

月球探测与研究进展*

邹永廖 欧阳自远 李春来

(中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

摘 要

概述了月球的探测历程及探测方式与科学目标的演变,系统总结了月球探测与研究取得的成果,分析了当前月球研究的基本问题;同时对未来的月球探测趋势及我国开展月球探测能力作了初步分析.

关键词 月球科学—探测器

1 月球探测的四个阶段

月球离地球最近,是地球惟一的天然卫星.对月球的观察和研究贯穿了人类的整个文明史,但总体上可分为四个阶段.

阶段一: 1959年以前.长期以来人类只能用肉眼对月球进行描述性、甚至是想象性的观察,到了17世纪中叶,望远镜的问世,使人们能对月球作比较详细的观察,对月球有了长足的认识.

阶段二: 1959年—1976年.真正意义上对月球的科学探测和研究是开始于20世纪50年代末.从1959年始,美国和前苏联展开了以月球探测为中心的空间科学和技术的激烈竞争,在月球探测方面取得了划时代的成就,并带动了一系列包括火箭、信息和材料等的高新技术的飞速发展.本阶段是月球探测的第一次高潮,前苏联和美国进行了规模浩大的月球探测计划,发射成功的月球探测器总共有45枚,其中美国占25枚,前苏联占20枚(表1),从表1可以看出:

(1) 1959年—1976年的第一轮月球探测,历时18年,主要集中在1965年—1972年间,每年成功发射的月球探测器达3—8枚.

(2) 在冷战背景下,美国和苏联展开了月球探测的激烈竞争.苏联在以下领域取得了明显的优势:① 1959年发射了第一个击中月球的探测器(Luna 2);② 1959年Luna 3号飞越月球背面,第一次拍摄到月球背面的照片,并对月球背面的地形单元命名;③ 1966年发射的Luna 9号成为第一个在月面软着陆的探测器;④ 1966年发射的Luna 10号是第一个环月飞行的探测器;⑤ 1970年发射的Luna 16号第一次实现了无人驾驶飞船登月取样并返回地球;⑥ 1970年发射的Luna 17号成为第一艘无人驾驶的月球车在月面行驶并进行科学探测.美国在月球探测领域于1968年发射的Apollo-8号实现了第一次载人的环月飞行;1969年Apollo-11载人登月成功,从而实现了人类的足迹踏上另一个天体的千

* 863-2,7,6,9 的资助
2000-07-03 收到原稿

年梦想, 相继 Apollo-12, 14, 15, 16, 17 载人登月, 对登陆区附近进行了系统的勘测, 并取回了 382 kg 的月壤和月岩样品, 使人类对月球的认识取得了划时代的突出成就.

表 1 发射成功的月球探测器一览表

时 间	名 称	发 射 国 家	探 测 器 类 型	成 果
1959 年	月球 2 号 (9 月 12 日)	苏联	硬着陆	第一个击中月球
	月球 3 号 (10 月 4 日)	苏联	飞越月球	拍摄了第一张月球背面照片
1964 年	徘徊者 7 号 (7 月 28 日)	美国	硬着陆	撞毁前, 发送了 4316 幅电视画面和照片
1965 年	徘徊者 8 号 (2 月 17 日)	美国	硬着陆	撞毁前, 发送了 7137 张高分辨率照片和画面
	徘徊者 9 号 (3 月 21 日)	美国	硬着陆	撞毁前, 发送了 5814 张高分辨率照片和照片
1966 年	探测器 3 号 (7 月 18 日)	苏联	飞越月球	月球背面和西缘照片
	月球 9 号 (1 月 31 日)	苏联	软着陆	第一个月球软着陆器
	月球 10 号 (5 月 31 日)	苏联	环月飞行	第一颗环月飞行器
	勘察者 1 号 (5 月 30 日)	美国	软着陆	向地球发送了 11237 张照片和工程数据
	月球轨道器 1 号 (8 月 10 日)	美国	环月飞行	向地球发回 211 张月球电视照片
	月球 11 号 (8 月 24 日)	苏联	环月飞行	摄影, 技术实验
	月球 12 号 (10 月 22 日)	苏联	环月飞行	摄影, 电视照片
	月球轨道器 2 号 (11 月 6 日)	美国	环月飞行	发回了 184 张电视照片, 为阿波罗飞船选择登月地点
	月球 13 号 (12 月 21 日)	苏联	软着陆	月壤力学测定, 电视全景照片
	月球轨道器 3 号 (2 月 4 日)	美国	环月飞行	发回 182 张月面电视照片
	勘察者 3 号 (4 月 17 日)	美国	软着陆	发回了 6315 张电视照片和工程数据
	1967 年	月球轨道器 4 号 (5 月 8 日)	美国	环月飞行
探险者 35 号 (7 月 19 日)		美国	环月飞行	向地球发回了粒子和磁场资料, 一直工作到 1972 年
月球轨道器 5 号 (8 月 1 日)		美国	环月飞行	发回了 213 张月面电视照片
勘察者 5 号 (9 月 8 日)		美国	软着陆	发回 18000 张电视照片. 第一次做了月球土壤化学分析
勘察者 6 号 (11 月 7 日)		美国	软着陆	发回 30065 张电视照片和化学分析数据
1968 年	勘察者 7 号 (1 月 7 日)	美国	软着陆	发回 21274 张电视照片和化学分析数据
	月球 14 号 (4 月 7 日)	苏联	环月飞行	
	探测器 5 号 (9 月 15 日)	苏联	绕月飞行, 返回	生物标本辐射损伤实验
	探测器 6 号 (11 月 10 日)	苏联	绕月飞行, 返回	月球背面摄影
	阿波罗 8 号 (12 月 21 日)	美国	第一次载人环月飞行	实验飞行, 摄影
	阿波罗 9 号 (3 月 3 日)	美国	载人环月飞行	模拟登月
	阿波罗 10 号 (5 月 18 日)	美国	载人环月飞行	模拟登月

续表 1

时间	名称	发射国家	探测器类型	成果
1969年	阿波罗 11 号 (7 月 16 日)	美国	第一次载人登月	月面停留 21 h 36 min, 宇航员工作 2 h 10 min, 采集标本 28 kg
	探测器 7 号 (8 月 7 日)	苏联	绕月飞行, 返回	月球背面的南半球摄影
1970年	阿波罗 12 号 (11 月 14 日)	美国	载人登月	月面停留 31 h 31 min, 宇航员工作约 8 h, 采集标本 34 kg
	月球 16 号 (9 月 12 日)	苏联	不载人登月	苏联第一艘登月后返回的飞船, 第一次无人驾驶登月取样 (0.12 kg)
	探测器 8 号 (12 月 20 日)	苏联	绕月飞行, 返回	照相
	月球 17 号 (11 月 10 日)	苏联	不载人登月	第一艘无人驾驶月球车
1971年	阿波罗 14 号 (1 月 31 日)	美国	载人登月	月面停留 33 h 30 min, 宇航员工作 9 h 29 min, 采集标本 42.64 kg
	阿波罗 15 号 (7 月 26 日)	美国	载人登月	月面停留 66 h 55 min, 宇航员工作 18 h 36 min, 采集标本 77.5 kg, 月球车行程 27 km, 从飞船上释放粒子和磁场子卫星
	月球 19 号 (9 月 28 日)	苏联	环月飞行	摄影
1972年	月球 20 号 (2 月 14 日)	苏联	不载人登月	自动月球车取样返回
	阿波罗 16 号 (4 月 16 日)	美国	载人登月	月面停留 71 h 02 min, 宇航员工作 20 h 14 min, 采集标本 96.4 kg, 月球车行程 27.1 km. 释放了粒子和磁场子卫星
	阿波罗 17 号 (12 月 17 日)	美国	载人登月	月面停留 74 h 59 min 38 s, 宇航员工作 22 h 05 min, 采集标本 12.5 kg, 月球车行程 36 km
1973年	月球 21 号 (1 月 8 日)	苏联	不载人登月	月球车 2 号漫游, 测量磁场、辐射、土壤, 激光定位, 摄影
1974年	月球 22 号 (1 月 2 日)	苏联	环月飞行	拍摄近距离照片
1976年	月球 24 号 (8 月 14 日)	苏联	不载人登月	月球土壤深处取样 (1 kg) 返回地球
1990年	飞天号探测器 (1 月 24 日)	日本	环月飞行器	飞天号探测器用于地-月轨道环境探测, “羽衣” 月球轨道器用于对月观测
1994年	克莱门汀 -1 号 (1 月 25 日)	美国	环月飞行	获取详细的极高分辨率的月球地质和地形图
1998年	月球勘探者号 (1 月 7 日)	美国	环月飞行	探测月球极地水冰、月球表面元素制图

(3) 苏联的月球探测器主要有月球号 (Luna) 系列和探测器 (Zond) 系列。其中一共发射了 24 枚月球号系列探测器, 实现成功探测的有 15 次; 月球号是随着月球探测技术与水平的提高而实施的综合性、系列性的不载人月球探测系列, 但 1966 年以前发射的探测器成功率极低, 1966 年以后月球号探测的成功率有明显的提高。而 Zond 号系列探测器则是一种专业化的月球探测系列, 主要是通过绕月飞行进行月面照相, 或开展地月空间环境探测, 并进行返回地球实验飞行。

(4) 美国的月球探测主要包括徘徊者号 (Ranger) 系列、勘察者号 (Surveyor) 系列、月球轨道号 (Lunar Orbiter) 系列和阿波罗号 (Apollo) 系列。徘徊者号系列, 于 1961 年—1965 年间实施, 其主要任务是通过飞越月球拍摄月面照片或通过硬着陆过程拍摄较近距离的、分辨率更高的照片, 为月球表面的地形、地貌、地质构造提供了全面而精细的照片; 勘察者号系列实施于 1966—1968 年间, 是专门从事月球探测器安全软着陆、在软着陆过程中拍摄较精细的月面照片、降落后进行月面土壤和岩石的物理机械性质、化学成分测定的月球探测系列; 月球轨道号系列于 1966—1967 年间实施, 主要是为载人登月阿波罗号的实施而进行全月表面精细制图、优选载人登月的登陆位置而实施的月球探测系列; 阿波罗号系列探月器于 1968—1972 年间实施, 其宗旨是载人登上月球并安全返回地球, 通过载人绕环地球、环绕月球飞行并返回地球, 最终 6 次实现了人类登上月球并安全返回地球, 取回 381.7 kg 月球样品, 对月球科学的各个领域开展了较全面的研究与探测, 阿波罗号系列的实施, 是人类历史上对月球进行的最为宏伟的划时代的月球探测活动。

从 1959—1976 年间第一轮月球探测的历程可以看出, 探测月球的方式具有以下的演变历程, 这种演变是随着空间技术的发展和加深对月球的了解的深入而发展的。

① 击中月球与飞越月球 (1959 年). 在开展探测初始阶段, 只能进行击中月球与飞越月球拍摄月球照片。

② 硬着陆 (1964—1965 年).

③ 软着陆 (1966—1968 年).

④ 环月飞行 (1966—1973 年), 是持续时间最长的月球探测方式。

⑤ 载人环月飞行 (1968—1969 年).

⑥ 不载人软着陆并返回地球 (1970—1976 年).

⑦ 载人登月并返回地球 (1969—1972 年).

月球探测的科学目标是随着对月球认识的进展和空间探测技术的进步而逐渐演变的, 根据上述月球探测分析, 本阶段月球探测目标的演变如表 2 所示。

表 2 月球探测目标的演变

探测目标	时间
● 击中月球	1959 年
● 飞越月球、拍摄月球背面照片	1959 年
● 硬着陆, 拍摄高分辨照片	1964—1965 年
● 软着陆, 对月面进行各种科学参数的测定	1966—1968 年
● 环月飞行, 编制和不断完善全月面地形图、地貌图、地质图及近月空间探测, 优选载人登月着陆位置	1966—1973 年
● 载人环月飞行并返回地球, 为载人登月与返回地球积累科学资料	1968—1969 年
● 不载人月球探测器软着陆并自动取样返回地球	1970—1976 年
● 载人登月并返回地球, 对月球的空间与表面环境、月球的地形、地貌、地层与地质构造、月表土壤与岩石的分布、成分与成因、月球的地球物理参数、月球的内部结构、演化与成因	1969—1972 年

阶段三: 1976 年—1994 年. 这段时期是月球探测活动的低潮, 其原因可能是: ① 第一次月球探测高潮, 是由前苏联和美国两个超级大国为争夺空间霸权而掀起的竞争, 是冷

战的产物。随着冷战形势的缓和,加之前苏联的解体,空间霸权的争夺有所缓解。②第一次月球探测高潮,获得了难以计数的数据与资料,动员了世界各国的有关实验室对月球样品开展系统而深入的研究,各国科学家都需要相当长的一段时间来整理、消化和研究已有的资料,更需要提高到理性认识的阶段。③需要在战略、技术与集成、探测效益等各方面总结第一次月球探测高潮耗资大、效率低、探测水平不高的经验与教训。

阶段四:尽管1986年美国就提出了重返月球、建立月球基地的设想,但真正掀起新一轮探月高潮是1994年1月25日美国发射的“克莱门汀号”(Clementine)宇宙飞船。“克莱门汀号”探月器通过环月飞行,对全月球进行了高精度的摄影测量,返回了大量数据,获得了全月球的数字地图和地形图,图像的分辨率比以往的月球照片高出100倍以上;“克莱门汀号”飞船还用紫外和近红外摄像机第一次对整个月球表面进行了11个波段的扫描摄影,获得了许多极有价值的专业地图,包括全月球表面铁和钛的分布图。1998年1月7日美国又发射了“月球勘探者号”(Lunar Prospector)探测器,它的成功发射,标志着“又快、又好、又省”的空间探测战略与重返月球计划的真正实施,这是因为,“月球勘探者号”重126 kg,耗资仅0.63亿美元,携带有 γ 谱仪、 α 谱仪、中子谱仪、电子反射仪和磁强计等科学仪器,先进行环月低高度(距月面约100 km)探测一年,再降低高度到50 km和10 km,进行高分辨测量,最后撞击在月表上。Lunar Prospector完成了月球表面一些有用元素(U、Th、K、Fe、Ti等)成份分布探测,并进行资源利用前景的评价,大大加深了对月球成因和演化的认识;进行了月球全球磁场和引力场测绘与制图;分析了月球极区撞击坑阴影区水冰的分布与含量。上述成果为月球基地的建立提供了科学依据,因此,这一阶段也被称为月球探测的第二次高潮。

2 月球探测的主要成果

通过对月球所进行的飞越月球、绕月飞行与绕月卫星、月球自动车、无人和载人登月探测与取样,人们获得了极其丰富的数据,对月球的形状、大小、轨道参数、近月空间环境、月表结构与特征、月球的岩石类型与化学组成、月球的内部结构与演化历史取得了一系列突破性进展,对月球的起源和地月系统的相互作用与影响获得了新的认识。

- 精确测定了月球的形状、大小和运行轨道;证实月球的岩石有极微弱的剩磁,磁化强度约 $(2-4)\times 10^{-6}$ 电磁单位/g,月球没有磁场,当运行到地球与太阳之间的新月位置时,不受地磁场影响,只受太阳风控制;当处于满月位置时,则刚好位于中远磁层结构和动力学十分重要的区域,属太阳风阴影区;月球平均密度为 $2.44\pm 0.004(\text{g}/\text{cm}^3)$,表面重力加速度为 $162\text{ cm}/\text{s}^2$;月球的重力场不均匀,月球内部存在一些重力异常的质量瘤;月球表面热流为 $2\mu\text{W}/\text{cm}^2$,内部的地温梯度很小,月球内部能量近于衰竭,月震能释放 $< 10^6\text{ J}/\text{h}$,每年月震释放的能量仅相当于地震的百万分之几倍;银河宇宙线、太阳耀斑粒子和太阳风可直接抵达月面,注入月壤和月岩,形成多种宇宙成因核素。

- 月球表面几乎没有大气(月面气压仅为 10^{-14} 大气压)和大气活动,月球白昼温度为 $130-150^\circ\text{C}$,太阳照射到的阴影区和夜晚温度为零下160到零下 180°C 。月球表面没有液态水,更没有任何生命存在的痕迹。

• 月球表面主要的地形单元为月海盆地、月陆和撞击坑。月海是指地形相对低洼的大型盆地，月球正面的月海约占正面面积的一半，背面月海分布极少。风暴洋、静海、雨海、冷海、澄海、丰富海、危海、云海、东海等月海盆地大约是距今 39 亿年前由大量大型的小天体撞击月表挖凿而形成，后期为大面积火山喷发的玄武岩所覆盖。撞击月海盆地时溅射的大量岩石碎块堆积在盆地周围，形成围绕月海盆地的山系，如比利牛斯山脉、阿尔泰山脉、阿尔卑斯山脉、朱拉山脉、喀尔巴阡山脉、科迪勒拉山脉等。月陆也称高地，是月面最古老的地形单元，高地物质大部分是富含长石的深成岩。月海和月陆表面布满了撞击形成的环形构造，称为撞击坑，直径大于 1 km 的撞击坑占月表面积的 7—10%。较年轻的撞击坑尚保留有撞击溅射物运动所形成的辐射纹。

• 月球表面覆盖着一层较厚的月壤，一般厚 5—10 m，由月岩破碎的角砾、岩屑、粉尘和冲击玻璃所组成。月壤中含有丰富的太阳风组份，H、He、N、C 的含量分别为 $(0.1—211) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ (标准状态下)、 $(1—63) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ (标准状态下)、 $(13—153) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ (标准状态下)、 $(10—280) \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ (标准状态下)。月壤中的 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 比值为 2300—2800， ^3He 的浓度为 $(0.4—15) \times 10^{-9} \text{ g/cm}^3$ (标准状态下)。初步估算全月球月壤中 ^3He 的资源量可达 100—500 万吨。 ^3He 是人类未来可长期使用、清洁安全而廉价的可控核聚变最佳燃料，其他副产品如氢、氮、二氧化碳等也将是月球基地生命保障体系的重要资源。

• 组成月球的化学元素与地球的是相同的，但月球更富含难熔元素，并缺少挥发性元素，表明形成月球时的凝聚温度比地球略高。在月岩中已发现 100 多种矿物，绝大多数矿物的成份与结构与地球的矿物相同，仅发现静海石等 5 种矿物属地球上未发现的矿物。月球矿物普遍不含水，矿物中的变价元素多为低价元素，如 Fe 多为 Fe^0 和 Fe^{2+} ，表明月球矿物是在缺水和还原的条件下形成。月表的岩石类型比较简单，组成月陆的岩石为富含斜长石的深成岩，主要是斜长岩、辉长岩、斜长苏长岩及富含钾、稀土及磷酸盐的克里普 (KREEP) 岩。组成月海的岩石主要是富含铁 (钛) 镁质的玄武岩，可划分为富钛、低钛、富钾玄武岩等。有的月海玄武岩含钛铁矿可高达 25% (体积)，钛铁矿是月球上提炼钛、铁与水的重要资源。

• 根据月表撞击坑的相对密度及相应的岩石年龄的测定数据，月球的地质演化历程从老到新可划分为：

前雨海纪 (4639.5 亿年)：包括月亮的形成，撞击坑密度最大的月陆区及强夷平过程。

雨海纪 (39.531.5 亿年)：大型撞击形成月海盆地，如雨海事件；多次月海玄武岩喷发，形成广泛分布的月海玄武岩。

爱拉托逊纪 (31.518 亿年)：形成大量撞击坑。

哥白尼纪 (18 亿年至今) 形成有辐射纹的撞击坑。

• 根据月震和小天体撞击月表时月震波传播的测定与分析，月球的内部呈层圈结构。但没有发现具有类似地球的铁镍核。

• 根据对月球各类岩石的成份、结构与形成年龄的研究，月球的演化历史的重大事件可归纳为以下几个阶段：(1) 月球的形成年龄约 45.6 亿年。(2) 月球形成后曾发生过较大

规模的岩浆洋事件, 通过岩浆的熔离过程, 于 41 亿年前形成了斜长岩月壳, 月球通过内部物质调整形成月幔与月核. (3) 根据雨海撞击事件的年龄测定, 在 40—39 亿年前, 月球曾遭受到小天体剧烈的撞击, 形成广泛分布的月海盆地, 称为雨海事件. (4) 月海泛滥事件, 在 39—31.5 亿年间, 月球发生过多次剧烈的玄武岩喷发事件. 玄武岩充填月海的厚度不等, 如风暴洋约几百米, 危海、晴海和雨海中玄武岩充填厚度分别达 1.5—2 km, 1.6 km 及 1.5—2.5 km. (5) 31.5 亿年以来, 月球内部的能源逐渐枯竭, 没有大规模的岩浆火山活动与月震, 小天体的撞击仍然持续发生, 产生具有辐射纹的撞击坑及重叠的撞击坑, 使月面具有斑驳陆离、千疮百孔的面貌. (6) 月球表面没有大气、水体和生命活动, 日夜温差变化幅度很大, 使月球表面覆盖着一层机械破碎的岩屑与粉尘组成的月壤. 1994 年发射的克莱门丁 (Clementine) 探测器和 1998 年发射的月球勘探者 (Lunar Prospector), 探测到月球南北极区撞击坑的永久阴影区有含量极低的水冰与月壤混合, 水冰的来源较公认的看法是, 当彗星撞击月表时, 撞击体剧烈破碎, 其碎块溅射落在原有的撞击坑永久阴影区与月壤混合, 估计月表的永久阴影区残留的水冰可达 66 亿吨.

• 初步形成了有关月球的起源假说, 主要有四种假说: (1) 捕获说认为地球与月球不属同一星云团物质形成的, 由于地-月轨道的变化, 在 1—10 个地球半径范围内月球被地球捕获, 成为地球的卫星. (2) 共振潮汐分裂说认为地球初始呈熔融态, 由于潮汐共振, 在赤道面上一部分熔体分裂, 冷凝后形成月球. (3) 双星说认为在太阳星云凝聚过程中, 在星云的同一区域形成了地球与月球. 以上三种假说, 虽然均有一定依据, 但在地月成份与自转速度的差异, 氧及其他同位素组成的相似性等方面, 仍存在许多难以自圆其说的难点. (4) 大碰撞分裂说, 这是近年来形成的并获得大多数学者的支持的月球成因假说, 这个假说认为: 地球早期受到火星大小的小天体的撞击, 两个天体的硅酸盐幔的一部分碎片在轨道组成月球; 这个假说较合理地解释了月球的化学元素与同位素组成, 地球自转加速及地月自转速度的差异, 月球早期曾产生过岩浆洋及斜长岩月壳与月海玄武岩的喷发.

3 当前月球科学研究的基本问题

尽管月球探测已经取得了大量成果, 但仍相当分散; 月球登月取样还局限于月球正面, 对月球的整体性了解还很肤浅.

目前, 月球研究的科学问题已跨越了描述性和解释性阶段, 侧重于机制与成因的解释, 主要体现在以下几个问题. (1) 月表环境与地月空间环境: 包括①月球大气层的起源、演化、现状与保持机制; ②月表三维地貌的测定; ③月壤的成因及其厚度分布的差异性; ④太阳风粒子在月壤矿物中的吸附机理和影响因子; ⑤月岩剩磁的强度、月岩撞击磁化记录与机理; ⑥月球的岩石类型、分布特征与规律; ⑦全月球的地质构造框架及形成演化过程. (2) 月球的内部结构: 包括①月球内部层圈结构的划分及其成因; ②月球巨厚岩石圈 (1000 公里厚) 的构成和成因; ③月球早期全球性偶极磁场的起源、消失过程与机理; ④月球内部质量瘤分布的差异性、性质和成因; ⑤月球内部热能的来源、传导与月表热流. (3) 月球的起源与演化: ①月球演化阶段的科学划分; ②月球起源理论的完善与演化机制的探讨; ③地月系的形成过程.

月球研究的应用问题也已提到议事日程,侧重于能源、资源和环境开发利用的评估与实施方案的预研究. 主要包括: (1) 月球能源的开发利用前景与实施方案. ①月球表面可以获得极其丰富而稳定的太阳能,在月表建立并联式太阳能电站,产生的能源除供人类在月球上建立的“地球村”外,还可输送到地球;②月壤中气体(如氢、氦、氖、氩、氮等)资源,尤其是核聚变燃料 ^3He 的开发和利用. 能源是人类生存、发展面临的最严重的问题之一. 矿物燃料在可预见的将来就将消耗殆尽. 未来解决能源问题的出路有两条:一是太阳能,二是核能. 理想的核能是利用可控的核聚变反应:用氘聚变成氦;或用氘和氚聚变成氦;或用氘和氦-3聚变成氦. 前两种目前较难实现,而氘和氦-3的聚变反应较易控制,比较安全、干净. 月球既无磁场又无大气,太阳风粒子能很容易地抵达月球表面,渗入月壤颗粒,形成一层约 $10\mu\text{m}$ 厚的覆盖层,使月壤颗粒表面蕴藏着丰富的氦-3、氢和其它气体元素. 在地球上,天然气矿床中已知的氦-3资源只够维持一个500兆瓦规模发电厂数月的用量,而月球上,氦-3的丰度可达 $(0.4-15)\times 10^{-12}$,储量估计100—500万吨,以现在全球能源消耗量估算,月球的氦-3可供人类使用1万—5万年. 同时,从月壤中每提取一吨氦-3,还可得到约6300吨氢、700吨氮和1600吨碳,这些副产品对维持月球永久基地来说,也是必需的. (2)月球岩石和土壤中资源的开发利用前景与实施方案. 月陆区广泛分布的斜长岩,富含Si、Al、Ca、Na等元素. 克里普岩(KREEP)以富钾(K)、稀土元素(REE)和磷(P)而命名. 月海玄武岩含钛铁矿可达25%(体积),高钛月海玄武岩含钛铁矿约15%—28%,而低钛玄武岩含钛铁矿也达到10%. 月海玄武岩中的钛铁矿甚至比我国攀枝花钒钛磁铁矿矿石(平均含钛10.56%)更富含钛. 钛铁矿不仅是Fe、Ti和O的极富潜力的重要资源,钛铁矿与氢的反应: $\text{FeTiO}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{TiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 将是月球基地获取水资源的重要途径. 月壤中富含各种气体,当月壤加热到 700°C 时,可释放出全部气体. (3)月球水资源的探测与开发利用前景研究. 月球南、北极区撞击坑中的永久阴影区存在水冰,水冰与月壤中的碎屑、岩粉混合,含量约0.5%—1%. 月球水冰的发现为解决月球“地球村”的供水提供了新的前景. 由于月壤中水冰的含量极低,储量不明,分布面积又广,难于开发利用,也许远不如直接用月壤中的氢与氧合成水,或在钛铁矿的冶炼过程中生成的水. 因此,在未来的月球探测和研究中,我们需要进一步探测月球表面水的分布,水富集区的划分,水冰的开采、分离与提取技术的前期研究. (4)月球特殊环境的开发利用. 月球没有大气层,没有大气活动,具有高真空度;月球没有全球性磁场;月球是一个“僵死”的天体,地质构造非常稳定,火山活动绝迹,月震强度极微弱;月球表面的重力仅为地球的 $1/6$;月球上没有任何生命物质与生命活动形成的污染. 因此月球的这些特殊环境可以为我们所开发利用,主要包括:①月球天文观测站与研究基地. 建立月球天文观测站对太阳系、银河系和星际空间进行观测研究比哈勃望远镜精度高、造价低,运行与维护费用低,并可进行天体物理、重力波物理学和中微子物理的观测与实验. ②地球观测站. 对地面的气候变化、生态演化、环境污染、自然灾害进行高精度观测与监视,为人类的可持续发展作出贡献. 地球观测站可以清晰地观察和监视人类的各种经济、军事与社会活动,进行研究、预报与评估,提供极有价值的信息;月球基地甚至可以成为一个军事平台,具有重要的军事和战略意义. ③可作为天然的“空间站”,成为深空探测的前哨阵地和转运站.

4 21 世纪初月球探测与研究的发展趋势

21 世纪初的 20 年将是月球探测的另一个高潮, 那么, 世界各国的探月活动有何计划出台? 未来的月球探测与研究的发展态势将会是如何的呢?

1994 年欧洲空间局 (ESA) 就提出的重返月球建立月球基地的计划。目前欧空局正在着手于两项月球探测技术的研究: ① 欧洲月球软着陆演示计划 (LEDA)。为了掌握月面软着陆技术和月面移动能力, 计划于 2002 年发射一个在南极区降落的月球软着陆探测器, 包括月面巡游车、机械臂、土壤处理试验装置及其他现场测量仪器, 对月球南极地区的地形与地貌进行成像分析, 为建立月球基地积累数据。② 月球轨道观测站 (MORO)。为测定月球表面的地形、地貌、岩石成份和化学组成, 探测月球内部的热状态和结构, 计划 2003 年发射一个主卫星和一个在极轨低高度运行的子卫星, 携带紫外、红外、可见及 X 射线谱仪, 测定热流和地形的高度计, 用于大地测量和测定重力的子卫星。

1995 年美国提出了面向 21 世纪的“新盛世”计划, 该计划以全新的发展思路, 首先确认、开发、验证空间探测活动所需的新技术, 然后发射大量小型低成本小卫星, 实现高频度发射, 组成星座并联成一个整体, 采用整星计算机一体化设计等新途径, 实现卫星分系统模块化, 电子部件集成化, 有效载荷微型化, 自主性卫星运行, 使卫星的功率、重量和成本上一个新台阶。具体的目标与计划为: ① 90 年代末至 21 世纪初, 用机器人对月球进行探测; ② 2005 年前, 实现重新载人登上月球, 在月球上建立适于居住的前哨站, 安装科学仪器月球取氧装置等; ③ 2005—2010 年建成第一个具有生活保障系统的受控生态环境的月球基地, 月球基地进行月面建筑、运输、采矿、材料加工和各项科学研究。

作为新崛起的空间大国之一的日本也制定了一系列雄心勃勃的探月计划。在其整个计划中, 将在 21 世纪初发射“月球-A”探测器, 携带二个穿透器与轨道分离器, 穿透月面 23m, 进行月震探测; 通过 Lunar-A 进行月球的全球性地形地貌、矿物岩石成份和内部结构的探测基础上, 在 2000 年—2015 年的 15 年期间, 将发射月球轨道卫星系列探月器, 进一步探讨月球的全球性演化; 2015 年后, 拟建立一个采用大型太阳阵和红外干涉仪的月球极区定位观测站, 对月球开展系统而深入的研究。

印度也计划于 2005 年发射绕月飞行的月球探测卫星, 探测月球资源含量和分布。

月球探测是一项先进科学与技术的综合与创新, 是一项长周期、大投资的重大工程, 任何一个国家都难以独自完成, 因此, 未来月球探测的必然趋势和特色是走国际合作道路。

纵观世界各国 21 世纪月球探测计划, 21 世纪的月球探测与 20 世纪月球探测相比较, 目标更明确, 规模更宏大, 参与国家更多。其主要特点表现为: ① 实现“又快、又好、又省”的探测总方针; ② 建立月球基地、开发资源、解决重大科学难题是探测的总指导思想; ③ 国际合作必将是未来行星与月球探测的必由之路。而探月活动的总趋势必将是朝着为解决以下几个问题的方向进行: ① 对月球地形、地貌、地质、地球化学与内部构造特征的深入研究, 从而深化人类对月球、地球和太阳系形成与演化的认识; ② 把月球建设成为集对地监测和星空探测与研究的平台, 成为深空探测的前哨站与转运站等功能的基地; ③ 月球的太阳能与核聚变燃料的开发与利用; ④ 月球岩石和土壤中矿产资源的开发与利用。

月球不属于任何国家, 但谁先利用, 谁先获益。作为具有空间探测能力的中国到底有

没有能力开展月球探测呢?

在基础理论研究上,我国学者自60年代中期就开始了月球及行星、地外物体等方面的系统研究,特别是在太阳系小天体如小行星、彗星、陨石、宇宙尘等,月质学和比较行星地质学,小天体撞击地球诱发的气候、环境灾变与生物灭绝等研究领域上取得了一系列重大的研究成果。

在空间技术上,我国从20世纪50年代末就开始了空间技术的攻关性研究,在过去近50年中取得了一系列辉煌的成就,特别是1999年11月利用长征二号F型运载火箭成功发射的“神舟号”载人试验飞船顺利回收,实现了中国载人航天技术历史性的跨越。目前,我国现有的“长征”系列运载火箭与发射场可以满足发射月球探测器的基本要求;月球探测器的各分系统如结构、热控制、姿控、轨控、电源、测控、数据管理等系统大部分可继承已有的研制成果;我国已具有多年研制空间环境探测器和空间遥感器的能力与经验,在空间环境探测器方面,高能带电粒子探测器、低能粒子探测器、半导体望远镜、等离子体探测器、流星尘埃仪、磁强计、散射计、多谱段辐射计、成像光谱仪等的研制已很成熟。我国现有的地球测控网(陆基站和测控船)用于月球探测的测控通信基本可行,但用于图像传输的数据率较低,测轨精度亦较差,但只要结合我国月球探测的需要,在已有的航天测控网的基础上加以改进或增建一座天线直径34m或64m的地面主控站即可满足月球与火星探测器的测控与通信要求。所有这些在空间环境探测器和星载遥感器及其在轨运行管理的经验等,都为实施与完成我国月球探测任务提供了必要的基础设施。

尽管中国在月球探测上远远比美国、欧空局、日本、俄罗斯等空间大国落后,但从基础研究方面,还是空间技术方面,我国都已具有开展月球探测的能力。

参 考 文 献

- [1] 欧阳自远. 天体化学. 北京: 科学出版社, 1998. 93—145
- [2] 欧阳自远. 月球地质学. 地球科学进展, 1994, 9(2):80—81
- [3] 中国科学院地球化学研究所. 月质学研究进展. 科学出版社, 1979
- [4] Binder A B. Lunar prospector: overview. *Science*, 1998, 281:1475—1476
- [5] Konopliv A S, Binder A B, Hood L L *et al.* Improved gravity field of the Moon from Lunar Prospector. *Science*, 1998, 281:1476—1480
- [6] Lin R P, Mitchell D L, Curtis D W *et al.* Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: results from Lunar Prospector. *Science*, 1998, 281:1480—1484
- [7] Lawrence D J *et al.* Global elemental maps of the Moon: the Lunar Prospector Gamma-Ray spectrometer. *Science*, 1998, 281:1484—1489
- [8] Lawrence W C *et al.* Major compositional units of the Moon: Lunar Prospector Thermal and fast neutrons. *Science*, 1998, 281:1489—1493
- [9] Elphic R C *et al.* Lunar Fe and Ti abundance: comparison of Lunar Prospector and clementine data. *Science*, 1998, 281:1493—1500

PROGRESS OF EXPLORATION AND STUDY OF THE MOON

ZOU Yongliao OUYANG Ziyuan LI Chunlai

(Space Chemistry Group, Institute of Geochemistry, The Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

Abstract

In this paper, the authors outline the four exploration stages of the Moon and their exploration status and scientific objectives, summarize the achievements of exploration and study of the Moon. In the meantime, the authors also study the exploration trend of the Moon and point out that China has the capacity to explore the Moon not only in basic theory studies but also in the space technologies.

Key words Science of the Moon, Detector