

月球空间天气探测与研究进展

罗冰显^{1,2,3,4}, 张贤国^{1,2,3,5}, 孙天然^{1,3}, 白先勇^{4,6}, 韦 飞^{2,3,5}, 林瑞淋^{1,2,3}, 李 磊^{1,3}, 张坤毅^{2,3,5}, 孔令高^{2,3,5}, 王馨悦^{2,3,5}, 谢良海^{1,3}, 彭松武^{2,3,5}, 唐斌斌^{1,3}, 张颖洁^{1,3}, 徐秋予^{1,3}, 冷 双^{2,3,5}, 冯鹏远^{2,3,5}, 苏 杨⁷, 甘为群⁷, 封 莉⁷, 田 晖^{1,3,8}, 陈林杰^{1,3}, 颜毅华^{1,3}, 宋永亮^{4,6}, 刘四清^{1,2,3,4}, 邓元勇^{4,6}

(1. 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院 空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190; 6. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 7. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210023; 8. 北京大学 地空学院, 北京 100871)

摘 要: 稳定的天体地质构造、与地球合适的距离、无稠密大气和全球磁场, 使得月球成为日地月空间天气监测和研究的天然优良实验室。回顾了国内外月球空间天气探测和研究进展, 梳理了月球空间天气关键科学问题及预报应用问题, 提出了建立月球空间天气监测站的构想, 明确了监测站具体科学目标, 并介绍了监测站三大系统构成及相互关系, 包括监测系统、科学研究系统以及建模与预报系统。建立月球空间天气监测站对研究太阳爆发活动、日地月耦合关系以及月球局地环境的变化具有重要的科学意义, 也有利于促进月球空间天气建模和预报技术的发展, 提升未来月球科研探索任务空间环境保障能力。

关键词: 月球空间天气; 月球空间天气探测和研究; 月球空间天气监测站; 月球空间天气预报

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)02-0159-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20220086

引用格式: 罗冰显, 张贤国, 孙天然, 等. 月球空间天气探测与研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(2): 159-168.

Reference format: LUO B X, ZHANG X G, SUN T R, et al. Progress in lunar space weather detection and research[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(2): 159-168.

引 言

空间天气通常指由太阳活动引起的日-地空间环境扰动, 蕴含着复杂、多尺度、多要素的物理过程, 可能影响人类太空探索活动和高技术系统的安全和运行, 也可能影响到人类生命和健康, 因此成为空间科学和空间应用都重点关注的研究对象^[1-2]。随着人类太空活动范围的拓展, 月球以及以远深空已成为空间天气重要的研究范畴。

与地球相比, 月球没有稠密的大气和全球磁场, 未形成和地球空间环境一样的复杂结构, 但月球每月绕地球公转一周, 交替穿行于行星际空间、地球磁鞘和地球磁尾区域, 如图1所示, 因此月球空间环境不仅受太阳活动的直接影响, 也受月球轨道处地球空间环境变化的影响^[3]。

月球空间天气指的是受太阳活动以及地球空间环境影响产生的月球空间环境的剧烈变化。前期的探测

和研究表明, 月球上存在类似地球上“风、雨、电、尘”等空间天气现象。“风”指的是等离子体。月球周期性穿入穿出地球磁层, 受到太阳风和地球风的直接冲击, 经历不同的等离子体环境, 影响月表电位及月尘分布。“雨”指的是高能粒子, 包括银河宇宙线、太阳爆发活动产生的高能粒子及其直接轰击月球表面产生的次级粒子。研究表明, 月表银河宇宙线所产生的每天辐射剂量当量比国际空间站内每天所遭受辐射剂量当量高约2.6倍^[4], 太阳质子事件高能粒子可直达探月航天器及月表, 引起航天器相关电子设备产生故障, 影响航天员的生命安全^[5-6]。“电”指的是剧烈的电磁辐射和月表电场。太阳强电磁辐射会增强月球光电流3~10倍。当月球处于地球磁尾等离子体片区域时, 月表电位将从平时-100 V以内大幅上升, 最高可达到-1 kV^[7], 此时探月航天器表面充电/放电将加剧, 可引发电子系统的故障。“尘”指的是月尘及其迁移运动。

收稿日期: 2022-09-21 修回日期: 2023-06-12

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFE0202100); 国家重点实验室专项基金; 中国科学院重点部署项目(ZDRE-KT-2021-3); 国家自然科学基金(41731070, 42074202, 42188101, U2106201); 中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDJ-SSW-JSC028)

月球表面电位变化将影响到近月空间悬浮月尘分布。在静电作用下,月尘可迁移到几千米甚至100 km高度^[8]。由于带电月尘具有强附着性和研磨性,可导致航天器和探月设备仪器黏附污染、设备阻塞、密封失效、材料磨损、散热退化、仪表错误等效应,严重影响系统的可靠性^[9]。细小的月尘还会附着在登月航天员的航天服表面,被带回登月舱内部,甚至直接渗透进航天服中,对航天员的健康产生极大损害^[10]。

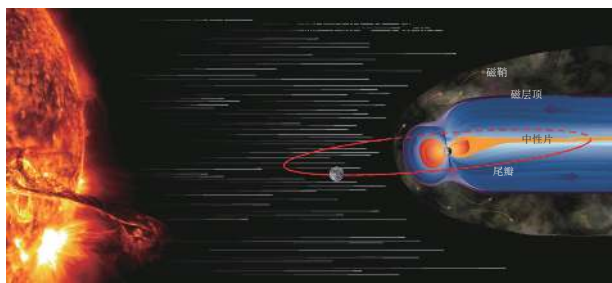


图1 日-地-月关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Sun-Earth-Moon relationships

月球空间天气涉及了太阳引发的日-地-月之间多种尺度、多种要素、多种机制的相互作用和物理过程。前期国内外的月球探测,如美国“阿波罗”(Apollo)及后续计划、中国“嫦娥工程”、日本“月亮女神号”(Kaguya)等,开启和促进了对月球空间环境的研究。由于缺乏对月球空间环境长期、综合、全面的探测数据,国际上对日-地-月空间环境扰动耦合的研究仍处于萌芽和探索阶段。开展日-地-月空间环境扰动耦合监测和研究,既是重要的前沿科学问题,又是服务地-月空间探索的重大预报应用问题。

1 月球空间天气探测历史

20世纪50年代末—70年代初,在美苏两国冷战的背景下,开展了以月球探测为中心的美苏太空竞赛,掀起了人类第一次月球探测高潮,并于1969年实现了人类首次载人登月。1958—1976年,美国和苏联共发射了108个月球探测器,成功或部分成功有52个。在1976年以后的18年期间,探测进入了宁静期,无任何成功的月球探测活动。随着深空探测技术发展和月球科学研究进入新阶段,1986年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)开始构思重返月球计划,并于1994年和1998年分别成功发射了“克莱门汀号”(Clementine)和“月球勘探者号”(Lunar Prospector, LP)月球探测器,奏响了人类重返月球、建立月球基地的序曲,掀起了第二次探月热潮。这次探月热潮参与国达十几个国家,如中国、美国、俄罗斯、日本、英国、德国、巴西、印

度等,部分国家也宣布了各自的登月计划^[11]。中国在2004年正式开展探月工程——“嫦娥工程”,2020年已完成了无人月球探测阶段,目前正向载人登月迈进,最终将建立月球基地^[12-13]。在以往的一些探月及登月任务过程中,搭载过粒子辐射探测器、等离子体探测器、月尘探测器、磁场探测器等空间环境探测设备,获取了大量宝贵的月球空间环境探测数据,并孕育出一批丰硕的科研成果。

在等离子体环境探测方面,Apollo 12~15计划均对月表的等离子体环境进行了探测,等离子体相关仪器共有3种:CPLEE(Charged Particle Lunar Environment Experiment)、SWS(Solar Wind Spectrometer)和SIDE(Superthermal Ion Detector)^[14-15]。这些早期探测项目形成主要的月球等离子体环境认知,即太阳风等离子体打到月表被吸收,在后端形成等离子体尾迹^[16-17]。对月球等离子体环境认知的迅速提升主要来自于1994年“风”(Wind)卫星实施的飞越月球探测^[18-20]。进入21世纪以来,随着中国“嫦娥一号/二号”、日本“月亮女神号”、印度“月船号”(Chandrayaan)、美国“阿尔忒弥斯号”(Acceleration, Reconnection, Turbulence, and Electrodynamics of Moon's Interaction with the Sun, ARTEMIS)卫星发射,对月球等离子体环境开展了更为细致深入的探测,揭示了月球附近更为丰富的等离子体现象^[21-22]。

在粒子辐射探测方面,1998年美国发射的LP卫星在月球极地轨道100、50和30 km的高度飞行,获得了月球轨道中子和伽马射线探测的结果,并利用这些结果寻找水和计算月球表面的铁元素丰度,发现只有月球南极的舒梅克(Shoemaker)环形山、凯布斯(Cabeus)陨石坑以及北极的罗兹德斯特温斯基U(Rozhdestvensky U)陨石坑含有大量的氢聚集,这些数据表明两极可能存在水冰^[23-24];2009年美国发射了“月球勘测轨道器”(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO),其搭载的辐射效应宇宙射线望远镜(Cosmic Ray Telescope for the Effects of Radiation, CReTER),对月球轨道电离总剂量以及剂量率进行估计,并首次观测到了月球反照质子^[25];2018年印度发射了“月船1号”(Chandrayaan 1)探测器,上面搭载的辐射剂量探测器是一个小型的剂量谱仪,用来监测运行轨道的辐射环境,对剂量率和通量情况进行长期观测,获得在距月表20 000~30 800 km区域,1~10 MeV电子以及17.5~200 MeV质子平均剂量率为12.76 μGyh^{-1} ,平均通量为3.14 $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ^[26]。

在月尘探测方面,早期月尘观测来自于Apollo时

期看到的月球地平辉光现象^[27-29]。地平辉光现象发生在晨昏线附近,被认为是由漂浮尘埃颗粒对太阳光进行前向散射造成的。月球地平辉光现象可分为两类:一类是“勘测者号”(Surveyor)任务看到的距离月面高度小于1 m的辉光现象,对应的尘埃尺寸约为5 μm ;另一类是Apollo任务看到的高度可达100 km的辉光现象,对应的尘埃尺寸约为0.1 μm ,月面附近尘埃数密度可达 10^4 m^{-3} 。然而,后续Clementine和LRO卫星的遥感观测并没有看到类似地平辉光现象,得到的尘埃密度也比Apollo时期低4个量级^[30-31]。最近LADEE(Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer)卫星的原位观测结果也比Apollo结果小2个量级^[32],不过奇怪的是,这些尘埃信号与高度没有相关性。Xie等^[33]利用ARTEMIS太阳风数据,证明了LADEE尘埃探测器的电流信号受到月表反射太阳风粒子的污染,因而实际尘埃密度要比 10^2 m^{-3} 还要小,这与Clementine和LRO的探测结果相吻合。这些结果表明,月球附近只存在稀薄的尘埃外逸层,而没有地平辉光现象所对应的浓密尘埃云。因此,月面尘埃环境到底是什么样的以及Apollo时期地平辉光现象是如何形成的目前仍然是个谜。

在月球微磁层探测方面,利用月球磁场、月球等离子体、中性原子等探测数据,直接或间接验证了月球微磁层的存在。月球微磁层早期观测证据来自LP卫星, Lin等^[34]首先在Imbrium磁异常区看到了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^[35]发现这种激波结构更多地发生在离子回旋半径比较小的时候。最近, Halekas等^[26]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,并伴随着一些特殊的观测条件,如低高度、高太阳天顶角以及小离子惯性长度^[36]。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体空腔,或者是这个空腔的高度非常低,无法被绕月飞行的航天器看到。另一方面,日本Kaguya和印度Chandrayaan 1飞船在一些强的磁异常区都观测到大量反射的太阳风质子^[37-38]。与此同时, Chandrayaan 1上还搭载了一个能量中性原子(Energetic Neutral Atom, ENA)探测器,可以探测太阳风打到月面反射回来的中性原子。通过ENA探测,发现在这些强磁异常区的ENA发射率会大大降低,在ENA图像上留下一个局部的空腔^[39-40],从而间接证实了与微磁层相关的等离子体空腔的存在。这些观测结构表明,至少在一些强的磁异常区太阳风会被有效

遮挡而形成微磁层。

中国在无人探月阶段已发射过“嫦娥一号”~“嫦娥五号”探月卫星,其中“嫦娥一号”“嫦娥二号”“嫦娥四号”卫星搭载了空间环境探测器,“嫦娥三号”搭载了月尘测量仪。基于“嫦娥一号/二号”太阳风离子探测器的探测数据分析,首次获得了近月轨道的太阳风双离子流现象^[41]和月球外逸层 H^{2+} 信息^[42],也获得月表离子散射与加速以及拾起离子、太阳风离子与磁异常相互作用等相关探测结果^[43-45]。基于“嫦娥一号”太阳风离子探测器,联合日本Kaguya卫星数据,分析研究了月球尾迹区中地球弓激波的不规则变化^[46]。基于“嫦娥三号”着陆器上月尘测量仪SQCM(Sticking Quartz Crystal Microbalance)的探测数据,发现在距离月面190 cm高度处月尘的年平均积累量约为 $21.4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ^[47]。“嫦娥四号”月球着陆器中子及辐射剂量探测仪(Lunar Lander Neutron and Dosimetry, LND)首次对月球表面的辐射剂量率开展了主动测量,获得了月球上的银河宇宙射线辐射剂量当量比国际空间站上的宇航员所受到的要高出2.6倍,是地球表面的200~300倍的结论^[4]。基于“嫦娥四号”巡视器搭载的中性原子探测仪(Advanced Small Analyzer for Neutrals, ASAN)数据,不仅实现了月球微磁层的首次月面观测,同时也揭示了微磁层在月面与太阳风相互作用中起到的作用、形成条件和内部结构等^[48-49]。

2 月球空间天气科学问题和研究进展

经过60多年的探测,人类对月球空间天气的认识及预报取得了很大进步,但面对未来人类再次登月,甚至在月球上建立基地,目前所具备的月球空间天气保障服务能力还远远不够,还有很多关键科学问题需要解决,需要进一步探测和研究。

2.1 月球空间天气关键科学问题

1) 月球空间环境分布和日-地-月环境相互作用

月球空间环境是太阳电磁辐射、太阳等离子体(太阳风)、太阳高能粒子、银河宇宙线、地球磁尾等离子体(地球风)与月球相互作用的结果,包含了月球空间磁场、电场、等离子体、高能粒子、月尘等空间环境要素的分布和变化。

针对探月活动所需的月球空间环境保障,不仅需要开展月球空间环境各要素全球分布普查探测,了解月球空间环境整体结构和分布特征,还需对部分关键区域(局地)进行精细化探测,如载人登月地点、月球科研站位置,研究月表局地空间环境区域化分布特征,如不同区域月壤分布对银河宇宙线次级粒子分布

影响、月球坑对月表电位及月尘分布影响等。

月球空间环境(全球和局地)分布并不是固定的,不仅受月球自转影响,也受月球公转(穿越不同区域等离子体)影响,还受太阳爆发活动和地球磁尾扰动影响。因此,需研究月球空间环境随月球地方时变化过程,研究月球穿行于太阳风、地球磁鞘、地球磁尾(等离子体片或尾瓣)过程中月球空间环境变化过程,研究太阳日冕物质抛射、太阳高能粒子事件、太阳耀斑爆发活动以及地球磁尾扰动对月球空间环境的影响。

2) 月球空间天气准确预报

月球空间天气是受太阳活动以及地球空间环境影响产生的月球空间环境的剧烈变化。要实现月球空间天气准确预报,既需解决各种情况下太阳日冕物质抛射、太阳高能粒子事件、太阳耀斑爆发活动以及地球磁尾等离子体片与月球空间环境各要素分布变化之间的定量关系,又需知道太阳日冕物质抛射、太阳高能粒子事件能否到达月球、何时到达月球以及月球何时穿越地球磁尾等离子体片,还需知道将要到达月球的日冕物质抛射具体等离子体和磁场参数、太阳高能粒子事件粒子能谱信息、太阳耀斑光谱信息以及月球轨道上地球磁尾等离子体片具体等离子体和磁场参数。

目前,日月之间上游太阳风、高能粒子实时连续监测主要依靠日地连线拉格朗日L1点位置附近探测卫星,如ACE卫星、DSCOVR卫星利用L1点观测数据,可以提前预知将要到达月球的日冕物质抛射、太阳高能粒子事件情况,不过时间提前量基本在1h以内。为实现对月球空间环境更长时间提前量预报,需要依靠太阳成像数据,利用太阳全日面、活动区综合观测数据,预测太阳何时、何地将要爆发多强等级的太阳日冕物质抛射、太阳高能粒子事件或太阳耀斑,预测太阳日冕物质抛射和太阳高能粒子事件在行星际空间如何传播以及日冕物质抛射在行星传播过程中可能所产生的太阳高能粒子事件,如图2所示,以解决太阳日冕物质抛射、太阳高能粒子事件是否能到达月球、何时到达月球、到达月球时有多强等问题,进而预报太阳爆发活动对月球空间环境各要素产生的影响。

针对月球轨道地球磁尾等离子体片,目前没有实时连续监测卫星,并且地球磁尾等离子体片分布随着地球本身自转及上游太阳风而变化。因此,需要先解决日地之间的耦合过程,实现地球磁尾等离子体片预报,再结合月球轨道预报,实现月球是否将穿越地球磁尾等离子体片、何时穿越、穿越过程所面临等离子体及磁场等预报,最终预报地球磁尾等离子体片对月

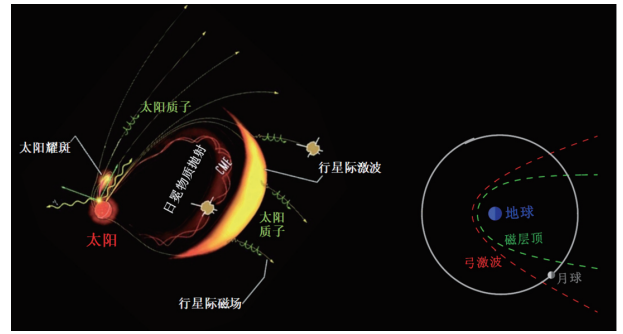


图2 太阳爆发活动及日-地-月关系示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solar eruptions and Sun-Earth-Moon relationships

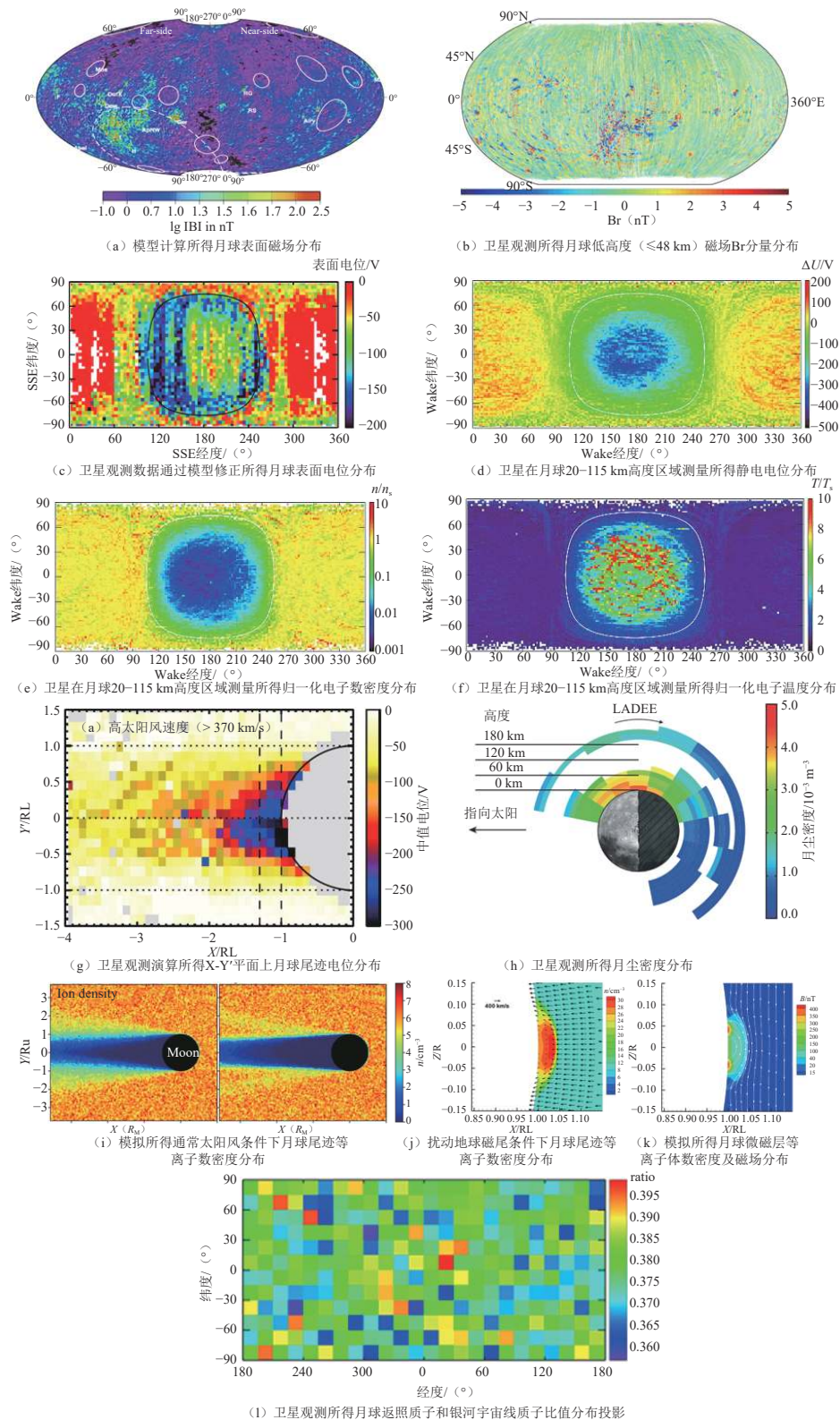
球空间环境各要素产生的影响。

2.2 月球空间天气研究进展

经过60多年月球探测和研究,目前已了解月球空间环境基本分布情况,获得了月球各空间环境要素平均或一定条件下的分布结果,如图3所示。基于探月卫星实测数据,获得了某些高度月球磁场、月球电位、月球电子数密度平均分布结果,推演出了月表磁场、月表电位分布结果,也构建了月球磁场分布及电位分布模型,服务于全月球空间环境数值模拟^[49-52]。对于月球全球等离子体尾迹和月球微磁层结构,探月卫星覆盖区域有限或穿越月球微磁层次数有限,只能提供部分区域分布结果,但通过数值模拟,也给出了月球全球等离子体尾迹和月球微磁层等离子体及磁场分布结果^[53-54]。探月卫星也获得了月尘空间平均分布结果以及月球反照质子和银河宇宙线质子比值分布结果^[8,55]。

太阳爆发活动或月球穿越磁尾等离子体片所引发月球空间天气现象或月球空间环境明显改变,目前主要处于研究阶段。主要利用数值模型,结合一些事例,解释其物理变化过程,也用于验证模型有效性。例如,Rasca^[56]分析太阳日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)对月球等离子体尾迹的影响;Halekas^[57]分析太阳高能粒子事件对月表电位的影响;Vaverka^[58]分析月球穿越地球磁尾时月表电位和月尘变化。针对太阳质子事件和银河宇宙线对月表次级粒子的影响,可依据观测或模型计算所得太阳质子事件和银河宇宙线能谱,结合月壤分布,利用GEANT4软件仿真计算获得^[59]。

针对引发月球空间环境变化的太阳爆发活动预报,主要借鉴日-地空间环境预报相关监测、经验模型、理论模型,如日-地连线上L1点处ACE卫星和DSCOVR卫星实时太阳风和太阳高能粒子观测、美国空间天气预报中心(Space Weather Prediction Center, SWPC)已业务化运行的WSA-ENLIL太阳风预报模



注: R_M 为月球半径。

图 3 月球空间环境探测、反演或模拟结果

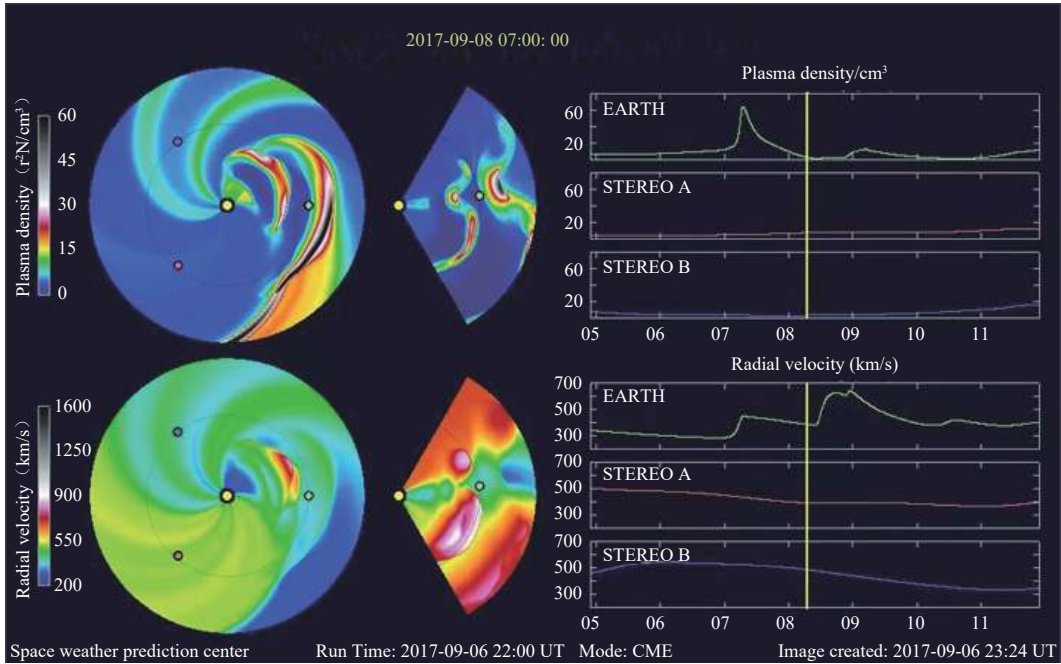
Fig. 3 Detection, inversion or simulation results of lunar space environment

型^[60-62] (如图4 (a) 所示)、中国空间环境预报中心 (Space Environment Prediction Center, SEPC) 业务化

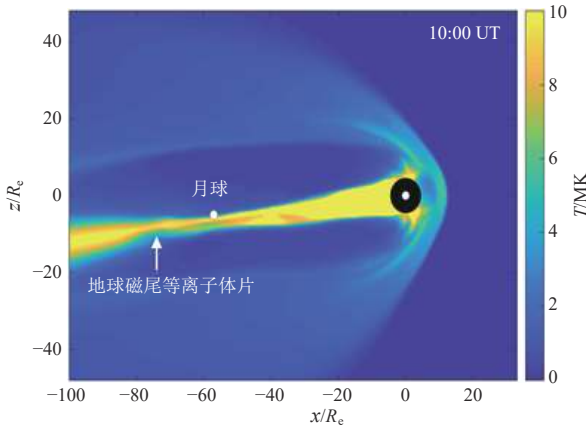
运行的WSA-HAF太阳风预报模型^[60,63-65]、美国IPATH太阳质子事件日球层加速和传输预报模型^[66]。针对月球

轨道地球磁尾等离子体和磁场预报, 主要也是依靠太阳风和地球磁层相互作用理论模型, 如美国已业务化运行的BAT-R-US模型^[67]、美国CCMC (Community Coordinated Modeling Center) 运行的OpenGGCM模

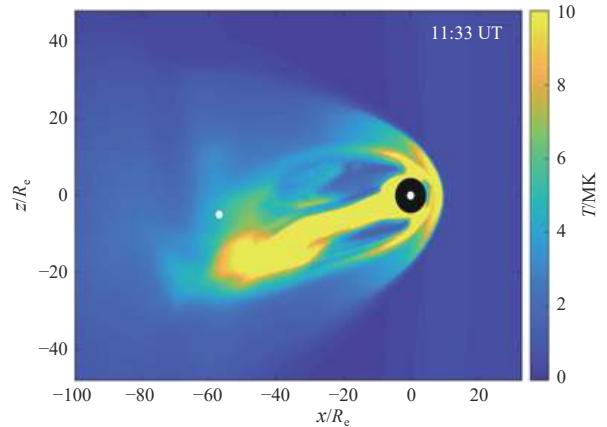
型^[68] (如图4 (b) 所示)、中国自主研发的PPMLR-MHD模型^[69]。此外, 也利用一些磁层顶统计模型开展月球穿越磁层顶预报服务, 如Shue 等模型和Lin等模型^[70-71]。



(a) WSA-ENLIL模型模拟CME行星际传输过程



(b) OpenGGCM模型模拟太阳风激波前在x-z坐标系下地球磁尾等离子体片温度变化



(c) OpenGGCM模型模拟太阳风激波后在x-z坐标系下地球磁尾等离子体片温度变化

注: R_e 为地球半径。

图4 WSA-ENLIL模型模拟CME行星际传输过程和OpenGGCM模型模拟太阳风激波前和激波后地球磁尾等离子体片变化^[53]

Fig. 4 A CME interplanetary transmission process simulated by WSA-ENLIL model and the variations of magnetotail plasma sheet during pre-shock and post-shock simulated by OpenGGCM model^[53]

上述部分模型曾投入到以往探月工程任务月球空间环境保障中, 提供月球轨道太阳风、月球轨道太阳高能粒子事件、月球穿越地球磁层顶等相关预报。

2.3 月球空间天气探测和研究需求

月球空间天气涉及了太阳引发的日-地-月之间多种尺度、多种要素、多种机制的相互作用和复杂的物

理过程。目前对月球空间环境整体平均分布有一定了解, 但对太阳爆发活动、月球轨道磁尾等离子体片如何量化影响月球空间环境还比较有限, 主要依靠一些事例和数值模型, 对月球局地空间环境分布变化了解的更少。因此, 需要继续开展并加强月球空间天气探测和研究。

1) 加强对未来载人登月、月球科研站、月球基地等区域空间环境探测和研究, 深入了解月球局地空间环境分布变化特征及其与太阳活动和月球轨道地球磁尾之间的关系。

2) 建立月基的空间天气关键要素监测站, 快速、实时获取太阳活动、地球磁层扰动大尺度观测数据, 与局地月球空间环境观测形成最小化监测单元, 助力于日地月空间环境耦合关系研究和月球空间环境预报。

3) 发展月球空间环境预报技术, 完善或开发月球空间环境预报模型, 形成具备精细化、定制化的月球空间环境保障能力。

3 月球空间天气探测未来发展建议

稳定的天体地质构造、与地球合适的距离、无稠密大气和全球磁场, 使得月球成为日地月空间天气监测和研究的天然优良实验室。在月球建立月球空间天气监测站, 开展月表局地环境、太阳活动、地球磁层大尺度成像等实时、综合、长期的探测, 一方面获取日地月空间天气因果链关键数据, 揭示月球局地环境与太阳活动、地球磁尾活动之间的关系, 提升对日地月空间天气基本过程的认识, 另一方面构建月球科研站空间天气保障监测站基本型, 开发相关空间天气预报模型, 提升月球探测空间天气保障的及时性、针对性和准确性。

月球空间天气监测站由监测系统、科学研究系统以及建模与预报系统组成, 各系统组成见图5。

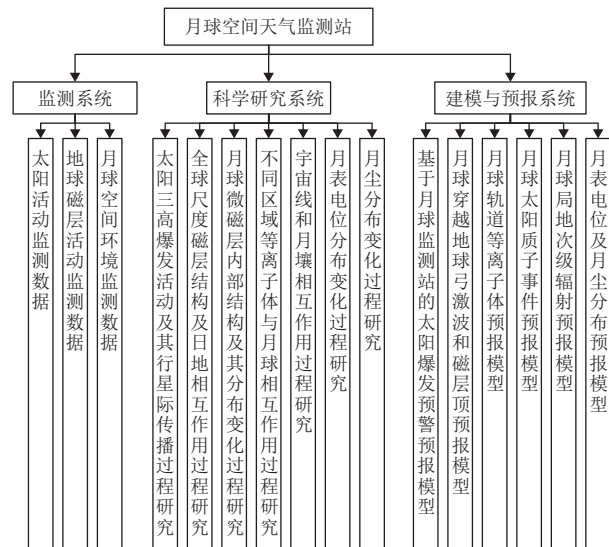


图 5 月球空间天气监测站组成

Fig. 5 Composition of Moon-based space weather monitoring station

监测系统将对太阳活动、地球磁层活动以及月球空间环境实时、综合、长期的监测, 提供太阳

光球图像、光球磁图、光球视向速度图、太阳伽马和X射线流量、太阳极紫外和低频射电流量和频谱信息等太阳活动监测数据, 提供地球磁层顶和南北极尖区软X射线遥感成像地球活动监测数据, 提供月球轨道太阳风、地球磁鞘、地球磁尾等离子体及磁场监测数据, 提供月表银河宇宙线、太阳质子事件、高能粒子与月壤相互作用所产生的次级粒子、月表等离子体、月表电位、月尘等月球空间环境监测数据, 为科学研究系统提供日地月空间天气因果链关键数据, 为建模和预报系统提供建模数据以及预报模型驱动数据。

基于监测系统所得数据, 科学研究系统将开展太阳“三高”(高能量、高温、高速)爆发活动及其行星际传播过程研究、全球尺度磁层结构分布变化过程研究、月球微磁层内部结构及其分布变化过程研究、不同区域等离子体(太阳风、地球磁鞘、地球磁层)与月球相互作用过程研究、宇宙线(银河宇宙线和太阳质子事件)与月壤相互作用过程研究、月表电位分布变化过程研究、月尘分布变化过程研究等等, 用于揭示太阳爆发活动、月球局地空间天气、日-地-月空间环境耦合等相关的科学问题, 提升人类对月球局地环境以及日-地-月空间环境耦合机制及过程的认识, 为建模与预报系统提供理论指导。

建模和预报系统将以监测系统提供的数据为基础, 以科学研究系统提供的理论依据为指导, 构建基于月球监测站的太阳爆发预警预报模型、月球穿越地球弓激波和磁层顶预报模型、月球轨道等离子体预报模型、月球太阳质子事件预报模型、月球局地次级辐射预报模型、月表电位及月尘分布预报模型, 实现基于月球监测站为主要驱动数据的月球空间天气预报保障能力, 提升探月任务空间天气保障的及时性、针对性和准确性, 以更好满足未来探月任务空间环境预报保障服务的需要。

4 结束语

本文介绍了月球空间天气基本要素及其预报的重要性, 回顾了国内外空间天气探测和研究进展, 梳理了月球空间天气关键科学问题及预报应用问题。针对未来月球任务规划, 提出了月球空间天气监测站构想及其具体的科学目标, 介绍了其监测系统、科学研究系统以及建模与预报系统具体组成及相互关系。月球空间天气监测站将有助于提升对日-地-月空间天气基本过程的认识, 提高对未来月球空间环境预报保障服务能力。

参 考 文 献

- [1] SAMUEL P M. National space weather program: strategic plan [R]. Washington, DC: National Space Weather Program Council, 2010.
- [2] 刘四清, 罗冰显. 全球空间天气路线图及对中国的启示[J]. *空间科学学报*, 2019, 39(3): 275-282.
LIU S Q, LUO B X. Global space weather roadmap and its enlightenment to China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, 39(3): 275-282.
- [3] 史全岐, 宗秋刚, 乐超, 等. 月球表面及空间环境对太阳风与地球风的响应[J]. *中国科学基金*, 2022, 36(6): 871-879.
SHI Q Q, ZONG Q G, YUE C, et al. Response of the lunar space environment to solar wind and Earth wind[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(6): 871-879.
- [4] ZHANG S Y, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, YU J, et al. First measurements of the radiation dose on the lunar surface[J]. *Science Advances*, 2020, 6(39): eaaz1334.
- [5] CUCINOTTA F A, DURANTE M. Cancer risk from exposure to galactic cosmic rays: implications for space exploration by human beings[J]. *Lancet Oncology*, 2006(7): 431-435.
- [6] REEDY R C. Solar particle events and their radiation threats[C]// Proceedings of Conference on the High Energy Radiation Background in Space. [S. l.]: IEEE, 1997: 41-44.
- [7] HALEKAS J S, DELORY G T, LIN R P, et al. Lunar Prospector observations of the electrostatic potential of the lunar surface and its response to incident currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: A09102.
- [8] HORANYI M, SZALAY J R, KEMPF S, et al. A permanent asymmetric dust cloud around the Moon[J]. *Nature*, 2015, 522(7556): 324-326.
- [9] 张森森, 王世杰, 李雄耀, 等. 月尘的性质及危害评述[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2013, 38(2): 339-350.
ZHANG S S, WANG S J, LI X Y, et al. Properties and harmfulness of lunar dust: a review[J]. *Earth Science—Journal of China University Geosciences*, 2013, 38(2): 339-350.
- [10] 马加炉, 王怡灵, 谢广辉, 等. 月尘对登月服的影响及研究进展[J]. *载人航天*, 2016, 22(4): 445-451.
MA J L, WANG Y L, XIE G H, et al. Effect and research progress of lunar dust on lunar EVA space suits[J]. *Manned Spaceflight*, 2016, 22(4): 445-451.
- [11] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
OUYANG Z Y. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.
- [12] 裴照宇, 王琼, 田耀四. 嫦娥工程技术发展路线[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2015, 6(2): 99-110.
PEI Z Y, WANG Q, TIAN Y S. Technology roadmap for Chang'E program[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015, 6(2): 99-110.
- [13] 庞之浩. 中国嫦娥探月工程之路回眸[J]. *科学*, 2021, 73(4): 1-6.
PANG Z H. Overview of China's Chang'E lunar exploration missions[J]. *Science*, 2021, 73(4): 1-6.
- [14] NEUGEBAUER M, SNYDER C W, CLAY D R, et al. Solar wind observations on the lunar surface with the Apollo 12 ALSEP[J]. *Planetary and Space Science*, 1972, 20: 1577-1591.
- [15] CLAY D R, GOLDSTEIN B E, NEUGEBAUER M. Lunar surface solar wind observations at the Apollo 12 and Apollo 15 sites[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80: 1751-1760.
- [16] COLBURN D S, CURRIE R G, MIHALOV J D, et al. Diamagnetic solar-wind cavity discovered behind Moon [J]. *Science*, 1967, 158: 1040-1042.
- [17] NESS N F, BEHANNON K W, TAYLOR H E, et al. Perturbations of the interplanetary magnetic field by the lunar wake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1968, 73(11): 3421-3440.
- [18] OGILVIE K W, STEINBERG J T, FITZENREITER R J, et al. Observations of the lunar plasma wake from the WIND spacecraft on December 27, 1994[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 10: 1255-1258.
- [19] OWEN C J, LEPPING R P, OGILVIE K W, et al. The lunar wake at 6.8 RL: WIND magnetic field observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(10): 1263-1266.
- [20] FARRELL W M, FITZENREITER R J, OWEN C J, et al. Upstream ULF waves and energetic electrons associated with the lunar wake: detection of precursor activity[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23: 1271-1274.
- [21] HALEKAS J S, SAITO Y, DELORY G T, et al. New views of the lunar plasma environment[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59(14): 1681-1694. (14): 1681-1694.
- [22] HALEKAS J S, POPPE A R, MCFADDEN J P, et al. Evidence for small-scale collision-less shocks at the moon from Artemis[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41: 7436-7443.
- [23] MAURICE S, FELDMAN W C, LAWRENCE J, et al. High energy neutrons from the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(E8): 20365.
- [24] SANIN A B, MITROFANOV I G, LITVAK M L, et al. Testing lunar permanently shadowed regions for water ice: LEND results from LRO [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: E00H26.
- [25] MAZUR J E, CRAIN W R, LOOPER M D, et al. New measurements of total ionizing dose in the lunar environment[J]. *Space Weather-The International Journal of Research & Applications*, 2011, 9(7): 1-12.
- [26] DACHEV T P, TOMOV B T, MATVIICHUK Y N, et al. An overview of RADOM results for earth and moon radiation environment on Chandrayaan-1 satellite[J]. *Advance in Space Research*, 2011, 48(5): 779-791.
- [27] RENNILSON J J, CRISWELL D R. Surveyor observations of lunar horizon glow[J]. *The Moon*, 1974, 10: 121-142.
- [28] MCCOY J E, CRISWELL D R. Evidence for a high altitude distribution of lunar dust[J]. *Proceedings Lunar Science Conference*, 1974, 5: 2991-3005.
- [29] MCCOY J E. Photometric studies of light scattering above the lunar terminator from Apollo solar corona photography[J]. *Proceedings Lunar Science Conference*, 1976, 7: 1087-1112.
- [30] 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*, 2014, 119: 2548-2567.
- [31] 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.
- [32] SZALAY J R, HORÁNYI M. The search for electrostatically lofted grains above the Moon with the Lunar Dust Experiment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 5141-5146.

- [33] XIE L H, ZHANG X P, ZHENG Y C, et al. Solar wind-generated current in the Lunar dust experiment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43: 3662-3669.
- [34] 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: 1480-1484.
- [35] 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: L08106.
- [36] 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.
- [37] 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: L03202.
- [38] SAITO Y, YOKOTA S, ASAMURA K, 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: 265-303.
- [39] 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: L05103.
- [40] VORBURGER A, WURZ P, BARABASH S, et al. Energetic neutral atom observations of magnetic anomalies on the lunar surface[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 117: A07208.
- [41] KONG L G, WANG S J, WANG X Y, et al. In-flight performance and preliminary observational results of Solar Wind Ion Detectors (SWIDs) on Chang'E-1[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 62: 23-30.
- [42] WANG X D, ZONG Q G, WANG J S, et al. Detection of $m/q = 2$ pickup ions in the plasma environment of the Moon: the trace of exospheric H_2^+ [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: L14204.
- [43] WANG X D, BIAN W, WANG J S, et al. Acceleration of scattered solar wind protons at the polar terminator of the Moon: results from Chang'E - 1/SWIDs[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L07203.
- [44] WANG X Q, CUI J, WANG X D, et al. The Solar wind interactions with lunar magnetic anomalies: a case study of the Chang'E-2 plasma data near the serenitatis antipode[J]. *Advance in Space Research*, 2012, 50: 1600-1606
- [45] ZHONG J, XIE L, ZHANG H, et al. Chang'E-1 observations of pickup ions near the Moon under different interplanetary magnetic field conditions[J]. *Planetary and Space Science*, 2013, (79-80): 56-63.
- [46] NISHINO M N, WANG X D, FUJIMOTO M, et al. Anomalous deformation of the Earth's bow shock in the lunar wake: joint measurement by Chang'E-1 and SELENE[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59: 378-386.
- [47] LI D T, WANG Y, ZHANG H, et al. In-situ measurements of lunar dust at the Chang'E - 3 landing site in the northern Mare Imbrium[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124: 2168-2177.
- [48] XIE L H, ZHANG A B, LI L, et al. Chang'E-4 energetic neutral atom observation reveals new features about the Solar wind-Moon interaction[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, 42(1): 11-24.
- [49] RAVAT D, PURUCKER M E, OLSEN N. Lunar magnetic field models from Lunar Prospector and SELENE/Kaguya along-track magnetic field gradients[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2020, 125: 2019JE006187.
- [50] HALEKAS J, SAITO Y, DELORY G, et al. New views of the lunar plasma environment[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, 59(14): 1681-1694.
- [51] HALEKAS J S, BALE S D, MITCHELL D L, et al. Electrons and magnetic fields in the lunar plasma wake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110: A07222.
- [52] XU S, POPPE A R, HALEKAS J S, et al. Mapping the lunar wake potential structure with ARTEMIS data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124: 3360-3377.
- [53] RASCA A P, FATEMI S, FARRELL W M, et al. A double disturbed lunar plasma wake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2021, 126: e2020JA028789.
- [54] XIE L, LI L, ZHANG Y, et al. Three dimensional Hall MHD simulation of lunar minimagnetosphere: General characteristics and comparison with Chang'E-2 observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120: 6559-6568.
- [55] WILSON J K, SPENCE H E, KASPER J, et al. The first cosmic ray albedo proton map of the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: E00H23.
- [56] RASCA A P, FATEMI S, FARRELL W M. Modeling the Lunar wake response to a CME using a hybrid PIC model[J]. *The Planetary Science Journal*, 2022, 3: 1.
- [57] HALEKAS J S, DELORY G T, LIN R P, et al. Lunar surface charging during solar energetic particle events: Measurement and prediction[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: A05110.
- [58] VAVERKA J, RICHTEROVÁ I, PAVLU J, et al. Lunar surface and dust grain potentials during the Earth's magnetosphere crossing[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 825(2): 1-10.
- [59] 蔡明辉, 杨涛, 韩瑞龙, 等. 月球表面次级中子辐射环境仿真研究[J]. *航天器环境工程*, 2021, 38(3): 328-332.
- CAI M H, YANG T, HAN R L, et al. Simulation of induced neutron radiation environment on lunar surface[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2021, 38(3): 328-332.
- [60] ARGE C N, LUHMANN J G, ODSTRČIL D, et al. Stream structure and coronal sources of the solar wind during the May 12th, 1997 CME[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66: 1295-1309.
- [61] ODSTRČIL D. Modeling 3-D solar wind structure[J]. *Advances in Space Research*, 2003, 32: 497-506.
- [62] MAYS M L, TAKTAKISHVILI A, PULKKINEN A, et al. Ensemble modeling of CMEs using the WSA-ENLIL+Cone model[J]. *Solar Physics*, 2015, 290(6): 1775-1814.
- [63] HAKAMADA K, AKASOFU S I. Simulation of three-dimensional solar wind disturbances and resulting geomagnetic storms[J]. *Space Science Reviews*, 1982, 31(1): 3-70.
- [64] AKASOFU S I, FRY C D. A First-generation geomagnetic storm prediction scheme[J]. *Planetary Space Science*, 1986, 34: 77-92.
- [65] FRY C D, SUN W, DEEHR C S, et al. Improvements to the HAF solar wind model for space weather predictions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(A10): 20985-21002.
- [66] HU J, LI G, AO X, et al. Modeling particle acceleration and transport at a 2-D CME-driven shock[J]. *Journal of Geophysical Research: Space*

- Physics, 2017, 122: 10, 938-10963.
- [67] GOMBOSI T. SWMF/BATS-R-US, model item, openGMS[EB/OL]. (2020)[2022-09-21]. <https://geomodeling.njnu.edu.cn/modelItem/25c704c2-8253-4c5e-a597-193c218c353f>.
- [68] JOACHIM R, TIMOTHY F R. OpenGGCM, model item, OpenGMS[EB/OL]. (2020-07-02)[2022-09-21]. <https://geomodeling.njnu.edu.cn/modelItem/10f31acb-b0c5-456b-922a-4b96c6ec1fd4>.
- [69] HU Y, GUO X, WANG C. On the ionospheric and reconnection potentials of the Earth: results from global MHD simulations[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: A07215.
- [70] SHUE J H, SONG P, RUSSELL C T, et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(A8): 17691-17700.
- [71] LIN R L, ZHANG X X, LIU S Q, et al. A three - dimensional asymmetric magnetopause model[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115: A04207.

作者简介:

罗冰显(1981-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:空间环境预报研究和航天工程任务保障服务等。本文通信作者。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号(100190)

电话:(010)62586421

E-mail:luobx@nssc.ac.cn

Progress in Lunar Space Weather Detection and Research

LUO Bingxian^{1,2,3,4}, ZHANG Xianguo^{1,2,3,5}, SUN Tianran^{1,3}, BAI Xianyong^{4,6}, WEI Fei^{2,3,5}, LIN Ruilin^{1,2,3}, LI Lei^{1,3}, ZHANG Shenyi^{2,3,5}, KONG Linggao^{2,3,5}, WANG Xinyue^{2,3,5}, XIE Lianghai^{1,3}, PENG Songwu^{2,3,5}, TANG Binbin^{1,3}, ZHANG Yingjie^{1,3}, XU Qiuyu^{1,3}, LENG Shuang^{2,3,5}, FENG Pengyuan^{2,3,5}, SU Yang⁷, GAN Weiqun⁷, FENG Li⁷, TIAN Hui^{1,3,8}, CHEN Linjie^{1,3}, YAN Yihua^{1,3}, SONG Yongliang^{4,6}, LIU Siqing^{1,2,3,4}, DENG Yuanyong^{4,6}

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

2. Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190,

China; 3. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190; China; 4. University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049, China; 5. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China; 6. National

Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 7. Purple Mountain Observatory,

Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China; 8. School of Earth and Space Sciences,

Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The stable celestial geological structure, the suitable distance from the Earth to the Moon, and no dense atmosphere and global magnetic field make the Moon a natural and excellent laboratory for the monitoring and research of the Sun-Earth-Moon space weather. This paper reviews the progress of lunar space weather detection and research, and surveys the key scientific problems of lunar space weather and the problems of its prediction application, proposes the concept of the Moon-based space weather monitoring station, set up the specific scientific objectives of the monitoring station, and finally introduces its three major systems and the relationships among them, including the monitoring system, the scientific research system, and the modeling and forecasting system. The establishment of a Moon-based space weather monitoring station is of great scientific significance for studying the mechanism of solar eruptions, the coupling of the Sun to the Earth and the Moon, and the local variations of the Moon's environment. It will also promote the development of lunar space weather modeling and prediction technologies and improve the capability in providing space environmental safeguard services for future lunar explorations.

Keywords: lunar space weather; lunar space weather detection and research; moon-based space weather monitoring station; lunar space weather prediction

Highlights:

- The progress of lunar space weather detection and research is reviewed.
- The key scientific and applied issues for lunar space weather are surveyed, including the distributions and variations of lunar space weather, and the accurate prediction of lunar space weather.
- The concept and the scientific objectives of the Moon-based space weather monitoring station are proposed, and its monitoring system, scientific research system, modeling and forecasting system, and the relationships among these systems are introduced.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]