

火星沉降 H-ENA 的分布与特性*

张艺腾^{1,2,3,4} 李磊^{1,3,4} 谢良海^{1,3,4}
苟晓晨^{1,3,4} 冯永勇^{1,3,4}

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

4(中科—莘县联合研究中心 聊城 252400)

摘要 能量中性原子 (Energetic Neutral Atom, ENA) 是由能量离子与中性背景成分电荷交换产生. 火星的外逸层扩展范围远高于弓激波, 上游太阳风质子与其相互作用并转化为太阳风氢 ENA (Hydrogen-ENA, H-ENA), 新生的 H-ENA 可直接进入低层大气, 成为新的物质与能量输运通道. 本文基于单流体多成分 MHD 模型与中性外逸层模型, 计算了火星 200 km 等高面沉降 H-ENA 通量的空间分布, 统计了多种太阳风条件下沉降 H-ENA 的粒子与能量沉降率, 分析影响因素. 结果表明, 在一定模拟条件下, 产生于弓激波上游的太阳风 H-ENA, 呈 $\cos Z$ 分布 (Z 为天顶角), 受磁异常影响较小, 是沉降 H-ENA 的主要成分, 占 ENA 总沉降量的 59%, 占能量沉降的 81%; 产生于磁鞘的磁鞘 H-ENA 受磁异常阻碍影响较大, 在最强磁异常上方其沉降通量显著下降; 沉降 H-ENA 与上游太阳风的通量呈正比例关系; 2.1%~3.5% 上游太阳风质子转化为太阳风 H-ENA.

关键词 火星, 沉降 H-ENA, MHD 模型, 磁异常

中图分类号 P353

Distribution and Characteristics of Martian Precipitating H-ENA

ZHANG Yiteng^{1,2,3,4} LI Lei^{1,3,4} XIE Lianghai^{1,3,4}
GOU Xiaochen^{1,3,4} FENG Yongyong^{1,3,4}

1(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

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

3(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

4(Joint Research and Development Center of Chinese Science Academy and Shen County, Liaocheng 252400)

* 国家自然科学基金项目 (42241112, 42122032), 中国科学院重点部署项目 (ZDBS-SSW-TLC00103), 民用航天预先研究项目 (D020104), 国家重点实验室专项研究基金和中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”项目共同资助

2023-04-07 收到原稿, 2023-04-20 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract Energetic Neutral Atom (ENA) is generated by charge exchange between energetic ions and background neutrals. As Martian exosphere extends far above the bow shock, hydrogen ENA (H-ENA) produced by solar wind proton may enter the lower atmosphere directly, depositing mass and energy in the atmosphere. Based on the single-fluid multispecies MHD model and exosphere model, this paper calculates the spatial distribution of the precipitating H-ENA flux at the height of 200 km on Mars, evaluates the particle and energy deposition rate of the precipitating H-ENA under different solar wind conditions, analyzes their controlling factors. The results show that the solar wind H-ENA generated upstream of the bow shock is less affected by the crustal fields, and shows a $\cos Z$ distribution. As a major mass and energy source, the precipitating solar wind H-ENAs account for 59% particle deposition and 81% energy deposition of the total precipitating ENAs. Magnetosheath H-ENA generated in the magnetosheath is greatly affected by the crustal fields, and their precipitating flux decreases significantly above the strongest magnetic anomalies. The precipitating H-ENA flux is proportional to the upstream solar wind flux, and 2.1%~3.5% of upstream solar wind protons are estimated to be converted into the solar wind H-ENAs.

Key words Mars, Precipitating H-ENA, MHD model, Crustal

0 引言

能量离子与中性粒子发生碰撞, 电荷交换后形成能量中性原子 (Energetic Neutral Atom, ENA), 电荷交换是能量中性原子最重要的产生机制. ENA 是中性的, 几乎沿直线运行, 可以被遥感探测. ENA 的粒子种类、速度、温度、密度等多种信息反映其上游等离子体源的状态, 进一步推演空间环境信息后, 反映大尺度行星磁层的完整面貌^[1,2]. 以往研究空间等离子体环境时主要集中在火星离子与电子方面^[3], 开展 ENA 中性环境研究对研究火星空间环境具有重要的意义.

火星独特的空间环境使其 ENA 的分布与地球明显不同. 由于缺少全球性磁场, 火星弓激波平均高度仅约 $0.64 R_m$ (R_m 为火星半径)^[4]. 火星外逸层广泛分布于弓激波之外, 太阳风质子与外逸层成分电荷交换产生太阳风氢 ENA (Hydrogen-ENA, H-ENA). 太阳风 H-ENA 与磁鞘等离子体产生的磁鞘 H-ENA, 由于电中性的特点, 可以直接穿透弓激波与磁堆积区边界 (Magnetic field Pileup boundary, MPB), 沉降至 110~130 km 低层大气, 形成了火星独特的沉降 H-ENA 现象. 沉降 H-ENA 现象长期存在, 虽缺少 ENA 的直接测量证据, 但有两个次级现象可以作为间接证据. 一个现象是沉降 H-ENA 产生质子极光, 该现象分别被 MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) 搭载的极紫外光谱仪 (Imaging

Ultraviolet Spectrograph, IUVS) 以及 MEX (Mars Express) 搭载的大气光谱仪 (Spectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars, SPICAM) 探测并证实^[5,6]; 另一个现象是沉降 H-ENA 再次发生碰撞电荷交换, 产生具有太阳风等离子体能量特征的次级质子, 该现象在 MPB 以下被 MAVEN 搭载的太阳风离子分析仪 (Solar Wind Ion Analyzer, SWIA) 探测并证实^[7].

太阳风等离子体受到火星电离层的阻碍, 减速偏转并与来自行星的离子共同形成 MPB 边界, 堆积的磁场形成了感应磁层. 感应磁场极大地阻碍了太阳风离子向火星大气的沉降. 相比之下, 由太阳风质子产生的太阳风 H-ENA 在大范围内长期稳定地直接进入火星大气. Halekas 等^[7]、Kallio 等^[8] 和 Wang 等^[9] 分别根据探测数据和数值模型估计 H-ENA 相对于上游太阳风离子的转化率为 0.5%~5%, 1%~3% 和 2%. 沉降 H-ENA 将太阳风等离子体的物质与能量直接输运到了低层大气, 是物质与能量运输的新路径.

迄今为止, 开展过火星 ENA 探测的航天器仅有 MEX 和天问一号 (Tianwen-1). 早在 1995 年, Barabash 等对火星 ENA 的种类及通量进行了分析评估^[10]. 基于 MEX 任务, Futaana, Gunell, Galli, Wang 等分别报告了火星 ENA 的探测结果^[11-16]. 其中磁鞘 H-ENA 典型通量为 $(4\sim7)\times 10^9 \text{ m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 峰值通量为 $1.3\times 10^{11} \text{ m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 部分热的 MS H-ENA 进入火星阴影, 通量约为 $10^8 \text{ m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. 由于太阳

UV 污染的影响, MEX 并没有获得太阳风 H-ENA 的直接测量结果. 基于 Tianwen-1 任务, Ma 等^[17] 报告了太阳风 H-ENA 典型通量为 $10^9 \sim 10^{10} \text{ m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, Zhang 等^[18] 报告了利用太阳风 H-ENA 反演上游太阳风参数的结果, 更多的数据结果正在研究中. Ramstad 等^[19] 利用 MAVEN 的离子数据反演了火星 ENA 的全球分布, 其中太阳风 H-ENA 通量为 $3 \times 10^9 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. 上述探测结果仅在局部或特定位置给出了探测结果, 对于沉降 H-ENA 的全球分布仍缺少充足的探测结果, 所以作为补充的基于模型的研究工作尤为重要.

基于 ENA 的产生原理, 由等离子体模型、中性背景成分模型和电荷交换模型生成 ENA 的产生率模型, 进而生成 ENA 探测模型. Wang 等^[9] 开展了基于 Hybrid 模型的沉降 H-ENA 模拟研究, 指出太阳活动极小期大约 2% 太阳风质子转换为沉降 H-ENA, 其具有不对称性分布. 但 Hybrid 模型不包含火星磁异常, 不能体现其影响. 由于 Hybrid 模型的计算量大, 其计算范围与网格精度不能兼顾, $3 R_m$ 的计算范围略有不足. MHD 模型的优势在于网格精度高、计算效率高, 范围大, 能够正确反映电离层和磁异常的作用. 虽然单流体多成分 MHD 模型忽略了火星电离层离子的拾取过程, 但这不是本文关注的重点, 同时却能够比较好地反应火星诱导磁层的大尺度结构.

本文在 $20 R_m$ 范围内建立了基于 MHD 模型的 H-ENA 模型, 对沉降 H-ENA 的空间分布等特性进行了模拟研究, 分析了磁异常与上游太阳风通量对其影响, 评估了由太阳风质子到太阳风 H-ENA 的转换率.

1 H-ENA 模型

1.1 模型方法与参数

H-ENA 由太阳风质子与外逸层中性成分电荷交换而产生, 主要由以下三个物理过程产生^[18]:

- (1) $\text{H}^+ + \text{H} \rightarrow \text{H} + \text{H}^+$,
- (2) $\text{H}^+ + \text{O} \rightarrow \text{H} + \text{O}^+$,
- (3) $\text{H}^+ + \text{H}_2 \rightarrow \text{H} + \text{H}_2^+$.

模拟 ENA 的空间分布需要已知太阳风质子与外逸层的分布以及电荷交换截面.

1.1.1 火星空间太阳风质子分布

采用单流体多成分 MHD 模型^[20,21] 描述太阳风与火星的相互作用, 作为 H-ENA 模型中等离子体源

的分布. 在 MHD 模型中假设了一些模型条件, 包括等离子体被认为是流体, 磁场冻结在流体内, 热速度为各向同性, 单流体 MHD 模型中各成分遵循同一个动量方程, 具有相同的速度. MHD 模型中包含了火星表面磁异常的分布以及 Hall 效应. 本文关注的是太阳风等离子体的主要成分质子的空间分布及其形成的等离子体边界.

图 1 给出了 MHD 模型的仿真结果. 当太阳风等离子体遇到火星的阻碍时, 速度减慢, 方向偏转, 密度增加, 形成弓激波、磁堆积区、磁鞘等边界和区域. 火星的磁异常可以改变空间等离子体的分布, 尤其是最强磁异常位于正午时, 南半球磁堆积区边界被抬升. MHD 模型采用的上游太阳风条件列于表 1.

1.1.2 火星空间中性背景成分分布

通常认为中性背景成分由外逸层模型与热层模型构成. 火星的外逸层由中性粒子构成, 几乎没有碰撞, 亦不受电磁场约束, 其行为完全依赖于行星引力. 假设所有粒子均源于下方的大气层, 没有外部粒子源的入射. 根据粒子的能量, 其轨道可以分为三类: 弹道型、环绕型和逃逸型. 具有足够能量的粒子会从外逸层底 (临界高度) 射出, 并运动至无穷远处而不返回, 这些粒子属于逃逸型; 粒子能量相对稍低, 粒子无法彻底逃离行星, 但可维持其环绕星球运动, 这些粒子属于环绕型; 粒子能量更低, 从底部大气层跃入外逸层后最终还要回落, 运动轨迹与外逸层底有两个交点, 这些粒子属于弹道型. 将这三类粒子加在一起, 即可得出外逸层粒子密度. 本文在外逸层临界高度以上采用外逸层模型^[22], 在外逸层临界高度以下采用该 MHD 模型中基于 Viking 和 Mariner 任务探测的热层模型, 作为 H-ENA 模型中中性源的分布. 表 2 给出了临界高度为 170 km 处外逸层模型参数.

1.1.3 电荷交换碰撞

采用电荷交换截面函数描述电荷交换过程, 即作为产生 H-ENA 的物理过程, 以建立 H-ENA 模型, 模型忽略了次级碰撞与损失机制. Rinsuke 等^[23]、Lindsay 和 Stebbings^[24] 总结了质子与 H 原子、 H_2 分子、O 原子等中性成分的电荷交换截面 σ 随入射质子能量变化的曲线及拟合公式, 经过本文的验证, 拟合公式可以很好地再现实验数据曲线 (见图 2).

根据 Swaczyna 等^[25] 研究给出的质子与 H 原子电荷交换产生 H-ENA 的散射角度分布, 与本文等离

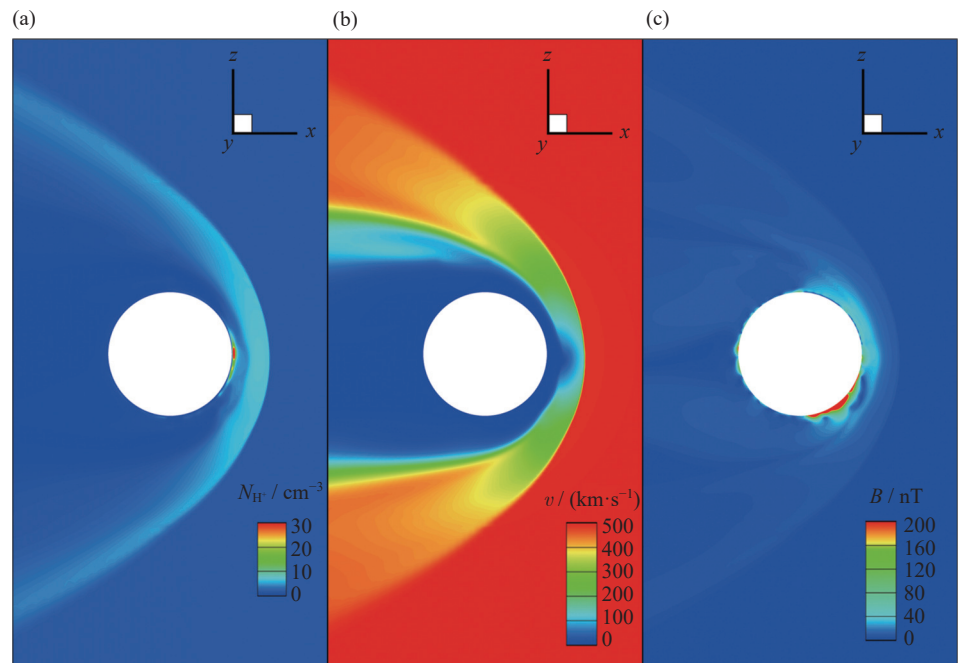


图 1 MHD 模型的仿真结果. 在 MSO (Mars Solar Orbital) 坐标系 xz 平面内各物理量的空间分布
Fig. 1 Simulation result of MHD model. Spatial distribution of physical quantities on the xz plane in the MSO (Mars Solar Orbital) frame

表 1 MHD 模型的参数
Table 1 Parameters of MHD model

太阳风参数	值
密度/ cm^{-3}	1.8
速度/ $(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	(500, 0, 0)
质子温度/K	1.5×10^5
磁场/nT	(-1.6, 2.5, 0)

表 2 临界高度 170 km 处外逸层模型参数
Table 2 Model parameters at exospheric critical altitude 170 km

成分	温度/K	密度/ cm^{-3}
H	192	9.9×10^5
H ₂	192	3.8×10^6
O(thermal)	173	1.4×10^8
O(hot)	4.4×10^3	5.5×10^3

子体源的特点, 本文统计的 H-ENA 能量范围为 0.01~10 keV, 10 eV 对应中位数散射角小于 5° , 100 eV 以上时不足 1° , 假定其碰撞后方向不变.

1.2 计算方法

H-ENA 的产生率可以表示为

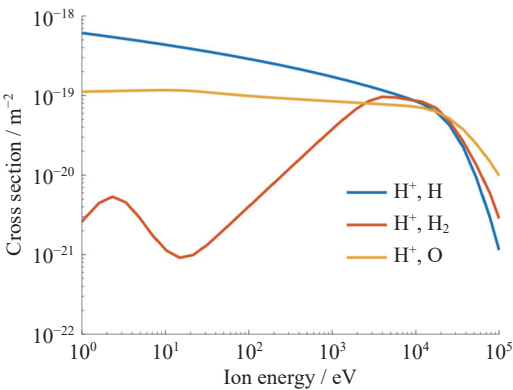


图 2 质子与 H 原子、H₂ 分子、O 原子的电荷交换截面曲线

Fig. 2 Cross-section of charge exchange between proton and atomic H, H₂ and atomic O

$$p_{\text{ENA}} \approx nu \sum_i n_i \sigma_i(u). \tag{1}$$

其中, n 和 u 为太阳风密度与体速度; n_i 和 σ_i 为各中性成分的密度和电荷交换截面, 下标 i 为 1, 2, 3, 代表 H, O 和 H₂.

假设质子和中性成分各向同性的, 根据上述各模型结果可以得到 H-ENA 产生率的空间分布 (见图 3). 磁鞘和上游太阳风区域是火星空间 H-ENA 产

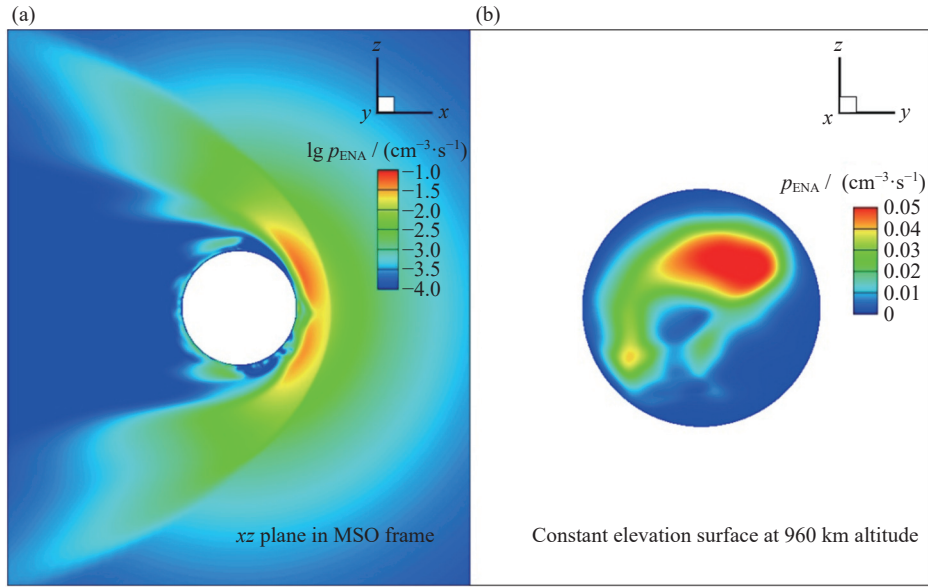


图 3 H-ENA 产生率的全球分布

Fig. 3 Global distribution of H-ENA production rate

生的主要区域, 根据产生区域的不同这些 ENA 称为太阳风 H-ENA 和磁鞘 H-ENA. 磁鞘 H-ENA 产生率可达 $0.1 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. 其他区域则低于 $0.01 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. 图 3(a) 中由于火星弓激波的高度较低, 仅约 $0.64 R_m$, 外逸层广泛存在于弓激波之外, H-ENA 的产生区域远超过弓激波位置. 弓激波上游广泛的外逸层在太阳风 H-ENA 的生成中起着重要作用. 随着火星周围太阳风的减速, 磁鞘中的质子通量增加, 磁鞘 H-ENA 的产生率高于弓激波上游太阳风 H-ENA 的产生率. 图 3(a) 表明, 最强磁异常位于正午, 推高了南半球磁堆积区边界的高度 (MPB 平均高度为 960 km ^[4]), 推高了磁鞘 H-ENA 的产生区, 导致南北不对称的情况, 进而导致图 3(b) 中 H-ENA 的产生率在南半球出现了分布空洞, 这是随火星自转周期性发生的现象.

ENA 遥感探测反映的是沿探测方向所有当地生成的 ENA 随距离的积分效应, 根据常用的习惯, 约定标符号 “*” 的物理量表示单位时间当地生成的 ENA, 不标符号的物理量表示遥感探测的 ENA, 所以标符号物理量比不标符号物理量少一个距离的量纲. 可以根据下式分别计算当地生成 ENA 的微分通量 j^* , 遥感探测 ENA 的微分通量 j , 定向微分通量 J 和通量 F , 即

$$j^* = \frac{v}{m} \frac{pf}{n}, \quad (2)$$

$$j(\mathbf{r}, \Omega) = \int j^*(\mathbf{r}', -\Omega) ds, \quad (3)$$

$$J(\mathbf{r}) = \int j(\mathbf{r}, E) dE, \quad (4)$$

$$F(\mathbf{r}) = \int j(\mathbf{r}, E, \Omega) d\Omega dE. \quad (5)$$

其中, f 为离子源的相空间密度, m 为粒子质量, v 为粒子速率, $\mathbf{r}$ 为探测器位置矢量, Ω 为视线方向, 也可以表示为 (θ, φ) , $\mathbf{r}'$ 为沿着视线方向的位置矢量, s 为视线方向的距离, E 为 ENA 能量. 由此, H-ENA 模型可以根据 ENA 产生率 p_{ENA} 与离子分布相空间密度 f , 计算 H-ENA 的微分通量及通量.

2 沉降 H-ENA 的结果

定义到达并进入 200 km 等高面的 H-ENA 为火星沉降 H-ENA, 根据其源区的空间位置分为沉降太阳风 H-ENA 与沉降磁鞘 H-ENA, 在能量分布、空间分布、整体行为特征等方面具有明显的区别. 为了进一步明确沉降 H-ENA 的分布以及与其上游太阳风的关系, 本文统计了 200 km 等高面全球沉降 H-ENA 的通量空间分布, 分析了磁异常对沉降分布的影响, 推导了沉降 H-ENA 通量的计算公式, 计算了不同太阳风条件下沉降 H-ENA 物质与能量运输的变化, 模拟了 H-ENA 分布的图像, 计算了太阳风 H-ENA 的转化率.

2.1 沉降 H-ENA 的分布与统计

沉降的太阳风 H-ENA 具有上游太阳风离子的特征, 动能较高、温度较低、方向集中、空间分布大尺度均匀. 图 4 给出了沉降太阳风 H-ENA 的空间分布.

图 4 给出了 200 km 等高面上沉降太阳风 H-ENA 通量的空间分布. 其中经纬度 (0, 0) 表示日下点, 角度分辨率为 6° . 弓激波上游产生的太阳风 H-ENA 几乎无损地穿越弓激波、MPB 达到 200 km. 200 km 以上外逸层稀薄, 由于碰撞导致的 ENA 损失可以忽略不计. 该沉降太阳风 H-ENA 通量既反映了弓激波上游的太阳风 H-ENA 的产生情况, 又反映了沉降太阳风 H-ENA 向低层大气输入物质能量的情况. 由于模型中外逸层具有对称性和稳定太阳风具有空间均匀性, 沉降太阳风 H-ENA 的空间分布也呈中心对称, 与方向角度无关. 广泛分布于向阳面的太阳

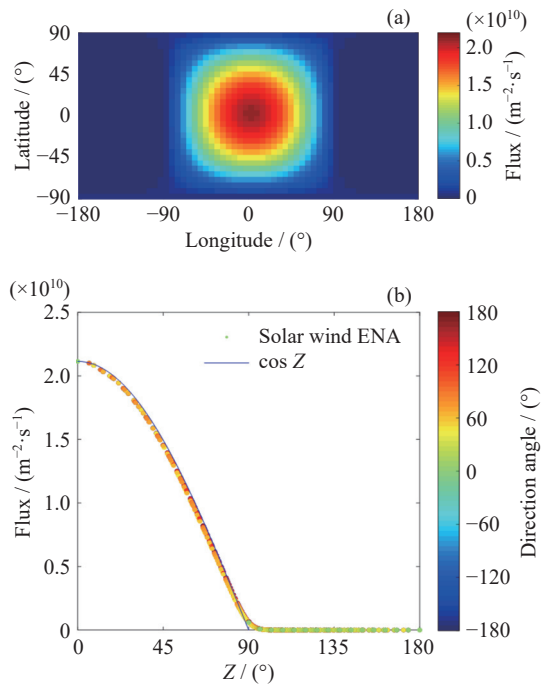


图 4 200 km 等高面上沉降太阳风 H-ENA 通量的空间分布. (a) 沉降太阳风 H-ENA 通量的经纬度分布, (0, 0) 表示日下点. (b) 沉降太阳风 H-ENA 通量随太阳天顶角 (Z) 的变化

Fig. 4 Spatial distribution of solar wind H-ENA flux at 200 km. (a) Longitude and latitude distribution of the precipitating solar wind H-ENA flux, and (0, 0) represents the subsolar point. (b) Variation of the precipitating solar wind H-ENA flux with the solar zenith angle (Z)

风 H-ENA, 具有高速低温, 运动方向平行, 通量空间分布均匀的特点, 所以沉降太阳风 H-ENA 在 200 km 等高面上的通量分布基本遵循了 $\cos Z$ 投影的比例关系. 沉降太阳风 H-ENA 产生于弓激波上游, 基本上不受火星磁异常的影响.

图 5 给出了 200 km 等高面上沉降磁鞘 H-ENA 通量的空间分布. 磁鞘 H-ENA 反映了磁鞘区太阳风等离子体的特征, 相比太阳风 H-ENA, 其速度低温度高, 方向不集中, 其空间分布受到磁异常分布的影响. 在图 5(a)(b) 中可以看到, Hall 效应导致沉降磁鞘 H-ENA 通量在太阳风对流电场负方向 (南半球) 比正方向 (北半球) 多. 图 3(a) 中, 位于正午的最大磁异常推高了南半球 MPB 边界和磁鞘区, 导致磁鞘 H-ENA 的产生率下降. 相比图 5(a) 中无磁异常的情况, 图 5(b) (c) 中由于磁异常的存在, 沉降磁鞘 H-ENA 的通量明显降低. 这说明磁异常会阻碍磁鞘 H-ENA 的产生与沉降. 图 5(c) 中最大磁异常位于正午时, 南半球沉降磁鞘 H-ENA 的通量显著降低. 这说明沉降磁鞘 H-ENA 的通量大小及空间分布受磁异常分布的影响非常显著, 这种影响随火星自转呈周期性

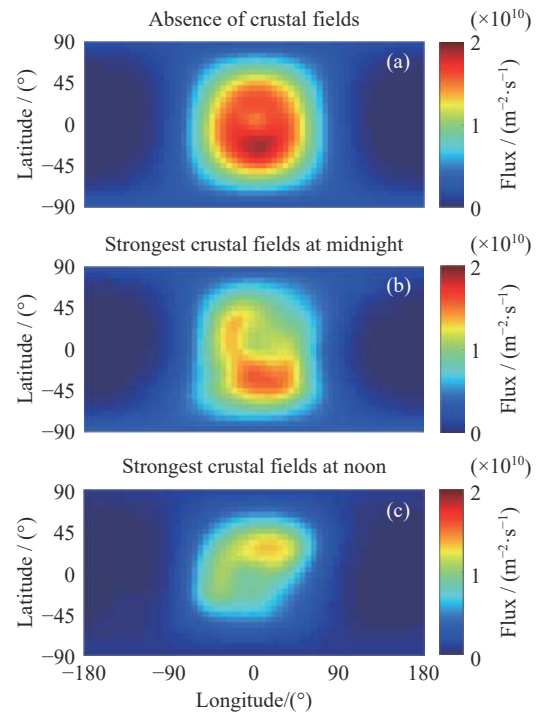


图 5 200 km 等高面上沉降磁鞘 H-ENA 通量的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of precipitating magnetosheath H-ENA flux at 200 km

日变化.

图 6 给出了 200 km 等高面上沉降 H-ENA 通量随太阳天顶角 (Z) 的变化. 其中沉降太阳风 H-ENA 在三种情况下差别不大, 基本遵循了图 4(b) 展示的特征规律, 方向角度的分布非常集中, 说明其相对日下点位置始终呈中心对称分布, 受磁异常影响较

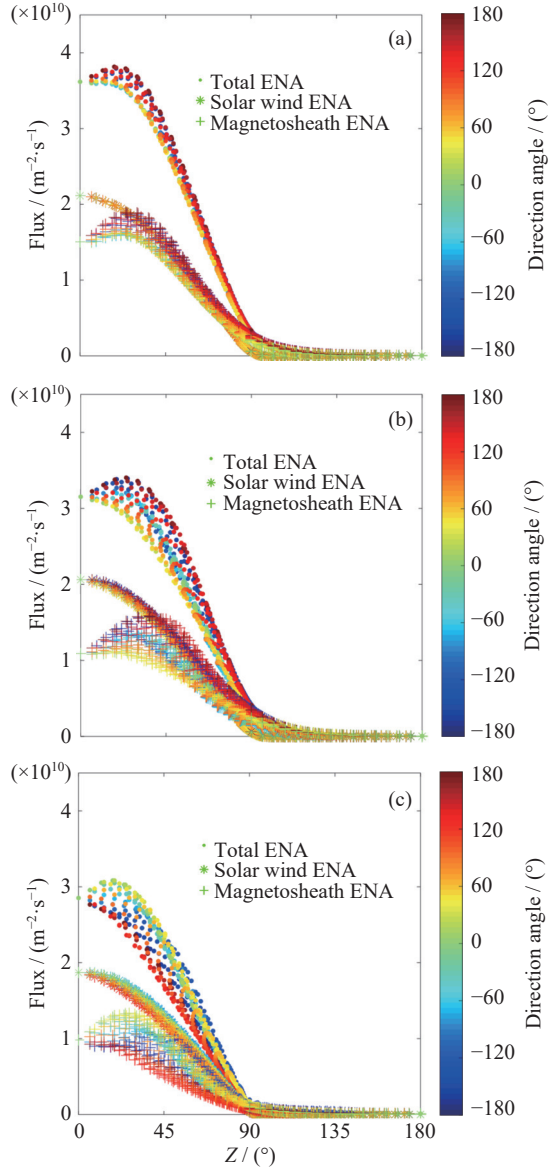


图 6 200 km 等高面上沉降 H-ENA 通量随太阳天顶角 Z 的变化 (方向角为该位置与日下点连接弧线相对于日下点地理北向的方向角)

Fig. 6 Variation of precipitating H-ENA flux on 200 km constant elevation surface with solar zenith angle Z (Direction angle is from the connection arc between the precipitating position and subsolar point to the geography north of the subsolar point)

小. 沉降磁鞘 H-ENA 的通量在 3 种情况下依次递减, 其方向角度散点分布更为分散, 说明其受磁异常的阻碍而通量下降, 导致南北分布差异较大. 沉降太阳风 H-ENA 与沉降磁鞘 H-ENA 通量的加和构成沉降 H-ENA, 其主要成分为沉降太阳风 H-ENA, 在一定程度上受磁异常分布影响, 呈现周期性日变化.

沉降 H-ENA 的粒子通量、粒子沉降率与能量沉降率受火星磁异常分布的影响. 表 3 中定量描述了 3 种磁异常条件下太阳风 H-ENA 与磁鞘 H-ENA 的各沉降物理量. 磁异常阻碍太阳风 H-ENA 沉降的影响约为 14%, 而对磁鞘 H-ENA 阻碍的影响高达 40%. 这导致最强磁异常在正午时, 太阳风 H-ENA 占总沉降率的占比为 59%; 其能量沉降率占比为 81%. 最强磁异常位于正午时, 总 H-ENA 的沉降率和能量沉降率分别为 $1.22 \times 10^{24} \text{ s}^{-1}$, $1.12 \times 10^{27} \text{ eV} \cdot \text{s}^{-1}$.

2.2 沉降 H-ENA 与上游太阳风的关系

沉降 H-ENA 中的太阳风 H-ENA 与磁鞘 H-ENA 都是由太阳风等离子体产生, 其通量应与太阳风条件密切相关. 磁鞘 H-ENA 受到磁异常等多种因素影响, 其沉降通量并不稳定; 太阳风 H-ENA 产生于弓激波上游, 受其他因素影响较小, 与太阳风条件关系密切. 沉降太阳风 H-ENA 的通量可以由式 (1)~(3) 及式 (5) 推导获得. 通过下式可以看出, 沉降的太阳风 H-ENA 通量与上游太阳风通量成正比, 与外逸层在弓激波上游沿太阳风方向的密度积分成正比, 即

$$\begin{aligned}
 F_{\text{SW-ENA}}(\mathbf{r}) &= \int j(\mathbf{r}, E, \theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi dE = \\
 &= \int \frac{uvf \sin\theta}{m} \left[\int_{\text{BS}}^{\infty} \sum_i n_i(\mathbf{r}') \sigma_i(u) ds \right] d\theta d\varphi dE = \\
 &= \int \frac{uvI}{m} f \sin\theta d\theta d\varphi dE \approx \rho u I = F_{\text{SW}} I.
 \end{aligned} \tag{6}$$

其中, (θ, φ) 表示视线方向, BS 表示弓激波, I 表示自弓激波至无穷远的积分项, 下标 SW 表示太阳风, 下标 SW-ENA 表示太阳风 H-ENA.

2022 年 4 月 24 日一个 CME 到达了火星, 根据 MAVEN 探测的 CME 到达前后上游太阳风条件, 建立 H-ENA 模型, 并统计沉降 H-ENA 物理量如表 4 所示, 与太阳风通量的比例关系如图 7 所示. 表 4 与图 7 显示, 太阳风 H-ENA 与磁鞘 H-ENA 的最大通

表 3 不同磁异常条件下沉降 H-ENA 物理量统计
Table 3 Statistics on precipitating H-ENA parameters under different crustal field conditions

模型条件 (最强磁异常)	沉降太阳风 H-ENA			沉降磁鞘 H-ENA		
	最大通量 ($\times 10^{10}$)/(m ² ·s ⁻¹)	沉降率 ($\times 10^{24}$)/s ⁻¹	能量沉降率 ($\times 10^{27}$)/(eV·s ⁻¹)	最大通量 ($\times 10^{10}$)/(m ² ·s ⁻¹)	沉降率 ($\times 10^{24}$)/s ⁻¹	能量沉降率 ($\times 10^{27}$)/(eV·s ⁻¹)
Case 1 无	2.11	0.84	1.06	1.89	0.83	0.57
Case 2 位于子夜	2.06	0.80	1.01	1.59	0.70	0.47
Case 3 位于正午	1.87	0.72	0.91	1.33	0.50	0.21

表 4 不同太阳风条件下沉降 H-ENA 物理量统计
Table 4 Statistics on precipitating H-ENA parameters under different solar wind conditions

模型说明	太阳风	沉降太阳风 H-ENA		沉降磁鞘 H-ENA	
	通量($\times 10^{12}$)/(m ² ·s ⁻¹)	最大通量 ($\times 10^{10}$)/(m ² ·s ⁻¹)	沉降率($\times 10^{24}$)/s ⁻¹	最大通量 ($\times 10^{10}$)/(m ² ·s ⁻¹)	沉降率($\times 10^{24}$)/s ⁻¹
表3中Case 3	0.90	1.87	0.72	1.33	0.50
CME到达前	2.71	9.03	3.59	6.93	2.47
CME到达后	10.94	38.36	14.96	28.80	11.60

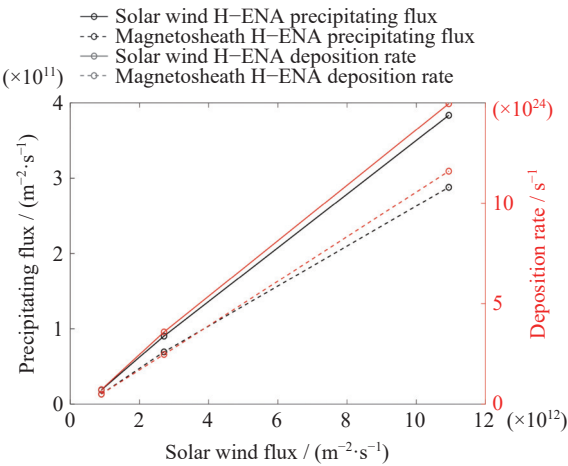


图 7 太阳风通量与沉降 H-ENA 通量以及沉降率的关系

Fig. 7 Relation between solar wind flux and the precipitating H-ENA flux, particle deposition rate

量、粒子沉降率与上游太阳风通量保持了正比例关系. 其中磁异常条件固定为最强磁异常在正午, 以排除其变化带来的影响. 太阳风 H-ENA 的沉降率占总沉降率 56%~59%. 太阳风 H-ENA 最大通量占太阳风通量的转换比为 2.1%~3.5%.

根据式 (4), 模拟了 CME 到达前后火星空间 H-ENA 定向微分通量的全球分布 (见图 8). 图 8 可以直观反映 CME 前后 H-ENA 模型的变化. 位于视场

左侧的是太阳风 H-ENA, 其高速低温, 在视场内分布集中; 在火星本体阴影附近的是磁鞘 H-ENA, 其相对低速高温, 在视场内分布区域分散. 太阳风 H-ENA 与磁鞘 H-ENA 在 CME 到达之后均明显增强.

3 讨论

采用单流体多成分 MHD 模型时, 弓激波上游稳态太阳风等离子体的动力学效应不显著, 可以采用 MHD 模型, 而火星磁鞘太阳风等离子体不满足 MHD 模型中各向同性假定, 磁鞘 H-ENA 的模拟结果可能与真实情况有所出入. 但磁鞘厚度较薄, 动力学效应对沉降的 H-ENA 影响较小, 且沉降 H-ENA 的主要成分为太阳风 H-ENA, 采用 MHD 模型是可以接受的.

采用各向同性的外逸层模型, 可能与真实情况略有不同, 但这种差异较小. MAVEN 搭载的 Imaging UltraViolet Spectrograph (IUVS) 显示 CME 期间太阳辐射稳定, 外逸层可以认为是短期稳定的. 外逸层的临界参数存在季节性变化, 可能会影响模拟沉降 H-ENA 的通量, 但不影响其变化的比例关系和主要结论.

作为沉降 H-ENA 物质与能量输入的次级效应, Haider 等^[26]总结了火星质子极光现象的观测与模型

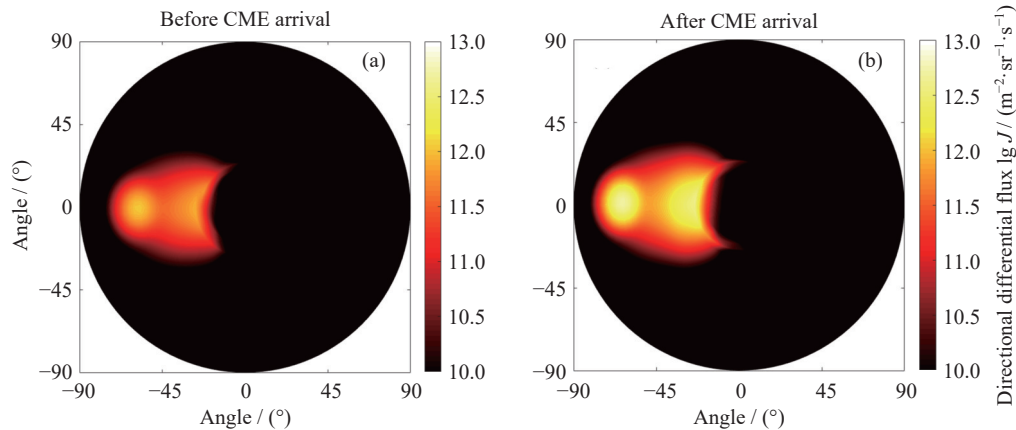


图 8 模拟 H-ENA 定向微分通量图像. 模拟观测位置为 MSO 坐标系下 $(-1.5, 2.6, 0)$, 视场为指向火星的半空间 2π 视场

Fig. 8 Image of simulated H-ENA directional differential flux. Virtual observation position is $(-1.5, 2.6, 0)$ in MSO frame, the field of view is 2π in half space field facing to Mars

工作. 基于蒙特卡洛方法的极光模型模拟了沉降 H-ENA 与大气相互碰撞进而发生能量损失和激发 Lyman- α 光谱的过程. 作为向低层大气直接输入物质与能量源头的沉降 H-ENA 在这里作为质子极光模型的输入条件, 对沉降 H-ENA 的研究有望进一步引导后续物理过程的研究.

太阳风 H-ENA 由弓激波上游太阳风等离子体与外逸层相互作用产生, 其通量与弓激波位置相关, 与太阳风动压相关. 该部分计算较为复杂, 可结合太阳风动压弓激波经验模型进行研究. Zhang 等^[18] 指出利用天问一号 (Tianwen-1) 搭载的火星离子与中性粒子分析仪 (Mars Ion and Neutral Particle Analyzer, MINPA) 遥感测量太阳风 H-ENA 反演上游太阳风条件, 可以作为监测数据的重要补充. 目前在近火点附近 MINPA 没有开启 ENA 探测模式, 后期有望获得沉降 ENA 观测数据, 以更深入开展太阳风物质与能量向低层大气输入的问题研究.

4 结论

H-ENA 沉降是火星空间环境的独特现象. 基于 MHD 模型, 建立了 H-ENA 模型, 模拟了沉降 H-ENA 的空间分布, 统计了沉降 H-ENA 的通量、沉降率、能量沉降率等物理量, 总结了磁异常对沉降 H-ENA 的影响, 模拟验证了沉降 H-ENA 与上游太阳风通量的正比例关系, 模拟了 CME 前后 H-ENA 图像, 计算了太阳风 H-ENA 的转化率.

结果表明, 沉降太阳风 H-ENA 的空间分布满足 $\cos Z$ 投影的分布规律, 受磁异常分布影响较小; 沉降磁鞘 H-ENA 则受到磁异常分布影响较大, 可能存在日变化周期的现象. 在本文模拟条件下, 沉降太阳风 H-ENA 占总粒子沉降率 59%, 占总能量沉降率 81%, 是沉降 H-ENA 的主要成分.

后续研究将根据沉降 H-ENA 的模型进一步探讨火星质子极光现象的规律, 根据火星 H-ENA 的实测数据开展更深入的研究工作.

致谢 MHD 模型由 Michigan 大学 CSEM 团队提供的 BATS-R-US 模型生成.

参考文献

- [1] GRUNTMAN M. Energetic neutral atom imaging of space plasmas[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, **68**(10): 3617-3656
- [2] WURZ P. Detection of energetic neutral atoms[M]//The Outer Heliosphere: Beyond the Planets. Germany, 2000: 251-288
- [3] GUO Zhizhong, FU Huishan, LIU Yangyang. Statistical study of electron flux in Martian space environment[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2022, **53**(4): 488-496 (郭志忠, 符慧山, 刘杨洋. 火星空间环境中电子通量的统计研究 [J]. *地球与行星物理评论*, 2022, **53**(4): 488-496)
- [4] VIGNES D, MAZELLE C, RME H, et al. The solar wind interaction with Mars: locations and shapes of the bow shock and the magnetic pile-up boundary from the observations of the MAG/ER Experiment onboard Mars Global Surveyor[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(1): 49-52

- [5] DEIGHAN J, JAIN S K, CHAFFIN M S, *et al.* Discovery of a proton aurora at Mars[J]. *Nature Astronomy*, 2018, **2**(10): 802-807
- [6] RITTER B, GÉRARD J C, HUBERT B, *et al.* Observations of the proton aurora on Mars with SPICAM on board Mars express[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(2): 612-619
- [7] HALEKAS J S. Seasonal variability of the hydrogen exosphere of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, **122**(5): 901-911
- [8] KALLIO E, LUHMANN J G, BARABASH S. Charge exchange near Mars: The solar wind absorption and energetic neutral atom production[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A10): 22183-22197
- [9] WANG X D, ALHO M, JARVINEN R, *et al.* Precipitation of hydrogen energetic neutral atoms at the upper atmosphere of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(10): 8730-8748
- [10] BARABASH S, LUNDIN R, ZARNOWIECKI T, *et al.* Diagnostic of energetic neutral particles at Mars by the ASPERA-C instrument for the Mars 96 mission[J]. *Advances in Space Research*, 1995, **16**(4): 81-86
- [11] FUTAANA Y, BARABASH S, GRIGORIEV A, *et al.* First ENA observations at Mars: ENA emissions from the martian upper atmosphere[J]. *Icarus*, 2006, **182**(2): 424-430
- [12] FUTAANA Y, BARABASH S, GRIGORIEV A, *et al.* First ENA observations at Mars: Subsolar ENA jet[J]. *Icarus*, 2006, **182**(2): 413-423
- [13] GUNELL H, BRINKFELDT K, HOLMSTRÖM M, *et al.* First ENA observations at Mars: Charge exchange ENAs produced in the magnetosheath[J]. *Icarus*, 2006, **182**(2): 431-438
- [14] GALLI A, WURZ P, BARABASH S, *et al.* Energetic hydrogen and oxygen atoms observed on the nightside of Mars[J]. *Space Science Reviews*, 2006, **126**(1): 267-297
- [15] GALLI A, WURZ P, KALLIO E, *et al.* Tailward flow of energetic neutral atoms observed at Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, **113**(E12): E12012
- [16] WANG X D, BARABASH S, FUTAANA Y, *et al.* Directionality and variability of energetic neutral hydrogen fluxes observed by Mars Express[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(12): 7635-7642
- [17] MA J J, LI W Y, KONG L G, *et al.* Solar wind energetic neutral atom observation at Mars by MINPA onboard the Tianwen-1 orbiter[C]//Proceedings of the Fall Meeting 2022. Chicago, American: AGU
- [18] ZHANG Y T, LI L, XIE L H, *et al.* Inversion of upstream solar wind parameters from ENA observations at Mars[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(7): 1721
- [19] RAMSTAD R, BRAIN D A, DONG Y X, *et al.* Energetic neutral atoms near Mars: Predicted distributions based on MAVEN measurements[J]. *The Astrophysical Journal*, 2022, **927**(1): 11
- [20] MA Y J, NAGY A F, SOKOLOV I V, *et al.* Three-dimensional, multispecies, high spatial resolution MHD studies of the solar wind interaction with Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A7): A07211
- [21] MA Y J, RUSSELL C T, FANG X, *et al.* MHD model results of solar wind interaction with Mars and comparison with MAVEN plasma observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(21): 9113-9120
- [22] CHAMBERLAIN J W, HUNTEN D M. Theory of Planetary Atmospheres[M] Orlando FL: Academic Press, 1987
- [23] RINSUKE I, TATSUO T, TOSHIZO S, *et al.* Analytic cross sections for collision of H, H₂, He and Li atoms and ions with atoms and molecules; 1993
- [24] LINDSAY B G, STEBBINGS R F. Charge transfer cross sections for energetic neutral atom data analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A12): A12213
- [25] SWACZYNA P, MCCOMAS D J, ZIRNSTEIN E J, *et al.* Angular scattering in charge exchange: Issues and implications for secondary interstellar hydrogen[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, **887**(2): 223
- [26] HAIDER S A, MAHAJAN K K, BOUGHER S W, *et al.* Observations and modeling of martian auroras[J]. *Space Science Reviews*, 2022, **218**(4): 32

作者简介



张艺腾 男, 1981年11月出生于辽宁省沈阳市. 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 硕士生导师. 主要研究方向为火星空间环境、高精度磁场探测与应用等.

E-mail: ytzhang@nssc.ac.cn



李磊 女, 中国科学院国家空间科学中心研究员. 主要从事行星空间环境探测研究.

E-mail: lil@nssc.ac.cn