

月球水冰探测

贾瑛卓¹, 覃朗^{1,2}, 徐琳¹, 马涛³, 杨蔚⁴, 惠鹤九⁵, 严俊⁶, 邹永廖¹

(1. 中国科学院 国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100090; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210033; 4. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;
5. 南京大学, 南京 210023; 6. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012)

摘要: 20世纪90年代以来, 随着科学技术的发展, 月球探测和研究的不断深入, 月球极区永久阴影区存在水冰以及月球早期水的问题成为国际探测与研究的热点。在调研月球水(冰)的研究现状基础上, 分析梳理了涉及月球水的关键科学问题, 从不同空间维度、不同探测方式上, 探讨性地分析并提出我国后续探月工程中水(冰)的科学任务、探测指标以及有效载荷配置方案及其功能要求, 可为“探月四期”工程提供借鉴。

关键词: 月球上的水; 月球探测; 科学目标; 有效载荷

中图分类号: V11

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)03-0290-07

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191108009

引用格式: 贾瑛卓, 覃朗, 徐琳, 等. 月球水冰探测[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 290-296.

Reference format: JIA Y Z, QIN L, XU L, et al. Lunar water-ice exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 290-296.

引言

月球上的水根据赋存状态可分为2种形式: 一种是在月球两极永久阴影区的水冰; 另一种是指在月球物质的内部结构中探测到的水, 这可能对月球地质演化过程起到了举足轻重的作用。目前认为月球水的来源主要是有3种形式^[1-5]: 月球内部岩浆洋的水; 彗星或陨石撞击携带的水; 太阳风质子与月表含氧物质相互作用产生的水。其中, 产生于太阳风质子与月表含氧矿物之间相互作用的太阳风成因水, 会受月表温度变化发生迁移运动, 部分最终在月球永久阴影区中保存下来^[6-7]。月球内部的水, 与月球起源、岩浆洋演化、后期物质加入等重大科学问题直接相关。而探测月球极区永久阴影区水冰分布和来源, 以及挥发分组成等, 对于理解月球上挥发分迁移和滞留过程, 以及太阳系内水的迁移过程有重要意义。

在月球两极永久阴影区存在水冰的设想首先由美国科学家Watson等在1961年首次提出^[8-9]: 太阳相对月球赤道平面的位置不超过1.6°, 月球两极一些撞击坑的底部常年处于阴影状态, 水可能会以冰的形式保存下来, 进入宇宙的几率很小, 所以在月球两极的撞击坑中可能存在大量的水, 形态可能为冰尘混合物。在月球形成的历史上, 还有大量的小行星和彗星撞击月

球, 所带入的水冰和有机挥发分物质, 可能有一部分被这些永久阴影区的巨大冷阱所捕集并保存下来^[10]。同时月球永久阴影区水冰和在开采月球玄武岩中产生的副产品即水等, 也是未来月球基地、载人探月活动的重要战略资源, 如果能在月球上找到具有潜在利用价值的水, 可降低月球基地的建设成本和复杂性, 而且也可以作为未来深空探测的补给基地。但早期探测技术和“阿波罗”(Apollo)样品实验分析技术相对落后等原因, 有关月球极区的水冰一直受到质疑。

月球大撞击成因理论, 普遍认为月球在形成过程中温度非常高且活动非常剧烈, 在月表形成了一个全球性的岩浆洋^[11-13]。在整个高温过程中, 一般认为挥发分会大量丢失, 水会全部丢失, 即月球在岩浆洋阶段基本是不含水的。岩浆洋结晶模型推测, 早期月球即使含水, 其含水量也小于10 ppm^[14-15]; 而在月球火山玻璃、磷灰石, 以及橄榄石熔体包裹体中探测到的水, 被认为是在岩浆洋结晶之后, 月球发生部分熔融时, 由陨石、彗星以及太阳风注入到月球内部的^[14, 16]。因此认为月球是极“干”的, 在物质组成上应具有明显的贫水和挥发分的特征。

随着空间探测技术和实验室分析技术的快速发展, 1994年“克莱门汀号”(Clementine)和1998年“月

收稿日期: 2019-11-08 修回日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41590851); 北京市科学技术委员会资助项目(Z181100002918003); 中国科学院重点部署资助项目(ZDRW-KT-2019-5)

球勘探者号”(Lunar Prospector, LP)轨道探测器发射后,通过雷达回波数据发现月壤中可能存在类似冰块或冰层反射体^[17],在月球两极通过中子谱仪探测到丰富的氢^[18],氢有可能是以水分子的形式存在,所以氢信号的强弱可以间接反映水含量的多少。近年来,科学家利用傅里叶变换红外光谱测量了月球亚铁斜长岩中钙长石的水^[14, 19-20],亚铁斜长岩一般被认为是月球岩浆岩中直接结晶逸出的原始高地月壳的成分,也是月球古老高地中分布非常广泛的一类岩石。这一发现首次证实了早期月球含水,对普遍接受的月球大撞击成因理论提出了挑战。Li等利用“印度月船1号”(Chandrayaan-1)搭载的光谱-矿物制图仪(Moon Mineralogy Mapper, M3)测量月球永久阴影区水冰的反射光谱,通过判断近红外波段吸收峰特征,给出了月球极区存在水冰的直接证据^[21]。

目前,对于月球中水的来源并没有定论。月球高地被认为是由早期近乎熔融状态的月球冷却结晶形成的原始地壳,在月球高地的矿物质颗粒中检测到水分,意味着在冷却成型之前的熔融阶段,月球内部就存在水分^[2-3]。但是这些水何时以何种方式到达月球,小行星和彗星对这些水的相对贡献是多少,这些问题仍然没有答案。月球水的氢同位素组成显示月球内部的水可以是月球形成时保留的岩浆水、月球形成后小行星和彗星的加入以及太阳风的注入^[22]。根据样本中氢与氮的数据分析,有一类富含水的小行星-碳质球粒陨石,正是月球内部水的主要来源,而彗星和小行星带来的水只占月球总水量的20%^[1]。但是晚期小行星加入引起的水含量增加,必须考虑其它元素和同位素的变化,特别是需要解释地月物质的同源性^[11-13, 23]。

在月球高地斜长石中水的发现,以及月球永久阴影区水冰的发现,改变了人们对存在于月球中的水的看法,激发了对地月系统挥发分起源以及大撞击形成的原始月球盘的物理化学条件的新一轮研究。而月球早期水的问题,则涉及到月球科学中另一重大科学问题,即月球的“干湿论”问题。月球极区水冰是长期保存下来的,这些水冰的位置分布、厚度、含冰量和挥发分组成等对我们理解月球上水和挥发分迁移和滞留过程有着重要的意义,记录了月球演化过程的挥发分演变。准确辨识月球水冰的来源是揭示月球“干”“湿”的重要线索^[24-26]。

1 90年代以来月球水冰的探测与研究

从20世纪90年代开始的探测活动中,针对月球永久阴影区是否有水冰这个问题进行了多项针对性的探

测和研究,利用雷达、中子谱、光谱、撞击实验等探测技术开展遥感探测,以及阿波罗返月样品和月球陨石的实验室测试分析研究。

雷达探测:1994年1月25日,美国发射了Clementine月球探测器,该探测器上搭载了一台双基地雷达。1994年4月,当运行到月球南极上空200 km高度,并与月球、地面接收站在一条直线上时,雷达回波出现异常,被认为可能是永久阴影区存在水冰造成的^[27],探测结果如图1所示。但是,这一解释争议很大,因为该回波异常也可能是大入射角、粗糙月表等造成。后续美国在2009年发射月球勘测轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)搭载的Mini-RF^[28-29](Radio Frequency)和印度Chandrayaan-1搭载的Mini-SAR^[30](Synthetic Aperture Radar)都在月球极区发现了回波异常,但是对回波异常的解释长期存在争议,无法确定其到底是水冰引起,还是粗糙月表造成的。

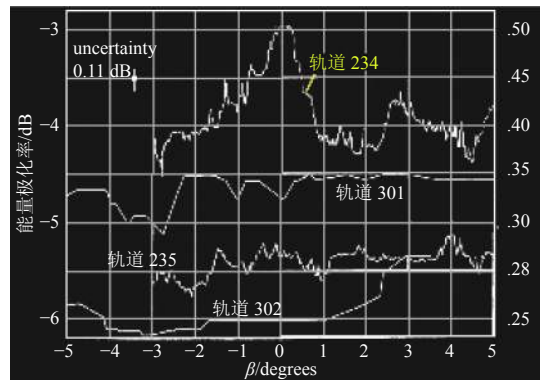


图1 “克莱门汀”雷达探测结果,雷达回波数据 displays 第234轨雷达回波数据异常^[27]

Fig. 1 Clementine radar detection results, radar echo data shows that the radar echo data in orbit 234 is abnormal^[27]

全月球中子谱探测:美国在1998年发射的LP探测器上搭载了中子谱仪,通过探测氢的分布、寻找月球极区可能存在的水冰沉积区。中子谱仪在月球南北两极检测到了氢的信号,认为其存在形式为水冰物质,分布深度约为月表40 cm深处,两极水冰总有效面积约为1 850 km²,储量估计可多达3亿t,推测这些水冰可能与月壤混合存在^[18, 31],探测数据如图2所示。这是首次获得月球极区存在水冰的证据,太阳风成分中含有丰富的氢,因此月表物质中的氢到底是以水冰、羟基还是其它含氢化合物的形式存在,尚无定论。LRO上搭载的低能中子探测器^[32-33],在月球撞击坑内的永久阴影区发现了氢,通过记录中子计数探测到氢的含量,进而证明水的存在。

红外光谱探测:印度Chandrayaan-1搭载的M3对全

月进行光谱成像,发现在月球所有纬度上都在 $2.8\sim 3.0\ \mu\text{m}$ 处存在吸收,指示水或羟基(OH)的存在,但羟基的可能性较大^[34-35]。光谱探测只能感应表面几毫米,因此,该发现表明水应该存在于月表数毫米厚的月尘内,与月球矿物以结晶水的形式存在,只有这样才能解释为什么在白天温度可以达到 $130\ \text{C}$ 左右且月球中低纬度地区也检测到了 $2.8\sim 3.0\ \mu\text{m}$ 的吸收。利用M3的最新数据研究表明,在月球南北极 $1.3\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.0\ \mu\text{m}$ 同时存在近红外光谱吸收峰的地方可能存在水冰^[21],月球南北极可能存在水冰的分布区域如图3所示。

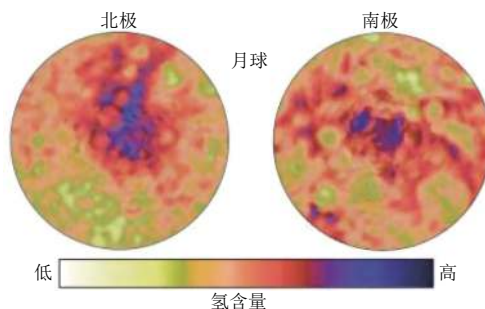
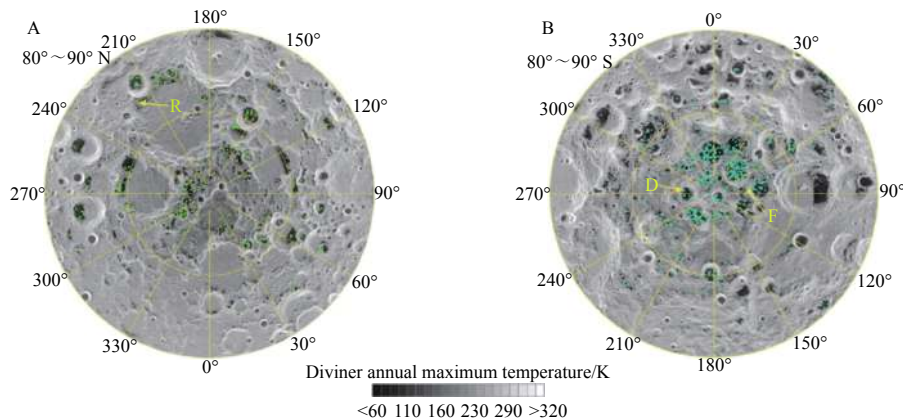


图2 “月球勘探者号”中子探测器数据分析月球两极氢含量分布^[18]
Fig. 2 Data from the lunar prospector neutron detector analyzed the distribution of hydrogen content at the lunar poles^[18]



注: 最高温度 (< 110 K)、LOLA反照率 (> 0.35)、灯关带比 (> 1.2, 仅适用于南极), 每个点表示一个M (3) 像素, $\sim 280\ \text{m} \times 280\ \text{m}$
图3 在月球北极(左)和南极(右)在年最高温度下水冰的分布(绿色和青色的圆点)^[21]

Fig. 3 Distribution of water-ice-bearing pixels (green and cyan dots) overlain on the Diviner annual maximum temperature for the (left) northern and (right) southern polar regions

永久阴影区的撞击实验: 通过对月球南北极永久阴影区的撞击,形成气化云柱,然后对其进行光谱观察,以检测水分子存在的信号。该实验总共进行了3次: ①LP任务结束之后,将其撞向月球南极的一个永久阴影区,然后利用地基望远镜对该区域进行观察,但该次实验未能检测到水分子的信号; ②LRO上搭载的月球撞击坑观测与遥感卫星LCROSS (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite), 后者经过专门的设计主要是用于永久阴影区的撞击实验,以探测水冰的存在^[31, 36-37], 结果如图4所示,该撞击实验结果表明,近红外吸收光谱探测到由水蒸气和冰的吸收峰,紫外辐射指示了羟基自由基(OH)的存在^[38],说明气化云柱中存在水,根据探测的结果,经估算该永久阴影区的水冰含量可达 $5.6 \pm 2.9\ \text{wt}\%$ ^[38], 如图5所示,除水冰之外,该实验还检测到其他一些挥发组分,包括轻碳氢化合物,含硫物质和二氧化碳; ③Chandrayaan-1搭载了一个月球撞击体探测器(Moon Impact Probe, MIP), 2008年11月14日,从100 km

的轨道上,以自由落体的形式,撞击月球南极沙克尔顿撞击坑,同时Chandrayaan-1上的M3对撞击区进行探测,检测到了月球表面 $2.8\sim 3.0\ \mu\text{m}$ 的吸收特征,表明含OH或 H_2O 的硅酸盐存在,因而也进一步证实永久阴影区中水的存在^[30]。

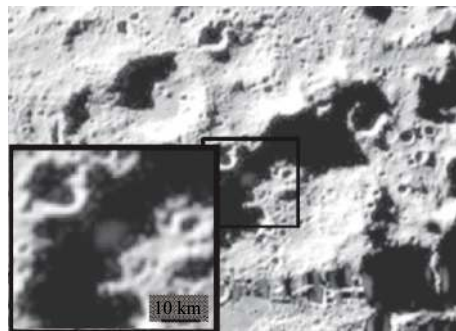
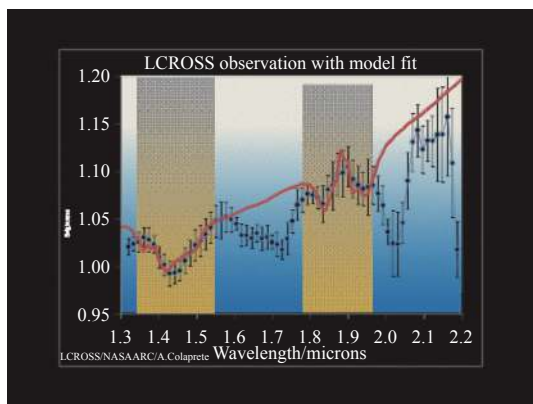


图4 LCROSS上的可见光相机拍摄,撞击发生20 s后出现气状云柱^[36]
Fig. 4 Visible light camera on LCROSS shows a cloud of gas 20 s after impact^[36]

综上所述,虽然美国、日本、印度等分别实施了对月球永久阴影区水冰的探测,间接证明了水冰的存

在。但是，这些实际上并未真正探测到水，对可能存在的水冰含量、分布以及来源等毫无认识。由于遥感手段限制，目前探测月球是否存在水冰只能采用间接方式，无法直接检测水分子的存在。因此，月球的“干”和“湿”之争依然是月球科学的一个热点问题，其早期挥发分含量、后期彗星和小行星的撞击，以及太阳风的贡献、迁移和保存机制等问题都没有得到解决，进而无法对月球的起源和演化过程进行较好的制约。要解决这些问题，就需要对月球极区永久阴影区开展着陆就位探测，使用不同于以往的探测技术，确证月球永久阴影区是否存在水冰，并获取其挥发分和H同位素组成。



注：红色曲线为月壤与水冰混合物光谱模型，两条曲线重叠明显，证明吸收特征是冰引起

图5 LCROSS观测数据，蓝色曲线为近红外光谱仪光谱曲线^[36]

Fig. 5 The LCROSS observation data showed that the blue curve was the spectral curve of the near-infrared spectrometer and the red curve was the spectral model of the mixture of lunar soil and water ice

2 中国月球后续任务中水冰探测的科学任务

围绕月球全球水冰探测，特别是月球两极撞击坑底部的永久阴影区水冰的赋存状态、含量、分布特征及其来源的探测研究，我国的月球后续探测任务将开展：全月表水冰的遥感探测；月球两极永久阴影区水冰的原位探测；月球返回样品的实验室精确测量。

1) 对全月表的水分布进行遥感探测，构建全月表水含量分布图，对月表水含量分布进行研究

利用微型合成孔径雷达对全月表的水分布进行遥感探测，并对月球极区着陆区附近的永久阴影区进行高精度成像，识别可能的水冰存在形式和分布；利用中子谱仪，获取全月球表面H元素的分布规律及其含量随昼夜交替的变化，区分岩浆水和空间风化作用水，研究太阳风与月表的相互作用，为月表挥发分资源勘探提供重要线索；综合微型合成孔径雷达和中子

谱仪的高空间分辨率和能量分辨率的数据，获得对于月表水含量的高精度填图，为月球资源利用和开采提供建议。

2) 对月球两极永久阴影区中的水冰含量进行原位测量，并获得水冰的氢同位素组成

利用水分子分析仪，在月球南极永久阴影区开展水冰和有机质的就位探测，测定出 H_2O 分子，并获得水分子中H的同位素组成，提供月球水冰来源的直接证据，揭示月球南极永久阴影区中水冰和有机质等挥发性组分的空间分布，评估永久阴影区中水冰的储量。

3) 月球返回样品中挥发性元素的含量以及同位素组成的实验室测量

利用高精度水及挥发分同位素分析技术，选取合适的月球样品，并发展适合与样品多元素分离的化学流程，通过对返回样品中不同类型的月壤颗粒进行红外光谱、拉曼光谱、透射电镜和纳米离子探针等研究分析，精确测定样品水和挥发分含量以及同位素组成，确定月球水及挥发分的分布和来源，获得月球内部水及挥发分的含量和同位素特征，加深对地月亲缘性认识，进一步认识月球的起源和岩浆演化过程。此外，可以结合不同的挥发分同位素体系来综合判断月球挥发分分布的整体变化，进而完善对于月球起源以及后期岩浆演化的理解。

3 实现科学目标需配置的有效载荷

就研究手段而言，现阶段对月球水冰的探测主要是利用雷达数据、中子谱仪数据和对月球极区阴影区的地形分析进行的。根据我国月球后续任务，围绕月球全球水冰探测，特别是月球两极撞击坑底部的永久阴影区水冰的赋存状态、含量、分布特征及其来源的探测研究，拟配置3台科学有效载荷。在环月轨道器上配置中子谱仪和微型合成孔径雷达，获取全月面特别是南极永久阴影区水冰的分布和含量情况；在飞跃探测器上配置水分子分析仪，获取飞跃探测器着陆点的水分子精确探测数据，研究水的来源。

3.1 水分子分析仪探测任务和主要功能要求

月球永久阴影区水冰的探测是国际月球探测的热点，也是我国月球探测后续任务的重要探测内容。LRO等采用遥感间接技术方案，没有真正探测到水，对水冰可能的来源更是毫无认识。只有对月球极区永久阴影区水冰开展就位探测，才能解决月球极区水冰的含量、组成和来源。水分子分析仪需要在飞跃器的支持下，进入月球南极永久阴影区开展水冰的就位探测，测定出 H_2O 分子，并获得水冰的H的同位素组成。

在飞跃器多点着陆的条件下,开展不同位置的水冰和有机质就位探测,揭示月球南极永久阴影区中水冰和有机质等挥发性组分的空间分布。

功能要求:通过探测月球南极永久阴影区月壤水冰及其含量,为直接确认月球南极永久阴影区中存在水冰及其来源的研究提供科学依据。具备 H_2O 分子和甲烷等有机分子的测定及其H同位素组成的分析功能,以及多次样品就位采集分析功能。

3.2 中子谱仪探测任务和主要功能要求

中子探测器是利用中子与探测器材料发生核反应,在探测器内沉积一定特征能量,并最终转化为光子,经过光电转换形成脉冲,并根据脉冲幅度统计相同幅度脉冲的数量,形成脉冲幅度谱,根据谱中特征峰的计数得到中子的流量,从而探测月面中子流强,利用环月轨道器星下点经纬度信息,对同一像元区域内的中子流强度分别统计,得到全月面的中子流量强度分布信息。

利用中子探测器测量月表次表层的水氢分布是一种有效的手段。由于LP的中子谱仪空间分辨为45 km,不能完全区分南极典型阴影区坑内外的水氢中子信号,需要更高空间分辨的中子探测器。中子谱仪的探测灵敏度可以达到几十个ppm的水氢含量,其空间分辨和轨道高度直接相关,将星下像元直径作为空间分辨,一个像元直径是轨道高度的1.5倍,如果轨道器在环月15 km轨道飞行,则中子谱仪的空间分辨大约为22.5 km,而典型的南极阴影区直径均大于或接近该像元直径,因此可以实现这些阴影区内外的良好分辨。通过高空间分辨和高灵敏探测,可以在月球南极阴影区水氢分布问题上取得突破。

功能要求:通过开展全月面特别是极区阴影区快中子和热中子探测,获取高空间分辨率的次表层氢分布以及含量,为研究月面水(冰)分布特征提供科学依据。具备获取月面快中子、超热中子、热中子通量的能力。

3.3 微型合成孔径雷达功能要求和主要技术指标

微型合成孔径雷达采用脉冲体制发射信号,线性调频基带信号被载频调制后通过天线发射出去,雷达波照射到目标并反射后,雷达接收回波然后下变频解调并数字化采样与存储。根据SAR成像理论,其对理想点目标的成像结果可以近似为一个二维sinc函数,图像几何分辨率指标定义为点目标成像结果的半功率主瓣宽度,该指标反映了雷达对目标成像的精细程度。微型合成孔径雷达可实现的分辨率最高达1 m且为SAR载荷的常规工作模式,能够探测月球表面细部特征。

月球两极永久阴影区常年处于低温无光照的状态,因此利用光学相机无法对永久阴影区进行成像观测。目前国际上采用SAR载荷进行月球探测的只有印度的“月船1号”“月船2号”和美国的LRO,但是由于受到极化能力限制,无法剔除石块对圆极化比参数反演的影响,使得水冰探测的分析结果一直备受质疑。微型合成孔径雷达采用有源相控阵天线体制,可实现多角度、多极化成像,提升目标精细识别能力,有望在极区永久阴影区水冰方面取得突破。

功能要求:获取月面特别是南极永久性阴影区高精度地形地貌;获得目标的不同极化组合下的图像,具备目标分类识别能力,特别是探测月球阴影区域月面土壤水冰的信息;获取南极-艾特肯盆地高精度图像,分析月球南极-艾特肯盆地撞击溅射沉积建造特征。

4 结 论

月球上的水冰是国际月球探测热点,也是未来重要的战略资源;月球水的分布和来源是亟待解决的关键科学问题。本文在调研月球水冰探测与研究现状的基础上,研究分析了月球中的水所涉及的相关科学难题及重大科学意义,论证提出了我国后续月球探测工程对月球水(冰)探测和研究的科学探测任务,提出了实现科学目标的有效载荷需求,特别是其主要的探测功能及对应的科学有效载荷探测方案。

参 考 文 献

- [1] LUCEY P G. A lunar water world[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 531-532.
- [2] ANAND M. Lunar water: a brief review[J]. *Earth Moon & Planets*, 2010, 107(1): 65-73.
- [3] BARNES J J, KRING D A, TARTESE R, et al. An asteroidal ice deposition in polar cold traps[J]. *Icarus*, 2011, 215(1): 1-16.
- [4] STEWART B D, PIERAZZO E, GOLDSTEIN D B, et al. Simulations of a comet impact on the Moon and associated ice deposition in polar cold traps[J]. *Icarus*, 2011, 215(1): 1-16.
- [5] ARNOLD J R. Ice in the lunar polar regions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(B10): 5695-5668.
- [6] BUTLER B J. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1997, 102(E8): 19283-19291.
- [7] SCHORGHOFER N, TAYLOR G J. Subsurface migration of H_2O at lunar cold traps[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2007, 112(E2): 1-11.
- [8] WATSON K, MURRAY B C, BROWN H. On the possible presence of ice on the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(5): 1598-1600.
- [9] WATSON K, MURRAY B C, BROWN H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(9):

- 3033-3045.
- [10] ARNOLD J R. Ice in the lunar polar regions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(B10): 5659-5668.
- [11] HARTMANN W K, DAVIS D R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin[J]. *Icarus*, 1975, 24(4): 504-515.
- [12] CANUP R M, ASPHAUG E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation[J]. *Nature*, 2001, 412(6848): 708-712.
- [13] CANUP R M. Forming a moon with an earth-like composition via a giant impact[J]. *Science*, 2012, 338(6110): 1052-1055.
- [14] HUI H, PESLIER A H, ZHANG Y, et al. Water in lunar anorthosites and evidence for a wet early Moon[J]. *Nature Geoscience*, 2013(6): 177-180.
- [15] HUI H, XU Y, PAN M. On water in nominally anhydrous minerals' from mantle periodontitis and magmatic rocks[J]. *Science China-Earth Sciences*, 2016, 59(6): 1157-1172.
- [16] LIN Y H, TRONCHE E J, STEENSTRA E S, et al. Evidence for an early wet Moon from experimental crystallization of the lunar magma ocean[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 10(1): 14-18.
- [17] PAIGE D A, SIEGLER M A, ZHANG J A, et al. Diviner lunar radiometer observations of cold traps in the Moon's south polar region[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 479-482.
- [18] FELDMA W C, MAURICE S, BINDER A B, et al. Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles[J]. *Science*, 1998(281): 5382.
- [19] HUI H, GUAN Y, CHEN Y, et al. A heterogeneous lunar interior for hydrogen isotopes as revealed by the lunar highlands samples[J]. *Earth Planet and Science Letters*, 2017(473): 14-23.
- [20] FURI E, DELOULE E, TRAPPITSCH R. The production rate of cosmogenic deuterium at the Moon's surface[J]. *Earth Planet and Science Letters*, 2017(474): 76-82.
- [21] LI S, LUCEY G P, RALPH E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. *Pans*, 2018, 36(115): 8907-8912.
- [22] VATTUONE L, SMERIERI M, SAVIO L, et al. Accretion disc origin of the Earth's water[J]. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2013, 371(1): 1-11.
- [23] BREARLEY A J. The action of water. In: Lauretta DS and McSween HY Jr. (eds.) *Meteorites and the Early Solar System II*[M]. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 2006.
- [24] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [24] OUYANG Z Y. Introduction to Lunar science[M]. Beijing: China Aeronautic Publishing House, 2005.
- [25] 郑永春, 邹永廖, 张锋, 等. 月球上的水: 探测历程与新的证据[J]. *地质学报*, 2011, 85(7): 1069-1078.
- ZHENG Y C, ZOU Y L, ZHANG F, et al. Water on the Moon: exploration history and new evidence[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(7): 1069-1078.
- [26] ALEXANDER C M O'D, BOWDEN R, FOGEL M L, et al. The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets[J]. *Science*, 2012(337): 721-723.
- [27] NOZETTE S, LICHTENBERG C L, SPUDIS P, et al. The Clementine bistatic radar experiment[J]. *Science*, 1996, 274(5292): 1495-1498.
- [28] ARAKI H, TAZAWA S, NODA H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya LALT laser altimetry[J]. *Science*, 2009(323): 897-900.
- [29] NOZETTE S, SPUDIS P, BUSSEY B, et al. The Lunar reconnaissance orbiter miniature radio frequency(mini-RF) technology demonstration [J]. *Space Science Reviews*, 2010(150): 285-302.
- [30] SPUDIS P, BUSSEY D, BUTLER B, et al. The Mini-SAR imaging radar on the Chandrayaan-1 mission to the Moon[C]//Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts. Houston: [s. n.], 2009.
- [31] COLAPRETE A, SCHULTZ P, HELDMANN J, et al. Detection of water in the LCROSS ejection plume[J]. *Science*, 2010, 30(6003): 463-468.
- [32] MITROFANOV I G, BARTELS A, BOBROVNITSKY Y I, et al. Lunar exploration neutron detector for the NASA lunar reconnaissance orbiter[J]. *Space Science Reviews*, 2010(150): 183-207.
- [33] CHIN G, BRYLOW S, FOOTE M, et al. Lunar reconnaissance orbiter overview: the instrument suite and mission[J]. *Space Science Reviews*, 2007(129): 391-419.
- [34] PIETERS C M, GOSWAMI J N, CLARK R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 568-572.
- [35] BANDFIELD J L, POSTON M J, KLIMA R L, et al. Widespread distribution of OH/H₂O on the lunar surface inferred from spectral data[J]. *Nature Geoscience*, 2018(11): 173-177.
- [36] WOODEN D H, COLAPRETE A, ENNICO K, et al. Lunar Crater Observation and Sensing Satellite(LCROSS) sission: results from the nadir near-infrared spectrometer aboard the shepherding spacecraft[C]//Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts. Houston: [s. n.], 2009.
- [37] SCHULTZ P H, HERMALYN B, COLAPRETE A, et al. The LCROSS cratering experiment[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 468-472.
- [38] GLADSTONE G R, HURLEY D M, RETHERFORD K D, et al. LRO-LAMP observations of the LCROSS impace plume[J]. *Science*, 2010, 330(6003): 472-478.

作者简介:

贾瑛卓(1978-),女,高级工程师,主要研究方向:月球科学研究。

通讯地址:北京市海淀区中关村南二条1号(100190)

电话:(010)61611605

E-mail:jjayingzhuo@nssc.ac.cn

Lunar Water-Ice Exploration

JIA Yingzhuo¹, QIN Lang^{1,2}, XU Lin¹, MA Tao³, YANG Wei⁴, HUI Hejiu⁵, YAN Jun⁶, ZOU Yongliao¹

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

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033, China;

4. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

5. Nanjing University, School of Earth Science and Engineering, Nanjing 210023, China;

6. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Since the idea of water-ice on the moon was put forward by American scientist Kenneth Watson in 1961, whether there is water in the permanent shadow area has been debated. Lunar water-ice is a major scientific problem related to the "dry" and "wet" theory of the moon. Since the 1990s, the existence of water-ice in the permanent shadow area of the lunar polar region and the problem of water in the early lunar period have become the hot spot of international lunar exploration. Based on the research status of lunar water, the key scientific problems related to lunar water are analyzed from different space dimensions and different exploration methods, and the science objectives, the payload configuration and technical indicators of China's follow-up lunar water-ice exploration projects are put forward

Keywords: water-ice on the moon; lunar exploration; science objectives; science payloads

Highlights:

- Key scientific problems of lunar water and the significance of lunar water-ice exploration are analyzed.
- Science exploration mission and achievements of lunar water-ice are reviewed.
- Science payload configurations and main technical parameters for lunar water-ice exploration on China's follow-up lunar exploration projects are introduced.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]