0254-6124/2022/42(1)-0011-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

XIE Lianghai, ZHANG Aibing, LI Lei, WANG Huizi, SHI Quanqi, ZHANG Jiang, WANG Wenjing, WEISER Martin, ZHANG Yiteng, KONG Linggao, FENG Yongyong, ZHOU Bin, WANG Jindong. Chang'E-4 Energetic Neutral Atom Observation Reveals New Features about the Solar Wind–Moon Interaction (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 11–24. DOI:10.11728/cjss2022.01.20220113

嫦娥四号能量中性原子观测揭示太阳风与月面相互作用新特征*

谢良海[1,2] 张爱兵[2,3] 李 磊[1,2] 王慧姿[4] 史全岐[4]
张 江[4] 王文静[2] WEISER Martin[5] 张艺腾[1,2]
孔令高[2] 冯永勇[1,2] 周 斌[1,2] 王劲东[1,2]

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(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(山东大学空间科学与物理学院 威海 264209)

5(瑞典空间物理研究所 基律纳 SE-981)

摘 要 与地球不同，月球暴露在太阳风中。太阳风注入到月面，与月壤相互作用，部分太阳风质子以能量中性原子（Energetic Neutral Atom, ENA）的形式被月表散射。另外，月球局部地区的磁异常能阻挡太阳风到达月面，并形成微磁层，成为月面天然的保护屏障。然而以往相关的观测数据都来自轨道器，月面的真实情况无从知晓。嫦娥四号任务搭载的中性原子探测仪首次在月面就位测量 ENA，为研究月面和太阳风相互作用提供了新的视角。本文综述了嫦娥四号的 ENA 探测，重点介绍了一些不同于以往遥感观测的新现象，包括月面 ENA 反射率较高，ENA 通量向低能段聚集，以及除了氢 ENA 还有其他重成分 ENA 等。分析上游太阳风观测数据发现，月面对太阳风的作用主要体现在 105～523 eV 能量段，且在磁异常下游时 ENA 通量整体偏低。利用全球 Hall MHD 数值模拟，证明了微磁层是造成 ENA 通量降低的原因。同时，还发现月球微磁层的形成与太阳风动压以及离子惯性长度有关，微磁层内的静电场使得太阳风减速和偏转，对应的电势差为 50～260 V。

关键词 太阳风–月面相互作用，能量中性原子，微磁层，嫦娥四号

中图分类号 P354.1

Chang'E-4 Energetic Neutral Atom Observation Reveals New Features about the Solar Wind–Moon Interaction

* 国家重点研发计划项目（2020 YFE0202100）和国家自然科学基金项目（41941001，42174216）共同资助

2021-12-28 收到原稿，2022-01-11 收到修定稿

E-mail：zhab@nssc.ac.cn

XIE Lianghai[1,2] ZHANG Aibing[2,3] LI Lei[1,2] WANG Huizi[4] SHI Quanqi[4]
ZHANG Jiang[4] WANG Wenjing[2] WEISER Martin[5] ZHANG Yiteng[1,2]
KONG Linggao[2] FENG Yongyong[1,2] ZHOU Bin[1,2] WANG Jindong[1,2]

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

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

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

4(*School of Space Science and Physics, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai* 264209)

5(*Swedish Institute of Space Physics, Kiruna* SE-981)

Abstract Different from the Earth, the solar wind can directly impact the lunar surface, and partly be scattered as Energetic Neutral Atoms (ENAs). However, the lunar magnetic crustal fields in some regions, called magnetic anomalies, can deflect the solar wind to form a mini-magnetosphere, shielding the surface. All previous understandings about these processes are obtained from orbit, and the truth on the lunar surface is still unknown. The Advanced Small Analyzer for Neutrals (ASAN) onboard Chang' E-4 mission can detect the reflected Energetic Neutral Atoms (ENAs) from the lunar surface, which will provide new perspectives to study the solar wind interaction with the Moon. Here is a review on the recent works with the ENA data from ASAN, focusing on introducing some new discoveries by ASAN, such as a higher ENA reflection ratio, more ENAs gathered at lower energies, and some heavier ENAs other than the H ENA. Compare with the upstream solar wind data, it is found that the ENAs in the energy range of 105～523 eV are closely related with the solar wind. Moreover, the ENA fluxes downstream from the magnetic anomalies are generally smaller. Combined with the global Hall MHD simulation, reduction in the ENA flux is confirmed to be caused by a mini-magnetosphere. Meanwhile, it is found the formation of the mini-magnetosphere is determined by the solar wind dynamic pressure and the ion inertia length, and the mini-magnetosphere brings a deceleration to the solar wind, by a differential electrostatic potential of 50～260 V.

Key words Interaction between solar wind and lunar surface, Energetic Neutral Atom (ENA), Mini-magnetosphere, Chang'E-4

0 引言

由于月球缺少全球性磁场及浓密大气层的保护，太阳风粒子可以毫无障碍地轰击月表。这些粒子的注入一方面会引起月表物质各种物理和化学属性的变化，如通过还原反应产生月球水[1-3]和纳米铁[4,5]，带来空间风化效应；另一方面通过反射、溅射等方式补充月球稀薄的气体外逸层[6,7]。因此，研究太阳风与月面相互作用对于理解月面的光谱特征以及月球稀薄大气的成分构成具有重要意义。关于太阳风月面反射，人们比较关心的是其反射率、能量分布和角分布等，Kaguya 卫星首先观测到约有 0.1%～1% 的太阳风质子会被月表反射回来，能量损失约为 30%[8]。另外，Chandrayaan-1 和 IBEX 任务的中性原子探测仪发现部分太阳风质子获得一个电子后，以能量中性原子（Energetic Neutral Atom, ENA）的形式反射回来，平均反射率为 10%～20%，损失能量约为 50%[9]。Chandrayaan-1 观测结果显示，ENA 的角分布并不是理论预期的前向散射，而是以后向散射为主，这可能与月表的微观结构有关[10]。另外，ENA 能量近似呈 Maxwell-Boltzmann 分布，其温度正比于入射太阳风速度，但其反射率似乎与入射太阳风速度无关，这

与理论预期不符[11]。Funsten 等[12] 利用 IBEX 数据分析发现, ENA 反射率在入射能量较低时与太阳风能量无关, 但在入射能量较高时(>250 eV)反射率随入射太阳风能量增大而减小, 与理论预期一致。但是, 这些结果都是来自卫星观测, 月面的情况还有待月面就位观测数据的进一步验证。此外, 以往这些结果都只看到了反射的 H 原子, 而对于可被溅射出来的 O、Si、Mg、Ca、Al 和 Fe 等重元素目前还没有观测。因此, 太阳风溅射对月球气体外逸层的具体贡献目前仍不清楚。

另外, 月球虽然没有像地球一样全球性的偶极场, 但有广泛分布的月壳剩磁, 称为磁异常[13,14]。这些磁异常主要分布在月球背面, 水平方向的特征尺度约为 100 km, 月面的磁场强度为几十到几百 nT 不等。通常情况下, 太阳风可以直接轰击月面并被月面吸收或散射。但在一些强磁异常区, 太阳风会被磁场偏转和反射, 从而大大降低到达月面的太阳风通量, 形成一个类似于地球磁层一样的局部空腔结构。由于该结构的尺度小, 通常称之为微磁层。月球微磁层是太阳系中最小的磁层结构。认识微磁层, 一方面有助于理解太阳风与小尺度磁场的相互作用; 另一方面, 微磁层作为月面天然的屏障, 是研究表面物质成分、月壤风化等与太阳风关系的最佳场所。

月球微磁层的早期观测证据来自月球勘探者号(Lunar Prospector, LP)卫星。利用这些数据, Lin 等[15] 首先发现在雨海对跖区(Imbrium antipode)磁异常区存在类似于地球弓激波和磁鞘区的压缩及磁场低频扰动, 之后 Halekas 等[16] 发现这种激波结构更多地发生在离子回旋半径较小的时候。最近, Halekas 等[17] 利用 ARTEMIS 卫星数据进一步证实了与月球微磁层相关的激波存在。然而, 一个完整的磁层结构还应包含激波之下的等离子体空腔。这种空腔结构目前仅被 LP 卫星观测到一次, 并伴随一些特殊的观测条件, 例如低高度、高太阳天顶角以及小的离子惯性长度[18]。这表明月球微磁层由于尺度小, 离子可能是非磁化的, 部分离子可以穿透进去, 从而不容易形成等离子空腔; 另一种可能是空腔的高度非常低, 无法被绕月飞行的卫星看到, 这时可以借助 ENA 遥感观测推断是否有微磁层。Kaguya 和 Chandrayaan-1 在一些强的磁异常区都观测到大量反射的太阳风质子[19,20]。同时, 这些区域的 ENA 发射率大大降低, 在 ENA 图像上留下一个局部的空洞[21,22]。这些结果表明,太阳风在强磁异常区受到了磁场的有效阻挡, 到达月面的太阳风通量大幅度减少, 从而间接证实了微磁层及相应等离子空腔存在。然而, 目前仍然没有月面微磁层的直接观测数据。

嫦娥四号是人类首个着陆在月球背面的探测器, 其上搭载的中性原子探测仪可以就位测量被月面散射的太阳风 ENA 粒子。通过分析嫦娥四号的 ENA 数据, 可以获得更加准确的太阳风在月面的散射信息, 有助于更好地理解太阳风与月面的相互作用。此外, 嫦娥四号着陆点(177.6°E, 45.4°S)刚好位于月球最强磁异常区 —— 雨海对跖区(Imbrium antipode)的东部边缘, 当太阳风从西边吹过来时此处可能形成微磁层, 从而为嫦娥四号就位观测月球微磁层提供了良好契机。

1 中性原子探测仪

嫦娥四号上搭载的中性原子探测仪(Advanced Small Analyzer for Neutrals, ASAN)由瑞典空间物理研究所(Swedish Institute of Space Physics, IRF)和中国科学院国家空间科学中心联合研制。该仪器搭载在嫦娥四号巡视器上, 对月表能量中性原子和正离子的能量、通量和成分进行探测。中性原子探测仪传感器组成如图 1 所示[23]。中性原子探测仪有两种工作模式: 中性原子探测模式和离子探测模式, 可分时探测中性原子和正离子, 其中中性原子探测模式为其主要探测模式。在中性原子探测模式下, 能量中性原子经过离子偏转系统后进入仪器内部, 被电荷转换面电离为正离子, 正离子通过静电分析器完成能量分析, 之后由飞行时间单元(离子打在起始面上产生二次电子, 并被电子倍增器放大产生起始信号; 离子与起始面作用后生成的中性原子打在终止面上, 产生二次电子并被电子倍增器放大产生终止信号)确定其速度, 通过能量和速度可以得到中性原子的质量(成分)信息。在离子探测模式下, 离子偏转系统关闭, 可实现正离子探测。中性原子探测仪正样如图 2 所示, 前部为传感器, 入口斜向上, 后部为电子学箱, 仪器总质量(包括电子学)为 970 g, 功耗 3.4 W, 使用瑞典空间物理所的定标设备完成了定标。

中性原子探测仪的能量范围为 10 eV 至 10 keV,

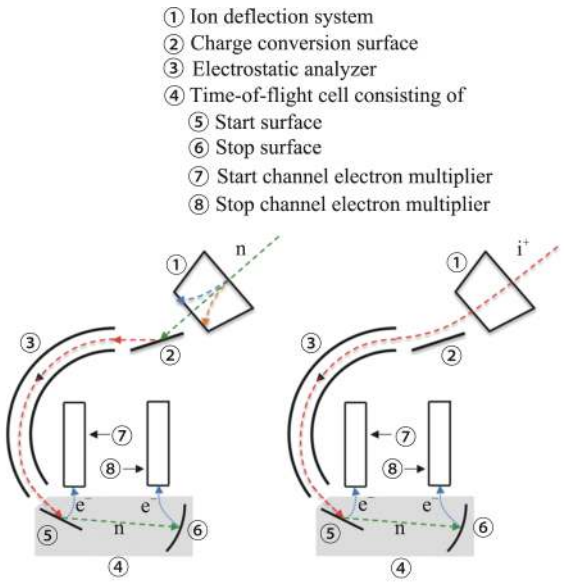


图 1 中性原子探测仪传感器

Fig. 1 Ion optical elements of the sensor

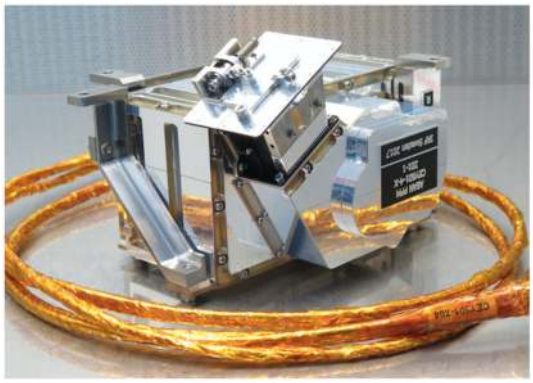


图 2 中性原子探测器正样

Fig. 2 ASAN flight model

分成 48 个能道，平均能量分辨率$\Delta E/E$约为 30%（实际的分辨率取决于测量粒子的能量，氢原子的能量分辨率在 16%～130% 之间变化）。基于飞行时间质谱分析技术，中性原子探测仪可以实现成分分辨，质量分辨率（$m/\Delta m$）约为 2，能够区分氢、氦和氧组（≥ 16 amu）。仪器的时间分辨率为 4.6 s。中性原子探测仪视场为 37°×30°（垂直方向为 37°，水平方向为 30°，半高宽为 28°×14°），视轴斜向下指向月表，与水平方向夹角为 30°，所产生的梯形视场边界围成的面积约为 1.57 m^2 [24]。中性原子探测仪安装在嫦娥四号巡视器的$+x$舱板上（见图 3），仪器隔热安装在有效载荷舱内，传感器的入口系统通过$+x$舱板的开孔伸出舱外。传感器入口采用一次性开启的保护盖防止着陆时月尘进入，巡视器到达月表后，保护盖永久打开。结合巡视器的机动性，中性原子探测仪可以在不同太阳风照射角度及巡视路径上不同地点处开展探测。

2 ENA 数据处理及能谱结果

2019 年 1—6 月（6 个月昼）中性原子探测仪开机 21 次进行探测，单次科学探测的持续时间约 3 h。数据分以下几个步骤处理。首先，由于计数率较低，将单次科学探测的原始计数进行积分以改善数据统计的质量，然后扣除由放射性同位素热源（RHU）造成的背景噪声，接着评估造成不确定性的可能因素。最后，将粒子计数转换为微分通量。

安装在巡视器后面板上的放射性同位素热源（位于中性原子探测仪安装位置的另一侧）会发出伽马射线，产生明显的背景干扰信号。背景扣除可使用两种不同的方法，选用哪种方法取决于要处理的信号类型，以及综合考量在统计学上哪一种更好。典型的能量中性氢原子能谱在太阳风能量处有一个截止值，一般约为 1 keV。鉴于来自放射性同位素热源的背景信号与仪器的能道无关，而 4.5～8.7 keV 之间能道的信号主要由放射性同位素热源产生，通过这些能道的平均计数率可估算背景信号，从 START 原始计数率中扣除平均背景计数率即可获得能量中性氢原子有效计数率。对于质量大于 4 amu 的较弱能量中性原子信号，需要估算飞行时间。放射性同位素热源产生的背景信号在飞行时间谱中有一个峰值，通常低于 1 amu。通过事件符合性可估算背景计数率（$r_{\rm BG}$）的上限，即 $r_{\rm BG} = r_{\rm STA}\ r_{\rm STO}\ t_{\rm TOF}$。其中：$r_{\rm STA}$ 为飞行时间起始信号计数率；$r_{\rm STO}$ 为飞行时间终止信号计数率；$t_{\rm TOF}$ 为飞行时间窗口长度，为 1.6 μs。有效计数率通过从飞行时间计数率中扣除平均背景计数率 $r_{\rm BG}$ 获得。

迄今为止，观测到的主要成分为能量中性氢原子。因此假设重粒子成分可忽略，能量中性氢原子的微分通量为

$$f_{\rm H} = \frac{C - s_{\rm BG}}{\varepsilon_{\rm H} G_{\rm H0} E_0 {\rm d}t}. \tag{1}$$

其中，C为每个能道的 START 原始计数，$s_{\rm BG}$为来自 RHU 的背景信号，从 4.5～8.7 keV 能道的平均计数估计，$\varepsilon_{\rm H}$为探测效率，$G_{\rm H0}$为未包含探测效率的能量中性氢原子的几何因子，E_0 为能道中心值，${\rm d}t$为每个能

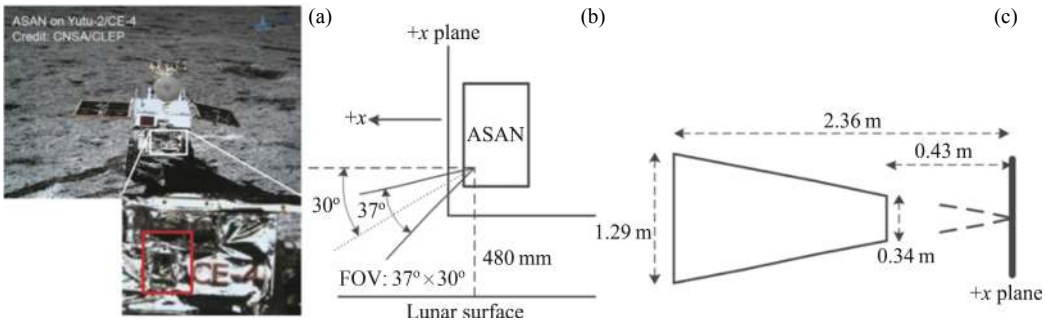


图 3 (a) 巡视器上的中性原子探测仪(红色正方形), (b) 仪器安装方位(巡视器前进方向为+x方向, 虚线显示的是视场的视轴), (c) 中性原子探测仪收集粒子的表面区域的视场范围

Fig. 3 (a) ASAN (red square) on the rover, (b) accommodation geometry (the rover moves nominally in the +x direction, and the dotted line shows the bore sight of FOV), (c) field of view footprint of the surface area from which ASAN collects particles

道的积分时间。

质量大于 4 amu 的重粒子成分的微分通量使用

$$f_{\mathrm{X}}=\frac{C-r_{\mathrm{BG}}\mathrm{d}t}{\varepsilon_{\mathrm{X}}G_{\mathrm{X0}}E_0\mathrm{d}t} \tag{2}$$

进行计算。其中 C为在感兴趣的质量范围内的计数值, r_{BG}为背景计数率, 由飞行时间系统中事件符合性计数来估计, ε_{X}为符合探测效率, G_{X0}为未考虑探测效率的能量中性重粒子几何因子, E_0 为能道的中心, $\mathrm{d}t$为一个能道的积分时间。值得注意的是, 因为r_{BG}为背景计数率的上限, 所以可能在一定程度上低估能量中性重粒子的微分通量。

粒子通量的不确定度包括几何因子的不确定度和计数统计误差。对于两个最低的能道, 几何因子的不确定度为标称值的+200% 和–70%, 其他能道为+40% 和–30%。

图 4 显示了 2019 年 5 月 1 日 06:18—10:45 UTC 期间探测到的能量中性氢原子的平均能谱, 当时太阳风速为 340 km·s^{-1}。图 4(a) 给出了能量中性氢原子通量, 图 4(b) 给出了质量大于 4 amu 的能量中性原子通量。当通量低于灵敏度极限(见图 4 中虚线)时, 无法将其与零通量区分开。能量中性氢原子能谱中有两个域, 能量大于 100 eV 的通量几乎完全来自月面散射的太阳风, 能量低于 100 eV 的则可能来自表面溅射。 较重的能量中性原子(质量大于 4 amu)集中在能量小于 100 eV 范围内。每次测量的重原子成分的结果变化很大, 可能是 5 keV 以上的重原子, 也可能是后向散射的太阳风重离子, 例如高价氧离子, 这有待进一步研究(见图 4b)。由于背景噪声的影响,

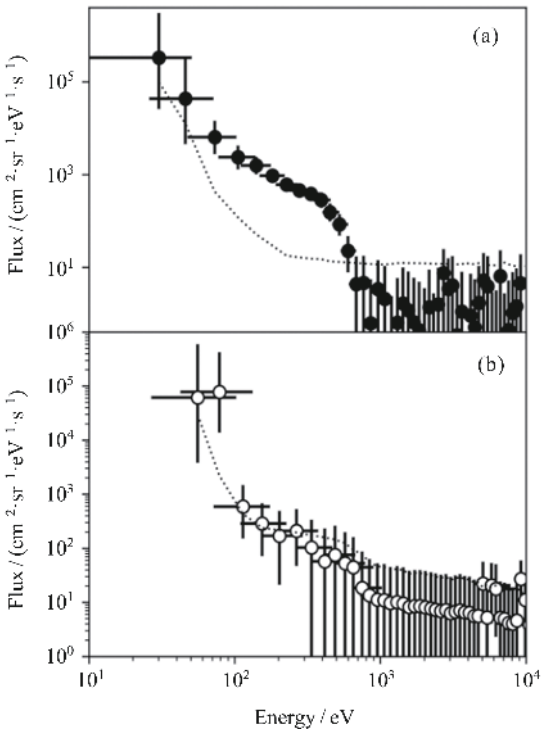


图 4 2019 年 5 月 1 日 06:18—10:45 UTC 期间测得的能量中性粒子平均能谱

Fig. 4 Average ENA energy spectrum from 06:18 to 10:45 UTC on May 1, 2019

质量在 1 amu $< m \leqslant$ 4 amu 的能量中性原子更加难以区分。

ASAN 测量到的 ENA 微分通量(j_{ENA})与太阳天顶角(SZA, 定义符号 α)及月球车相对于太阳的方向有关。由于月球车在 ASAN 测量期间不移动, 因此只能观测来自特定方向的表面散射通量。如果月面的

散射函数与轨道遥感得到的散射函数[25]相同，则基于 ASAN 观测数据，使用散射函数计算月表反射的 ENA 总通量；结合太阳风参数，可以计算氢 ENA 的反射率。首先对 ASAN 能谱进行能量积分，得到方向通量，近似写为

$$j_{\mathrm{ENA}}\left(\alpha_0,\phi_0,\theta_0\right)=\sum_E\frac{\left(j_{E_{i+1}}+j_{E_i}\right)\left(E_{i+1}-E_i\right)}{2}. \tag{3}$$

其中，下标 0 表示中性原子探测仪观测的角度，ϕ为散射方位角、θ 为散射极角(定义见文献 [24])，$j_{E_i}(\mathrm{cm}^{-2}\cdot\mathrm{sr}^{-1}\cdot\mathrm{s}^{-1}\cdot\mathrm{eV}^{-1})$为能道$E_i$(eV) 的微分通量。采用文献 [25] 的方法，可以得到 ASAN 视场方向上的散射函数$f_s\left(\alpha_0,\phi_0,\theta_0\right)$，再结合太阳风通量 J_{sw}，可以计算垂直方向上的反射率

$$R_{\perp}=\frac{j_{\mathrm{ENA}}(\alpha_0,\phi_0,\theta_0)}{f_s\left(\alpha_0,\phi_0,\theta_0\right)\cdot J_{\mathrm{sw}}}. \tag{4}$$

$R_{\perp}$的误差源包括 ENA 方向通量 j_{ENA} 的误差和太阳风通量 J_{SW} 的误差。ENA 方向通量 j_{ENA} 的误差来源于各能道几何因子的误差，太阳风通量的误差来源于中性原子探测仪观测期间太阳风的变化。

2019 年 5 月 1 日 ASAN 观测时，$\alpha=58^{\circ}$，月球车观测的散射方位角ϕ=–31°和散射极角 θ=60°，低端截止能量为 30 eV 的能量中性氢原子反射率 $R_{\perp}$=0.32(0.19, 0.58)，低端截止能量为 46 eV 的能量中性氢原子反射率 $R_{\perp}$=0.10(0.07, 0.17)，括号中的数字表示第 25 个和第 75 个百分位数。而 Chandrayaan-1 观测的反射率为 0.19，第 25 和第 75 百分位数分别为 0.16 和 0.21。IBEX 星际边界探测器探测的反照率为 0.11 ± 0.06(1σ)。ASAN 测量结果略高于以往遥感观测结果，这可能与低能段的溅射有关。

为了将 ASAN 的能谱与 Chandrayaan-1 和 IBEX 的结果进行比较，利用太阳风能量 E_{sw} 对中性原子的能量进行归一。如图 5 所示，垂直方向的误差棒对应于 90% 置信区间，水平方向的误差棒对应于能量响应最大值的半宽。虚线表示 90% 置信区间，低于该置信区间，中性原子探测仪有效计数无法与噪声区分开来。从图 5 可以看出，ASAN 能谱在大于 0.1E_{sw} 部分与 Chandrayaan-1 及 IBEX 的结果有很好的一致性。与 ENA 生成过程相关的有两种成份。高于 0.1E_{sw} 的成分主要是太阳风质子反向散射为能量中性氢原子，而低于该能量的中性原子，月表溅射的 ENA 比重增加。溅射 ENA 的能量主要在 0.1～100 eV。与 Chandrayaan-1 和 IBEX 探测器数相比，中性原子探测仪数据显示在小于 0.1 E_{sw} 以下有较大的通量。低端通量在不同次探测中变化很大。这种现象可能是由于溅射产额以及月壤中可用氢的变化造成的。Chandrayaan-1 和 IBEX 探测器的 ENA 能谱是在轨道上大面积区域的平均值。其中，IBEX 是月球的 1/4，Chandrayaan-1 是几百平方千米。因此，观测区域的任何局部特征都是模糊的。而中性原子探测仪的视场范围只有 1.57 m^2，局部风化层特征例如孔隙率、粒度和成分也可能影响能谱，尤其是在能量较低时。图 4 和图 5 展示了太阳天顶角 α=58°和散射极角 θ=60°情况下的 ENA 能谱。Chandrayaan-1 的能谱是 α 范围为 0°～90°和 θ=0°(即星下点方向)下的平均值。IBEX 的能谱是一个典型的 1/4 月球表面的加权平均值，覆盖范围广，α 范围为 0°～90°，θ 为 0°～90°。ENA 能谱可能随 α 和 θ 而变化。因此当在所有角度上积分时，中性原子探测仪的特定观测几何可能导致特殊的能谱。此外，最低定标能量为 100 eV，外推得到的更低能量的几何因子存在不确性，这也是在低能量下不同探测器结果存在差异的另一个原因。

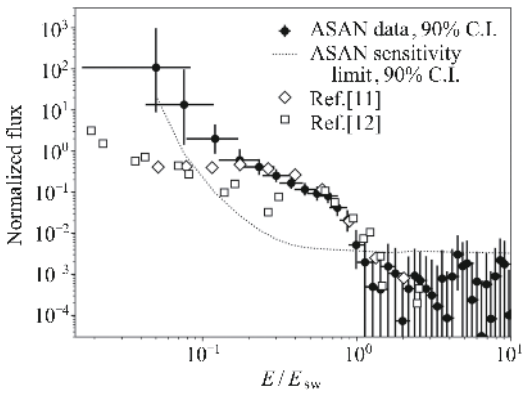


图 5 2019 年 5 月 1 日 06:18—10:45 UTC 观测的能量中性氢原子平均能谱

Fig. 5 Average hydrogen ENA energy spectra at 06:18—10:45 UTC on May 1, 2019

3 月球微磁层

ASAN 结果低能段通量较高的另一个原因可能是受到周围磁场的减速作用。如图 6 所示，虽然嫦娥

四号着陆点(177.6°E, 45.4°S)处的磁场比较弱(约为6 nT), 但在该着陆点西北边是月球最强的磁异常区, 即雨海对跖区(Imbrium antipode)。该磁异常区的中心位于162°E, 33°S, 半径达600 km[13], 嫦娥四号刚好位于该磁异常区的东南边缘。以往研究结果表明, 该磁异常区可能形成微磁层[15], 并且可以屏蔽掉27%～74%的太阳风[22]。由图6可知, 当太阳风西边吹过来时, 嫦娥四号位于磁异常的下游, 这时如果上游的磁异常形成微磁层, 嫦娥四号可能被包裹在微磁层的磁尾里。由于微磁层可以使太阳风发生偏转及减速, 从而会影响月面测到的ENA能谱。接下来利用ASAN观测的ENA数据, 分析微磁层对ASAN观测结果的影响, 并对月球微磁层的形成条件及其屏蔽效率展开讨论[26]。

选取2019年1月11日至2020年4月28日期间中性原子探测仪的46个ENA能谱数据。如图7(a)所示, 其中蓝色、红色星号分别表示上游和下游的测量值, 蓝色和红色线分别表示上游测量和下游测量的

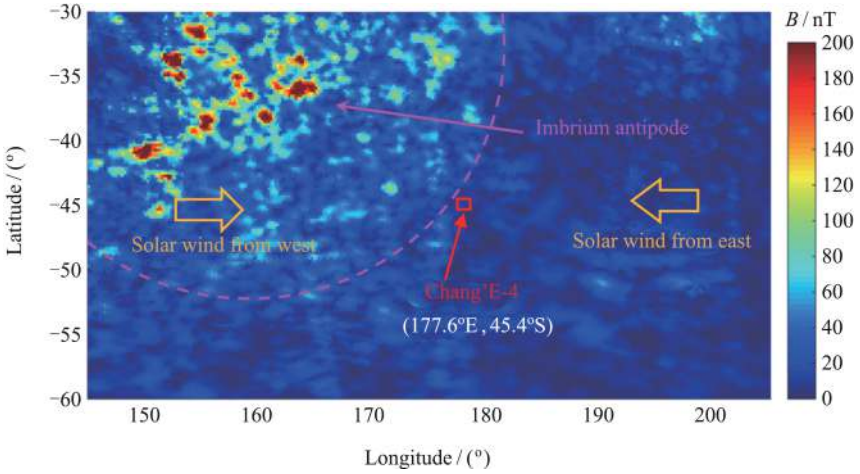


图6 嫦娥四号着陆点周围的磁场分布

Fig. 6 Lunar crustal magnetic field strength distribution near the Chang'E-4 landing site

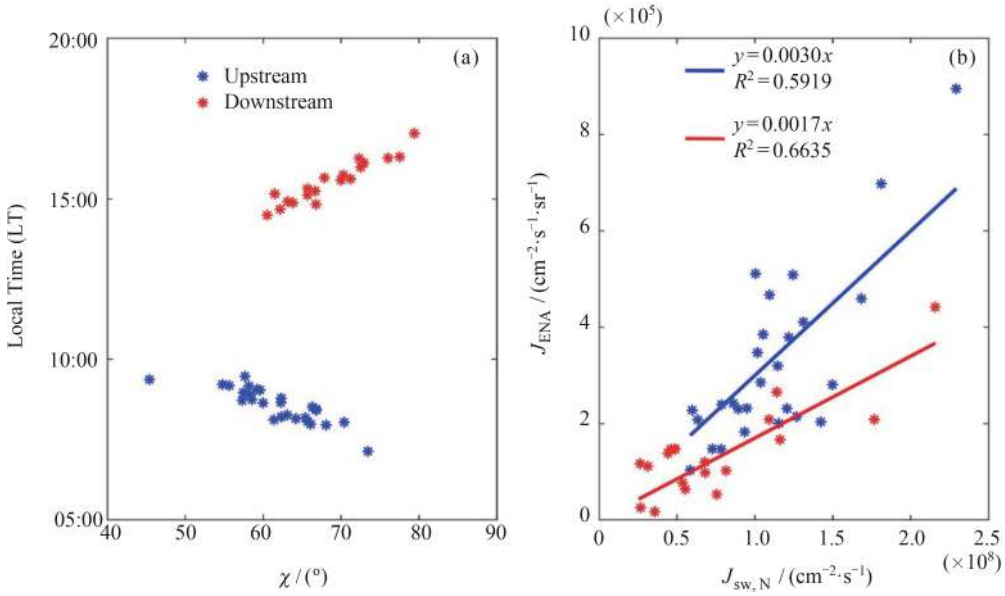


图7 ENA观测对应的月球地方时及ENA微分通量J_{ENA}与太阳风通量法向分量$J_{\mathrm{SW,N}}$之间的关系

Fig. 7 Local time for ASAN ENA measurement, dependence of the differential ENA flux J_{ENA} on the normal component of the solar wind flux $J_{\mathrm{sw,N}}$

拟合线。中性原子探测仪开机时间集中在月球的上午和下午两个时间段，其中有 26 次测量发生在上午，对应的时间为 07:00—09:30 LT，其他测量则发生在下午，对应时间为 14:30—17:00 LT。结合图 6 发现，上午时段嫦娥四号是在雨海对跖区磁异常区的上游，而下午时段嫦娥四号是在磁异常区的下游，因此下游测量可能看到微磁层的尾巴。由上节讨论，ASAN 测到的 H-ENA 可能受到月表溅射的能量中性重粒子的污染，这些污染主要集中在低于 100 eV 能量段[23,24]。因此，这里选取能量高于 100 eV 的 ENA 通量研究磁异常对太阳风的影响。

首先通过式(3)对 100 eV 以上能量范围的 ENA 能谱进行积分，得到单次测量的 ENA 微分通量，即 $J_{\rm ENA}$。根据 Chandrayaan-1 观测结果，月面散射的 ENA 微分通量决定于太阳风通量、太阳天顶角以及散射角等参数。通过对散射角求积分，可以得到 $J_{\rm ENA} \propto J_{\rm sw}\cos(\alpha)$，其中 $J_{\rm sw}$ 和 α 分别表示太阳风通量和太阳天顶角[25]。可以发现 $J_{\rm sw}$ 实际上是和太阳风法向通量成正比，即 $J_{\rm ENA} \propto J_{\rm sw,N}$，其中 $J_{\rm sw,N} = J_{\rm sw}\cos\chi$ 是太阳风在月表的法向通量，χ 为太阳风与月表法向的夹角。如图 7(b)所示，上游和下游观测到的 $J_{\rm ENA}$ 均与 $J_{\rm sw,N}$ 有比较好的线性关系。另外，还发现下游的 $J_{\rm ENA}$ 整体上小于上游的 $J_{\rm ENA}$，这意味着这些下游观测可能和微磁层有关。这时磁异常位于嫦娥四号上游，如果形成了微磁层，嫦娥四号会被包裹在微磁层的磁尾里。由于微磁层对太阳风的屏蔽作用，造成到达月面的太阳风通量降低，相应月面反射的 EAN 通量也会降低，最终造成如图 7(b) 所示的下游 ENA 通量整体偏低。

另外，下游测量到的 $J_{\rm ENA}$ 虽然较小但仍然正比于 $J_{\rm sw,N}$，这表明微磁层可能只是部分屏蔽掉太阳风，一些太阳风质子可以穿透微磁层并到达月表，从而 $J_{\rm ENA}$ 与 $J_{\rm sw,N}$ 仍然正相关。因此，有必要进一步估计有多少太阳风粒子能够穿透微磁层，即粒子的穿透效率 $\eta_{\rm SW}$。由图 7(b) 中的拟合曲线可知，没有微磁层时 $J_{\rm ENA}$ 与 $J_{\rm sw,N}$ 的比值约为 0.003。如果忽略不同散射角分布函数带来的影响，可以将 0.003 看成是正常情况下 $J_{\rm ENA}$ 与 $J_{\rm sw,N}$ 的平均比值，其表征的是 ASAN 视场内 ENA 的平均反射率。将位于磁异常下游时测到的 $J_{\rm ENA}/J_{\rm sw,N}$ 除以 0.003，就得到了微磁层的穿透效率。

如图 8(a) 所示，当离子惯性长度足够大(>120 km)时，一些 $\eta_{\rm sw}$(图 8 中绿色星号)可能接近或甚至大于 1.0，这意味着在这些时刻并没有形成微磁层，可能的原因是大部分离子都穿透进去了从而破坏了微磁层结构。因此，将这些数据归为外部测量(Outside measurements)，其余的则为内部测量(Inside

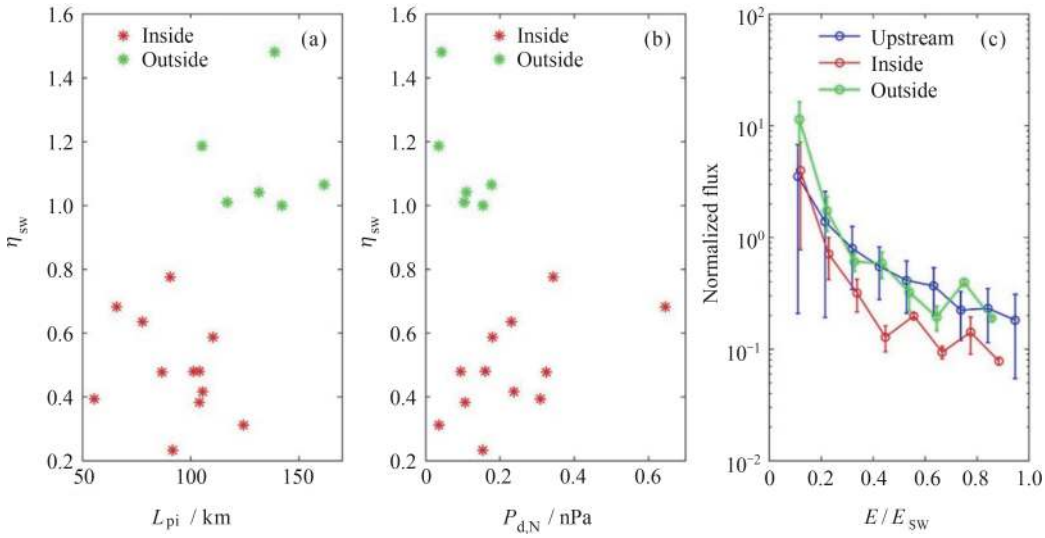


图 8 (a) 和 (b) 分别为穿透效率 $\eta_{\rm sw}$、离子惯性长度 $L_{\rm pi}$ 和太阳风动压法向分量 $P_{\rm d,N}$ 的依赖关系，(c) 归一化的能谱，不同点间的间隔约为 0.1 $E_{\rm sw}$

Fig. 8 Dependences of penetrating efficiency (a) and the ion inertia length $L_{\rm pi}$ (b) on the normal component of the solar wind dynamic pressure $P_{\rm d,N}$, respectively, (c) normalized energy spectra with an increment of about 0.1 $E_{\rm sw}$ for the upstream, inside, and outside measurements, respectively

measurements), 只有内部测量的$\eta_{\rm SW}$才能表征微磁层的穿透效率。通过这种方式, 最终得到微磁层的穿透效率为 0.23～0.78(如图 8a 中的红色星号), 平均值为 0.57。此前, Chandrayaan-1 在雨海对跖区磁异常区附近观测到的磁场屏蔽效率为 0.27～0.74[22], 对应的$\eta_{\rm sw}$为 0.26～0.73, 与这里的结果基本一致。

此外, Chandrayaan-1 结果显示$\eta_{\rm SW}$与太阳风动压正相关。考虑到太阳风动压对微磁层的作用主要在垂直月面方向, 这里检查$\eta_{\rm SW}$与太阳风动压方向分量 $P_{\rm d,N}$ 的关系, 有

$$P_{\rm d,N}=\rho v_{\rm sw}^2\cos^2\chi. \tag{5}$$

其中, ρ 和 $v_{\rm sw}$ 分别为太阳风的密度和速度。如图 8(b)所示, 对于内部测量, $\eta_{\rm SW}$随 $P_{\rm d,N}$ 增加而增加, 这与 Chandrayaan-1 的观测结果一致。对于外部测量, $\eta_{\rm SW}$通常大于 1.0, 最大值接近 1.5, 这意味着有额外的太阳风打到月面, 可能来源是太阳风由旁边磁场偏转而来。另外, 此时$\eta_{\rm SW}$随 $P_{\rm d,N}$ 增加而减小, 这表明太阳风动压越低越容易被磁场偏转。Chandrayaan-1 也对类似的通量增强区进行了观测, 其一般发生在紧邻微磁层的周围, 产生原因为太阳风被微磁层偏转, 并在其外围形成一个堆积区[21]。此外, 通过比较归一化的能谱 (ENA 能量由太阳风动能 $E_{\rm sw}$ 归一化, 微分通量由 $10^{-5}J_{\rm sw,N}$ 归一化), 发现微磁层内的 ENA 通量整体小于没有微磁层时(上游时)的 ENA 通量(见图 8c)。并且, 这种差异在高能段更明显, 这表明离子在穿透微磁层时已经减速, 从而造成高能段通量向低能段转移。对于外部测量, 其与上游观测结果在高能段相差不大, 但是其低能段(低于 0.2 $E_{\rm SW}$)的 ENA 通量比上游结果还高。这部分多出来的低能粒子应该是由上游或旁边磁异常对太阳风的偏转和减速带来的。

此前, Xie 等[27] 利用三维 Hall MHD 模型研究了月球微磁层, 发现压力平衡距离与离子惯性长度之比对于微磁层的形成非常重要。当比值较小时, 离子会穿透得更深, 微磁层不容易形成。这里对 Xie 等的全球 Hall MHD 模型进行改进, 将其中的磁异常模型从原来的 178 阶球谐函数提高到 450 阶球谐函数, 从而具有更好的空间分辨率。使用月心太阳黄道坐标系(Selenocentric Solar Ecliptic, SSE)描述来太阳风与磁异常的相互作用, 其中 x 轴从月球中心指向太阳, z 轴垂直于黄道面, y 轴满足右手螺旋法则。网格采用局部加密的球网格, 其在月面附近最小约为 8 km。模拟区域为 x=[−8, 2]$R_{\rm L}$, y=z=[−5, 5]$R_{\rm L}$, 其中 $R_{\rm L}$=1738 km 是月球半径。太阳风从+x 平面流入计算区域, 并从−x 平面流出, 月表是吸收边界。行星际磁场固定为 5 nT, 方向为+y 方向。针对嫦娥四号观测时段, 平均 α=65°, 日下点位于(125°E, 0°S), 对应的嫦娥四号在 SSE 坐标系中的位置为 [0.4265, 0.5578, −0.7120]$R_{\rm L}$。

为了定量分析微磁层穿透效率与太阳风的关系, 这里模拟了 4 种不同情况, 对应的太阳风参数和模拟结果如图 9 所示。其中情况 1(即 Case1)代表了嫦娥四号观测中典型的太阳风条件, 可以看到此时形成了微磁层, 且嫦娥四号(Chang'E-4)刚好被包裹在磁尾里(图 9a)。通过计算月表离子通量与上游太阳风通量的比值, 得到情况 1 的穿透效率$\eta_{\rm sw}$为 0.41(图 9b), 这与 ASAN 观测到的平均穿透效率 0.57 比较接近。通过比较情况 2 和情况 1, 发现当离子惯性长度相同时, 较低的 $P_{\rm d,N}$ 可以带来较小的$\eta_{\rm sw}$(图 9c)。通过比较情况 4 和情况 3, 发现即使 $P_{\rm d,N}$ 相同, 离子惯性长度较大时可能不会形成微磁层(图 9e 中$\eta_{\rm sw}$大于 1)。这些结果与图 8(a)和 8(b)所示情况一致。此外, 模拟中还发现太阳风的减速和偏转, 情况 1、2 和 3 中月面太阳风速度分别降低了 16%、36% 和 35%, 同时速度分别偏转了约 11°、32°和 30°。这些结果表明, 具有较低动压的太阳风更容易被磁异常偏转, 这也与 ASAN 观测结果一致。然而, 这里的模拟并没有在微磁层中看到密度空腔。这意味着由于离子穿透效应的存在, 月球微磁层内部不容易形成等离子体空腔, 月面太阳风通量的降低主要是由太阳风的偏转和减速造成的。

4 ENA 能谱与太阳风的关系

ENA 由太阳风粒子在月表反射产生, 其能谱决定于入射太阳风参数及月面微观结构。Futaana 等[11] 利用 Chandrayaan-1 数据发现 ENA 的温度与太阳风的速度正相关。前两节介绍 ASAN 发现 ENA 的截止能量与太阳风能量基本一致[24], 同时 ENA 能谱还受磁异常或者微磁层的影响[26]。Wieser 等[21] 发现能量较低 (<100 eV) 的氢原子受微磁层的影响不明显, 而对于 150～600 eV 的 ENA, 微磁层的影响比较明显。这种差异表明可能存在两种起源的氢原子, 一种能量低于 100 eV, 而另一种能量大于 150 eV。能

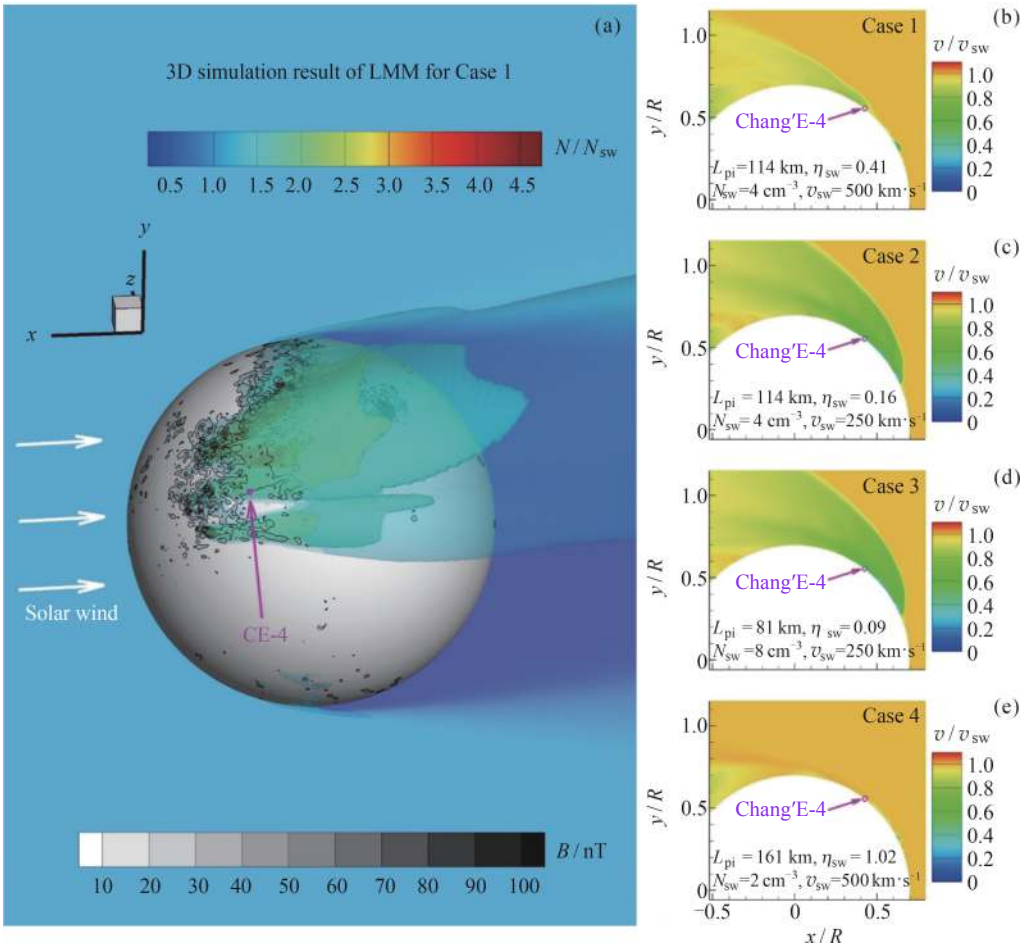


图 9 (a) 情况 1 的三维模拟结果，其中月球上的灰度图表示月球磁场大小，彩色透视图表示密度等值图，其大小利用太阳风密度 N_{sw} 进行了归一化，紫色圆圈为嫦娥四号（Chang'E-4）位置；(b)(c)(d)(e) 分别为情况 1、2、3 和 4 在 z=–0.712 R_L 的 xy 平面上的速度模拟结果

Fig. 9 (a) 3D view of the simulation result for Case 1, where the central ball represents the lunar body with gray contours to show the magnitudes of the crustal magnetic fields, and the 3D colored contours show the number densities normalized by the solar wind number density N_{sw}. The magenta circle indicates the location of Chang'E-4. (b)(c)(d)(e) are the results in the xy plane at z = –0.712 R_L for Cases 1, 2, 3, and 4, respectively

量大于 150 eV 的氢原子可能与太阳风质子轰击月壤直接相关，因为在这些氢原子产生的图像中可以看到微磁层[21]。另外，微磁层中存在离子和电子分离带来的静电场，该静电场造成太阳风在到达月面前减速，每单位电荷能量降低 135～150 eV [28,29]。

这里使用 2019 年 1 月 11 日至 2020 年 10 月 12 日 23 个月昼的 54 次观测数据，其中在月球当地时早晨开机 31 次，下午开机 19 次。太阳风观测数据来自绕月飞行的 ARTEMIS 卫星，并取 ASAN 开机时间段的平均太阳风速度和密度。考虑到昏侧可能受到微磁层的影响，分晨侧和昏侧两组数据进行讨论。图 10 给出了 ENA 微分通量与太阳风通量的关系，可以看出 ENA 微分通量均与太阳风通量呈正相关关系。利用线性函数 $\mathrm{d}f_{ENA} = c \cdot \mathrm{d}f_{sw} + k$，对每个能量段的数据进行拟合，其中 c 为反射系数，k 表示另外可能的 ENA 源，结果列于表 1。从表 1 可以看出，当 ENA 能量为 105～523 eV 时，相关系数较高，140～333 eV 时的相关系数可达 0.7，这说明这一能量段的 ENA 主要来自太阳风反射。而当 ENA 能量低于 105 eV 时，ENA 通量与太阳风通量无相关性，这说明这一能段的 ENA 可能不是来自太阳风，而是其他源，例如月表或仪器表面溅射的 ENA。同时还发现 ENA 微分通量也与各能道的太阳风密度和动压呈正相关关系，并且 ENA 微分通量与密度的相关系数在

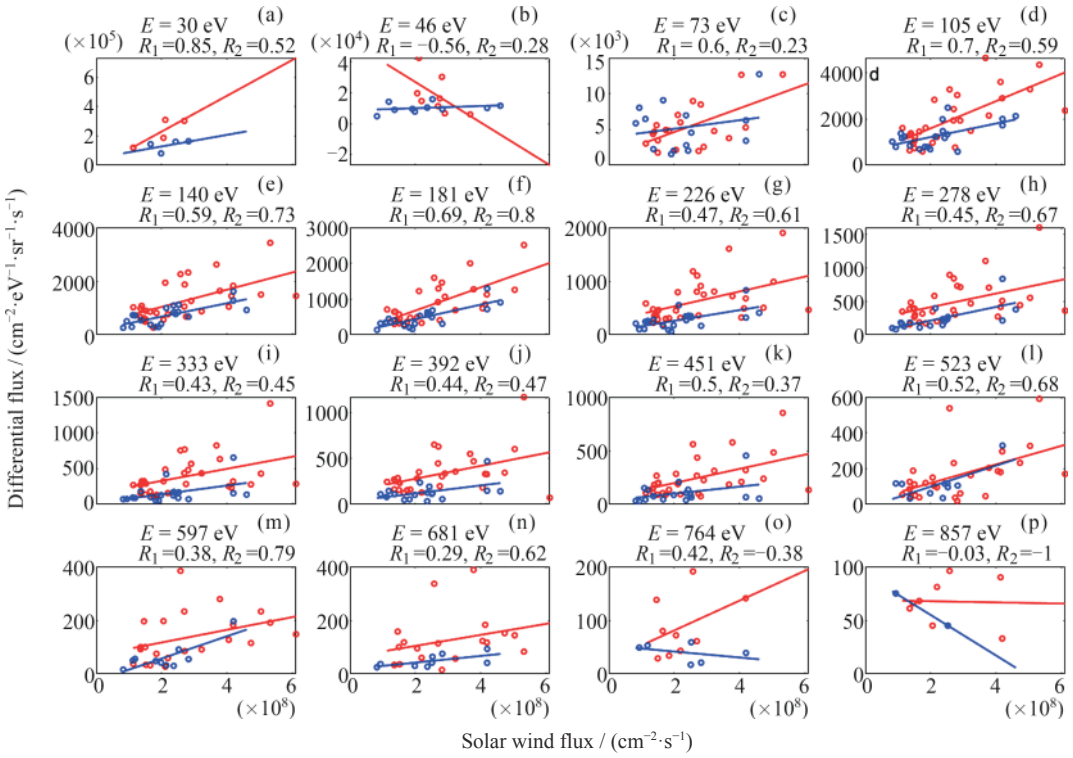


图 10　ENA 微分通量与太阳风通量的关系。红色圆圈表示在月球晨侧的数据，蓝色圆圈表示在月球昏侧的数据，R_1 和 R_2 分别表示晨侧和昏侧的相关系数

Fig. 10　Relationship between the ENA differential flux and solar wind flux. The red circles indicate the data on the lunar dawnside, and the blue circles indicate the data on the lunar duskside. R_1 and R_2 represent the correlation coefficients on the dawnside and duskside, respectively

表 1　各 ASAN 能量段内 ENA 微分通量与太阳风通量的线性拟合结果

Table 1　Linear fitting results of the integrated solar wind flux and the differential flux in each ASAN energy bin

能量/eV	晨侧 c	晨侧 k	晨侧 r^2	昏侧 c	昏侧 k	昏侧 r^2
30	1.22×10^{-3}	-1.44×10^{4}	0.73	1.29×10^{-4}	1.15×10^{5}	0.04
46	-1.31×10^{-4}	5.31×10^{4}	0.32	-8.38×10^{-6}	1.73×10^{4}	0.00
73	1.66×10^{-5}	1.32×10^{3}	0.36	5.98×10^{-6}	3.90×10^{3}	0.05
105	5.85×10^{-6}	4.20×10^{2}	0.49	2.91×10^{-6}	6.36×10^{2}	0.34
140	3.17×10^{-6}	3.97×10^{2}	0.34	2.73×10^{-6}	95.1	0.55
181	3.20×10^{-6}	32.4	0.48	2.09×10^{-6}	1.12	0.62
226	1.37×10^{-6}	2.51×10^{2}	0.22	1.02×10^{-6}	58.9	0.36
278	1.04×10^{-6}	2.12×10^{2}	0.20	1.08×10^{-6}	−12.4	0.48
333	8.43×10^{-7}	1.60×10^{2}	0.18	6.24×10^{-7}	13.9	0.22
392	7.02×10^{-7}	1.38×10^{2}	0.19	4.59×10^{-7}	22.7	0.24
451	6.60×10^{-7}	66.4	0.25	3.43×10^{-7}	27.6	0.16
523	5.31×10^{-7}	17.3	0.27	5.94×10^{-7}	−20.7	0.48
597	2.36×10^{-7}	69.8	0.15	4.14×10^{-7}	−25.3	0.64
681	2.09×10^{-7}	64.1	0.08	1.24×10^{-7}	17.4	0.39
764	2.78×10^{-7}	25.4	0.18	-2.72×10^{-8}	43.8	0.04
857	-5.46×10^{-9}	68.8	0.00	-1.85×10^{-7}	93.0	0.98

晨侧较高，而 ENA 微分通量与动压的相关系数在昏侧较高。但是，ENA 微分通量与太阳风速度并没有明显的相关性[30]。

图 11(a)给出了晨昏两侧太阳风动能 (由太阳风体积速度得出) 与 ENA 截止能量之间的关系，图 11(b)为晨昏两侧 ENA 温度与太阳风动能的关系。在计算 ENA 温度时，这里排除了几个可能没有磁屏蔽效应或受邻近磁异常偏转影响的事件 (即图 8 中绿色的点)。这些偏转的粒子在一定程度上增加了穿透速度，可能对温度有影响。在图 11(a)(b)中，蓝线表示昏侧线性拟合结果，红线表示晨侧线性拟合结果。这里将 95% 置信区间 (虚线) 作为线性拟合参数的误差。计算得到的 ENA 温度与文献 [11] 中 Maxwell-Boltzmann 分布的最佳拟合参数的结果具有相同的量级。在图 11(a)(b)中，红线均相对高于相应的蓝线，晨昏数据点之间的差异均具有统计学意义。对晨侧和昏侧数据集应用 t 检验，截止能量和温度的 p 值分别为 0.026 和 0.01，这说明晨昏数据集之间存在显著的统计学差异，从而证实了晨侧和昏侧数据集属于两个不同的分布。结果表明，在相同的太阳风能量下，昏侧 ENA 截止能量和 ENA 温度均低于晨侧 ENA，即在昏侧太阳风减速 ENA 能谱变窄。因此，ENA 截止能量降低，温度较低。

在昏侧，太阳风可能受到月球微磁层的影响，被磁异常上方的静电场所减速。因此，产生同样能量的 ENA。由于微磁层的减速作用，昏侧的太阳风质子在与月球表面相互作用之前，需要能量更高的太阳风质子。利用晨侧与昏侧的 ENA 截止能量之差，即将晨昏两侧的 ENA 截止能量的拟合结果相减 (图 11 中的红色实线和蓝色实线)，可估算太阳风在昏侧的减速，进而计算昏侧月表相对于太阳风的静电势。太阳风减速率可利用 ENA 截止能量差除以初始太阳风能量获得。

Kaguya[28] 观测发现南极艾特肯盆地附近磁异常内部存在+150 V 的电势，此时初始太阳风能量约为 630 eV。图 11 中的黑色方框标注了两个分别在晨侧和昏侧初始太阳风能量 (约 680 eV) 与之相近的事件，晨侧 (680 eV) 和昏侧 (550 eV) 的 ENA 截止能量差约为 130 eV，即存在+130 V 的电势差。由图 12 可以看出，静电势和太阳风减速率都随太阳风能量而变化，静电势为 50～260 V(95% 置信区间为 30～350 V)，太阳风的减速率为 12%～18%(95% 置信区间为 7.5%～30%)。这里的结果与前人基本一致[28,29]。

5 结论与展望

嫦娥四号搭载了国际上首个原位观测月面能量中性原子的探测仪。本文介绍了中性原子探测仪的

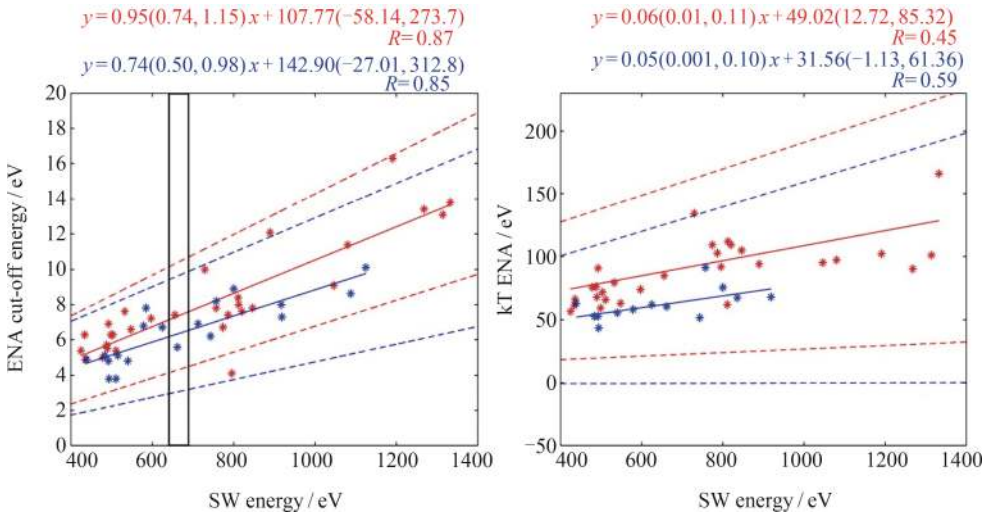


图 11 (a) 晨侧 (红线) 和昏侧 (蓝线) 太阳风能量与 ENA 截止能量的关系，(b) 晨侧 (红线) 和昏侧 (蓝线) 的太阳风能量与 ENA 温度的关系。虚线为 95% 置信区间

Fig. 11 Relationships between solar wind energy and ENA cutoff energy on the dawnside (red line) and duskside (blue line). The dashed lines indicate 95% confidence intervals

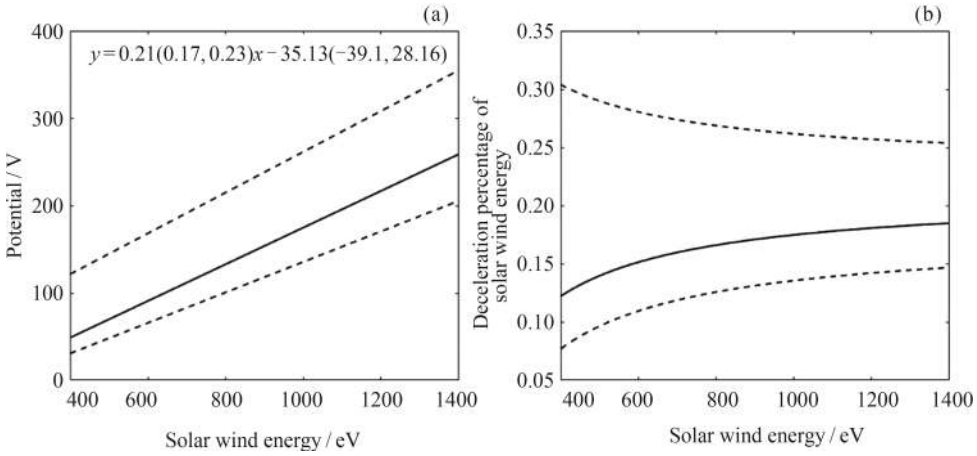


图 12 月表相对于太阳风的静电势 (a) 及太阳风减速百分比与太阳风能量的关系 (b)。虚线为 95% 置信区间

Fig. 12 (a) Lunar surface electrostatic potential relative to the solar wind, (b) relation between the solar wind deceleration percentage and the solar wind energy. The dashed lines are 95% confidence intervals

工作原理,重点对月面 ENA 观测的最新研究成果进行了梳理和总结。主要结论如下。

(1)相比于以往遥测观测,月面就位测量的 ENA 反射率较高(约为 0.32),通量向低能段(低于 100 eV)聚集,且首次测量到质量大于 4 amu 的重 ENA。

(2)太阳风对 ENA 的作用主要集中在 105～523 eV 能量区间,ENA 的截止能量和温度均正比于太阳风能量,昏侧 ENA 的通量、截止能量和温度均低于晨侧 ENA。

(3)结合数值模拟,证明了微磁层是造成 ENA 晨昏差异的原因,该微磁层位于雨海对跖磁异常区下游,空间尺度达 600 km,其可使太阳风通量减少约 43%,速度减小 12%～18%,对应的静电势为 50～260 V。

(4)月球微磁层仅在离子回旋半径较小(<120 km)时才可形成,部分太阳风质子仍可穿透微磁层,穿透效率在 0.23～0.78 之间,且正比于太阳风动压。

这些结果提高了对太阳风与月面相互作用的认识,但同时又带来了一些新的问题。首先,低能段 ENA 的具体来源仍然不清楚,氢 ENA 可能的来源包括太阳风月面溅射以及仪器内部表面的溅射。如果是前者,则可能与月壤多孔结构引起的多次散射有关,那将有助于进一步认识太阳风与月面的相互作用过程。其次,ASAN 测量到了较重的能量中性原子,为研究太阳风月面溅射对月球外逸层的贡献提供了实测数据,但是目前测量结果的背景噪声比较大,这给数据处理带来困难。再次,目前观测数据仍然有限,不能覆盖所有的散射角,因而 ENA 月面散射的角分布函数仍然不知道,这会对 ENA 反射率以及微磁层遮挡效率的计算带来影响。截至撰写本文时,ASAN 探测器仍然在月面工作,并且仪器状态良好。未来借助更多测量数据,将有望得到更为准确的 ENA 散射函数、反射率等信息,同时也为研究月球微磁层提供更多实测数据。另外,通过对重成分 ENA 探测数据的处理和分析,有望对太阳风月面物质溅射及其对月球稀薄大气的贡献进行定量评估。

参考文献

[1] PIETERS C M, GOSWAMI J N, CLARK R N, *et al*. Character and spatial distribution of OH/H_2O on the surface of the Moon seen by M^3 on chandrayaan-1[J]. *Science*, 2009, **326**(5952): 568-572

[2] LI Shuai, GARRICK-BETHELL I. Surface water at lunar magnetic anomalies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(24): 14318-14327

[3] WANG Huizi, ZHANG Jiang, SHI Quanqi, *et al*. Earth wind as a possible exogenous source of lunar surface hydration[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **907**(2): L32

[4] NOBLE S K, PIETERS C M, KELLER L P. An experimental approach to understanding the optical effects of space weathering[J]. *Icarus*, 2007, **192**(2): 629-642

[5] WU Yanxue, LI Xiongyao, YAO Wenqing, *et al*. Impact characteristics of different rocks in a pulsed laser irradiation experiment: simulation of micrometeorite bombardment on the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, **122**(10): 1956-1967

[6] WURZ P, ROHNER U, WHITBY J A, *et al*. The lunar

exosphere: the sputtering contribution[J]. *Icarus*, 2007, **191**(2): 486-496

[7] SARANTOS M, KILLEN R M, GLENAR D A, *et al.* Metallic species, oxygen and silicon in the lunar exosphere: upper limits and prospects for LADEE measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A3): A03103

[8] SAITO Y, YOKOTA S, TANAKA T, *et al.* Solar wind proton reflection at the lunar surface: low energy ion measurement by MAP-PACE onboard SELENE (KAGUYA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(24): L24205

[9] WIESER M, BARABASH S, FUTAANA Y, *et al.* Extremely high reflection of solar wind protons as neutral hydrogen atoms from regolith in space[J]. *Planetary and Space Science*, 2009, **57**(14/15): 2132-2134

[10] SCHAUFELBERGER A, WURZ P, BARABASH S, *et al.* Scattering function for energetic neutral hydrogen atoms off the lunar surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(22): L22202

[11] FUTAANA Y, BARABASH S, WIESER M, *et al.* Empirical energy spectra of neutralized solar wind protons from the lunar regolith[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E5): E05005

[12] FUNSTEN H O, ALLEGRINI F, BOCHSLER P A, *et al.* Reflection of solar wind hydrogen from the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, **118**(2): 292-305

[13] MITCHELL D L, HALEKAS J S, LIN R P, *et al.* Global mapping of lunar crustal magnetic fields by Lunar Prospector[J]. *Icarus*, 2008, **194**(2): 401-409

[14] TSUNAKAWA H, TAKAHASHI F, SHIMIZU H, *et al.* Surface vector mapping of magnetic anomalies over the Moon using Kaguya and Lunar Prospector observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, **120**(6): 1160-1185

[15] LIN R P, MITCHELL D L, CURTIS D W, *et al.* Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: results from Lunar Prospector[J]. *Science*, 1998, **281**(5382): 1480-1484

[16] HALEKAS J S, BRAIN D A, MITCHELL D L, *et al.* On the occurrence of magnetic enhancements caused by solar wind interaction with lunar crustal fields[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(8): L08106

[17] HALEKAS J S, POPPE A R, MCFADDEN J P, *et al.* Evidence for small-scale collisionless shocks at the moon from ARTEMIS[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41**(21): 7436-7443

[18] HALEKAS J S, DELORY G T, BRAIN D A, *et al.* Density cavity observed over a strong lunar crustal magnetic anomaly in the solar wind: a mini-magnetosphere?[J]. *Planetary and Space Science*, 2008, **56**(7): 941-946

[19] LUE C, FUTAANA Y, BARABASH S, *et al.* Strong influence of lunar crustal fields on the solar wind flow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(3): L03202

[20] SAITO Y, YOKOTA Y, ASAMURA S, *et al.* In-flight performance and initial results of Plasma Energy Angle and Composition Experiment (PACE) on SELENE (Kaguya)[J]. *Space Science Reviews*, 2010, **154**(1/2/3/4): 265-303

[21] WIESER M, BARABASH S, FUTAANA Y, *et al.* First observation of a mini-magnetosphere above a lunar magnetic anomaly using energetic neutral atoms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(5): L05103

[22] VORBURGER A, WURZ P, BARABASH S, *et al.* Energetic neutral atom observations of magnetic anomalies on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A7): A07208

[23] WIESER M, BARABASH S, WANG X D, *et al.* The advanced small analyzer for neutrals (ASAN) on the Chang' E-4 Rover Yutu-2[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(4): 73

[24] ZHANG Aibing, WIESER M, WANG Chi, *et al.* Emission of energetic neutral atoms measured on the lunar surface by Chang'E-4[J]. *Planetary and Space Science*, 2020, **189**: 104970

[25] VORBURGER A, WURZ P, BARABASH S, *et al.* Energetic neutral atom imaging of the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research:Space Physics*, 2013, **118**(7): 3937-3945

[26] XIE Lianghai, LI Lei, ZHANG Aibing, *et al.* Inside a lunar mini-magnetosphere: first energetic neutral atom measurements on the lunar surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(14): e2021GL093943

[27] XIE Lianghai, LI Lei, ZHANG Yiteng, *et al.* Three-dimensional Hall MHD simulation of lunar minimagnetosphere: general characteristics and comparison with Chang'E-2 observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(8): 6559-6568

[28] SAITO Y, NISHINO M N, FUJIMOTO M, *et al.* Simultaneous observation of the electron acceleration and ion deceleration over lunar magnetic anomalies[J]. *Earth, Planets and Space*, 2012, **64**(2): 4

[29] FUTAANA Y, BARABASH S, WIESER M, *et al.* Remote energetic neutral atom imaging of electric potential over a lunar magnetic anomaly[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(2): 262-266

[30] WANG Huizi, XIAO Chao, SHI Quanqi, *et al.* Energetic neutral atom distribution on the lunar surface and its relationship with solar wind conditions[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **922**(2): L41

(责任编辑：孙伟英)