0254-6124/2011/31(5)-567–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Shi Jiankui, Cheng Zhengwei, Wang Shengguo, Zhang T L, Liu Zhenxing. Theoretic study on formation and variation of magnetopause of planet Mars. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 567-572

火星磁层顶形成和变化的理论研究*

史建魁[1] 程征伟[1] 王胜国[1,2] Zhang T L[3] 刘振兴[1]

1(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)

2(北京应用气象研究所 北京 100081)

3(Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, 8042 Graz, Austria)

摘 要 考虑太阳风动压与行星电离层中的带电粒子热压及磁压之和平衡, 建立了有大气 (电离层) 的行星磁层顶形成的理论模型, 结合卫星对火星的观测数据, 对子午面内向日侧火星磁层顶位形进行了数值计算和分析, 研究了火星磁层顶位形及其与太阳风动压之间的变化关系. 结果认为, 火星磁层顶位形与地球磁层顶相似. 太阳风动压越大, 火星磁层顶越靠近火星; 太阳风动压越弱, 火星磁层顶越远离火星. 根据火星内秉磁矩从古到今逐渐减小的观点, 探索了大尺度磁场 (内禀磁矩) 对火星磁层顶的贡献作用, 结果认为大尺度磁场越强, 火星磁层顶越远离行星. 这对于进一步研究火星磁层的长期演化以及其他行星磁层的位形变化都具有重要的意义.

关键词 火星, 磁层顶, 位形和变化

中图法分类号 P 353, P 185.3

Theoretic Study on Formation and Variation of Magnetopause of Planet Mars

SHI Jiankui[1] CHENG Zhengwei[1] WANG Shengguo[1,2]

ZHANG T L[3] LIU Zhenxing[1]

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

2(*Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing* 100081)

3(*Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, 8042 Graz, Austria*)

Abstract It is known that Mars has no intrinsic magnetic field according to the observation, and it has an induced magnetosphere with a formation different from the Earth's. In this paper, to consider the balance between solar wind dynamic pressure and the planetary ionospheric charged particle pressure companying with a weak intrinsic magnetic field pressure, a model for formation of planet Mars magnetopause is established. According to the satellite observation, configuration of the dayside Martian magnetopause and its variation in the meridian planes are studied with the model. The results show that the configuration of the dayside Martian magnetopause has some similarities to the geo-magnetopause. The stronger the solar wind dynamic pressure is, the closer

* 国家自然科学基金项目 (41074114, 40921063), 国家重点实验室专项基金项目和中国科学院创新方向性项目 (KJCX2-YW-T13-3) 共同资助

2010-06-12 收到原稿, 2011-04-01 收到修定稿

E-mail: jkshi@cssar.ac.cn

the Martian magnetopause to the Mars surface will be. The weaker the solar wind dynamic pressure is, the farther the Martian magnetopause to the Mars surface will be. According to the view that the Martian intrinsic magnetic moment is reducing from ancient times to the present and it would be reversed, the role of the large scale magnetic field to the Martian magnetopause is studied with an assumed intrinsic magnetic moment. The results show that the stronger the intrinsic magnetic moment was, the further the Martian magnetopause to the Mars surface would be. The weaker the intrinsic magnetic moment was, the closer the Martian magnetopause to the Mars surface would be. These results are significant not only to study the long term variation of the Martian magnetosphere, but also to study the configuration of magnetopause in general planet.

Key words Mars, Magnetopause, Configuration and variation

1 引言

火星是地球的近邻, 在许多方面与地球相似. 有观点认为, 火星是地球的未来. 尽管对火星的天基探测开始较早, 同时进行了比较行星学研究, 并取得了一系列的探测和研究结果. 但至今, 火星上还有许多问题有待于深入研究.

1965 年, 水手 4 号飞船第一次探测到火星磁场、等离子体和磁层顶 [1]. 之后的许多飞船探测表明, 火星磁层顶前方有像地球那样的弓激波存在. 火卫-2 飞船发现, 火星弓激波的平均火心距离约为 $2.6\,R_{\rm m}$ ($R_{\rm m}$ 为火星半径), 火星弓形激波位置与太阳风压力有相关关系, 在太阳活动最大年可近达火心 $1.5\,R_{\rm m}$ 处. 火星磁鞘区特征表现为太阳风成分 (H^+) 向火星电离层成分 (O^+) 过渡, 火星磁层顶的火心距离约为 $1.4\,R_{\rm m}$, 比地球磁层顶的地心相对距离要小得多 [2−4]. 火星探测飞船的观测资料还表明, 火星磁尾为可压缩型, 其厚度随太阳风压力的增大而减小. 火卫-2 飞船探测发现, 火星背阳面磁场 B_x 分量显著, 且在 $2.8\,R_{\rm m}$ 以外的火星磁尾行星际磁场起控制作用, 说明有感应磁场存在 [5]. 对火星磁尾的局地披盖角 (磁场与 x 轴之间的夹角) 和磁尾的张开角 (太阳风流与磁尾磁层顶间的夹角) 均随太阳风动压的增大而减小, 在火星磁尾 $2.8\,R_{\rm m}$ 处的张开角只有地球磁尾 $17\,R_{\rm e}$ ($R_{\rm e}$ 为地球半径) 处张开角的一半 [6].

火星周围也有电离层存在, 火星电离层中的主要成分为电子、H^+ 离子和 O^+ 离子, 还有其他离子, 例如 O_2^+ 离子等 [7], 火星夜晚侧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. 太阳风主要是通过火星电离层与火星相互作用的. 关于火星电离层及其中的带电粒子特性问题已有许多研究, 对带电粒子的分布特点已有一定的认识 [8−10].

火卫-2 飞船观测到火星的内秉磁场很弱, MGS 飞船探测数据表明, 火星的内秉磁场更弱, 低于 $2\times10^{11}\,{\rm T\cdot m^3}$, 但火星上某些地区仍有很强的局部磁场存在 [11−13]. 据此, 有研究者提出了火星磁场反转的观点 [14]. 也就是说, 在远古时期火星的内秉磁场很强, 而随着时间的长期推移, 目前火星的内秉磁场已经很弱了. 火星内秉磁场逐渐减弱, 主要是由于火星的固有磁矩大小在变小, 磁矩变小到零, 还会继续变小, 从而反转.

由于火星的大尺度磁场很弱, 太阳风与火星电离层相互作用, 形成了一个感应型的火星磁层, 又称为磁障碍层 [15−16]. 对火星磁场以及感应磁层已经进行了大量的探测, 并有了一定的认识. 但关于火星磁层形成的理论, 特别是火星电离层与太阳风相互作用的压力平衡问题, 只有一些定性的说法, 还没有从理论上进行较为细致的计算和探讨.

本文根据行星电离层与太阳风相互作用的压力平衡模型, 研究了火星磁层顶的位形及其与太阳风动压之间的变化关系. 根据火星磁矩反转的观点, 假设火星具有一定的内秉磁矩, 研究了火星内秉磁场对磁层形成的作用和影响, 其对于研究火星磁层长期变化过程具有重要意义.

2 行星磁层顶压力平衡关系

行星与太阳风相互作用一般情况可以分为三种类型. ①对于非磁化无大气的行星 (把月球纳入考虑), 太阳风可以直接撞到星体表面而被吸收; ②对于

非磁化有大气的行星, 主要表现为行星电离层内的粒子热压力与太阳风动压相互平衡 (太阳风中的磁压比太阳风动压小得多), 从而形成感应型磁层, 也即成为磁障碍层, 太阳风只能绕磁层顶而过; ③对于磁化有大气行星, 主要表现为行星电离层内的粒子热压力及磁压力之和与太阳风动压相互平衡, 从而形成与地球类似的磁层, 太阳风只能绕磁层顶而过.

火星与太阳风的相互作用属于第二种情况. 通常认为, 火星周围有大气存在, 在太阳辐射作用下形成电离层. 火星的全球性大尺度本底磁场很弱, 因而火星电离层中的粒子热压力要比火星本底磁压力大得多. 所以一般都认为主要是火星电离层中粒子的热压与太阳风的动压相平衡, 从而形成了火星磁层或磁障碍层的顶部边界 [17].

行星在与太阳风相互作用过程中, 磁层顶处的压力平衡关系可以表述为

$$P_{\rm sd} = P_{\rm mp} + P_{\rm mm}. \tag{1}$$

其中, $P_{\rm sd}$, $P_{\rm mp}$ 和 $P_{\rm mm}$ 分别表示太阳风动压、行星电离层中的粒子热压和磁压. 式 (1) 表明, 在大气行星与太阳风相互作用的一般情况下, 对于非磁化 (大尺度磁场的压力可被忽略的情况) 行星, 只要忽略式 (1) 右边的磁压项即可. 对于式 (1) 中的粒子热压项和磁压项, 可分别采用如下表达式求解:

$$P_{\rm mp} = \sum_i n_{\rm i} k T_{\rm i} + n_{\rm e} k T_{\rm e}, \tag{2}$$

$$P_{\rm mm} = \frac{4 \times B^2}{8\pi}. \tag{3}$$

其中, n, T, k 和 B 分别表示行星大气中的带电粒子数密度、温度、气体常数和磁场强度, 下标 i 和 e 分别表示离子和电子. 式 (2) 右边的第一项表示不同粒子成分的热压之和, 第二项表示电子热压.

尽管火星的大尺度磁场压力很弱, 可被忽略, 为了与粒子热压进行比较, 此处仍保留磁压项进行研究, 结果认为磁压与热压相比确实可被忽略.

3 分析计算方法

计算中采用的坐标系类似于地球空间研究中常用的 GSM 坐标系, 即取坐标原点于火星中心, x 轴正方向指向太阳, z 轴与火星自转轴一致, 北为正, y 轴由右手定则确定.

在具体计算分析中, 我们根据卫星探测数据, 计算出火星轨道附近的太阳风动压变化范围, 进而取合理且不同的太阳风动压值. 根据卫星探测数据和 Verigin 以及 Haider 等的分析研究 [18−19], 考虑火星电离层中带电粒子的分布在向阳面随高度的变化, 采用具体的粒子密度分布 [20−21]. 在第一部分研究中, 根据 MGS 卫星的探测, 取火星大尺度磁场的磁矩为 $1\times10^{10}\,\mathrm{T\cdot m^3}$ (观测认为小于 $2\times10^{11}\,\mathrm{T\cdot m^3}$)[12]. 在第二部分的研究中, 取假定的磁矩值, 分析计算从火星日下点 (火星磁层顶与火心–日心连线的交点) 开始, 利用逐点迭代计算的方法, 分析子午面内火星磁层顶逐点位置以及不同条件下的变化.

利用迭代法计算的具体步骤如下.

步骤 1 在子午面内计算出太阳风动压与磁层内压力的平衡点 x_0 (日下点, 纬度角 $\theta_0 = 0$, 该点矢径方向为磁层顶的法线方向), 得到火星日下点坐标 (x_0, z_0), $z_0 = 0$, 计算 (x_0, z_0) 点的火心距离 r_0.

步骤 2 改变纬度角 θ 值, 使得 $\theta_1 = \theta_0 + \Delta\theta$, 在计算中 $\Delta\theta$ 为固定步长, 假设当 $\theta = \theta_1$ 时磁层顶的法线方向为 (x_1, z_1) 的径线方向, 则取太阳风动压在垂直于磁层顶方向上的分量为 $P_{\rm sd}\cos\theta_1$.

步骤 3 根据压力平衡条件, 求解出 $\theta = \theta_1$ 时的磁层顶假定位置 (x_1, z_1), 计算 (x_1, z_1) 点的火心距离 r_1, 如果 $|r_1 - r_0|$ 小于 r_1 的 1%, 则取 (x_1, z_1) 为 $\theta = \theta_1$ 时对应的磁层顶位置, 否则, 作 (x_0, z_0) 和 (x_1, z_1) 两点的连线, 另行假定 $\theta = \theta_1$ 时磁层顶的法线方向为这两点连线的垂直方向, 据此, 另行求出磁层顶假定位置 (x_1, z_1), 并另行计算 r_1, 如果 $|r_1 - r_0|$ 小于 r_1 的 1%, 则取 (x_1, z_1) 为 $\theta = \theta_1$ 时对应的磁层顶位置, 否则, 继续重复, 直到 $|r_1 - r_0|$ 小于 r_1 的 1% 为止, 才能最后确定取 (x_1, z_1) 为 $\theta = \theta_1$ 时对应的磁层顶位置.

步骤 4 继续改变纬度角 θ 值, 使得 $\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta$, 用类似于步骤 2 中求 (x_1, z_1) 点的方法逐次迭代, 求出纬度角 $\theta = \theta_2$ 时的磁层顶位置 (x_2, z_2). 用同样的方法分别求出纬度角 $\theta = \theta_3, \theta_4, \cdots, \theta_n$ $(\theta_n = 90^\circ)$ 时对应的磁层顶位置 (x_2, z_2), $(x_3, z_3), \cdots, (x_n, z_n)$. 假设子午面内火星的磁层顶关于日下点对称, 根据得到的这一系列点, 可以得到在选定参数条件下向阳面火星磁层顶的位置和形状.

4 主要研究结果及分析

首先仅改变太阳风动压来研究火星磁层顶的位形. 固定火星磁场值时, 在不同的太阳风动压条件下所得到的火星磁层顶的位形是不同的. 图 1 给出了计算得到的火星大尺度磁场磁矩不变时, 不同太阳风动压条件下火星磁层顶的位形.

在与图 1 相关的分析计算中, 根据卫星观测, 取火星电离层中大尺度磁场的磁偶极矩为 $1\times10^{10}\,\mathrm{T\cdot m^3}$, 取火星轨道附近 (1.52 AU) 的太阳风动压分别为 $P_{\mathrm{sd}}=1\times10^{-10}$, 1×10^{-9}, 5×10^{-9} 和 $1\times10^{-8}\,\mathrm{Pa}$.

从图 1 可以看出, 无论太阳风动压多大, 火星磁层顶日下点的火心距离都较小, 而火星极点对应的磁层顶的火心距离也都相应较小. 考虑火星的磁层顶南北半球对称, 火星磁层顶的位形应该位于半圆形与抛物线之间, 这与地球磁层顶的位形相似. 随着太阳风动压的增强, 火星磁层顶日下点的火心距离减小, 极点上方火星磁层顶的火心距离也减小.

表 1 给出了与图 1 对应的不同太阳风动压情况下火星磁层日下点的火心距离 r_0 和火星极点对应的火星磁层顶距离 z_0.

从表 1 中的数据可以清楚看出, 当太阳风动压 P_{sd} 位于 $1\times10^{-10}\sim1\times10^{-9}\,\mathrm{Pa}$ 之间时, 火星磁层日下点的火星距离位于 4286~6292 km 之间, 约为 $1.26\,R_{\mathrm{m}}$ ~$1.85\,R_{\mathrm{m}}$, 这与卫星观测数据相一致 [2−4].

从表 1 中的数据还可以清楚看出, 当太阳风动压 $P_{\mathrm{sd}}=1\times10^{-10}\,\mathrm{Pa}$ 时, 火星磁层日下点的火心距离 r_0 为 $1.85\,R_{\mathrm{m}}$, 火星极点对应的火星磁层顶距离

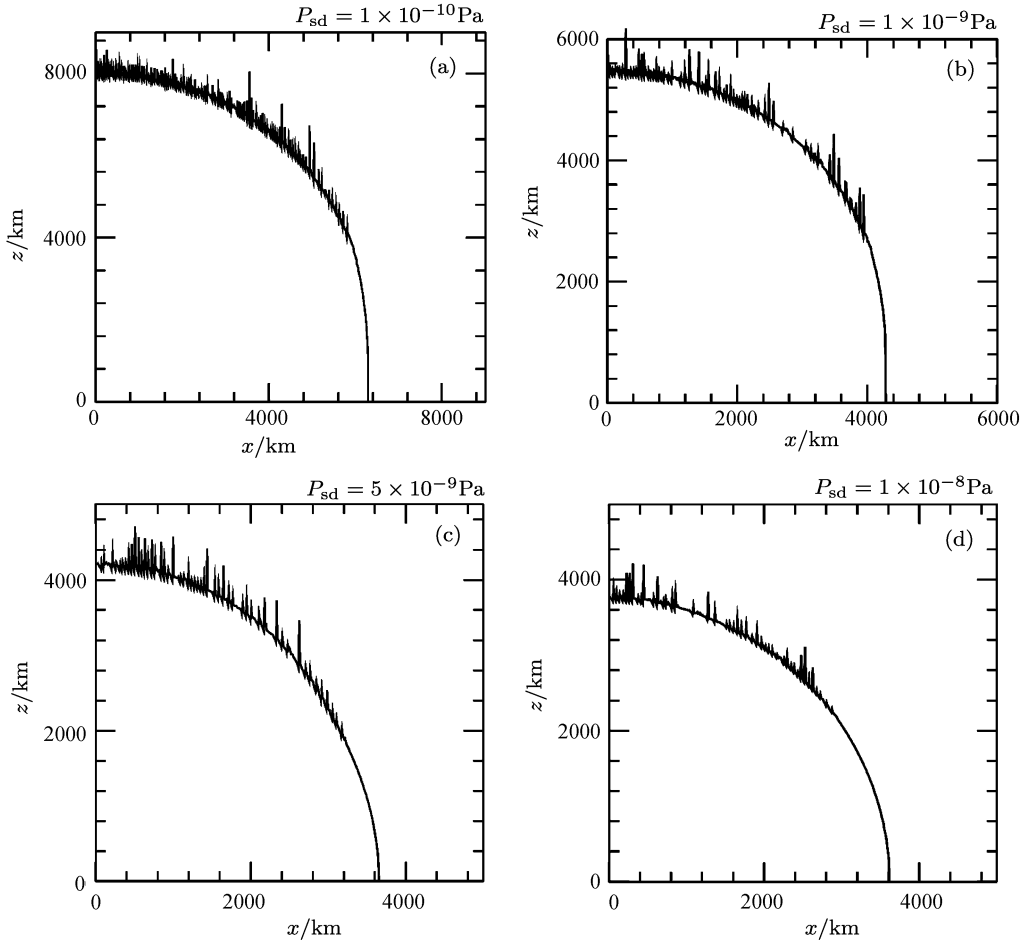


图 1 根据模型计算得到的不同太阳风条件下北半球火星磁层顶的位形

Fig. 1 Configuration of the northern hemispheric magnetopause of Mars under different solar wind conditions according to the model calculation

表 1 不同太阳风动压时火星日下点的距离

Table 1 Distance of the Martian subsolar to the Martian surface corresponding to different solar wind dynamic pressures

P_{sd}/Pa	r_0/km	r_0/R_m	z_0/km	z_0/R_m
1×10^{-10}	6292	1.85	7989	2.35
1×10^{-9}	4286	1.26	5485	1.61
5×10^{-9}	3656	1.08	4182	1.23
1×10^{-8}	3617	1.06	3785	1.11

z_0 为 $2.35\,R_m$. 随太阳风动压增强, r_0 逐渐变小, z_0 也在变小, 当 $P_{sd}=5\times10^{-9}$ Pa 时, r_0 减小到 $1.08\,R_m$, z_0 减小到 $1.23\,R_m$. 当太阳风动压继续增强, 从 5×10^{-9} Pa 增强到 1×10^{-8} Pa 时, r_0 减小甚微, 几乎没变化, z_0 变化也较小. 可见, 对于一定的火星电离层状况, 当太阳风增强到一定程度再继续增加时, 对火星磁层顶的压缩效果将减小. 这些变化关系从物理上来解释是合理的.

在图 1 和表 1 的计算中, 保留了火星的内秉磁矩, 取其值为 $1\times10^{10}\,\mathrm{T\cdot m^3}$, 这与 MGS 卫星探测结果 (小于 $2\times10^{11}\,\mathrm{T\cdot m^3}$) 是一致的 [12]. 在计算过程中, 将磁压和粒子热压进行对比, 结果认为, 这么小的磁压确实是可以忽略不计的. 在图 1 和表 1 的计算中得到的火星磁层顶位形主要是粒子热压与太阳风动压平衡的结果.

有研究认为, 在很久以前, 火星上存在可观的大尺度偶极磁场, 而后来慢慢地减小, 直到今天, 火星的大尺度偶极磁场非常小, 小于目前仪器的可探测值 [12,14]. 根据这一观点, 本文尝试探索了过去火星上大尺度磁场 (磁矩) 对火星磁层顶的贡献作用, 研究了假定的不同磁矩条件下火星大尺度磁场对火星磁层顶位形的影响.

图 2 给出了计算所得到的磁矩分别为 $1\times10^{11}\,\mathrm{T\cdot m^3}$ 和 $5\times10^{11}\,\mathrm{T\cdot m^3}$ 时火星磁层顶的位形. 在与图 2 有关的计算中, 取太阳风的动压值 $P_{sd}=2\times10^{-10}$ Pa.

从图 2 中可以看出, 当火星的内秉磁矩假定为 $1\times10^{11}\,\mathrm{T\cdot m^3}$ 时, 火星磁层顶日下点的火心距离约为 5580 km (约为 $1.64\,R_m$), 极点上方火星磁层顶的火心距离为 7160 km (约为 $2.11\,R_m$); 当火星的内秉磁矩假定为 $5\times10^{11}\,\mathrm{T\cdot m^3}$ 时, 火星磁层顶日下点的火心距离约为 7728 km (约为 $2.27\,R_m$), 极点上方火星磁层顶的火心距离为 9611 km (约为 $2.83\,R_m$). 由此可见, 随着假设的内秉磁矩的增强, 火星磁层顶日下点的火心距离在增大, 极点上方火星磁层顶的火心距离也在增大. 内秉磁矩的增强, 使得火星电离层内部的磁压增大, 因而抵御太阳风动压的因素在增强, 磁层顶 (无论是日下点处还是极点上方) 自然会向外扩大. 这从物理上来说也是合理的.

这里研究给出的火星磁层顶与太阳风的变化关系, 不仅对于非磁化有大气行星磁层顶的形成和变化是适用的, 对磁化有大气行星也是适用的. 关于在假

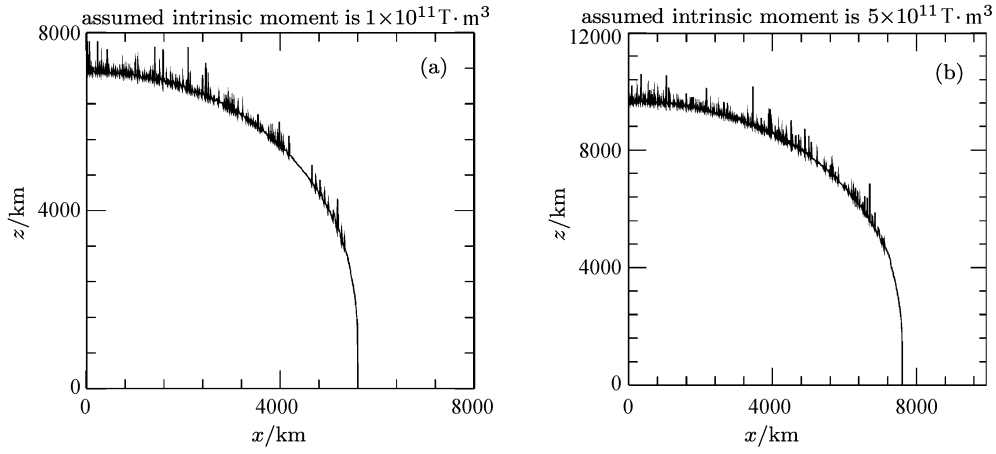


图 2 根据模型计算得到的不同磁矩条件下北半球火星磁层顶的位形

Fig. 2 Configuration of the northern hemispheric magnetopause of Mars under different intrinsic moment conditions according to the model calculation

定内秉磁矩条件下研究得到的火星磁层顶与磁矩变化关系的结果, 仅对磁化有大气的行星或火星的过去情况适用.

5 结论

建立了压力平衡的火星磁层顶形成的理论模型, 结合人造卫星的观测数据, 对火星子午面内向日侧火星磁层顶的位置和形状进行数值计算和分析, 研究了太阳风动压对火星磁层顶的影响. 在假设的火星磁矩条件下, 研究了内秉磁矩对火星磁层顶形成的作用, 主要结论如下.

(1) 火星的磁层顶形状介于半圆形与抛物线形之间, 这与人造卫星对火星的观测符合得很好.

(2) 当太阳风动压增强时, 火星磁层顶的火心距离变小, 当太阳风动压减小时, 火星磁层顶的火心距离变大. 这不仅适用于非磁化有大气的行星, 也适用于磁化有大气的行星.

(3) 在远古时期, 火星的内秉磁矩越大时, 火星磁层顶的火心距离也越大; 当火星的内秉磁矩变小时, 火星磁层顶的火心距离也变小. 这条结论仅对于磁化有大气的行星是适用的.

关于火星日下点距离随太阳风动压以及内秉磁矩的变化关系, 对于行星极点处对应的磁层顶距离, 也是如此.

这些结论从物理上来说都是合理的, 为进一步研究火星对太阳风的响应过程以及火星磁层的长期演化奠定了基础.

参考文献

[1] O'Gallagher J J, Simpson J A. Search for trapped electrons and a magnetic moment at Mars by Mariner IV [J]. *Science*, 1965, **149**(3689):1233-1235

[2] Gringauz K I. A comparison of the magnetosphere of Mars, Venus and the Earth [J]. *Adv. Space Res.*, 1981, **1**:5-6

[3] Gringauz K I. What was known about the Martian magnetosphere before Phobos-2 mission [J]. *Planet. Space Sci.*, 1991, **39**:73-74

[4] Schwingenschuh K, Riedler W, Lichtenegger H, *et al.* Martian bow shock: Phobos observation [J]. *Geophy. Res. Lett.*, 1990, **17**:889-892

[5] Mohlmann D, Riedler W, Rustenbuch J, *et al.* The question of an internal Martian magnetic field [J]. *Planet. Space Sci.*, 1991, **39**:83-88

[6] Riedler W, Schwingenschuh K, Lichtenegger H, *et al.* Interaction of the solar wind with the planet Mars: Phobos 2 magnetic field observation [J]. *Planet. Space Sci.*, 1991, **39**:75-79

[7] Kallioa E, Fedorovb A, Budnikb E, *et al.* On the properties of O^+ and O^{2+} ions in a hybrid model and in Mars Express IMA/ASPERA-3 data: A case study [J]. *Planet. Space Sci.*, 2008, **56**:1204-1213

[8] Wang J S, Nielsen E. Wavelike structures in the Martian topside ionosphere observed by Mars Global Surveyor [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(E7):5078-5083

[9] Zhang M H G, Luhmann J G. Comparison of peak ionosphere pressures at Mars and Venus with incident solar wind dynamic pressure [J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(A2):1017-1025

[10] 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]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**(A9):9311-9318

[11] Acuna M H, Connerney J, Wasilewsky P, *et al.* Magnetic field and plasma observations at Mars: Initial results of the Mars Global Surveyor mission [J]. *Science*, 1998, **279**:1676-1680

[12] Acuna M H, Connerney J, Wasilewsky P, *et al.* Magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(E10):23 403-23 408

[13] Connerney J E P, Acuã M H, Wasilewski P J, *et al.* The global magnetic field of Mars and implications for crustal evolution [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**:4015-4018

[14] Glassmeier K H, Musmann G, Vocks C, *et al.* Mars— a planet in magnetic transition [J]. *Planet. Space Sci.*, 2000, **48**(12-14):1153-1159

[15] Lü Baowei, Wing I P, Liu Zhenxing. Advance in Space Physics (Volume 3) [M]. Beijing: Science Press, 2001. In Chinese (吕保维, 叶永煊, 刘振兴. 空间物理学进展 (第三卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2001)

[16] 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**:1933-1936

[17] Liu Zhenxing, *et al.* Space Physics [M]. Harbin: Harbin Institute and Technology Press, 2005. In Chinese (刘振兴, 等. 太空物理学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005)

[18] 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]. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:307-313

[19] Haider S A. O^+ escape in the polar ion exosphere of Mars [J]. *Adv. Space Res.*, 1995, **16**(6):49-55

[20] Fox J. Response of the Martian thermosphere/ionosphere to enhanced fluxes of solar soft X rays [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**(A11), doi:10.1029/2004JA010380

[21] Kessel R L, Johnstone A D, Coates A J, *et al.* Space plasma measurements with ion instruments [J]. *Rev. Sci. Inst.*, 1989, **60**(12):3750-3761