中国月球及深空空间环境探测

王 赤^{1,2},张贤国^{1,3,4},徐欣锋¹,孙越强^{1,2,3,4}
 (1.中国科学院国家空间科学中心,北京 100190;
 2.中国科学院大学,北京 100049;
 3.天基空间环境探测北京市重点实验室,北京 100190;
 4.中国科学院 空间环境态势感知技术重点实验室,北京 100190)

摘 要:深空探测承载着人类航天技术发展、探索宇宙奥秘和寻找地外生命及人类宜居地的重任,成为各航天大 国关注的热点。我国月球与深空探测虽然起步晚,但起点高,正在追赶并将实现领先。简要回顾了我国月球及深空空 间环境探测的载荷情况、数据结果、理论和应用研究成果,简述了当前在研的自主火星空间环境探测目标以及规划中 的未来深空探测任务,并根据当前国际发展态势,及我国在研、规划中的月球及深空探测任务情况,分析了我国月 球及深空空间环境探测的关键科学问题、载荷技术发展趋势、理论与模拟的研究需求,最后对深空环境探测进行了 展望。

关键词:空间环境;空间天气;深空探测;月球探测 中图分类号: V447+.1 **文献标识码:** A

文章编号:2095-7777(2019)02-0105-14

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.02.001

引用格式:王赤,张贤国,徐欣锋,等.中国月球及深空空间环境探测[J].深空探测学报,2019,6(2): 105-118.

Reference format: WANG C, ZHANG X G, XU X F, et al. The lunar and deep space environment exploration in China[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (2): 105-118.

引 言

1957年10月4日,人类第1颗人造卫星"斯普特 尼克1号"在前苏联拜科努尔航天中心发射升空,开 启了人类探索太空的时代。经过60多年的空间探测 与研究,人们逐渐认识到除陆地、海洋、大气之外, 还存在一个与人类生存和发展息息相关的空间环 境^[14]。空间环境是指地球表面20~30 km以上到地外 天体表面之间区域范围内各类物质的状态及演化。

这一广阔空间环境中的基本物理过程备受关注, 是当代自然科学最活跃的前沿学科之一。20世纪90 年代末,是空间物理走向"硬"科学时代的一个新发 展阶段,强调科学与应用的密切结合,还产生了专门 研究和预报空间环境中灾害性过程的变化规律,减轻 或防止空间灾害,为人类活动服务的空间环境、空间 天气学科⁽⁴⁾。

空间环境同时也是航天器故障异常的主要诱因之 一,是航天工程应用关注的热点领域。中高层大气、 空间磁场、电离层、高能带电粒子、空间等离子体、 空间碎片和微流星等空间环境可导致航天器轨道姿态

收稿日期: 2019-02-20 修回日期: 2019-03-30

非受控改变、通信定位质量下降或测控受干扰、总剂 量、单粒子、充放电、机械损伤、化学损伤、电子器 件硬软错误等诸多空间环境效应,威胁航天器运行的 效能发挥,乃至减寿或损毁^[5-13]。数据统计分析表 明:因空间环境因素直接导致的航天器故障(异常) 约占总故障数的40%左右^[13]。

空间环境探测是人类认识空间环境的必要措施^[14]。空间环境研究是以观测为基础,多学科(空间物理、地球物理、大气物理、等离子体物理等)、多技术(现代电子、通信和计算机技术、大数据技术等)高度交叉综合,地面观测和空间探测的有机结合,通过全球性的合作探测与研究,以解决人类生存发展所面临的环境问题为宗旨的重大前沿科技领域^[15]。空间环境探测是了解空间环境状态及变化规律的重要手段,同时也是保障人类空间活动安全的重要数据来源^[16]。

深空探测作为与地球轨道卫星和载人航天并驾齐 驱的航天活动,不仅是空间技术发展的必然选择,更 承载了人类探寻宇宙起源和演化、认识太阳系、探索 地球与生命起源和演化奥秘的梦想^[17]。1958年8月17日,美国太空技术实验室(Space Technology Laboratory, STL)研制的"能力1号"(ABLE1,后命名为"先锋0号",PIONEER0)太空船自卡纳维拉尔角发射中心发射升空,直指环月轨道^[18],拉开了人类深空 探测的序幕。

截止2018年底,世界各国已发射的深空探测任 务达到250次,其中美国102次、前苏联和俄罗斯 108次、日本13次、欧空局12次、中国7次、德国和 印度各2次,其他国家地区共4次^[18],对太阳系内包 括月球、行星、彗星、太阳等天体进行了探测,飞行 最远的探测器距离地球超过200亿km。通过深空探 测,取得了大量科学探测和技术成果,拓展了人类对 太阳系和宇宙的认识,推动了空间技术的进步和经济 社会的发展^[19]。

中国的深空探测起步于月球探测,按照探月工程 "绕""落""回"三步走的任务规划^[20-21],自2003年 启动探月工程一期研制以来,已经成功实施了"嫦娥 1号"(CE-1)、"嫦娥2号"(CE-2)、"嫦娥3号" (CE-3)^[22]、"嫦娥4号"(CE-4)月球探测任务及 "嫦娥5T1"飞行试验器任务,圆满完成探月工程一 期"绕"和二期"落"的任务,后续将择机实施"嫦 娥5号"任务,完成探月工程三期"回"的任务。

中国的火星探测计划开始于2011年发射的"萤 火1号",是由中国国家航天局与俄罗斯联邦航天局 合作共同探索火星的项目。2011年11月9日,俄方 宣布搭载有"萤火1号"的"福布斯-土壤号"火星 探测器变轨失败。2016年1月,中国正式批复中国首 次自主火星探测任务,中国火星探测任务正式立项, 并将在2020年左右发射一颗火星探测器^[23]。与此同 时,正在论证后续月球、小天体、火星、木星甚至更 远的深空探测任务^[19,24]。

我国月球及深空空间环境探测也是随着我国的深 空探测的发展而发展起来的,既为推动空间物理和空 间天气科学研究进展贡献中国力量,也为我国空间技 术不断刷新中国距离保驾护航。截止2018年底,我 国月球及深空空间环境探测任务包括"嫦娥1号" "嫦娥2号""萤火1号""嫦娥4号",在研任务包括 "自主火星",正在论证的任务包括后续探月、木星系 探测、小行星探测,主要探测要素包括粒子(等离子 体、能量粒子、高能粒子、中子)和物理场(磁场) 等要素,主要研究手段包括数据分析、基于数据的仿 真研究、数据可视化和基于物理的数值模拟研究。

1 探测任务

1.1 "嫦娥1号""嫦娥2号"

"嫦娥1号""嫦娥2号"是2颗三轴稳定的绕月 极轨卫星,分别于2007年10月24日和2010年10月1 日发射,环月飞行高度为200km和100km,轨道周 期为127min和118min。空间环境探测仪由一台太阳 高能粒子探测器(High-energetic Particles Detectors, HPD)和2台太阳风离子探测器(Solar Wind Ion Detectors, SWIDs)由SWIDA/SWIDB组成,其科学目 标是探测月球的空间环境,研究月球空间的高能粒子 和太阳风离子的成分、通量、能谱及其时空演化特 征,以及太阳活动对月球空间环境的影响^[25-31]。

1) 太阳高能粒子探测器

太阳高能粒子探测器由中国科学院国家空间科学 中心研制,科学探测目标是探测月球轨道空间的高能 质子、电子和重离子能谱随时间的演化特征(具体指 标见表1,详见文献[32]),探测指标的设计主要针对 可能诱发卫星单粒子效应和卫星充电效应,威胁卫星 安全的高能粒子种类和能谱。

表1 HPD 技术指标 Table 1 Performances of HPD

能道	能量 /MeV	计数范 围/(s ⁻¹)	种类	视场/(°)	几何因子 /(cm ² ster)	
P1	3.92~7.84	$0 \sim 10^{5}$				
P2	7.84~13.9	$0 \sim 10^{5}$	质子	80.51	0.85	
Р3	13.9~26	$0 \sim \! 10^5$				
P4	$26{\sim}60.8$	$0 \sim 10^{5}$				
P5	60.8~153	$0 \sim 10^{3}$	质子	60.25	0.45	
P6	153~412	$0 \sim 10^{3}$				
E1	≥0.101	$0 \sim 10^{5}$	山之	148.96	3.17	
E2	≥1.96	$0 \sim \! 10^5$	电丁	60.25	0.45	
He	12.48~106.4	$0 \sim 10^{3}$	He			
Li	32.3~212.1	0~7	Li,Be,B	148.96	0.45	
С	113.5~590.4	0~7	C,N,O			
	时间分辨率/s		1	l		

HPD的传感器由3片半导体硅探测器组成,带电 粒子在传感器中以电离方式损失能量,根据3片半导 体硅探测器输出能量的不同,可区分粒子成分和能 量。HPD安装在卫星顶部,视场方向为朝天向。

2) 太阳风离子探测器

"嫦娥1号""嫦娥2号"安装的太阳风离子探测器(SWIDs, SWIDA/SWIDB)由中国科学院国家空间科学中心研制,其科学探测目标是探测月球附近等离子体和月球的相互作用,获得月球附近太阳风的基

本特征,包括速度、密度和温度等。SWIDs的观测 对象是月球空间0.04~20 keV的离子。其科学探测结 果主要用于研究月球附近等离子体环境的特征和月表 与太阳风等离子体环境的相互作用。

SWIDs采用半球形静电分析器,有12个探测入口分布在同一扇面内平分180°极角,称为极角P1~ P12,每个极角各有48个能量通道,近对数划分0.04 ~20 keV能道宽度,称为能道C1~C48,每一能道对 应偏转电压不同,选通不同能量-电荷比*E/Q*的离子 入射 MCP 传感器。SWIDs 包含2台太阳风离子探测 器,中心视场重合、扇面正交安装,仪器安装在朝天 面,中心视场朝天(具体指标见表2,详见文献[32])。

表2 SWIDs技术指标 Table 2 Performances of SWIDs

Table 2 Terrormances of Swiths				
参数	SWIDs			
能量范围	40 eV/q~16 keV/q			
能量分辨率	8.5%(FWHM)			
能道数	48			
视场	$180^{\circ} \times 6.7^{\circ}$ (FWHM)			
角度分辨	15° × 6.7°(FWHM)			
时间分辨率/s	2.9			
计数范围/(·s-1)	$0 \sim 10^{5}$			

1.2 "萤火1号"

"萤火1号"火星探测器的主要科学目标是探测 研究火星的空间环境,因此在有效载荷的选择上主要 考虑火星空间环境磁场及等离子体能谱和质谱的探 测。其上的等离子体探测包是当时国际上先进的等离 子体探测器之一,适应自旋或三轴稳定的卫星平台, 对空间等离子体方向分布、能谱和离子质量进行探 测。高精度磁通门磁强机探测精度为0.01 nT,达到 当时国际磁通门磁强计的先进水平;星-地掩星接收 机与俄罗斯FGSC福布斯-土壤探测器配合,主要探 测火星正午和子夜电离层的电子密度,有望填补火星 电离层探测的空白^[33-34]。

1) 等离子体探测包

"萤火1号"等离子体探测包由中国科学院国家 空间科学中心研制,其探测目标是近火星空间的等离 子体环境,等离子体探测包探测等离子体的分布函 数、成分等参数,包括离子的能量、方向分布和成 分,电子的能量和方向分布。等离子体探测包采用静 电分析器技术,在传感器的壁面加电场对入射的带电 粒子进行方向和能量的分辨。在半球形静电分析器之 后再加上飞行时间(Time of Flight, ToF)系统还可 以对离子成分进行分辨^[35]。等离子体探测包由离子分 析器^[36](I、II)、电子分析器^[37]和电子学箱4部分组成,具体指标如表3所示。

	表3	等离子体探测包性能指标
Table 3	Speci	fications of plasma package of YH-1

名称	电子	离子I	离子II
能量/keV	0.02~10	0.02~10	0.02~10
能量分辨率/%	15	15	15
质量分辨/(M/ΔM)	不分辨	6个质量组	6个质量组
角分辨	$9^\circ \times 15^\circ$	$15^\circ imes 360^\circ$	$15^\circ imes 360^\circ$
视场范围	$9\times90^\circ+9\times90^\circ$	$90^\circ imes 360^\circ$	$90^\circ imes 360^\circ$
时间分辨/s	8	8	8

2) 高精度磁通门磁强计

中科院国家空间科学中心研制的"萤火1号"高 精度磁强计采用了分立结构的磁通门传感器。其探测 精度达到0.01 nT,重量约为2.5 kg,传感器重0.25 kg,功耗5W。性能指标(如表4所示)经过国外机 构检测,达到国际先进水平^[38-39]。

表4 "萤火1号"高精度磁强计技术指标 Table 4 Specifications of VH-1 fluxgate magnetometer

-	5 5
指标内容	指标
探测范围/nT	± 256
分辨率/nT	0.01
采样率	10 Hz 1 Hz
噪声	< 0.01 nT/Hz1/2
传感器类型	分立分量磁通门

3) 掩星接收机

火星电离层无线电掩星探测的原理是以俄罗斯 Rhobos-Grunt探测器上的甚高频信标信号(833 MHz/ 416.5 MHz)作为掩星探测的无线电信号源,利用 "萤火1号"上安装的接收机进行接收,记录下被火 星电离层遮掩信号的载波相位L1、L2。掩星接收机 的主要指标如表5所示^[40]。

表5 "萤火1号"掩星接收机主要指标 Table 5 Specifications of VII 1 receiver

Table 5 Specifications of TH-Treetwei				
指标内容	指标			
接收机灵敏度/dBm				
载波相位测量精度	125 dBm:0.5% 周 95 dBm:2% 周			
动态范围/dB	50			

1.3 "嫦娥4号"

"嫦娥4号"空间环境探测主要采用国际合作方 式开展,科学目标和技术指标如表6所示^[41-42],所携 带的载荷中子与辐射剂量探测仪LND和中性原子探 测仪ASAN性能指标如表7~8所示。

Table 6 Scientific objectives for the international collaboration payloads onboard CE-4					
载荷名称	科学目标/探测任务	国际合作方	中方PI单位	搭载平台	
中子与辅射剂量 探测仪LND	测量月表的综合粒子辐射剂量和LET谱,测量月表快中子能谱和热中子通量	德国基尔大学	中国科学院国家 空间科学中心	着陆器	
中性原子探测仪 ASAN	研究月表溅射过程的机理记忆在月球大气形成过程中的作用,研究月表散射过程 中能量中性原子的分布函数及其与地形地貌和地方时的关系	瑞典空间物理 研究所	中国科学院国家 空间科学中心	巡视器	

主("惨世4号"交问环接探测到举日标

measuring	instru	ment neutron and radiation measuring instrument	
Table 7	Mai	in specifications of lunar neutron and radiation	
	表7	中子与辐射剂量探测仪主要性能指标	
ASAN		中能重中性原丁的分布函数及共与地形地貌和地力	的的大

	8
指标内容	指标
快中子能谱	20~20 MeV,32个能道
热中子通量	$10 \sim 10^4 \text{ min}^{-1}$
质子能谱	7~30 MeV,32 个能道
电子能谱	60~500 keV,32个能道
α粒子能谱	7~20 MeV/n,32个能道
重离子能谱	10~30 MeV/n,32×32 个矩阵
LET谱范围	0.1~430 keV/µm,64个能道
时间分辨率/min	剂量率:1 质子:5 电子:5 重离子:30

表8 Table 8 Ma	中性原子探测仪主要性能指标 in specifications of neutral atom detector
指标内容	指标
观测要素	能量中性原子(ENA),正离子
能量范围	$10 \text{ eV}{\sim}10 \text{ keV}$
质量分辨率	能量中性原子:氢原子 其他成分原子组正离子:质荷比1、2、4、8、16、32
能量分辨率	7%(正离子),30%(能量中性原子)
时间分辨率/s	10

1.4 在研任务

作为我国深空探测计划的又一个里程碑事件,中 国政府于2016年1月对中国首次自主火星探测任务正 式批复立项,计划于2020年发射一颗火星探测器, 一次性实现"环绕""着陆""巡视"3个目标。中国 首次自主火星探测任务的探测器由一个火星环绕器和 一个火星着陆巡视器构成。环绕探测科学任务着眼于 对火星全球性和综合性的探测;着陆巡视器由进入舱 和火星车组成,火星车巡视探测科学任务着眼于火星 局部地区的高精度就位探测。其科学目标包括5个方 面的探测和研究[43]:

- 1) 火星形貌与地质构造特征;
- 2) 火星表面土壤特征与水冰分布;
- 3) 火星表面物质组成:
- 4) 火星大气电离层及表面气候与环境特征;
- 5) 火星物理场与内部结构。

其中,第4与第5项科学目标与空间环境探测紧 密相关。为实现上述目标,火星环绕器配置火星磁强 计、火星离子与中性粒子分析仪、火星能量粒子分析 仪等3类空间环境探测载荷,火星车上配置火星表面 磁场探测仪,具体载荷配置和探测目标如表9~10 所示[43]。

表9 火星环绕器空间环境探测载荷配置 Table 9 Payloads of MARS-1 orbiter

有效载荷	功能简介	科学探测任务及目标				
火星磁强计	获取火星空间磁场环境数据,对磁场进行高精度 矢量测量。	探测火星空间磁场环境,研究火星电离层及磁鞘与太阳风磁场相互作用机制。				
火星离子与 中性粒子分 析仪	测量分辨火星空间环境中的离子通量、成分、密度、速度、温度等物理参量;测量中性能量粒子的 通量,分辨H、He、O等主要中性粒子成分。	对火星等离子体中的粒子特性进行研究,了解火星大气的逃逸;研究太阳风和火星 大气相互作用、火星激波附近中性粒子加速机制。				
火星能量粒 子分析仪	获取能量电子、质子、α粒子、离子的能谱、通量和 元素成分数据。	研究近火星空间环境和地火转移轨道能量粒子的能谱、元素成分和通量的特征及 其变化规律;绘制火星全球和地火转移轨道不同种类能量粒子辐射的空间分布图; 与磁强计、离子和中性粒子分析仪等联合研究近火星空间能量粒子辐射与大气的 关系、太阳风暴能量粒子事件对火星大气逃逸的影响与相互作用的规律以及火星 粒子加速与输运过程。				

Table 10	Pavloads	of MARS-1	rove

有效载荷	功能简介	科学探测任务及目标
火星表面磁场 探测仪	对火星表面磁场进 行矢量测量。	探测研究着陆区火星磁场,确定火星磁场指数;与环绕探测配合,探测研究火星空间磁场,反演火星电离层发电机电流,研究火星电离层电导率等特性;尝试利用天然磁场跃变,探测火星内部局部构造。

2 探测与分析结果

迄今为止,我国自主获取的月球与深空空间环境 的数据主要来自"嫦娥1号"和"嫦娥2号","嫦娥 4号"的数据正在分析中。

2.1 近月空间环境分布规律

1) 高能粒子分布

"嫦娥1号"和"嫦娥2号"HPD探测结果表明, 太阳活动低年,空间环境相对宁静时期,月球轨道 100~200 km高度空间区域与ACE卫星所在的行星际 日-地(月)系统拉格朗日L1点附近的高能质子、高 能电子、重离子He、C、N、O的背景流量相当,月 球的局部磁异常和稀薄大气对月面以上100~200 km 的高能带电粒子影响很小^[26,32]。

CE-1 观测的质子能谱具有幂律谱的分布形态, 并与通常所指具有90%置信度最恶劣的银河宇宙线 质子谱相当^[26],观测结果如图1所示。



图1 CE-1在环月轨道观测、CREME86计算1AU处、 ACE于L1点观测高能质子能谱比对 Fig. 1 The spectrums of energetic protons by CE-1 at lunar orbit, CREME86 at 1 AU and ACE at L1

月球附近经常观测到高能电子流爆发现象,CE-1/HPD探测器的观测概率是20%,其中持续几分钟的 脉冲式事件和持续时间大于10 min 的事件各占50%, 磁尾的磁鞘和边界层过渡区是此类事件的多发区 域^[26],观测结果如图2所示。



图2 CE-1/HPD 观测到的 0. 1~2 MeV 高能电子爆发现象 20070123) Fig. 2 Bursts of 0. 1~2 MeV electron event by CE-1/HPD on 20070123

2) 太阳风等离子体分布

"嫦娥1号""嫦娥2号"和SWIDs数据分析表明,

太阳风离子分布符合 Maxwell 分布,可以对 SWIDs 数据用 Maxwell 函数拟合获得月球附近等离子体参数。 对月球附近和行星际上游太阳风离子的速度、密度和 温度比对分析表明,太阳活动低年,空间环境相对宁 静条件下,月球附近太阳风参数演化与上游太阳风保 持着相同的时间演化趋势;二者相比,太阳风速度、 密度变化不大,温度有所上升,这可能与月球附近太 阳风受到压缩或与月面相互作用加速加热有关^[44]。

月球在中磁尾穿越磁层顶期间,观测到显著的太阳风、磁鞘、磁尾等离子体特征,对应上述3个等离子体区域,温度逐渐上升,密度逐渐下降^[45]。

CE/SWIDs 观测的背景太阳风能谱图(见图3~ 4)表明,大部分观测到的太阳风能谱具质子H⁺单峰 结构,或质子和4He²⁺双峰结构,4He²⁺峰中心能量约 是H⁺峰中心能量的2倍^[28,32]。









2.2 近月空间环境与月面相互作用

1) 近月空间离子加速现象

王晓栋等^[31]利用"嫦娥1号"SWIDS的数据发现 了月球晨昏线附近太阳风离子经月面散射,被对流电 场加速的现象(图5)。这种加速现象多发生在南北 两极,可导致~200 eV/q的离子产生600~1500 eV 的能量增加。这种加速机制多发生在行星际磁场*By* 分量为主的情况下,且对应*By*值的正、负,其发生 区域分别在月球的南极、北极。同时这种加速离子经 *E×B*进入月球尾迹,为太阳风粒子进入月球尾迹提供 了一种可能机制。



图5 CE-1/SWIDB在极区附近观测到的离子加速现象。A: SWIDB的几何姿态; B: 月球在日地月空间的位置; C: SWIDB 1-11 极角计数累计能谱 演化, 红色横线标注太阳风粒子观测时段、品红横线标注被加速离子观测时段; D: 太阳天顶角、SCG坐标位置; E: 时延后的行星际磁场 Fig. 5 The observation of orbit 0381 and 0382, when the Moon and the spacecraft were in the interplanetary space. (A) The observation geometry of SWIDB in the selenocentric solar ecliptic (SSE) coordinate system. Sectors in black detected the largest flux of solar wind protons. (B) The location of the spacecraft in the ecliptic plane during observation. (C) The summed E-t spectrum of all 11 sectors except for the blocked sector 12. Red and pink bars cover the measurements of the solar wind ions and accelerating particles, respectively. (D) The evolution of solar zenith angle (SZA) and selenocentric geographic (SCG) coordinates of the spacecraft. (E) The Bx, By and Bz components of the interplanetary magnetic field (IMF) in GSE coordinate system. IMF data in this study are from ACE/MAG at L1 point with shifted time. Gradient gray boxes cover the pariod soft the spacecraft in the optical shadow

钟俊等^[46-47]利用"嫦娥1号"数据发现了月球向 阳面"载荷"(pickup)离子加速的现象,并对不同 行星际条件下的"载荷"离子加速现象进行详细分 析。结果表明,行星际磁场*Bx*为主时,"载荷"离子 速度有一个很强的平行磁场分量,行星际磁场*By*分 量的大小影响加速效率,随着*By*分量数值减少,"载 荷"离子加速效率下降。钟俊等^[47]同时发现,行星际

磁场 By为正情况下,H⁺进入月球尾迹的深度大于 He²⁺ (图6)。

这些研究结果对近月等离子体环境的理解具有重 要意义。

2) 月球逃逸层H,+存在的证据

2011年,王晓栋等^[48]报道了"嫦娥1号"SWIDs 观测到能谱平行曲线结构(PCs,图7所示)的事例,



图6 CE-1/SWIDB数据和时延后的ACE行星际磁场数据
 Fig. 6 The observation results of CE-1/SWIDB and time-shifted
 IMF from L1/ACE
 注:图中2条谱带从下而上分别表示H^{*}和He^{2*}离子能谱

被认为是首次就位探测到月球逃逸层H₂+存在的证据。 王晓栋等对该能谱平行曲线结构进行了详细分析,结 果表明,能谱平行曲线离子的能量存在2倍比例关系, 且在速度相空间,平行曲线结构的离子表现出显著的双 圆环现象,给出了"载荷"(pickup)粒子中存在*m/q* = 2的离子成分的证据,即月球逃逸层H₂+存在的证据。

3) 月面微磁层观测结果

王晓倩等^[49]和崔俊等^[50]基于"嫦娥2号"太阳风 离子探测器数据发现了月球微磁层(Lunar Magnetic Anomalies, LMA)存在的证据,"嫦娥2号"中第 35、36、37轨在100 km高度幸运地穿越了澄海对峙



图7 CE-1/SWIDs观测到的平行曲线结构。A: 月球在地月空间的位置; B: SWIDA/B在SSE坐标系投影; C: SWIDA和SWIDB全方向累加能谱 演化图; D: 太阳天顶角(红色曲线)、纬度(绿色曲线)和SSE坐标经度(蓝色曲线)/SCG坐标经度(蓝色点线); E: 时间延迟后的L1点ACE 观测的行星际磁场; F: SWIDB的方向谱,纵轴为每一个极角方向的视场方向,红色加号标注能谱双曲线数据

Fig. 7 Observation of parallel curve (PC) events in orbit 0326. (A) Position of the Moon (closed circle) in the ecliptic plane as seen from the Earth's north pole. (B) Observation geometries of SWIDA and SWIDB projected in the XY and the XZ plane in the selenocentric solar ecliptic (SSE) frame, in which the Sun locates at the +X direction. The trajectory of the spacecraft in this orbit is drawn to scale. The blue and red arcs represent the latitude coverages where PCs were observed by SWIDA and SWIDB, respectively. Specifically, locations of the spacecraft and FOVs of SWIDA and SWIDB at the time of three (one for SWIDA) observations are shown, with sector 1 and 12 marked. Dark sectors detect PC particles. IMF direction projected on the ecliptic plane is also shown. Following panels show time-dependent parameters. (C) Energy-time (E-t) spectra of (top) SWIDA and (bottom) SWIDB data summed over all 12 sectors each. (D) The solar zenith angle (SZA) (red curve), latitude (green curve) and longitude of the spacecraft in the SSE (blue dashed curve) /selenocentric geographic (SCG) (blue dot-dashed curve) frames. The blue and red bars cover the time spans of PCs in SWIDA and SWIDB, respectively. (E) The interplanetary magnetic field (IMF) conditions shifted from L1 point measurement (ACE / MAG data). (F) The directional spectrum of SWIDB data in the meridian plane by integrating over all energy channels. The direction is the instantaneous FOV direction of a sector. The red pluses figure out PC counts.

区(Serenitatis Antipode)附近,SWIDs观测到显著的LMA特征,即太阳风离子密度下降和温度上升(图8中阴影区),这被认为是微磁层对太阳风的屏蔽

作用造成的。这是当时月球微磁层存在的第3个公开 发表的观测证据,也是其中最显著最直接的观测 证据。



图8 "嫦娥2号" SWIDs 观测到的微磁层存在的证据 Fig. 8 The evidence of LMA by CE-2/SWIDs

4) 近月高能电子爆发事件

王馨悦等^[25]利用 HPD 高能电子数据和 SWIDs 等 离子体数据分析发现,高能电子爆发事件可诱发环月 卫星表面充电,这种充电现象进而导致 SWIDs 探测 到的等离子体能谱整体抬升,抬升幅度与卫星表面充 电电位相当。

5) 磁层对近月空间粒子辐射环境的屏蔽作用

王洁和秦刚^[51]利用"嫦娥1号"HPD高能粒子数 据对月球轨道的磁层屏蔽效应进行了分析研究,发现 当月球位于地球磁层内时,HPD6个能道的质子通量 并没有发生显著减少,结果表明地球磁层不能为月球 轨道附近高能粒子提供显著的磁屏蔽。对于6个质子 能道,月球位于地球磁尾与太阳风中时,高能质子通 量差异的百分比上限分别为1.2%、0.07%、1.4%、 2.7%、0.29%和1.7%。 京然氏了通导美臣五八比京义加7

高能质子通量差异百分比定义如下

$$P_{i} = \frac{f_{\text{in},i} - f_{\text{out},i}}{(f_{\text{in},i} + f_{\text{out},i})/2} \times 100\%$$

其中: i表示能道序号; in和out分别表示磁层内外。

2.3 基于实测数据的理论和应用研究

1) 卫星和月球表面充电研究

王馨悦等^[25]基于 CE-1/HPD 探测的高能电子爆发 事件数据,进而用电流平衡法对事件期间卫星和月表 充电现象进行了模拟研究(图9),结果表明,高能 电子爆发时段内能量电子积分总流量超过10¹¹ cm⁻²时, 环月卫星和月球表面充电电位均可达负上千伏,且月表 充电时间尺度比卫星表面充电时间小1个量级。



Fig. 9 Simulation of satellite and Lunar surface charging

石红等^[45]利用 CE-1/SWIDs 等离子体数据对平静 期近月环境中的卫星表面充电情况进行了估算。根据 2008年6月份的CE-1/SWIDs数据,轨道等离子体温度在1.8~20 eV之间,在忽略二次电子发射、光电子

发射和迎风面的情况下,粗略估算太阳风等离子体对 探测器的充电电位在-7~-70V之间,而月球尾迹区 充电现象仍需进一步研究。

2) 基于实测数据的微磁层模拟研究

Xie 等^[52]对 CE-2/SWIDs 月面微磁层观测结果进 行了三维 Hall-MHD 数值模拟研究,重现了月面磁场 异常区等离子体密度的下降(图10所示),但这个等 离子体空洞可能不是在微磁层内,而是2个磁异常 (澄海和雨海)引起的微磁层之间的压缩区。研究同 时发现,由于微磁层的空间尺度与离子回旋尺度相 当,Hall效应在微磁层形成过程中发挥了非常重要的 作用。太阳风离子可以穿越微磁层的磁层顶,削弱间 断面两侧的等离子体速度跃变,导致等离子体空泡消 失,以及弓激波和磁层顶的合并,而电子被微磁层边 界阻挡。这同时导致了微磁层的不对称性,等离子体 堆积到一侧,而磁场堆积到另一侧。模拟结果显示,决 定微磁层结构的参数主要包括太阳天顶角(Sun Zenith Angle, SZA)、磁声马赫数 $M_{MS} \left(=\frac{v_0}{\sqrt{v_A^2 + v_s^2}}\right)$ 和压 强平衡距离与离子惯性尺度的比例 $D (=R_M/L_{pi}, R_M = \sqrt[6]{\frac{\mu_0 \mu^2}{32 \pi^2 M n_0 V_0^2}}, L_{pi} = \frac{c}{\omega_{pi}}\right)$ 。SZA越大,微磁层 尺度越大; D足够大情况下, M_{MS} 越小微磁层尺度越 大; 另一方面,随着D变小,更多离子可以穿越磁层 顶导致弓激波与磁层顶合并,引起微磁层的基本结构 发生改变。



图 10 月面微磁层 3D Hall MHD 数值模拟结果与 CE-2 实测结果比对 Fig. 10 Comparisons between the simulation and the observation of Chang' E-2 on 0037 orbit

注: 红色曲线为CE-2实测等离子体密度变化,绿色和蓝色曲线分别为等离子体密度、磁场模拟结果

3) 数据可视化

对于深空空间环境探测中大量、异构的复杂探测 数据的可视化,我国科学家进行了大量有益的探索。 毛凯憨等^[53]、Zhang等^[54-55]和熊继新等^[56]提出的数据 可视化分析技术能够快速提取粒子通量的分布、演化 特征,实现对大规模粒子分布数据的可视化分析。并 在此基础上设计实现的可视化辅助分析系统(图11 ~12)充分整合了数据浏览、比较、三维可视及渲染 和分析时所需要的多种信息,大大提高了对大规模粒 子数据的分析效率。



图 11 嫦娥 HPD 数据可视化辅助分析系统 Fig. 11 Quick-plot system for CE/HPD data analyzing



图 12 "嫦娥" SWIDs数据可视化辅助分析系统 Fig. 12 Quick-plot system for CE/SWIDs data analyzing

3 我国月球及深空空间环境探测展望

1)与规划任务相关的深空空间环境问题

我国的深空探测已经成功实施了"嫦娥1号" "嫦娥2号""嫦娥3号""嫦娥4号"月球探测任务及 "嫦娥5号"飞行试验器任务,圆满完成探月工程一 期"绕"和二期"落"的任务,后续将择机实施"嫦 娥5号"任务,批复立项了中国首次自主火星探测任 务,预计在2020年左右发射一颗火星探测器,与此 同时,正在论证后续月球、小天体、火星、木星甚至 更远的深空探测任务。

空间环境探测作为科学探索和航天工程环境适应 能力提升的主要数据获取手段,其关注的科学问题理 应与我国月球与深空探测任务的实施一致,主要包 括:①月尘迁移、微磁层分布与成因、月面物质成分 及其与地球太阳风关联关系等问题;②行星际物质的 主要成分及其传播特性;③太阳风与火星、木星、其 他天体的相互作用机制,以及各自磁层特性;④太阳 活动、日冕物质抛射事件和能量粒子事件在其中发挥 的作用;⑤火星、木星大气层的结构、辐射环境及其 对行星际空间环境扰动的响应过程和机理;⑥太阳系 天体有机物、水分子踪迹以及中性成分逃逸的过程和 机理。

2) 载荷技术发展建议

我国深空探测起步晚,但起点高,对应国际发展 态势以及我国深空探测规划,载荷技术的发展应满足 以下几点需求。

(1)提升宏观探测能力,加强遥感成像探测技术 受运载能力限制,深空探测资源十分宝贵,消耗 最少资源获取最丰富观测信息是大的发展趋势,遥感 成像载荷,可以一次性获取市场范围内宏观尺度等离 子体、磁场分布信息,XEUV成像技术、中性原子成 像技术等正在成为国际深空空间环境探测的主流 载荷。

(2) 提升微观探测能力,发展轻小型化多要素综合探测技术

磁场、成分、能谱、投掷角等原位探测要素是深 空空间物理现象微观分析的必要要素,时、空变化尺 度跨度大,必须同时同地探测才能深入物理现象本 质,限于深空探测平台能力,需发展轻小型多要素综 合探测技术。

(3)提升长周期多目标探测能力,发展长寿命、 大动态复杂环境适应技术

深空探测任务周期长、一次性到访目标多样,对 探测载荷的长寿命、大动态复杂环境适应能力提出了 新的、更高需求。

(4)提升有效数据获取效率,发展星上载荷智能 化数据处理技术

数据传输也是深空探测任务的难点之一,同时受 距离限制载荷通讯控制无法实时,因此减少无效数据 回传、提升载荷自主应对能力是今后深空探测载荷发 展趋势之一,星上智能化数据处理是有效解决手段 之一。

3) 与实测数据配合的理论、模拟和应用分析 研究

科学创新和应用能力提升是空间环境探测的最终 目标,二者相辅相成是航天强国道路上前进的推

动力。

数值模拟是对新的探测现象进行合理解释、理论 研究取得创新进展的重要手段之一,自主探测、原创 创新、兼顾国际合作是我国深空探测必须坚持的发展 之路。因此,必须加强与探测配合的理论和数值模拟 研究能力。

深空探测存在许多未知,空间环境探测和应用研 究是提升我国航天工程空间环境适应能力的基础。提 前布局和发展应用能力是从容应对深空探测空间环境 威胁的重要前提。

4 结束语

深空探测承载着人类航天技术发展、探索宇宙奥 秘、寻找地外生命和宜居地的重任,成为各航天强国 关注的热点。我国月球与深空探测起步晚,但起点 高,正在追赶并努力实现并跑到领先。空间环境探 测,既承载了人类对科学未知不断探索的好奇心,也 担负着支撑空间技术、空间应用发展的重要任务。通 过"嫦娥1号""嫦娥2号"装载的高能粒子探测器、 太阳风离子探测器获得的近月空间环境第一手数据, 重新认识了近月空间环境粒子分布规律,发现了太阳 风离子加速现象、高能电子爆发事件、月球逃逸层 He²⁺存在证据、微磁层的存在等现象,利用事例分 析、数值模拟等手段提出了自己的理论认识,为我国 月球与深空空间环境探测奠定了基础、积累了经验、 培养了优秀的科学家团队。

目前,人类首次实现月背着陆的"嫦娥4号"正 利用国际合作载荷源源不断地获取新的、高精度空间 环境数据,其探测结果的研究发现必将为国际深空探 测的发展做出独特的重要贡献。

我国自主火星探测已做好了准备,探月后续任 务、小行星、木星系以及更远深空的探测计划必将极 大促进对月球与深空的空间环境的认知。

参考文献

- OFCM. The national space weather program, the strategic plan, FCM-P30-1995. [EB/OL].(1995)http://www.ofcm.gov/publications/ spacewx/nswpp30.pdf.
- [2] 刘振兴. 日地空间环境的监测和预报[J]. 大自然探索, 1996(4): 3-5.
- [3] 魏奉思.空间天气学[J].地球物理学进展,1999,14(s1):1-7.
 WEI F S. Space weather[J]. Progress in Geophysics, 1999, 14(s1):
 1-7.
- [4] 王赤.空间物理和空间天气探测与研究[J].中国工程科学,2008, 10(6):41-45.

WANG C. Exploration and research of space physics and space weather[J]. Engineering Science, 2008, 10(6):41-45.

- [5] LEACH R D, ALEXANDER M B. Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment[R]. Huntsville, AL, United States: National Aeronautics & Space Administration NASA Reference Publication, 1996.
- [6] 朱光武,李保权.空间环境对航天器的影响及其对策研究[J]. 上海 航天,2002,19(4):1-7.
 ZHU G W, LI B Q. Space environment and effect and countermeasure research on spacecraft[J]. Aerospace Shanghai,2002,19(4):1-7.
- [7] 朱光武,李保权.空间环境对航天器的影响及其对策研究(续)[J]. 上海航天,2002,19(5):9-16.
 ZHU G W, LI B Q. Space environment and effect and countermeasure research on spacecraft[J]. Aerospace Shanghai, 2002, 19(5): 9-16.
- [8] 冯伟泉,徐焱林. 归因于空间环境的航天器故障与异常[J]. 航天器 环境工程,2011,28(4):375-389.
 FENG W Q, XU Y L. Space failures and anomalies related with space environment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(4):375-389.
- [9] 薛玉雄,杨生胜,把得东,等空间辐射环境诱发航天器故障或异常 分析[J]. 真空与低温,2012,18(2):63-70.
 XUE Y X,YANG S S,BA D D, et al. Analysis of spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space radiation environment[J]. Vacuum & Cryogenics,2012,18(2):63-70.
- [10] 赵晶.空间环境对航天器影响的统计分析[J]. 航天器环境工程, 1998(4):41-53.

ZHAO J. The statistical figures of spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 1998(4):41-53.

- [11] 陈磊,李飞,任德鹏,等.月面和近月空间环境及其影响[J]. 航天器 工程,2010,19(5):76-81.
 CHEN L,LI F, REN D P, et al. Lunar surface and near lunar space environments and their effects[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19 (5):76-81.
- [12] 陈凤贵,王胜国,谢志辉,等.空间环境对载人登月活动的影响及 保障需求研究[J].装备环境工程,2014,11(1):77-96.
 CHEN F G, WANG S G, XIE Z H, et al. Research on the effects of space weather and support needs in manned lunar landing[J]. Equipment Environmental Engineering,2014,11(1):77-96.
- GARRETT H, WHITTLESEY A, DAUGHTRIDGE S. Environment induced anomalies on the TDRS and the role of spacecraft charging
 Journal of Spacecraft and Rockets, 1985, 28(3): 324-329.
- [14] 朱光武,王世金.日地空间环境探测[J].世界科技研究与发展, 2000,22(3):36-38.
 ZHU G W, WANG S J. Sun-Earth space environment detect[J]. World Sci-Tech R&D,2000,22(3):36-38.
- [15] 刘振兴. 我国空间环境监测和预报系统亟待加强[J]. 中国科学院 院刊,1997(3):218-220.
- [16] 龚建村,刘四清,师立勤,等.空间环境天基探测现状与需求分析
 [J].空间科学学报,2009,29(3):346-352.
 GONG J C, LIU S Q, SHI L Q, et al. Status and demand analysis of space-based observation of space environment[J]. Chinese Journal of Space Science, 2009, 29(3): 346-352.
- [17] 范全林,王琴,白青江.2018年深空探测热点回眸[J].科技导报,

```
2019,37(1):52-64.
```

FAN Q L, WANG Q, BAI Q J. Review of 2018 global deep space activities[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(1):52-64.

- [18] SIDDIQI A A. Beyond Earth: a chronicle of deep space exploration, 1958 - 2016[EB/OL]. (2019-2-28). https://history.nasa.gov/series95. html.
- [19] 叶培建,邹乐洋,王大轶,等.中国深空探测领域发展及展望[J].国际太空,2018(10):4-10.
 YE P J,ZOU L Y,WANG D Y,et al. Development and prospect of Chinese deep space exploration[J]. Space International,2018(10):4-10.
- [20] 欧阳自远,李春来,邹永廖,等. 深空探测的进展与我国深空探测的发展战略[J]. 中国航天,2002(12):28-32.
 OUYANG Z Y,LI C L,ZOU Y L, et al. Progress of deep space exploration and Chinese deep space exploration strategy[J]. Aerospace China,2002(12):28-32.
- [21] 叶培建,彭兢. 深空探测与我国深空探测展望[J]. 中国工程科学, 2006,8(10):13-18.
 YE P J, PENG J. Deep space exploration and its prospect in China[J]. Engineering Science,2006,8(10):13-18.
- [22] 吴伟仁,于登云.深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报,2014,1(1):5-17.
 WU W R,YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space of Exploration, 2014,1(1):5-17.
- [23] 孙辉先,李慧军,张宝明,等.中国月球与深空探测有效载荷技术的成就与展望[J]. 深空探测学报,2017,4(6):495-509.
 SUN H X,LI H J,ZHANG B M, et al. Achievements and prospects of payloads technology in Chinese lunar and deep space explorations
 [J]. Journal of Deep Space of Exploration,2017,4(6):495-509.
- [24] 新华.中国未来将实施四次重大深空探测任务[J].太空探索,2017 (3):5-5.
- [25] 王馨悦,张爱兵,荆涛,等.高能电子爆发与绕月卫星表面电位 大幅下降的联动效应研究[J] 地球物理学报,2016,18(5): 585-589.
 WANG X Y, ZHANG A B, JING T, et al. Synchronization of energet-

ic electron bursting and lunar orbiter surface charging to negative kilovots[J] Chinese Journal of Geophysics, 2016, 18(5):585-589

- [26] 王馨悦,荆涛,张珅毅,等.嫦娥一号卫星太阳高能粒子探测器的 首次观测结果[J].地球物理学进展,2012,27(6):2289-2295.
 WANG X Y,JING T,ZHANG S Y,et al. The first results of Chang'e-1 high energetic particles detector[J]. Progress in Geophysics, 2012,27 (6):2289-2295.
- [27] WANG X Y, ZHANG A B, ZHANG X G, et al. Bursts of energetic electron induced large surface charging observed by Chang'E-1[J]. Planetary & Space Science, 2012, 71(1):1-8.
- [28] 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 & Space Science, 2012, 62 (1):23-30.
- [29] 欧阳自远. 嫦娥一号卫星的初步科学成果与嫦娥二号卫星的使命
 [J]. 航天器工程,2010,19(5):1-6.
 OUYANG Z Y. Science results of Chang'e-1 lunar orbiter and mission goals of Chang'e-2[J]. Spacecrafts Engineering, 2010, 19(5):

1-6.

- [30] OUYANG Z Y, LI C L, LIAO Z Y, et al. Chang'E-1 lunar mission: an overview and primary science results[J]. Chinese Journal of Space Science, 2010, 30(5): 392-403.
- [31] 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 (7): 1-5.
- [32] 王馨悦,张爱兵,荆涛,等.近月空间带电粒子环境——"嫦娥1号" "嫦娥2号"观测结果[J]. 深空探测学报,2019,6(2):1-8.
 WANG X Y, ZHANG A B, JING T, et al. The lunar charged particle environment by Chang' E-1 and Chang' E-2[J]. Journal of Deep Space Exploration,2019,6(2):1-8.
- [33] 吴季,朱光武,赵华,等. 萤火一号火星探测计划的科学目标[J]. 空间科学学报,2009,29(5):449-455.
 WU J,ZHU G W,ZHAO H, et al. Overview of science objectives of China-Russia joint Mars exploration program YH-1[J]. Chinese Journal of Space Science,2009,29(5):449-455.
- [34] 孙越强,吕良庆,王世金,等. 萤火一号火星探测器有效载荷分系 统设计[J]. 上海航天,2013,30(4):159-163.
 SUN Y Q,LV L Q,WANG S J,et al. Design of payload subsystem of YH-1 Mars probe[J]. Aerospace Shanghai,2013,30(4):159-163.
- [35] 李磊,张爱兵,孔令高,等. 火星等离子体环境探测[J]. 空间科学学报,2009,29(5):462-465.
 LI L, ZHANG A B, KONG L G, et al. Exploring the plasma environment of Mars[J]. Chinese Journal of Space Science, 2009, 29(5): 462-465.
- [36] 孔令高,张爱兵,王世金,等.萤火一号火星探测器离子分析器设 计和仿真技术[J].上海航天,2013,30(4):164-168.
 KONG L G, ZHANG A B, WANG S J, et al. Design and simulation of iron analyzer onboard YH-1 Mars probe[J]. Aerospace Shanghai, 2013,30(4):164-168.
- [37] 张爱兵,孔令高,王世金,等.萤火一号火星探测器电子分析器设 计和试验[J]. 上海航天,2013,30(4):187-191.
 ZHANG A B,KONG L G, WANG S J, et al. Design and test of electron analyzer onboard YH-1 Mars probe[J]. Aerospace Shanghai, 2013,30(4):187-191.
- [38] 王劲东,赵华,周斌,等.火星空间环境磁场探测研究——"萤火一号"磁强计的研制与应用[J].物理,2009,38(11):785-792.
 WANG J D, ZHAO H, ZHOU B, et al. Martian space environment magnetic field research: development and application of the YH-1 precision magnetometer[J]. Physics,2009,38(11):785-792.
- [39] 周斌,赵华,王劲东,等.火星空间环境磁场探测研究——高精度 磁强计[J].空间科学学报,2009,29(5):467-474.
 ZHOU B, ZHAO H, WANG J D, et al. Martian space environment magnetic field investigation-high accuracy magnetometer[J]. Chinese Journal of Space Science,2009,29(5):467-474.
- [40] 孙越强,杜起飞,朱光武,等.中俄联合火星电离层星-星掩星探测
 [J]. 空间科学学报,2009,29(5):475-479.
 SUN Y Q, DU Q F, ZHU G W, et al. Joint Russian-Chinese satellite-to-satellite joint Russian-Chinese satellite-to-satellite martian radio occultation experiment[J]. Chinese Journal of Space Science, 2009, 29(5):475-479.

117

- [41] 贾瑛卓,邹永廖,薛长斌,等. 嫦娥四号任务科学目标和有效载荷 配置[J]. 空间科学学报,2018,38(1):118-130.
 JIA Y Z, ZOU Y L, XUE C B, et al. Scientific objectives and payloads of Chang'E-4 Mission[J]. Chinese Journal of Space Science, 2018,38(1):118-130.
- [42] 薛长斌,周晴,王雷,等."嫦娥4号"任务有效载荷系统设计与实现
 [J]. 深空探测学报,2017,4(6):516-521.
 XUE C B,ZHOU Q, WANG L, et al. Design and implementation of payload system in Chang' e-4 mission[J]. Journal of Deep Space of Exploration,2017,4(6):516-521.
- [43] 朱岩,白云飞,王连国,等.中国首次火星探测工程有效载荷总体 设计[J]. 深空探测学报,2017,4(6):510-514.
 ZHU Y, BAI Y F, WANG L G, et al. Integral technical scheme of payloads system for Chinese Mars-1 exploration[J]. Journal of Deep Space of Exploration,2017,4(6):510-514.
- [44] 王馨悦,张爱兵,孔令高,等. 嫦娥一号卫星太阳风离子探测器离子流量反演太阳风参数与初步结果分析[J]. 空间科学学报,2013, 33(2):143-150.
 WANG X Y, ZHANG A B, KONG L G, et al. In-flight experiment

of Solar wind ion detectors on Chang'E-1 and the Solar wind near the Moon[J]. Chinese Journal of Space Science, 2013, 33 (2) : 143-150.

- [45] 石红,田立成,杨生胜. 嫦娥一号卫星太阳风离子探测器数据分析
 [J]. 物理学报,2014,63(6):069601(1-7).
 SHI H,TIAN L C, YANG S S. Analysis of data obtained by the solar wind ion detector on board the chang'e-1 lunar orbiter[J]. Acta Physica Sinica,2014,63(6):069601(1-7).
- [46] 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 & Space Science, 2013, 80(s79 - 80): 56-63.
- [47] ZHONG J, XIE L, PU Z Y, et al. Features of solar wind ions near the Moon observed by spacecraft Chang'E-1[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(3):225-229.
- [48] 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 H²⁺ [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38 (14) : 209-216.
- [49] 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]. Advances in Space Research, 2012,50(12):1600-1606.
- [50] 崔峻,王晓倩,王晓栋,等.月球微磁层的探测[J].物理,2012,41

(6):392-397.

CUI J, WANG X Q, WANG X D, et al. Observation of lunar minimagnetospheres[J]. Physics, 2012, 41(6): 392-397.

- [51] 王洁,秦刚. 基于嫦娥一号高能粒子数据的地球磁层屏蔽效应研究[J]. 空间科学学报,2013,33(5):532-539.
 WANG J, QIN G. Study of magnetospheric shielding effect with energetic particles data from Chang' E-1[J]. Chinese Journal of Space Science,2013,33(5):532-539.
- [52] 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 Space Physics, 2015, 120(8):6559-6568.
- [53] 毛凯惠,孙延奎,张田,等. 嫦娥一号高能粒子分布数据的可视化
 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2011,23(4):682-688.
 MAO K H, SUN Y K, ZHANG T, et al. Visualizing the distribution of the energetic particle data acquired by Chang' E-1 exploration[J]. Journal Of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011,23 (4):682-688.
- [54] ZHANG T, SUN Y, TANG Z. 3D visualization of solar wind ion data from the Chang 'E-1 exploration[J]. Computers & Geosciences, 2011,37(10):1711-1718.
- [55] 张田,孙延奎,唐泽圣.嫦娥一号太阳风离子数据在月表分布的可视化[J].中国图象图形学报,2011,16(3):488-494.
 ZHANG T, SUN Y K, TANG Z S. Visualization of the distribution of the solar wind ion flux data above the moon surface based on Chang' E-1 exploration[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(3): 488-494.
- [56] XIONG J, WONG H C, WONG U H, et al. An intuitive software framework for visualizing the solar wind ion data from Chang'E-1 lunar orbiter[C]//Proceedings - 4th International Congress on Image and Signal Processing. Shanghai, China: IEEE, 2011.

作者简介:

王赤(1967-),男,研究员,主要研究方向:空间物理、空间天 气、磁层物理、日球层物理。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号(100190) 电话:(010)62586371

E-mail:cw@spaceweather.ac.cn

张贤国(1979-),男,研究员,主要研究方向:磁层物理、空间环境 探测。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号(100190) 电话:(010)62582827

E-mail:zhangxg@nssc.ac.cn

The Lunar and Deep Space Environment Exploration in China

WANG Chi^{1,2}, ZHANG Xianguo^{1,3,4}, XU Xinfeng¹, SUN Yueqiang^{1,2,3,4}

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

2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China;

4. Key Laboratory of Science and Technology on Space Environment Situational Awareness, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The payloads, data results, simulations, theoretical and applied research results of Chinese lunar and deep space environment exploration are briefly reviewed. The scientific objectives of the ongoing Mars space environment exploration and the future deep space exploration missions are also described. The exploration strategy, payload development, theoretical and simulation approaches are suggested.

Key words: space environment; space weather; deep space exploration; lunar exploration

High lights:

- The technical specifications and scientific objectives of the lunar and deep space environmental payloads since Chang'E-1 are reviewed.
- The scientific objectives of Mars space environment exploration and future deep space exploration missions are described.
- The results and analysis of Chinese lunar and deep space environment exploration are summarized.
- Prospects for the scientific problems, payload technology and theoretical development of lunar and deep space environmental exploration in China are suggested.

[责任编辑:杨晓燕,英文审校:朱恬]