

2020年深空探测热点回眸

时蓬, 王琴, 白青江, 范全林

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

摘要 2020年国际深空探测事业稳步推进。回顾了2020年世界深空探测的工程成就和科学产出, 评述了中国探月工程嫦娥五号采样返回任务以及嫦娥四号/三号的成果产出, 对比了美国、中国和阿联酋3个火星探测任务, 围绕在轨的35个深空任务梳理了包括太阳探测和行星科学的多项科学发现, 讨论了深空探测发展的环境因素特别是新冠疫情的影响, 并展望了全球2021年即将实施的深空探测任务。

关键词 深空探测; 2020年研究热点; 空间科学; 科学发现

2020年注定是人类发展历史上不平凡的一年。一方面, 世界各国与新型冠状病毒肺炎(新冠肺炎)疫情的搏斗尚未终结; 另一方面, 人类探索太空的步伐又因深空探测屡获激励和新知。对比2019年的展望^[1], 2020年深空探测领域, 全球仅有不到10次空间科学发射任务的重头戏, 1个太阳抵近探测任务和3个火星探测任务均发射成功。截至2020年12月底, 全球在轨深空探测任务共计35个(表1)。2020年发射的深空探测器, 除了嫦娥五号任务历时23 d完成月球自动采样返回外, 都还在飞向太阳、火星等目标天体的漫漫旅途上。

得益于多个在轨深空探测器的高分辨率数据, 科学家对月球和小行星的形成和演化有了更新的认知; 美国与在恒星际空间的“宇宙漂流瓶”旅行者2号重新取得了联系。当人类不再满足地球摇篮, 载人登月、载人登火逐渐变成现实时, 与深空探索有关的“游戏规则”已成为各国不可忽视的公共事务。

回眸2020, 本文梳理中国月球与深空探测的重要工程进展和科学产出, 关注行星科学在金星、火星、木星等太阳系探测上的重大成果, 正视新冠肺炎疫情对世界航天发展的影响, 透过各国深空战略和发展路线图展望2021年全球深空探测任务新动向。

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-01-04

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: 时蓬, 副研究员, 研究方向为空间科学任务规划、空间科学战略, 电子信箱: shipeng@nssc.ac.cn; 王琴(共同第一作者), 副研究员, 研究方向为深空探测战略规划、组合导航, 电子信箱: wangqin@nssc.ac.cn; 白青江(共同第一作者), 副研究员, 研究方向为空间科学发展战略, 电子信箱: bqj@nssc.ac.cn; 范全林(通信作者), 正高级工程师, 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: 时蓬, 王琴, 白青江, 等. 2020年深空探测热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 69-87; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.01.005

表1 2020年在轨深空探测任务

序号	所属学科	任务名称	探测对象	状态	轨道/位置	主要所属国家/地区
1		斯皮策空间望远镜(Spitzer)	宇宙(红外辐射)		地球尾随日心轨道	美国
2	天体物理学	盖亚(GAIA)空间望远镜	银河系及以远恒星		L2点	ESA
3		光谱-伦琴-伽玛射线空间天文台(Spectra-RG)	宇宙(X射线)		L2点	俄罗斯
4		旅行者2号(Voyager 2)	外太阳系		最初轨道:6.2AU远日点;约125AU@2020.12	美国
5		旅行者1号(Voyager 1)	外太阳系		最初轨道:8.9 AU远日点;约152AU@2020.12	美国
6		太阳风探测器(WIND)	太阳风		L1点 halo 轨道	美国
7	日球层物理学	太阳和日球层物理天文台(SOHO)	太阳		L1点	ESA
8		先进成分探测器(ACE)	日冕、太阳风和其他行星际粒子		L1点	美国
9		日地关系天文台(STEREO)	太阳和CMEs		大椭圆轨道	ESA
10		帕克号太阳探测器(Parker)	太阳		0.73 AU远日点, 0.046 AU近日点	美国
11		太阳轨道器(Solar Orbiter)	太阳		0.91AU远日点, 0.28AU近日点	ESA
12		火星奥德赛号(Mars Odyssey)	火星	科学探测	环火轨道	美国
13		火星快车号(Mars Express)	火星		环火轨道	ESA
14		火星勘测轨道器(MRO)	火星		环火轨道	美国
15		新视野号(New Horizons)	冥王星系统和柯伊伯带		最初轨道:木星借力轨道	美国
16		月球勘测轨道器(LRO)	月球		环月轨道	美国
17		拂晓号(Planet-C/Akatsuki)	金星		环金星轨道	日本
18		朱诺号(Juno)	木星		环木星轨道	美国
19		火星科学实验室/好奇号(MSL/Curiosity)	火星		火表	美国
20	行星科学	火星轨道探测器曼加里安号(MOM/Mangalyaan)	火星		环火轨道	印度
21		火星大气与挥发物演化任务(MAVEN)	火星		环火轨道	美国
22		嫦娥三号(玉兔号)	月球		月表	中国
23		隼鸟2号(Hayabusa 2)	小行星		环 Ryugu 小行星轨道&小行星表面	日本
24		火星生命探测计划2016-痕量气体轨道器(ExoMars 2016-TGO)	火星		环火轨道	ESA
25		起源、光谱解析、资源识别、安全和风化层探测器(OSIRIS-REx)	小行星		环Bennu小行星轨道	美国
26		洞察号(InSight)	火星		火表	美国

表1 2020年在轨深空探测任务(续)

序号	所属学科	任务名称	探测对象	状态	轨道/位置	主要所属国家/地区
27		鹊桥中继卫星(Queqiao)	月球	巡航	环月轨道	中国
28		贝皮·科伦坡号(BepiColombo)	水星		环水星轨道	ESA
29		嫦娥四号/玉兔二号	月球	科学	月表	中国
30	行星科学	月船2号(Chandrayaan-2)	月球	探测	环月轨道	印度
31		希望号(Hope)	火星		环火轨道	阿联酋
32		天问一号	火星	巡航	环火轨道&火表	中国
33		火星2020/毅力号(Perseverance)	火星		火表	美国
34	空间地球科学	深空气候观测站(DSCOVR)	空间天气	科学探测	L1点	美国
35	技术验证	伊卡洛斯号(IKAROS)	太阳帆技术验证	巡航	金星转移轨道,环日轨道	日本

1 月球探测中国工程成就斐然

虽然国际电信联盟(ITU)和国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)等组织规定深空为距离地球大于或等于 2.0×10^6 km的空间,定义其以远的航天活动为B类任务(即深空任务)^[2],但月球作为航天器和人类离开地球轨道、进入太阳系和宇宙空间的第一级台阶,并考虑进入太空的成本以及地外天体进入、下降、着陆和返回(EDL&A)的技术门槛等因素,将月球探测作为深空探测的起点仍不啻为一个选择。

随着嫦娥五号任务的圆满成功,中国成为世界上第3个能从月球采样返回的国家,继1972年美国“阿波罗17号”和1976年苏联“月球24号”采样返回任务之后,科学家44年来再次获得全新的月球样品。2020年月球上在役运行的还有4个任务的探测器,分别是:美国的月球勘测轨道器,印度的月船2号轨道器,嫦娥三号着陆器,以及嫦娥四号的着陆器、玉兔2号月球车和鹊桥号中继星。嫦娥三、四、五号任务的成功实施,使中国成为新世纪唯一实现月球表面软着陆并开展科学探测和样品返回的航天国家,中国航天在深空探测的路上成就斐然。

1.1 嫦娥五号实现人类44年来再次月球采样返回

嫦娥五号任务2020年11月24日4:30从海南文昌发射升空,样品返回舱2020年12月17日1:59

在内蒙古四子王旗着陆,它作为中国复杂度最高、技术跨度最大的航天系统工程,首次实现了中国地外天体采样返回,是中国探月工程的又一重要里程碑,圆满实现了第一阶段“绕”“落”“回”3步走的目标。本次任务创造了多项中国首次,包括地外天体采样与封装、月球轨道无人交会对接和样品转移、建立中国月球样品的存储分析和研究系统等,必将为深化人类对月球成因和太阳系演化历史的科学认知作出贡献。

嫦娥五号选取的着陆点远离美国阿波罗计划的6个采样点以及前苏联月球号计划的3个采样点^[3],具体位于月球正面西北角的一个火山穹隆区域——吕姆克山(Mons Rümker)上。从更大范围看,吕姆克山属于月球正面最大的月海风暴洋(Oceanus Procellarum),但迄今从未有航天器到过,留存有大约13亿~20亿年前的玄武岩和月壤。

鉴于20世纪美国载人登月、苏联自动采样返回的月球样品的形成时间几乎都早于30亿年前,而相对于非常不均一的月球表面,它们的采样点也仅能代表月表约5%~8%的面积。为全面重建月球的地质演化史,科学家亟需来自不同地域、不同类型的样本来获取更多关于月球的信息,这也正是嫦娥五号的重大科学目标所在,理论上嫦娥五号将返回有史以来最年轻的新样本,将有助于更好地了解地球上已存在多细胞生物时(12亿年前地球上已

有最低等的真核生物-绿藻出现)月球上发生了什么(图 1^[4])。

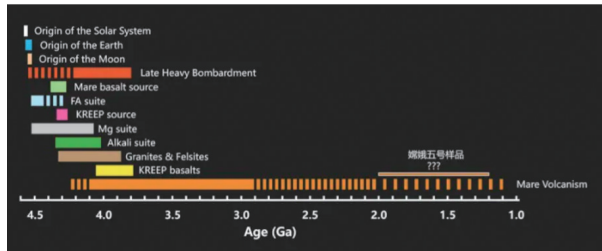


图1 月亮形成演化历史

此外,嫦娥五号有效载荷分系统共配置了7种有效载荷,包括全景及着陆相机系统、月壤结构探测仪和月球矿物光谱分析仪等,它们对着陆区的就位探测数据不仅能为返回样品提供关键的地质背景信息,而且进一步分析对于揭示月球次表层结构、月表光谱特征和物质成分等也很有价值。

1.2 嫦娥四号首次表征月表辐射环境

在遥远的月球背面,嫦娥四号着陆器和玉兔二号月球车和着陆器分别于2020年12月21日19:22分和22日5:00完成第25月昼工作,按地面指令完成月夜模式设置,进入月夜休眠。截至2020年12月22日,嫦娥四号着陆器和玉兔二号月球车已在月面工作719 d,月球车累计行驶600.55 m^[5]。

2020年6月,因首次实现人类月背软着陆和月背中继通信的突破,嫦娥四号任务团队获国际宇航联合会(IAF)2020年度世界航天奖。一年来,以中国科研人员为主的国际科研团队利用嫦娥四号科学数据,取得了众多原创成果。利用玉兔二号的测月雷达,首次揭示出月球背面着陆区域地下40 m的分层结构,发现地下物质由低损耗的月壤物质和大小不同的大量石块组成,有望为月背地质演化研究带来新的启示^[6]。利用玉兔二号的可见光-近红外成像光谱仪首次获取了月壤在月表原位状态下的光度特性^[7],对于准确反演着陆区物质成分和丰度至关重要,也为轨道数据的光度校正提供了关键的地面真值。利用玉兔二号搭载的中-瑞典联合研制的中性原子探测仪(ASAN),首次在月表开展能量中性原子的就位探测,揭示了太阳风与月表的微观相互作用机理^[8]。尤为重要的是,着陆器搭载的

中德联合研制的月表中子与辐射剂量探测仪(LND)实现了人类首次月表就位粒子辐射环境探测^[9](图2),科学家发现月球表面的粒子辐射剂量当量是火星表面和空间站内部的2倍、一次航班的5~10倍、地球表面(北京)的300倍。鉴于月球没有像地球一样的大气和磁场,银河宇宙线(GCR)可以轻松到达月球表面,而当太阳活动爆发时,空间辐射也会极大增强。因此,相关研究成果为中国后续的嫦娥计划,特别是“载人登月”辐射危害的前期评估和相应的辐射防护提供了重要依据。

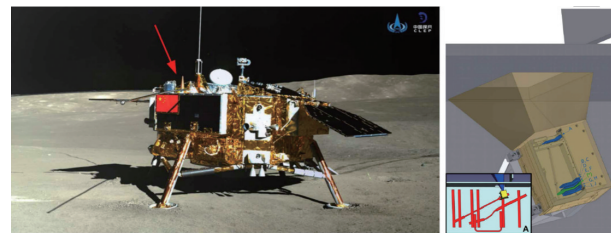
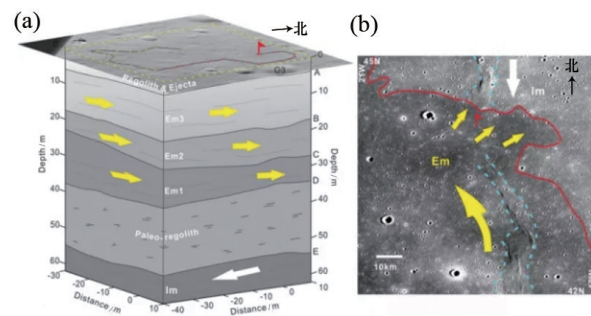


图2 嫦娥四号着陆器搭载的月表中子与辐射剂量探测仪(LND,左)及LND传感器头和调节装置示意(右)

2013年12月2日发射的嫦娥三号探测器已处于“退役”状态(长管阶段),但着陆器部分科学载荷仍在工作,科学数据持续产出成果。通过分析低频雷达浅层数据,推测出月球雨海(Mare Imbrium)北部年轻的爱拉托逊纪(Eratosthenian Period)熔岩流具有多期性,并对一些构造演化提供了新的约束^[9](图3)。



注:蓝虚线为皱脊,白色和黄色长箭头指示熔岩流方向

图3 嫦娥三号探测区三维地层模型(a)及爱拉托逊纪月海物质流动方向示意(b)

1.3 月球探测成果深化地月关系认知

2020年8月20日,印度空间研究组织(ISRO)网站刊文总结月船2号轨道器搭载的8台有效载荷

在轨运行1年的科学进展。在经过同行评议后,月船2号的第一批探测数据已于2020年12月24日正式公布^[10-11]。ISRO还表示轨道器健康、子系统性能正常,有足够的燃料来维持大约7年的运行。双频合成孔径雷达(DFSAR)继续获得了月球南北两极的水冰观测数据,在L和S波段生成了月表图像,其全极化成像能力为了解月球水冰沉积物性质和分布提供了新的见解。在Haworth环形山附近,有一个像素子集呈现出低介电常数和低表面粗糙度,暗示此处可能存在水冰。综合分析月船1号、2号以及美国LRO的数据,将能更好地了解月球何处及以什么形式发现水冰,以兹为未来任务提供资源。大型软X射线光谱仪(CLASS)在2020年5月29日捕获了月球X射线荧光,光谱清晰地显示出月面高地主要耐火元素(Al和Ca)的光谱特征,并具有较低含量的Mg和Fe元素(图4)。需要说明的是,当时太阳爆发了年度第2强的耀斑,这也意味着月船2号间接监测到了太阳活动。

此外,关于地月关系,有两项研究工作值得关注。利用月船1号的月球矿物绘图仪(Moon Mineralogy Mapper, M3)的高光谱反射率数据,在月球高纬度地区发现了赤铁矿^[12],它们是由地球上层大气

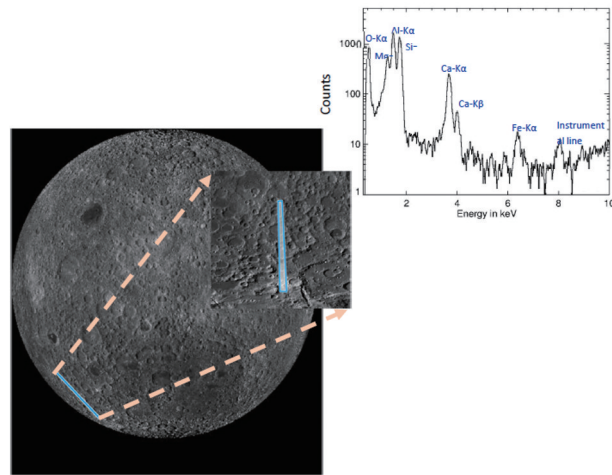


图4 X射线光谱仪(CLASS)在2020年5月29日捕获到了月球X射线荧光

中的 O_2 氧化形成的——在过去的几十亿年里,当月球处于地球的磁尾时,这些 O_2 会被太阳风持续吹到月球表面。因此不仅在面向地球的月球正面高纬度地区,月球的背面也可能存在赤铁矿(图5)。这表明地球可能在月表演化过程中扮演了重要角色。当然,如果未来的月球极区采样任务能返回赤铁矿样本,上述假设将最终得到验证,揭示地球大气在过去数十亿年间的演化。

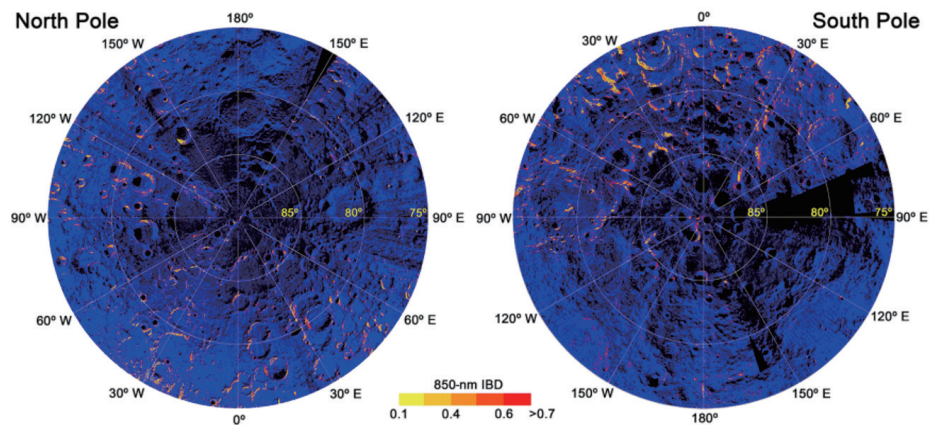


图5 利用M3在月球南/北极75°~90°探测到赤铁矿

对阿波罗任务获取的月球岩石样本进行分析后发现,月球曾经也存在磁场,并且和地球共享一个磁屏蔽^[13]。月球形成的主流理论大型碰撞事件假说(the Lunar-forming Giant Impact)认为月球是

45亿年前地球和一颗火星大小的星体“忒伊亚”(Theia)暴力相撞的产物,是地球的孪生姐妹。由于月核很小,科学家们曾认为月球不曾拥有永久性全球性磁场。但用计算机模拟40亿年前月球和地

球的磁场行为,发现地球和月球的磁场曾经有数十亿年“共享”在一起,并可能在41亿~35亿年前持续存在(图6)。

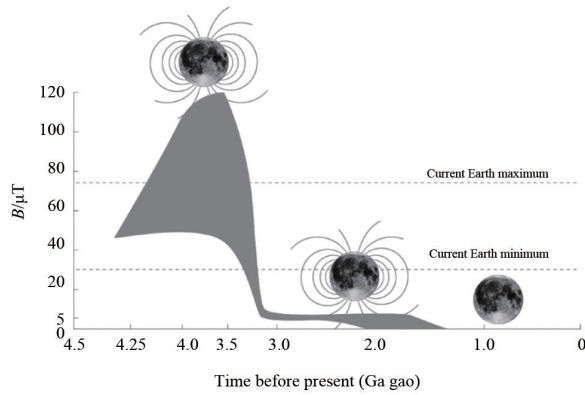


图6 月球磁场强度与时间的关系示意

2 国际在轨深空探测任务不断挺进科学目标

月球是人类走向深空的前哨站而不是终点。2020年2月,人类首个对太阳极区成像的太阳轨道探测器发射升空,并期待与帕克号实现对太阳的协同抵近观测。贝皮·科伦布号水星探测器为了实现2025年12月抵达环水星轨道探测的最终理想,2020年频繁利用地球、金星的引力辅助飞行。拂晓号初步揭开了金星大气超级旋转现象的成因。火星探测方面,2020年7月,中国、美国和阿联酋的3个探测器发射成功。2020年,在外太阳系,即将退役的朱诺号揭示木星浅闪电之谜;新视野号发现了冥王星地形对其大气循环的控制作用。在更遥远的恒星际,2020年11月上旬,美国利用位于澳大利亚堪培拉的深空网络(DSN)升级的70 m天线(DSS-43),与中断音信8个月后的旅行者2号重新取得联系。工作在日地连线L1点的太阳和日球层观测台、太阳风监测卫星等多个空间天气监测任务仍在获取科学数据^[1]。

太阳轨道探测器由欧洲航天局(ESA)主导、美国航空航天局(NASA)参加,历时20余年后在2020年2月10日在美国发射升空,现处于巡航飞行中。它前期主要在水星轨道以内的大椭圆日心轨道开展近距离太阳观测,后期在黄道面外开展太阳极区

高分辨率成像及探测^[14],提升人类对太阳活动周、日地联系的理解。预计2021年11月开始科学任务运行^[15],12月27日探测器将在距离金星云顶约7500 km处飞掠,届时多个原位探测科学载荷将开机探测金星的磁场、等离子体和粒子环境。

2020年帕克号的触摸太阳之旅再继续。通过分析帕克号电/磁场探测仪(FIELDS)的探测结果,科学家们首次听到了太阳风的“声音”,即等离子体波引起的电和磁涨落^[16]。2020年7月11日,帕克号第3次飞越金星;同年9月27日,帕克号第6次抵达近日点(0.09 AU, 20.3 RS),并于2021年1月17日第7次抵达近日点^[17]。

水星探测极具挑战。贝皮·科伦布号于2018年10月发射,2025年12月抵达环水星轨道,目前仍在飞抵途中,期间还要多次借助几颗内行星完成一系列的引力辅助飞行——地球1次,金星2次,水星6次。2020年4月10日,贝皮·科伦布号首次飞越地球,在距离地球约128000 km处快速飞掠时拍摄了地球照片(图7),同时校准了相关有效载荷并测量了地球空间环境。同年10月15日,它首次掠过金星,距离金星约10720 km。期间,德国宇航中心(DLR)和德国明斯特大学的科学家们启动了水星辐射计和热红外光谱仪(MERTIS),拍摄了近10万张照片,但MERTIS没有探测到引起全世界关注的金星大气磷化氢(PH₃)。预计2021年8月11日将再次飞掠金星,2021年10月1日第1次飞掠水星。

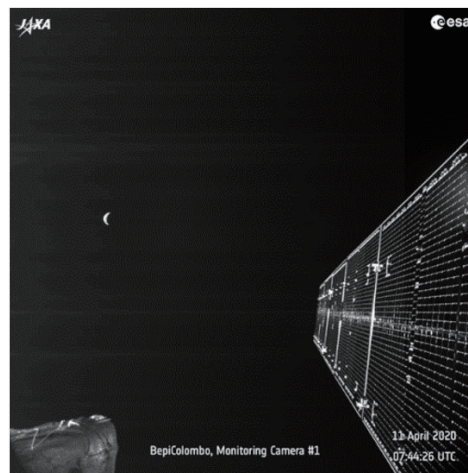


图7 贝皮·科伦布号拍摄到的地球影像
(图片来源:ESA)

2.1 美中阿抓住2020火星探测窗口

火星是航天器探测和登陆次数最多的类地行星,也是继月球后最有希望载人登陆的地外天体。2020年,有8个探测器在火星上工作。2020年7月下旬,中国首次火星探测任务(天问一号)、美国的火星2020任务(毅力号)以及阿联酋的希望号任务(Hope Mars)已成功发射^[18]。与此同时,美国、中国和日本都宣布了火星采样返回任务的计划或相关设想。

毅力号(火星车)2020年7月30日发射,计划2021年2月18日在杰泽罗陨石坑(Jezero Crater)着陆。任务携带7台(套)探测仪器,将继续以探寻火星表面过去乃至现在可能的生命信息及综合性的火星地质特性为主目标,开展原位探测和岩石/土壤样本采集返回^[19-20]。

继2018年洞察号着陆器搭载两颗6U立方星(Marco-A/B)实现世界首次深空飞行后,美国本次任务也有2项创新技术实验任务。一是火星车携带的机智号(Ingenuity)微型太阳能旋翼直升机,它通过相机视觉导航,将试图利用火星稀薄大气获得升力(注:火星大气层平均密度只有地表的1%左右)。机智号按计划在1月内进行5次短程概念演示验证飞行,每次飞行不超过3 min,每次航程最远300 m、最大高度5 m,有望成就“人类在莱特兄弟之后首次在其他星球上飞行”的壮举,并为未来火星机载探测奠定基础。二是火星O₂就位资源利用实验室(MOXIE),它采用“燃料电池逆向运行”技术,首次尝试利用火星大气中的CO₂做原料制取O₂,为未来火星载人探测或驻留、生产火箭燃料等大规模应用提供支撑。

天问一号(轨道器+着陆器+火星车)2020年7月23日发射,计划于2021年2月实施火星捕获,

2021年5月择机软着陆于乌托邦平原(Utopia Planitia)南部区域,是迄今国际首个通过一次发射实现火星环绕、着陆、巡视探测的任务。天问一号共搭载13台科学载荷,其中,环绕器搭载7台、火星车搭载6台。

希望号(轨道器)2020年7月20日发射,作为阿联酋乃至阿拉伯世界的第1个火星探测器,计划2021年阿联酋成立50周年时进入火星轨道。需要指出的是,NASA包办了希望号3个有效载荷和探测器的总装,可以看做是MAVEN的后续,而探测器发射使用日本H-2A火箭。希望号将探测火星大气层,建立整个火星年气候的第1张完整图片。

世界各国火星探测任务前赴后继,巨额投入背后追求的是重大科学目标和航天技术创新,20世纪太空竞赛意味虽然还若隐若现,但已不是主旨。根据2001年以来版本持续更新的美国火星探测项目分析组(MEPAG)《火星探测科学目标报告》,当前各国的火星探测任务基本上都围绕火星生命、气候、地质、载人等4类目标展开,其中载人登火属于工程目标,当然各国具体目标各有侧重^[21]。以2020年火星探测的美中阿为例,科学目标与有效载荷配置对比如表2所示。

2.2 科学探测发现火星气辉和频繁小火星震

在役的欧美火星探测器2020年又加深了人们对火星的认知。火星大气的研究进展主要来自于火星快车和痕量气体轨道器的探测。火星快车的高分辨率立体相机(HRSC)拍摄的北极冰盖,展现出明亮的冰层、深色的山谷和洼地以及强风和沙尘活动的有趣迹象^[22]。风蚀作用刻画了火星北极地形的螺旋状特征——火星大气中的下降风从北极中心地带呈放射状盘旋,周期性向外移动,从而形成螺旋状地形(图8)。

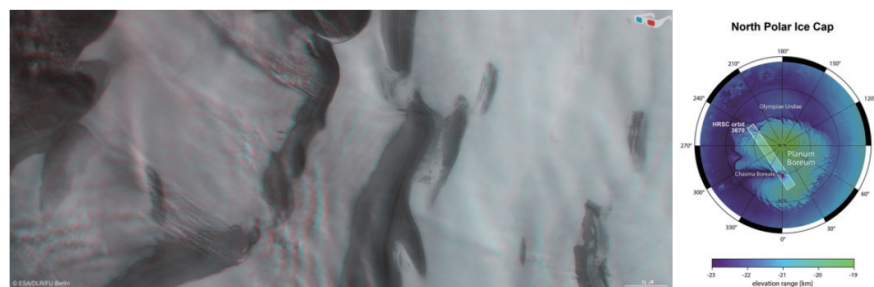


图8 火星北极冰盖

表2 2020年3次火星探测任务主要科学目标对比

任务	毅力号		天问一号		希望号	
	科学目标	有效载荷	科学目标	有效载荷	科学目标	有效载荷
生命—— 探测火星表面高宜居性和对生命/有机质有高保存潜力的环境,开展非破坏性的生物/有机质检测	检测岩石和 风化层是否存 在有机物	超级相机 (SuperCam)				
	精细测量火 表物质元素	X射线光谱 仪(PIXL)	研究火表 水冰分布	矿物光谱 探测仪	—	—
气候—— 探测当前气候、近期气候 和古气候	高灵敏度探 测火表环境 中的碳元素,识别 有机化合物	拉曼和荧光 光谱仪 (SHERLOC)				
	观测火表天 气现象	桅杆相机- Z(MasterCam- Z)	研究火星 环境特征	磁强计、离 子与中性粒 子分析仪、能 量粒子分析 仪、表面磁场 探测仪	研究大气 温度模式, 冰,水蒸气和 灰尘	红外光谱仪 (EMIRS)
	测量火星大 气风温湿压以 及沙尘大小与 形态,紫外线、 可见光和红外 辐射等	火星环境动 力学分析仪/ 火星气象站 (MEDA)	研究火星 大气电离层 及表面气候	火星气象 测量仪	高层大气 及逃逸至太 空的氢和氧 的痕迹	紫外线光谱 仪(EMUS)
地质—— 在火表、内部和火卫3方 面开展探测,收集样本, 理解火星-火卫系统的整 体演化	火表地貌、岩 石和土壤	桅杆相机-Z	研究火星 地貌与地质 构造特征	中分辨率 相机、高分 辨率相机、地 形相机		
	岩石化学组 成和矿物学分 析	超级相机	研究火表 土壤特征、物 质组成	矿物光谱 探测仪	拍摄高分辨 率图像	高分辨相机 (EXI)
载人—— 着陆、巡视、就位资源利 用、行星保护和火卫探测	岩石土壤高 分辨率成像	X射线光谱 仪				
	绘制岩石和 矿物组成	拉曼和荧光 光谱仪	研究火星 物理场与内 部结构	次表层探 测雷达		
	火星浅层地 质结构特性	次表层雷 达成像仪(RIM- FAX)				
	利用火星CO ₂ 资源制取氧气	火星氧气就 地资源利用实 验室(MOXIE)	—	—	—	—

根据火星痕量气体轨道器的大气化学套件(ACS)2年来的精准测量数据,水从火星大气逸散的速度比以往的观点快得多^[23]。在整个观测期间,大气中都存在高度约为80~100 km的过饱和区域,

表明水蒸气更容易通过大气层进入行星际空间,且逸散速度更快(图9)。深入分析ACS数据,首次在中红外波段发现了火星大气中O₃和CO₂的信号,有助于更准确地确定火星上是否存在与生物或地质



图9 ExoMars 2016发现水的逃逸速度更快

活动密切相关的甲烷^[24-26]。在搜寻甲烷的过程中意外观测到 O_3 , 这表明未来可利用红外波段在距火表更低高度上探测 O_3 分布, 一改过去只能通过紫外线测量高于火表20 km的 O_3 高度变化。

火星在人们印象中是个红色星球, 但痕量气体轨道器发现 O_2 正在使火星大气层发出绿色光芒(图10)。调整天底和掩星探测包(NOMAD)中紫外线和可见光光谱仪(UVIS)的指向, 通过掩星/临边侧向(edge-on)探测发现绿色气辉在海拔约80 km高度最强, 且随着火星和太阳之间距离的变化而变化。此乃首次在地球之外的行星周围观测到这种太阳辐射^[27-28]。建模表明, 绿色气辉主要是由占火星稀薄大气95%的 CO_2 分解成CO和 O_2 驱动的。火星气辉中氧原子激发的可见光强度是紫外光的16.5倍, 而地球气辉中可见光的强度则弱得多。研究行星气辉有助于了解大气成分和动力学, 揭示日光和太阳风的能量沉积过程, 而它们引起的大气密度变化则直接影响轨道器高度和着陆器降落伞开伞等工程技术实现。



图10 ExoMars-2016首次探测到火星大气中的绿色气辉

关于火星内部结构的新认知来自洞察号。它在火表已工作2年, 取得多项发现^[29-33], 揭示出火星上小地震此起彼伏、大风肆虐, 拥有较强的局部地壳磁场和奇特磁场脉动^[34-35]。

内部结构地震实验(SEIS)装置已发现超过450个火震信号, 绝大多数可能是火震, 其他有可能是风等环境因素导致的噪声数据, 最大烈度约为4.0级, 尚不足以传导至下地幔和火星核。洞察火星内部结构, 显然还需要积累更多、更强的火震事件。测量火星上的磁场是了解全球磁场的性质和强度的关键。磁强计记录到了洞察号着陆区的较强磁场, 发现Elysium平原的Homestead hollow浅环形山的磁场信号比MAVEN卫星的反演值高10倍, 合理推测是火星局部地壳下至数千米的深度有强磁化的古老岩石, 磁场大小随昼夜时间变化波动的原因则可能与太阳风、行星际磁场和火星大气的相互作用有关, 而时变场对研究火星的深电导率结构非常有用, 因为它与火星内部温度有关。

2.3 金星、木星等深空探测促进行星科学发展

2020年还有拂晓号、朱诺号、新视野号等多个深空任务在对金星、木星和柯伊伯带等进行科学探测。

1) 金星超级旋转成因。

金星致密大气层的环流速度比金星本身的自转快近60倍。科学家利用拂晓号对金星云层的紫外观测数据, 结合全球大气环流模型(GCM)模拟, 发现由太阳辐射加热驱动的金星大气热潮汐导致了金星的超级旋转现象^[36]。研究认为, 虽然金星大气湍流和行星尺度波对热潮汐作用有不利影响, 但金星大气主要由一个双环流系统控制(图11): 子午向大气环流(白色线)缓慢地将热量传输到南北两极, 超级旋转(黄色线)把向阳面的热量传输至金星的背阳面, 而正是热潮汐(橙色线)向赤道运动导致了向西的超级环流。这也为人们更好地理解潮汐锁定的系外行星宜居性问题打开了思路。

2) 木星闪电之谜。

朱诺号探测数据对木星大气的小且浅的“闪电”^[37]和木星冰雹“蘑菇球”(mushball)^[38-39]等现象给出了解释。

木星闪电的首个证据是1979年3月旅行者1

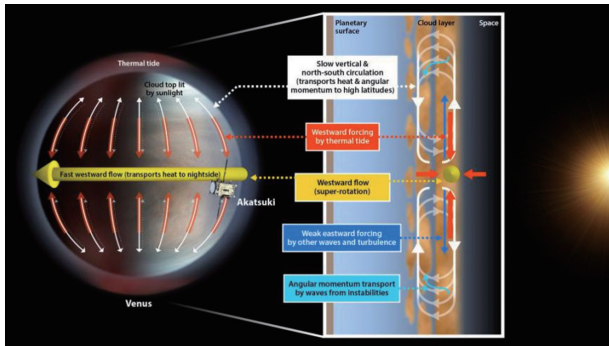


图 11 金星大气超级旋转现象的成因
(图片来源:JAXA/PLANET-C 项目团队)

号发现的。若参照地球闪电和冰雹形成原理,木星闪电须在云层顶部之下 45~65 km 高度的水云层形成。但 2020 年观测到的木星浅闪电是在云层顶部以下 20~40 km 的氨水溶液云中产生的,这里温度

约-88℃,氨扮演了防冻剂角色。木星深层大气将水冰晶释放至水云层之上约 25 km 处,冰晶被氨融化,形成氨-水液体云。在此新状态下,下沉的氨-水液滴会与来自更底层的上升水-冰晶体碰撞并发生电荷分离,并使云层带电,随后就发生了浅闪电现象。鉴于地球大气层并不存在氨水云,此发现带给行星科学巨大的惊喜。与地球大气层中形成冰雹的过程类似,上述过程中水-氨混合物亦会形成黏糊糊的木星冰雹,在木星强风作用下体积不断增大,最终落到木星表面后,将因较高温度蒸发消失(图 12)。这解释了氨在木星大气层的不均匀分布现象,在某些区域利用微波辐射计难以探测到氨的辐射信号——氨并没有消失,它只是通过与水混合隐藏和输运罢了。

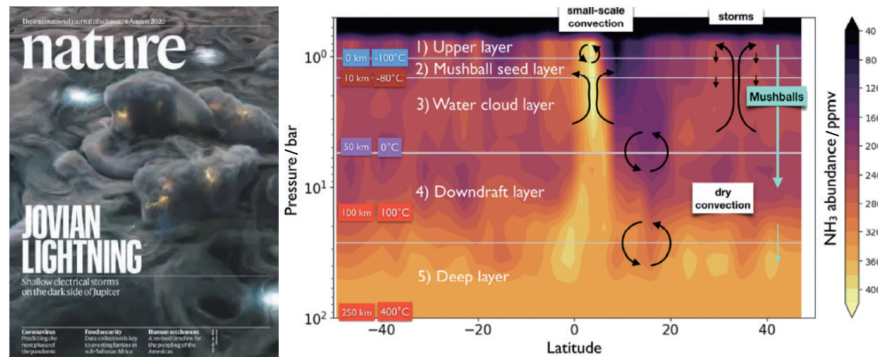


图 12 木星大气的浅闪电现象和木星氨丰度随纬度和气压变化

3) “心”形地貌控制冥王星大气循环。

在更遥远的外太阳系探索方面,基于新视野号飞越冥王星的数据,科学家分析了冥王星的地形及氮冰覆盖情况,并利用 GCM 模型模拟了氮循环(图 13),发现冥王星标志性的心脏形地区(Tombaugh Regio)控制着冥王星的大气循环^[40-41]。占心形地区面积一半的斯普特尼克(Sputnik)氮冰平原之于冥王星气候,可能与海洋之于地球气候同样重要,心形地区北/南部氮冰昼夜融冻循环推动了冥王星的大气环流并影响其地质景观。

新视野号飞越柯伊伯带天体“阿罗科斯”(Arrokoth)后,目前还在向柯伊伯带深处疾驰,继续对沿途天体进行观测,并探测柯伊伯带的带电粒子辐射和尘埃环境。它最终将像旅行者号那样到达恒

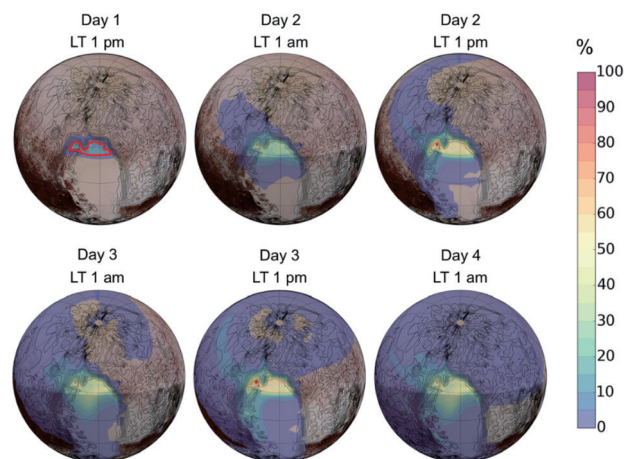


图 13 暗物质大气丰度的时间演化仿真

星际空间,成为人类历史上第 5 颗获得太阳系逃逸速度的空间探测器。

2.4 小行星采样任务中间科学产出丰硕

隼鸟二号(Hayabusa-2)携带对162173龙宫(Ryugu)小行星的样本返回舱2020年12月7日成功着陆^[42],使日本成为全球首个连续两次成功完成小行星采样回收的国家。NASA的OSIRIS-REx于2020年10月完成对目标小行星101955贝努的采样,任务过半。回眸2020年,随着嫦娥五号采样返回任务的成功实施,不由得让人们畅想太阳系探测和行星科学研究将进入一个样品采集和回收的黄金时代。

2020年10月20日,OSIRIS-REx采样臂的圆形铲撞击贝努,释放压缩氮气吹起粉尘,按照“一触即走”(touch-and-go, TAG)策略完成了表面收集样本的工程目标。采样监视相机(StowCam)回传图像显示封装样品的过程中发生了样本粒子逃逸,但有惊无险,研究人员相信已超额完成采集60 g小行星物质的任务要求。按计划,OSIRIS-REx探测器将于2021年3月返航、2023年9月抵达地球^[43]。

实际上,为了实施这次采样任务,OSIRIS-REx自2018年12月抵达贝努后,就一直在对其进行高分辨率探测,获取了贝努的组成和结构数据、全球地形地貌图,进而确定了采样地点。OSIRIS-REx最初的设计是假设贝努表面覆盖着细粒物质。而近距离探测表明贝努表面充满低矮房子大小的巨砾,俨然乱石堆,大大增加了采样难度。2020年10月8日《Science》与《Science Advances》刊发6篇论文,介绍了探测器环绕贝努的详情,提供了贝努的古代和返回地球样本的背景资料,既为其TAG采样注入了坚强信心,也填补了科学家对小行星理解的关键空白。

依据卵石及陨石坑颜色和反照率多光谱图像^[44],研究人员对贝努表面经历的太空风化过程进行了推断。用红外光谱法绘制的贝努全球地图(图14)表明,贝努表面广泛分布有含碳物质(如有机分子或碳酸盐),尤其集中在单个卵石上^[45]。特别的,观测到的明亮岩脉(veins)具有明显的红外吸收(约3.4 μm),提示它们是碳酸盐矿物,其中最大的碳酸盐脉延伸约90 cm长、数厘米厚,显示贝努的母体小行星在数千年甚至数百万年的时间内,经历

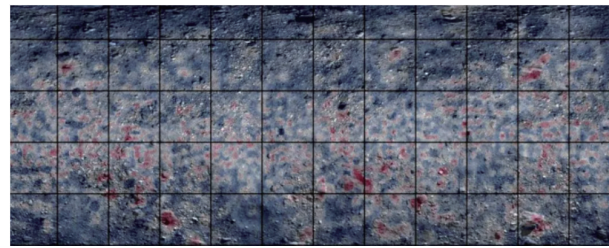


图14 红外光谱技术绘制的贝努全球地图
(红色代表碳酸盐矿物)

过大量的热液/水蚀变活动^[46]。根据激光测高仪(OLA)数据构建的20 cm分辨率的3D模型表明,贝努的形状和地形存在半球差异,南半球更圆、更光滑,而其北半球的坡度更高、形状更不规则^[47];红外热数据承载了行星热惯量和表面粗糙度等物理特征。研究表明:贝努可能由2种不同类型的卵石组成,它们虽有相似的矿物成分,但具有不同的颜色和反照率,也可能具有不同的结构特性^[48]。根据轨道动力学反演的贝努重力场表明,贝努密度分布不匀,赤道和中心区域密度较低,这可能缘于早期的YORP效应或吸积过程所致的快速旋转^[49]。

2.5 多个深空天文台揭秘深远宇宙

日地连线L2点是开展深空天文观测的极佳位置。2020年盖亚(Gaia)和光谱-伦琴-伽玛(SpektR-RG)深空天文台的观测数据,增加了人类对宇宙、太阳系形成、系外行星等方面的认识。斯皮策空间望远镜(Spitzer)实现了深空红外天文观测的里程碑。

众所周知,太阳系位于银河系的猎户座旋臂上,但银河系的结构却属“不识庐山真面目”。2020年,科学家根据Gaia的第2批数据(DR2),构建了全新视角下的银河系星际物质的3D地图,发现了迄今为止最大的波浪状气体结构,长约9000光年,宽约400光年,在银河系星系盘中央平面上上下延伸了约500光年^[50]。这个波状结构以发现它的哈佛大学拉德克利夫高等研究所命名,被称为“拉德克利夫波”(Radcliffe wave)。它改变了150年来人们关于银河系的传统看法,原以为是单一星环结构的古尔德带(Gould Belt),其实只是拉德克利夫波的一份子,而太阳距离拉德克利夫波最近的位置仅500光年。

科学家强调,拉德克利夫波一直就在我们眼前,但直到现在才看到它。这也迫使人们重新思考银河系三维结构,并很可能为其他重大发现铺平道路。

基于Gaia的观测数据,西班牙加那利亚天体物理研究所(IAC)领衔的国际研究团队,首次揭示太阳和太阳系的形成以及地球上生命的出现,可能是银河系与人马座(银河系的卫星星系)之间发生碰撞的结果^[51-52]。研究首次揭示出人马座对银河系的影响可能更大,两个星系碰撞产生的涟漪似乎引发了恒星大规模形成事件,其中一次事件与47亿年前太阳形成的时间大致一致。值得一提的是,ESA已于2020年12月发布了Gaia任务的第3批科学数据(DR3)^[53],如图15所示,包括近20亿颗恒星的位置、运动、亮度和颜色的高精度数据,以及对太阳系在银河系轨道的加速度的首次光学测量原始结果,为科学研究再次提供了巨量数据。

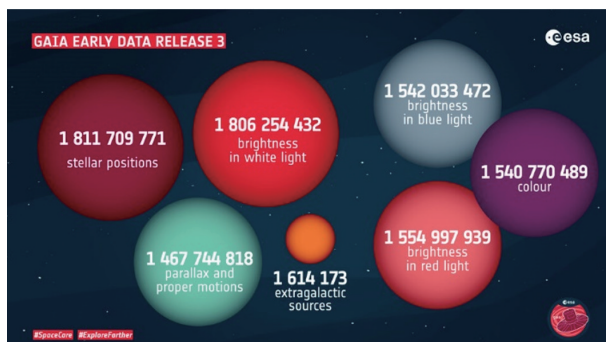


图15 ESA于2020年12月3日发布Gaia任务第3批数据

俄罗斯和德国合作任务Spektr-RG的主科学载荷eROSITA于2020年6月完成首次全天空巡天,绘制了包含超100万个天体的宇宙地图(图16)。发现的X射线源数量是X射线天文学60年发现数量的2倍^[54],其中大部分是宇宙空间尺度上的活跃星系核,标志着宇宙时间尺度上巨型黑洞的增长。Spektr-RG启动第2次全天空巡天后,计划在未来3年绘制7张详细宇宙地图^[55]。

2020年初,美国主动关闭了斯皮策空间望远镜,这颗红外天文科学卫星已5次延寿、在轨运行超过16年(图17),运用其科学数据发表了超过9000篇科学论文,在宇宙红外观测、恒星和星系演

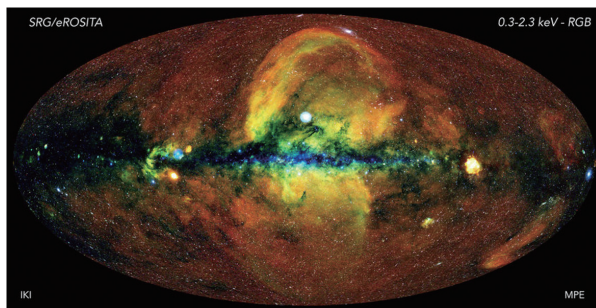


图16 Spektr-RG首幅宇宙地图(图片来源:IKI&MPE)

化、系外行星证认等多个领域取得了重大发现^[56-57]。斯皮策任务的开放技术创新、科学目标与时俱进以及协同一体化观测等实现科学产出最大化的系列实践做法值得借鉴^[58]。

利用SST的海量数据的科学研究仍在不断深化,《Nature Astronomy》在2020年4月和5月出版2期回顾专辑介绍了红外天文、系外行星与活动星系核(AGN)的进展和前沿^[59],同年10月继续刊发综述文章,点评SST在太阳系彗星、半人马小行星(Centaurs)和柯伊伯带小天体研究方面的重要成果,包括对这些天体的大规模巡天、新发现的太阳系天体的表征、对它们表面和发出物质的光谱测量,以及冰巨星大气的综合表征等^[60-61]。

3 深空探测发展的若干环境因素

深空探测是国家战略。21世纪以来,当深空探测不再是航天强国的独角戏、越来越多的航天国家把目光投向深邃太空后,其发展需要考虑的外围因素日益引起重视,这里面既有行星保护旧事重提,也有国际空间法律法规的博弈,以及近地小天体防御的大国担当。特别的,2020年世界新冠疫情不可避免的波及深空探测发展。

3.1 新冠疫情波及深空任务

2020年,中国深空探测步步为营,嫦娥四号在轨正常,天问一号按期发射,嫦娥五号圆满采样返回。但是放眼世界,新冠疫情的影响则无法忽视。

美国载人重返月球的阿尔忒弥斯计划(Artemis program)虽然在推进,但空间发射系统和猎户座飞船的制造和测试活动都已暂停。2020年5月,NASA宣布太空发射系统(SLS)火箭的首次发射推

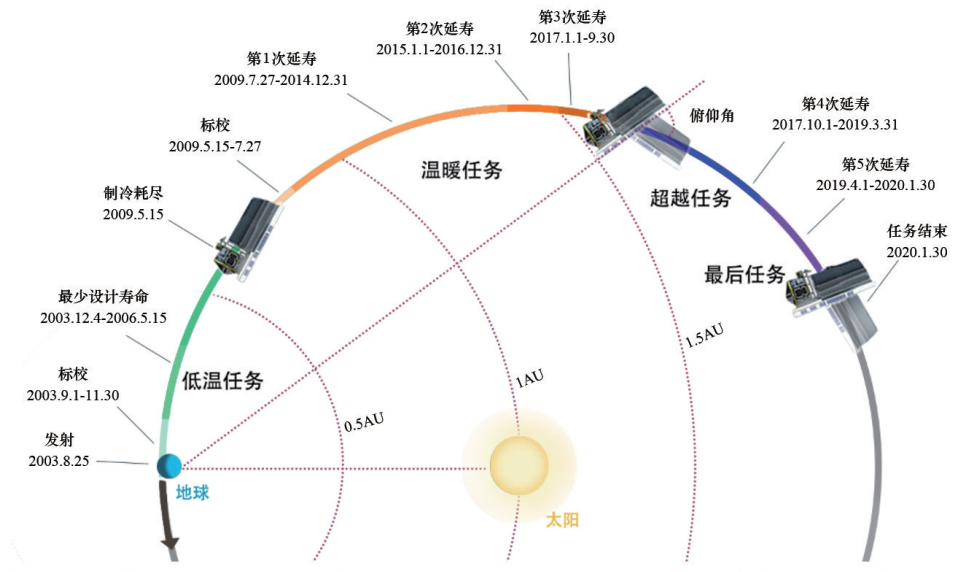


图17 斯皮策空间望远镜阶段划分示意

迟到2021年下半年,新冠病毒大流行是导致其延迟发射的部分原因,而这直接影响到了Artemis 1原定于2020年下半年的发射计划——由SLS Block1发射猎户座飞船,不载人绕月飞行3周后返回地球。

欧洲方面,随着新冠疫情的爆发,ESA曾决定在2020年3月24日至4月2日期间暂停TGO、火星快车、“星簇”计划和太阳轨道器等4项空间科学任务的仪器运行和数据采集工作^[62]。2020年3月12日,ESA宣布ExoMars 2020推迟到2022年,虽然主要原因是航天器的软件问题、着陆用的主降落伞尚未成功测试,但欧洲疫情恶化这一不可抗力因素的影响也属事实。

3.2 深空探测相关制度和法律

3.2.1 行星保护

行星保护(planetary protection)是指在开展深空探测时,应避免发生有意或无意地把地球生物或有机成份携带至行星或其他恒星系体系,影响后续生命探测的活动(正向防护,输出型),或从地外天体返回的物质/生物污染、危及地球生物圈的活动(逆向防护,输入型)^[63]。

行星保护是每一个开展深空探测国家都应遵守的国际行为。2017年12月版的国际空间研究委员会(COSPAR)行星保护国际政策,将行星保护任

务分为5类,并给出了相应政策性要求^[64]。NASA、ESA及俄罗斯等依据COSPAR对行星保护的要求,制定了各自的行星保护政策和标准规范。进入21世纪,全球航天机构向外层空间和地外天体发射的航天器数量急剧增多,特别是像Space X这样的商业航天机构也加入到航天发射之列,行星保护任务面临新的形势。

NASA是目前在行星保护研究方面的规范机构。隶属于NASA总部的行星保护办公室(PPO)在其网站发布有相关政策和标准^[65],其行星保护政策与COSPAR政策一致^[66]。美国国家科学院(NAS)也对行星及其卫星保护发布过多份文件,强调了未来行星保护政策的制定战略重点及相应建议等。

2020年7月,NASA以暂行指令(NID)的形式更新了《行星保护指南》,主要对月球和火星的探测任务进行了修订。

月球的行星保护级别从之前的2类修改为1类:月球上不可能存在任何生命物质,来自月球的航天器和样品也不可能对地球生命造成威胁,进而对航天器的消毒灭菌工作大量减少,从而节省大量预算。不过,该指南仍特别将存在水冰的月球南北极永久阴影区列为保护2类,需要防止来自地球的正向污染。阿波罗飞船着陆点和其他历史遗迹周边区域也将被归入2类。火星的行星保护级别被

列入4类,即对所有去往火星的探测器和宇航员都需进行最严格的消毒灭菌措施,以防止可能对火星的生物环境造成正向污染,同时,需要对来自火星的探测器和航天员进行隔离消毒,以免对地球环境造成反向的生物污染。不过,NASA表示这项涉及火星的指令并未改变火星探索任务的行星保护要求,而是呼吁对如何做到这一点进行研究^[67]。

中国天问一号任务对火星的行星保护给予了高度重视,和欧美专家就行星保护的策略、标准、技术和操作展开了深入的探讨^[68]。持续开展行星保护关键技术研究和管理规范政策体系建设,对于维护中国负责任的航天大国形象具有重要的意义。

3.2.2 深空资源开发

航天技术的跨越使得太阳系深空资源开发前景诱人,不仅为人类走向深空提供不可或缺的资源,也意味着巨大的经济效益。由此引发的国际法规与标准博弈已引起广泛关注。

联合国分别于1967年和1979年开放签署了《关于各国探索和利用包括月球和其他天体在内外层空间活动的原则条约》(简称《外空条约》)和《关于各国在月球和其他天体上活动的协定》(简称《月球协定》),旨在建立深空资源开发的规则体系。但近年来,美国、卢森堡等国利用相关国际条约规定的模糊性,各自在其国内开展了立法及相关活动^[69]。例如,2020年4月,美国总统特朗普签署了《关于鼓励国际社会支持空间资源回收和利用的行政命令》,认为“外层空间是人类活动的法律和物理上独特的领域,美国并不将其视为全球公地”,无视和挑战《外空条约》和《月球协定》等建立的深空资源开发规则体系,为未来太阳系资源利用活动树立不良示范^[70]。

中国尚未出台航天法,但学者一直在呼吁。一方面,尽快组织力量研究外空资源开发开采国际机制的构建问题,提出符合中国利益的具体建议,支持国家的外空外交^[71];另一方面,应积极争取国际组织和有关国家支持,与国际社会一道,就《外空条约》和《月球协定》等太空法律机制和规则的修订和实施进行谈判,以取得最大限度的国际共识,化解月球与行星探测因潜在竞赛所带来的消极影响^[72]。

3.3 近地小天体防御事宜

2020年12月23日北京时间7:00多,一颗可能源于主带的S类阿波罗型近地小行星,以偶发流星的身份出现在中国青海玉树市上空,形成火流星事件。实际上,自地球诞生以来小行星曾数次撞击地球。人类文明要永续发展,必须对近地小天体撞击这一发生概率极低、但危害极大的潜在灾难性威胁有所预案。NASA探测的贝努小行星,其轨道就属于可能撞击地球的类型,但在未来100年内撞上地球的可能性仅为1/2700。

近地天体防御的问题已受到各国政府关注,NASA于2016年成立了行星防御协调办公室(PD-CO),主要负责监测和追踪近地小行星,鉴别飞向地球的潜在威胁天体,提出防御方案的同时向公众发布警告。但是如何防范小行星撞击地球以及如何防御,受限于目前人类的技术发展水平,难度还相当大。

中国一直在开展近地小天体的搜索和监测,并加入了联合国和平利用外层空间委员会下设的国际小行星监测预警网(IAWN)。中国学者创新提出的“以石击石”动能撞击行星防御任务概念,为防御大尺寸潜在威胁小行星提供了核爆之外的一种新选项(图18),已引起国际关注^[73]。它同时也融合

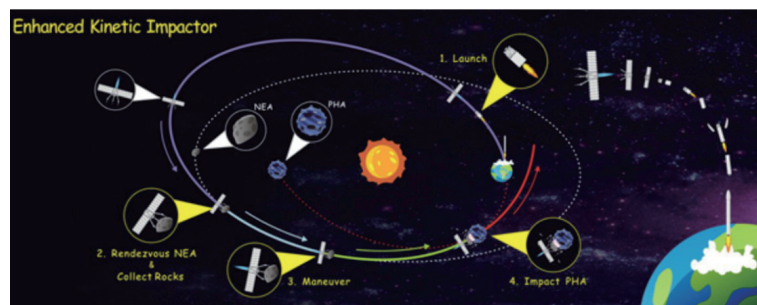


图18 中国学者“以石击石”行星防御任务方案示意

了小行星探测和行星防御,在行星科学方面也具有较高的研究价值。

4 2021年多个深空任务值得期待

2021年4月12日是苏联宇航员加加林乘坐东方1号遨游太空60周年纪念日,但20世纪美苏太空竞赛的大幕早已落下,重大科学目标牵引成为深空探测的主旋律。2021年2月,美国、中国和阿联酋的3个火星探测器将陆续抵达。特别的,天问一号2021年2月10日将近火制动、进入环火轨道,此时距庚子除夕仅一天,将是献给全体中国人牛年的最好贺礼。

4.1 2021年深空任务发射清单基本明确

各国探月仍在接续,印度、美国和俄罗斯均有发射计划。

至于美国的“阿尔忒弥斯”计划之Artemis 1任务,计划2021年升空。从2019年开始一推再推后,2021年7月,美国商业航天公司Astrobotic将搭载联合发射联盟(ULA)的首发火神半人马座火箭(Vulcan Centaur)执行NASA的商业月球有效载荷服务(CLPS)任务,其游隼号月球着陆器(Peregrine Lunar Lander)携带逾10个NASA与其他国家和组织的有效载荷到月球表面。火箭将着陆器发到地球轨道,Peregrine将继续前往月球。

距离苏联时代最后一次探月任务“月球-24号”45年后,俄罗斯“月球-25号”“月球-水珠”(Lunar-Glob)着陆器计划于2021年10月发射,将在月球南极附近的博古斯劳斯基(Boguslawsky)陨石坑着陆寻找水痕迹,并测试软着陆技术。ESA为该任务提供视频摄像机和地面支持团队。

2020年7月,印度空间研究组织(ISRO)主席Sivan指出,印度第3次探月任务有关的所有活动都顺利进行,月船3号(Chandrayaan-3)推迟到2021年上半年发射。2021年1月6日最新报道称,持续受新冠疫情的影响,发射日期待定,或再次推迟到2021年底或2022年初发射。月船3号旨在实现月球软着陆,包括着陆器、月球车和推进模块,它将利用依然在轨的月船2号轨道器。

日地连线拉格朗日L2点将迎来新的空间天文台。詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)是NASA、ESA和加拿大空间局(CSA)联合研发的旗舰型空间天文望远镜,在经历了数年的推迟和数十亿美元的预算超支后,计划于2021年10月31日发射,旨在观测宇宙最早恒星和星系的第一束光,在红外波段揭示深远古暗冷宇宙的奥秘,并搜寻宜居系外行星、观测系外行星的大气层、寻找生命迹象。

小行星探测和防御也各有任务安排。2021年人类首个行星防御演示验证任务将由NASA和ESA联合实施。2021年7月22日,NASA的“飞镖”双小行星重定向实验任务(DART)将率先搭乘Space X的猎鹰9火箭升空,预计2022年9月到达目标天体——编号为65803的近地双小行星系统迪迪莫斯(Didymos,希腊语原意“双胞胎”),并受控“自杀”撞击其中较小的迪莫弗斯(Dimorphos,希腊语原意“两种形态”,编号65803 Didymos 1),借以改变其轨道(重新定向)而使其远离地球。DART在撞击前将释放大意大利航天局的LICIACube立方星,由其拍照和记录撞击产生的影响。随后,ESA赫拉(Hera)任务将于2024年发射升空,2027年抵达较小的“迪莫弗斯”开展近距离探测。“赫拉”也搭载了2颗6U立方星,其中小行星勘察器(APEX)将对“迪迪莫斯”双星进行高光谱测量,勘探其物质成分和磁场;而“朱文塔斯”(Juventas)将通过低频雷达探测迪莫弗斯的内部结构和引力场,Hera本身亦可作为两颗立方星的地球通信中继星。对比Hera与DART的观测数据将能深入了解撞击效应导致的迪莫弗斯形态和轨道改变。需要说明的是,“迪迪莫斯”小行星系统没有撞击地球的危险。DART撞击产生的绝大多数碎片将留在小行星上,也会有一小部分碎片可能会飞到地球化作“人造”流星雨。

美国首次近距离探索木星特洛伊小行星的露西(Lucy)任务属于探索者计划(Explorer),目前正瞄准2021年10月16日开启的发射窗口,开展为期12年的8颗不同小行星探测旅程,包括1颗主带小行星与7颗特洛伊(Trojan)小行星,这也是世界首个探索如此多个不同目标天体的深空探测任务。

露西将有一个漫长的巡航阶段,2025年4月才能飞临8个任务目标中的第1个即主带小行星,之后再访问特洛伊小行星。NASA以1974年在埃塞俄比亚发现的女性古人类化石露西(LUCY)命名该任务,寄托了对人类起源的探索。

4.2 金星任务或成为下一个热点

2020年,一则关于金星的天文观测引起轰动。科学家利用位于智利的“阿塔卡马大型毫米/亚毫米波阵列”(ALMA)和美国夏威夷的“詹姆斯·克拉克·麦克斯韦望远镜”(JCMT),发现金星云层中存在磷化氢(PH_3)^[74],并表示非生物机制不能解释这些 PH_3 的来源,换句话说这意味着金星上存在某种(厌氧生物)生命的可能。不过有科学家随后指出,被认为是 PH_3 的光谱数据非常接近金星大气中常见的 SO_2 光谱——金星大气层是否存在 PH_3 还需要更多的科学探测支持^[75]。未来在寻找太阳系地外生命的目的地清单——火星、木卫二(Europa)、土卫二(Enceladus)中,也许还应该加上金星。

实际上,把视线稍微略过2021年,就会发现金星有望成为继月球、火星后的下一个行星探测焦点。就在过去的2020年,美国遴选了金星探测任务,其他国家也在考虑开展金星探测。

美国发现项目(Discovery)4个候选任务中有2个金星探测任务,分别是金星惰性气体、化学成分和成像的大气层深度调查+(DAVINCI+,达芬奇+)任务,以及金星辐射、射电科学、干涉合成孔径雷达干涉测量、地形学和光谱学(VERITAS,真理号)任务。达芬奇+将研究金星大气成分,真理号将利用雷达对金星表面进行测绘等。

俄罗斯金星D(Venera-D)任务,包括轨道器、着陆器、气球等,科学目标聚焦金星大气和地表关键问题,寻找火山和地震活动等,最终方案仍在论证,拟不早于2026年发射。

ESA“宇宙憧憬”(Cosmic Vision)计划遴选的中型(M5)科学任务概念中,金星探测任务“展望”(EnVision)是最终入围的3个候选任务概念之一,这个金星轨道器旨在绘制金星地表详图,研究金星大气,拟在2030年代初期发射。

印度空间研究组织(ISRO)正在论证“金星船”

(Shukrayaan)的轨道器方案,携带合成孔径雷达(SAR)、探地雷达等有效载荷,测绘金星表面和次表面,研究金星大气化学成分和与太阳风的相互作用。金星船拟在2024年12月发射,并以2026年作为备份(金星发射窗口间隔19个月)。

中国科学院在空间科学先导专项中也布局了若干金星科学研究,针对金星大气同位素探测器关键技术、金星探测的科学目标调研与概念性方案设计、金星环境探测卫星等,开展了预先研究工作。

5 结论

2020年,新冠疫情放慢了世界很多深空任务实施的步伐。但是中国月球与深空探测有序推进,屡获科学新知。叩问宇宙苍穹,行星科学迎来一次次重大发现,太阳和日球层物理继续拓展其边际,深空空间天文台更是增加了对银河系和系外行星等的认识。然而,要步入月球以远的深空,限于人类现有的抵达能力,每个深空探测任务都需要足够的耐心去等待,海量的宝贵数据有待挖掘。在开拓深空第五疆域的路上,让我们继续与日月星辰对话,穿越时空,找寻“我们是谁,从哪里来,到哪里去”的终极答案。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 范全林, 白青江, 时蓬. 关于空间科学概念的若干考证[J]. 科技导报, 2020, 38(17): 100-114.
- [3] Yang W, Lin Y T, New lunar samples returned by Chang'e-5: Opportunities for new discoveries and international collaboration[J/OL]. The Innovation, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100070>.
- [4] Moons of our Solar System[EB/OL]. [2020-12-10]. <https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=69111§ion=4.6>.
- [5] “玉兔二号”月球车行驶里程突破600米[EB/OL]. [2020-12-10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1686749998791-211412&wfr=spider&for=pc>.
- [6] Li C, Su Y, Pettinelli E, et al. The Moon's farside shallow

- subsurface structure unveiled by Chang'E-4 Lunar Penetrating Radar[J]. *Acta Geochimica*, 2020, 6(9): eaay6898.
- [7] Lin H L, Yang Y Z, Lin Y T, et al. Photometric properties of lunar regolith revealed by the Yutu-2 rover[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020(638): 6.
- [8] Zhang S Y, Robert F W, Yu J, et al. First measurements of the radiation dose on the lunar surface[J]. *Science Advances*, 2020, 6(39): 1-5.
- [9] Yuan Y F, Wang F H, Zhu P M, et al. New constraints on the young lava flow profile in the northern Mare Imbrium[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(16): 1-7.
- [10] Chandrayaan-2 completes a year around the Moon[EB/OL]. [2020-12-10]. <https://www.isro.gov.in/chandrayaan-2-completes-year-around-moon>.
- [11] Chandrayaan-2 Mission: Initial data release[EB/OL]. [2020-12-24]. <https://www.isro.gov.in/update/24-dec-2020/chandrayaan-2-mission-initial-data-release>.
- [12] Li SH, Paul G L, Abigail A F, et al. Widespread hematite at high latitudes of the Moon[J]. *Science Advances*, 2020, 6(36): 1-8.
- [13] James G, David Dr, Scott B, et al.. When the Moon had a magnetosphere[J]. *Science Advances*, 2020, 6(42): 1-5.
- [14] 魏海燕, 范全林, 时蓬. 欧美发射太阳轨道探测器推动抵近太阳观测[J]. *空间科学学报*, 2020, 40(2): 147-150.
- [15] Solar orbiter[EB/OL]. [2020-12-24]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter.
- [16] Parker Solar Probe team hears first whispers of the solar wind's birth[EB/OL]. [2020-12-20]. <https://www.jhuapl.edu/FeatureStory/200114>.
- [17] Parker Solar Probe Encounters[EB/OL]. [2020-12-20]. <https://spgway.jhuapl.edu/encounters>.
- [18] 时蓬, 范全林, 李自杰. 2020年全球重要空间科学发射任务[J]. *空间科学学报*, 2020, 40(1): 1-4.
- [19] Mars 2020 Perseverance Rover[EB/OL]. [2020-12-08]. <https://www.jpl.nasa.gov/missions/mars-2020-perseverance-rover>.
- [20] Mars 2020 Perseverance Rover instruments[EB/OL]. [2020-12-08]. <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/instruments>.
- [21] 赵宇婧, 周迪圣, 李雄耀, 等. 国际火星探测科学目标演变与未来展望[J]. *科学通报*, 2020, 65(23): 2439-2453.
- [22] Rippling ice and storms at Mars' north pole[EB/OL]. [2020-12-08]. http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Mars_Express/Rippling_ice_and_storms_at_Mars_north_pole.
- [23] Anna A F, Franck M, Oleg K, et al. Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season[J]. *Science*, 367(6475): 297-300.
- [24] ExoMars finds new gas signatures in the martian atmosphere[EB/OL]. [2020-12-08]. http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars/ExoMars_finds_new_gas_signatures_in_the_martian_atmosphere.
- [25] Olsen K S, Lefèvre F, Montmessin F, et al. First detection of ozone in the mid-infrared at Mars: implications for methane detection[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020(639): 1-7.
- [26] Trokhimovskiy A, Perevalov V, Korablev O, et al. First observation of the magnetic dipole CO₂ absorption band at 3.3 μm in the atmosphere of Mars by the ExoMars Trace Gas Orbiter ACS instrument[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020(639): 1-7.
- [27] ExoMars spots unique green glow at the Red Planet[EB/OL]. [2020-12-08]. http://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/ExoMars/ExoMars_spots_unique_green_glow_at_the_Red_Planet.
- [28] Gérard J C, Aoki S, Willame Y, et al. Detection of green line emission in the dayside atmosphere of Mars from NOMAD-TGO observations[J]. *Nature Astronomy*, 2020, 4(11): 1-4.
- [29] Banerdt W B, Smrekar S E, Banfield D, et al. Initial results from the InSight mission on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2020(13): 183-189.
- [30] Johnson C L, Mittelholz A, Langlais B, et al. Crustal and time-varying magnetic fields at the InSight landing site on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2020(13): 199-204.
- [31] Banfield D, Spiga A, Newman C, et al. The atmosphere of Mars as observed by InSight[J]. *Nature Geoscience*, 2020(13): 190-198.
- [32] Giardini D, Lognonné P, Banerdt W B, et al. The seismicity of Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2020(13): 205-212.
- [33] Lognonné P, Banerdt W B, Pike W T, et al. Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data[J]. *Nature Geoscience*, 2020(13): 213-220.
- [34] Golombek M, Warner N H, Grant J A, et al. Geology of the InSight landing site on Mars[J]. *Nature Communica-*

- tions, 2020, 11(1014): 1–11.
- [35] A year of surprising science from NASA's InSight mars mission[EB/OL]. [2020–12–08]. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/a-year-of-surprising-science-from-nasas-insight-mars-mission>.
- [36] Takeshi H, Hayashi Y Y, Shigeto W, et al. How waves and turbulence maintain the super-rotation of Venus' atmosphere[J]. *Science*, 2020, 368(6489): 405–409.
- [37] Becker H N, Alexander J W, Atreya S K, et al. Small lightning flashes from shallow electrical storms on Jupiter[J]. *Nature*, 2020, 584: 55–58.
- [38] Rohini S G, Thomas K G, Bertrand B, et al. Possible Transient Luminous Events observed in Jupiter's upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(11): 1–15.
- [39] Tristan G, Li C H, Scott J B, et al. Storms and the depletion of ammonia in Jupiter: II explaining the Juno observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(8): 1–18.
- [40] Pluto's icy heart makes winds blow[EB/OL]. [2020–12–08]. <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/02/2020-04/112548.htm>.
- [41] Bertrand T, Forget F, White O, et al. Pluto's beating heart regulates the atmospheric circulation: results from high resolution and multi-year numerical climate simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2020, 125(12): 1–24.
- [42] Japan's Hayabusa2 capsule lands with carbon-rich asteroid samples[EB/OL]. [2020–12–08]. <https://www.sciencemag.org/news/2020/12/japan-s-hayabusa2-capsule-lands-carbon-rich-asteroid-samples>.
- [43] NASA's OSIRIS-REx Successfully Stows Sample of Asteroid Bennu[EB/OL]. [2020–12–08]. <http://www.parabolicarc.com/2020/10/29/nasas-osiris-rex-successfully-stows-sample-of-asteroid-bennu>.
- [44] DellaGiustina D N, Burke K N, Walsh K J, et al. Variations in color and reflectance on the surface of asteroid (101955) Bennu[J]. *Science*, 2020, 370(6517): 674.
- [45] Amy A S, Hannah H K, Victoria E H, et al. Widespread carbon-bearing materials on near-Earth asteroid (101955) Bennu[J]. *Science*, 2020, 370(6517): 675.
- [46] Kaplan H H, Lauretta D S, Simon A A, et al. Bright carbonate veins on asteroid (101955) Bennu: Implications for aqueous alteration history[J]. *Science*, 2020, 370(6517): 676.
- [47] Daly M G, Barnouin O S, Seabrook J A, et al. Hemispherical differences in the shape and topography of asteroid (101955) Bennu[J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): 1–11.
- [48] Rozitis B, Ryan A J, Emery J P, et al. Asteroid (101955) Bennu's weak boulders and thermally anomalous equator [J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): 1–18.
- [49] Scheeres D J, French A S, Tricarico P, et al. Heterogeneous mass distribution of the rubble-pile asteroid (101955) Bennu[J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): 1–16.
- [50] Zucker C, Joshua S S, Edward F S, et al. A large catalog of accurate distances to local molecular clouds: the Gaia DR2 edition[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 879: 1–20.
- [51] You've lost your orbit, captain[EB/OL]. [2020–12–08]. http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia/Galactic_crash_may_have_triggered_Solar_System_formation.
- [52] Ruiz LT, Gallart C, Bernard E J, et al. The recurrent impact of the Sagittarius dwarf on the star formation history of the Milky Way[J]. *Nature Astronomy*, 2020(4): 965–973.
- [53] GAII early data release 3[EB/OL]. [2020–12–08]. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/early-data-release-3>.
- [54] Our deepest view of the X-ray sky[EB/OL]. [2020–12–08]. <https://www.mpg.de/14999689/our-deepest-view-of-the-x-ray-sky?c=2249>.
- [55] Spektr-RG commences sky scanning[EB/OL]. [2020–12–31]. <http://en.roscosmos.ru/21145/>.
- [56] Lisse C, Bauer J, Cruikshank D, et al. Spitzer's Solar System studies of comets, centaurs and Kuiper belt objects[J]. *Nature Astronomy*, 2020(4): 930–939.
- [57] Trilling D E, Lisse C, Cruikshank D P, et al. Spitzer's Solar System studies of asteroids, planets and the zodiacal cloud[J]. *Nature Astronomy*, 2020(4): 940–946.
- [58] 范全林, 时蓬, 王琴, 等. 斯皮策空间望远镜实现最大化科学产出[J]. *科技导报*, 2020, 38(20): 113–122.
- [59] Spitzer steps aside[J]. *Nature Astronomy*, 2020, 293(4): 293.
- [60] Trilling D E, Lisse C, Cruikshank D P, et al. Spitzer's Solar System studies of asteroids, planets and the zodiacal cloud[J]. *Nature Astronomy*, 2020(4): 940–946.
- [61] Lisse C, Bauer J, Cruikshank D, et al. Spitzer's Solar System studies of comets, centaurs and Kuiper belt objects[J]. *Nature Astronomy*, 2020(4): 930–939.
- [62] ESA scales down science mission operations amid pan-

- demic[EB/OL]. [2020-12-08]. http://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/ESA_scales_down_science_mission_operations_amid_pandemic.
- [63] COSPAR. The COSPAR workshop, planetary protection policy[R]. Houston, Texas: World Space Council, 2011.
- [64] COSPAR. Planetary protection policy[EB/OL]. [2020-12-08]. <https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2019/12/PPPolicyDecember-2017.pdf>.
- [65] NASA. Planetary protection[EB/OL]. [2020-12-08]. <https://planetaryprotection.nasa.gov>.
- [66] National Aeronautics and Space Administration. Biological contamination control for outbound and inbound planetary spacecraft[EB/OL]. [2020-12-08]. <http://nods3.gsfc.nasa.gov/displayDir.cfm?t=NPD&c8020&s7F>.
- [67] NASA Updates Planetary Protection Policies for Robotic and Human Missions to Earth's Moon and Future Human Missions to Mars[EB/OL]. [2020-12-18]. <https://www.nasa.gov/feature/nasa-updates-planetary-protection-policies-for-robotic-and-human-missions-to-earth-s-moon>.
- [68] 徐侃彦, 马玲玲, 印红, 等. 火星无人探测与行星保护[J]. 深空探测学报, 2019, 6(1): 9-15.
- [69] 白青江, 范全林, 任丽文, 等. 关于太阳系深空资源开发立法的思考[J]. 卫星应用, 2018(8): 49-53.
- [70] Executive order on encouraging international support for the recovery and use of space resources[EB/OL]. [2020-12-22]. <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/executive-order-encouraging-international-support-recovery-use-space-resources>.
- [71] 王国语. 拉开外空采矿竞赛的序幕?——美国行星采矿立法的法律政策分析[J]. 国际太空, 2016(5): 12-21.
- [72] 何奇松. 新一轮月球竞赛与太空治理的前景[J]. 社会科学文摘, 2019(8): 41-43.
- [73] Li M, Wang Y, Wang Y, et al. Enhanced kinetic impactor for deflecting large potentially hazardous asteroids via maneuvering space rocks[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 8506.
- [74] Greaves J S, Richards A M S, Bains W, et al. Phosphine gas in the cloud decks of Venus[J]. Nature Astronomy, 2020, 4(10): 1-20.
- [75] No phosphine in the atmosphere of Venus[EB/OL]. [2020-12-18]. <https://arxiv.org/abs/2010.14305#:~:text=No%20phosphine%20in%20the%20atmosphere%20of%20Venus%20,%20%20%20%28or%20arXiv%3A2010.14305-v1%20%5Bastro-ph.EP%5D%20for%20...%20>

Review of 2020 global deep space activities

SHI Peng, WANG Qin, BAI Qingjiang, FAN Quanlin

Space Science and Deep Space Exploration Study Center, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract The global deep space exploration endeavor was pushed forward steadily in 2020. In this article we review the outstanding engineering success and scientific output in the year, analyze the results of Chang'E 5 sampling return mission and Chang'E 3/4 missions in the Chinese Lunar Exploration Program, compare the main scientific goals and payloads of the three Mars missions by US, China and United Arab Emirates, and summarize the scientific findings about the sun and solar system given by the 35 deep space missions operating in orbit. We also review the scenario of future deep space exploration especially affected by the COVID-19 pandemic. We conclude the article with the prospect of future launches in 2021.

Keywords deep space exploration; 2020 hotspot; space science; discovery ●



(责任编辑 王丽娜)