

文章编号: 1000-4734(2022)02-0222-09

月球矿产资源勘查进展及展望

高楠^{1,2}, 许英奎^{1,3*}, 罗泰义⁴, 凌宗成⁵, 朱丹^{3,4},
李阳^{1,3}, 李雄耀^{1,3}, 刘建忠^{1,3*}

(1. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 安徽 合肥 230026; 4. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室,
贵州 贵阳 550081; 5. 山东大学(威海)空间科学与物理学院, 山东 威海 264209)

摘要: 地球是人类起源和成长的“摇篮”, 然而人类终将跳出“摇篮”, 拥抱更广阔的宇宙空间。月球是地球唯一的天然卫星, 也是唯一一颗人类已经登陆的地外星球, 月球矿产资源开发利用是人类走向太空的必经之路。前苏联 Luna 计划和美国 Apollo 计划引领的第一次探月高潮, 采回了约 382 kg 样品使人类得以近距离接触和全方位认识月球。当前正是全球探月工程的第二次高潮期, 在本次探月高潮期, 月球矿产资源的开发利用将成为重要目标。以往的月球资源探测以科学研究为主, 而以应用和商业利益为目的的月球资源勘查工作尚未开展。因此, 有必要对月球矿产资源进行系统梳理和研究, 初步建立月球矿产勘查的规范, 指导载人登月和人机互动进行月面资源勘查。本文从国际太空矿产领域的发展趋势、月球矿产资源的需求、潜在的矿产种类、勘查流程等方面进行系统综述, 根据可勘查属性将月球各类矿产划分为钛铁矿型、斜长岩型、磷酸盐型、月壤型、水冰型等 5 种类型, 为中国未来的载人探月项目着陆区选址和矿产勘查规范的建立提供初步参考依据。

关键词: 月球; 矿产资源; 勘查; 载人探月

中图分类号: P184; P691

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.025

第一作者: 高楠, 女, 1997 年生, 硕士研究生, 地球化学专业. E-mail: gaonan19@mails.ucas.ac.cn

Recent advance and prospect of the lunar mineral resources exploration

GAO Nan^{1,2}, XU Ying-kui^{1,3*}, LUO Tai-yi⁴, LING Zong-cheng⁵, ZHU Dan^{3,4}, LI Yang^{1,3},
LI Xiong-yao^{1,3}, LIU Jian-zhong^{1,3*}

(1. Center for Lunar and Planetary Science, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China; 4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 5. College of space science and physics, Shandong University (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: The Earth is the cradle of the origin and growth of the human, yet humanity will eventually jump out of the cradle to embrace the outer space. The moon, the natural satellite of the Earth, is the only planets other than earth that humans have ever landed on. The exploration and utilization of the mineral resources of the moon is one of the most important steps for mankind to step into space. The first lunar exploration period, led by Luna and Apollo projects, collected ~382 kg samples so that people could be close contact and comprehensive understanding of the moon. Now it is the second climax period of the global lunar exploration project. During this period of lunar exploration, the exploration and utilization of lunar resources will be a significant target. However, the exploration of lunar resources in the past was mainly based on scientific research, while for the purpose of application and commercial interests has not yet been carried out. Therefore, it is necessary to systematically comb and study lunar mineral resources, establish a standard for lunar

收稿日期: 2021-06-06

基金项目: 中国科学院先导 B 项目(编号: XDB41000000; XDB18000000); 中国科学院前沿科学重点研究计划(编号: QYZDY-SSW-DQC028); 广西科技基地与人才建设专项(编号: AD1850007); 国家自然科学基金项目(编号: 41773064; 41773065; 41931077)

* 通讯作者, E-mail: xuyingkuai@vip.gyig.ac.cn; liujianzhong@mail.gyig.ac.cn

mineral exploration initially, to guide manned mission to moon and lunar surface resources exploration through human-computer interaction. This paper systematically reviews the development trend of international space mineral resources, the demand for moon mineral resources, the potential mineral types, and the exploration process. According to the explorable properties of various minerals on the moon, we divided the resources into five types such as ilmenite, anorthosite, phosphate, lunar soil, and water ice. This paper also provides a preliminary reference basis for the site selection of the landing zone and the establishment of the specifications of mineral exploration for China's future manned lunar exploration project.

Keywords: moon; mineral resources; exploration; manned lunar exploration

迄今为止,人类所有的经济活动都依赖于地球的物质和能源,而地球资源多为不可再生资源。长久以来,人类认识到只有空间探索才能从实质上带给人类无限的外部能源和原材料^[1-6]。月球是距离地球最近的天体,是人类进行空间资源利用的重要目标^[7]。在过去 20 年月球遥感探测以及前苏联 Luna 计划和美国 Apollo 计划所获得的月球样品研究基础上^[8-9],前人按照空间位置初步定义了 3 种月球资源^[10]: 1) 利用月球物质促进月球探测的原位资源利用 (ISRU); 2) 利用月球物质促进包括地球轨道在内的地月空间系统的探测活动,并支撑未来太阳系内深空探测活动; 3) 将月球物质输送至地球以促进地球的可持续发展的资源。这 3 种可能的月球资源代表着应用难度依次增加的层次结构,也代表了可能实现的时间顺序。短期内月球的资源利用以原位资源利用为主。

Apollo 探月时代的主要科学目标是认识月球,新时代月球探测工程将月球资源综合利用作为最重要的科学目标,是月球探测工程任务的代需求。根据 1979 年联合国大会通过的《关于各国在月球和其它天体上活动的协定》(即《月球公约》),月球资源属于全人类,但遵循先到先得的原则,可见抢先发现和占有最具开采价值的优质矿产资源,是属于“开疆拓土”性质的战略性工作,因此,资源勘查工作是新时代月球探测工程任务的重中之重。2015 年美国制定了《2015 外太空资源探索与利用法》,规定“谁先勘探,谁先拥有”的外太空资源商业开发原则。2016 年欧洲航天局公布了建造“月球村”的太空计划,将从月球获得天然资源视为首要任务。2018 年,美国总统 Donald John Trump 宣布美国将于 2028 年重返月球并建立月球基地。2019 年 3 月,美国副总统 Mike Pence 宣布要在 2024 年登月。2020 年 4 月 6 日,美国总统签署第 13914 号总统行政令,即《关于鼓励国际支持太空资源的获取和使用》,鼓励美国公民在月球或其他星球从事商业活动,并认为外太空资源并不是全球共有资源。因此,在太空资源领域“先到先得”的国际规则下,开展月球矿产资源勘查和利用是一项亟需尽早展开的“国家行动”。

由于太空资源勘查和开发领域尚处萌芽期,前人的工作主要集中在矿产定义和分类、有用元素赋存矿物、水冰等特殊类型矿产等少量科学研究上^[9-13],实质性的矿产勘查工作尚未开展。考虑到月球矿产的特殊性,其矿产种类、勘查方法、开采手段等均与地球有较大的区别,因此,有必要开展系统梳理和研究。本文从月球矿产开发需求、潜在的月球资源、主要勘查方法等方面进行系统研究,按照月球各类矿产的可勘查属性将其分为钛铁矿型、斜长岩型、磷酸盐型、月壤型、水冰型等 5 种类型,并对人类未来进行的载人登月和人机结合开展矿产勘查等活动提供初步参考依据。

1 月球矿产资源开发的需求

1.1 月球基地建设和预期功能

国外月球探测的现状和规划一般将月球探测分为月球环绕、无人登陆、载人登陆和月球基地 4 个阶段^[14]。4 个阶段与我国嫦娥工程的“探月”“登月”和“驻月”的总体思路相吻合^[15]。月球基地在登月和驻月阶段有重要作用,能为宇航员提供生命保障必需的“消耗品”和居住地,在实现自给自足的基础上,开展科学实验和生产活动,是人类长期驻留月球并拓展生存空间的前哨站。前人已经对月球基地功能和构建开展了系列研究^[16-18]。预期的月球基地主要包括生活区、实验区、生产区等(图 1)。

基地功能涵盖：1) 生产基地运行所需的能源、材料和生命保障物质；2) 能源和物质循环利用；3) 规划月球基地运行并决策，制定月球资源利用的实施方案；4) 开展月球矿产资源勘查，为后续月球基地的可持续发展提供保障。因此，月球基地的建设和运行都离不开就地资源的开采和利用。

1.2 月球基地的矿产需求

从月球基地的建设、正常运行和宇航员生存的基本需求出发，月球基地所需资源包括宇航员生命保障“消耗品”、基地建设和生产材料、基地运行能源等 3 种类型。

宇航员生命保障“消耗品”：水和氧气是人类生存必需的“消耗品”。通过月球资源原位利用，制备水和氧气，可减少对地球运送物资的依赖，保证月球基地生命支持系统更加稳固。月球上 H_2O 和 O_2 提取的方法主要有以下 5 种^[19-21]：1) 可直接利用太阳能将月壤加热至适当温度（如 $800\text{ }^\circ\text{C}$ ），提取氢元素，进而与钛铁矿反应生成水；2) 月球极区永久阴影区可能赋存水冰，可以作为月球水资源的候选者；3) 氢气还原月壤生产氧气；4) 月壤碳热还原反应生产氧气；5) 电解月壤的熔融氧化物生产氧气。

基地建设和生产材料：由于月球没有大气层，长期遭受太阳风粒子、宇宙射线和微陨石的轰击，需要建筑物来保护宇航员和月球基地设备，也需要建立发射场进行深空拓展。目前适用于月球基地的建筑材料主要有金属（如 Fe、Ti、Al 等）、陶瓷和玻璃。金属的提取方法主要通过电解熔融岩浆岩提取 Fe、Ti、Al 等^[19, 21-22]。陶瓷和玻璃主要通过烧结月壤或熔融玄武岩产生，还伴有一些耐高温的副产品。月壤颗粒中值粒径为 $40\sim 130\text{ }\mu\text{m}$ ，经过简单筛选可以直接用于 3D 打印，制造部分建筑器材^[23-24]。

基地运行能源：月球基地运行需要大量能源，月球主要能源包括太阳能、核能和化学燃料^[25]。月表可利用太阳能光伏发电，供应各种电解反应、移动设备和照明设备。另外，月壤含有来自太阳风的气体元素，如 H 和 He。通过加热月壤可提取太阳风挥发分并提纯出 ^3He 和 H_2 。其中， ^3He 作为一种清洁、高效的核聚变原料，除了作为月球基地的能源供应，还可以返回地球^[26-27]。此外，月球的 KREEP 岩含有可观的 U 和 Th，也可作为核能的原料^[28-29]。推进剂是火箭和基地挖掘、运输等移动设备的动力来源，使用最多的是液态氢和液态氧，可通过电解月壤中提取的水收集 H_2 和 O_2 ，再进一步加工制成。碳氢化合物燃料（如 CH_4 ）也可以作为推进剂和燃料电池，主要通过分解宇航员产生的生活垃圾和月壤的碳热还原反应产生 CH_4 ，为着陆器、储存器和移动电源系统提供能源。

1.3 月球基地的经济效益需求

宇航员生命保障物质、基地建设材料所需要的大量物资和能源等如果完全从地球获取，势必需要长期且频繁的地月空间的航天运输支持。但航天运输非常昂贵，以地月空间为例，运输成本约为 $50000\sim 90000\text{ 美元/kg}$ ^[23]。若实现月球资源的原位利用，则可大幅减少地月运输频次和重量，有效降低月球基地初期建设和长期维持的经济成本。另外，值得注意的是，月球上太阳辐照条件优于地球。由于月球几乎没有大气，每年到达月球的太阳光辐射能量高达 $1.2\times 10^{13}\text{ kW}$ ^[30]，加上月球上不存在建筑物的限制，方便大面积铺设太阳能电池板储存太阳能。通过对太阳能、 ^3He 等优势能源的开发利用，可以节省经济成本。

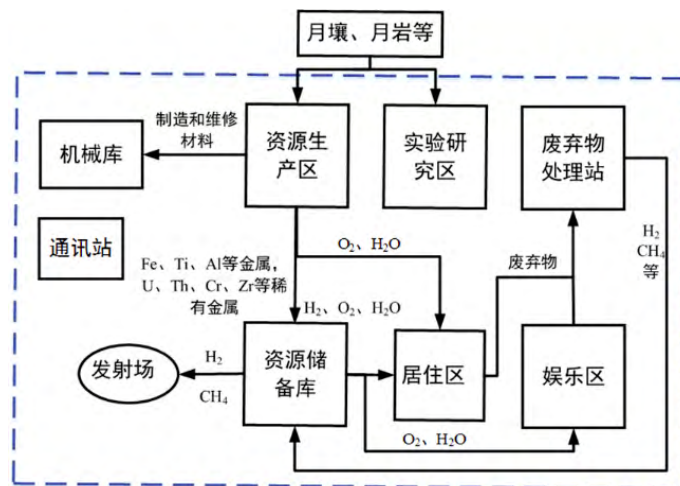


图 1 月球基地运行功能愿景图

Fig. 1. The suppositional function of lunar base.

1.4 人类社会可持续发展的需求

目前人类使用的最主要的能源是不可再生的化石能源(煤、石油、天然气)。随着人口增加、经济增长和生活水平的不断提高,人们对能源的需求也会不断增长,这意味着能源损耗会愈发严重^[31-32]。当下人类已面临着严重的能源危机,要保持人类社会和经济的可持续发展,就必须彻底解决能源问题,而解决途径便包括新能源的利用^[32]。

月球具有独特的地质演化和空间环境特征,这意味着月球具有不同于地球的资源 and 能源,如月壤富集太阳风注入的³He。³He 作为未来清洁、高效、安全的核聚变发电燃料,具有巨大的能源潜力,但地球³He 储量很有限。因此有不少学者提出,若将月球所特有的资源和能源转运至地球,对于解决人类能源危机,推动人类社会可持续发展具有深远意义^[10, 24, 26, 30]。

2 潜在的月球资源

2.1 月球资源的科学探测现状分析

自上世纪六七十年代以来,月球探测任务集中于科学研究,主要以样品分析、无人遥感和就位探测为主。在样品分析方面,基于月球返回约 382 kg 样品^[30]以及目前为止回收的 412 块月球陨石(据 Meteoritical Bulletin Database)的研究,已获得月球基本的物质组成信息。月球物质中含有地球上发现的所有元素,而月球却表现出独特的资源特征(表 1),很多地球上的重要矿产资源,如 Cu、Ag、Cl、

表 1 月球可利用资源种类及其利用途径

Table 1. Potential lunar resources and utilization

资源种类	矿产资源	赋存岩石	主要赋存矿物或来源	$W_{B,平均}$	$W_{B,最大}$	推测品位	可能用途
气体元素	H	月壤	各类月壤矿物/太阳风注入	50 $\mu\text{g/g}$	150 $\mu\text{g/g}$	150 $\mu\text{g/g}$	火箭推进剂、还原剂
气体元素	³ He	月壤	钛铁矿	4 $\mu\text{g/g}$	30 $\mu\text{g/g}$	30 $\mu\text{g/g}$	清洁能源、战略资源
气体元素	C	月壤	各类月壤矿物/太阳风注入	124 $\mu\text{g/g}$	300 $\mu\text{g/g}$	300 $\mu\text{g/g}$	还原剂、钢材原料
气体元素	N	月壤	各类月壤矿物/太阳风注入	81 $\mu\text{g/g}$	150 $\mu\text{g/g}$	150 $\mu\text{g/g}$	特殊气体
黑色金属	Fe	月海玄武岩	辉石、钛铁矿、橄榄石	15%	17%	20%	基地建设
黑色金属	Ni	月壤	陨石撞击	250 $\mu\text{g/g}$	730 $\mu\text{g/g}$	1500 $\mu\text{g/g}$	制造火箭外壳、基地建设
黑色金属	Mn	月海玄武岩	辉石、橄榄石	0.2%	0.3%	0.3%	合金的添加剂
黑色金属	Cr	月海玄武岩	铬铁矿、辉石	0.2%	1.1%	2%	制造钢材
黑色金属	Cr	高地苏长岩	铬铁矿	0.2%	0.3%	15%	制造钢材
黑色金属	Ti	高钛玄武岩	钛铁矿、辉石	7%	8%	16%	制造火箭外壳、基地建设
有色金属	Al	斜长岩	钙长石	18%		18%	基地建设混凝土
有色金属	Zn	火山玻璃	火山玻璃	10 $\mu\text{g/g}$	400 $\mu\text{g/g}$	800 $\mu\text{g/g}$	合金材料
稀有/分散金属	Ce (及其它 REE)	KREEP 岩/其它演化程度较高火成岩	磷灰石、陨磷钙钠石	175 $\mu\text{g/g}$	700 $\mu\text{g/g}$	3500 $\mu\text{g/g}$	特殊材料、战略资源
稀有/分散金属	K	KREEP 岩/其它演化程度较高火成岩	磷灰石、陨磷钙钠石	0.8%	1.8%	9%	生命必需元素、重要原料
稀有/分散金属	U	KREEP 岩/其它演化程度较高火成岩	磷灰石、陨磷钙钠石	6.1 $\mu\text{g/g}$	2.72 $\mu\text{g/g}$	139.5 $\mu\text{g/g}$	核能燃料
稀有/分散金属	Th	KREEP 岩/其它演化程度较高火成岩	磷灰石、陨磷钙钠石	22 $\mu\text{g/g}$	50 $\mu\text{g/g}$	500 $\mu\text{g/g}$	核燃料、战略资源
非金属	Si	斜长岩	钙长石	44%	47%	70%	太阳能电池板、半导体原件
非金属	P		磷灰石、陨磷钙钠石	0.6%	2.2%	10%	生命必需元素、重要原料
非金属	火山玻璃	火山玻璃	火山玻璃				建材

注: 以上数据引自文献[8-9, 11-12]; 其中, 推测品位是根据现有月球样品化学成分数据和元素富集过程推测的。

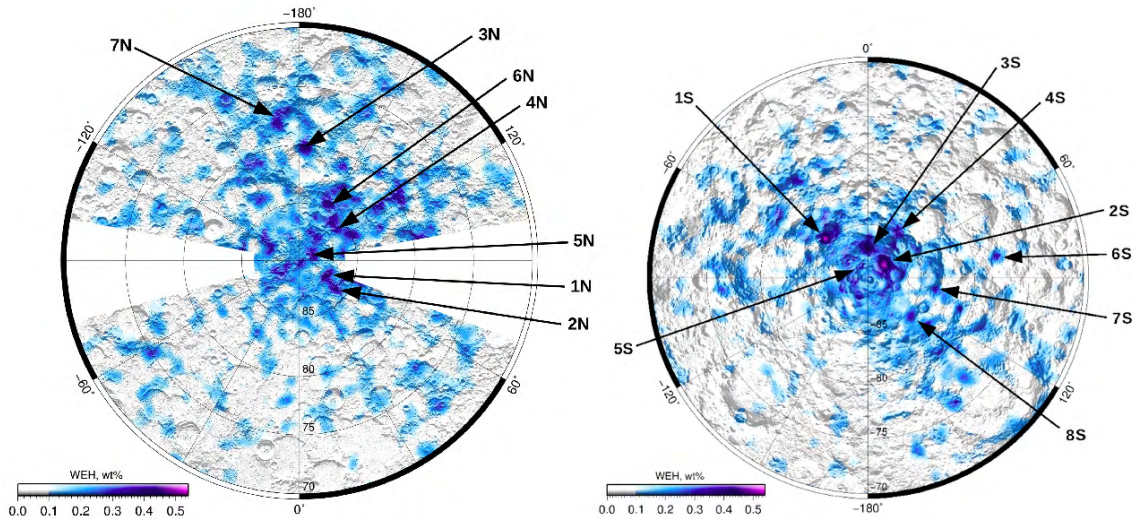


图 2 月球极区水冰物质含量分布图(左: 北极, 右: 南极)

Fig. 2. Distribution of water-ice within lunar poles (left: north pole; right: south pole).

B 等资源在月球上非常稀缺,但在未来矿产勘查中可能会找到以上元素的高度富集体。月球矿产资源主要赋存于高地斜长岩、月海玄武岩、火山碎屑岩、月壤及其组成矿物中,包括斜长石和钾长石中的 Na、K、Sr、Ba,橄榄石中的 Mg 及辉石中的 Mn、Cr 等有用元素。一些磷酸盐矿物中富集的稀土元素和卤族元素(如陨磷钙钠石中 $w(\text{Ce}_2\text{O}_3)$ 达 4%,磷灰石中 $w(\text{F})$ 和 $w(\text{Cl})$ 约 3%~4%),火山碎屑岩所富集的 S、Ag、Cd、Zn 及 Br 等元素。月壤的物质成分和其下伏岩石成分基本类似,但其富集太阳风长期作用所注入的 He 及其他惰性气体元素,还有 C、H 及 N 元素。

在遥感和原位探测方面,目前对月球硅酸盐矿物(主要为斜长石、辉石、橄榄石、尖晶石)及其主量元素(主要为 Fe、Ti 等元素)的勘查主要依赖成像光谱数据。探测结果显示,月海玄武岩富含辉石和橄榄石,其中橄榄石含量可超过 20%;高地斜长岩富含斜长石,一般高于 50%,甚至局部还有斜长石含量达 95%~99%的高纯度斜长岩发现。对主量元素的探测结果显示,月海玄武岩中富铁,FeO 含量可超过 20%,主要存在于钛铁矿中的钛元素含量变化范围很大, TiO_2 丰度可超过 14%;高地斜长岩相对贫铁,FeO 丰度一般低于 10%。其他金属矿产资源的勘查主要依赖于伽马射线谱仪、中子谱仪及 X 射线谱仪遥感探测。根据这些探测结果,目前已经获得了月表主要元素的全月分布图,包括 Al、Si、Ca、U、K 和 Th 等;基于“嫦娥一号”微波辐射计测量数据,绘制了全月 ^3He 含量分布图;月球极区水冰资源勘查方面,基于中子谱仪 H 元素数据,绘制了月球南北极区的水冰丰度图(图 2),发现局部地区水冰物质的丰度可达 0.5%左右。

综上所述,目前对月球资源的科学探测获得了丰富的成果,但尚未聚焦于资源勘查和利用。高精度和综合月球资源勘查将是新一轮载人月球探测的重要技术挑战。

2.2 月球主要地质作用及成矿过程

作为距离地球最近的天体,月球是探测程度最高的地外天体,基于对大量月球样品、遥感探测数据的分析,形成了对月球起源和演化历史的基本认识。根据“大碰撞”理论,月球形成于一次早期撞击事件。撞击形成的月球早期发生核幔分异,并出现全球性的岩浆洋,岩浆洋冷却结晶形成以斜长岩成分为主的月壳,镁铁质矿物组成的月幔,壳幔之间为富集钾(K)、稀土元素(REE)、磷(P)等不相容元素的原始克里普岩(urKREEP)。目前共确认了 4 套非月海原岩石类型:斜长岩套(AN)、镁质岩套(MAN)、碱性岩套和 KREEP 岩^[33-34]。月亮形成后,月球南极—艾肯盆地、雨海、东海等大型盆地的形成及后续的月海玄武岩的充填,塑造了现今月球表面的大尺度地形特征。

月球的岩浆活动是重要成矿过程, 4 套非月海原岩石是岩浆洋冷却过程中形成的。其中斜长岩中的 Al 和 Si, KREEP 岩中的 REE、U、Th、K、P 是重要的矿产勘查和利用对象, 而月海玄武岩中的钛铁矿、铬铁矿等是金属元素 Fe、Ti、Cr 等元素富集的矿物, 是月球可利用资源勘探中的重要目标矿物。火山碎屑岩是月球火山喷发活动的产物, 其富含火山玻璃等矿产资源。另外, 月球表面广泛覆盖着由撞击作用和太空风化作用形成的月壤, 一般厚度为 5~10 m, 主要由矿物和岩石碎屑、熔融玻璃、粘结集块岩组成, 富集源于太阳风的 H、³He、C、N 和陨石中的 Ni 等元素。

2.3 月球可利用资源的种类

据目前月球探测成果及对月球样品的分析, 结合月球基地建设的能源和资源需求, 月球上可利用资源主要分为以下 3 类: 金属矿产、非金属矿产和气体等。其中, 金属矿产主要包括黑色金属 (Fe、Ti、Mn、Cr、Ni), 稀有/分散金属 (K、Th、U、Ce 及其它 REE) 及有色金属 (Al、Zn); 非金属矿产主要为 Si 和 P; 有用气体元素主要包括 H、³He、C 和 N。表 1 列出了各种元素的赋存岩石、主要赋存矿物、品位和用途。

2.4 月球原位资源利用的可行性

通过上述对月球潜在的、可利用的矿产资源需求、种类及储量的分析, 我们认为月球矿产资源具有较大的开采价值, 可以满足原位资源利用需求。原位资源利用技术可实现月球等天体可利用资源的勘查、提取, 以供应空间站和月球基地等中长期任务的长期运行。原位资源利用技术包括 4 个部分: 1) 对目的地勘测、勘探和测绘, 以确定可利用资源; 2) 原始资源的采集和预处理, 以获取资源; 3) 将原始资源转化为推进剂、能源、生命保障等消耗品; 4) 制造产品并安装基地原位资源利用设施。一般说来, 与将地球生产材料或生产设备运输至太空或月球进行利用相比, 月球原位资源利用将产生更大的经济效益。

国际上原位资源利用的概念提出较早。自上世纪 80 年代以来, 月球和行星科学家提出了众多制备水、氧气、氢气的概念性方案。以氧气制备为例, 从月壤中的金属矿物和非金属氧化物中提取氧的概念性方案超过 20 种, 其中部分开展了缩比验证试验^[21]。尤其美国 NASA 开展了许多利用火山灰、钛铁矿等制备 O₂、H₂ 和 H₂O 等的技术验证试验。在 2008 年设计了第一台可演示 ISRU 样机, 进行了月壤开采、H₂O 和 O₂ 制备、资源储存等功能验证。美国 NASA 的空间技术任务理事会建立了月球表面创新计划 (LSII), 首要目标是发展原位资源利用技术, 将围绕利用月球资源生产水、燃料和其他物质的技术展开。另外, 美国 NASA 和欧洲 ESA 还联合研发了原位资源利用设备——氧气制备和原位利用实验装置 (Mars Oxygen ISRU Experiment, MOXIE), 该设备搭载美国“毅力”号火星车首次在行星探测任务中开展了资源原位利用的实验, 于 2021 年 4 月利用电化学方法成功将火星大气中的部分二氧化碳转化为氧气。因此, 月球原位资源利用已经具备了良好的基础和可行性, 有望在未来月球探测和基地运行中实施。

3 月球矿产资源勘查

3.1 月球矿产资源勘查的必要性

月球矿产资源勘查的必要性体现在以下 3 点:

1) 矿产资源勘查是月球资源利用的前提。在地球上, 矿产资源开发和利用之前要进行详细的勘查, 以确定矿产资源种类、分布以及储量, 评估开采是否具备经济效益。目前为止尚未对月球开展资源的勘查工作, 因此要开发和利用月球资源, 矿产资源勘查是首要任务。

2) 矿产资源勘查是月球基地建设与运行的重要保障。月球基地的建设和运行都需要大量的能源和资源。由于地月运输成本极高, 需要开展原位资源利用, 满足基地建设和运行需求。为保障基地建设和运行的合理、经济和高效, 实现月球原位资源有效利用, 需进行精细的月球矿产资源勘查。

3) 高精度的勘查技术能够保证载人阶段月球矿产资源勘查的顺利实施。已有的月球探测以轨道遥感探测为主, 与月表物质成分相关的轨道探测光谱数据、能谱数据偏少且空间分辨率较低(可见光-近红外光谱数据一般百米级, 热红外光谱一般低于 500 m, 伽马谱一般低于 15 km)。这些数据仅能满足科学研究方面的基本需求, 距离月球资源的勘查、开发和利用还有很大的差距。根据地球矿产资源的勘查经验, 除大尺度的矿产资源遥感探测外, 异常区的原位高精度物化探技术是现代地球资源勘探的基本手段, 因此研发适用于月球环境的高精度物化探技术具备良好的技术储备。在载人探月过程中, 宇航员携带所研发的手持或车载小型化矿产资源勘查设备进行月面定点或布站式勘查, 可保证载人阶段月球矿产资源勘查的顺利实施。

3.2 月球矿产资源勘查方法和技术

月面矿产资源勘查技术需要借鉴现有的地球资源勘测技术和方法, 充分吸收和集成已有的月球无人探测和样品研究成果经验, 明确月球可勘查矿产种类, 梳理月球矿产资源勘查流程, 提出勘查技术需求并聚焦攻关的关键技术。

月球矿产资源勘查的方法首先需要考虑月球成矿过程的特殊性。由于月球缺乏水和风的搬运改造, 月壤的矿物组成可以反映原位基岩的信息; 撞击作用可挖掘月球深部岩石, 撞击坑溅射物和岩石露头可以用于解译深部岩石的剖面信息。因此, 根据月球主要矿物如钛铁矿、磷灰石等的物性参数, 结合月面矿物填图和月壤化探确定月面异常, 最后通过物探手段解译深部异常, 是月球矿产资源勘查的基本手段。

在地球的地质矿产资源勘查中, 我国已经建立了《地质矿产勘查规范总则》和不同类型、不同矿种的一系列国家标准和行业标准。借鉴地球标准, 结合月球矿产勘探的特殊性, 月球上可利用资源勘查的基本思路是: 1) 通过对已有月球地质研究、能谱数据和遥感数据的综合分析, 优选预查区; 2) 通过逐渐加强的地质学和综合的物探、化探工作, 不断约束矿床成因、矿体产状及矿床规模(预测的、推断的、控制的和探明的储量)、矿石选冶特征和综合利用性能、矿山开采的工程地质和环境地质问题; 3) 根据实时航天成本、矿产勘探开采成本和矿产品价格进行核算, 评估相应矿产开采的经济可行性。

为了进一步明确月球矿产资源的勘查方法和相关技术, 有必要梳理出一套关于月球矿产资源勘查的概念化流程。参照地球矿产资源勘查流程, 大致包括预查、普查、详查和勘探 4 个阶段(图 3)。

预查: 预查活动分为 2 个阶段: 1) 优选预查区: 对研究区域内地理、地质、物探和化探等各种资料进行综合调研, 以获得研究区岩石单元和岩石类型、构造单元和构造特征、矿化异常单元及矿化特征的初步认识, 逐步编制较大比例尺的区域地

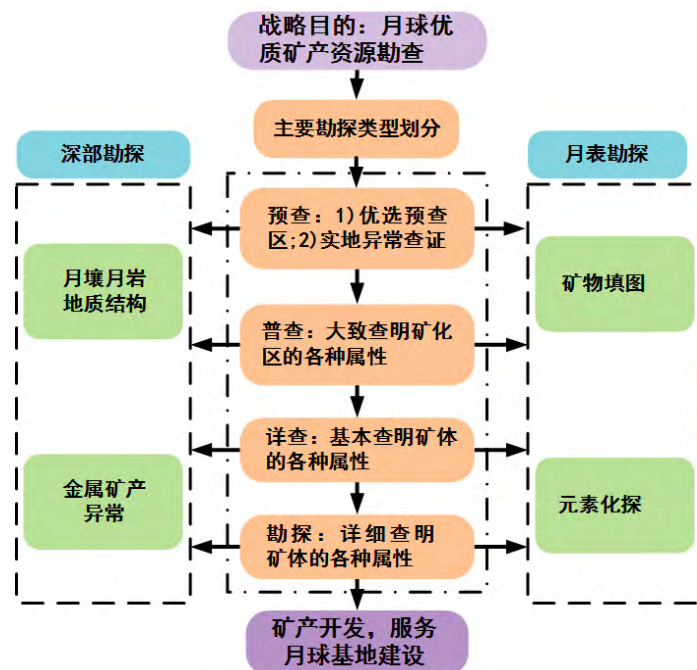


图 3 月球矿产资源勘查概念化流程

Fig. 3. Conceptual procedures and contents of lunar resources exploration.

质矿产预测图,对矿化异常进行分级;2)实地异常查证:以资源开发利用为目的的月球探测活动是矿产勘查开始的标志,宇航员借助攻关研制的手持和车载小型化勘查设备进行月面定点或布站式勘查,对异常进行分级验证,估算科研资源量,为开展普查工作提供依据。

普查:对预查确定的矿化异常开展地质填图和露头检查,大致查明成矿地质条件。对矿化体进行有效的物探和化探及数量有限的取样工程,大致控制主要矿体特征,大致查明矿石的选冶性能。依据普查所获得的地质矿产资料进行概略研究,研究是否值得转入详查,为详查工作提供依据。

详查:基本查明成矿地质条件,开展系统的取样工程和物探、化探工作,控制矿体的总体分布范围。基本查明矿石的物质组成、矿石质量,对矿石的加工选冶性能进行试验和研究,基本查明矿床的开采技术条件,选择合适的方法估算相应类型的资源量,为是否进行勘探决策提供依据。

勘探:在详查基础上加密各种取样工程及相应的工作,详细查明矿石物质组成、赋存状态、矿石类型、质量及其分布规律,详细查明影响矿床开采的主要工程地质和环境地质问题。采集具有代表性的矿石类型样品,进行加工选冶性能试验;详细估算相应类型的资源量,为矿山初步设计和矿山建设提供依据。

3.3 月球可勘查矿产种类划分

根据已有科学探测结果和资料,月球矿产资源主要赋存在玄武岩、斜长岩、KREEP 岩和月壤中。玄武岩含钛铁矿,富集 Fe、Ti 元素,主要分布于月球正面,厚度一般不超过 2 km;斜长岩中主要矿物为斜长石,富含 Al 和 Si 元素,主要分布在高地地区,厚度约 30~40 km;KREEP 岩含磷灰石,富集 K、P、U、Th、REE 元素,分布于月球正面的风暴洋区域,厚度约为 20 km。月壤覆盖于月球表面,富含来自太阳风的 H、³He、C、N 和陨石中的 Ni 等元素,中值粒径 40~130 μm,月壤厚度 5~10 m。

根据月球可利用资源(表 1)的主要赋存矿物特征及成矿机理,考虑月球矿产的可勘查性和经济价值,建议将月球可勘查矿产划分为:1)钛铁矿型:主要赋存于月海高钛玄武岩中($w(\text{TiO}_2)$ 平均 11%左右),伴生铬铁矿,主要利用元素为 Ti-Fe-O,共(伴)生 Cr-He-H;2)磷酸盐型:主要赋存于 KREEP 岩中($w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 平均 0.7%左右),伴生钾长石($w(\text{K}_2\text{O})$ 平均 0.7%左右),主要利用元素为 P-K,共生 REE-Th-U-F-Cl;3)斜长岩型:主要赋存于高地斜长岩中(斜长石可富集到 90%~95%左右,平均含 Al_2O_3 34%、 SiO_2 45%、CaO 20%),主要利用元素为 Si-Al-Ca,该类型矿床基本不需要分选富集;4)月壤型:月壤是早期月球基地建设的重要利用对象,可利用元素基本涵盖上面 3 种类型,优势是基本不需要开采和粉碎。预期月海高钛玄武岩区、KREEP 岩区和高地斜长岩区的月壤相对富集上述 3 种矿物;5)水冰型:月球极区永久阴影区富含水冰的月壤型矿床,主要利用资源是水,该类型矿床不需要分选富集。

4 结 语

目前,国际太空资源探测与研究领域竞争激烈,美国和欧洲处于领先地位。我国嫦娥系列工程正在顺利实施,已取得一系列重要成果。嫦娥四号实现国际首次月球背面软着陆和中继星信息传递,1:250 万全月球数字地质图顺利完成并入选中国科学院“十八大”以来的创新成果展;嫦娥五号实现中国首次月球无人采样返回。同时,我国的“行星科学”一级学科正在建设之中,“太空资源学”也被列为优先发展领域之一。未来 5~15 年将成为月球资源勘查利用领域的黄金发展时期。月球矿产资源勘查是实现月球矿产资源开发利用的前提,为人类月球基地建设和人类移居月球奠定重要基础。在当前的形势下,秉着“先到先得”的原则,开展月球矿产资源勘查和利用已成为我国刻不容缓的任务。规范的月球矿产资源勘查流程有利于人类未来高效、准确、有针对性的开采和利用月球资源,同时可保障月球基地建设和运行的合理、经济和高效。

参 考 文 献 :

- [1] Hartmann W. The resource base in our solar system [A]. FINNEY B A J, EM. *Interstellar Migration and the Human Experience*[M]. Berkeley: University of California Press, 1985: 26-41.
- [2] Lewis J. *Mining the Sky: Untold Riches from the Asteroids, Comets and Planets* [M]. Reading, Massachusetts: Helix Books, 1996.
- [3] Martin A. Space Resources and the Limits to Growth [J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 1985, 38: 243-252.
- [4] Metzger P, Muscatello A, Mueller R, et al. Affordable, rapid bootstrapping of space industry and solar system civilisation [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 26: 18-29.
- [5] Schultz F. The effects of investment in extraterrestrial resources and manufacturing on the limits to growth [J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 1988, 41: 497-508.
- [6] Wingo D. *Moonrush: improving life on Earth with the Moon's resources*[M]. Burlington: Apogee Books, 2004.
- [7] Jose G d R, George B, Helmut M. Space mining is the industry of the future ... or maybe the present[J]. *Mining Engineering*, 2020, 72: 40-48.
- [8] Heiken G, Vaniman D, French B. *The Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [9] Jolliff B, Wiczorek M, Shearer C, et al. New Views of the Moon [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60: 1-721.
- [10] Ian A C. Lunar Resources: A Review [J]. *Progress in Physical Geography*, 2015, 39: 137-167.
- [11] Fegley B, Swindle T. Lunar volatiles: implications for lunar resource utilization [A]. LEWIS J, MATTHEWS M, GUERRIERI M. *Resources of Near Earth Space*[M]. Tucson: Tucson University Press. 1993: 367-426.
- [12] Papike J, Ryder G, Shearer C. Lunar samples[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1998, 36(5): 1-234.
- [13] Haskin L, Warren P. Lunar chemistry[A]. HEIKEN G, VANIMAN D, FRENCH B. *The Lunar sourcebook: A user's guide to the Moon*[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1991: 357-474.
- [14] 果琳丽. 载人月球基地工程 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.
- [15] 张巧玲. 欧阳自远院士描绘嫦娥工程后续蓝图 [N]. *科学时报*, 2011.
- [16] 邓连印, 郭继峰, 崔乃刚. 月球基地工程研究进展及展望 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2009(2): 25-30.
- [17] 于登云, 葛之江, 王乃东, 等. 月球基地结构形式设想 [J]. *宇航学报*, 2012, 33(12): 1840-1844.
- [18] 袁勇, 赵晨, 胡震宇. 月球基地建设方案设想 [J]. *深空探测学报*, 2018, 5(4): 374-381.
- [19] Schwandt C, Hamilton J A, Fray D J, et al. The production of oxygen and metal from lunar regolith [J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 74: 49-56.
- [20] McKay D S, Allen C C. Hydrogen reduction of lunar materials for oxygen extraction on the moon [C]. 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1996.
- [21] Taylor S. Thermodynamics and energetics of resting site use by the American marten *Martes americana*[D]. Laramie : University of Wyoming, 1993.
- [22] Duke M B, Gaddis L R, Taylor G J, et al. Development of the Moon [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2006, 60(1): 597-655.
- [23] 李志杰, 果琳丽. 月球原位资源利用技术研究 [J]. *国际太空*, 2017(3): 44-50.
- [24] Ellery A. Sustainable in-situ resource utilization on the moon [J]. *Planetary and Space Science*, 2020, 184. DOI : 10.1016/j.pss.2020.104870.
- [25] 任德鹏, 李青, 许映乔. 月球基地能源系统初步研究 [J]. *深空探测学报*, 2018, 5(6): 561-568.
- [26] Taylor L A, Kulcinski G L. Helium-3 on the Moon for Fusion Energy: the Persian Gulf of the 21st Century [J]. *Solar System Research*, 1999, 33: 338.
- [27] Wittenberg L J, Santarius J F, Kulcinski G L. Lunar Source of ^3He for Commercial Fusion Power [J]. *Fusion Technology*, 1986, 10(2): 167-178.
- [28] Ashley S F, Parks G T, Nuttall W J, et al. Nuclear energy: Thorium fuel has risks [J]. *Nature*, 2012, 492(7427): 31-33.
- [29] Humphrey U E, Khandaker M U. Viability of thorium-based nuclear fuel cycle for the next generation nuclear reactor: Issues and prospects [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 97: 259-275.
- [30] 欧阳自远. 月球探测的进展与我国月球探测的科学目标 [J]. *贵州工业大学学报(自然科学版)*, 2003, 32(6): 1-7+17.
- [31] 刘建忠. 月球的能源探测和利用前景 [C]// 第七届全国空间化学与陨石学学术研讨会论文集. 中国矿物岩石地球化学学会陨石学与天体化学专业委员会、中国空间科学学会空间化学与地质专业委员、中国矿物岩石地球化学学会陨石学与天体化学专业委员会、中国空间科学学会空间化学与地质专业委员、中国矿物岩石地球化学学会, 2003: 13.
- [32] 谭国武, 邱建忠. 能源与人类文明 [J]. *现代物理知识*, 2007(2): 67-69.
- [33] 凌志成, 刘建忠, 张江, 等. 基于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据的月球岩石类型填图: 以月球雨海—冷海地区(LQ-4)为例 [J]. *地学前缘*, 2014, 21(6): 107-120.
- [34] 王庆龙. 月球雨海地区的地质演化(博士论文) [D]. 长春: 吉林大学, 2016.