

从电影《流浪地球Ⅱ》看月球的探测与利用

□ 李雄耀

DOI:10.16632/j.cnki.cn11-1005/d.2023.04.008

2023年初热映的科幻电影《流浪地球Ⅱ》呈现了一个令人兴奋和发人深省的故事,告诉我们月球探索的重要性。电影中,为了拯救地球,人们提出了“移山计划”,即在月球上安装行星发动机“放逐”月球,同时在地球上安装行星发动机实现地球停转,并推动其离开太阳系前往新的家园。故事背后的一系列问题引人深思:在月球上能用什么来制造庞大的行星发动机?用什么能源维持它的运行?地球被视为人类生命的摇篮,它的宜居环境是如何演变形成的,对人们寻找新家园有何启示?这些问题的解答,需要我们继续探索月球,迈向更遥远的深空,站在太阳系甚至宇宙全局角度不断探寻。

月球是距离地球最近的天体,蕴藏着重要的太阳系演化信息和大量潜在可开发利用的资源,一直是备受关注的重要对象,也是人类离开地球迈向深空的前哨站。月球探测不仅是人类探索未知、揭开宇宙奥秘的关键一步,也是为地外资源利用、太空开发奠定基础的重要环节。

月球是一个重要的信息库

月球是一颗古老的天体,在过去的几千年里,它一直被认为是地球的兄弟,它的历史

和地球有着紧密的联系。月球是一个非常重要的信息库,它不仅可以提供有关行星形成和演化的信息,还保存着地球和太阳系演化过程的历史记录。

月球不受大气、水和生物等复杂因素的作用,很好地保存了其45亿年的形成演化历史信息,其中隐含的部分演化规律在太阳系天体演化过程中具有普遍性。因此,月球记录下的多种特殊地质特征,可以帮助我们了解地球以及太阳系其他天体的形成过程和演化历史。月球表面裸露着的古老岩石,可以帮助我们了解行星的内部结构及演化过程,特别是行星形成最初几百万年的岩浆洋演化和火山活动历史。月球表面被撞击挖掘暴露出的深层岩石还可以提供有关深部地壳和地幔组成的信息。月球表面覆盖着大量月壤,它是一种长期在陨石或微陨石撞击、太阳风等高能粒子轰击以及大幅昼夜温差交变作用等太空风化过程中形成的岩石矿物粉末,它可以提供有关太阳系天体的后期演化过程信息,特别是水星和小行星等无大气天体几十亿年以来的表面地质过程以及物质改造过程信息。月球上还有大量撞击坑,那是长期由陨石撞击挖掘形成的一种地貌类型,可以提供有关

太阳系早期撞击的历史信息,以及天体外动力地质演化的历史记录。

月球还是一个重要的天然科学实验室,它的真空、低重力、弱磁环境以及特殊的空间位置都是开展科学实验的理想场所。月球没有大气层,是一个理想的超高真空环境;同时,月球重力加速度仅为地球的1/6,是低重力环境。这样的特殊环境可以用来研究真空低重力环境下的物理和化学反应,进行空间材料的结构变化以及材料的耐热性、耐冷性、耐腐蚀性等性能研究;可以进行空间燃烧实验,研究太空环境下燃料的燃烧性能以及热力学性能;还可以用来研究太空环境下的生物学反应,比如微生物、植物的生长和繁殖,人体的生理反应和生化反应等。月球没有类似地球的全球偶极磁场,剩磁也很微弱,理想的弱磁环境可以进行电子学和电磁波的相关研究,比如研究太空环境下电子的运动规律、电磁学性能以及电磁波的传播特性、传播距离等。此外,月球的轨道和运动规律决定了它在运动过程中将不断穿越地球磁鞘和磁尾,同时保持一面背向地球,这为空间物理实验和天文观测提供了理想场所。

总的来说,月球既作为一个忠实的记录者记录了自身的演化历史,也作为一个环境构建者为我们开展科学实验提供了理想场所。《流



电影《流浪地球 II》海报

浪地球 II》中人们希望找寻适宜人类生存的新家园,这就需要深入理解太阳系甚至宇宙的演化过程,清晰认识地质过程和空间环境对形成宜居环境的制约。月球作为一个不宜居天体,它的演化过程是一个重要反证。月球信息库为我们探索宜居环境形成规律提供了重要基础。此外,《流浪地球 II》中将月球作为行星发动机的可行性验证的试验场,也提示了月球重要的可利用价值。

月球是一个重要的资源库

月球作为一个理想的天然实验室,其本身也是一种重要的资源。《流浪地球 II》中行星球发动机的建造和试验都体现出了利用月球资源的理念。按照目前的技术评估,地月往返成本约在50万—60万元人民币每千克,考虑到未来的长期运行,从地球运输资源并非一个好的选择,充分利用月球资源才是有效的解决途径。

月球资源指月球表面可供利用的矿产、能源以及环境等自然资源,强调就位利用的可行性,以满足人类在月球表面、月球轨道和空间环境中的科学研究、探测活动和工程建设等的需求。矿产资源主要指月球表面可供开发利用的矿物资源,包括月壤、钛铁矿、斜长岩等岩石矿物;能源资源是指可以在月球进行开采的能

源,主要包括氢、氦-3、氧、水冰等;环境资源是指月球表面的可利用环境因素,包括真空、低重力、辐射环境等。月球资源利用可以为月球探测与开发提供支撑,是实现月球轨道和空间环境中科学研究、航天活动和工程建设的重要保障,也可以为未来的空间探索、移民和开发奠定基础。月球资源中比较具有代表性的有以下几种。

钛铁矿资源。月球表面分布着22个主要的月海,所填充的玄武岩总体积约106万立方千米。对人类采回的月球岩石样品的分析表明,月海的玄武岩中存在大量高钛玄武岩,其中钛和铁的含量相当高,钛铁矿最高体积含量可达18%。据推算,月海玄武岩中钛铁矿的总资源量约为1300万亿—1900万亿吨,其中可开采利用的钛铁矿资源量约为110万亿—220万亿吨,所包含的二氧化钛资源量可达57万亿—115万亿吨。尽管这些估算有很大不确定性,但可以肯定的是月海玄武岩中丰富的钛铁矿是未来月球开发利用中最重要的矿产资源之一。

水冰资源。根据最新探测结果,月球南北两极永久阴影区中水冰高度富集,估计总资源量约为66亿吨。水冰不仅可以为未来月球基地提供基本生命维持保证,而且通过分解水可得到氧气和氢气,其中氧气是航天员在月球上必需的生命支持物质,而氢气可以作为火箭燃料的推进剂。

氦-3资源。在月壤的稀有气体中,最让我们感兴趣的是核聚变燃料——氦-3。相比目前正在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更多的优点。首先,传统的氘—氚聚变反应过程中会产生大量高能中子,而这些中子将对核反应装

置产生广泛的放射性损伤;若用氦-3作为反应物,氘—氦聚变反应主要产生高能质子而不是中子,因此所需要的防护设施、材料和环保条件要简便和廉价得多。其次,氦本身具有放射性,而氦-3没有放射性。据计算,氦-3的能量回报率为270,核裂变发电的能量回报率为20,而煤仅为16,氦-3作为一种可长期使用、清洁、高效、安全的核聚变发电燃料是毋庸置疑的。但是,氦-3在地球上的含量微乎其微,理论储量仅约0.5吨。而月球由于几乎没有大气层,长期的太阳风粒子注入使月壤富含氦-3,其资源总量可达100万—500万吨。若能实现商业化利用,月壤中的氦-3可满足地球数万年的能源需求。

我国月球探测的发展

我国月球探测从20世纪90年代的规划论证,到21世纪初的立项实施,再到如今的多任务快速实施,已经取得了举世瞩目的成就。20世纪90年代初,中国科学院地球化学研究所欧阳自远院士提出了我国月球探测的总体规划。2004年,国家正式批准“嫦娥一号”工程任务立项实施;2007年10月24日,“嫦娥一号”月球探测卫星成功发射升空,成为中国首枚进入月球轨道的探测卫星。“嫦娥一号”的发射标志着中国月球探测进入了新的阶段。随后,2010年发射的“嫦娥二号”月球探测卫星进一步对月球表面环境、矿物组成、地形地貌等进行详细探测,并飞掠图塔蒂斯小行星进行探测。2013年发射的“嫦娥三号”月球探测卫星实现了月面软着陆和巡视探测,标志着我国月球探测的技术和装备发展已经取得了长足的进步。2018年发射的“嫦娥四号”月球

探测卫星实现了人类首次月球背面软着陆和巡视勘察。2020年“嫦娥五号”成功发射并实现了采样返回任务,带回1731克月球样品,圆满完成了欧阳自远院士提出的我国月球探测“绕—落—回”三步走任务。

在完成一系列工程任务后,我国月球探测在月球地形地貌、物质组成、空间环境、内部结构以及表面磁场等方面也取得了一系列新认识,尤其是最近两年针对“嫦娥五号”月球样品的研究,厘定了月球岩浆活动的持续时间,将阿波罗时期认定的月球停止岩浆活动的时间推迟了10亿年。同时,还揭示了高压矿物的特征及成因、月壤中水的太阳风成因机制、纳米铁的不同成因机理等月球地质演化规律。

未来,我国月球探测将发生重大变革,重点将从科学认识转向资源利用。从深空探测发展大趋势看,太空资源开发和利用已成为世界各国竞争的新疆域。探测对象从距离相对较近的月球和火星拓展到了更遥远的小行星以及其他天体,与人类社会可持续发展息息相关的太空资源开发和利用会成为今后较长一段时间国际深空探测的重要目标。当前,世界主要航天大国都已围绕太空资源规划和部署了大量探测任务,多个国家还为此出台了太空资源开发和利用的法律法规。在此背景下,我国月球探测的重点也势必从科学研究转向资源利用。我国已提出在月球南极通过国际合作共同建设月球科研站的规划,探索月球资源利用的技术途径;与此同时,载人月球探测将瞄准建设可供航天员长期驻留的月球基地,开展月球资源利用技术验证,开启月球资源利用的新时代。

围绕月球基地建设,月球资源就位利用主要包括月壤资源利用、月面工程建造和月面生

命支持三个大方面。月壤资源利用是指从月球表面的火山熔岩、碎屑和月壤中提取有价值的物质资源,包括金属、硅酸盐、氧化物、矿物质等,用于构建宇航器、火箭发动机、电池、飞机、航天飞行器和其他航天设备,支撑月面科学研究、工程建设和设备供应等;月面工程建造是指在月球表面建设实验室、航天站、天文台、放射性物质储存设施和工业厂房等设施,为月球科学研究和航天活动提供基础;月面生命支持是指在月球表面建设安全的生活空间,提供水、食物和空气等生活必需品,为月球轨道和空间环境提供人员驻扎的可行性。

月球资源利用面临的挑战主要有三个方面:首先是技术挑战。技术难题包括月球表面资源的开采、提取和分离等,目前这些技术仍处于实验阶段,需要进一步开发和研究。其次是经济挑战。月球资源的开采、提取、分离和运输等是大投入、高成本的活动,需要大额投入才能获得预期效果。最后是安全挑战。包括月球表面的放射性物质、环境辐射和月面尘埃的危害等,尚需要科学家们进行大量研究,对这些潜在的危害进行准确评估,以确保月球资源利用的安全性。

月球探测具有非常重要的意义,是理解太阳系天体演化过程、认识宜居环境成因的重要基础,也是人类寻找新家园的跳板。而月球资源利用是实现月球开发和移民的重要支柱,是未来宇宙探索的基础。我国月球探测在取得巨大成就的基础上,也将瞄准月球资源利用这一目标,逐步建立月球科研站和月球基地,开启未来月球探测的新时代。

(作者单位:中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心)