

· 专题:双清论坛“月球科研站的关键科学问题” ·

月球表面及空间环境对太阳风与地球风的响应^{*}

史全岐¹ 宗秋刚^{2**} 乐超² 李磊³

1. 山东大学空间科学研究院,威海 264209
2. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871
3. 中国科学院国家空间科学中心,北京 100190

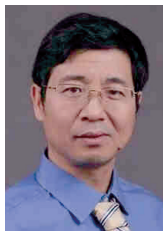
[摘要] 月球空间作为日-地-月空间的重要组成部分,是研究基础空间物理以及等离子体与类月天体(无大气且无全球磁场)相互作用的天然实验室,也是影响月球探测任务实施的重要环境因素。面向月球科研站等月球探测任务的国家重大战略需求,亟需聚焦月球空间环境对太阳风与地球风的响应,其中不仅包括常规监测月球空间天气(包括监测太阳风、地球风、能量带电粒子和中子辐射及波动环境、月尘和外逸层等)以保障人类探月登月的空间环境安全,也包括研究各种空间粒子与月表物质和电磁场的相互作用。可利用多卫星观测、遥感监测、月表就地探测、数据分析、数值模拟等手段发现新的物理现象或揭示新的物理机制,探寻太阳系中不同天体空间物质循环过程与辐射环境的差异及其产生原因,从而拓展我们对地球和行星宜居性的认识,并为月球科研站等月球后续任务的实施提供参考。

[关键词] 太阳风;地球风;月球空间环境;月球风化;月球水;月表磁异常;月尘

1 月球空间环境及其与月表作用的研究意义

宇宙线—太阳风—地球磁场(地球风)—月球的紧密联系、相互作用,构成了复杂多变的日-地-月空间环境,其中地月空间包括近地空间、月球空间及两者之间的磁层和太阳风等区域,如图1所示,月球空间环境受到日-地-月空间中各种物理过程的影响,其中不仅存在太阳风、地球风、宇宙线(Cosmic Ray)、太阳能量粒子(Solar Energetic Particle, SEP)等初级粒子,还包括以上多种初级高能粒子与地球大气或月壤作用产生的反照粒子,此外还有稀薄的月球外逸层(大气)以及近月尘埃环境,这些都是近年来科学研究和技术应用的前沿阵地^[1, 2]。

在科学上,地月空间环境涉及多尺度的基本空间离子体物理问题,包括波粒相互作用、能量转化等,一直以来都是业界关注的热点和难点问题。月球作为天然的空间等离子体实验室,在其环境中进



宗秋刚 北京大学地球与空间科学学院教授、空间所所长、行星科学中心主任。主要研究方向为地球和行星空间物理与空间天气及空间探测,至今在国内外最主要空间物理刊物发表论文400多篇,被引1万余次,在“杀手电子”快速形成机制、超低频波激发新机制和磁结构诊断新原理和新方法等方面的工作突破推进了学界对于空间粒子动力学过程的认识。曾获2020年国际日地物理委员会(SCOSTEP)杰出科学家奖、2020年欧洲地球科学联合会(EGU)汉尼斯·阿尔文(Hannes Alfvén)奖章及2018年国际空间研究委员会(COSPAR)维克拉姆·萨拉巴依奖章等。



史全岐 山东大学空间科学研究院教授,国家杰出青年科学基金获得者。研究方向为日-地-月空间环境,至今发表业内主要期刊文章120余篇,构建了一种多点卫星数据分析方法,并提出月球水来自地球风。2013年,获得国家自然科学基金优秀青年科学基金,入选教育部新世纪优秀人才支持计划;2017年,获美国地球物理学会(AGU)“日地系统科学BASU早期科研生涯奖”;2018年,获得中国地球物理学会傅承义青年科技奖;2019年,获评英国皇家学会“牛顿高级学者”基金。

收稿日期:2022-05-01;修回日期:2022-05-31

^{*} 本文根据第302期“双清论坛”讨论的内容整理。

^{**} 通信作者,Email:qgzong@pku.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42011530080,41974189)的资助。

行连续观测有助于发现新的物理现象或揭示新的物理机制。太阳风、地球风与月表相互作用可产生水和羟基、赤铁矿、中性原子、月源粒子等物质,研究太阳风、地球风与月表物质的相互作用,有助于了解日-地-月系统中磁场及大气的演化过程,进而理解太阳系中不同天体空间物质循环过程与辐射环境的差异及产生原因,从而拓展我们对地球和行星宜居性的认识。

在技术应用方面,以上所述的粒子辐射会导致设备异常、卫星损毁,甚至危害宇航员的生命健康安全,因此对日-地-月空间环境的常规监测可以帮助研究、预报空间天气,对保障探月登月等人类航天活动安全具有重要的意义。

月表水的研究不仅有助于揭示月球和太阳系天体形成与演化问题,而且充足的水源对载人登月和建立月球基地意义重大。美国重启载人登月 ARTEMIS 计划,寻找水冰是该计划最为迫切的任务之一,近年来我国探月项目也已将月球水的研究列为重点目标之一。

随着我国绕月探测、月面软着陆及采样返回等探月项目的推进,以及未来将要实施的载人登月及建立永久性月球基地等任务,近月尘埃环境问题的研究已变得尤为重要。漂浮的月尘会给人类月表探测活动带来诸多环境问题,如对航天员呼吸道和内脏的危害、科学仪器的表面磨损和机械阻塞、光学仪器及太阳能帆板的表面污染等等。月球尘埃环境的研究也对未来进行彗星、小行星以及行星际尘埃的研究具有参考意义。

此外,虽然月球目前没有整体的内禀磁场,但月表存在很多局域性的表面剩余磁场,通过对月球局部磁异常进行探测和研究,不仅可以追溯月球早期的内部结构及撞击历史,也能对研究月表空间风化、解释月表漩涡结构等问题提供线索。这些磁异常区可与太阳风/地球风相互作用形成微磁层(“迷你”磁层),月球微磁层代表了太阳系中尺度最小的磁层结构,是月面天然的保护屏障。通过对其产生条件和内部结构的研究,不仅有助于我们提高对空间物理基本问题的认知,也可对今后月面探测活动的安全防护问题提供科学依据。

2 研究背景和现状

宇宙线本身是由能量极高、通量较低的带电粒子组成(约含 89% 的质子、10% 氦、和 1% 的电子和重离子),来自日球层以外。太阳风是指从太阳高层大气喷射出的超声速带电粒子流^[3],充满了整个太阳系空间。宇宙线和太阳风都是持续存在的,除此之外还有偶发的太阳能量粒子(Solar Energetic Particles, SEPs)事件。早在 20 世纪 90 年代就有卫星在月球轨道附近观测到从地球逃逸的粒子,被称之为地球风^[4]。实际上,地球风可包含两部分,一部分是进入地球磁层后重新分布的太阳风粒子,另一部分是从地球电离层或高层大气上行进入磁层的粒子。从地球大气逃逸的地球风粒子,主要包含一价带电粒子,比如 H^+ 、 O^+ 、 NO^+ 、 N^+ 、 O_2^+ 等^[5-7];而太阳风还包含很多高价离子, He^{2+} 和 O^+ 可分别作为示踪粒子用于区分太阳风和地球风。

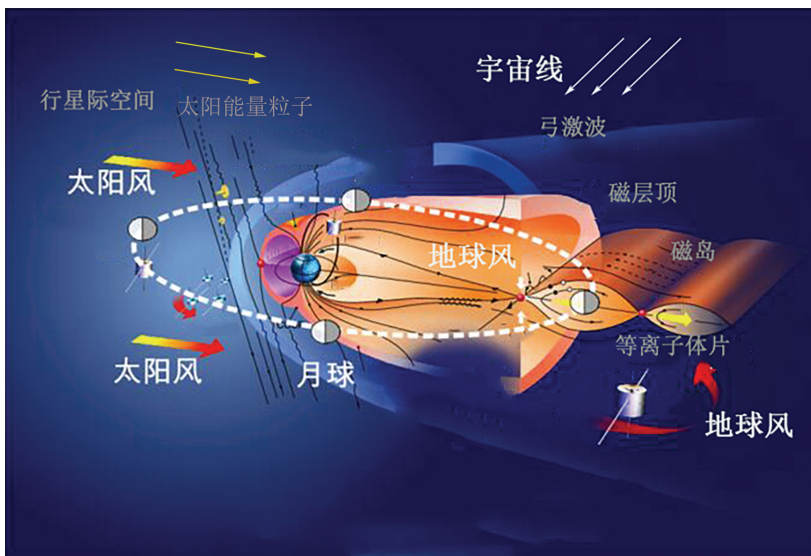


图 1 月球空间环境示意图

地球风粒子从地球逃逸是一个比较复杂的过程,不同时期逃逸粒子的成分不同,有时地球风中氧离子的含量会超过氢离子^[8],Wei等人^[9]的研究指出地磁场倒转期间地球的氧逃逸率会上升3~4个数量级。月球轨道有大约3/4的部分在近地太阳风中,1/4部分在地球磁层里面^[10]。Zong等人^[5,6]发现从地球逃逸的氧离子会镶嵌在磁尾的磁岛里面,这种磁岛称为“富氧”磁岛,可经过月球轨道,Ozima等人^[11]通过观测数据估算有大约10%的粒子会到达月球表面上,从而有机会和月表物质相互作用^[12-15],最近有研究认为这一过程可发生于火星与其卫星的相互作用中^[16]。

月球表面无全球性磁场和稠密大气保护,直接受微流星体、太阳风、地球风和宇宙线等轰击,使得月表物质的物理与化学性质发生变化,这一过程被称为太空风化/空间风化作用^[15]。太阳风、地球风与月球的相互作用涉及多种物理机制^[17],目前来自中国嫦娥系列卫星、日本Kaguya卫星、美国Lunar Prospector卫星、ARTEMIS卫星以及印度Chandrayaan-1卫星等数据表明,太阳风、地球风粒子在与月表物质相互作用过程中,在月表没有磁异常的向阳面区域,会产生能量转换和电荷的交换,在此过程中会产生能量中性原子(Energetic Neutral Atom, ENA),少部分(0.1%~1%)的质子和约20%的ENA会通过正/反向散射损失能量^[18,19],大部分(约79%)的质子会被月表吸收形成羟基或水^[20],另外,初级粒子在与月表物质相互作用过程中还会有重离子从月表溅射出来^[21]。

同时,月球表面存在一些磁异常区,在月球表面的磁场大小可高达几百纳特^[22],在月表磁异常区,局地磁场可与太阳风/地球风作用形成一个个微小的磁层,一部分质子会被月球的磁异常区或者微磁层反射,只改变方向不损失能量;还会有一部分离子被重拾加速^[23]。太阳风和行星际磁场经过月球后,在背阳面形成了月球尾迹结构^[24],其可向后延伸25个月球半径,在尾迹下游和磁异常附近可产生不同尺度的磁场扰动,引发不同类型的波动或湍流^[25,26]。

月球表面还可以直接与太阳光辐射、太阳风、宇宙线及微流星体等相互作用,形成风化层,并使月表带电,导致月尘的静电悬浮和运输^[27]。

宇宙线、太阳高能粒子等高能初级粒子会直接轰击月壤,并产生相应能量分布的次级粒子,进一步造成辐射效应^[28]。这些次级粒子除了带电粒子外,

还包含了大量的中性粒子辐射(如中子、 γ 射线等)。这些初级入射粒子及其产生的次级粒子辐射会严重威胁探月设备和人员的安全^[29,30]。

综上,月球表面及空间环境对太阳风与地球风的响应包含了月表物质中太阳风和地球风的作用历史记录,月球水等表面物质的产生与演化,月球尾迹、磁异常和微磁层(“迷你”磁层),尘埃环境和月面电场,近月表辐射环境等多个研究方向,同时涉及了空间物理学、天体化学及行星光谱学等多学科的交叉融合内容。在下一章节中将会详细介绍的各方向的研究现状及其中涉及的前沿科学问题。

3 前沿科学问题

3.1 月表物质中太阳风和地球风的作用历史记录

月球表面受太阳风、地球风和微流星体轰击,即空间风化作用。除了生成水之外,表面物质的性质也会发生变化:太阳风氢离子以及微流星体轰击在矿物中产生纳米级单质金属铁,降低反照率。由于月球的潮汐锁定效应,来自地球风的粒子大多轰击月球正面。地球风携带了地球上的氧离子、氮离子和惰性气体等成分,这些粒子对月球空间风化和物质演化的贡献目前研究还不多。

最新研究还表明地球风中的氢、氦、氮、氧、氖和氩等都可以传输并保存在月表物质中,记录了地球大气和磁场的演化的信息,例如赤铁矿中记录了地球风中氧逃逸的历史信息^[12],Terada等人^[31]的研究表明来自地球的氧离子可以注入月球风化层表面,深度约为数十纳米。而月壤中的氮含量与月壤的深度有关,说明月壤中的氮也是从外部注入的。Ozima等人^[4]根据阿波罗(Apollo)任务返回的月壤结果,发现月壤中氮元素的相对丰度比太阳风中的高,而且¹⁵N和¹⁴N的同位素占比也和太阳风中的有明显差别(约30%),所以他们猜测月壤中大部分的氮和一些其他挥发性元素来自地球的大气,他们推断只有地磁场基本消失的情况下,地球大气气体才能逃逸并注入月壤,所以月壤中氮元素的丰度也许可以确定全球地磁场开始出现形成的时间,而因月球背面月壤应该缺乏地球成分,这一假设可以通过对月球正面和背面月壤的观测来对比检验。

进一步,Ozima等人^[11]认为对月壤中He、N、O、Ne和Ar等元素的检测可为研究40亿年前无地质记录的“黑暗时代”提供新线索,可以帮助解决地球科学中三个最基本的问题:地磁场开始的时间、地球氧气出现的时间以及地月动力系统的演化。

3.2 月球水等表面物质的产生与演化

早在1961年, Watson等人^[32]就指出, 月球两极区域内永久阴影区的温度非常低, 月球两极撞击坑的底部可能有水冰, 后来包括Clementine^[33]、LP (Lunar Prospector)^[34]卫星等多个探测任务以及对月球样品的分析均表明月球上确实存在水和水冰。2009年, 科学家们分别利用三颗卫星的光谱仪观测到月表水的存在。同年美国LCROSS卫星撞击了月球南极陨石坑Cabeus内的永久阴影区, 通过对溅射物质的光谱检测, 直接确定月球极区含有大量水冰, 估计水含量约为5.6%^[35]; 2013年, Spudis等^[36]结合LP卫星中子谱仪和LRO雷达光谱的观测数据, 发现中子异常区(H含量高)与永久阴影区重合度很高, 估计在月球永久阴影区内可能蕴藏至少6亿吨的纯水冰。

学界认为月球水可能有三种来源: 一是月球形成早期来自月球内部的岩浆释放的挥发分^[37], 故而研究月球水对于揭示月球岩浆演化历史也具有重要意义; 二是在月球形成后漫长的地质时期中, 不断经受流星体或彗星的撞击, 其包含的水可以迁移并沉积到寒冷的月球极区内保存下来^[38]; 三是太阳风中氢离子持续轰击月表物质, 与其中的氧原子结合, 产生羟基和水^[39](如图2), 目前太阳风被认为是全月球表面水的一种主要来源, 而由其产生的月球水可动态输运到极区, 从而沉积在永久阴影区。

月球每月有1/4的时间在地球磁层内, 磁层可

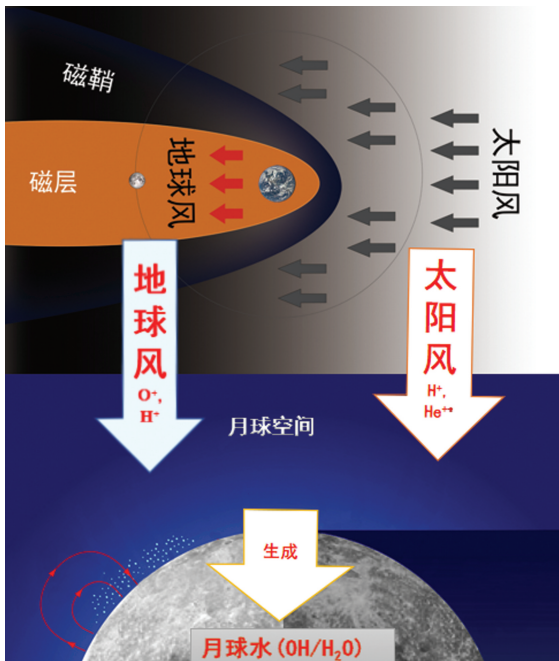


图2 太阳风、地球风与月表相互作用及月表水产生示意图

以屏蔽太阳风, 使在月表低纬度地区观测到的太阳风产生的水含量减弱^[40, 41]。然而, Wang等人^[13]通过多空间物理、天体化学和行星光谱学等多学科交叉研究发现, 月球位于太阳风和磁层时, 中高纬月表水含量基本不变, 说明地球风也是月球水不可忽略的粒子来源。在该过程中, 磁尾成为了连接地球与月球的物质“通道”。

目前月球水的产生、迁移、沉积及损失等物理过程还不清晰, 仍需进一步研究。此外, 不同能量的氢离子对水的产率的影响, 以及太阳风和地球风对月球水的相对贡献还不清楚, 仍需进一步研究。

除了水, 地球风中的氧离子对月表物质也有一定的影响, 但仍有一些问题还没解决, 例如氧离子如何从地球逃逸到达月球, 又是如何对月球表面物质产生影响即地球风对月表的空间风化作用(如赤铁矿的产生), 这些在国际上研究还较少, 且大都与月球水密切相关, 值得进一步研究。

磁暴期间等离子体片中氧离子的密度和压强是平静期的5倍^[42, 43], 而这些粒子是否会通过尾向高速流对月球的成分产生影响, 甚至影响到月球的水、赤铁矿的生成, 也是极其值得探索的问题。

3.3 月球尾迹、磁异常和微磁层(“迷你”磁层)

太阳风和地球风经过月球时, 会在月球背面形成尾迹^[44, 45], 影响整个月球空间环境。月球以每个月两次的频率穿过晨侧和昏侧的磁层顶、弓激波等边界区域, 在磁层内还会经历等离子体一尾瓣等不同的等离子体环境, 因此可能会与这些边界和区域发生相互作用, 例如在月球的尾迹里, 弓激波的结构会因为尾迹发生很大的改变, 另一方面, 弓激波扫过月球尾迹时能显著地改变尾迹的形态。不同等离子体环境变化对尾迹的影响都值得进一步的研究。

月球是一个内部活动近乎停止的卫星。探测数据表明, 月球目前没有整体的内禀磁场, 但月表具有许多局限性的表面剩余磁场, 称为磁异常。这些磁异常通常被认为是在内部发电机产生的背景磁场条件下, 由撞击溅射物在对跖区沉降引起的^[46]; 近年来研究结果发现, 月球上最大的一片磁异常集聚区分布在南极最大撞击坑南极一艾肯盆地(SPA)的北部边缘, 这些现象又比较支持内部发电机磁化理论^[47]。磁异常成因除了冲击剩磁和热剩磁外, 还有彗星撞击等假说^[48]。因此, 磁异常区的起源目前还没有定论, 有待进一步研究^[49]。

通常认为磁异常会与太阳风相互作用形成局部的微磁层或“迷你”磁层结构, 可偏转带电粒子, 成为

月表天然的保护屏障。这种“迷你”磁层区别于地球磁层,其尺度通常和离子回旋半径相当。目前关于月球“迷你”磁层的研究,问题主要集中在“迷你”磁层的产生条件和内部结构两方面,包括可能涉及到的“迷你”磁层外是否有激波,其对太阳风的屏蔽效率有多少等问题,还需要进一步的深入研究。

磁异常或“迷你”磁层会降低太阳风到达月表的通量,从而减小相应区域的空间风化效应,使月表呈现明亮蜿蜒状的漩涡结构。然而,另有一些观点认为,这种漩涡结构可能不仅是由于太阳风通量差异造成的,还可以由“迷你”磁层中月尘的静电迁移引起^[27]。因此,目前虽然能确定月表漩涡结构与磁异常有关,但其具体形成机制目前为止仍然没有统一论。此外,有些磁异常附近没有漩涡,一些漩涡位型和磁异常位型不一致^[50, 51],有待人们进一步揭示其成因。

此外,在月球东经 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 区域内,由太阳风、地球风/地球磁层共同作用形成了一个特殊的区域,被称为幽灵区^[52]。因为此区域在月球出磁层后即进入尾迹,受太阳风轰击的时间最短,致使其月表由太阳风引起的空间风化程度较低,其中地球风的信息保存比较纯粹,从而可以帮助研究地球大气和磁场的演化历史。

3.4 尘埃环境和月面电场

月球表面直接受到太阳光、太阳风、宇宙线及微流星体等作用,不仅形成风化层,还影响到月表的带电环境和月尘环境。如图 3 所示,向阳面月表主要因太阳光照作用发射光电子而带正电^[53];背阳面主要受太阳风/地球风等离子体的作用带负电^[54]。月尘带电是伴随月表充电过程同时进行的,在月面电场作用下,一部分月尘会克服重力及月表粘附力而离开月表,并在近月空间悬浮和输运,形成尘埃外逸层等环境。

月尘研究的一个关键问题是月尘如何迁移,目

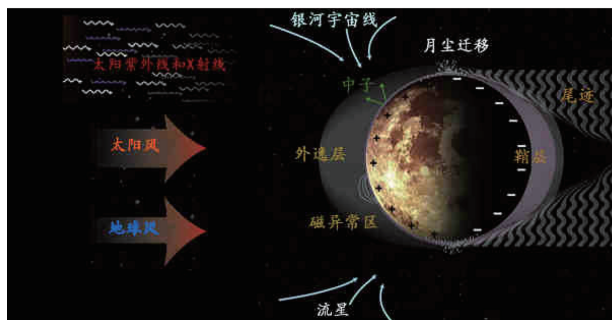


图 3 月表带电、磁异常以及月球尾迹示意图

(图片改自: <https://ssed.gsfc.nasa.gov/dream/science.html>)

前的观点包括静电迁移机制^[55]和微流星体撞击溅射机制^[56]。阿波罗时期看到的地平辉光现象表明在月球晨昏线附近有大量飘浮的尘埃颗粒。最近研究表明,地形起伏会带来局部遮挡效应,即太阳光和太阳风离子会被凸起的地形阻挡而不能进入其阴影区,但是热速度占优势的电子能够进入,因而带来背风侧的负电势,造成局部电场增强,从而加剧月尘的局部活动^[57, 58]。这些局部尘埃云可能对月面探测活动带来危害,需要在未来探测任务中做充分评估。

此外,月表的磁场遮挡效应也可以改变近月空间的电势分布^[59],其可能造成带电尘埃在正负电场作用下向不同方向进行迁移,成为了磁异常区月球漩涡形成的候选机制之一,但需要进一步寻找相关的观测证据。

3.5 近月表辐射环境

如前所述,因月球没有全球磁场和稠密大气的保护,宇宙射线、太阳高能粒子等高能初级粒子会直接到达月表,并与月壤作用产生次级粒子,造成辐射效应。这些次级粒子包括带电粒子和中性粒子(如中子、 γ 射线等)。这些初级粒子及次级粒子的辐射会威胁到探月设备和人员的安全与健康^[29]。

月球在公转轨道的四分之一时间经过地球磁层,前人工作认为其会对带电的银河宇宙线和太阳能量粒子事件产生一定屏蔽作用,使得满月时期的探月航天器和月面上活动的航天员相对安全一些^[30, 60, 61]。然而,最新研究发现月球在满月期间也可能脱离地球磁场的保护,暴露于太阳能量粒子的辐射风险之中^[62]。由此可见,地球磁层屏蔽的效果还存在一定争议,值得进一步深入研究。此外,地球空间暴,如地球磁尾高速流和亚暴产生的带电粒子加速^[63],可能对月球的辐射环境产生影响,这方面也值得进一步研究。

与带电粒子不同,不带电的中子不受电磁场的约束,很难防护,穿透能力强,模拟表明,月表中子辐射剂量占总辐射剂量的 $1/4$ 左右^[64],可能对月表航天员和设备安全构成较大威胁,因此需要对月表中子开展进一步就位观测和模拟研究。此外,我们还可以通过中子辐射和月表物质的作用来反推月球次表层的成分,由于水是很好的中子慢化剂,所以月壤中的含水量会反应到月表中子能谱的变化中^[65]。另外,月球次表层的铁、钛等也可以通过中子来反演^[66],所以中子探测可以作为研究月壤成分的一种重要手段。然而,由于影响中子能谱变化的因素较多等原因,利用中子能谱反演月表物质信息的方法

还存在不少尚未解决的技术难点,还需更多的实测数据分析和更加贴合实际情况的模拟,以及方法上的突破。

除此之外,月球的固有特征,包括内禀磁场和稠密大气的缺乏以及复杂的等离子体环境,导致月球空间环境中产生各种波动。这些波动发生在很宽的频率范围内,包括海拔 100 km 处峰值频率接近 0.01 Hz 单色磁波动(~ 0.01 Hz ULF 波),太阳风尾迹外 0.1~10 Hz 宽带磁湍流, ~ 1 Hz 窄带低频哨声波和 ~ 1 kHz 高频哨声波以及磁异常区附近的静电波等^[26]。然而,月表空间波动分布与变化特性仍存在不少未解决的问题。例如,这些波动能否传播到月球表面并被观测到,它们如何响应太阳风与地球风带电粒子,如何影响月表粒子辐射环境,以及波动和粒子如何在月球磁异常区耦合等问题,都仍存在众多疑问。

太阳风、地球风粒子轰击月表物质,其中一部分被散射成离子,一部分散射成为能量中性原子并逃逸到月球外逸层中。Wang 等人^[67]2011 年利用嫦娥二号数据在月球外逸层中发现了 H^+ 离子。最近嫦娥四号中性原子探测器首次在月球背面发现 ENA 能通量的晨昏不对称^[68-70]。然而,这些粒子对外逸层和辐射环境的贡献目前还尚不明确。除了散射,太阳风/地球风和月表作用还会发生溅射过程,产生月源粒子,其对月表辐射环境的影响仍需进一步探究。

4 研究展望与建议

月球是天然的空间实验室,在月球建立科研站可在同一空间观察各种过程的时间变化,相比时间、空间都变化的卫星观测更有优势,连续观测有助于发现新的物理现象与机制,解决例如波粒相互作用、能量转化、月球水的来源演化等基本空间科学问题,同时,针对月球周围复杂的空间环境,长期监测地球风、太阳风、宇宙线、月尘、电磁场和波动环境,可以更好地研究和预报空间天气,保障科研站和载人登月等活动的安全^[1, 2]。具体若干建议如下:

(1) 在太阳风、地球风与月球相互作用方面,首先可利用中性原子成像仪研究月球与太阳风、地球风之间发生的后向散射以及电离复合过程,研究地球磁暴以及亚暴期间环电流的动态变化过程,评估地球氢离子和氧离子的逃逸率;结合低能粒子探测器和磁强计研究地球风/太阳风如何影响月球磁场异常区的等离子体。此外,还可以研究地球风/太阳风如何影响月球无磁场区域的等离子体,了解地球

风是如何影响月壤的,以及地球和月球的起源信息,评估离子在与月球、地球、太阳风之间的相互作用过程中的逃逸水平,探究地球风中的氧离子、氮离子和惰性气体等粒子对月球物质演化的贡献。另外,可以对比研究月球不同区域,比如月球正面、背面和磁异常区,可以大大促进对太阳风、地球风与月球相互作用的理解。

(2) 研究月球水等表面物质的产生、迁移、沉积及损失等物理过程,需要充分利用空间物理、天体化学、行星光谱学等多学科的交叉合作,对月球空间、月球表面以及外逸层开展多探测器、多点(如正面与背面、磁异常内外)联合同步观测。此外,也可利用中子谱仪配合其他载荷(如 γ 谱仪),并结合数值模拟,反演月球的亚表层水、铁、钛等物质的分布情况,并结合光谱和质谱数据探测其化学形式(水冰、OH、 H_2)。针对不同能量的氢离子对水的产率的影响以及太阳风和地球风对月球水的相对贡献等问题,可通过返回样品分析及轰击实验进行交叉研究。

(3) 在月球尾迹和磁异常及微磁层研究方面,主要涉及带电粒子与电磁场及其波动环境,可在环绕器上搭载等离子体和波动仪器以及磁强计,研究月球位于太阳风和地球风不同区域月球尾迹的动态变化及等离子体与磁异常的相互作用等问题。同时可借助数值模拟对尾迹及微磁层进行研究。

为研究磁异常对月面空间风化的影响,我们还需要获取月面光谱数据,依此来计算月面纳米级单质金属铁以及羟基和水含量,确定空间风化程度,再结合磁场观测数据,来确定磁异常对月面空间风化的影响,进而解释漩涡结构形成的原因。

(4) 尘埃环境和月面电场

为了全面地研究月球近表面的尘埃等离子体环境,可在月面部署尘埃探测器、软 X 射线探测器、等离子体探测器(低能质子和电子)、电场和磁场探测器,其中为了进一步研究月表磁异常的遮挡效应以及地形遮挡效应对月面电势和尘埃分布的影响,可在月面不同位置(正面、背面、磁异常区等)放置尘埃探测器并配合电磁场测量,结合数值模拟,研究不同背景等离子体环境中(太阳风以及地球磁层中的不同区域)、不同位置(磁异常或撞击坑)处的尘埃迁移和分布特征,并检验月尘迁移形成月球漩涡的观点。

(5) 在近月表辐射环境方面,可设立月球空间天气气象站,发挥月球空间天气的保障作用,需要持续探测地球风、太阳风,带电粒子、中子辐射与波动环境,以短(天到月)和长(年)时间尺度监测月球表

面的辐射环境。可在着陆器和环绕器上部署中子谱仪、低能、中能、高能粒子仪器以及波动探测器。不仅可以研究粒子和波动的来源以及波粒相互作用等问题,还可以评估带电粒子和中子对仪器设备和人体的辐射剂量,为保障探月登月活动提供环境参考。还可利用紫外光谱仪、质谱仪、X射线探测仪等对外逸层的中性成分进行观测,以了解月源粒子对月表辐射环境及外逸层的贡献。

致谢 诚挚感谢中国科学院国家空间中心谢良海、山东大学张江老师和王慧姿、韩晨光、傅越、商文赛等同学,以及其他中国科学院国家空间中心、中国科技大学、武汉大学等单位的同事在相关素材方面的帮助。

参 考 文 献

- [1] 王赤,张贤国,徐欣锋,等. 中国月球及深空空间环境探测. 深空探测学报, 2019, 6(2): 105—118.
- [2] 吴伟仁,于登云,王赤,等. 月球极区探测的主要科学与技术问题研究. 深空探测学报, 2020, 7(3):223—231, 240.
- [3] Parker EN. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. The Astrophysical Journal Letters, 1958, 128: 664.
- [4] Ozima M, Seki K, Terada N, et al. Terrestrial nitrogen and noble gases in lunar soils. Nature, 2005, 436(7051): 655—659.
- [5] Zong QG, Wilken B, Reeves GD, et al. Geotail observations of energetic ion species and magnetic field in plasmoid-like structures in the course of an isolated substorm event. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1997, 102(A6): 11409—11428.
- [6] Zong QG, Wilken B, Woch J, et al. Energetic oxygen ion bursts in the distant magnetotail as a product of intense substorms: three case studies. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1998, 103(A9): 20339—20363.
- [7] Zong QG, Wilken B. Bursty energetic oxygen events in the dayside magnetosheath: GEOTAIL observations. Geophysical Research Letters, 1999, 26(22): 3349—3352.
- [8] Fu SY, Zong QG, Wilken B, et al. Temporal and spatial variation of the ioncomposition in the ring current. Space Science Review, 2001, 95: 539—554.
- [9] Wei Y, Pu ZY, Zong QG, et al. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: implications to mass extinction. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 394: 94—98.
- [10] Shue JH, Song P, Russell CT, et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1998, 103(A8): 17691—17700.
- [11] Ozima M, Yin QZ, Podosek FA, et al. Toward understanding early Earth evolution: prescription for approach from terrestrial noble gas and light element records in lunar soils. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(46): 17654—17658.
- [12] Li S, Lucey PG, Fraeman AA, et al. Widespread hematite at high latitudes of the moon. Science Advances, 2020, 6(36): eaba1940.
- [13] Wang HZ, Zhang J, Shi QQ, et al. Earth wind as a possible exogenous source of lunar surface hydration. The Astrophysical Journal Letters, 2021, 907(2): L32.
- [14] Wei Y, Zhong J, Hui H, et al. Implantation of Earth's Atmospheric Ions Into the Nearside and Farside Lunar Soil: Implications to Geodynamo Evolution. Geophysical Research Letters, 2020, 47(3): e2019GL086208.
- [15] Pieters CM, Noble SK. Space weathering on airless bodies. Journal of Geophysical Research: Planets, 2016, 121(10): 1865—1884.
- [16] N n n Q, Poppe AR, Rahmati A, et al. Implantation of Martian atmospheric ions within the regolith of Phobos. Nature Geoscience, 2021, 14(2): 61—66.
- [17] Halekas JS, Saito Y, Delory GT, et al. New views of the lunar plasma environment. Planetary and Space Science, 2011, 59(14): 1681—1694.
- [18] Wieser M, Barabash S, Futaana Y, et al. Extremely high reflection of solar wind protons as neutral hydrogen atoms from regolith in space. Planetary and Space Science, 2009, 57(14/15): 2132—2134.
- [19] 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). Geophysical Research Letters, 2008, 35(24): L24205.
- [20] Pieters CM, Goswami JN, Clark RN, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1. Science, 2009, 326(5952): 568—572.
- [21] 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). Geophysical Research Letters, 2009, 36(22): L22106.
- [22] Tsunakawa H, Takahashi F, Shimizu H, et al. Surface vector mapping of magnetic anomalies over the Moon using Kaguya and Lunar Prospector observations. Journal of Geophysical Research: Planets, 2015, 120(6): 1160—1185.
- [23] Nishino MN, Fujimoto M, Maezawa K, et al. Solar-wind proton access deep into the near-Moon wake. Geophysical Research Letters, 2009, 36(16): L16103.
- [24] Ness NF, Behannon KW, Scarce CS, et al. Early results from the magnetic field experiment on lunar Explorer 35. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1967, 72(23): 5769—5778.
- [25] Luo QY, Yang L, Ji JH. Global distribution of the kinetic scale magnetic turbulence around the moon. The Astrophysical Journal Letters, 2015, 816(1): L3.
- [26] Harada Y, Halekas JS, Poppe AR, et al. Statistical characterization of the forenoon particle and wave morphology: ARTEMIS observations. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2015, 120(6): 4907—4921.
- [27] Garrick-Bethell I, Head JW III, Pieters CM. Spectral properties, magnetic fields, and dust transport at lunar swirls. Icarus, 2011, 212(2): 480—492.

- [28] Dobynde MI, Guo JN. Radiation environment at the surface and subsurface of the moon: model development and validation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(11): e2021JE006930.
- [29] Zhang SY, Wimmer-Schweingruber RF, Yu J, et al. First measurements of the radiation dose on the lunar surface. *Science Advances*, 2020, 6(39): eaaz1334.
- [30] Shang WS, Tang BB, Shi QQ, et al. Unusual Location of the Geotail Magnetopause Near Lunar Orbit: A Case Study. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, 125(4): e27401.
- [31] Terada K, Yokota S, Saito Y, et al. Biogenic oxygen from Earth transported to the Moon by a wind of magnetospheric ions. *Nature Astronomy*, 2017, 1: 26.
- [32] Watson RE, Freeman AJ. Origin of effective fields in magnetic materials. *Physical Review*, 1961, 123(6): 2027—2047.
- [33] Nozette S, Rustan P, Pleasance LP, et al. The clementine mission to the moon: scientific overview. *Science*, 1994, 266(5192): 1835—1839.
- [34] Feldman WC, Barraclough BL, Fuller KR, et al. The lunar prospector gamma-ray and neutron spectrometers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1999, 422(1/2/3): 562—566.
- [35] Colaprete A, Schultz P, Heldmann J, et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume. *Science*, 2010, 330(6003): 463—468.
- [36] Spudis PD, Bussey DBJ, Baloga SM, et al. Evidence for water ice on the Moon: results for anomalous polar craters from the LRO Mini-RF imaging radar. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(10): 2016—2029.
- [37] Liu Y, Taylor LA. Water on the moon. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(2): 579—588.
- [38] Greenwood JP, Itoh S, Sakamoto N, et al. Hydrogen isotope ratios in lunar rocks indicate delivery of cometary water to the Moon. *Nature Geoscience*, 2011, 4(2): 79—82.
- [39] Sunshine JM, Farnham TL, Feaga LM, et al. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the Deep Impact spacecraft. *Science*, 2009, 326(5952): 565—568.
- [40] Li S, Garrick-Bethell I. Surface water at lunar magnetic anomalies. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(24): 14318—14327.
- [41] Cho E, Yi Y, Yu J, et al. Assessment of the shielding effect of the earth's magnetic field on lunar OH/H₂O. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2018, 123(8): 2110—2118.
- [42] Yue C, Jun CW, Bortnik J, et al. The relationship between EMIC wave properties and proton distributions based on van Allen probes observations. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(8): 4070—4078.
- [43] Fu SY, Wilken B, Zong QG, et al. Ion composition variations in the inner magnetosphere: individual and collective storm effects in 1991. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, 106(A12): 29683—29704.
- [44] Ma YH, Wong HC, Xu XJ. Subsonic and sunward-orientated lunar wake observed by ARTEMIS in the geomagnetotail. *Astrophysics and Space Science*, 2015, 358(2): 1—12.
- [45] Schubert G, Lichtenstein BR. Observations of Moon-plasma interactions by orbital and surface experiments. *Reviews of Geophysics*, 1974, 12(4): 592—626.
- [46] Hood LL, Artemieva NA. Antipodal effects of lunar basin-forming impacts: initial 3D simulations and comparisons with observations. *Icarus*, 2008, 193(2): 485—502.
- [47] Wieczorek MA, Weiss BP, Stewart ST. An impactor origin for lunar magnetic anomalies. *Science*, 2012, 335(6073): 1212—1215.
- [48] Wieczorek MA, Weiss BP, Breuer D, et al. Lunar magnetism. [2022-05-01]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03524536>.
- [49] 潘永信, 纪新林, 朱日祥. 月球磁学观测与研究进展. *地球化学*, 2010, 39(1): 32—36.
- [50] Denevi BW, Robinson MS, Boyd AK, et al. The distribution and extent of lunar swirls. *Icarus*, 2016, 273: 53—67.
- [51] Blewett DT, Coman EI, Hawke BR, et al. Lunar swirls: examining crustal magnetic anomalies and space weathering trends. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(E2): E02002.
- [52] Tucker OJ, Farrell WM, Poppe AR. On the effect of magnetospheric shielding on the lunar hydrogen cycle. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(2): e2020JE006552.
- [53] Grobman WD, Blank JL. Electrostatic potential distribution of the sunlit lunar surface. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1969, 74(16): 3943—3951.
- [54] Halekas JS, Mitchell DL, Lin RP, et al. Evidence for negative charging of the lunar surface in shadow. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(10): 77-1—77-4.
- [55] Rennilson JJ, Criswell DR. Surveyor observations of lunar horizon-glow. *The Moon*, 1974, 10(2): 121—142.
- [56] Glenar DA, Stubbs TJ, McCoy JE, et al. A reanalysis of the Apollo light scattering observations, and implications for lunar exospheric dust. *Planetary and Space Science*, 2011, 59(14): 1695—1707.
- [57] Xie LH, Zhang XP, Li L, et al. Lunar dust fountain observed near twilight craters. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(23): e2020GL089593.
- [58] Farrell WM, Stubbs TJ, Halekas JS, et al. Anticipated electrical environment within permanently shadowed lunar craters. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115(E3): E03004.
- [59] Futaana Y, Barabash S, Wieser M, et al. Remote energetic neutral atom imaging of electric potential over a lunar magnetic anomaly. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(2): 262—266.
- [60] Xu XJ, Angelopoulos V, Wang Y, et al. The energetic particle environment of the lunar nearside: SEP influence. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, 849(2): 151.
- [61] Winglee RM, Harnett EM. Radiation mitigation at the moon by the terrestrial magnetosphere. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(21): L21103.

- [62] Harnett EM. Deflection and enhancement of solar energy particle flux at the Moon by structures within the terrestrial magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, 115(A1): A01210.
- [63] Zong QG, Yue C, Fu SY. Shock induced strong substorms and super substorms: preconditions and associated oxygen ion dynamics. *Space Science Reviews*, 2021, 217(2): 1—34.
- [64] Hayatsu K, Kobayashi S, Yamashita N, et al. Environmental radiation dose on the moon// *Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications*. Villa Olmo, Como, Italy: WORLD SCIENTIFIC, 2008: 792—796.
- [65] Lawrence DJ, Hurley DM, Feldman WC, et al. Sensitivity of orbital neutron measurements to the thickness and abundance of surficial lunar water. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2011, 116(1): 1—13.
- [66] Litvak ML, Mitrofanov IG, Sanin A, et al. Global maps of lunar neutron fluxes from the LEND instrument. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E12): E00H22.
- [67] Wang XD, Zong QG, Wang JS, et al. Detection of $m/q = 2$ pickup ions in the plasma environment of the Moon: the trace of exospheric H_2^+ . *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(14): L14204.
- [68] Wang HZ, Xiao C, Shi QQ, et al. Energetic neutral atom distribution on the lunar surface and its relationship with solar wind conditions. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, 922(2): L41.
- [69] Xie LH, Li L, Zhang AB, et al. Inside a lunar mini-magnetosphere: first energetic neutral atom measurements on the lunar surface. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(14): e2021GL093943.
- [70] 谢良海, 张爱兵, 李磊, 等. 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. *空间科学学报*, 2022, 42(1): 11—24.

Response of the Lunar Space Environment to Solar Wind and Earth Wind

Quanqi Shi¹ Qiugang Zong^{2*} Chao Yue² Lei Li³

1. *Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209*

2. *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871*

3. *State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

Abstract The lunar space is an important part of the Sun-Earth-Moon system, which is a natural laboratory for studying fundamental physics and the interaction between space plasmas and the celestial bodies like the Moon (i. e., lacking any significant atmosphere and a global magnetic field). It is also an important environmental factor that should be considered in lunar exploration missions. For the major national strategic needs of lunar exploration missions such as International Lunar Research Station, it is imperative to focus on the response of the lunar space environment to the solar wind and Earth wind, not only including routine monitoring of lunar space weather (such as solar wind, Earth wind, energetic charged particles, neutron radiation, dust and lunar exosphere.) to ensure the safety of human lunar exploration, but also studying the interaction of the space particles with lunar surface materials and electromagnetic fields. The new physical phenomena or mechanisms may be found using multi-satellite observations, remote sensing and in situ lunar surface observations, data analysis, numerical simulation, and other methods. Understanding of the Earth and planetary habitability can be broadened by studying the material circulation processes and radiation environment of different celestial bodies in the solar system and their formation mechanisms, which may provide some reference for the lunar scientific research station and other future lunar missions.

Keywords solar wind; earth wind; lunar space environment; lunar surface weathering; lunar water; lunar surface magnetic anomalies; lunar dust

(责任编辑 刘敏 张强)