

·学科进展与展望·

# 月球探测的进展与我国的月球探测

欧阳自远<sup>\*†‡</sup> 李春来<sup>†</sup> 邹永廖<sup>†</sup> 刘建忠<sup>†</sup>

(<sup>†</sup>中国科学院国家天文台,北京 100012;<sup>‡</sup>中国科学院地球化学研究所,贵阳 550002)

**[摘要]** 月球探测是我国航天活动发展的必然选择,将成为我国航天事业的第三个里程碑,自20世纪60—70年代的第一次月球探测高潮后,迎来了“重返月球”的又一次月球探测热潮,以开发利用月球上丰富的核聚变燃料氦-3、矿产和空间环境资源等为最终目标。我国已经具备了进行月球探测的技术能力,首期工程的科学目标包括获取月球表面三维影像、分析月球表面有用元素含量和物质类型的分布特点、探测月壤厚度和探测地-月空间环境。

**[关键词]** 月球探测,月球资源,科学目标

## 1 月球探测的历程

自古以来,人们就对月球寄予了真情期望的遐想和充满诗意的赞美,只能靠肉眼观测月球并寄托自己的想象。直到16世纪望远镜发明以后,人类才能够用望远镜观察月球,在空间分辨率大于10公里时,人们发现月球上有高山和广阔的平原并布满了环形山。真正对月球的了解是在上世纪50年代以后,月球探测进入空间探测阶段。

### 1.1 第一次探月高潮(1958—1976年)

月球是离地球最近的天体,是人类走出地球摇篮,迈向浩瀚宇宙的第一步。在冷战背景下,美国和前苏联展开了以月球探测为中心的空间竞赛,掀起了第一次月球探测高潮。自1958—1976年,美国和前苏联共发射83个月球探测器,成功45个。1969年7月美国阿波罗11号飞船实现了人类首次登月,相继阿波罗-12、14、15、16、17和前苏联的月球号-16、20和24进行了载人和不载人登月取样,共获得了382公斤的月球样品和难以计数的科学数据。月球探测取得了划时代的成就。

月球探测是人类进行太阳系探测的历史性开端,大大促进了人类对月球、地球和太阳系的认识,带动了一系列基础科学的创新,促进了一系列应用科学的新发展。月球探测,尤其是载人登月是人类

迈出地球摇篮的第一步,是整个人类历史进程的里程碑。月球探测成为人类历史和科学技术发展史上划时代的标志性事件。

美国与前苏联正是通过月球探测,建立和完善了庞大的航天工业和技术体系;有力地带动和促进了一系列科学技术的快速发展;月球探测技术在军事和民用领域得到延伸、推广和二次开发,形成了一大批高科技工业群体,包括微电子,计算机,遥感、遥测与遥控,微波雷达,红外与激光,超低温、超高温和超高真空技术以及冶金,化工,机械,电子视听声像和信息传递等,产生了显著的社会效益和经济效益。据不完全统计,从阿波罗计划派生出了大约3000多种应用技术“成果”。在登月后的短短几年内,这些应用技术就取得了巨大的效益——在登月计划中每投入1美元就可获得4—5美元的产出。

人类通过对月球的探测,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、月球的资源与能源、月球的内部结构与演化历史等的研究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。

### 1.2 月球探测宁静期(1976—1994年)

自1976年以来,延续约18年没有进行过任何成功的月球探测活动,其原因可能是:随着冷战形势

\* 中国科学院院士。

本文于2003年5月8日收到。

的缓和,随后前苏联的解体,空间霸权的争夺有所缓解;需要总结探测活动耗资大、效率低、探测水平不高的经验与教训,提出新的探测思路 and 战略;以月球探测获得的技术为基础,将月球探测技术向各领域转化、推广和应用,完善航天技术系统,研制新的空间探测技术,如航天飞机及其他往返运输系统、大推力火箭、高效探测仪器等,为进一步开发利用地外资源进行科学和技术准备;需要较长时间进行探测资料的消化、分析与综合,将月球科学研究提高到更高理性认识的阶段。

### 1.3 重返月球

1986年,空间探测技术和月球科学研究达到了新的阶段,对月球进行科学的、“理性”的探测时机已经成熟,美国航空航天局(NASA)开始构思重返月球的计划。1989年7月20日美国总统布什宣布:“在即将到来的10年里,我们努力的目标是自由号太空船;然后,在新的世纪,我们要重返月球,重返未来,而且这一次要呆下去”。“要呆下去”开发利用月球矿产资源、能源和特殊环境,建设月球基地,为人类社会的可持续发展服务,已成为新世纪月球探测的总体目标。

1994年和1998年,美国成功发射了“克莱门汀”和“月球勘探者”号月球探测器,对月球形貌、资源、能源和水冰等进行了探测,标志着“又快、又好、又省”空间探测战略的实施,奏响了人类重返月球、建立月球基地的序曲。俄罗斯、欧洲空间局、日本和印度在上世纪90年代也制定了月球探测的计划,并在积极实施中,最近3年将发射4个月球探测器。此外,英国、德国、奥地利、乌克兰等国家,也都提出了相应的月球探测计划。在2002年10月的世界空间大会上,美国宣布将在近期启动系统的月球探测新计划,开发利用月球资源。总之,月球探测已经成为各航天国家空间探测的重点,月球探测的新高潮即将到来。

## 2 新世纪初月球探测的趋势与前景

未来的月球探测将主要侧重于:(1)月球能源资源的全球分布与利用前景评估;(2)月球矿产资源的全球分布和利用前景评估;(3)月球特殊空间环境资源(超高真空、无大气活动、无磁场、地质构造稳定、弱重力、超洁净)的开发利用,建立月基天文台,建立特殊生物制品和特种新型材料生产基地,建立基础科学实验室等;(4)建立月球基地的方案与逐步实施。

纵观世界各国21世纪月球探测计划,与初期的月球探测相比较,重返月球,建立月球基地的目标更明确,规模更宏大,参与国家更多。月球不属于任何国家,但谁先利用,谁先获益。

### 2.1 月球将为人类社会提供长期、稳定、廉价和洁净的核聚变燃料

月球上可利用的能源主要有太阳能和核聚变燃料。由于月球表面没有大气,太阳辐射可以长驱直入;同时,月球上的白天和黑夜都相当于14.5个地球日,因此在月球表面建立全球性的并联式太阳能发电厂,就可以获得极其丰富而稳定的太阳能。这不但解决了月球基地的能源供应问题,还可以用微波将能量传输到地球,为地球提供新的能源。

月球表面都覆盖着一层由岩石碎屑、粉末、角砾、撞击熔融玻璃等成分极为复杂的物质组成的结构松散的混合堆积物即月壤。由于月球几乎没有大气层,月球表面长期受到太阳风粒子的注入。由于太阳风离子注入物体暴露表面的深度一般小于 $0.2\mu\text{m}$ ,因此这些稀有气体在细粒月壤中平均含量最高,有些月壤细粒粉末中稀有气体含量高达 $0.1\text{--}1\text{cm}^3/\text{g}$ (标准状态下),相当于 $10^{19}\text{--}10^{20}$ 原子/厘米<sup>3</sup>。在整个月球演化史中,由于外来物体对月球表面的频繁撞击,月壤物质几乎完全混合,在深达数米的月壤中这些稀有气体的含量较均匀。

在月壤的稀有气体中,最让我们感兴趣的是氦-3。因为,相比目前正加速发展的利用氘和氚反应的热核聚变装置来说,用氦-3来进行核聚变反应具有比用氘作燃料有更多的优点,主要表现在:(1)反应产生的能量更大;(2)传统的氘和氚核反应过程中,伴随核聚变的产生,要产生大量的高能中子,而这些中子能够对核反应装置产生广泛的放射性损伤;相反,若用氦-3作为反应物,则主要产生高能质子而不是中子,对环境保护更为有利;(3)氦本身具有放射性对,而氦-3则没有。

月壤中氦-3的资源量对未来人类开发利用月球能源具有极为重要的意义。由于月壤中氦-3的含量较为稳定,只要能够精确探测月壤的厚度,就可以估算出月壤中氦-3的资源量。以“阿波罗”和“月球”探测器的实测结果为参考标准计算,月壤中氦-3的资源总量可达100—500万吨。而全地球上天然气可提取的氦-3只有15—20吨。建设一个500MW的D—<sup>3</sup>He核聚变发电站,每年消耗的氦-3仅需50公斤。全世界的年总发电量约须100吨的氦-3,也就是说,月壤中的氦-3可供地球能源需求达

万年。因此,开发月壤中所蕴涵的丰富的氦-3对人类未来能源的可持续发展具有重要而深远的意义。

据计算,氦-3的能量回报率为270,原子能发电的能量回报率为20,煤为16。氦-3作为一种清洁、高效、安全的核聚变发电燃料是无容置疑的。当前,可控核聚变工业发电尚未实现,但随着可控核聚变发电的商业化,航天科技的发展和进步,航天运输成本将日益降低,利用氦-3发电将成为理所当然和历史潮流的必然。

## 2.2 月球的金属矿产资源将是地球资源的重要储备和支撑

月海玄武岩中的钛、铁等资源:月面上有22个月海,除东海、莫斯科海和智海位于月球的背面外,其它19个月海都分布在月球的正面。月海中的玄武岩含 $\text{TiO}_2$ 的含量范围为0.5%—13%。月球上22个月海中所充填的玄武岩总体积约106万 $\text{km}^3$ 。若以钛铁矿含量超过8wt%,即 $\text{TiO}_2$ 的含量 $>4.2\text{wt}\%$ 的月海玄武岩进行估算,月海玄武岩中钛铁矿的总资源量约为1300—1900万亿吨。尽管上述估算带着很大的推测性与不确定性,但可以肯定的是月海玄武岩中所蕴涵的丰富的钛铁矿是未来月球开发利用的最重要的矿产资源之一。

克里普岩与稀土元素、钍、铀等资源:克里普岩(KREEP)是高地三大岩石类型之一,因富含K(钾)、REE(稀土元素)和P(磷)而得名。克里普岩在月球上分布很广泛。风暴洋区的克里普岩其厚度估计有10—20 km。风暴洋区克里普岩中的总稀土元素资源量约为225—450亿吨。克里普岩中所蕴藏的丰富的钍、铀和稀土元素也是未来人类开发利用月球资源的重要矿产资源之一。此外,月球还蕴藏有丰富的铬、镍、钾、钠、镁、硅、铜等金属矿产资源,将会为人类社会的可持续发展作出贡献。

## 2.3 月球表面特殊空间环境的利用

月球几乎没有大气层,属于超高真空状态,因而月球表面不会有大气吸收、反射与散射等干扰;由于没有大气的热传导,月球表面昼夜温差极大;月球没有全球性的磁场,月岩只有极微弱的剩磁;月球的内部能量已近于衰竭,内部的地温梯度也很小,月震释放的能量仅相当于地震的一亿分之一,地质构造极其稳定;自距今31亿年以来,月球没有发生过显著的火山活动和构造运动,因此,月球的“地质时钟”停滞在31亿年之前,至今仍保留了其早期形成时的历史状况;月球表面还具有高洁净、弱重力的特征。

上述所有这些特征,是在地球上无法达到的。

因此,在月球表面建立月基天文观测站和研究基地,技术要求比哈勃太空望远镜更低,而精度比后者高得多,月基天文观测站的运行和维护费也会低得多。在月面建立月基对地监测站,可以对地面的气候变化、生态演化、环境污染、各种自然灾害和人类活动进行高精度的观察和监视,为人类的可持续发展做出贡献。

月球的特殊环境为研制特殊生物制品和特殊材料开拓了广阔而诱人的前景,目前已提出庞大的需要在月球基地内研制的生物制品与特殊材料的清单。月球将成为新的生物制品和特殊材料的研制、开发和生产的基地。

月球是地球唯一的天然卫星,是人类唯一的、庞大而稳固的“天然空间站”,是人类征服太阳系、开展深空探测的前哨阵地和转运站。在月球上建立永久性“地球村”,是人类向外层空间发展的第一个目标,也是最关键的一步,而重返月球计划旨在建设一个具有生命保障系统的受控生态环境的月球基地,进行月面建筑、运输、采矿、材料加工和各项科学研究,为将来建设适于人类居住的月球村进行科研和技术准备,使月球最终成为一个庞大、稳固而功能齐全的“天然空间站”,成为人类共有的科学实验室和开展深空探测的研究试验基地、前哨阵地和物资转运站。因此月表与月球的空间环境具有巨大的利用前景。

可以看出,月球的矿产资源、能源资源和特殊环境资源将对人类社会的可持续发展发挥长期稳定的支撑作用,地-月系不仅是一个统一的自然体系,而在人类社会的可持续发展方面,也将构成一个统一的整体。

## 3 我国月球探测的发展战略与科学目标

### 3.1 开展月球探测是我国航天活动发展的必然选择

我国在发展人造地球卫星和载人航天之后,与时俱进,适时开展以月球探测为主的深空探测,是我国科学技术发展和航天活动的必然选择;月球探测是一个国家综合国力和科学技术水平的重要体现;月球探测能极大地增强民族凝聚力,成为中华民族伟大复兴的一个重要标志性工程;月球探测也是我国航天事业持续发展,有所作为、有所创新的重大举措;月球探测将成为我国空间科学和技术发展的第三个里程碑;月球探测可以成为我国新的科技生长点,有利于推动科教兴国方针的贯彻实施,促进高新技术的全面发展,推动基础科学的创新和发展;开展

月球探测,将提高我国认识月球、开发利用月球资源的能力,对维护我国在月球上的权益具有重要的战略意义。总之,我国的月球探测虽然起步晚,但在较高的起点上迎头赶上,确保我国在国际月球探测活动中占有一席之地。

### 3.2 我国月球探测工程的发展规划设想

我国开展月球探测工程应紧密结合我国国情和月球探测工程的特点;应服从和服务于科教兴国战略和可持续发展战略,以满足科学、技术、政治、经济和社会发展的综合需求为目的,把推进科学技术进步的需求放在首位,力求发挥更大的作用;要坚决贯彻“有所为,有所不为”的方针,有限目标,突出重点,集中力量,在关键领域取得突破;我国月球探测工程虽然起步晚,要借鉴国外月球探测工程的经验和教训,优选探测目标,力求高起点进入国际主流,有一定的先进性和创新性,形成自己的特色,作出应有贡献;充分利用我国在开展人造卫星工程、载人航天工程和空间科学研究等方面创造的条件和取得的成果,加强系统设计创新和必要的技术攻关,在求实创新的基础上,实施“又快、又好、又省”的发展策略,探索更加经济、更加高效的月球探测工程发展道路;采取短期目标与长远目标相结合,单一任务与综合性计划相结合,循序渐进与分阶段发展相结合,各阶段互相有机衔接的发展策略,以实现持续、协调的发展。

综合分析国际上月球探测已取得的成果,以及世界各国“重返月球”的战略目标和实施计划,考虑到我国科学技术水平、综合国力和国家整体发展战略,近期我国的月球探测应以不载人月球探测为宗旨,可分为三个发展阶段:

第一阶段:环月探测:研制和发射我国第一个月球探测器——月球探测卫星,对月球进行全球性、整体性与综合性探测。主要目标是:获取月球高精度三维立体图像;勘察月球重要矿产资源的分布特点与规律;勘测月壤的厚度与核聚变发电燃料氦-3的分布与资源量;探测地-月空间环境;并对月球表面的环境、地貌、地形、地质构造与物理场进行探测。

第二阶段:月面软着陆器探测与月球车月面巡视勘察:发射月球软着陆器,试验月球软着陆和月球车技术,就地勘测月球资源,开展月基天文观测,并为月球基地的选择提供基础数据。

第三阶段:月面巡视勘察与采样返回:发射小型采样返回舱,采集关键性月球样品返回地球。我国在基本完成不载人月球探测任务后,根据当时国际

上月球探测发展情况和我国的国情国力,可进一步研究拟定我国载人月球探测战略目标和发展规划,择机实施载人登月探测以及与有关国家共建月球基地。

### 3.3 我国月球探测卫星——“嫦娥一号”的科学目标

我国的第一个月球探测卫星应在确保成功的基础上,优选探测目标,确保重点,探测内容既与国际接轨,又要具有特色,不完全重复其他空间国家已做过的工作,为月球研究和“重返月球”提供前所未有的新资料,奠定我国月球探测和深空探测的地位和特色。

我国的月球探测应该在较高的起点上开始,越过逼近和硬着陆的探测方式,直接进入环月探测阶段,月球资源探测卫星的探测重点为月球三维影像分析、月壤厚度探测、月球有用元素和物质类型的全球分布特点以及地-月空间环境调查,其中有用元素和物质类型分布的探测有一部分是其他空间国家也在筹备开展的,月壤厚度探测是其他空间国家还没有进行过的项目,地-月空间环境调查是我国第一次获取地球静止轨道以外的空间环境数据,中国的探测成果将为月球研究和资源调查提供大量有用的新资料。

获取月球表面三维影像:获取月球表面三维影像,精细划分月球表面的基本构造和地貌单元;进行月球表面撞击坑形态、大小、分布、密度等的研究,为类地行星表面年龄的划分和早期演化历史研究提供基本数据;划分月球断裂和环形影像纲要图,勾画月球地质构造演化史;为月面软着陆区选址和月球基地的位置优选提供基础资料。

分析月球表面有用元素含量和物质类型的分布特点:勘探月球表面有开发利用价值的14种元素(钛、铁、钍、铀、钾、氧、硅、镁、铝、钙、钠、锰、铬、稀土元素)的含量与分布,其中有9种元素是我国首次进行探测,获取14种有用元素的分布图。根据元素分布的特点和高光谱数据,确定克里普岩、斜长岩和玄武岩的类型与分布;发现各元素在月表的富集区,评估月球矿产资源(Fe、Ti等)的开发利用前景,为月球的开发利用和“月球村”的选址提供有关资源、能源分布的数据。

月球表面物质是研究月球形成和演化历史最为直接的对象,因此,月球表面元素丰度、岩石类型及其全球分布的探测和研究,是月球资源探测的主要途径和最重要的主题。通过对月岩及其分布的研

究,为未来开发和利用月球的资源(如铁、钛和稀土元素)提供依据,为研究太阳系和地-月系的起源方式与演化过程提供直接和有效的科学证据。

**探测月壤厚度:**利用微波辐射技术,获取月球表面月壤的厚度数据,这也是国际上第一次进行全月球的月壤厚度测量。获取月球表面月壤厚度的数据,从而得到月球表面年龄及其分布,估算月球表面氦-3的含量、资源分布及资源量。

**探测地-月空间环境:**月球与地球的平均距离约为38万公里,处于地球磁场空间的远磁尾区域,探测太阳宇宙线高能粒子和太阳风等离子体,研究太阳风和月球以及磁尾和月球的相互作用,对深入认识这些空间物理现象对地球空间以及对月球空间的影响有深远的科学及工程意义。

### 3.4 我国完全具备开展月球探测的能力

我国已经建立起了完整配套的航天月球探测工程体系,这些基础设施和研制条件为我国开展月球

探测工程奠定了必要的物质基础。经过多年可行性论证,我国月球探测的总体战略和科学目标已经明确。东方红-3号(DFH-3)可以作为月球探测卫星平台,各分系统也基本采用其他卫星的成熟技术。长征-3甲(CZ-3A)运载火箭可以满足发射月球探测卫星的要求。我国现有的S频段航天测控网,在甚长基线干涉(VLBI)天文测量网的配合下,可以完成首期月球探测的测控任务。我国具备了月球探测数据的接收、处理和译解能力。

总之,我国已经具备了开展月球探测一期工程——“嫦娥一号”的能力和条件,完全可以利用现有设备和条件,大部分采用现有的成熟技术,不存在无法攻克的技术难题,不会出现颠覆性的技术问题。我国开展的月球探测工程,科学目标明确、先进,有创新性,投资有限,风险较小,是一项影响深远的国家战略工程。

## THE PROGRESS OF LUNAR EXPLORATION AND CHINESE LUNAR EXPLORATION PROJECT

Ouyang Ziyuan<sup>†‡</sup> Li Chunlai<sup>†</sup> Zou Yongliao<sup>†</sup> Liu Jianzhong<sup>†</sup>

(<sup>†</sup>National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012; <sup>‡</sup>Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002)

**Abstract** Exploring the moon is the first step of the deepspace exploration, necessity of China's space project, and will be the third milestone in Chinese space event, after the launch of the earth orbiter and the manned spaceflight. During the 1960's and 1970's, lunar exploration came to its first climax and achieved great success. Now the second climax of the lunar exploration is coming, taking the exploitation and utilization of Helium-3 (a kind of material of nuclear fusion), mineral and unique space environment resource as an ultimate target. Since the launch of the first satellite DFH-1 in 1970, China has greatly developed in space technology, and now has the ability to send a space probe to the moon, and even other planets. China's first lunar exploration will focus on survey of potential and usable resources of the moon. The main scientific objectives include acquirement of three dimensional atlas of the moon's surface, analysis of the abundant usable elements, and exploration of the thickness of the lunar regolith and the space environment near the moon.

**Key words** lunar exploration, lunar resources, scientific objectives