

文章编号: 1000-8349(2009)03-0280-11



# 基于 MGS 探测器掩星观测的 火星电离层数据初步分析

张素君<sup>1,2</sup>, 史 弦<sup>1,2</sup>, 平劲松<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 该文简要介绍了行星无线电掩星技术的意义、历史和原理。利用 MGS 探测器无线电科学掩星实验得到的火星电离层电子浓度 EDS 数据, 可研究火星电离层的结构。文中分析了 MSG 电子浓度廓线的峰值高度随经度的变化特性, 并结合火星电离层的 Chapman 模型和实测的电子浓度廓线, 探讨了火星电离层的双层或多层结构的可能性及其物理机制。分析了峰值电子浓度和峰值高度同太阳天顶角的关系和 *TEC* 在各数据集中的分布。

**关 键 词:** 无线电掩星技术; MGS; 火星; 电离层

**中图分类号:** P185.3, P352.7 **文献标识码:** A

## 1 引 言

行星无线电掩星技术是研究行星科学的重要手段。作为行星物理探测的主要方法之一, 无线电科学实验提供了大量的、超出预想的行星大气和重力场信息。历史上几乎所有的行星任务都利用了无线电掩星技术来探测行星的大气、电离层、行星环以及磁场, 而且未来的任务也将会采用这一技术。无线电掩星探测技术可以为研究行星的大气直接地提供一些重要的大气参数信息, 这对实现航天器在行星上成功软着陆提供了保障。利用地面上的接收机(如美国深空网 DSN, Deep Space Network)对空间飞行器进行无线电观测, 通过对接收信号的相位、频移或振幅的测量可以研究行星及其卫星的大气和电离层结构, 并用于探测行星引力场、形状、质量、行星环、行星历表、日冕、磁场、彗发以及诸如引力波的广义相对论和引力红移验证<sup>[1]</sup>。

**收稿日期:** 2008-05-05; **修回日期:** 2009-05-12

**基金项目:** 国家高科技 863 计划项目 (2007 AA12A210, 2008 AA12A209)

## 2 掩星技术的历史和原理

对无线电传播的研究可以回溯到 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。由 da Cain 领导的 JPL 团队也独立地开展了地球大气折射对多普勒计数准确度影响的研究, 从中他们发现了利用多普勒相位测量的敏感性来研究行星大气和电离层的可行性<sup>[1]</sup>。理论和有关技术的研究大部分是 Fjeldbo 等人开展的<sup>[3]</sup>。掩星技术首先在 1965 年 Mariner 4 号飞过火星时付诸实施, 实现了对火星表面压强、温度和火星电离层电子浓度的第一次测量, 探测到火星大气的突变特征, 证明了火星大气主要是由 CO<sub>2</sub> 构成的、火星表面温度低于地球的 1%, 甚至比预测值的量级还要低<sup>[9]</sup>。Eshleman, Tyler, Kliore, Fjeldbo, Lindal, Woo 等人先后介绍了 Voyager<sup>[10]</sup>, Mars Observer<sup>[11]</sup>, Mariner<sup>[9,12~15]</sup> 等航天器的无线电科学实验, 这些实验对内行星(水星, 金星, 火星)和四大行星(木星、土星、天王星、海王星)<sup>[16~19]</sup>的无线电掩星观测, 得到了大量关于行星电离层结构和大气组成的信息。

行星无线电掩星观测的基本原理是: 地面站接收一个航天器在被一个行星(或其卫星)遮掩前后的无线电信号, 通过测量无线电信号的相位或振幅的变化, 用某种反演方法计算下降和上升掩星阶段的大气折射率廓线, 然后再推算出低层大气的分子数密度、温度、压强廓线和高层大气的电子浓度、等离子体温度廓线, 从而了解行星大气及其空间环境的有关情况。如果是行星环掩星, 还可以得到行星周围环内的物质粒子大小分布信息<sup>[20~22]</sup>。下降掩星观测时对应双程或三程测量模式, 双程链路信号穿过电离层上层到达行星表面然后被行星遮掩。刚进入上升掩星观测时, 由于卫星不能收到地面上行信号, 需要由星上晶振控制产生下行信号, 对应于单程测量模式, 单程链路信号从行星表面穿过电离层上层和整个大气层。之后双程链路恢复通信。

## 3 MGS 电离层掩星数据处理与分析

MGS (Mars Global Surveyor) 是在 Viking 计划以后 20 年, 美国实行的新一代的火星探测计划。它于 1996 年 11 月 6 日发射, 1997 年 9 月 11 日进入环火星轨道。MGS 的主要任务是研究火星的表面、大气层和磁层的情况。2001 年 2 月 1 日后, 进行了 4 次扩展任务<sup>[2]</sup>。从 1998 年 1 月开始, MGS 进行了 17 000 多次掩星实验, 探测了从火星表面到高度达 250 km 处的大气, 观测结果通过 Abel 变换反演折射率廓线<sup>[3]</sup>。因为折射率跟中性大气和电离层中的带电离子相关, 处理结果得到了两组数据<sup>[4]</sup>: 电离层电子浓度数据 (EDS, Electron Density profile Standard) (100~200 km 势高范围) 和中性大气数据 (TPS, Temperature Pressure profile Standard) (0~40 km 势高范围), 这两部分的垂直分辨率都为 500 m<sup>[5]</sup>。根据这些无线电掩星数据可以开展很多研究工作, 比如: 对中性大气的温度和压强数据再加上一些大气模型就可以研究低层大气的结构和动力学特征<sup>[6]</sup>; 电子浓度数据可以用来研究电离层的周年变化特征、中性大气和电离层的相互作用以及电离层中的潮汐现象<sup>[7,8]</sup>。

本文中我们将对目前 NASA PDS (Planetary Data System) 公布的, MGS 无线电科学 (RS, Radio Science) 掩星实验得到的电离层 EDS 数据<sup>[23]</sup>进行初步的分析, 整个数据的时间跨度

大约为 4 个火星年，可以用于分析火星电离层的变化特性。

### 3.1 MGS/RS EDS 数据的分布情况

MGS/RS EDS 数据的分布情况如表 1 所示，表中各物理量含义如下。

(1) *Sun\_Mars\_lon*：太阳在火固系中的经度。对应于掩星发生时刻和火星过春分点时刻时火星与太阳连线之间的夹角。从火固系的春分点开始度量，向东为正。

(2) *Sun\_lat*：掩星发生时刻太阳在火固系中的纬度，向北为正。

(3) *LTST* (Local True Solar Time)：掩星发生时刻对应的地方真太阳时。与日下点经度对应的子午线上的当地太阳时定义为正午 12<sup>h</sup>。其他子午线上的时刻可通过换算得到。掩星观

表 1 MGS/RS EDS 数据集参数分布情况

File name profile num.	Date	<i>LTST</i> /h	<i>SZA</i> /(°)	<i>Sun_Mars</i> <i>_lon</i> /(°)	<i>Sun_lat</i> /(°)	$N_m$ / $10^{10}\text{m}^{-3}$	$H_m$ /km	$c$	$H_0$ /km
mors_1007	98.12.24	3.3	78.4	74.1	24.1	6.8	128.0	0.35	9.87
32	98.12.31	4.3	80.8	77.3	24.53	9.7	144.1		
mors_1010	99.03.09	3.5	76.4	107.6	22.51	7.0	127.5	0.39	9.72
43	99.03.27	4.1	77.8	115.9	23.93	10.3	140.1		
mors_1011	00.12.09	2.7	80.5	86.8	25.15	6.2	126.1	0.39	10.73
134	00.12.21	2.8	82.2	92.5	25.19	9.5	144.4		
mors_1015	99.05.06	12.0	78.5	134.7	13.68	4.0	123.2	0.44	11.15
220	99.05.29	12.2	86.9	146.3	17.62	10.5	153.6		
mors_1019	00.12.09	2.8	75.3	86.8	23.43	6.0	124.5	0.40	10.47
448	01.01.31	3.1	82.2	110.9	25.19	11.5	144.4		
mors_1023	00.11.01	2.8	82.2	70.2	23.60	3.2	127.7	0.42	10.51
284	00.12.08	2.8	86.6	86.8	25.15	9.3	152.9		
mors_1024	01.02.01	3.06	71.8	110.9	2.62	4.2	122.6	0.43	11.07
840	01.06.06	8.8	86.9	173.8	23.43	13.2	157.4		
mors_1027	02.11.01	3.5	74.9	89.0	21.43	5.6	121.1	0.41	10.45
603	03.01.10	4.4	83.7	120.9	25.19	11.9	146.6		
mors_1028	03.01.01	4.1	70.9	116.6	10.15	7.9	124.5	0.41	10.45
650	03.01.21	12.3	75.9	155.5	22.38	12.8	144.7		
mors_1029	03.03.22	12.4	71.1	155.9	0.02	6.9	126.0	0.41	11.20
565	03.06.04	14.1	79.7	197.3	10.00	12.2	146.9		
mors_1030	03.06.22	13.9	83.0	207.8	-11.4	5.4	133.7	0.40	11.60
76	03.07.02	14.1	84.9	214.1	-13.80	8.1	152.7		
mors_1035	04.11.23	4.4	73.2	119.0	2.81	5.6	124.8	0.45	10.49
947	05.03.10	12.4	81.0	173.4	21.86	11.4	152.6		
mors_1036	05.03.11	12.4	73.7	173.4	0.02	3.1	125.3	0.46	11.81
904	05.06.09	14.7	89.2	227.3	-18.24	10.7	171.7		

测时刻的当地真太阳时的计算公式是: (掩星时刻日下点在火固系中的经度 - 此时太阳在火固系中的经度)/15<sup>h</sup>+12<sup>h</sup>。

(4)  $SZA$  (Solar Zenith Angle): 掩星发生时刻当地天顶方向和太阳方向之间的夹角, 即掩星发生时刻太阳的天顶距。

(5)  $N_m$ : 一个廓线内的峰值电子浓度。

(6)  $H_m$ : 峰值电子浓度对应的高度值, 参考水准面的赤道半径是 3396 km。

(7)  $c$ : Chapman 模型中的参数。

(8)  $H_0$ : Chapman 模型中的参数, 称为标高。

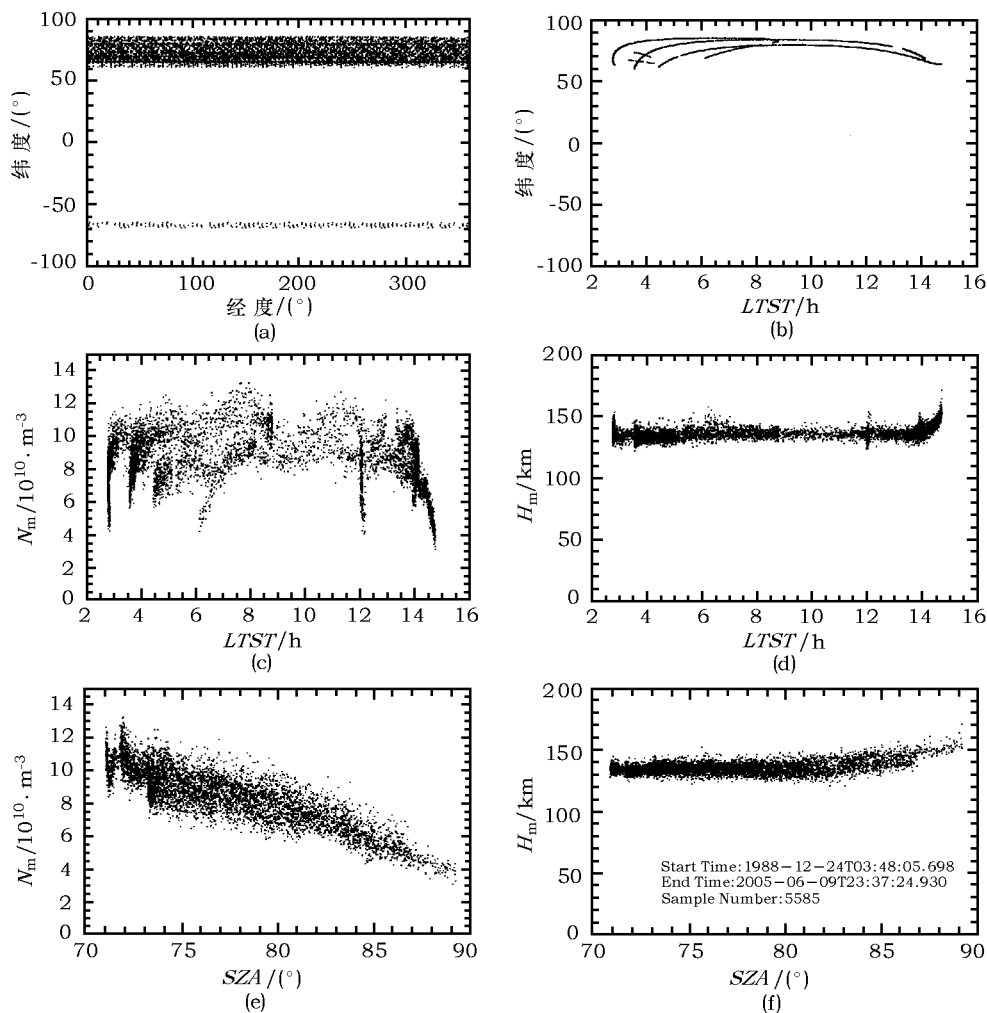


图 1 MGS/RS EDS 数据

(a) 在经度、纬度上的分布; (b) 在  $LTST$ 、纬度上的分布; (c) 峰值电子浓度随  $LTST$  的变化;

(d) 峰值高度随  $LTST$  的变化; (e) 峰值电子浓度随  $SZA$  的变化; (f) 峰值高度随  $SZA$  的变化

从表 1 得出火星电离层的分布特性如下:

- (1) 太阳天顶角  $SZA$  的变化范围:  $70.96^\circ \sim 89.22^\circ$ ;
  - (2) 电离层峰值高度的变化范围为  $120 \sim 170$  km;
  - (3) 连续掩星观测的经度间隔大约为  $55^\circ$  (mors\_1007) 或  $28^\circ$  (其他数据集);
  - (4)  $Sun\_Mars\_lon$  是太阳在火固系中的经度, 可以反映火星上的季节变化, 其取  $0^\circ$  和  $180^\circ$  值则是火固系中的春秋分点, 取  $90^\circ$  和  $270^\circ$  则对应于北半球夏至和冬至。
- 可进一步将数据按照季节性分布划分为三部分。

- (1) mors\_1007, 1010, 1011, 1019, 1023, 1027 的数据对应的纬度在  $64.7^\circ \sim 77.6^\circ\text{N}$  之间,  $Sun\_Mars\_lon$  的范围为:  $70^\circ \sim 120^\circ$ , 其时刻对应于北半球夏至日附近, 近远日点;
- (2) mors\_1015 的数据对应的纬度范围为  $64.7^\circ \sim 69.1^\circ\text{S}$ ,  $Sun\_Mars\_lon$  在  $135^\circ \sim 146^\circ$  之间, 南半球近分点;
- (3) 其他数据集: mors\_1024, 1028, 1029, 1030, 1035, 1036 的数据对应的纬度范围为  $60.6^\circ \sim 85.5^\circ\text{N}$ ,  $Sun\_Mars\_lon$  在  $110.9^\circ \sim 227.3^\circ$  之间, 北半球分点附近;

图 1 给出了峰值电子浓度和峰值高度随地方真太阳时、太阳天顶角的分布情况。从图 1(a) 可以看出除 mors\_1015 探测到南半球的电离层外, 其他数据都分布在北半球。从图 1(b) 可以看出北半球的数据主要分布在当地太阳时  $2.5^{\text{h}} \sim 15^{\text{h}}$ , 南半球的数据主要在  $12^{\text{h}}$  左右。

### 3.2 MGS 电子浓度廓线的峰值高度随经度的分布特点

根据上节对 MGS/RS EDS 数据的季节性划分, 下面选取了几组数据进行分析。给出了峰值高度随经度的分布, 并对南北半球的数据进行了简单的对比分析, 参见表 2 和图 2、图 3。

表 2 mors\_1007, 1011, 1019, 1015 的数据分布情况

File name (Profile num.)	Date	$LTST$	$SZA$	$N_m$	$H_m$	$c$	$H_0$	$Sun - lat$	
		/h	/( $^\circ$ )	/ $10^{10} \cdot \text{m}^{-3}$	/km		/km	/( $^\circ$ )	
mors_1007	1998.12	min	3.34	78.40	6.756	128.04	0.35	9.87	24.17
(32)	(24~31)	max	4.26	80.80	9.611	144.11			24.53
mors_1011	2000.12	min	2.76	80.50	6.170	126.13	0.39	10.73	25.15
(134)	(09~21)	max	2.78	82.20	9.486	144.41			25.19
mors_1019	2000.12.09~	min	2.76	75.31	5.985	124.49	0.40	10.47	23.43
(448)	2001.01.31	max	3.08	82.20	11.466	144.41			25.19
mors_1015	1999.05	min	12.0	78.5	4.014	123.20	0.44	11.15	13.68
(32)	(06~29)	max	12.2	86.9	10.494	153.60			17.62

表 2 中, mors\_1007, 1011, 1019 数据集都位于北半球远日点附近。mors\_1007 的太阳天顶角  $SZA$  变化很小, 对应的地方太阳时  $LTST$  在  $3^{\text{h}} \sim 4^{\text{h}}$  的范围内。mors\_1011 是 mors\_1019 的一个子集, 前者只有 134 组廓线,  $SZA$  的范围是  $80.5^\circ \sim 82.2^\circ$ ; 后者有 448 组廓线, 但  $SZA$  的范围要大得多。mors\_1015 数据集位于南半球近分点附近, 对应于冬季中午。

图 2(a) 给出了 mors\_1015 的峰值浓度随  $SZA$  的分布,  $N_m$  随  $SZA$  的增加递减。这一现象是光化学平衡的一个重要性质<sup>[24]</sup>。图 2(b) 给出了 mors\_1015 的峰值高度随  $SZA$  的分布,  $H_m$  随  $SZA$  的增加呈较大的坡度递增。

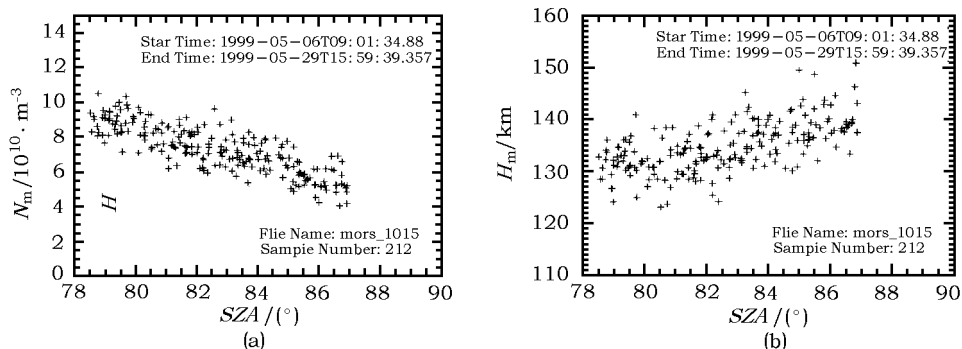


图 2 (a) mors\_1015 的峰值浓度随  $SZA$  的分布, (b) mors\_1015 的峰值高度随  $SZA$  的分布

mors\_1007, 1011, 1019, 1015 各数据集的峰值高度  $H_m$  随经度有比较明显的变化, 可以用高斯方法对这些数据进行拟合处理。我们采用了 4 阶高斯拟合公式, 其表达式为:

$$y(x) = a_1 e^{-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 e^{-\left(\frac{x-b_2}{c_1}\right)^2} + a_3 e^{-\left(\frac{x-b_3}{c_1}\right)^2} + a_4 e^{-\left(\frac{x-b_4}{c_1}\right)^2} \quad (1)$$

得到的拟合曲线如图 3 所示。其中黑点为  $H_m$  数据点, 实线为拟合曲线, 虚线为置信区间的预测边界。从图 3(a, b, c) 可以看出位于北半球的 mors\_1007, 1011, 1019 数据集的峰值高

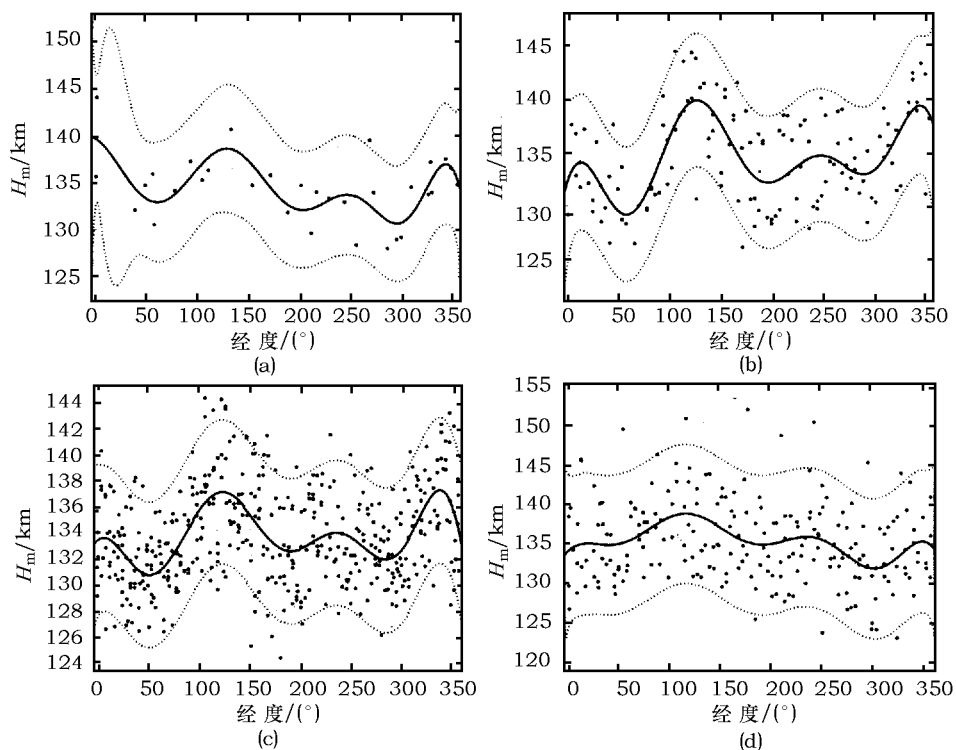


图 3 高斯拟合结果

(a) mors\_1007, (b) mors\_1011, (c) mors\_1019, (d) mors\_1015, 置信度为 90%, 虚线表示预测的置信区间边界

度随经度变化的趋势比较接近, 在  $130^\circ \pm 10^\circ$  和  $0^\circ \pm 10^\circ$  处有明显的峰值, 但平均峰值高度有几 km 的差别。图 3(d) 中, 位于南半球的 mors\_1015 数据集的变化趋势明显不同于北半球的 3 个数据集。峰值高度随经度的变化与火星大气的波动特性是一致的, 也与低层大气的膨胀和收缩相对应<sup>[7]</sup>。SZA 和季节性条件是造成白天地方性火星电离层峰值高度变化的主要因素, 经度的变化是另外一个附加因素<sup>[24]</sup>。

### 3.3 火星电离层的电子浓度廓线

作为一种电离介质, 电离层在无线电波的传播中扮演着重要的角色。火星电离层和地球电离层有很多不同之处, 因为火星离太阳更远, 太阳辐射比较低, 导致火星电离层中的等离子体密度也比较低。地球电离层大致可分为四层, 一般认为火星电离层只有一层从 100 到几百 km 的电离气体。地球电离层被很强的行星际磁场包围, 可以免受太阳风的影响, 相比之下, 火星由于没有这样一个强磁场的保护, 直接暴露于太阳风中<sup>[9]</sup>。

现在对地球电离层的许多现象还不是了解得很清楚, 这通常是因为磁场带来的一些复杂效应, 如控制进入的带电离子、影响电离层的运动、储存高能离子提供可能的加热和电离源、影响和控制小尺度和大尺度上的电离层异常、对太阳风的部分防护等。对火星电离层的研究应该有助于区分和理解地球电离层的不同现象, 更好地理解火星大气和电离层的形成和损失机制及其物理特性<sup>[9]</sup>。

#### 3.3.1 火星电离层的 Chapman 模型

对火星电子浓度白天廓线的分析, 一般都是将峰值电子浓度和上层部分廓线与 Chapman 模型预测的行为特性进行比较。可以用一个理想的 Chapman 层:

$$N(h)/N_{m,F1} = \exp\left\{c\left[1 - z - \sec \chi e^{-z}\right]\right\},$$

$$z = (h - H_{m,F1})/H_0 \quad (2)$$

表示火星的上层电离大气。该层主要是由太阳风等离子体和典型的未磁化行星大气相互作用产生的<sup>[25]</sup>。其中,  $N_{m,F1}$  是火星电离层主要峰值即 F<sub>1</sub> 层峰值电子浓度,  $H_{m,F1}$  是 F<sub>1</sub> 层峰值高度,  $H_0$  是标高,  $\chi$  是太阳天顶角。

用式 (2) 的模型进行最小二乘法拟合, 可给出峰值高度附近的电子浓度曲线, 并得到模型中的两个参数  $c$  和  $H_0$ 。对每个数据集里的参数值求平均, 结果在表 1 中  $z$  最后两列给出。图 4 是

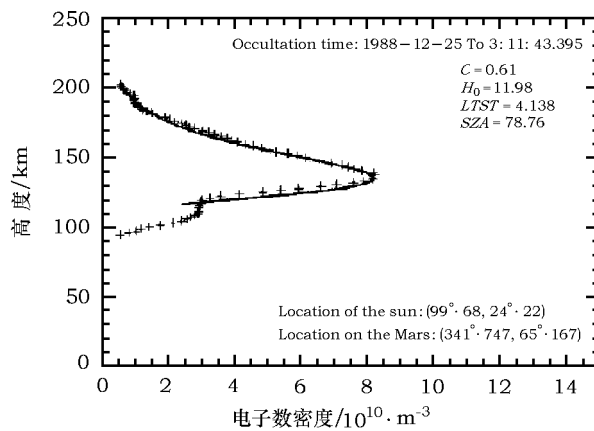


图 4 MGS 探测到的火星电离层电子浓度廓线

典型的火星电离层电子浓度廓线 (其中, 点为实测数据, 实线为用 Chapman 模型拟合的结果)。

电离层受太阳位置的影响较大。火星电离层电子浓度廓线并不完全呈现单一峰值, 而是大部分呈现明显的双峰或多峰 (如图 5 所示), 显示火星的电离层可能存在两层或多层结构。最小二乘拟合时, 必须合理选取  $c$  和  $H_0$  的初值才能使求解收敛。实际数据处理中先根据方差最小的原则得到  $c$  和  $H_0$  的一组初值, 然后再代入进行最小二乘拟合求解, 减少了不收敛的几率。

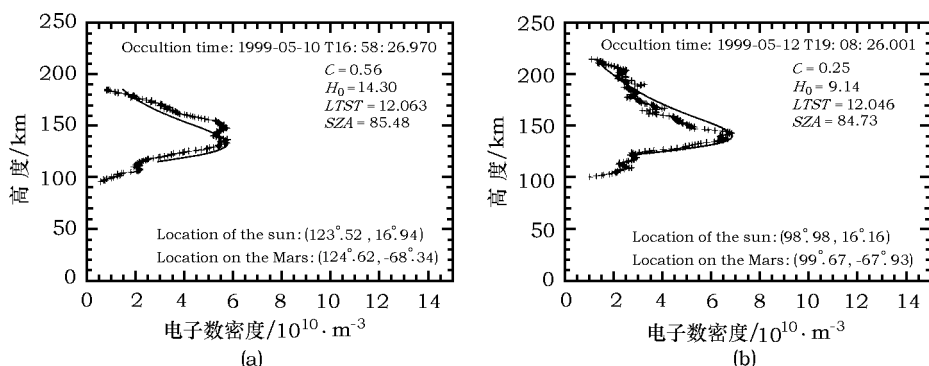


图 5 MGS 探测到的火星电离层电子浓度廓线

(a) 双峰, (b) 多峰情况

### 3.3.2 火星电离层的双层和多层结构

随着火星观测数据的累积和精度的提高, 大量的实测电离层廓线都不是简单的单峰廓线, 呈现了双峰和多峰结构的特点。从图 4 可以看出, 在 137 km 处有一个主峰, 接近 110 km 处有一个副峰,  $F_1$  峰值处的离子主要是  $O_2^+$ , 该层主要是太阳的紫外辐射引起的; 副峰的离子主要是  $O_2^+$  和  $NO^+$ , 该层是由于软 X 射线电离而产生的 [7]。  $F_1$  峰值的变化可作为到达火星的太阳紫外辐射流量变化的主要指标。相比之下, 软 X 射线流量随太阳周期的变化更明显, 所以副峰的峰值浓度在太阳活动高峰期变化更显著 [7]。 Bougher S.W. 等人通过比较 MGS/RS 得到的电离层峰值高度随经度的波数 3 的振荡和 MGS Accelerometer 得到的中性大气密度随经度的变化, 发现两者之间的变化趋势非常相似, 与半日潮的频率是一致的。指出  $F_1$  层峰值高度是火星低层大气和高层大气耦合的一个重要指标 [8]。

从图 5(a) 可以看出在 136 km 和 146 km 处有两个主峰, 图 5 (b) 中则存在两个主峰和几个明显的副峰。火星电离层电子浓度廓线的双峰和多峰结构, 可能是太阳风压剧烈变化的情况下太阳风与电离层的相互作用引起的 [24]。以前对火星电离层的测量和建模表明在大约 180 km 以下的电离层白天不存在垂直的和水平的离子传输 [24], 主要峰值即  $F_1$  层峰值是受光化学过程控制的,  $F_1$  层峰值高度的分布是由太阳紫外辐射穿透大气的深度决定的, 因此也同中性大气的结构相关 [7]。同时由于某些原因使得 Chapman 模型不能完全解释火星电离层的结构和物理特性, 如由于扩散和对流导致大部分电离层中的内部电离传输, 这种再分配导致了电子浓度廓线不仅取决于区域的产生率和损失率而且取决于压强梯度、离子与中性大气、离子与离子以及离子和电子的碰撞频率 [26]。

### 3.3.3 峰值浓度和峰值高度同太阳天顶角的关系

峰值电子浓度  $N_m$  和峰值高度  $H_m$  与太阳天顶角  $SZA$  之间存在如下函数关系 [26] :



$$N_m = N_0(\cos \chi)^k . \quad (3)$$

$$H_m = H_0 + H \ln \sec \chi . \quad (4)$$

其中,  $N_0, H_0$  是太阳天顶角  $\chi$  为  $0^\circ$  时的峰值电子浓度和峰值高度;  $H$  是中性大气的标高。对于理想的 Chapman 模型 ( $k$  为 0.5), 电离层处于光化学平衡, 中性大气的标高为定值。火星电离层白天的峰值浓度和峰值高度的变化都比较平稳。太阳活动极大时,  $N_0$  可以达到  $2.5 \times 10^5 / \text{cm}^3$ , 相应的临界频率为 4.5 MHz。太阳活动极小时,  $N_0$  大约为  $1.0 \times 10^5 / \text{cm}^3$ , 临界频率为 2.85 MHz。低于 4.5 MHz 的电波基本上不能穿透火星电离层, 但火星电离层对 450 MHz 之上的电波几乎是透明的 [27]。

利用 MGS/RS EDS 中的峰值浓度和峰值高度数据, 根据 (3) 和 (4) 式进行最小二乘拟合得到的一组参数为:  $k = 0.44, N_0 = 1.7 \times 10^5 / \text{cm}^3, H_0 = 126.75 \text{ km}, H = 13.35 \text{ km}$ 。

### 3.3.4 火星电离层的 TEC 值分布

对火星电离层电子浓度廓线按下面 (5) 式在高度上积分可得到总电子含量 TEC (Total electron content) 大约为  $0.4 \times 10^{16} / \text{m}^2$ , 约是地球电离层的 TEC 值 ( $2.0 \times 10^{17} / \text{m}^2$ ) 的 1/50。

$$TEC = \int N_e(h) dh \quad (5)$$

$$\tau = TEC / N_{e, \max} , \quad (6)$$

根据式 (6) 又可以得到相应的电离层厚度  $\tau$  及不同 TEC 值或电离层厚度范围内的电子浓度廓线个数分布情况。图 6(a) 给出了 6 个数据集中 TEC 含量的分布情况, 其相应的电离层厚度如图 6(b) 所示。虽然火星电离层的峰值高度和 TEC 值相对于地球电离层都较低, 但仍然可以使将来在火星上进行异地通讯成为可能 [27]。

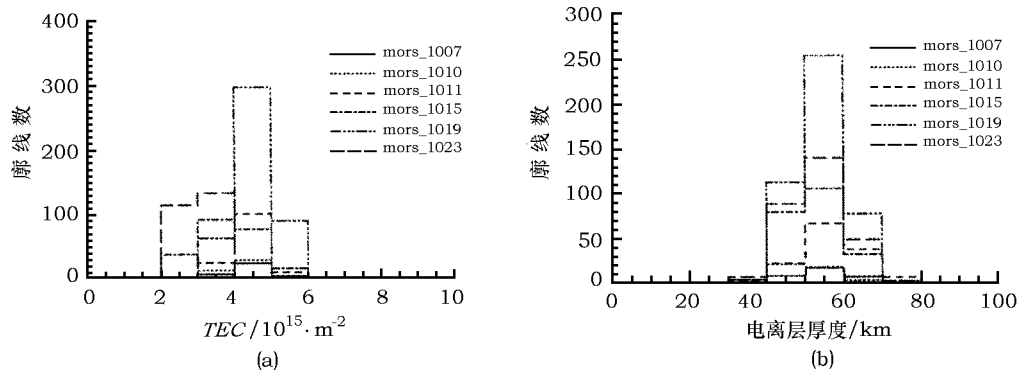


图 6 前 6 组火星电离层 EDS 数据集的分布: (a) TEC 值, (b) 电离层厚度

## 4 结 语

从 20 世纪 60 年代开始, 很多行星探测任务利用了无线电掩星技术来探测太阳系内的各大行星, 得到了大量的行星大气、磁场、等离子体、行星环等重要信息。近年来国际上陆续开展的行星探测计划有 Cassini, Cassini-Huygens, Rosetta, Mars Express, Venus Express 及中俄联合火星探测计划等。

MGS 火星掩星观测取得了卓越的成果, 得到了大量的火星电离层和大气的数据。但由于星地掩星几何构型的限制, 只能探测到太阳天顶角  $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$  的区域。在中俄联合火星探测计划中, 将利用 YH-1 和 Phobos-Grunt 进行星-星掩星观测, 探测火星中午和子夜的电离层。这对火星大气的全球一体化研究将是有力的补充。

本文初步分析了 NASA PDS 公布的 MGS 无线电掩星火星电离层观测数据, 并简单介绍了行星无线电掩星的历史和原理。结合火星电离层的物理特性, 重点分析了峰值高度相对于经度、峰值电子浓度和峰值高度相对于太阳天顶角的变化, 探讨了火星电离层的双层和多层结构。对多层结构模型的数学化和物理背景的研究是下一步需要开展的任务。相信本文的工作将为我国参与中俄联合火星计划中 YH-1 和 Phobos-Grunt 掩星观测任务打下一定的基础。

**致谢** 本研究还得到中国科学院“天文地球动力学方向”百人计划、中俄合作“萤火-1”火星探测工程 VLBI 测控分系统、上海市导航定轨重点实验室的支持, 特此致谢。

### 参考文献:

- [1] Asmar S W, Renzetti N A. The Deep Space Network as an instrument for radio science research. Pasadena: JPL Publication, 1993: 80
- [2] Albee A L, Palluconi F D, Arvidson R E *et al.* Science, 1998, 279(5357): 1671
- [3] Fjeldbo G, Kliore A J, Eshleman V R. AJ, 1971, 76(2): 123
- [4] Hinson D P, Simpson R A, Twicken J D *et al.* JGR, 1999, 104(E11): 26997
- [5] Cahoy K L, Hinson D P, Tyler G L. JGR, 2006, 111(E05003): 2
- [6] Hinson D P, Wilson R J. JGR, 2004, 109(E01002): 1-2
- [7] Bougher S W, Engel S. GRL, 2001, 28(16): 3091
- [8] Bougher S W, Engel S, Hinson D P *et al.* JGR, 2004, 109(E03010): 1-5
- [9] Kliore A, Cain D L, Levy G S *et al.* Science, 1965, 149: 1243
- [10] Eshleman V R, Tyler G L, Anderson J D *et al.* SSR, 1977, 21: 207
- [11] Tyler G L, Balmino G, Hinson D P *et al.* JGR, 1992, 97: 7759
- [12] Kliore A, Levy G S, Cain D L *et al.* Science, 1967, 158: 1683
- [13] Kliore A, Fjeldbo G, Seidel B L *et al.* Science, 1969, 166: 1393
- [14] Kliore A, Cain D L, Fjeldbo G *et al.* Icarus, 1972, 17: 484
- [15] Kliore A, Fjeldbo G, Seidel B L *et al.* JGR, 1973, 78: 4331
- [16] Lindal G F, Wood G E, Levy G S *et al.* JGR, 1981, 86A: 8721
- [17] Lindal G F, Sweetnam D N, Eshleman V R *et al.* AJ, 1985, 90: 1136
- [18] Lindal G F, Lyons J R, Sweetnam D N *et al.* JGR, 1987, 92: 14987
- [19] Lindal G F. AJ, 1992, 103: 967
- [20] Fjeldbo G, Eshleman V R, Garriott O K *et al.* JGR, 1965, 70: 3701
- [21] Fjeldbo G, Eshleman V R. PSS, 1968, 16: 1035
- [22] Pätzold M. Mars: Mars Radio Science Experiment. <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=31033&fbodylongid=660>, 2006
- [23] <http://pds-geosciences.wustl.edu/missions/mgs/rsdata.html>, 2008
- [24] Zhang M H G, Luhmann J G, Kliore A J. JGR, 1990, 95: 17095
- [25] 熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论. 武汉: 武汉大学出版社, 1997: 53
- [26] Zhang M H G, Luhmann J G, Kliore A J *et al.* JGR, 1990, 95: 14829
- [27] Ho C, Golshan N, Kliore A. Radio Wave Propagation Handbook for Communication on and Around Mars. Pasadena: JPL Publication, 2002: 10~17

## Preliminary Analysis of Martian Ionospheric Observation data Based on MGS Radio Occultation Experiment

ZHANG Su-jun<sup>1,2</sup>, SHI Xian<sup>1,2</sup>, PING Jin-song<sup>1</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Investigations of planetary atmospheres, ionospheres, rings, and magnetic fields using radio occultation techniques have been conducted by almost every planetary mission and are planned for many future ones. Changes in the frequency, phase, and amplitude of spacecraft radio signal, caused by passage through the atmosphere and ionosphere of the planet, were observed immediately before and after occultation by the planet. According to an inversion method we can get the refractivity, density in the atmosphere near the surface, the scale height in the atmosphere, and the electron density profile of the ionosphere. Over 17 000 radio occultation experiments conducted with MGS since early 1998 have derived two subset data products from the source profiles. Using the data set EDS provided by the MGS Radio Science experiment, we get some figures and tables. As the dayside ionosphere of Mars resembles the Chapman model, we use the least square method to fit the EDS data set, get two parameters  $c$  and  $H_0$  in this model. Also the phenomenon of double layers and multilayers of Martian ionosphere is validated and discussed. This phenomenon may reflect the solar wind interaction with the ionosphere under highly variable solar wind dynamic pressure conditions. The change of the peak electron density  $N_m$  and peak height  $H_m$  relative to longitude,  $LTST$ , and  $SZA$  in different datasets is discussed. The primary electron density peak is under the local control of photochemical processes. The location of the Martian ionospheric  $F_1$  peak height is determined by how deeply the solar EUV radiation penetrates into the atmosphere. The secondary electron density peak is controlled by soft X-ray ionization, it should be more prominent at high solar activity. The heights of both primary and secondary electron density peaks are regulated by the underlying neutral atmospheric structure. But due to the restriction of spacecraft-earth occultation geometry, only areas in the solar zenith angle of  $45^\circ \sim 135^\circ$  can be detected in this way. In the future Chinese-Russian joint Mars mission, spacecraft-spacecraft occultation will be utilized to detect the dayside and nightside ionosphere, which will greatly complement the global exploration of Martian atmosphere.

**Key words:** radio occultation technique; MGS; Mars; ionosphere