



月球空间环境研究进展

王明远, 王 美, 平劲松, 韩松涛

A Review of Lunar Space Environment Study

WANG Mingyuan, WANG Mei, PING Jinsong, and HAN Songtao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20200013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空间甚低频太阳射电Ⅲ型爆研究进展

Research Advances of Solar Radio Type III Bursts at Space Very Low Frequencies

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(1): 92-99

近月空间带电粒子环境——“嫦娥1号”“嫦娥2号”观测结果

The Lunar Charged Particle Environment by Chang'E-1 and Chang'E-2

深空探测学报(中英文) . 2019, 6(2): 119-126

空间甚低频太阳Ⅱ型射电暴研究进展

Advances in Space VLF Type II Solar Radio Bursts

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(4): 423-432

行星低频射电爆发的空间探测进展

Introduction of Space Exploration Progress for Planetary Radio Burst Emission

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(1): 80-91

基于空间矢量天线的太阳低频射电爆发探测研究

Study of Very Low Frequency Solar Radio Emission Detection with Space Vector Antenna

深空探测学报(中英文) . 2021, 8(1): 100-108

在月球背面进行低频射电天文观测的关键技术研究

Key Technologies of Very Low Frequency Radio Observations on the Lunar Far-Side

深空探测学报(中英文) . 2017, 4(2): 150-157



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

月球空间环境研究进展

王明远¹, 王美², 平劲松¹, 韩松涛²

(1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 2. 北京航天飞行控制中心, 北京 100012)

摘要: 虽然月球是除地球以外人类探测最为频繁的目标天体之一, 但是月球空间环境仍然是未解之谜。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)的“阿波罗”(Apollo)系列、“勘测者”(Surveyor)系列、“阿尔忒弥斯”(Artemis)任务、月球大气和粉尘环境探测器(Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, LADEE), 前苏联的“月球”(Luna)系列探测任务均进行了(或计划进行)月面就位探测, 提供了一些月球电磁环境和月尘的信息; 历次月球探测任务中的无线电观测提供了部分关于月球等离子体环境的信息。本文首先对当前月球空间环境研究进展和存在的问题进行介绍; 其次, 探讨了日、地对月球空间环境的可能影响; 最后, 基于“嫦娥四号”中继星及着陆器搭载的甚低频射电探测载荷, 对未来月球空间环境研究及其探测进行了展望。

关键词: 月球空间环境; 低频射电; 嫦娥四号

中图分类号: P184.5+7

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)05-0486-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20200013

引用格式: 王明远, 王美, 平劲松, 等. 月球空间环境研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(5): 486-494.

Reference format: WANG M Y, WANG M, PING J S, et al. A review of lunar space environment study[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(5): 486-494.

引言

自20世纪六七十年代的月球探测任务开始, 月球表面粉尘和临近空间等离子体环境的特殊性就引起了人们广泛的兴趣。前苏联、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)先后以就位观测和无线电观测方式对月球外逸层、月球临近空间等离子体环境进行了探测。历次探测任务的观测结果差异较大, 表明了月球临近空间环境存在复杂多变性。此种特性及其与太阳、地球、行星际空间环境的关系都有待未来月球任务的进一步探索。

1 月球外逸层和临近空间尘埃环境

月球是典型的无空气天体, 其外逸层成分是历次月球探测的热点之一。目前已知的中性大气成分包括: “阿波罗17号”(Apollo 17)利用中性质谱仪探测

到Ar和He^[1]; 地基观测到Na和K^[2]; 月球大气与粉尘环境探测器(Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer, LADEE)测得Ne、Al、Ti和Mg^[3-4]。Na元素的产生和损失过程是这几类元素中研究最为深入的。Sarantos等^[5]给出了地面对月球外逸层中Na元素连续20年的观测结果, 并将观测到的Na强度与观测期间的主要紫外线和太阳风环境进行了比较, 发现测得的Na强度及其随相位角的变化与光子刺激解吸过程一致。除了光子刺激解吸过程外, 当月球处于太阳风中时, 太阳风离子能够促进月壤颗粒中Na的扩散进而增强解吸过程, 同时太阳风中的重离子也可以通过溅射增加Na的含量^[5-6]。

在月球外逸层理论模拟方面, Hodges^[7-8]模拟了月球外逸层H和He浓度的全球分布, 其结果与Apollo 17搭载的中性质谱仪测量结果一致。Wurz等^[9]利用Monte-Carlo模型对月球外逸层进行了模拟, 对日间的月球外逸层中性成分进行仿真, 得到的结果除Ca元素丰度外大多与已有观测相符。Sarantos等^[6]对月球外逸

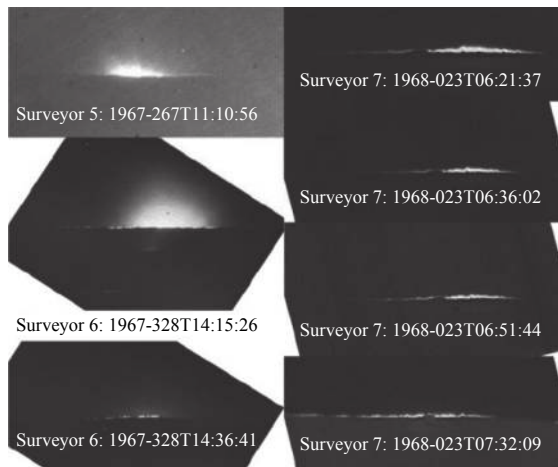
收稿日期: 2020-03-09 修回日期: 2020-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(11941003, 41604150); 中国科学院战略性先导科技专项A类(XDA15017500); 中国科学院与荷兰科技组织射电天文国际合作项目(GJHZ1867); “嫦娥四号”月球着陆探测NCLC载荷专项(2016年)

层中来自月壤的中性原子进行了模拟。

同时,在月球外逸层中也探测到了离子的存在,主动磁层离子示踪仪(Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers, AMPTE)和太阳风综合实验室(comprehensive solar WIND laboratory for long-term solar wind measurements, WIND)观测到 O^+ 、 Si^+ 、 Na^+ 和 Al^+ ^[10, 11],月女神探测器(SELenological and ENgineering Explorer, SELENE)的离子质谱仪观测到 He^+ 、 C^+ 、 O^+ 、 Na^+ 、 K^+ 和 Ar^+ ^[12-13],这些离子是来源于行星际空间还是月球表面在太阳风或者微流星撞击下的溅射,目前尚无定论。

在20世纪六七十年代,美国“勘测者号”(Surveyor)系列和“阿波罗”(Apollo)系列任务期间,探测器搭载相机在日出前和日落后不仅拍到了显著的日冕和黄道散射光(图1),同时也拍到了清晰的月面水平辉光(Lunar Horizon Glow, LHG)——证明月表以上存在可以散射、折射太阳光的物质^[14]。同一时期,前苏联“月球车2号”(Lunokhod 2)上的天体光度计在低于地平线17 mrad的情况下测得了月球表面上方尘埃粒子的散射光,估计该散射光是由距月球表面约260 m高度处的尘埃云引起的^[15]。此类物质的形成机制及其影响成为月球临近空间环境研究的关键问题。



注:图片来源于NASA;左上两幅图中存在显著的日冕和黄道散射光贡献。

图1 Surveyor系列拍摄到的水平辉光表明了,在晨昏边界线上,前向散射的阳光来自月表以上漂浮的月尘粒子^[16-18]

Fig. 1 The lunar horizontal glow obtained by the Surveyor series shows that the forward scattered sunlight comes from the dust particles floating above the moon's surface on the lunar terminator^[16-18]

一种目前比较流行的观点认为,月球和地月系统所在的行星际空间,流星体和行星际尘埃粒子遍布。

高速的相对运动导致这些物体撞击到无大气天体的表面时,会产生带电或中性尘埃和气体,以及二次溅射的尘埃粒子,这些气体和尘埃在引力的束缚作用下形成了该天体的外逸层^[19-21]。在木星和土星的冰卫星探测任务中,使用就位尘埃探测仪器观测到了此类天体的外逸层,但是此类现象从未在具有难熔表面的行星周围探测到。

Apollo 15和Apollo 17观测到了月表的水平辉光,据此推定在月球晨昏界限附近存在一个高密度微小尘埃粒子云。其中,Apollo 17宇航员部署的月球抛射和陨石试验(The Lunar Ejecta and Meteorites, LEAM)在Apollo 17着陆舱返回后进行了为期3年的连续月球尘埃就位观测,也是迄今为止月球表面唯一的就位尘埃观测试验。LEAM观测到一个缓慢移动的带电尘埃粒子群,其粒子半径约为数百 μm ,特征与晨昏交界诱发的带电尘埃粒子一致,因此静电对月表尘埃悬浮的影响也是尘埃云形成的可能原因之一。Criswell^[16]认为静电悬浮尘埃量约为二次溅射产生尘埃量的 10^7 倍。静电力自身不足以将尘埃带离月表^[22],其对尘埃颗粒悬浮的贡献是建立在尘埃颗粒通过溅射等其它机制从月表喷射出来的基础上的^[23],尘埃颗粒的悬浮高度与其颗粒半径密切相关。

1994年2月26日—4月22日的“克莱门汀”(Clementine)探测任务对LHG进行了观测,并获得了5个有效照相观测序列。在尘埃半径为 $0.1 \mu m$ 的假设下,基于Clementine导航相机的照相结果进行模拟推定月球尘埃云的丰度为 $5 \sim 30 \text{ cm}^{-2}$ ^[24]。Feldman^[25]基于月球勘测轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)的极紫外光谱仪观测数据进行模拟,得出月球尘埃云的丰度为 10 cm^{-2} 。两者的模拟结果均比产生“阿波罗”观测结果所需的理论尘埃丰度低 10^4 倍左右。Glenar等^[24, 26]认为静电力在月球外逸层尘埃的产生方面不起主导作用,流星体撞击及其二次溅射也无法产生足以支撑观测结果的尘埃云,因此尘埃云的存在是一种罕见的现象。

2013年9月NASA的LADEE探测任务发射升空。LADEE的主要科学目标为确定月球大气的成分,测量月球大气层尘埃的时空变换特性。LADEE上搭载了月球尘埃实验载荷(Lunar Dust EXperiment, LDEX)和极紫外/可见光谱仪(Ultraviolet/Visible Spectrometer, UVS)。LDEX是一种撞击电离尘埃探测器,用于测量尘埃粒子撞击目标时产生的等离子体云的正负电

荷,其观测数据被用来确定尘埃粒子与仪器碰撞的平均速率;UVS则用来观测月球大气不同成分的辐射以及尘埃的光学散射和消光。LDEX于2013年10月16日开始测量,在截止2014年4月18日任务结束的184 d总观测时间中(累积观测时间约80 d),共检测到约14万次尘埃撞击。同时,UVS在140 d的任务期内获得了100万个光谱数据。基于LDEX尘埃观测数据和UVS的光谱数据进行分析发现,月球周边存在永久非对称尘埃云(如图2所示),其粒子直径范围为20~300 nm,尘埃云密度在晨间晨昏线附近表现出强烈的增强,在10 km高度上,半径为0.1 μm 的尘埃密度约为 10^4m^{-3} ;尘埃云极可能是由高速运行在大椭圆轨道上的彗星式尘埃粒子撞击产生,而不是起源于微小行星、由运行在近圆轨道上的粒子以较低速度撞击月球导致的;流星雨期间,特别是双子座流星雨,由于月球表面暴露于同样的行星际尘埃粒子流中,由撞击产生的月球尘埃云的密度也会增加^[27-28]。同时月球尘埃云的密度也受到月球绕地球公转运动的调制^[29]。

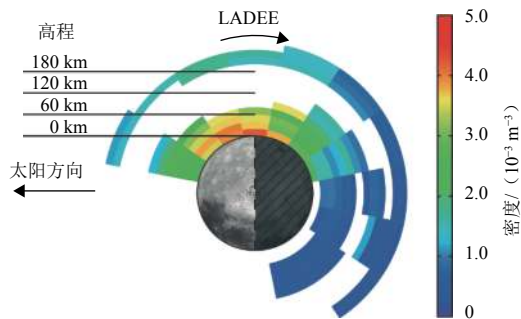


图2 LDEX测得的月球尘埃分布图^[27]

Fig. 2 Distribution of lunar dust detected by LDEX^[27]

2 月球临近空间等离子体环境

在历次月球探测任务中,对月球周边等离子体的探测主要依赖两类技术:无线电掩星观测和就位等离子体探测。首次对月球周围等离子体的观测由“先驱者7号”(Pioneer 7)于1966年实施,采用了无线电掩星观测方法,当时获得的电子密度约为 $4 \times 10^7 \text{el/m}^3$ ^[30]。首次就位观测实施于1971年2月,由“阿波罗14号”(Apollo 14)搭载的月球环境带电粒子探测器(the Charged-Particle Lunar Environment, CPLEE)在距离月表26 cm高处对40~200 eV的带电粒子进行了观测。根据CPLEE观测数据推断,在月面日间,距离月表几百米左右高度处的电子密度为 10^4el/cm^3 ^[31]。

前苏联的两个探测器“月球19号”(Luna 19)和“月球22号”(Luna 22)均携带了同源的双频无线电信标,其星上晶振稳定度为 10^{-7} (约600 s),相位采样率为0.2 sps,采用三轴稳定状态。两者分别于1972年、1974年进行了月球等离子体的无线电掩星观测试验。根据观测数据反演结果(图3)可知,月球等离子体电子密度自高度30~40 km开始随高度的降低快速增加;电子密度峰值出现在2~10 km处;在日间峰值密度范围为 $400 \sim 2000 \text{cm}^{-3}$,标高约为10~30 km;在几乎所有的廓线中,电子密度在接近月球表面时随着高度的降低而减少^[32]。

2003年,ESA的首个探月任务“智慧1号”(Smart 1)发射升空。该卫星具备S、X及Ka波段的下行能力。Smart 1探测器于2006年开始进行多次的双频月球无线电掩星观测试验,并获得了大量数据,但是迄今为止尚未有详细的试验结果发布。Pluchino等^[30]给出了该探测器获得的等离子体总电子含量,约为 10^{13}el/m^2 。

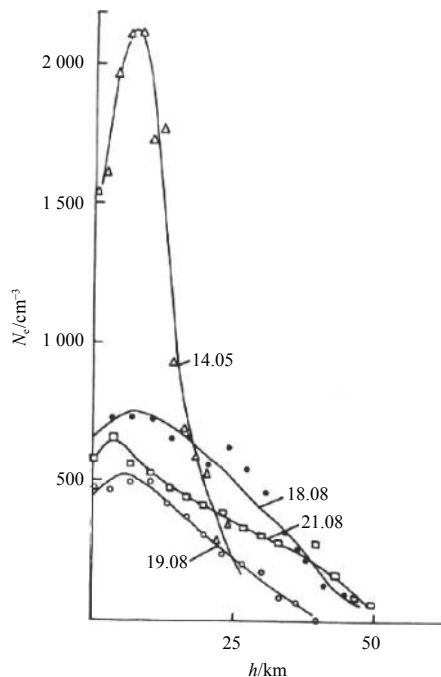


图3 Luna 19 & Luna 22无线电掩星观测获得的电子密度^[32]

Fig. 3 The electron density obtained by Luna 19 & 22^[32]

2007年9月,JAXA发射了SELENE探测器,该探测器携带的两个子卫星Rstar和Vstar。两个子卫星均具备甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)无线电信标信号下行能力。其中子卫星Vstar与主卫星于2007年11月—2009年6月开展了S和X波段双频的月球临近空间环境的无线电掩星观测,获得了

378个观测序列。观测期间，中国科学院国家天文台和新疆天文台参加了该实验，并获得了掩星观测数据。由于Vstar采用约0.18 Hz的稳定自旋控制卫星姿态，导致0.18 Hz基频和高倍频谐波项、缓慢进动的低频周期项以及长期项给卫星发出的电磁波带来偏差，特别是其中的低频项和长期项，在SELENE掩星观测中无法扣除，给结果带来了较大影响^[33]。根据上述观测序列进行反演获得的电子数密度较小，且变化无明显规律。对SELENE观测结果进行特定的筛选后，挑选出太阳天顶角小于60°的16个序列，获得了其平均电子密度廓线，如图4所示^[34]。

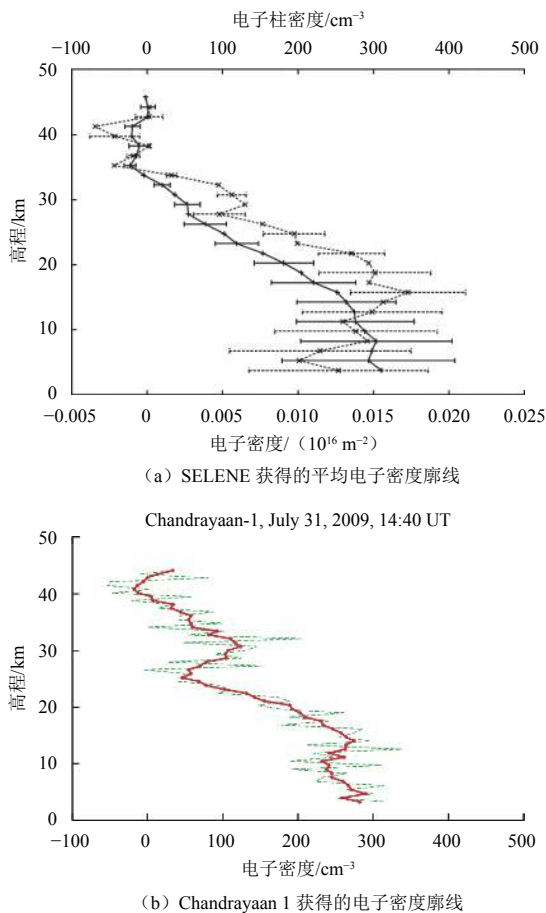


图 4 SELENE获得的平均电子密度廓线和Chandrayaan 1获得的一例电子密度廓线^[34-35]

Fig. 4 The average electron profile obtained by SELENE and the electron profile obtained by Chandrayaan 1^[34-35]

印度月球探测任务“月船1号”(Chandrayaan 1)发射于2008年10月。Chandrayaan 1具备S波段下行通信能力，于2009年开展了该波段的双程单频掩星试验，其公布的一例观测结果(也是唯一一例公开结果)发生于太阳天顶角101.72°时，掩星点坐标为77.2°N和

90.2°W。Chandrayaan 1这例结果与SELENE观测结果的电子密度较为接近^[35]。

2015—2016年，利用中国再入返回飞行器服务舱，中国科学院国家天文台和北京航天飞行控制中心联合开展了S/X相干双频掩星观测的试观测试验。根据试验数据成功获取了月表以上至50 km左右的电子柱浓度信息(如图5所示)，其中电子柱浓度最大处约为 $0.4 \times 10^{16} \sim 0.5 \times 10^{16}$ el/m²，且浓度随高度的降低而增加^[36]。

上述观测中，Apollo 14 CPLEE的观测结果、Luna 19和Luna 22、Smart 1和再入返回飞行器服务舱的观测结果支持月球表面存在较强的等离子体层，其中，再入返回飞行器服务舱获得的电子密度峰值与CPLEE接近；而SELENE和Chandrayaan 1获得的电子密度较前述小1.5~2个量级。

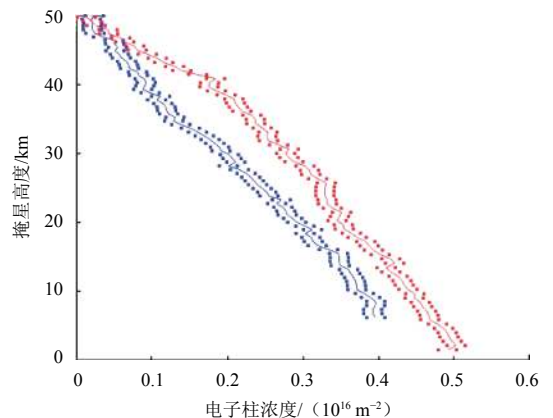


图 5 月球电离层电子柱浓度随高度的变化^[36]

Fig. 5 The electron column concentration of lunar ionosphere changing with height^[36]

历次月球无线电掩星观测结果的不一致与其试验中的关键参数(表1)也密切相关。由表1可见，由于观测目标较为稀薄，除Chandrayaan 1以外的掩星试验均采用了具有同源频率参考的相干双频掩星方法；SELENE任务利用其小卫星开展了星星双频掩星观测，这种设计能够极大地提高观测数据的时空覆盖，但是由于SELENE采用的S波段双频信号频点相近，同时其子卫星特有的自旋稳定带来的信号误差无法消除，直接影响了其观测结果的有效性^[33]；再入返回飞行器服务舱和Luna19/Luna22在观测频点选择和观测模式上都更为可信，两者的观测结果也相近。再入返回飞行器服务舱掩星试验具有同类试验中最高星上晶振稳定性和最高的地面采样率，提供了更精细的电子浓度随高度的变化特征。

表 1 历次月球掩星观测试验情况对比

Table 1 The key parameters in previous successful lunar occultation experiments

航天器	工作频率/MHz	地面观测站	观测模式	星上晶振稳定度	采样率/sps	卫星状态
Luna 19/Luna 22	936.85/3 747.4		相干双频星地掩星	10^{-7} (约600 s)	0.2	三轴稳定
Smart 1	S波段: 2 235.1 X波段: 8 453.02 Ka波段: 32 121.5	Medicina, Noto	相干双频星地掩星			三轴稳定
SELENE	S波段 2 218.0, 2 287.312 5	Usuda	相干双频星星掩星	短稳 10^{-7}	40	自旋, 频率为0.18 Hz
Chandrayaan 1	S波段: 2 230.8	Bylallu	单频双程星地掩星		1	三轴稳定
再入返回飞行器服务舱	S波段 X波段	喀什, 佳木斯	相干双频星地掩星	短稳 10^{-9}	100	三轴稳定

由于月球外逸层大气稀薄, 由氦、氩等组成的气体浓度在夜半球仅约为 $2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 在日半球约为 10^4 cm^{-3} 。因此月球外逸层光致电离所能产生的电子远小于前述的较强电子密度 (Apollo 14等5个探测器结果)。而月球不仅处在太阳辐射的影响下, 太阳风等离子体、地球磁尾和行星际空间环境也会对其产生影响。太阳辐射作用于月球表面所发生的光化学反应使得日间的月表附近存在一层光电子; 月表尘埃云在太阳辐射作用下, 也会发生光化学反应; 同时, 来自太阳风的等离子体, 月球位于磁尾时来自地球磁层的等离子体, 均为月球临近空间等离子体的可能来源。月球尘埃云的涨落也必然影响着月球临近空间的等离子体。

前述观测结果均为来自于月球的日半球。在月球的夜半球, 光化学反应不存在, 此时月球表面处在太阳风和地球磁尾等离子体的影响下。位于月球表面或近地表的尘埃粒子吸收周围等离子体中的电子和离子, 从而使尘埃粒子带电, 与带电的月球表面相互作用, 并导致尘埃悬浮和运动。对于直径约100 nm的尘埃粒子, 带电尘埃粒子的数密度约为 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$ ^[37]。月球日半球和夜半球带电粒子数密度的巨大差异必将导致月球晨昏线附近离子和尘埃粒子的复杂变化。

3 日地对月球空间环境的影响

由于月球没有全球磁场和浓密的大气层, 其表面处在太阳风粒子和太阳风的直接影响下。太阳辐射导致的月表光化学反应是月球等离子体的来源之一。另外, ARTEMIS提供的磁场观测数据揭示了月球临近空间约100 km左右的感应磁场分布特征。Luo等^[38]由此推测, 月球日半球对太阳辐射和太阳风粒子的吸收、反射作用, 导致了月球的夜半球后部存在等离子体空腔现象, 并在晨昏线附近出现了等离子体的局部增强, 表明在月球临近空间等离子体与太阳风的相互作用导

致了局部等离子体的不稳定激发。

地球作为距离月球最近的天体, 其电磁环境直接影响了月球的表面空间环境。在CPLEE的任务期间, 月球穿过了地球磁鞘进入地球的磁尾, 并经历了一次月食, CPLEE的测量结果表明带电粒子浓度在地球磁鞘内最高, 进入磁尾后降低至三分之一左右, 进入月食后载荷所能测得的带电粒子消失^[31], 但是地球的等离子体片并未延伸至月球轨道。

另外, 地球keV~MeV的高能电子在磁极地区的极光区域附近或上空会产生强烈的非热低频射电辐射。地球的低频射电辐射功率为 $10^7 \sim 10^8 \text{ W}$, 其中在250 kHz处测得的辐射谱密度最大。这一辐射是月球空间的主要低频辐射来源, 其主要辐射为极光千米波辐射 (Auroral Kilometric Radiation, AKR, 100~500 kHz), 通常发生在高度约3 000~10 000 km的高纬度极光区, 且与地球磁层扰动相关。目前普遍认为AKR的产生与磁化等离子体中的自由能转换为辐射电磁波的过程有关^[39]。Benson和Calvert^[40]利用ISIS-1穿越AKR源区的观测数据发现, AKR的产生在强磁化区, 产生的电磁波的传播方向于地磁场夹角较大。Lee和Wu^[41]提出AKR源自相对论性电子回旋不稳定性产生X模的过程, 这也是目前最受认可的AKR产生机制。但是AKR实际的偏振辐射除了占主导地位的X模外, 还有O模。同时前述机制要求AKR发生在电子密度很低的区域, 能量要求为~10 keV, 这与实际观测存在差异, 因此AKR的产生机制尚需探索。

SELENE探测器携带的月球雷达探测仪 (Lunar Radar Sounder, LRS) 包括等离子体波接收器 (Natural Plasma Wave receiver, NPW) 和波形捕获 (Wave Form Capture, WFC) 仪器两个子系统。这些载荷观测到了地球的AKR及其明显的干涉图样 (图6)。这些干涉图样被认为是由于AKR的直达波及其在月球

表面或月球电离层上的反射波之间的相位差造成的^[42]。在不同月球等离子体截止频率下, SELENE团队通过模拟AKR在月表的理论干涉图, 与实际干涉图进行比

对, 最终获得干涉区域的等离子体截止频率。这是除了就位探测和掩星观测之外的一种探测月球电离层的新方法。

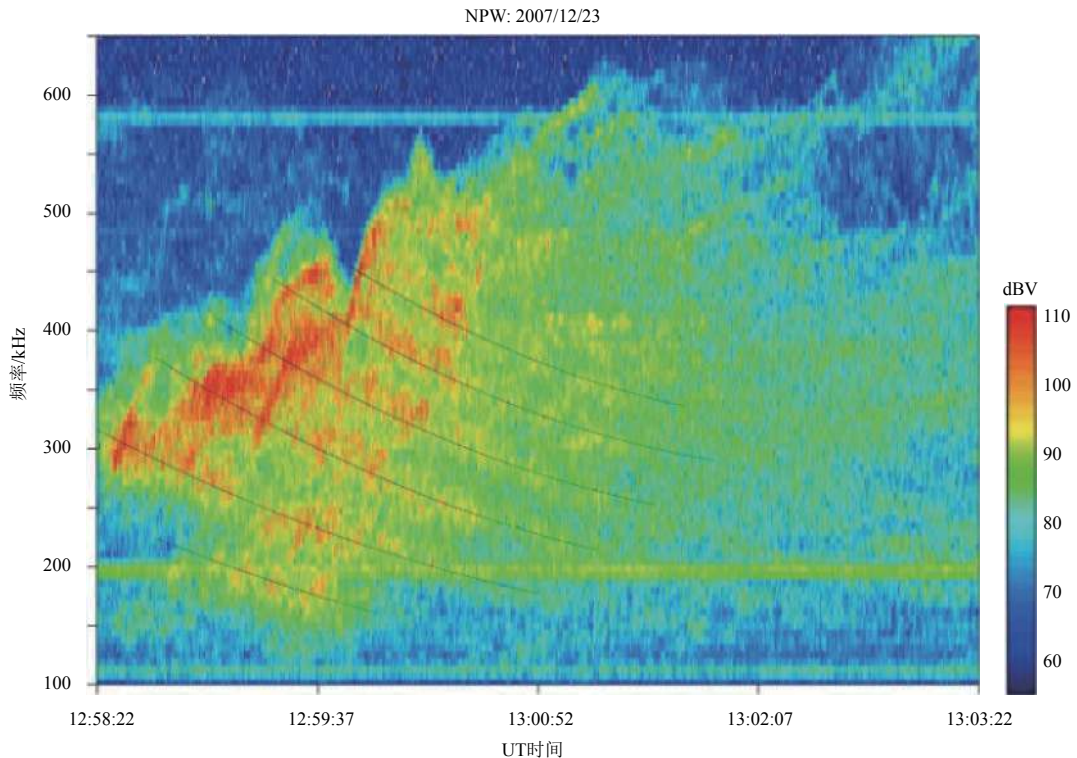


图6 SELENE观测到的AKR干涉图样^[23]

Fig. 6 An interference pattern on the AKR observed by SELENE^[23]

4 分析与展望

综上所述, 月球临近空间存在永久非对称的尘埃云, 其密度在流星雨期间有显著增加, 然而尘埃云的产生机制尚未确定; 同时, 无线电观测和就位观测均支持在月表至50 km范围内存在显著的电离层, 而历次观测间的差异表明其电子密度存在较大变化, 这一月球电离层的时空分布特性和产生机制目前均属未知。这两方面的未知也是探索月球临近空间奥秘的关键阻碍。另外, 月球临近空间尘埃和等离子体之间的相互作用机制, 将对月球射电观测、月球基地选址产生影响, 是未来月球任务中需要关注的问题。

上述科学问题也吸引了国际月球探测同行的关注。俄罗斯未来月球探测任务“月球25号”(Luna 25)和“月球27号”(Luna 27)的着陆器均将配备用于月球表面等离子体、尘埃探测的载荷, 包括电场传感器、压电式冲击传感器和光学观测相机等。在中国未来的月球在轨和着陆探测任务中, 搭载稳定的无线电科学

探测设备和就位探测载荷, 合理设计的探测轨道和着陆点, 开展长期观测, 将有助于了解月球等离子体环境的时空分布特性, 为上述问题的解决提供支持。

分别于2018年5月和12月发射的“嫦娥四号”中继星和着陆器各携带了一个低频射电探测载荷: 着陆器上的低频无线电频谱仪(Low Frequency Radio Spectrometer, LFRS)和中荷低频射电探测仪(Netherlands-China Low Frequency Explorer, NCLE), 两者的工作频率分别是100 kHz~40 MHz^[43]、100 kHz~80 MHz^[44]。在LFRS和NCLE的生命周期中, 两个载荷均会记录太阳的射电爆发, 太阳射电爆发覆盖的电磁波频率可低至几十kHz。而月球等离子体层的存在必将对LFRS的记录产生影响, 因此根据两个载荷低频部分射电爆发信号的不同, 可以推断出月球电离层的等离子体截止频率。另外, NCLE将可以记录类似SELENE观测中出现的地球AKR射电信号及其干涉信号, 为地球AKR研究和月球电离层研究提供信息。同时, LFRS的观测也将为我们揭开月球背面低频射电环境的神秘面纱。

参 考 文 献

- [1] HOFFMAN J H, HODGES J R R, EVANS D E. Lunar atmospheric composition results from Apollo 17[C]//Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference. Houston, Texas: [s.n.], 1973.
- [2] POTTER A E, MORGAN T H. Discovery of sodium and potassium vapor in the atmosphere of the Moon[J]. *Science*, 1988, 241(4866): 675-680.
- [3] BENNA M, MAHAFFY P R, HALEKAS J S, et al. Variability of Helium, Neon, and Argon in the lunar exosphere as observed by the LADEE NMS instrument[C]//2014 NASA Exploration Science Forum. Moffett Field, California: NASA, 2014.
- [4] COLAPRETE A, WOODEN D, COOK A, et al. Observations of titanium, aluminum, and magnesium in the lunar exosphere by LADEE UVS[C]//Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: [s. n.], 2016.
- [5] SARANTOS M, KILLEN R M, SHARMA A S, et al. Sources of sodium in the lunar exosphere: modeling using ground-based observations of sodium emission and spacecraft data of the plasma[J]. *Icarus*, 2010, 205(2): 364-374.
- [6] 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): 3103-3119.
- [7] HODGES R R. Helium and hydrogen in the lunar atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(34): 8055-8064.
- [8] HODGES R R. Methods for Monte Carlo simulation of the exospheres of the Moon and Mercury[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(A1): 164-170.
- [9] WURZ P, ROHNER U, WHITBY J A, et al. The lunar exosphere: the sputtering contribution[J]. *Icarus*, 2007, 191(2): 486-496.
- [10] HILCHENBACH M, HOVESTADT D, KLECKER B, et al. Detection of singly ionized energetic lunar pick-up ions upstream of Earth's bow shock[J]. *Solar Wind Seven*, 1992, A93-33554: 349-355.
- [11] MALL U, KIRSCH E, CIERPKA K, et al. Direct observation of lunar pick-up ions near the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(20): 3799-3802.
- [12] YOKOTA S, SAITO Y, ASAMURA K, et al. First direct detection of ions originating from the Moon by MAP-PACE IMA onboard SELENE (KAGUYA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(11): L11201.
- [13] TANAKA T, SAITO Y, YOKOTA S, et al. First in situ observation of the Moon-originating ions in the Earth's Magnetosphere by MAP-PACE on SELENE (KAGUYA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(22): L22106.
- [14] GRÜN E, HORÁNYI M, STERNOVSKY Z. The lunar dust environment[J]. *Planetary & Space Science*, 2011, 59(14): 1672-1680.
- [15] SEVERNY A B, TEREZ E I, ZVEREVA A M. The measurements of sky brightness on lunokhod-2[J]. *Moon*, 1975, 14(1): 123-128.
- [16] CRISWELL D R. Horizon-glow and the motion of lunar dust[J]. *Photon and Particle In-teraction in Space*, 1973, 37: 545-556.
- [17] RENNILSON J J, CRISWELL D R. Surveyor observations of lunar horizon-glow[J]. *Moon*, 1974, 10(2): 121-142.
- [18] COLWELL J E, BATISTE S, HORÁNYI M, et al. Lunar surface: dust dynamics and regolith mechanics[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): RG2006.
- [19] AUER A, SITTE K. Detection technique for micrometeoroids using impact ionization[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1968, 4(2): 178-183.
- [20] COLLETTE A, STERNOVSKY Z, HORÁNYI M. Production of neutral gas by micrometeoroid impacts[J]. *Icarus*, 2014, 227: 89-93.
- [21] HARTMANN W K. Impact experiments: 1. ejecta velocity distributions and related results from regolith targets[J]. *Icarus*, 1985, 63(1): 69-98.
- [22] MARSHALL J, RICHARD D, DAVIS S. Electrical stress and strain in lunar regolith simulants[J]. *Planetary & Space Science*, 2011, 59(14): 1744-1748.
- [23] STUBBS T J, VONDRAK R R, FARRELL W M. A dynamic fountain model for lunar dust[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(1): 59-66.
- [24] GLENAR D A, STUBBS T J, HAHN J M, et al. Search for a high-altitude lunar dust exosphere using Clementine navigational star tracker measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, 119(12): 2548-2567.
- [25] FELDMAN P D, GLENAR D A, STUBBS T J, et al. Upper limits for a lunar dust exosphere from far-ultraviolet spectroscopy by LRO/LAMP[J]. *Icarus*, 2014, 233: 106-113.
- [26] GLENAR D A, STUBBS T J, MCCOY J E, et al. A reanalysis of the Apollo light scattering observations, and implications for lunar exospheric dust[J]. *Planetary & Space Science*, 2011, 59(14): 1695-1707.
- [27] HORÁNYI M, SZALAY J R, KEMPF S, et al. A permanent, asymmetric dust cloud around the Moon[J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 324-326.
- [28] WOODEN D H, COOK A M, COLAPRETE A, et al. Evidence for a dynamic nanodust cloud enveloping the Moon[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9: 665-668.
- [29] SZALAY J R, HORÁNYI M. Annual variation and synodic modulation of the sporadic meteoroid flux to the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 10580-10584.
- [30] PLUCHINO S, SCHILLIRÒ F, SALERNO E, et al. Radio occultation measurements of the lunar ionosphere[J]. *Memorie Della Società Astronomica Italiana Supplement*, 2008, 12(12): 53-59.
- [31] REASONER D L, BURKE W J. Direct observation of the lunar photoelectron layer[J]. *Proceedings of the Third Lunar Science Conference*, 1972, 3: 2639-2654.
- [32] VYSHLOV A S. Preliminary results of circumlunar plasma research by the Luna 22 spacecraft[C]//Proceedings of the Open Meetings of Working Groups on Physical Sciences. Varna, Bulgaria: 1975.
- [33] 王震. 月球电离层探测研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- WANG Z. Study of lunar ionosphere detection[D]. Beijing: University of Chinese Academy Sciences, 2015.

- [34] IMAMURA T, NABATOV A, MOCHIZUKI N, et al. Radio occultation measurement of the electron density near the lunar surface using a subsatellite on the SELENE mission[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2012, 117: A06303.
- [35] CHOUDHARY R K, AMBILI K M, CHOUDHURY S, et al. On the origin of the ionosphere at the Moon using results from Chandrayaan-1 S-band radio occultation experiment and a photochemical model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 3: 10,025-10,033.
- [36] 韩松涛, 王明远, 平劲松, 等. 应用我国再入返回飞行器服务舱探测到较强月球电离层信号[J]. *科学通报*, 2016, 61(32): 3476-3481.
HAN S T, WANG M Y, PING J S, et al. Exploring strong lunar ionosphere successfully with the service module of Chinese circumlunar return and reentry spacecraft[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(32): 3476-3481.
- [37] POPEL S I, ZELENYI L M, GOLUB' A P, et al. Lunar dust and dusty plasmas: recent developments, advances, and unsolved problems[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 156: 71-84.
- [38] LUO Q Y, YANG L, JI J H. Global distribution of the kinetic scale magnetic turbulence around the Moon[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, 816(1): L3.
- [39] KAISER M L, ALEXANDER J K, RIDDLE A C, et al. Direct measurements by Voyagers 1 and 2 of the polarization of terrestrial kilometric radiation[J]. *Geophysical Research Letters*, 1978, 10: 857-860.
- [40] BENSON R F, CALVERT W. ISIS 1 observations at the source of auroral kilometric radiation[J]. *Geophysical Research Letters*, 1979, 6: 479-482.
- [41] LEE L C, WU C S. Amplification of radiation near cyclotron frequency due to electron population inversion[J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(7): 1348.
- [42] GOTO Y, FUJIMOTO T, KASAHARA Y, et al. Lunar ionosphere exploration method using auroral kilometric radiation[J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63(1): 47-56.
- [43] 纪奕才, 赵博, 方广有, 等. 在月球背面进行低频射电天文观测的关键技术研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2017, 4(2): 150-157.
JI Y C, ZHAO B, FANG G Y, et al. Key technologies of very low frequency radio observations on the lunar far-side[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(2): 150-157.
- [44] JIA Y, ZOU Y, PING J, et al. The scientific objectives and payloads of Chang'E-4 mission[J]. *Planetary & Space Science*, 2018: S0032063317300211, 162: 207-215.

作者简介:

王明远(1983-), 女, 工程师, 主要研究方向: 行星无线电科学。

通讯地址: 北京市朝阳区大屯路甲20号(100101)

电话: (010)64807839

E-mail: wangmy@nao.cas.cn

A Review of Lunar Space Environment Study

WANG Mingyuan¹, WANG Mei², PING Jinsong¹, HAN Songtao²

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics Laboratory, Beijing 100012, China)

Abstract: After more than fifty years lunar exploration, our understanding of the lunar space environment is still superficial. The lunar dusty exosphere research was based on ARTEMIS mission and the lunar atmosphere and dust environment detector which were developed by NASA. Based on the radio experiments of several lunar missions, the existence of lunar ionosphere is determined. The current status and observation of lunar exosphere and ionosphere are introduced in this paper. With the help of the low frequency radio astronomical payloads carried by Chang'E-4 relay satellite and the lander, more of lunar space environment will be uncovered.

Keywords: lunar space environment; low frequency radio astronomy; Chang'E-4

Highlights:

- The space-time characteristics and generation mechanism of the lunar ionosphere is a key scientific issue in the exploration of the lunar space environment.
- In future lunar exploration missions, it is necessary to explore the lunar ionosphere and its interaction with the moon's permanent asymmetric dust cloud.
- The low-frequency radio detection payloads onboard Chang'E-4 will study the radio environment on the farside of the moon.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]