0254-6124/2012/32(6)-765–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Liu Tongdi, Li Lei, Zhang Yiteng, Xie Lianghai. Global distribution of currents in Martian space. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 765-770

火星空间大尺度电流体系分布特征 *

刘童笛[1,2] 李 磊[1] 张艺腾[1] 谢良海[1,2]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 在 MHD 模型基础上, 对火星空间环境的电流分布进行了模拟. 结果表明, 火星空间存在着弓激波电流、磁堆积区电流、电离层电流和磁尾电流. 弓激波电流在激波曲面上均由北向南自成体系, 电流密度在弓激波顶区域较大. 在向阳面磁堆积区边界电流与电离层电流彼此耦合形成完整的回路, 在背阳面磁堆积区边界电流与磁尾中心电流片耦合形成完整的回路.

关键词 火星, 电流, 弓激波, 磁堆积区, 电离层, 磁尾

中图法分类号 P 353

Global Distribution of Currents in Martian Space

LIU Tongdi[1,2] LI Lei[1] ZHANG Yiteng[1] XIE Lianghai[1,2]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Based on the MHD model, the distribution of the currents in Martian space is calculated. The results show that there are 4 categories of currents, *i.e.*, the bow-shock current, magnetic pileup boundary current, the ionosphere current and the magnetotail current in Martian space. Currents flow on the surface of the bow-shock independently, which direction are perpendicular to the interplanetary magnetic field direction, with the peak current density located around the subsolar point. At dayside, the magnetic pileup boundary current closes through the ionosphere; while at nightside, magnetic pileup boundary current couples with central current sheet in the magnetotail to form a complete circuit. Magnetotail central currents near Mars within 1.2 $R_{\rm m}$ affected greatly by the ionosphere, would be separated for two or more current slices coupling together. The strength of ionosphere current, flowing from south to north, is the biggest in all, more than 100 $\rm nA{\cdot}m^{-2}$ in average; and the strength at dayside is bigger compared to that of the nightside.

Key words Mars, Current sheet, Bow-shock, Magnetic pileup region, Ionosphere, Magnetotail

* 国家自然科学基金面上项目资助 (40974108)

2011-04-25 收到原稿, 2011-12-18 收到修定稿

E-mail: liutongdi_163@163.com

0 引言

火星是一颗全球性固有磁场很小但局部磁异常区分布广泛的行星 [1−2]. 火星对太阳风运动的阻碍主要来自大气层和电离层 [3]. 太阳风遇到障碍后, 减速并产生方向偏转, 在火星上游形成弓激波. 行星际磁场 (IMF) 磁力线在经过火星时, 无法穿透导电的电离层, 部分磁力线在电离层内扩散, 悬挂在电离层上 [4], 在向阳面形成接近水平方向的磁场; 大部分 IMF 磁力线随着太阳风的对流, 绕过电离层到达背阳面, 并沿太阳风流动方向延伸, 形成磁尾. 火星磁尾由两个磁场方向相反的尾瓣构成, 两个尾瓣由中心电流片分隔开来. 观测表明, 火星附近存在三个明确的等离子体边界, 即弓激波、磁堆积边界、电离层顶 [5]. 火星磁异常能够干扰太阳风与火星的相互作用, 但其影响只是局域性的, 不会从总体上改变太阳风与火星相互作用的性质 [6].

最早 Phobos 卫星在距离火星球心 2.86 $R_{\rm m}$ ($R_{\rm m}$ 为火星半径, 1 $R_{\rm m}$ = 3396 km) 处观测到磁尾中心电流片, 确认火星的磁尾是由被火星拖曳的 IMF 构成的, 尾瓣和电流片的结构、方向由 IMF 方向控制 [7−8]. MGS 卫星在 400 km 高度的轨道上也多次穿越电流片, 其中多数穿越事件发生在背阳面和两极区域 [3]. 根据 MGS 的观测结果分析, 向阳面电流片是当太阳风遇到火星阻碍后 IMF 发生压缩形成的; 而背阳面以及两极的电流主要是被拖曳的磁力线形成反向磁场而产生的 [9]. 在背阳面, 即使 400 km 高度, 仍然可以观测到磁场两个尾瓣的结构及分隔尾瓣的电流片, 尽管火星表面分布有很多大小不一的磁异常区域, 但总体上电流片的方向仍然与拖曳的磁场形成的电流片方向一致 [10].

受卫星轨道的限制, 到目前为止, 对火星空间电流系的观测仍然是局域性的. 全球性的 MHD 模拟 [11] 能够较好地体现太阳风与火星的相互作用. 例如, 在火星磁尾中心出现的近似于 V 字形反向平行的磁场及在磁堆积区磁场的压缩等 [12], 因此, 本文在 MHD 模型基础上计算了火星空间电流, 试图给出火星全球电流体系的概貌.

1 火星空间电流模型

采用单流体多成分 MHD 模型模拟得到太阳风与火星相互作用的结果 [11]. MHD 模拟采用火星太阳轨道 (MSO) 坐标系, 即坐标原点位于火星球心, x 轴由火心指向太阳, y 轴指向火星公转的反方向, z 轴由右手螺旋法则确定, 垂直于火星公转轨道面. 日下点对应的火星地理位置为 (180°W, 0°S). 计算中考虑了火星磁异常, 中心位于 179°W, 58°S 最强磁异常区在日下点附近. 太阳风来流条件采用火星轨道的平均值, 太阳风速度为 400 km·s^{-1}、密度 4 cm^{-3}, IMF 位于 xy 平面内, 与 x 轴的夹角为 56°, $B_{\rm IMF}$ = 3 nT, 火星表面平均磁场强度取为 5 nT.

图 1 给出的是 MHD 模拟的磁场强度空间分布, 图 1(a) 为赤道面上的磁场, 图 1(b) 为中心子午面上的磁场 [13]. 从图 1 可以看到太阳风与火星相互作用形成的不同区域, 即弓激波 (bow shock)、磁堆积区 (magnetic pileup region)、磁堆积边界区 (magnetic pileup boundary)、电离层 (ionosphere) 和磁尾 (magnetotail). 在向阳面, 行星际磁场在穿越弓激波时发生压缩、偏转, 在磁堆积区, 磁场进一步压缩, 磁力线悬挂在电离层上; 在背阳面, 磁场近似为反向平行, 形成两个尾瓣.

在上述模拟结果的基础上, 由磁场矢量 $\boldsymbol{B}$, 根据麦克斯韦方程, 可以计算得到电流密度

$$\boldsymbol{J} = \frac{1}{\mu_0}\nabla \times \boldsymbol{B}. \tag{1}$$

其中, μ_0 为真空磁导率, 取为 $4\pi \times 10^{-7}$N·A^{-2}. 根据式 (1) 可以得出, 在磁场有变化的区域, 就可能存在电流. 因此, 磁场发生压缩及磁场方向出现偏转、反向的位置都会形成电流片. 在火星空间, 从图 1 可以看出, 火星空间的弓激波、磁堆积区、电离层区域以及磁尾的磁场变化都比较剧烈, 可以推断这些区域相应地存在电流分布.

2 火星空间电流分布

图 2 分别给出了火星空间电流强度在 xy, xz 面的分布. 从图 2 可以明显看到弓激波、磁堆积区、电离层、磁尾均存在着电流. 其中, 弓激波和磁尾的电流强度较小, 磁堆积区和电离层的电流强度较大, 这 4 个电流区域可以在图 1 所示的磁场分布中一一找到, 即磁场变化较大的位置. 下面对每个区域电流分别进行分析.

当超音速太阳风携带 IMF 吹向火星时, 运动受

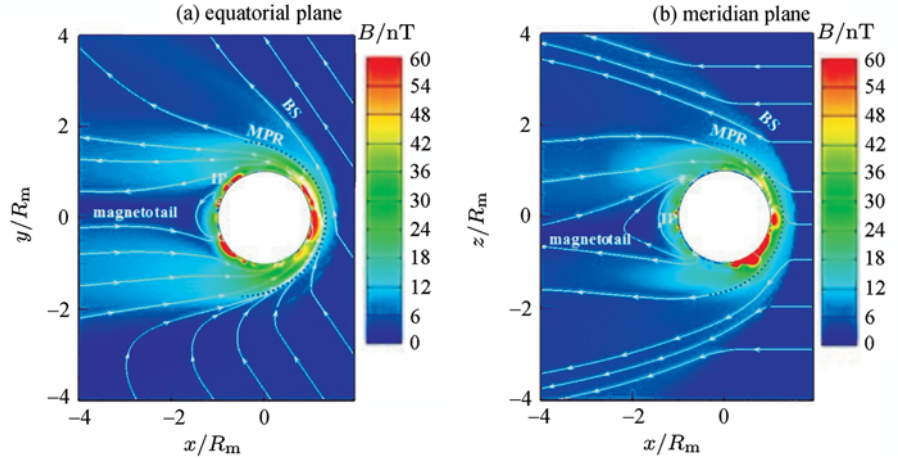

图 1　火星空间磁场强度 (白色曲线为磁力线, 黑色虚线代表弓激波和磁堆积区边界的位置)

Fig. 1　Strength distribution of magnetic field of Mars space (White lines marked with arrows indicate the vector direction of the magnetic field and black dashed lines show the locations of mean bow-shock and magnetic pileup boundary)

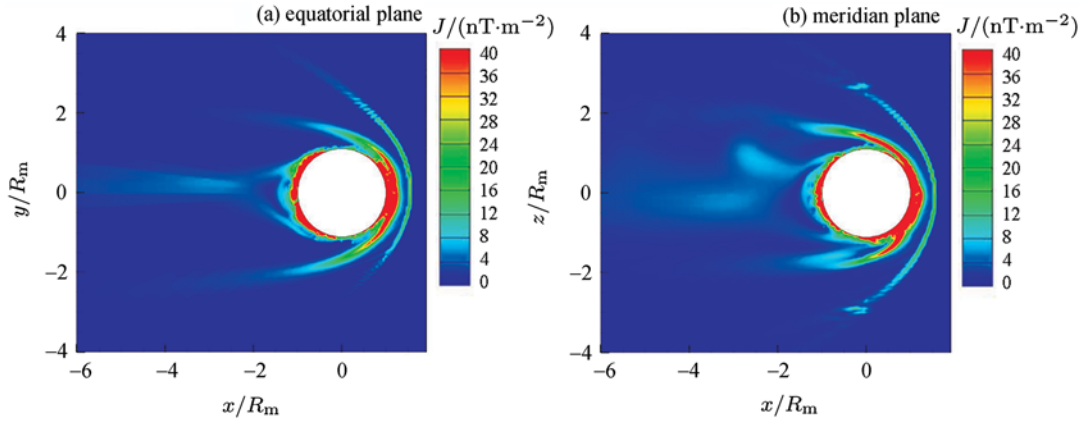

图 2　火星空间电流强度分布

Fig. 2　Strength distribution of currents flow of Mars space

到火星的阻碍, 在火星附近形成弓激波. IMF 在通过弓激波面时发生压缩和方向偏转, 在弓激波面上形成感应电流. 这里采用双曲面来代表弓激波的平均位置 [13], 根据式 (1) 计算弓激波面上的电流强度, 结果如图 3 所示. 由于电流密度对应于磁场的旋度, 本文计算中行星际磁场在赤道面内并与 x 轴成 56° 夹角, 从图 3 可以看出, 电流方向基本为沿弓激波面由北向南, 在赤道面上与 IMF 相互垂直, 弓激波日下点平均位置在距离火星球心 1.58 $R_{\rm m}$ 处. 太阳风平行于 x 轴吹向火星, 在弓激波日下点, 太阳风速度迅速减弱到极小, IMF 变化也最剧烈, 因此, 电流密度在日下点附近达最大值, 即 30 nA·m^{-2} 以上, 然后沿弓激波曲面向 $-x$ 方向逐渐减弱, 直到 1 nA·m^{-2} 以下.

磁堆积区边界位于弓激波和电离层顶之间, 其是由火星重离子与磁鞘内减速后的太阳风粒子相互作用形成的特殊边界 [5]. 在磁堆积区, 磁场出现压缩, 因此, 磁堆积区边界上必然存在电流片. 这里采用一个经验模式来计算磁堆积区边界的位置 [13], 得到其向阳面平均位置位于距离火星球心 1.29 $R_{\rm m}$ 的高度, 进而按式 (1) 计算磁堆积区边界面上的电流强度. 图 4 给出了向阳面磁堆积区边界上的电流分布, 白色箭头表示电流的流向, 曲面背景为对应电流密度值.

图 4(a) 给出的是向阳面磁堆积区边界上电流密度的三维分布, 图 4(b) (c) (d) 分别对应于赤道面、中心子午面、$x = 0$ 截面上磁堆积区边界电流密度的投影. 根据图 4(a), 结合图 4(b) (d) 可以看出, 磁堆积区边界上的电流从火星北半球极区附近流出, 分成两路沿顺时针和逆时针方向流向南半球极区附近, 一直流入到电离层中, 如图 4(d) 所示. 从图 4(a) (d) 可以看出, 流出源和流入源与火星南北两极并不重合, 而是有一定的夹角. 与图 3 比较, 磁堆积区电流强度比弓激波电流强度平均大一个量级左右. 另外, 从图 4(b) (c) (d) 还能看出子午面附近的电流强度要比晨昏面附近的大很多, 部分区域例如南半球区域以及两极附近的电流强度更大, 另外, 与晨昏面附近的磁堆积区边界电流尺度相比, 向阳面磁堆积区边界电流被压缩到很小的区域. 由于磁堆积区的结构会受到磁异常影响 [6], 南半球和两极电流密度较强, 这很可能与火星磁异常有关.

从图 1 可以看到, 当 IMF 绕过电离层进入背阳面后, 在背阳面形成了磁场反向平行的两个尾瓣. 在尾瓣的中间, 是磁尾中心电流片. 为了避开磁异常区对大尺度电流系的影响, 这里考察了磁尾 $x \leqslant -2\,R_{\rm m}$

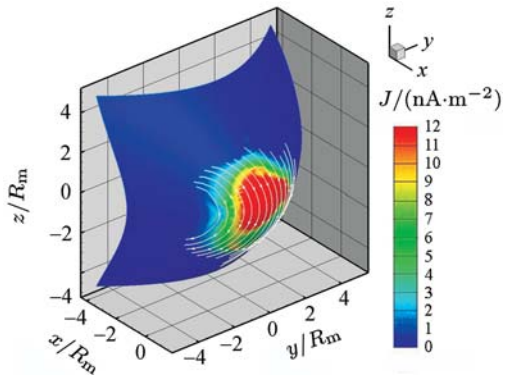

图 3 弓激波电流分布 (白色箭头为电流方向, 背景为对应电流密度值)

Fig. 3 Distribution of currents on the surface of bow-shock (White lines marked with arrows indicate the vector direction of the magnetic field and the background shows the strength distribution of currents flow)

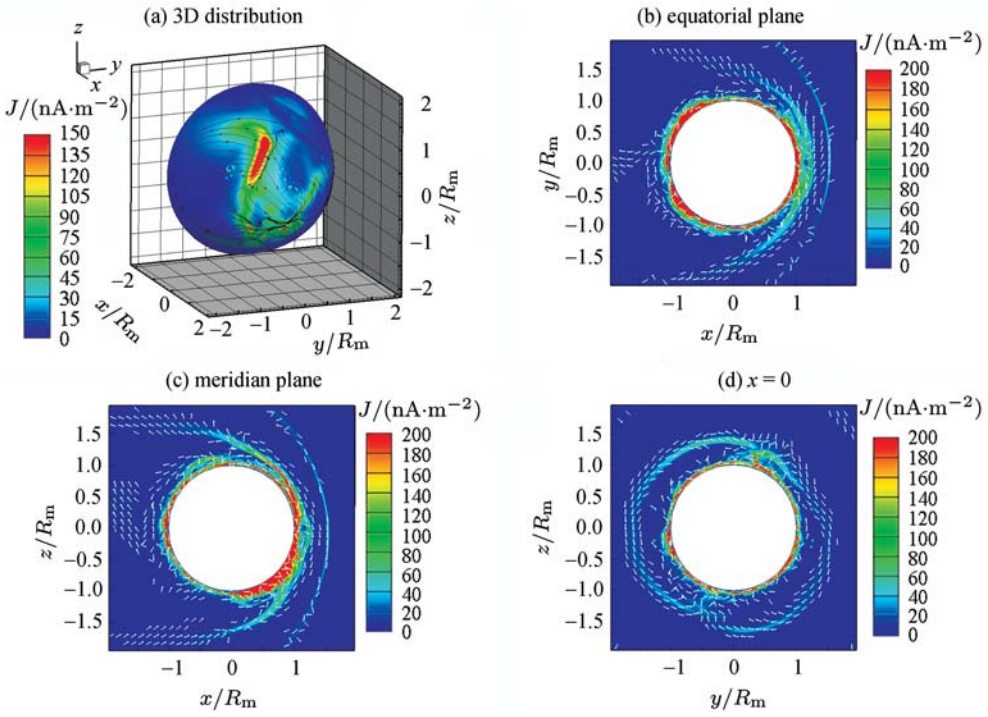

图 4 向阳面磁堆积区边界的电流分布 (黑色和白色箭头为电流密度的方向)

Fig. 4 Distribution of currents on the magnetic pileup boundary at dayside (Black and white arrows show the direction of the currents)

的电流分布, 图 5(a) (b) 分别给出了对应于背阳面 $x=-2.0\,R_{\rm m}$, $x=-3.0\,R_{\rm m}$ 处 yz 截面上的电流分布, 从中可以清晰看到中心电流片及背阳面磁堆积区边界上的电流片. 与向阳面比较 (见图 4), 背阳面磁堆积区边界上的电流片保持有类似的结构, 电流是沿磁堆积区边界分两路自北向南流动的. 不同点是, 背阳面磁堆积区电流与磁尾中心电流片连接起来, 构成了完整的回路. 磁尾中心电流片与 z 轴有一定的夹角, 模拟结果经测量平均约为 15°, 其方向与图 4(d) 中向阳面磁堆积区南北两电流源连线的方向一致, 均由行星际磁场的方向所控制 [7]. 比较图 5(a) (b), 背阳面磁尾电流沿着磁尾逐渐远离火星, 其结构形态几乎不

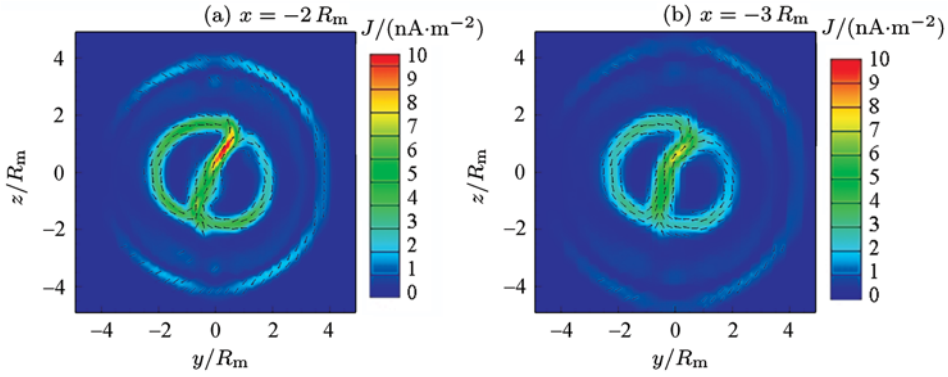

图 5 背阳面磁尾截面上的电流分布

Fig. 5 Distribution of currents on the magnetotail section at nightside

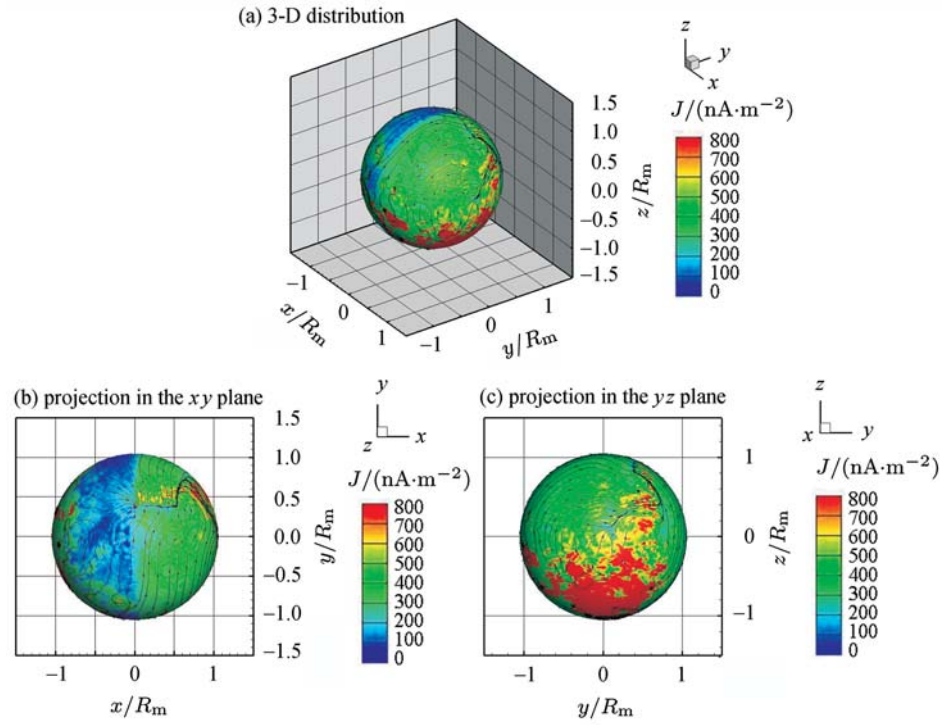

图 6 半径为 $1.1\,R_{\rm m}$ 球面上的电离层电流分布 (黑色流线为电流方向, 背景为电流密度值)

Fig. 6 Distribution of currents in $1.1\,R_{\rm m}$ sphere on the ionosphere (black lines marked with arrows indicate the vector direction of the currents flow and the background shows the strength distribution)

变化, 但其电流密度强度逐渐减弱. 可以想象, 在背阳面磁尾电流会随着远离火星而逐渐减弱直至消散.

火星电离层相当于一个导体, 运动的行星际磁场必定会在其中感应形成全球性的电流. 图 6 给出的是半径为 $1.1\,R_{\rm m}$ 球面上电离层电流的分布情况, 其中图 6(a) 为电离层电流的三维分布, 图 6(b) (c) 分别为电离层电流在 xy, yz 平面上的投影. 从图 6 可以看出, 电离层的电流密度强度是火星所有区域里最强的, 平均达到上百 $\rm nA{\cdot}m^{-2}$; 另外, 向阳面电离层电流强度平均比背阳面大得多, 晨昏线作为了电流强度强弱的分界面. 图 6(c) 显示出向阳面南半球电离层电流强度相对其他区域尤为强, 原因很可能与其位置下面分布着极强的磁异常有关, 计算结果表明某些区域甚至能够达到上万 $\rm nA{\cdot}m^{-2}$.

由此可见, 磁异常区域剧烈弯曲、变化的磁场在当地很可能会感应生成极强的电流.

另外, 从电离层电流的流向来看, 总体上是从南半球沿球面流向北半球, 并在北半球极区附近汇聚. 结合图 4(d) 中的电流密度投影可知, 在北半球极区附近汇聚的电离层电流又向上运动, 进入磁堆积区, 最终沿磁堆积区边界流入南半球电离层, 构成完整的电流回路. 图 6(c) 表明, 北半球电流分布比较有规律, 而南半球由于磁异常的影响, 电流分布和流向都比较杂乱.

3 结语

在 MHD 模拟结果的基础上, 对火星空间的电流体系进行了计算和分析. 结果表明, 火星空间存在着弓激波电流、磁堆积区边界电流、电离层电流和磁尾中心电流片. 当行星际磁场位于赤道面内, 弓激波电流由北向南自成体系, 电流强度在弓激波顶区域较大; 磁堆积区边界电流由北向南流动, 在向阳面与电离层电流构成回路, 而在背阳面与磁尾中心电流片耦合形成完整的回路.

本文研究的重点是火星空间的大尺度电流体系, 研究过程中同时发现, 在近火空间, 火星磁异常对电流分布会产生一定的影响. 有关磁异常区附近电流的形成机制及其分布规律还有待进一步深入研究.

参考文献

[1] Acuna M H, Connerney J E P, Wasilewski P,*et al*. Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission [J]. *Science*, 1998, **279**:1676-1678

[2] Brain D A, Bagenal F, Acuna M H. Martian magnetic morphology: Contributions from the solar wind and crust [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A12):1424-1426

[3] Luhmann N. Near-Mars space [J]. *Rev. Geophys.*, 1991, **29**(2):121-140

[4] Crider D H, Brain D A, Acuñ M H. Mars global surveyor observations of solar wind magnetic field draping around Mars [J]. *Space Sci. Rev.*, 2004, **111**:203-221

[5] Nagy A F, Winterhalter D, Sauer K,*et al*. The plasma environment of Mars [J]. *Space Sci. Rev.*, 2004, **111**:33-114

[6] Crider D H, Acuna M H, Connerney J E P *et al*. Observations of the latitude dependence of the location of the Martian magnetic pileup boundary [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**, 1170. doi:10.1029/2001GL013860

[7] Dubinin E, Lundin R, Norberg O. Pissarenko N. Ion acceleration in the Martian tail: Phobos observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:3991-3997

[8] Yeroshenko Y, Riedler W, Schwingenschuh K I, *et al*. The magnetotail of Mars: Phobos observations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**:885-888

[9] Helekas J S, Brain D A. Global distribution, structure, and solar wind control of low altitude current sheets at Mars [J]. *Icarus*, 2010, **206**:64-73

[10] Helekas J S, Brain D A, Lillis R J, *et al*. Current sheets at low altitudes in the martian magnetotail. Geophys [J]. *Res. Lett.*, 2006, 33. doi:10.1029/2006GL026229. L13101

[11] Ma Y, Nagy A F, Sokolov I V, Hansen K C. Three-dimensional, multispecies, high spatial resolution MHD studies of the solar wind interaction with Mars [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**, A07211, doi:10.1029/2003JA010367

[12] Zhang Y T, Li L. Feature of the Martial magnetic field structure [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(3):257-261

[13] Vignes D, Mazelle C, Rme H,*et al*. The solar wind interaction with Mars: Location and shapes of the bow shock and magnetic pileup boundary from observations of the MAG/ER experiment onboard Mars Global Surveyor [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**:49-52