

2019年深空探测热点回眸

范全林¹, 时蓬¹, 李自杰², 白青江¹, 王琴¹

1. 中国科学院国家空间科学中心空间科学与深空探测规划论证中心, 北京 100190

2. 中国科学院重大科技任务局, 北京 100864

摘要 深空探测是空间科学探索与发现的重要方式之一。2019年全球在轨工作的深空探测任务有29个, 皆为非载人航天任务, 主要开展了月球、火星和小行星等的探测、深空太阳观测及日-地L1点空间天气监测和L2点空间天文观测。在纪念人类登月50周年之际, 美国加快推动重返月球的阿尔忒弥斯计划, 中国嫦娥四号任务着陆器和玉兔二号月球车对月球背面的就位探测和巡视勘察陆续产出一批国际关注的科学成果。美国新视野号任务飞掠柯伊伯带小天体“2014 MU69”的首个科学成果揭示了该“接触双星系统”的发展、地质与构成。日本隼鸟二号任务完成对“龙宫”小行星的两次采样探测、启程返回地球。除了“史诗级”的太阳探测帕克号任务, 被“遗忘”在L1点的多个超期服役的空间天气监测科学任务如SOHO、WIND等表现依然稳定和出色。2020年, 人类将迎来探测火星的新发射窗口, 中国、美国和欧洲等即将实施的多个火星任务引人注目。

关键词 深空探测; 2019年研究热点; 空间科学; 科学发现

作为世界航天活动的重要内容之一, 人类的深空探测事业几乎与太空时代同步开启。1959年9月12日, 苏联发射月球2号(Luna 2)并于2天后击中月表、完成硬着陆, 标志着人类航天器第1次成功进入了近地轨道以外的太阳系空间, 可谓人类深空探测的原点。截至2019年12月底, 美国、俄罗斯(含苏联)、欧洲空间局、日本及中国等世界主要航天国家和机构共实施了256个深空探测任务, 其中月球任务116个, 火星任务44个^[1], 遍历了太阳系的所有行星及多个卫星, 开展了彗星、小行星探测和

采样返回, 开启了深空空间天气监测和空间天文观测。2019年, 各国在轨的深空探测任务共计29个, 包括中国的嫦娥四号和鹊桥中继星2个任务^[2], 全部为非载人航天/机器人探测任务, 主要由7个火星任务、5个月球任务、6个拉格朗日点L1/L2空间天气和空间天文任务等组成。

深空探测依托航天工程和空间技术的发展, 实现了人类憧憬数千年走出地球的梦想。历经半个多世纪, 深空探测的科学内涵在空间、时间和生命3个维度不断深化^[3]。从空间上来说, 深空探测意

收稿日期: 2019-12-31; 修回日期: 2020-01-10

基金项目: 中国科学院空间科学(二期)先导专项预研项目(XDA15010000); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-KT-2019-1)

作者简介: 范全林, 教授级高级工程师, 研究方向为空间科学发展战略和政策、空间天气学, 电子信箱: fan@nssc.ac.cn

引用格式: 范全林, 时蓬, 李自杰, 等. 2019年深空探测热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 47-64; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.01.004

味着更远、更深,既包括抵达月球、探测火星、飞向太阳系乃至恒星系空间,利用地-月或日-地拉格朗日点等特殊深空位置开展科学探索,也包括对地外天体从表面到深部的勘察和采样分析,揭示其内部结构与构成;从时间上来说,深空探测意味着看向时间的深处,通过采样、光谱等手段研究行星等天体的起源和演化、预测其未来;就生命而言,深空探测则看向人类的深处,研究生命起源和寻找地外生命乃至地外文明。

与2018年的深空探测热点相比^[4],2019年国际深空探测成果更有力支持了前述科学内涵,拓展了人类对太阳系和宇宙的认识。特别的,嫦娥四号任务即将迎来在轨一周年,取得了一批科学成果和发现,得到国际航天领域高度认可,已获2个国际奖项^[5]。新视野号任务探索了柯伊伯带微行星“2014 MU69”,使之成为人类迄今访问的最远天体。隼鸟二号完成对“龙宫”小行星的2次采样探测,已在返回地球的路上。2019年9月1日,第3次飞过绕日轨道近日点的帕克号于当年年底发布首批科学成果,带给科学界和公众超乎寻常的发现和惊喜,多个超期服役的空间天气监测科学任务加深了人们对空间天气源头太阳爆发的科学认知。旅行者2号完成星际穿越1年后,2019年11月发布的科学探测结果对穿越事件给予了确认。2019年7月13日发射升空的俄-德联合“光谱-RG”空间天文台,当年12月8日在日地拉格朗日L2点开启了4年巡天和2.5年定向的X射线宇宙成像观测^[6]。欧洲航天局(ESA)盖亚卫星(Gaia)已在L2点工作了9年,2019年,科学家利用2018年发布的第2批数据(DR2),并结合其他天、地基望远镜的红外和光学数据,绘出了首张银河系中心恒星群三维分布的棒状结构详图,但成因仍有待揭示^[7]。将于2020年1月30日退役的美国斯皮策空间望远镜(SST)目前(2019年12月27日)在距地球超过2.62亿km的日心轨道上运行,16年来这台空间红外望远镜取得了包括发现系外行星等多项重大科学发现,2019年,老骥伏枥的它对135个遥远星系长达200h的观测为宇宙大爆炸10亿年后再电离时期的成因提供了线索^[8]。

1 嫦娥四号是2019年深空探测亮点

嫦娥四号于2019年1月3日实现国际首次月背软着陆以来,至当年12月下旬,着陆器已进入第13月昼工作期,继续对月表线性能量转移谱、综合粒子辐射剂量及月表低频射电特征开展就位探测;“玉兔二号”巡视勘察累计逾345m,打破了尘封49年的世界纪录,成为在月面工作时间最长的无人驾驶月球车。目前,嫦娥四号任务已获得了13种、超过1.7TB的国内外科学和试验载荷的原始科学数据。通过对这些第一手数据的分析研究,以嫦娥四号任务科学研究核心团队为主的中外科学家已在《Science》等期刊发表科学论文20余篇^[9]。

其中,科研团队根据搭载的红外成像光谱仪、测月雷达、全景相机、地形地貌相机等科学仪器取得的探测数据,重构了嫦娥四号月球背面下降轨迹,对着陆点进行了精确定位^[10];获取了着陆区形貌、构造、成分等基本地质信息,发现个别探测点成分(月壤/岩石)以橄榄石和低钙辉石等矿物组分为主,证实了月幔富含橄榄石的既往推断,如图1^[11]所示。这些成果对揭示月球南极附近艾特肯盆地的地质演化乃至月亮早期演化历史、月球深部物质结构及形成机理等科学问题具有重要科学价值。此外,在月球低重力、强辐射、高温差严峻环境下,由重庆大学牵头承担、随嫦娥四号登陆月球背面的生物科普试验载荷,于2019年1月5日生长出第1株棉花种子嫩芽,完成了人类首次月面生物实验。嫦娥四号任务的这些创新被《Astronomy》评选为2019年度空间科学10大进展。

嫦娥四号任务受到中国国家领导人高度重视,在国际上被广泛关注。2019年2月20日,习近平总书记会见探月工程嫦娥四号任务参研参试人员代表时,要求大家为实现中国探月工程目标乘胜前进,为推动世界航天事业发展继续努力^[12]。2019年11月25日,嫦娥四号任务团队获得英国皇家航空学会2019年度团队金奖,成为本年度全球唯一获此殊荣的团队,也是该学会成立153年来首次向中国项目颁发奖项^[13];12月5日,在东京开幕的第三届国际月球村研讨会上,嫦娥四号探月任务获得月

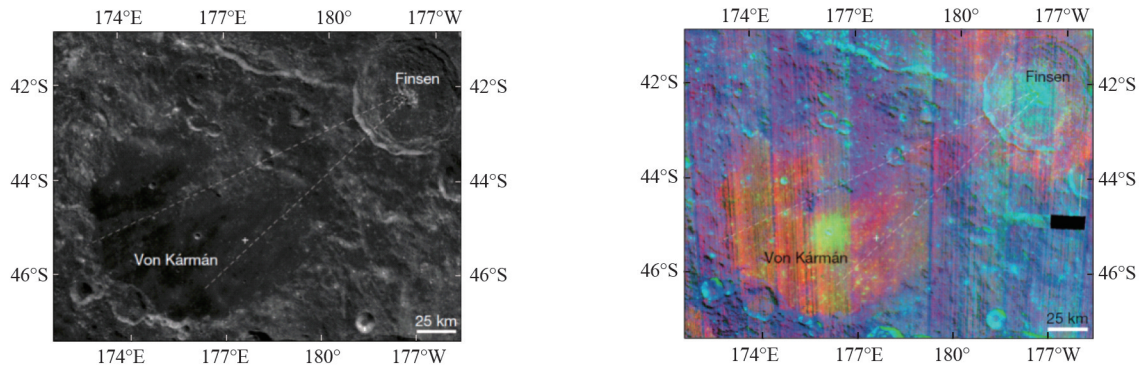


图1 冯卡门撞击坑中芬森撞击后月幔物质分布

球村协会颁发的优秀探月任务奖,成为该奖项首批获奖项目之一^[5]。

2 月球依然是2019年深空探测重头戏

2019年7月20日,是人类首次载人登月50周年纪念日。月球被视为地球第八大洲,包括美国在内的世界各国都举行了各种形式的活动,纪念人类永不磨灭的探索精神,回顾思考和展望人类飞向月球的过去、现在和将来,热议新一轮的全球探月高潮。

2019年3月,美国副总统迈克·彭斯指令美国国家航空航天局(NASA)在2024年“重返月球”,并明确指出,登上月球的首位女性和下一位男性将均为美国宇航员,用美国火箭,从美国本土发射。不同于阿波罗计划,为了2024年登月,NASA将建设访问型月球轨道空间站(LOP-G),并以此作为抵达月表或未来火星及深空探测的中转站。2019年6月,美国国家航空航天局(NASA)用阿波罗的孪生姐妹将“重返月球”命名为阿尔忒弥斯(Artemis)计划,并追加16亿美元启动^[4],明确登月地点为月球南极。南极是月球上无人探测方式研究得最为深入的区域,部分环形山的永久阴影区内保存的水冰形成于数十亿年前,未受太阳辐射及地质过程的污染,为研究早期太阳系提供了机会^[5]。与此同时,NASA遴选了9个团队分别对“阿波罗-17”任务的真空密封形式和冷冻保存的样品、“阿波罗-15”任务保存在氮气中的样本进行研究,旨在增进对月球的

理解,为接下来的月球及以远探索时代做准备^[6]。

2019年,探月小型任务与国际合作层出不穷。当年3月,NASA遴选出11个科学和技术验证载荷,计划搭载在系列商业月球着陆器任务,包括9台科学仪器和2个技术验证载荷^[7];ESA和NASA签署月球科学研究合作意向^[8]。JAXA计划开发月球基地远程建设系统^[9]。

紧随嫦娥四号任务,2019年2月,以色列的世界首个商业月球着陆器Beresheet发射成功,当年4月,失联后坠毁在月表^[10]。2019年7月22日,印度“月船2号”任务升空,其中“维克拉姆”号着陆器于2019年9月7日在月球南极距离月表2.1 km时与地球失联、软着陆失败,但搭载了8类有效载荷的轨道器目前正在100 km处绕月轨道上开展探测,任务网站上已发布了其高分辨率相机(OHRC)、地形测绘相机(TMC 2)、大气成分探测仪(CHACE 2)、双频合成孔径雷达(DF-SAR)、红外成像光谱仪(IIRS)等载荷获得的月表图像、月球外逸层⁴⁰AR(氩)等的探测数据^[11]。

2019年,其他在役的月球探测任务包括中国的嫦娥三号任务着陆器以及NASA的月球大气和灰尘环境探测器(LADEE)、月球勘测轨道器(LRO)和重力勘测和内部研究实验室(GRIL)。其中,嫦娥三号着陆器在2013年12月14日成功软着陆于月球正面,它设计寿命1年,现已超期服役,至2019年12月7日被成功唤醒,开启了第75月昼的新征程,刷新了人类航天器月面生存新纪录。

LADEE 搭载的中性质谱仪(NMS)发现撞击月球的流星体可为月球大气层短暂地注入水蒸气,有助于了解月球上水的历史、解释极区永久阴影区环形山内的水冰沉积(图2^[22])。LRO 通过对 12000 个月球环形山的观测,发现环形山底部有很厚的冰层,说明此前在 南极发现的冰沉积物可能与这些环形山底部的冰相连。月球环形山将成为月球探测的新目标,有助于解释月球上冰冻挥发物丰度之间的明显差异^[23]。作为对比,同一团队基于信使号(MESSENGER)水星激光测高仪(MLA)的观测数据,提出水星的水冰储量或许远超此前预期。他们对水星北极附近约 2000 个简单环形山的高度与直径比率进行了测量(直径约 2.5~15 km),发现更高纬度地区的环形山明显更浅,表明这些环形山底部有水冰堆积,冰层最厚约 50 m。

LRO 搭载的月球勘测轨道器相机(LROC)在月球北极的冷海(Mare Frigoris)首次发现了月海中的褶皱脊。鉴于此前认为月海约在 12 亿年前就停止收缩,但这些褶皱脊相对年轻,表明月球仍在活跃变化着,如图 3^[24]所示。

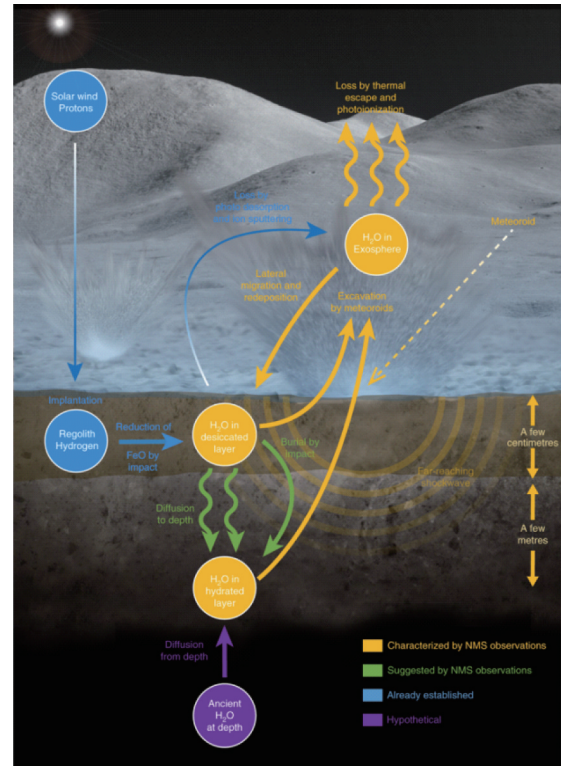


图2 LADEE 的 NMS 探测揭示月球水循环

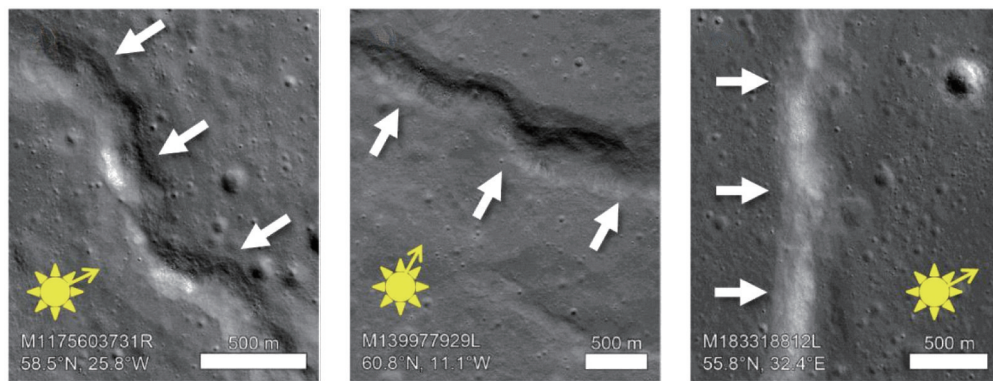


图3 冷海发现的月海褶皱脊(白色箭头)

对比 GRAIL 和 LRO 的探测数据,科学家发现月球南极艾特肯盆地地貌与月球引力不匹配,表明艾特肯盆地下埋藏着一颗巨大的嵌在月幔中的金属小行星残骸,或者存在由于盆地富含月球古老岩浆冷却凝固成的氧化物^[25-26]。

3 行星探测继续揭示重要科学发现

2019 年多个深空探测器,包括火星生命探测

计划-2016(ExoMars 2016)、好奇号(Curiosity)、洞察号(InSight)等火星任务,拂晓号(Planet-C/Akasuki)金星任务,朱诺号(Juno)木星任务等在轨运行良好,持续产出成果,对火星上水的研究取得新进展,发现了金星云层中的巨大条纹结构,发现木星磁场长期变化由行星深层大气风所驱动,揭示了土星环的质量等,在太阳系的形成、生命宜居性等科学前沿取得了重要突破。贝皮·科伦布号水星探测器(Bepi Colombo)还在借助地球、金星和水星的引

力弹弓反复调整轨道的过程中,将于2025年抵达环水星轨道。机遇号(Opportunity)火星车在火星上度过第15个生日后于2019年2月结束任务,远超90个火星日(约92 d)的设计寿命,成为迄今在火星表面工作最久的机器,它曾携手双胞胎——勇气号(Spirit)做出了重要科学发现:古代火星可能更温暖湿润,拥有孕育生命的条件。

3.1 火星震和水等研究取得重要进展

火星是迄今人类探测和着陆任务次数最多,也是最有希望和条件实现载人登陆的行星。2019年仍活跃着8个火星探测器,包括2个着陆探测器和6个轨道探测器。其中ExoMars 2016任务微量气体火星轨道器(TGO)、好奇号火星车和洞察号着陆器等,持续产出了重磅研究成果。

TGO上搭载的天底和掩星光谱仪(NOMAD)以及大气化学光谱仪组件(ACS),可用于研究火星沙尘暴对大气中水的影响,其中火星沙尘暴发生前和发生期间水分、半重水以及半重水/水分比见图4^[27]。根据TGO在轨1年的探测数据,科学家分析

了从火星地表至80 km高度的水蒸气和半重水垂直分布,认为持续几天的沙尘暴引起的升温可能是火星大气中水蒸气急剧增加的原因;首次开展的半重水与水蒸气关系的研究有助于理解控制逸散到外太空的氢和氘原子数量的过程,以及火星水存储的演变。此外,TGO研究团队根据NOMAD和ACS的数据,未能在火星大气中探测到甲烷,即发现火星大气中甲烷的浓度不会超过0.05 ppbv(体积的十亿分之一),比此前ESA火星快车和美国好奇号探测结果低10~100倍^[28]。科学家们还根据TGO上搭载的精细分辨率超热中子探测器(FREND)绘制了首张迄今分辨率最好的火星地下水分布图^[29],除了确定火星两极拥有富含水的永久冻土外,还揭示了火星局部湿润和干燥地区的细节。

好奇号在Gale陨石坑环形山盆地内发现了富含矿物盐的岩石,由浅咸水池经过反复溢流和干涸形成,是火星气候从温暖湿润过渡到寒冷干燥的证据^[30]。好奇号已经发现远处有更多倾斜岩层,未来将对其开展研究。

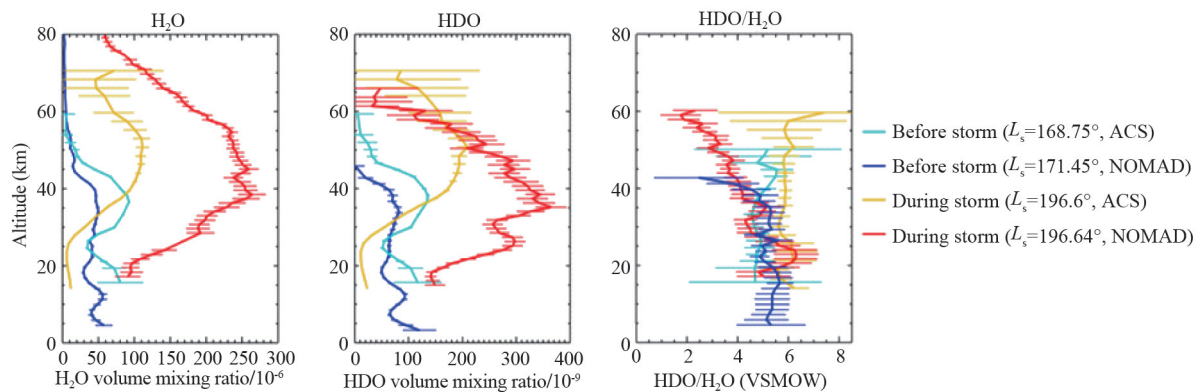


图4 火星沙尘暴发生前和发生期间水分、半重水,以及半重水/水分比

洞察号搭载的内部结构地震实验仪(SEIS,见图5)于2019年4月6日,即第128个火星日,探测到一个安静但明显的火震信号(图6),与阿波罗任务探测到的月表震动相似。科学家们判断此次震动并非由风暴等火星表面作用力造成,似乎来源于火星内部^[31]。这是在地球和月球以外第1次发现地震,标志着“火星地震学”这一新学科领域的诞生^[32]。抵达火星一年来,洞察号已经探测到322次

火星地震,有望揭开火星地壳、地幔和地核的内部结构之谜。

3.2 金星云层条纹结构被揭示

金星被厚厚的云层覆盖,遮挡了绝大部分的大气环流。研究金星的云层,将为揭示其大气环流提供非常关键的信息。2019年科学家利用拂晓号搭载的2 μm波长近红外相机IR2观测数据,发现了金星云层中的巨大条纹结构(图7),并利用“AFES-

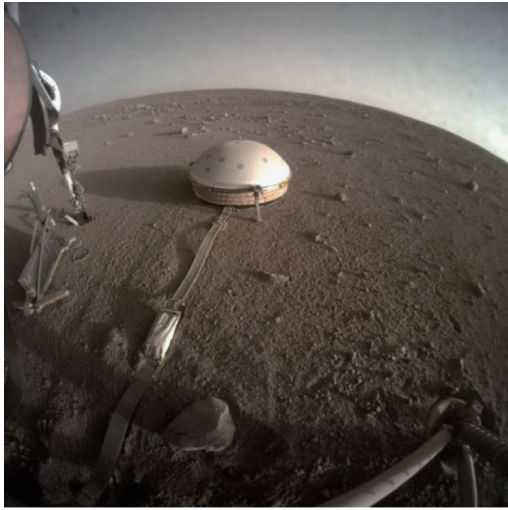


图5 洞察号圆顶内装有3个极端灵敏的火震仪设备
(图片来源: NASA/JPL-Caltech)

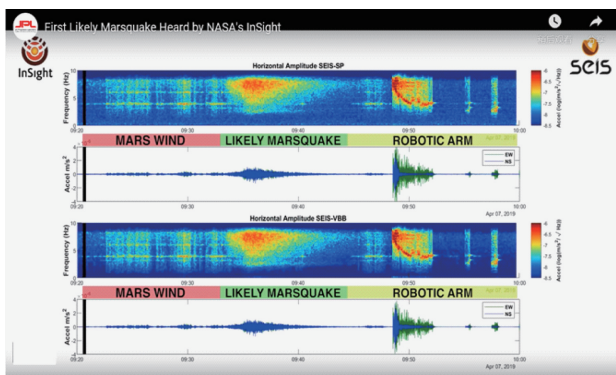


图6 洞察号着陆器首次探测到火星地震信号

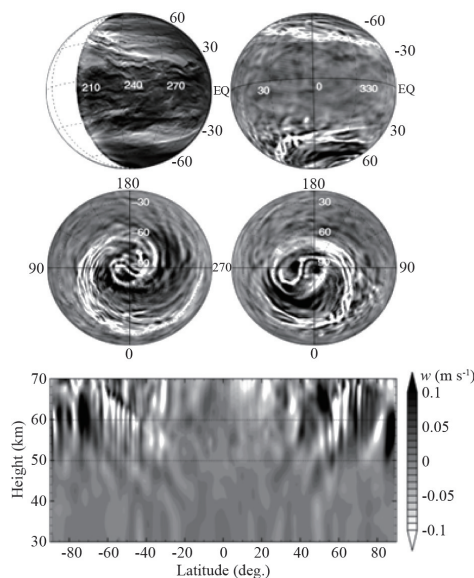


图7 金星的行星尺度条纹结构

金星”程序模拟揭示了它们可能源于两种大气波动——斜压不稳定和急流^[33]。

IR2相机首次观测到金星南、北半球存在接近对称的巨大条纹结构。在北半球,这些条纹从西北到东南方向延伸至少7700 km,每条条纹约有数百公里宽。科学家认为这种“行星尺度条纹结构”可能是金星独有的现象。金星作为地球的姊妹行星,考察金星的环境,研究金星气候的三维结构,相信会对认知地球的未来提供参考价值。

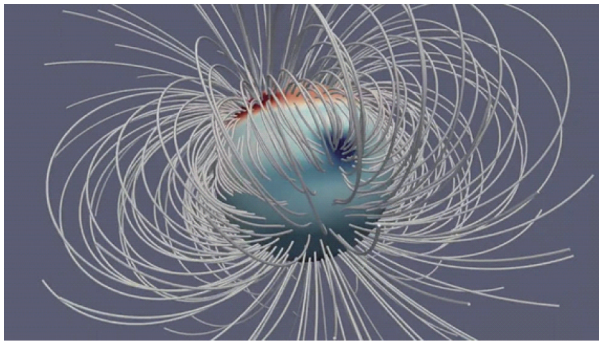
2019年12月7日,拂晓号项目经理Masato Nakamura在任务官网表示,在拂晓号发射9.5年、历经延迟和磨难成功进入金星轨道4周年之际,拂晓号探测金星不断变化的大气层的主要科学目标即将完成。

3.3 木星磁场长期变化由行星深层大气风所驱动

研究地外行星“长期变化”(secular variation)是科学家的重要追求之一,而朱诺号提供的近距离观测数据使得科学家梦想成真。2019年,朱诺号首次明确探测到木星内磁场随时间变化的情况。研究团队认为这颗气态巨行星的长期变化很可能是由其深层大气风所驱动,这一发现将有助于深入理解木星内部结构(包括大气动力学)以及破解地球磁场变化的若干未解之谜^[34-35]。

利用朱诺号搭载的磁强计前8次科学探测数据,研究团队建立了新的木星磁场模型JRM09,得到了木星磁场的3D地图。与既往的木星观测任务如先驱者10号(Pioneer 10)、先驱者11号(Pioneer 11)、旅行者1号(Voyager 1)、尤利西斯(Ulysses)号的数据进行比对,发现木星磁场在45年来发生了微小但清晰的变化,很可能是由从木星表面延伸至其内部约3000 km深处大气风的运行造成的。在这个高度,木星内部开始从气态转变为高导电性液态金属,剪切并拉伸着磁场。木星赤道附近大蓝斑地区的局部强磁场和该纬度的强纬向风(图8^[34])共同导致了木星磁场最大幅度的长期变化。

此外,科学家还利用其他航天器取得了一系列科学发现。例如,利用哈勃空间望远镜(Hubble)的可见光观测,在木卫二(Europa)表面发现了氯化钠,虽然尚不能确定氯化钠是否来自地下海洋,但对理解次表层化学仍有意义^[36]。



肉眼不可见的大蓝斑显示了木星赤道附近磁场聚集的显著特征
图8 木星磁场示意

3.4 土星环及土卫二等卫星的奥秘进一步被破解

在太阳系4个气态行星中,土星拥有庞大的卫星系统以及最为壮观、复杂的土星环。卡西尼-惠更斯任务(Cassini-Huygens mission)于2017年9月完成了撞向土星大气层的最终任务,结束了20年的探索之旅。

Cassini于2004年抵达土星后,对土星系统进行了13年的科学探测,取得了一系列重大发现。《Science》杂志在2019年6月专题发表相关科学成果,包括:土卫二(Enceladus)南极的羽流、土星E环的来源;土卫六(Titan)的甲烷循环,包括形成碳氢化合物湖泊的降雨;含有冰、硅酸盐和有机物,动态变化的土星环;土星的较差自转等^[37]。当期杂志封面即是Cassini拍摄的土卫三十五在宽约42 km的土星A环Keeler环缝的照片。

2019年,关于土星环、土星卫星新特性进一步被揭示。基于对土星环的近距离遥感观测,对于土星环结构的形成,科学家们认为很可能是由于粒子的物理特性的径向分层,而非成分不同^[38];通过测量Cassini探测器受到来自土星的引力作用,确定了土星的重力场以及土星环的质量和年龄^[39];通过Cassini对5颗卫星——土卫十八(Pan)、土卫三十五(Daphnis)、土卫十五(Atlas)、土卫十七(Pandora)和土卫十一(Epimetheus)的近距离飞越,研究团队认为这些小行星表面的光学特性是由2个竞争性过程决定的:一是土星环主系统内形成的红色物质污染,二是来自土卫二羽流喷出的冰粒子或水蒸气的堆积^[40]。通过Cassini搭载的宇宙尘埃分析仪(CDA)开展的质谱分析,在土卫二喷发出的羽状物

中发现了可产生氨基酸的含氮氧有机物(图9),反映了土卫二宜居性研究的新进展^[41]。

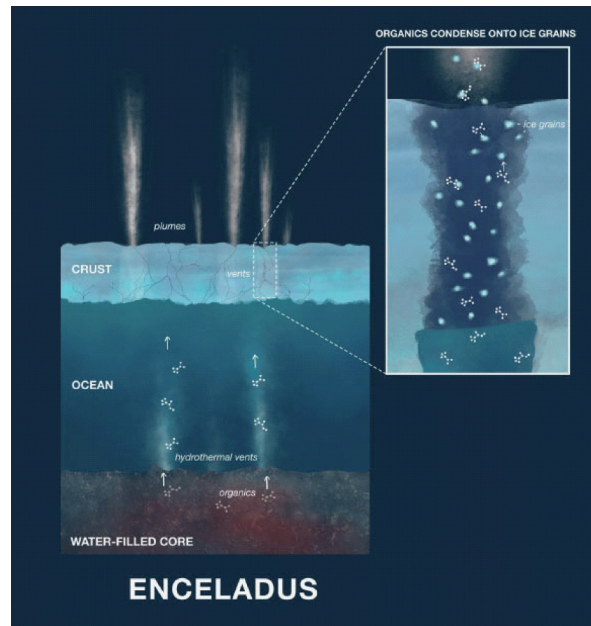


图9 卡西尼探测器发现了土卫二冰晶中的少量氮氧有机物
(图片来源:NASA/JPL-Caltech)

3.5 柯伊伯带小天体“阿罗科斯”神秘面纱被揭开

柯伊伯带是位于海王星轨道外侧、在黄道面附近的天体密集圆盘状区域,距离太阳约30 AU(AU是天文单位,地球和太阳间的距离为1 AU)。柯伊伯带内大部分天体由冷冻的挥发成分,如甲烷、氨和水组成。发射升空13年后,NASA新视野号(New Horizons)于2019年1月1日飞掠了柯伊伯带小天体2014 MU69,是目前人类航天器造访的最遥远的天体。

2014 MU69是于2014年6月26日由哈勃望远镜发现的。2019年11月11日,NASA将它正式命名为“阿罗科斯”(Arrokoth),它源于美洲原住民波瓦坦人说的阿尔贡金语中的“天空”一词,反映出人们探知天空和未知世界的渴望。此前它一度被称为“天涯海角”(Ultima Thule),含义是“超越已知世界的边界”,但引起一些媒体争议,认为它会引发与纳粹相关的联想。

根据新视野号返回的首批数据,科学家们对阿罗科斯的演化、地质和成分等进行了研究,相关成

果以《Science》封面文章的形式发表。阿罗科斯由两个不同形状的瓣组成“花生状”，在合并之前已互相潮汐锁定，两瓣大小分别为 $22\text{ km}\times 20\text{ km}\times 7\text{ km}$ 和 $14\text{ km}\times 14\text{ km}\times 10\text{ km}$ ，是迄今科学卫星探索的第1个接触双星，见图10。此外，新视野号还研究了阿罗科斯表面特征，包括亮斑和斑块、丘陵和低谷，以及环形山和深坑等，在其表面发现了水冰、甲醇和其他有机分子存在的证据，这与此前航天器探测到的大多数冰质天体的情况有较大差异^[42]。2014 MU69 可谓太阳系行星起源和演化的遗迹，有助于人们理解行星吸积形成过程。

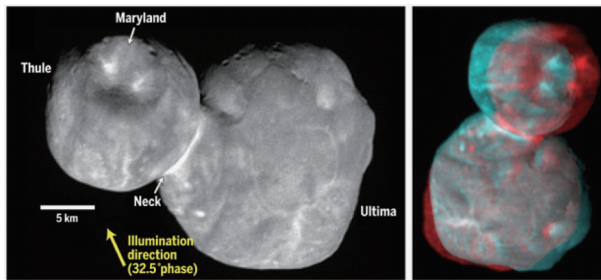


图10 多光谱可见光成像相机(MVIC)拍摄的MU69

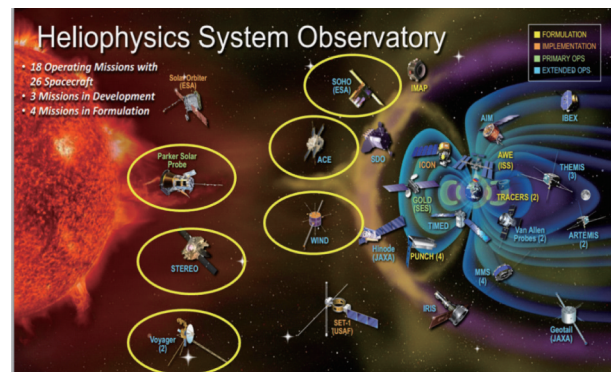
目前，新视野号离地球66亿 km，运行状况良好，还有足够的燃料和电力供它继续运行并与地球通信。它正以 5.3万 km/h 的速度继续向柯伊伯带深处进发，同时将对沿途的其他天体进行飞越探测，并就位探测柯伊伯带的带电粒子辐射和尘埃环境等。

4 太阳探测深空任务揭秘空间天气

空间天气是世界进入太空时代遭遇的新挑战，它是日地空间环境扰动变化的自然现象，能影响太空和地面关键技术系统的运行和效能，危害人类生活与健康^[43]。太阳爆发是灾害性空间天气的源头。抵近太阳探测、在日地连线拉格朗日L1点/L5点等位置开展空间天气探测，既能提升空间天气科学认知，亦能为空间天气业务预报提供预警时间。

实际上，航天强国和机构高度重视此类空间天气深空探测。2019年，有5个科学任务和1个业务卫星在遂行使命(图11)，其中：帕克号于2019年12月再次借助金星引力弹弓降低轨道，为2020年1月

的第4次抵近探测太阳做准备；在L1点则有监测空间天气的太阳风探测卫星(WIND, 1994年11月1日发射)、太阳与日球层观测台(SOHO, 1995年12月2日发射)、先进成分探测器(ACE, 1997年8月25日发射)等3个科学卫星；美国商业部国家海洋和大气管理局(NOAA)所属的空间天气预报中心(SWPC)运行的深空气候观测台(DSCOVR, 2015年2月11日发射)是世界首个空间天气业务卫星，工作位置也在L1点。此外，还有日地关系观测台前导卫星A(Stereo-A, 2006年10月25日双星发射，但后随空间观测台——Stereo-B于2016年9月23日失效)在执行科学探测。



椭圆标记了7个在轨的深空探测任务

(其中, Voyager为两个航天器: Voyager 1和Voyager 2)

图11 美国NASA的日球层物理系统观测卫星示意

(图片来源: NASA Science)

已在恒星际空间飞行的旅行者1号和旅行者2号(1号于1977年9月5日发射, 2号于1977年8月20日发射)属于日球层物理探测科学卫星, 但是它们对太阳系边际宇宙线和等离子体的探测有助于提升人们对空间天气的科学认知。除了帕克号是2018年8月12日新发射的任务外, 其余科学任务都已远远超过设计寿命, 几乎被人“遗忘”, 但它们仍呈现重要科学亮点。

4.1 帕克号2次掠日即获多个科学发现

迄今为止, 帕克号已经成功完成了3次近日点飞掠太阳探测(时间分别是2018年11月、2019年4月和2019年9月, 其6.4年设计寿命内预期近距离飞掠太阳24次), 任务团队也获2项荣誉: 2019年3

月被美国航天协会(AAS)授予2018年度尼尔阿姆斯特朗航天飞行成就奖,同年11月获颁NASA银质成就奖章。2019年12月4日,《Nature》以封面文章的形式集中推介帕克号的首批科学成果,亦即对前两次从距离太阳2400万km处(距日心约35个太阳半径处)飞掠的探测数据的研究。

利用搭载的4类先进有效载荷,即“太阳风电子、 α 粒子与质子探测器”(SWEAP)、太阳风宽视场成像仪(WISPR)、电/磁场探测仪(FIELDS)、太阳综合探测仪器包-高能粒子探测仪(IS \odot IS-EPI),帕克号已实现了多个首次发现。首次发现了人们长期寻找的“无尘区”的直接证据,即从距太阳表面1100万km开始,F冕强度向日心方向有宽约560万km的降低,此外还发现了K冕中的精细结构——太阳喷发的小等离子体泡形成部分新生的太阳风^[44];首次发现太阳风存在频繁的磁场快速翻转现象,整个过程持续数秒到数分钟,它们是太阳风中的局域行进扰动所致的S-型磁场扭结,可为揭秘日冕加热和太阳风的加速机制提供线索;与地球轨道附近观测到径向放射状太阳风不同,近日区域太阳风存在强烈的小尺度湍流和等离子体波动,太阳风径向速度存在与磁场翻转相关的连续尖峰结构,发现了近日点附近存在绕太阳快速旋转的太阳风,且其速度比标准模型的预测结果几乎快了10倍^[45];发现了从赤道区冕洞喷发的高度结构化的慢速太阳风(图12^[46]);发现了地球上无法觉察的太阳活动

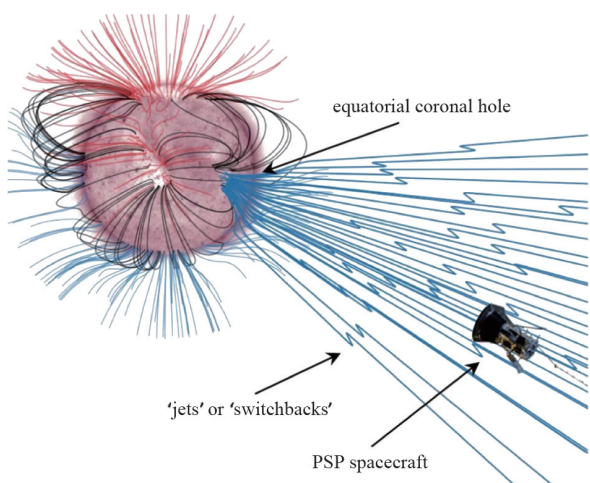


图12 帕克号首次掠日发现的太阳风磁场快速翻转(之字型)现象示意

平静期的2种微尺度的空间天气爆发事件——高能粒子暴(SEP)和日冕物质抛射(CME)^[47]。

正如2019年已92岁高龄的尤金·帕克(E.N. Parker)教授所说,即使只有两次飞掠的科学数据,帕克号的这些成果就代表了人类太阳系探测的重大里程碑^[48]。作为人类第1个真正意义上的恒星探测器,帕克号是人类深空探测的一次升级,已开始揭示太阳风和日冕大气的新特征,引发人们对恒星如何损失角动量以及随着其衰老而变慢等理论的重新思考。随着它日益抵近太阳和第25太阳活动周的来临,未来6年帕克号必将带给人们更多的发现,既为回答现有问题提供线索,亦可能带来颠覆人类认知的新发现,且拭目以待。

4.2 L1点WIND卫星超期服役有亮点

2019年9月,WIND卫星的首席科学家Lynn B. Wilson III因在无碰撞激波物理和空间等离子体动力学的杰出成就被授予NASA优异科学成就奖章。同年11月1日,WIND卫星迎来在轨25周年纪念,直接或间接使用其数据的科学出版物超过5000篇,新闻发布会上集中介绍了WIND卫星25年太阳风科学探测和运行的10大亮点,包括追踪太阳射电频率的分钟变化观测朝向地球的空间天气、反演星际尘埃粒子、确定CME是否会侵袭或错过地球、所携燃料支持再继续观测55年、卫星三冗余配置实现了高确定性的等离子体密度测量、科学家连续观测完整23/24太阳活动周的唯一来源、测量到无碰撞磁场重联、近地太阳风中存在离子回旋波、氦丰度有助于确定太阳风速度、磁通量管爆发频率观测等工作,为包括伽马射线及动力学等在内的众多太阳爆发和等离子体物理问题提供了新的认知。值得一提的是,帕克任务继承了WIND卫星使用的法拉第杯探测太阳风^[49](图13)。

4.3 旅行者2号发布星际穿越科学成果

2018年11月5日,旅行者2号成为历史上第2个进入恒星际空间的航天器,当时它距离地球约180亿km^[4]。2019年11月,《Nature Astronomy》集中发表了旅行者2号上5个仍能运行的有效载荷星际穿越时的探测结果,包括1个磁强计、2个能级不同的能量粒子探测仪和2个等离子体探测仪的数

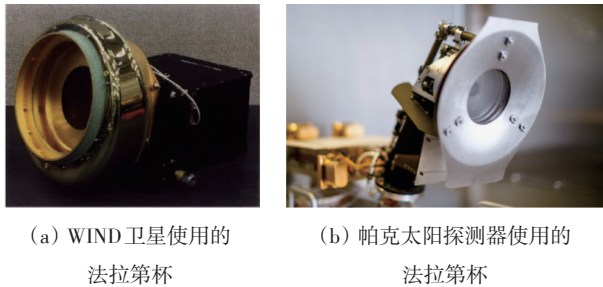


图 13 WIND 卫星与帕克太阳探测器所使用的法拉第杯

据分析,确认了旅行者 2 号进入恒星际空间事件^[50],但旅行者 2 号还没有完全抵达未扰的恒星际空间,而是像其姊妹——旅行者 1 号一样,还航行在日球层外的一个太阳风与星际风相互作用的边界层中,银河宇宙线(GCRs)在这里被调制^[51],太阳风粒子能透过边界层“泄漏”至星际空间^[52],边界附近的等离子体存在被压缩的现象^[53]。旅行者 2 号的磁场探测发现其穿越的日球层边界更薄更光滑、星际磁场更强,日鞘“磁垒”、日球层顶和邻近的星际介质形成了一个复杂的、相互联系的动力学系统,同时也确认了旅行者 1 号发现的日球层顶外的磁场与日球层内的磁场平行^[54]。

旅行者 1 号于 2012 年进入恒星际空间时搭载的等离子体仪早在 1980 年就已停止工作,这更凸显了旅行者 2 号科学发现的价值——它是未来 20 多年内最后一个星际穿越的人类航天器,是对星际介质/等离子体的首次探测,见图 14^[53]。鉴于两个航天器从不同的位置、在 11 年太阳活动周的不同

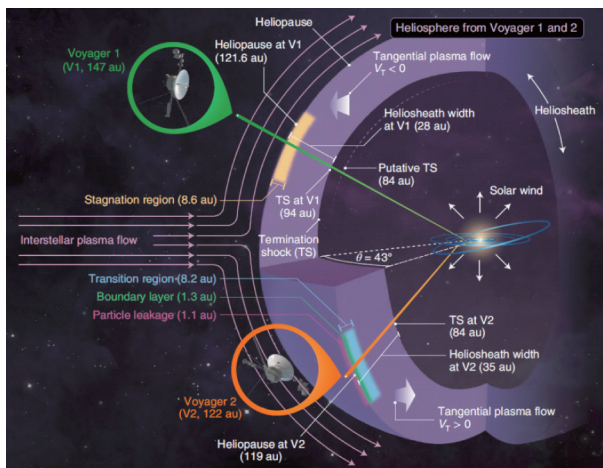


图 14 旅行者 1 号和 2 号分别从黄道面北、南侧几乎共轭的位置穿越日球层顶(HP)及其当前位置示意

时段完成星际穿越,对比它们的探测发现也有助于人们认知太阳活动对日球层的影响。发射升空 42 年后,旅行者 1 号和 2 号还会继续深入星际空间,探索并传回系外空间星际风直接探测新数据。期待旅行者以及新的太阳系边际探测任务能带给人们更多关于星际空间性质、结构等的发现。

5 小行星采样任务阶段成果超预期

2019 年,2 个执行小行星采样返回深空探测任务的航天器,即美国 NASA 的“起源、光谱解析、资源识别、安全和风化层探测器”(OSIRIS-REx, 又译冥王号,源于古埃及神话中的冥王奥西里斯)和日本 JAXA 的隼鸟二号(Hayabusa-2)分别对各自的目标小行星 101955“贝努”(Bennu,是埃及神话中的不死鸟、冥王的灵魂)和 162173“龙宫”(Ryugu)进行了探测和采样,相关新发现深化了人们对小行星起源和演化的认知,成为 2019 年空间科学探测的重要科学亮点。

2019 年 1 月 6 日,在 OSIRIS-Rex 进入环贝努的轨道一周后,探测器的导航相机首次发现了粒子喷射现象(图 15),随后对其开展的观测和研究成果

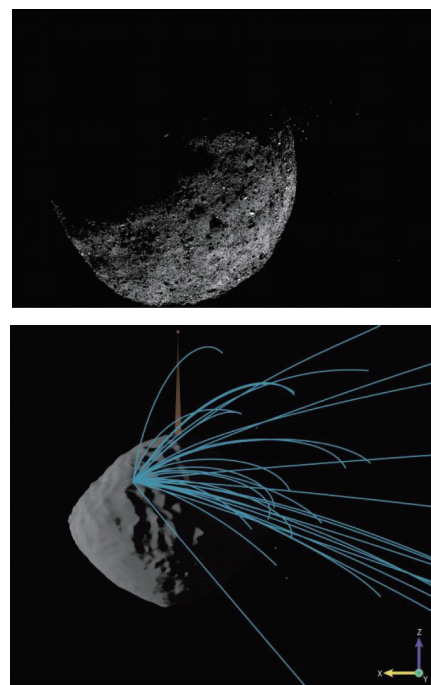


图 15 OSIRIS-REx 发现的贝努喷射粒子图像和建模示意

于12月6日发表在《Science》上。科学家发现2019年1月6日、1月19日和2月11日记录到的3次最大粒子喷发事件起源于贝努表面的不同位置,它们都发生在贝努的傍晚,喷射粒子要么短暂绕着贝努旋转、落回表面,要么逃逸至太空。可能存在3种候选机理导致粒子喷射事件:流星撞击、热应力破裂和水蒸气释放。可能不止一种机制起作用,进一步深入研究将增进人们对小行星及其类型的理解^[55]。

根据任务安排,OSIRIS-Rex对贝努的“氮气吹尘、接触即走”采样安排在2020年8月,航天器将于2021年离开贝努,于2023年9月搭载样品返回地球。科学家对4个贝努候选采样地点的近距离观测数据进行了数月评估。2019年12月13日,NASA宣布,位于贝努北纬56°、反照率和表面温度都最低的夜莺(Nightingale)陨石坑为OSIRIS-Rex的样品采集最佳地点,靠近赤道位于北纬11°、富碳物质光谱特征最强的鱼鹰(Osprey)作为后备采样地点(图16)^[56]。

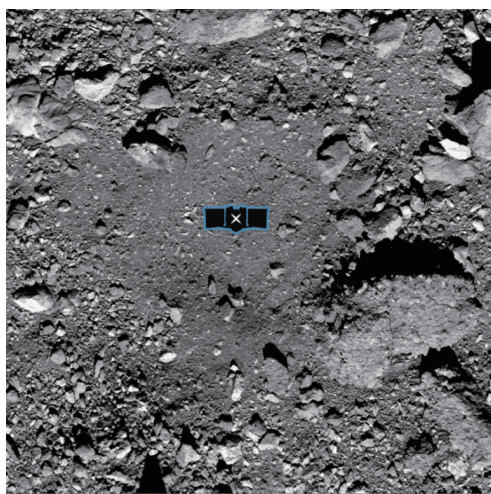


图16 OSIRIS-Rex在贝努小行星的首选采样点被确定为夜莺

实际上,在2019年上半年,在美国休斯敦召开的年度月球与行星科学会议(LPSC2019,3月18-22日)期间,《Nature》和《Science》杂志及其子刊就分别发表了多篇OSIRIS-Rex团队和隼鸟2号团队对贝努和龙宫的初步研究成果。

OSIRIS-Rex的近距离观测发现贝努的地形地

貌远比按热惯量和雷达极化率模型预期的崎岖,罕见开阔区域^[57],表面常见米级圆石,反照率低,属于碎石堆结构型小行星^[58],这也是该任务团队需要花费近1年时间调整采样计划、确定采样地点的原因。对其表面大量陨石坑的探测结果显示,贝努地表年龄约为1亿~10亿年,早于它成为近地小行星的时间^[59],暗示贝努可能起源于主小行星带。

2019年,隼鸟二号对龙宫的采样堪称深空探测任务工程实现的经典样本。2019年2月22日,隼鸟二号向龙宫表面发射1枚钽质子弹撞出碎屑,成功完成第1次采样,实现对小行星表面物质的采集;4月5日,隼鸟二号向龙宫表面投下撞击器(SCI),炸出一个直径超过10 m、深2~3 m的人造陨石坑;3个月后的7月11日,成功完成第2次采样,实现对小行星地下新鲜岩石样品的采集。这也是人类首次在小行星上成功完成多次着陆采样,首次采集到次表层地下样品,有望为太阳系早期历史和演化、发现构成生命有机物以及寻找地球生命起源提供线索。

近距离探测龙宫的成果表明,它具有高的孔隙率,呈现出碎石堆结构小行星特征^[60];它搭载的近红外光谱仪(NIRS3)发现龙宫表面只在2.72 μm处有很窄的V型吸收,说明其表面普遍存在含羟基的水合矿物(结构水),但几乎没有液态水和水冰存在^[61],某种程度上辜负了科学家对龙宫名字的预期。根据对龙宫地形地貌、物性和成分等探测的综合分析表明,龙宫的母体可能经历过水蚀、热变质、多次撞击以及碎块重新吸积过程(图17),暗示龙宫可能不像柯伊伯带阿罗科斯那样,并不是比较理想的原始星子^[62]。

2019年11月13日,隼鸟二号携带可谓太阳系“时间胶囊”的珍贵样品,启程返回地球。返回地球时拍摄的龙宫见图18^[63]。它计划将于2020年底在澳大利亚的乌美拉(Woomera)沙漠试验场着陆,与10年前隼鸟一号的返回舱为同一个着陆区。临别之前,隼鸟二号还完成了一项令人叫绝的科学实验:向龙宫投放了已故障的最后一枚巡视器MINERVA-II2和两个直径为10 cm的标记球TM-E、TM-C,通过观察它们在龙宫微弱引力下的运动状态改进提升

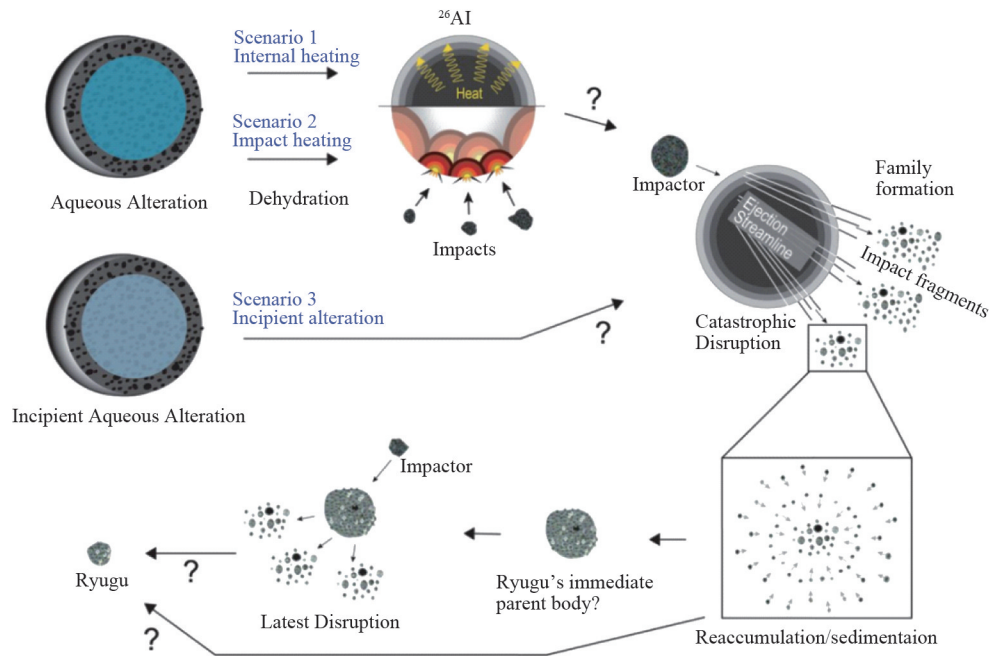


图 17 龙宫形成示意

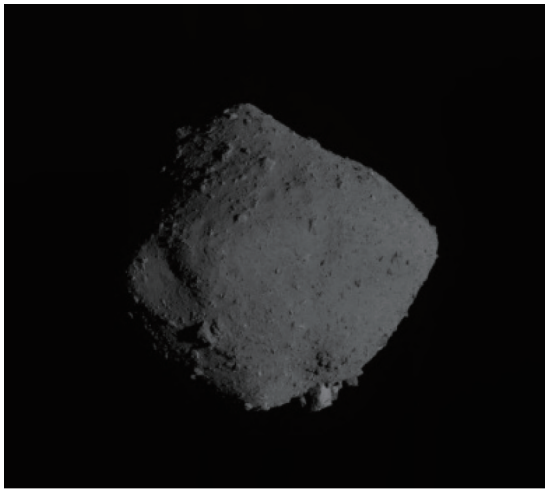


图 18 隼鸟二号返回地球时光学导航相机拍摄的龙宫

龙宫的重力场模型,同时也是迄今世界首次向地外天体成功投放的人造卫星。任务团队用人类最早的两颗人造卫星——斯普尼克1号(Sputnik 1)和探险者1号(Explorer 1)命名了两枚标记球。

迄今两个小行星采样任务工程实施比较顺利,初步的科学成果已揭示出小行星复杂的地质活动和演化历史,更重头的返回样品的实验室分析值得期待。

6 国际合作成为当下和未来深空探测的重要特征

与20世纪冷战时期的美苏太空竞赛不同,进入21世纪,国际合作成为深空探测科学任务的显著特征。飞抵月球及以远的太阳系和宇宙空间开展深空探测是人类共同的目标和诉求,其难度大、成本高,需要投入大量人力、物力、财力,动辄耗资数十亿美元,开展国际合作成为深空探测的主流。

例如,2018年以来,美国加快了LOP-G建设^[64],2019年实施“重返月球”的阿尔忒弥斯计划。LOP-G是由NASA主导,ESA、Roscosmos、JAXA、加拿大国家航天局(CSA)及澳大利亚航天局(ASA)等参与研发的深空门户,用以实现航天员在月球轨道和月面上长期驻留以及经月球中转往返火星及深空开展科学探索,同时兼顾空间安全和商业航天。火星探测方面,俄罗斯与欧洲合作开展Exo-Mars计划,旨在寻找火星生命;水星探测方面,欧洲、日本联合的贝皮·科伦布号探测器正前往水星;在小行星探测方面,德国、法国和美国等多个国家参与了日本的隼鸟二号任务。

在深空探测领域,随着嫦娥四号国际载荷等项

目的成功实施,中国也初步积累了相关国际合作经验。2019年4月18日,国家航天局向瑞典、德国、荷兰交接嫦娥四号载荷数据,并向全球发布嫦娥六号及小行星探测任务合作机遇公告^[65]。同年9月,在中俄总理第24次定期会晤期间,双方签署协同实施嫦娥七号月球极区探测任务和月球-资源轨道器(Luna 26)任务合作协定、建立联合月球与深空探测数据中心协定等多项空间合作双边协议。这表明中国主动提出国际合作方案,打造合作平台,迈开了向深空探测领域国际合作的新步伐。

7 多个航天国家更新深空路线图

2019年,NASA阿尔忒弥斯计划进一步深化:2024年前为第1阶段,实现美国宇航员踏足迄今无人造访的月球南极,首个任务阿尔忒弥斯1号无人试验飞船计划不早于2020年11月发射;第2阶段聚焦月表就位资源获取,提供燃料和生命供给,实现人类长期驻留月球,为载人登陆火星提供验证^[66](图19)。此外,NASA也于2019年6月遴选出新前沿计划(New Frontiers)的新任务——“蜻蜓”(Dragonfly)旋翼飞行器,这是继新视野号、朱诺号、冥王星号之后的第4个任务,拟于2026年发射,2034年抵

达土卫六(Titan),对多个地点采样和探测,搜寻生命起源和存在的迹象^[67]。

ESA在目前实施的宇宙憧憬计划(Cosmic Vision)中新遴选一项快响型任务(F-Class)——彗星拦截器(Comet Interceptor),计划于2028年搭载中型任务(M4)系外行星大气遥感红外大规模巡天(Ariel)发射升空,在日地连线L2点等候首次访问内太阳系的长周期原始彗星或来自其他星系的星际闯入者^[68]。ESA还启动了第4轮空间科学长期规划“旅程2050”(Voyage 2050)的制定工作^[69],规划周期为2035-2050年,包括3项大型任务、6~7项中型任务和若干小型任务及机会任务。“旅程2050”规划制定坚持自下而上、同行评议的原则,将于2020年中提交最终建议。在2019年11月底举行的ESA部长级理事会Space19+上,欧盟各国同意在未来3年向ESA提供总额约125亿欧元的资助^[70],比过去3年增加20%,重点投资深空与月球任务,加深人类对宇宙、对自己是谁以及来自何处的理解,主要包括空间引力波探测任务“激光干涉仪空间天线”(LISA)将与“雅典娜”X射线天文台(ATHENA)协同观测、为LOP-G项目提供重要的运输和居住模块、与NASA合作推动火星采样返回(MSR)等,但ESA规划的2025年发射空间天气业

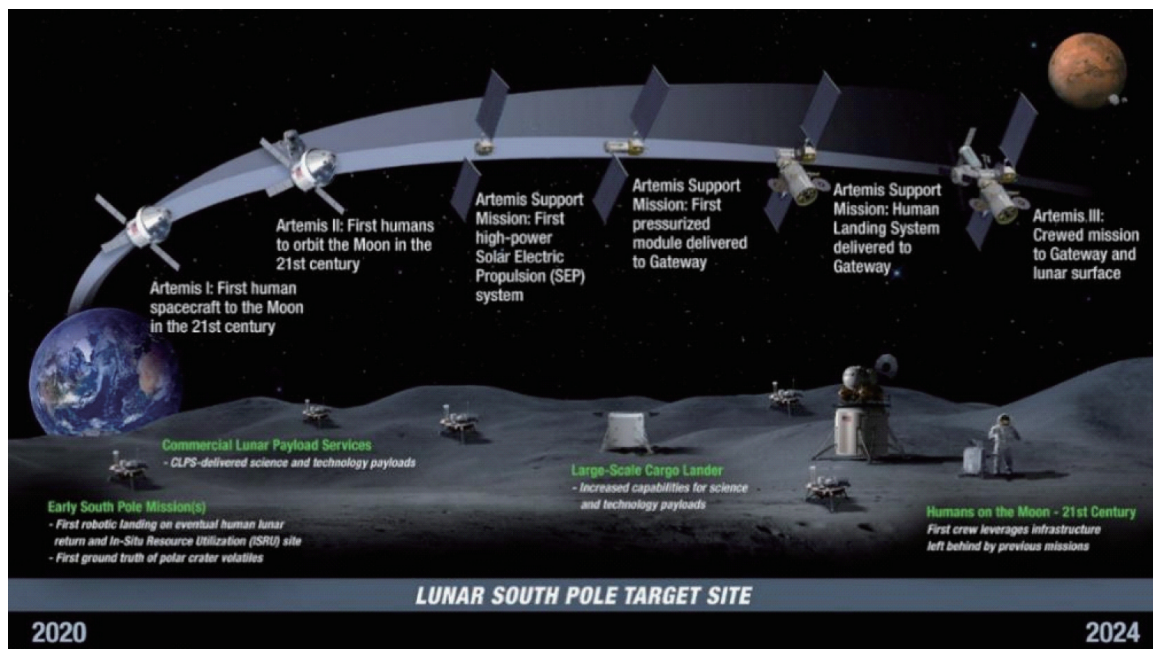


图19 阿尔忒弥斯载人月球计划路线(图片来源:NASA)

务卫星拉格朗日 L5 点任务未获本次会议通过。

俄罗斯联邦航天局(Roscosmos)公布了与俄罗斯科学院(PAH)联合制定的《月球综合探索与开发计划草案》^[71],全面阐述了未来4阶段月球探测和开发路线图。其中第1阶段(2019—2025年)主要利用国际空间站(ISS)在内的多种平台开发月球探测所需的关键技术,参与建造和运营国际近月轨道站;第2阶段(2026—2030年),启动月球基地建设国际合作,利用可重复使用的自动着陆器和载人轨道飞行器实施近月轨道飞行,多次采集土壤,建立月球研究网络。

日本于2019年5月制定了新版的《空间科学和探索路线图》^[72],强调从推动整个日本空间科学与探索的战略高度遴选任务,积极参与NASA和ESA发起的大型国际合作计划,如NASA宽视场红外巡天望远镜(WFIRST)、ESA木星冰卫星探测器(JUICE)和LISA等。在太阳系探测领域,要确立隼鸟号在小行星探测方面的优势,实现日本在该领域的领导地位;采取在轨和着陆两种方式开展行星探测,通过科学工程和国际合作,实现与欧美不同的独特探索路径。根据文部科学省发布的2020财年预算,在空间科学领域重点支持月球探索智能着陆器(SLIM)、火星卫星探测器(MMX)等。

加拿大政府发布了国家航天战略^[73],聚焦人工智能、深空机器人系统、对地观测能力和从ESA寻求新项目,并成为首个正式宣布加入NASALOP-G项目的国家,负责研制“加拿大机械臂-3”(Canadarm-3)新一代人工智能机器人。

8 火星探测将是2020年深空探测的主线

据不完全统计,2020年全球重要的空间科学发射任务约10次,深空探测任务是重头戏,主要集中在行星科学,包括4次火星探测和1次月球探测,此外还有空间太阳物理学和空间天文学任务各1次^[74]。

2020年将是火星探测的爆发期,中国首次火星探测任务(HX-1,图20)^[75]、NASA的火星2020任



图20 中国首次火星任务着陆器悬停避障试验
(图片来源:新华网)

务(Mars 2020)^[76]、ESA和Roscosmos合作的火星生物学任务2020(ExoMars 2020)^[77],以及得到日本大力支持的阿联酋的希望号(Mars Hope)^[78]等,将利用时隔26个月再次出现的火星探测窗口,于2020年7月下旬至8月上旬陆续从地球不同航天发射场启程,2021年上半年进入火星轨道,围绕生命迹象、空间环境与气候、地质及生存保障等行星科学重大前沿问题开展探测。

月球探测方面,作为中国探月工程“绕、落、回”三步走目标的最后一次任务,嫦娥五号预计2020年底发射,在月球正面月海风暴洋北缘的吕姆克山附近软着陆,开展着陆区的形貌探测和地质背景勘察,完成中国首次地外天体无人自动采样,并返回2 kg样品。美国阿尔忒弥斯计划首个任务阿尔忒弥斯1号无人试验飞船计划不早于2020年11月发射,将为后续任务开展月球南极艾肯盆地地质学研究、就位探测月球水冰等资源奠定基础;美国首个获允登月的商业航天企业月球快递公司(Moon Express)计划在2020年7月向月球南极发射机器人探测器,并在2021年建立月球永久研究站,将月球样本返回地球。

在太阳深空探测方面,ESA和NASA联合研制的太阳轨道探测器(Solar Orbiter)计划于2020年2月6日凌晨(UTC)发射。它设计寿命7年,是ESA宇宙憧憬计划(Cosmic Vision,2015—2025年)的第1个中型任务(M1)。任务运行初期(2021年11月前),探测器将借助行星引力弹弓(2次金星、1次地球)辅助变轨技术,于2022年在距离太阳4200万

km的水星内侧黄道面轨道上近距离探测太阳;任务后期及延寿阶段,它将借助金星引力逐渐抬高轨道倾角(与黄道面)至 33° ,直接探测太阳极区,并与帕克号实现对太阳的协同观测,倍增人们对空间天气源头太阳爆发的认知,促进恒星和星系演化等天文前沿。

送走2019年,21世纪的1/5即将成为历史。继陆、海、空、天之后,深空日益成为探索宇宙奥秘、和平利用太空的第五疆域。勾勒时空四维(4D)太阳系的全景,从月球到火星再到更深远的日球层顶,发现未知是根本原动力,科学牵引、创新技术的双轮驱动,将使人类在深空探测的路上行稳致远。

参考文献(References)

- [1] List of solar system probes[EB/OL]. [2019-12-26]. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Solar_System_probes.
- [2] David D, Terri D. Space missions in 2020[J]. Australian Sky & Telescope, 2020, 1: 36-37.
- [3] 万卫星, 魏勇, 郭正堂, 等. 从深空探测大国迈向行星科学强国[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(7): 748-755.
- [4] 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.
- [5] 华义, 邓敏, 梁赛玉. 嫦娥四号任务再获国际奖项[EB/OL]. (2019-12-05)[2019-12-10]. http://www.xinhuanet.com/2019-12/05/c_1125313376.htm.
- [6] Spektr-RG commences sky scanning[EB/OL]. (2019-12-11) [2019-12-30]. <http://en.roscosmos.ru/21145/>.
- [7] Anders F, Khalatyan A, Chiappini C, et al. Photo-astrometric distances, extinctions, and astrophysical parameters for Gaia DR2 stars brighter than $G=18$ [J]. Astronomy & Astrophysics, 2019, 628: 1-32.
- [8] Barros S D, Oesch P A, Labbé I, et al. The GREATS $H\beta+[O\text{ III}]$ luminosity function and galaxy properties at $z\sim 8$: Walking the way of JWST[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019, 498(2): 2355-2366.
- [9] 嫦娥四号任务科学成果交流会在京举行[EB/OL]. (2019-11-25)[2019-12-10]. <http://cheos.org.cn/n132/n230/n18088/c6808288/content.html>.
- [10] Liu J J, Ren X, Yan W, et al. Descent trajectory reconstruction and landing site positioning of Chang'E-4 on the lunar farside[J]. Nature Communications, 2019, 10: 4229-4238.
- [11] Li C L, Liu D W, Liu B, et al. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials[J]. Nature, 569: 378-382.
- [12] 习近平会见探月工程嫦娥四号任务参研参试人员代表[EB/OL]. (2019-02-20)[2019-12-10]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2019-02/20/c_1124142092.htm.
- [13] 嫦娥四号任务团队获英国皇家航空学会金奖[EB/OL]. (2019-11-27)[2019-12-10]. http://www.xinhuanet.com/mrdx/2019-11/27/c_138586399.htm.
- [14] NASA seeks \$1.6B to jump start new moon shot program called 'Artemis'[EB/OL]. (2019-05-13)[2019-12-10]. <https://www.al.com/news/2019/05/nasa-seeks-16b-to-jump-start-new-moon-shot-program-called-artemis.html>.
- [15] Moon's south pole in NASA's landing sites [EB/OL]. (2019-04-16) [2019-12-10]. <https://www.nasa.gov/feature/nasa-selects-teams-to-study-untouched-moon-samples>.
- [16] NASA selects teams to study untouched Moon samples [EB/OL]. (2019-03-12)[2019-12-10]. <https://www.nasa.gov/feature/nasa-selects-teams-to-study-untouched-moon-samples>.
- [17] NASA selects experiments for possible lunar flights in 2019[EB/OL]. (2019-02-22)[2019-12-10]. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-selects-experiments-for-possible-lunar-flights-in-2019/>.
- [18] ESA and NASA to team up on lunar science[EB/OL]. (2019-03-28) [2019-12-10]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ESA_and_NASA_to_team_up_on_lunar_science.
- [19] The JAXA space exploration innovation hub center co-produces results on remote and automatic Control to Build Lunar Base[EB/OL]. (2019-03-28)[2019-12-10]. <https://global.jaxa.jp/press/2019/03/20190328a.html>.
- [20] Beresheet a private Israeli moon mission[EB/OL]. [2019-12-10]. <https://www.planetary.org/explore/space-topics/space-missions/beresheet.html>.
- [21] Chandrayaan-2 Latest Updates[EB/OL]. (2019-11-13) [2019-12-26]. <https://www.isro.gov.in/chandrayaan2-latest-updates>.
- [22] Mehdi B, Hurley D M, Stubbs T J, et al. Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts[J]. Nature Geoscience, 2019(12): 333-338.
- [23] Lior R, Jaahnaev V, David A P. Thick ice deposits in

- shallow simple craters on the Moon and Mercury[J]. *Nature Geoscience*, 2019(12): 597–601.
- [24] Nathan RW, James F B, Thomas R W, et al. Evidence for recent and ancient faulting at Mare Frigoris and implications for lunar tectonic evolution[J]. *Icarus*, 2019 (325): 151–161.
- [25] Peter B J, David E S, Paul K B, et al. Deep structure of the lunar south pole–Aitken Basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(10): 5100–5106.
- [26] Meghan B. Weird ‘anomaly’ at the Moon’s south pole may be a metal asteroid’s grave[EB/OL]. (2019–06–10) [2019–12–17]. <https://www.space.com/moon-south-pole-anomaly-metal-asteroid-impact.html>.
- [27] Ann C V, Oleg K, Frank D, et al. Martian dust storm impact on atmospheric H₂O and D/H observed by ExoMars Trace Gas Orbiter[J]. *Nature*, 2019, 568: 521–525.
- [28] Oleg K, Ann C V, Franck M, et al. No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations[J]. *Nature*, 2019, 568: 517–520.
- [29] Первые результаты научных приборов «ЭкзоМарс-2016» опубликованы в[EB/OL]. (2019–04–10) [2019–12–13]. <http://press.cosmos.ru/pervye-rezultaty-nauchnyh-priborov-ekzomarsa-2016-opublikovany-v-nature>.
- [30] Rapin W, Ehlmann B L, Dromart G, et al. An interval of high salinity in ancient Gale crater lake on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 889–895.
- [31] World first French SEIS instrument detects ‘marsquake’ [EB/OL]. (2019–04–23) [2019–12–13]. <https://presse.cnes.fr/en/world-first-french-seis-instrument-detects-marsquake>.
- [32] NASA’s inSight lander captures audio of first likely ‘quake’ on Mars[EB/OL]. (2019–04–24) [2019–12–13]. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-insight-lander-captures-audio-of-first-likely-quake-on-mars>.
- [33] Hiroki K, Norihiko S, Masahiro T, et al. Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 23–33.
- [34] NASA’s Juno finds changes in Jupiter’s magnetic field [EB/OL]. (2019–05–20) [2019–12–13]. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasas-juno-finds-changes-in-jupiters-magnetic-field>.
- [35] Moore K M, Cao H, Bloxham J, et al. Time variation of Jupiter’s internal magnetic field consistent with zonal wind advection[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 730–735.
- [36] Samantha K T, Michael E B, Kevin P H. Sodium chloride on the surface of Europa[J]. *Science Advances*, 2019, 5(6): 1–5.
- [37] Linda S. Cassini–Huygens’ exploration of the Saturn system: 13 years of discovery[J]. *Science*, 2019, 364 (6445): 1046–1051.
- [38] Matthew S T, Philip D N, Jeffrey N C, et al. Close-range remote sensing of Saturn’s rings during Cassini’s ring-grazing orbits and Grand Finale[J]. *Science*, 2019, doi: 10.1126/science.aau1017.
- [39] Less L, Militzer B, Kaspi Y, et al. Measurement and implications of Saturn’s gravity field and ring mass[J]. *Science*, doi: 10.1126/science.aat2965.
- [40] Buratti B J, Thomas P C, Roussos E, et al. Close Cassini flybys of Saturn’s ring moons Pan, Daphnis, Atlas, Pandora, and Epimetheus[J]. *Science*, 2019, doi: 10.1126/science.aat2349.
- [41] Khawaja N, Postberg F, Hillier J, et al. Low-mass nitrogen-, oxygen-bearing, and aromatic compounds in Enceladean ice grains[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 489(4): 5231–5243.
- [42] Stern S A, Weaver H A, Spencer J R, et al. Initial results from the New Horizons exploration of 2014 MU69, a small Kuiper Belt object[J]. *Science*, 2019, doi: 10.1126/science.aaw9771.
- [43] 魏奉思, 万卫星, 曹晋滨, 等. 空间天气科学服务和平利用空间[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [44] Howard, R A, Vourlidas A, Bothmer V, et al. Near-Sun observations of an F-corona decrease and K-corona fine structure[J]. *Nature*, 2019, 576: 232–236.
- [45] Kasper, J C, Bale S D, Belcher J W, et al. Alfvénic velocity spikes and rotational flows in the near-Sun solar wind[J]. *Nature*, 2019, 576: 228–231.
- [46] Bale S D, Badman S T, Bonnell J W, et al. Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole[J]. *Nature*, 2019, 576: 237–242.
- [47] McComas D J, Christian E R, Cohen C M S, et al. Probing the energetic particle environment near the Sun[J]. *Nature*, 2019, 576: 223–227.
- [48] Parker E N. Exploring the innermost solar atmosphere [J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 997–1006.
- [49] Lina T. 25 years of science in the solar wind[EB/OL]. (2019–11–02) [2019–12–13]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/25-years-of-science-in-the-solar-wind>.

- [50] Gurnett D A, Kurth WS. Plasma densities near and beyond the heliopause from the Voyager 1 and 2 plasma wave instruments[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 1024–1028.
- [51] Stone E C, Cummings A C, Heikkila B C, et al. Cosmic ray measurements from Voyager 2 as it crossed into interstellar space[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 1013–1018.
- [52] Krimigis SM, Decker RB, Roelof EC, et al. Energetic charged particle measurements from Voyager 2 at the heliopause and beyond[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 997–1006.
- [53] Richardson J D, Belcher J W, Garcia-Galindo P, et al. Voyager 2 plasma observations of the heliopause and interstellar medium[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 1019–1023.
- [54] Burlaga L F, Ness N F, Berdichevsky D B, et al. Magnetic field and particle measurements made by Voyager 2 at and near the heliopause[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 1007–1012.
- [55] Laughton D S, Hergenrother C W, Chesley S R, et al. Episodes of particle ejection from the surface of the active asteroid (101955) Bennu[J]. *Science*, 2019, doi: 10.1126/science.aay3544.
- [56] Sean P. X marks the spot: NASA selects site for asteroid sample Collection[EB/OL]. (2019-12-17)[2019-12-20]. <https://www.nasa.gov/press-release/x-marks-the-spot-nasa-selects-site-for-asteroid-sample-collection/>.
- [57] Laughton D S, DellaGiustina D N, Bennett C A, et al. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu[J]. *Nature*, 2019, 568: 55–60.
- [58] DellaGiustina D N, Emery J P, Golish D R, et al. Properties of rubble-pile asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 341–351.
- [59] Walsh K J, Jawin E R, Ballouz R, et al. Craters, boulders and regolith of (101955) Bennu indicative of an old and dynamic surface[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 242–246.
- [60] Watanabe S, Hirabayashi M, Hirata N, et al. Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile[J]. *Science*, 2019, 364(6437): 268–272.
- [61] Kitazato K, Milliken R E, Iwata T, et al. The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy[J]. *Science*, 2019, 364(6437): 272–275.
- [62] Sugita S, Honda R, Morota T, et al. The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes[J]. *Science*, 2019, 364(6437); doi: 10.1126/science.aaw0422.
- [63] The "Goodbye Ryugu" campaign[EB/OL]. (2019-2-22)[2019-12-17]. http://www.hayabusa2.jaxa.jp/en/topics/20191113e_SAYONARA_Ryugu/.
- [64] 王琴, 邹永廖, 范全林. 美国公布未来6年深空发射计划, 加快月球轨道空间站建设[J]. *空间科学学报*, 2018, 38(6): 844.
- [65] 国际合作谱写深空探测未来[EB/OL]. (2019-04-22)[2019-12-21]. http://www.xinhuanet.com/tech/2019-04/22/c_1124396683.htm.
- [66] 宋婷婷, 范全林, 王琴. 美国公布重返月球的阿尔忒弥斯计划科学目标[J]. *空间科学学报*, 2019, 39(6): 717.
- [67] NASA's Dragonfly will fly around Titan looking for origins, signs of life[EB/OL]. (2019-06-28)[2019-12-30]. <https://www.nasa.gov/press-release/nasas-dragonfly-will-fly-around-titan-looking-for-origins-signs-of-life>.
- [68] ESA's new mission to intercept a comet [EB/OL]. (2019-06-19)[2019-12-30]. http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/ESA_s_new_mission_to_intercept_a_comet.
- [69] VOYAGE 2050 long-term planning of the ESA science programme[EB/OL]. (2019-11-15)[2019-12-13]. <https://www.cosmos.esa.int/web/voyage-2050>.
- [70] N°22 - 2019: ESA ministers commit to biggest ever budget[EB/OL]. (2019-11-28)[2019-12-30]. https://www.esa.int/Newsroom/Press_Releases/ESA_ministers_commit_to_biggest_ever_budget.
- [71] Roscosmos: Russia's lunar program is designed until 2040[EB/OL]. (2019-09-15)[2019-12-30]. <https://www.tellerreport.com/tech/2019-09-14---roskosmos--russia-s-lunar-program-is-designed-until-2040-.SJz4oV05US.html>.
- [72] Research and development directorate[EB/OL]. [2019-12-27]. http://www.kenkai.jaxa.jp/eng/publication/pamphlet/pdf/RD2018_eng.pdf.
- [73] Exploration imagination innovation[EB/OL]. [2019-12-27]. <https://www.asc-csa.gc.ca/pdf/eng/publications/space-strategy-for-canada.pdf>.
- [74] 时蓬, 范全林. 2020年全球重要空间科学发射任务展望[J]. *空间科学学报*, 2020, 40(1): 1–4.
- [75] 耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务[J]. *深空探测学报*, 2018, 5(5): 399–405.

- [76] Mars 2020 mission[EB/OL]. [2019-12-27]. <https://mars.nasa.gov/mars2020/>.
- [77] The ExoMars rover instrument suite looking for signatures of life on Mars[EB/OL]. (2019-09-01)[2019-12-27]. <https://exploration.esa.int/web/mars/-/45103-rover-instruments>.
- [78] Jeremy R. Hope Mars mission: Launching the Arab world into the space race[EB/OL]. (2019-10-21)[2019-12-27]. <https://www.space.com/hope-emirates-mars-mission.html>.

Review of global deep space activities in 2019

FAN Quanlin¹, Shi Peng¹, LI Zijie², BAI Qingjiang¹, WANG Qin¹

1. Space Science and Deep Space Exploration Study Center, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China

Abstract In 2019, 29 probes all of which are robotic missions explored the Moon, Mars, asteroids, and the Sun, monitoring space weather at Lagrange 1, conducting astronomy observation at Lagrange 2, etc. In the 50th anniversary of human's landing on Moon, US pushed forward the Artemis Program, and China CE-4 lander's in-situ detection and Yutu 2 rover's patrol yielded promising scientific output. Besides, New Horizons' encounter of Kuiper Belt small body "2014 MU69" unveiled the geology and composition of the contact binary. Japan's Hayabusa 2 finished the sampling of Ryugu twice and started to return to Earth. Apart from Parker solar probe, several space weather monitoring missions, such as SOHO and WIND, "forgotten" at L1 in extended missions, were in great status of operation. In 2020 the launch window for Mars mission will open, and several Mars missions by China, US, and Europe-Russia, respectively will be coming into the spotlight.

Keywords deep space exploration; 2019 hotspot; space science; discovery ●



(责任编辑 王丽娜)