 而地球大气的主要中性成分有 O, O_2 和 N_2 ; (2) 与地球不同, 火星大气中的中性分子的光子吸收横截面不随高度或者波长变化; (3) 火星电离层中, 几乎所有的等离子是由一种光电离过程、电荷交换或分解过程产生或消失的; (4) 火星电离层 M2 层峰值附近的主要离子成分是 O_2^+ , 地球上主要峰值密度附近的成分有 O^+ , O_2^+ , NO^+ ; (5) 与地球不同, 火星 M2 层峰值附近的等离子传输过程是可以忽略的.

由于火星电离层 M2 层附近的主要离子成分是分子离子 O_2^+ , 所以平方率损失系数适用. M2 层之上, 主要的离子成分是原子离子 O^+ , 线性损失适用. 在光

图 4 MEX RO 观测反演得到的典型的火星日间电离层电子密度的高度分层示意图

各层的高度分界线并不对应真实的高度, Nm_M2 , Hm_M2 分别是 M2 层的峰值密度和峰值高度

Figure 4 A typical electron density profile of Martian dayside ionosphere retrieved from MEX RO observation. The height boundaries are not responding to true values. Nm_M2 and Hm_M2 are the peak density and peak height of M2 layer.

化学平衡下, Chapman 模型给出的电子密度分布是^[25]

$$N_e(h) = N_m \exp \left[\frac{1}{2} \left[1 - \frac{h-h_m}{H} - e^{-\frac{h-h_m}{H}} \right] \right],$$

$$N_m = \frac{N_0}{c h^k(\chi)}, \quad (2)$$

$$h_m = h_0 + H \ln \text{ch}(\chi).$$

其中, N_0 和 h_0 是日下点的峰值电子密度和峰值高度, χ 是太阳高度角, z_0 是日下点的峰值高度, H 是中性大气的标高. 对于理想的 Chapman 模型, 大气层由单种吸收气体组成, 且大气是水平分层的, $k=0.5$, 大气标高与高度无关. 在 $\chi < 75^\circ$ 时可以用 $\sec \chi$ 很好地近似 $\text{ch} \chi$, 但在接近 90° 时, 如日出, 日落或者高纬地区, 此式近似不成立. 随大气高度降低, 太阳流量指数降低, 但中性分子密度指数升高, 两个相反的指数变化规律的乘积必然导致一个峰值结构的出现, 称为 Chapman 峰.

Chapman 理论模型是描述地球和火星电离层结构的一个重要方法. 尽管 Chapman 理论在描述类地行星的电离层方面有很多不足之处, 如对于火星, Chapman 理论并没有考虑 M2 层及其以下的部分还受到一系列光化学过程的影响和 M2 层以上传输过程的影响, 但它还是可以很好地描述火星电离层的垂直结构^[26].

下面将分别介绍火星电离层的主层 M2 层, 次层 M1 层, M1 层以下和 M2 层以上的结构特点以及最新的研究成果.

4.1 火星电离层的主层(M2 层)

火星电离层的 M2 层是最容易被探测的区域, 该层是由太阳紫外线辐射引起 CO_2 分子的光电离产生的, 其主要的离子成分是 O_2^+ . M2 层主要被光化学过程控制, 可以用简单的理论如 Chapman 层来很好地描述其特征, 同时 M2 层也受到 SZA、太阳辐射、磁场的强度、方向和形态, 以及中性大气密度变化的影响^[26]. 热潮汐和尘暴会引起中性大气密度的变化. 太阳活动周期、太阳自转和太阳耀斑会引起太阳辐射的变化.

M2 层最主要的几个特征参数是: 高度、厚度以及电子密度, 这三个参数的大部分变化都可以准确地用 Chapman 理论进行量化表示. Chapman 理论可以很好地估计峰值电子浓度 N_m 和峰值高度 H_m 及其同 SZA 的关系.

利用不同的观测数据得到的 M2 层的峰值电子密度同 $\cos^k(\text{SZA})$ 的关系也不完全相同. 如 Zhang 等人^[30]利用 MGS 任务之前的掩星探测数据, 拟合得到 $k=0.57$, $\text{SZA} > 44^\circ$. Fox 和 Yeager^[31]利用 MGS 的掩星探测数据得到: 低太阳活动, $k=0.42$; 中太阳活动, $k=0.465 \pm 0.01$; 高太阳活动, $k=0.49$. Nielsen 等人^[32]利用 MARSIS 的观测数据, 拟合得到 $k=0.476$, $0^\circ < \text{SZA} < 90^\circ$. 理论上, 晨昏线附近 $k=0.5$, 但 Fox 和 Yeager^[31]发现在接近晨昏线的地方, 这个指数会低于 0.5, 造成这个偏离的可能原因是: 在接近晨昏线时平行平面假设不再适合, 不能用 $\sec(\text{SZA})$ 来代替

图 5 峰值电子密度(a)和峰值高度(b)相对于太阳天顶角的变化^[30]

其中(a)图曲线是不同日下点电子密度的 Chapman 模型拟合结果, (b)图曲线是假设日下点峰值高度 120 km, 大气标高 10 km 情况下得到的 Chapman 模型拟合结果

Figure 5 Variations of peak electron density and peak height of Martian ionosphere versus SZA [30]. The curves in (a) show examples of Chapman layer peak behavior for two different subsolar densities. The curve in (b) shows a Chapman layer model assuming a subsolar peak at 120 km and 10km scale height.

ch(SZA).

Bougher 等人^[33]最先利用 MGS RS 的 32 组掩星观测数据来研究电子密度廓线与上层大气结构之间的关系. 他们发现主层 M2 层和次层 M1 层的峰值高度随当地经度有明显的波数 3 的变化, 这与由光化学平衡控制的电离层的主要特性不一致. Bougher 等人将这一现象解释为 M2 层峰值高度的经度控制. 在随后利用更多数据的分析中, Bougher 等人^[34]指出波数 3 的潮汐模式相当于半日波的频率, 进一步确认了北半球的 M2 层的峰值高度随当地经度有明显的波数 2 和 3 的变化, 南半球的 M2 层的峰值高度随当地经度有波数 1 的变化, 意味着火星电离层中存在着非迁移潮汐的作用. Krymskii 等人^[35]从 M2 层峰附近的数据得到了中性大气的标高, 发现了中性大气标高随经度的波数 3 的变化. Wang 和 Nielsen^[36]指出太阳风能量粒子对火星中性大气的加热会导致火星电离层 M2 层峰值高度的增加. Zou 等人^[37]发现火星北半球的日下点峰值密度低于南半球的日下点峰值密度, 并指出这一差异是低层大气的季节性变化引起的, 后来又指出 20 km 处的中性大气密度是影响南北半球的日下点峰值密度差异的一个重要因素^[38].

MASIS 的观测结果证实了火星电离层 M2 层峰值电子密度的异常增加只发生在壳磁场中类似极尖区的强垂直开放磁场区域, 而且 M2 层峰值电子密度增加的幅度远大于 RS 掩星观测的结果^[39]. 火星壳磁场类似极尖区的开放磁场区域出现电离层 M2 层峰值电子密度异常增加的机制可能有两种: 一种与能量粒子的注入有关^[40], 另一种与等离子体不稳定性的激发和波动加热有关^[32]. Gurnett 等人^[11,41]和 Nielsen 等人^[32]从较高时间分辨率的 M2 层峰电子密度数据中发现了 2005 年 9 月 15 日的一次太阳耀斑事件引起的电离层电子密度的变化, 耀斑最强烈的时候 M2 层峰值密度增加了 40%. Nielsen 等人^[42]在存在强垂直磁场的区域也发现了类似的峰值密度突然增强的现象, 其产生的原因与太阳耀斑无关.

4.2 火星电离层的次层(M1 层)

M1 层是由太阳 X 射线引起 CO₂ 分子的光电离, 以及随后的电子碰撞电离产生的. M1 层的主要成分也是 O₂⁺, 其中仅有 10% 左右的离子-电子对是由光电离产生的. M1 层位于 M2 层以下, 变化比较大, 而且该层电子密度的大小与掩星技术的测量模糊度相当,

所以很难利用掩星技术来测量 M1 层的形状, 高度及电子密度. MARSIS 的雷达测量模式也不能用来探测 M1 层^[26].

目前还没有关于 M1 层比较详细的模型介绍. 火星电离层的主要中性成分是 CO₂ 分子, 对于 M2 层, CO₂ 分子对 20–90 nm 波长的光子的电离截面是基本不变的, 所以 Chapman 理论对该层适用. 而对于 M1 层, 主要的光子在 20 nm 波长以下, CO₂ 分子的电离截面随着波长的减小而减小^[26], 所以 Chapman 模型不适合于 M1 层的研究.

尽管 M1 层不能很好地用 Chapman 层来进行描述, M1 层的峰值电子密度跟 cos(SZA) 也呈一定的指数关系. 根据 MGS 掩星观测的统计分析结果, 低太阳活动, $k=0.55$; 中太阳活动, $k=0.551\pm0.024$; 高太阳活动, $k=0.53$ ^[27]. M1 层主要受光化学过程控制, 主要的损失过程是分子离子的分解复合过程. M1 层对太阳耀斑非常敏感, 会造成整个 M1 层的电子密度增强, 且随着高度的上升增强幅度越大, 这同太阳耀斑期间的太阳光谱加宽效应是一致的^[26].

Mendillo 等人^[9]发现了 2001 年 4 月的一次太阳耀斑事件引起火星电离层电子密度增强了 200%, 如图 6 所示. Haider 等人^[43]分析了 MGS RO 的观测数据, 发现 2005 年 5 月 13 日的一次太阳耀斑事件和 2003 年 5 月 16, 17 日的 4 次日冕物质抛射事件(Coronal Mass Ejection, CME)引起火星电离层 M1 层部分的总电子含量分别增加了大约 10 倍和 3 倍, 见图 7. Fox 和 Yeager^[44]分析了电子密度廓线的 M2 和 M1 层的峰值高度相对于太阳天顶角和 F10.7 太阳流量的关系.

4.3 M1 层以下

早期的火星掩星探测数据几乎没有发现 M1 层以下的分层现象, 主要是受观测技术本身和低信噪比信号的限制, 不能提取 M1 层以下各层的有效数据. 地球上的 D 层是一直存在的, 比较稳定, 而在火星 M1 层以下的分层是不稳定的, 变化也比较大, 因而不能简单称为 D 层. 太阳耀斑, 耀斑及磁层引起的高能离子, 宇宙射线和流星的撞击都是产生硬 X 射线的因素, 这几个因素对地球电离层 D 层, 及火星 M1 层以下的分层都有贡献.

MEX RS 的观测证实了火星电离层的 80–100 km 高度范围内有流星层的存在^[45]. Withers^[46]利用 MGS 的掩星观测数据, 统计得到流星层的平均高度是

图 6 (网络版彩图) (a), (b): 2001 年 4 月 15 日和 4 月 26 日的 MGS 掩星观测得到的火星电离层电子密度, 其中实曲线代表受太阳耀斑影响后的电子密度廓线; (c), (d): 受太阳耀斑影响的电子密度相对于当天的平均电子密度差值的百分比分布, 阴影部分代表 1 倍中误差^[9]

Figure 6 (Color online) (a), (b): Electron density profiles of Mars obtained for 15 April and 26 April 2001 by MGS RO observations. The read curves indicate the flare-affected profiles. (c), (d): Percentage differences between the flare-affected profiles and the averages of the other profiles on each day. The shadings give the 1-sigma standard error [9].

(91.7±4.8) km, 平均峰值密度是 $(1.33±0.25)×10^{10} \text{ m}^{-3}$, 平均厚度是 $(10.3±5.2) \text{ km}$. 流星层的各物理参数如高度, 厚度, 电子密度之间呈正相关的, 但它们同太阳辐射, 中性标高, SZA 的相关性很弱.

图 8(a), (b) 给出了 MGS 和 MEX 掩星观测中在 80–100 km 高度范围出现的明显的流星层, 统计结果表明 MEX 观测中流星层出现的几率要大于 MGS, 其原因目前还没有很好的解释^[45]. 掩星观测技术主要是探测电离层中的电子密度含量, 不能得到流星层的离子成分, 因此目前也没有其他观测数据可以证实流星层的主要离子成分是 Mg^+ , 这还有待于未来的火星登陆器能获取低高度火星电离层的离子组成^[47].

图 7 (网络版彩图)从 MGS 掩星观测数据计算得到的 2005 年 5 月 12 到 5 月 18 日期间火星电离层 M1 层的 TEC 分布, 并标出了 5 次 CME 事件对该部分 TEC 的影响^[43].

Figure 7 (Color online) Normalized measured TEC distribution between 12 and 18 May 2005 measured by the MGS RO experiments in the M1 layer ionosphere of Mars, five CME events and their effects are shown [43].

在 MGS 和 MEX 的探测数据中也找到了太阳耀斑和高能粒子引起的火星低层电离层增强的现象^[9,48]. 在能量粒子事件期间, 能量粒子在 M1 层以下的某个高度产生了等离子体, 等离子体对地磁辐射的吸收导致 MARSIS 不能探测到地面的反射信号. 但目前, 由能量粒子产生的等离子体的垂直分布以及存在周期还没有明确的解释. 理论研究表明, 宇宙射线对维持 35 km 高度的残余离子体是有贡献的, 对应的电子密度超过 100 cm^{-3} ^[26].

4.4 M2 层以上

M2 层以上的火星顶部电离层受到太阳风, 以及太阳风通过磁力线与电离层相连的影响. M2 层以上比 M2 层附近的变化更加复杂, 主要包含一系列的原子和分子离子, 并同时受到光化学过程和传输过程的控制. 随着高度的增加, 传输过程越来越重要, 同时受太阳风, 磁场的强度、方向和形态的影响也越来越大. 理论研究表明火星电离层的过渡高度大概在 200 km 左右^[49], 在这个高度之上主要受传输平衡控制, 之下主要受光化学平衡控制.

Viking 时代的掩星资料以及 Viking 1 的 RPA 在位测量都没有发现火星上层电离层的标高变化, Viking 2 的 RPA 廓线中发现了 180 km 附近的标高变化. MARSIS 和 MEX RS 掩星观测分别在 210 km 和 230 km 附近看到了标高变化. MGS 的掩星廓线没有

图 8 MEX^[45](a)和 MGS^[46](b)无线电掩星观测在 80–100 km 高度范围内测量到的流星层
Figure 8 The meteoric layer measured by MEX [45] (a) and MGS [46] (b) RO observations at 80–100 km.

发现类似的标高变化, 主要的原因是 MGS 的轨道比较低, 不能探测到电离层较高的高度^[26]. 过渡高度附近的大气标高也存在变化, 这是因为由传输控制的上层的等离子标高大概是大气标高的 2 倍, 同电子和离子温度成正比, 同离子质量成反比^[23].

太阳活动高年, 火星上层电离层的变化也更加明显. 当太阳风动压跟火星电离层的热气压达到平衡时, 在这个位置形成电离层顶, 同时等离子体密度迅速降低. 电离层顶位置比较高时, 其下面的等离子标高也比较大(大约几百公里), 上层电离层对太阳风动压的变化更加敏感. 太阳活动低年, 电离层顶位置迅速降低, 标高也只有 20 km 左右, 电离层顶的位置降低到被光化学平衡控制的高度范围内(225 km 以下), 电离层对太阳风压的变化不是很敏感^[26].

MGS 探测到局部强壳磁场的上空存在顶部电子密度的加强或减弱的现象. Duru 等人^[50]在 MARSIS AIS 模式电离图中发现了强垂直壳磁场使当地上空的电子密度的增强而引起的斜回波. Ness 等人^[51]也在水手 9 号的 RS 掩星数据中发现了强垂直壳磁场引起的电子密度的增强. Nielsen 等人^[48]和 Gurnett 等人^[41]指出强垂直壳磁场上空引起的上层电子密度增强是由于太阳风等离子流沿强垂直壳磁场的开放磁力线对电子的加热引起的. Gurnett 等人^[52]发现顶层的电子密度和相应位置的磁场强度都存在很大的抖动. 这些

抖动可能的原因是: (1) 太阳风动压的扰动; (2) 磁鞘等离子体的不稳定性, 如镜像模式不稳定; (3) 磁鞘和电离层中等离子流的速度剪力引起的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性.

MEX RS 掩星电子密度廓线在 160–180 km 高度范围存在一个凸起. Kopf 等人^[53]从 MARSIS 得到的顶层电子廓线证实了在主要峰值以上还存在另外两个明显的分层, 分别称为第二和第三层. 第二层在近日点附近的出现概率为 60%, 随着 SZA 的增加概率降低, 到晨昏线附近概率只有 5%, 第三层的出现概率只有 1%. 图 9 给出了 MARSIS AIS 模式测量得到的火星电离层上层电子密度廓线, 相比于背景 Chapman 拟合曲线, 可以发现在 160–180 km, 240–300 km 和 300 km 以上有明显的分层现象. Kopf 认为是这一现象是由火星上层电离层同太阳风相互作用的动力学过程产生的.

Wang 和 Nielsen^[54]研究了火星上层电离层中出现的波动现象, 发现 80% 的电子密度廓线中存在约 40 km 尺度的波动, 指出是太阳风压激发了主要的波长为 40 km 的电离层波动.

5 火星夜间电离层

早期只有 Mars 4, 5 以及 Viking 1, 2 探测器获得

图9 (网络版彩图) MARSIS AIS 模式测量得到的火星电离层上层廓线

图中的线分别是 Chapman 模型拟合 M2 附近的电子密度廓线, 用 Gaussian 拟合得到的电离层上层的第二和第三层^[53]

Figure 9 (Color online) An electron density profile obtained by the AIS mode of the MARSIS instrument. The lines are Chapman fit curves to the electron density profile near the M2, the second and third topside layers respectively [53].

了火星夜间电离层的测量数据, 而近期的 MGS 掩星观测也只探测了火星日间电离层的近 5700 多条电子密度廓线, 没有夜间的探测数据. Viking 的掩星观测中有 40% 左右的观测是在夜间的 ($90^\circ < \text{SZA} < 125^\circ$)^[30], SZA 高于 110° 的情况下, M2 层的平均峰值电子密度大约为 $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$, 是日下点峰值密度的 1/40–1/20, 峰值高度大约为 160 km. Zhang 等人^[30]也指出火星夜间电离层的产生机制主要是由日间向夜间的等离子传输和粒子沉降.

火星夜间电离层的变化非常大, 一方面是因为火星夜间电离层太微弱, 而且火星自转速度慢, 影响了白天向夜间的电子传输, 另一个原因是受掩星观测几何构型本身的限制. 目前还没有对于火星深夜区的电离层 ($\text{SZA} > 140^\circ$) 的观测^[26]. 影响火星夜间电离层时空分布的几个因素包括^[55]: (1) 中性大气的密度、温度和结构^[56]; (2) 热层风使电子和离子朝不同方向运动产生的电流^[57]; (3) 由日间向夜间的等离子传输^[58]; (4) 流星消融引起 90 km 高度附近出现电离的峰值^[26]; (5) 宇宙射线引起 35 km 高度附近的电离^[26]; (6) 太阳能量粒子 (Solar energetic particle, SEP) 事件引起从表面到 150 km 高度范围电离^[6]; (7) Gamma 射线爆发引起 0–20 km 范围电离^[59]; (8) 主要依赖于电子温度的分解复合率的大小^[25]; (9) 火星的诱发磁场产生的超热电子的沉降引起的碰撞电离, 及相关的电子能量频谱和投影角分布 (Pitch Angle

Distributions, PADs)^[60]; (10) 火星壳磁场和行星际磁场相互影响后的磁场的强度和分布^[61]. 截至目前人们对以上各因素的机制还没有充分地了解.

Verigin 等人^[62]利用 Phobos 2 HARP 辐射计数据计算得到了电离率, 指出磁层中的电子可能是夜间

图10 (网络版彩图) (a), (b), (c): MEX 的 MARSIS 得到的电子密度廓线中的“洞”状结构以及相应时间的 ASPERA-3 ELS 和 IMA 测量到的电子能量, 离子能量数据^[67]; 下: Pioneer 金星飞行器在位观测到的金星夜间电离层中的“洞”状结构^[68]

Figure 10 (Color online) (a), (b), (c): The “hole” structure in the electron density profile observed by MARSIS and the corresponding ELS and IMA data from ASPERA-3. (d): A pair of holes encountered in the nightside ionosphere observed by Pioneer Venus spacecraft [68].

电离层的另外一个产生源. Němec 等人^[63]对 MARSIS 夜间观测数据($90^\circ < \text{SZA} < 140^\circ$)进行了详细地分析. 结果表明 SZA 大于 107° 的观测数据占总观测数据的 9%, M2 层峰值密度在 $5 \times 10^3 - 7 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ 范围内. 通过对夜间雷达电离层观测数据的仔细辨别, Němec 等人共发现了 90 个比较强烈的电离层回波信号, 这些信号都在壳磁场开放的区域, 磁场强度越强, 峰值密度越高.

Safaenili 等人^[64]指出, 在 SZA 大于 100° 的情况下, 壳磁场的磁力线接近垂直地方的 TEC 会比较强. Lillis 等人^[65]指出 SZA 大于 110° 的情况下, 一次太阳离子事件会引起 TEC 增加 2 倍. Leblanc 等人^[66]对夜间 TEC 和沉积电子流量的增强与 UV 极光观测的相关性进行了研究.

MARSIS 数据得到的夜间电子密度廓线中发现了火星夜间电离层中的电子密度抑制现象, 一般的尺度是 $950 \text{ km}^{[41,67]}$, 如图 10 所示. 金星夜间电离层中也发现了很多类似的“洞”状结构, 其附近存在显著的等离子逃逸^[68]. 电离层中的“洞”状结构的产生机制是: “洞”内的强垂直磁场阻止了周围离子和电子的进入, 同时离子向低层大气的沉降或通过电磁过程向磁尾的传输也导致了等离子体密度的减少^[68].

Perez-de-Tejada^[69]指出磁场相对于黄道面的方向可以部分解释金星电离层中存在的“洞”状结构.

6 总结

行星无线电掩星技术是探测行星大气和电离层的有效手段, 历史上大量的行星探测计划都采用了掩星观测的方法. MGS 和 MEX 的掩星观测数据和 MARSIS 的雷达观测数据提供了研究火星电离层结构, 各层的物理性质及引起该层特性变化的因素的重要信息. 火星日间电离层的 M2 层, M1 层是一直存在的, 而且它们的物理特性和变化机制也不同. 火星日间电离层的 M1 层以下部分中, 流星, 太阳能量粒子和宇宙射线引起的电离现象并不是一直存在的, 截至目前对这些物理现象还没有非常清楚的解释. 未来的火星电离层探测任务仍需要解决如: 火星上层大气和电离层与太阳风的相互作用, 等离子体的逃逸机制, 夜间电离层的产生和变化机制等方面的问题. 由于行星星-地掩星技术本身的限制, 不能得到 SZA 大于 125° 的观测数据^[55], 而且时间和空间分辨率也比较低, 可以通过采用星-星行星掩星观测的方法来解决这一问题.

致谢 感谢审稿人对本文深入而细致的审阅, 提出了很多宝贵的意见, 完善了本文的整体内容. 感谢 ESA PSA 和 NASA PDS 公布了 Mars Global Surveyor 和 Mars Express 的无线电科学掩星观测数据.

参考文献

- 1 Ho C, Golshan N, Kliore A. Radio Wave Propagation Handbook for Communication on and Around Mars. Pasadena: JPL publication, 2002. 7-18
- 2 王明远. 基于无线电科学的火星电离层研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2011. 4-6
- 3 Hanson W B, Sanatani S, Zuccaro D R. The martian ionosphere as observed by the Viking retarding potential analyzers. J Geophys Res, 1977, 82: 4351-4363
- 4 Kliore A J, Cain D L, Levy G S, et al. Occultation experiment: Results of the first direct measurement of Mars' atmosphere and ionosphere. Science, 1965, 149: 1243-1248
- 5 Acuña M H, Connerney J E P, Ness N F, et al. Global distribution of crustal magnetization discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment. Science, 1999, 284: 790-793
- 6 Luhmann J G, Russell C T, Scarf F L, et al. Characteristics of the Marslike limit of the Venus-solar wind interaction. J Geophys Res, 1987, 92: 8545-8557
- 7 Shinagawa H, Cravens T E. A one-dimensional multispecies magneto hydrodynamic model of the dayside ionosphere of Mars. J Geophys Res, 1989, 94: 6506-6516
- 8 Hinson D P, Simpson R A, Twicken J, et al. Initial results from radio occultation measurements with Mars Global Surveyor. J Geophys Res, 1999, 104: 26997-27012

- 9 Mendillo M, Withers P, Hinson D, et al. Effects of solar flares on the ionosphere of Mars. *Science*, 2006, 311: 1135–1138
- 10 Paetzold M, Tellmann S, Andert T. MaRS: Mars Express radio science experiment. In: Fletcher K, eds. *Mars Express: The Scientific Investigations*. Netherlands: ESA Communication Production Office, 2009. 217–230
- 11 Gurnett D A, Kirchner D L, Huff R L, et al. Radar sounding of the ionosphere of Mars. *Science*, 2005, 310: 1929–1933
- 12 Wu J, Zhu G W, Zhao H, et al. Overview of scientific objectives of China-Russia joint Mars Exploration program YH-1 (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2009, 29(5): 449–455 [吴季, 朱光武, 赵华, 等. 萤火一号火星探测计划的科学目标. *空间科学学报*, 2009, 29(5): 449–455]
- 13 Sun Y Q, Du Q F, Zhu G W, et al. Joint Russian-Chinese satellite-to-satellite Martian radio occultation experiment (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2009, 29(5): 475–480 [孙越强, 杜起飞, 朱光武, 等. 中俄联合火星电离层星-星掩星探测. *空间科学学报*, 2009, 29(5): 475–480]
- 14 Hu X, Wu X C, Gong X Y, et al. Simulation of the Mars ionosphere radio occultation experiments (in Chinese). *Acta Astronomica Sin*, 2009, 50(3): 301–311 [胡雄, 吴小成, 宫晓艳, 等. 火星电离层无线电掩星探测仿真研究. *天文学报*, 2009, 50(3): 301–311]
- 15 Zhang S J, Ping J S, Han T T, et al. Implementation of the Earth-based planetary radio occultation inversion technique. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 54(3): 1359–1366
- 16 Zhang S J, Ping J S, Yan H J, et al. Planetary radio occultation technique and inversion method In YH-1 Mars mission. In: the Proceedings of the 15th Asia-Pacific conference on Communications (APCC2009)-071. Shanghai: IEEE, 2009. 301–305
- 17 Asmar S W, Renzetti N A. *The Deep Space Network as An Instrument for Radio Science Research*. Pasadena: JPL Publication, 1993. 80–93
- 18 Fjeldbo G, Eshleman V R. The atmosphere of Mars analyzed by integral inversion of the Mariner IV occultation data. *Planet Space Sci*, 1968, 16: 1035–1059
- 19 Fjeldbo G, Kliore A J, Eshleman V R. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments. *Astron J*, 1971, 76: 123–140
- 20 Mahajan K K, Singh S, Kumar A, et al. Mars Global Surveyor radio science electron density profiles: Some anomalous features in the Martian ionosphere. *J Geophys Res*, 2007, 112: E10006
- 21 Mahajan K K, Mayr H G. Mars ionopause during solar minimum: A lesson from Venus. *J Geophys Res*, 1990, 95: 8265–8269
- 22 Barabash S, Fedorov A, Lundin R, et al. Martian atmospheric erosion rates. *Science*, 2007, 315: 501–503
- 23 Rishbeth H, Garriott O K. *Introduction to Ionospheric Physics*. New York: Academic Press, 1969
- 24 Chen R H, Cravens T E, Nagy A F. The Martian ionosphere in light of the Viking observations. *J Geophys Res*, 1978, 83: 3871–3877
- 25 Schunk R W, Nagy A F. *Ionospheres*. New York: Cambridge University Press, 2000
- 26 Withers P. A review of observed variability in the dayside ionosphere of Mars. *Adv Space Res*, 2009, 44: 277–307
- 27 Fox J L, Yeager K E. Morphology of the near terminator Martian ionosphere: A comparison of models and data. *J Geophys Res*, 2006, 111: A10309
- 28 Haider S A, Abdu M A, Batista I S, et al. D, E, and F layers in the daytime at high-latitude terminator ionosphere of Mars: Comparison with Earth's ionosphere using COSMIC data. *J Geophys Res*, 2009, 114: A03311
- 29 Banks P M, Kockarts G. *Aeronomy*. New York: Academic Press, 1973
- 30 Zhang M H G, Luhmann J G, Kliore A J, et al. A post-pioneer Venus reassessment of the Martian dayside ionosphere as observed by radio occultation methods. *J Geophys Res*, 1990, 95: 14829–14839
- 31 Fox J L, Yeager K E. Morphology of the near terminator Martian ionosphere: A comparison of models and data. *J Geophys Res*, 2006, 111: A10309
- 32 Nielsen E, Zou H, Gurnett D A, et al. Observations of vertical reflections from topside Martian ionosphere. *Space Sci Rev*, 2006, 126: 373–388
- 33 Bougher S W, Engel S, Hinson D P, et al. Mars Global Surveyor radio science electron density: Neutral atmosphere implications. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 3091–3094
- 34 Bougher S W, Engel S, Hinson D P, et al. MGS radio science electron density profiles: Interannual variability and implications for the Martian neutral atmosphere. *J Geophys Res*, 2004, 109: E03010
- 35 Krymskii A M, Breus T K, Ness N F. Effect of crustal magnetic fields on the near terminator ionosphere at Mars: Comparison of in situ magnetic field measurements with the data of radio science experiments on board Mars Global Surveyor. *J Geophys Res*, 2003, 108(A12): 1431, doi:10.1029/2002JA009662
- 36 Wang J S, Nielsen E. Evidence for topographic effects on the Martian ionosphere. *Planet Space Sci*, 2004, 52: 881–886
- 37 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 Geophys Res*, 2005, 110: A09311

- 38 Zou H, Wang J S, Nielsen E. Reevaluating the relationship between the Martian ionosphere peak density and the solar radiation. *J Geophys Res*, 2006, 111: A07305
- 39 Zou H, Chen H F, Yu N, et al. Effects of Martian crustal magnetic field on its ionosphere. *Sci China-Techol Sci*, 2010, 53: 1717–1724
- 40 Lundin R, Winningham D, Barabash S, et al. Plasma acceleration above Martian magnetic anomalies. *Science*, 2006, 311: 980–983
- 41 Gurnett D A, Huff R L, Morgan D D, et al. An overview of radar soundings of the Martian ionosphere from the Mars Express spacecraft. *Adv Space Res*, 2008, 41: 1335–1346
- 42 Nielsen E, Fraenz M, Zou H, et al. Local plasma processes and enhanced electron densities in the lower ionosphere in magnetic cusp regions on Mars. *Planet Space Sci*, 2007, 55: 2164–2172
- 43 Haider S A, Abdu M A, Batista I S. On the responses to solar X ray flare and coronal mass ejection in the ionosphere of Mars and Earth. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L13104
- 44 Fox J L, Yeager K E. MGS electron density profiles: Analysis of the peak magnitudes. *Icarus*, 2009, 200: 468–479
- 45 Paetzold M, Tellmann S, Häusler B, et al. A sporadic third layer in the ionosphere of Mars. *Science*, 2005, 310: 837–839
- 46 Withers P. Mars global surveyor and Mars odyssey accelerometer observations of the Martian upper atmosphere during aerobraking. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L02201
- 47 Witasse O, Cravens T, Mendillo M. Solar system ionospheres. *Space Sci Rev*, 2008, 139: 235–265
- 48 Nielsen E, Wang X D, Gurnett D A. Vertical sheets of dense plasma in the topside Martian ionosphere. *J Geophys Res*, 2007, 112: E02003
- 49 Nagy A F, Cravens T E, Mendillo M. Atmospheres in the Solar System: Comparative Aeronomy. Washington D C: American Geophysical Union, 2002. 39–54
- 50 Duru F, Gurnett D A, Averkamp T F. Magnetically controlled structures in the ionosphere of Mars. *J Geophys Res*, 2006, 111: A12204
- 51 Ness N F, Acuña M H, Connerney J E P, et al. Effects of magnetic anomalies discovered at Mars on the structure of the martian ionosphere and solar wind interaction as follows from radio occultation experiments. *J Geophys Res*, 2000, 105: 15991–16004
- 52 Gurnett D A, Morgan D D, Duru F, et al. Large density fluctuations in the Martian ionosphere as observed by the Mars express radar sounder. *Icarus*, 2010, 206(1): 83–94
- 53 Kopf A J, Gurnett D A, Morgan D D. Transient layers in the topside ionosphere of Mars. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L17102
- 54 Wang J S, Nielsen E. Wavelike structures in the Martian topside ionosphere observed by Mars Global Surveyor. *J Geophys Res*, 2003, 108(E7): 5078
- 55 Lillis R J, Fillingim M O, Brain D A. Three-dimensional structure of the Martian nightside ionosphere: Predicted rates of impact ionization from Mars Global Surveyor magnetometer and electron reflectometer measurements of precipitating electrons. *J Geophys Res*, 2011, 116: A12317
- 56 Bougher S W, Engel S, Roble R G, et al. Comparative terrestrial planet thermosphere: 2. Solar cycle variation of global structure and winds at equinox. *J Geophys Res*, 1999, 104: 16591–16611
- 57 Fillingim M O, Peticolas L M, Lillis R J. Localized ionization patches in the nighttime ionospheric of Mars and their electrodynamic consequences. *Icarus*, 2010, 206: 112–119
- 58 Uluşen D, Linscott I R. Low-energy electron current in the Martian tail due to reconnection of draped interplanetary magnetic field and crustal magnetic fields. *J Geophys Res*, 2008, 113: E06001
- 59 Inan U S, Lehtinen N G, Moore R C. Massive disturbance of the daytime lower ionosphere by the giant g-ray flare from magnetar SGR 1806-20. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L08103
- 60 Brain D A, Halekas J S, Peticolas L M, et al. On the origin of aurorae on Mars. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L01201
- 61 Halekas J S, Brain D A, Lillis R J. Current sheets at low altitudes in the Martian magnetotail. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L13101
- 62 Verigin M I, Gringauz K I, Shutte N M. On the possible source of the ionization in the nighttime Martian ionosphere: 1. Phobos 2 HARP electron spectrometer measurements. *J Geophys Res*, 1991, 96: 19307–19313
- 63 Němec F, Morgan D D, Gurnett D A. Nightside ionosphere of Mars: Radar soundings by the Mars Express spacecraft. *J Geophys Res*, 2010, 115: E12009
- 64 Safaeinili A, Kofman W, Mouginot J. Estimation of the total electron content of the Martian ionosphere using radar sounder surface echoes. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L23204
- 65 Lillis R J, Brain D A, England S L. Total electron content in the Mars ionosphere: Temporal studies and dependence on solar EUV flux. *J Geophys Res*, 2010, 115: A11314
- 66 Leblanc F, Witasse O, Lilensten J, et al. Observations of aurora by SPICAM ultraviolet spectrograph on board Mars Express: Simultaneous ASPERA-3 and MARSIS measurements. *J Geophys Res*, 2008, 113: A08311

- 67 Duru F, Gurnett D A, Morgan D D. Nightside ionosphere of Mars studied with local electron densities: A general overview and electron density depressions. *J Geophys Res*, 2011, 116: A10316
- 68 Brace L H, Taylor H A, Gombosi T I, et al. *The Ionosphere of Venus: Observations and Their Interpretations*. Arizona: Venus University of Arizona Press, 1983. 779–840
- 69 Pérez-de-Tejada H. Plasma channels and electron density profiles near the midnight plane in the Venus nightside ionosphere. *J Geophys Res*, 2004, 109: A04106

A review on the study of Martian ionosphere based on radio occultation observations

ZHANG SuJun^{1*}, WANG MingYuan², JIAN NianChuan¹, HAN TingTing³,
PING JinSong² & LI JinLing¹

¹ Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China;

² National Astronomical Observatory, Beijing 100012, China;

³ Architecture and Civil Engineering of Ezhou Polytechnic, Ezhou 436000, China

The early observations of the Mars ionosphere are very limited. Most of the information concerning the ionospheric properties of Mars comes from radio occultation experiments. Recent measurements by Mars Global Surveyor and Mars Express have greatly increased the number of observations of Martian dayside and nightside ionosphere. Large datasets of electron number density profiles have been published online for scientific analysis. Martian ionosphere is influenced by many factors, such as: solar EUV and X ray irradiance, solar wind, solar flare, neutral atmosphere, crustal magnetic field, cosmic rays, meteoric showers and so on. They lead to instantaneous and seasonal variations in Martian ionosphere. In this paper, fundamental principles and features of planetary radio occultation technique are briefly discussed. An introduction of the domestic work concerning the Joint Russia-China Mars exploration (YH-1) is also presented here. New developments in the study of the Martian ionosphere based on radio occultation observations are viewed, mostly from Mars Global Surveyor and Mars Express datasets. The layer structure of Martian dayside ionosphere and factors affecting the variability of each layer are summarized. Here we adopted from Withers, to classify the structure of Martian dayside ionosphere as: M1 below, M1, M2, and M2 above. Some newest findings with regard to the influence of solar activity, neutral atmosphere, crustal magnetic field and meteoric showers on the electron density profile, especially on the peak density and peak height of M2 and M1 layers are presented. This paper also discusses the variation mechanisms and the recent studies of Martian nightside ionosphere. The future research topics of Martian ionosphere will be centered on the interactions of the solar wind and the upper atmosphere, ion loss at Mars, the crustal magnetic control of local ionosphere, structure of night ionosphere and so on.

Martian ionosphere, occultation, MGS, MEX, ionospheric structure, Chapman model

PACS: 94.20.D, 94.20.Tt, 94.20.W, 96.30.Gc, 95.10.Gi

doi: 10.1360/132012-920