

# 嫦娥四号月球背面探秘之旅

徐琳

(中国科学院月球与深空探测总体部/国家空间科学中心 100190)

在地-月系统长期的演化过程中,地球和月球之间的潮汐力使月球的自转逐渐减缓,最终导致月球被地球潮汐锁定,使得月球总是同一面朝向地球,所以从地球上始终不能完全看见月球的另一面(仅有18%因天平动效应和视差而被观测),因此被称为月球背面。月球背面的第一张影像由前苏联的“月球3号”环月探测器在1959年10月拍摄,揭开了月球背面的神秘面纱,直到1968年12月的阿波罗8号任务环绕月球时,才直接用眼睛看见月球背面。2007年中国发射了嫦娥一号,获取了分辨率为120米的全月图,2010年发射的嫦娥二号,进一步获取了分辨率为7米的全月图。2010年12月,美国的“月球勘测轨道号”探测器拍摄了更多高分辨率的月球背面图像,让人们对月球背面有了进一步地了解。

2018年12月8日,伴随着巨大的轰鸣声,搭载着嫦娥四号月球探测器的长征三号乙运载火箭在西昌卫星发射中心发射升空,经过几周的飞行,于2019年1月3日10时26分成功着陆在月球背面的

冯·卡门撞击坑(东经177.59度,南纬45.46度),并通过运行在地月拉格朗日L2点Halo轨道上的“鹊桥”中继星传回了世界第一张近距离拍摄的着陆点附近月背影像图,此次任务实现了人类探测器首次月球背面软着陆就位探测,以及首次月球背面与地球的中继通信(图1)。

## 一、从地球看月球

早在17世纪,伽利略通过自制望远镜观测发现月亮主要分为暗色区域和亮色区域,在月球表面上用肉眼可以清楚看见有黑暗的,相对平坦的平原,被称之为“月海”,相对其他比较光亮的地方被称之为“月陆”,17世纪的天文学家开普勒最早引入这些名称(图2)。

现在我们知道,月海是古代火山爆发后岩浆在洼地凝结成的玄武岩,和地球的玄武岩类似,月海中的玄武岩含有丰富的铁。现在科学家已经在月球正面的月海中发现几个拥有盾状火山和火山穹

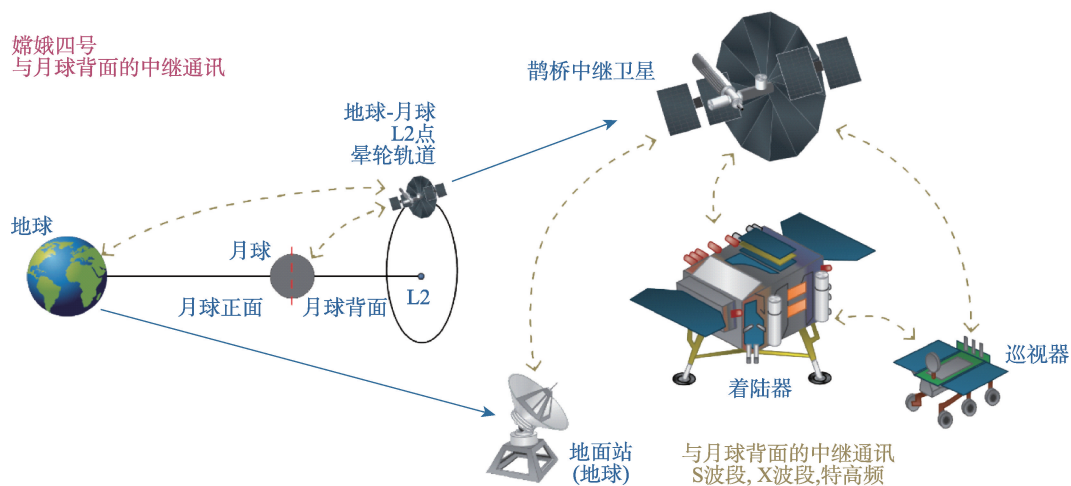


图1 通过“鹊桥”中继星来传输从月球背面探测到的信号到地球

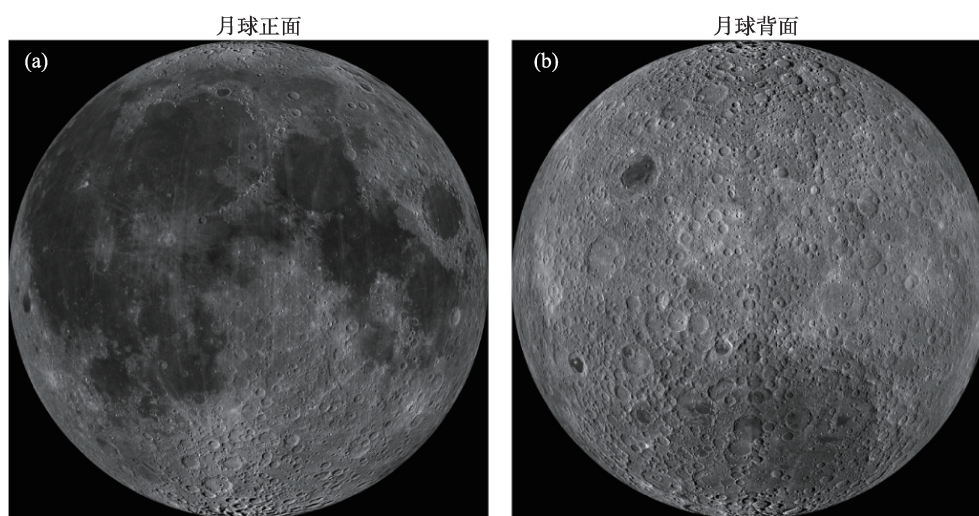


图2 月球正面(a)与背面(b)全球图像

顶的地质分区,这些是岩浆凝结形成月海的证据。几乎所有的月海都位于月球正面,占正面面积的31%,相较之下,在月球背面只有少数的月海,涵盖了背面2%的面积,这被认为和月球正面地壳下的生热元素的浓缩有关,生热元素的浓缩会造成地幔下的温度上升,部分溶解并上升到表面造成喷发。大部分玄武岩的喷发都出现在30至35亿年前的雨海纪,但也有少部分岩石样品的年龄是42亿年,也有一些相对年轻的样品,最年轻的是12亿年前。而月球上较亮的部分被称为月陆或者“高地”,因为它们的地势高于大多数的月海,大约在44亿年前形成,这意味着这些高地可能是在月球岩浆洋形成时的斜长岩堆积所产生的。

## 二、月球成因假说

有关月球的成因有很多假说,如:潮汐分裂说、同源说、捕获说和撞击成因说。目前最合理的、也是被

大家广泛接受的观点是20世纪80年代提出的“撞击成因说”。该假说认为一个直径如同火星大小的天体和当时的地球发生碰撞,这个碰撞的天体被称为忒伊亚,源自希腊神话中月神的母亲,女神忒伊亚(图3)。

这种撞击假说天体尺寸的比率是为了产生足够的角动量,以匹配当前系统轨道的参数。巨大的撞击和吸积过程产生的能量使月球形成了全球范围的岩浆洋,深度估计有几百千米,岩浆洋结晶分异形成了壳幔的圈层结构,目前我们知道的月球形成年龄,也可以认为是大撞击事件发生的时间,约为太阳系开始形成之后的40~50个百万年。当温度开始下降,炽热的岩浆逐渐冷却、结晶,在结晶的过程中,首先结晶出来的是富镁的橄榄石和辉石,它们由于密度大而下沉形成月幔。当岩浆洋结晶到75%左右,富铝和钙的斜长石开始形成,由于密度较轻而上浮,形成古老的月亮。有一种观点认为,由于较晚结晶、并位于上部的富铁质矿物密度较大,会由于重力不



图3 月球撞击成因想象图

稳而发生翻转,使岩浆洋上部富铁、富钛等较重的物质下沉,而底部富镁的物质被迫上涌,从而改变了月幔原始物质的层状分布特征。残留于月壳和月幔之间的岩浆主要成分为钾(K)、稀土(REE)和磷(P),合起来被称为“克里普岩(KREEP)”。月球岩浆洋的分异结晶决定了现在月球的成分和结构,该模式和地球的岩浆结晶分异、圈层结构的模式类似。

目前所知的月壳形成时间约为44.6亿年。月球在其形成过程中,一直受到小天体的撞击,从而形成各种大小不一的撞击坑或盆地。研究表明,撞击的强度和频率随时间而迅速递减,但在大约39亿年前,月球经历了异常大规模的撞击事件。有研究认为,月球正面的大多数撞击坑都是在这一阶段形成,后期的玄武岩火山喷发,使玄武岩充填了月球的撞击坑,并将富含克里普岩的物质也“携带”到月球表面。但是,对于发生在39亿年前的大撞击事件仍然存在争议,因为目前缺乏古老的月球岩石样品,无法确定39亿年前的撞击事件是在逐渐增加还是衰减。

月球的“撞击成因说”合理地解释了地月系统的许多基本特征,包括地球自转轴的倾斜与自转加速、月球轨道与地球赤道面不一致、月球富含难熔元素而匮乏挥发性元素和亲铁元素,等等,但仍然有一些未能解释的疑问。此外,岩浆洋结晶、壳幔分异等都是复杂的地质过程,以及月球的挥发性物质是否在碰撞中消耗殆尽等问题,远不是上述简单的模式能够完整解释。

### 三、嫦娥四号揭示月球地质信息

月球地质年代在科学界划分为五个纪:前酒海纪、酒海纪、雨海纪(又细分为早雨海世、晚雨海世)、爱拉托逊纪和哥白尼纪。地质年代的时间分界主要根据月面上的重大陨石撞击事件、撞击频率与撞击坑大小等,通过目前的研究手段,可以确定月面样品的年龄,月球地质年代的绝对时间已基本可知。然而,对于特定重要事件的发生时间仍然有很大争议,因为在月表取样的范围还很不全面,且大多数月表样品可能受到了漫长时间跨度内小陨石微粒撞击的污染。

根据月球岩石的矿物化学组成,月球表面的地

质单元可简单分为三大地体(或构造单元),分别为:风暴洋克里普岩地体(PKT)、斜长岩高地地体(FHT)、南极艾特肯盆地地体(SPAT)。三个构造单元的演化历史具有明显的差别,风暴洋克里普岩地体主要位于月球正面,是以克里普岩为主的月海玄武岩;斜长岩高地地体主要位于月球背面,是以斜长岩为主的高地斜长岩;南极艾特肯盆地地体主要呈现了月球深部的物质组成(图4)。目前,风暴洋克里普岩地体已经被巡视探测过。南极艾特肯盆地直径约2500千米,深约13千米,它是月球上最大、最古老和最深的撞击盆地,有助于我们获取月球深部物质的信息。盆地内部叠加了大量不同年代、不同形态的撞击坑或撞击盆地,这有助于了解月球的深部物质组成与结构,以及月球的撞击历史。古老的岩石样品,有助于获取年龄的信息,揭示39亿前的大撞击事件是否真的存在。这些对我们了解月球的形成和演化过程有很大帮助。

迄今为止,人类对月球已经开展了上百次无人环绕探测活动,环绕探测可以获得全月球的信息,但为了获得局部区域的高分辨信息,需要就位探测才能更好地完成。就位探测区域范围比较有限,但具有较高的水平、垂向分辨率,同时减少了空间传播损耗以及空间复杂环境的干扰等。直接对月球浅表层进行探测,可获得月球浅表层达百米的内部结构信息,对于揭示月球浅表层结构特征,进而了解月球物理状态与构造组成,为研究月球起源与演化历史等提供科学的依据。

美国的阿波罗载人登月计划、苏联的无人登月计划,以及中国的嫦娥三号任务都对月球开展了着陆和巡视探测,前两项计划还采集了月球的岩石和土壤样品返回地球。但是,这些探测计划都是针对月球正面开展的探测活动,并且只占月球正面很小的区域。嫦娥四号任务是人类首次对月球背面开展着陆和巡视探测,而月球南极至今没有开展过任何就位探测活动。

如前所述,月球正面主要是被玄武岩所覆盖,而月球背面主要是高地斜长岩,和正面的地质特征完全不同。嫦娥四号的着陆点位于东经177.59度,南

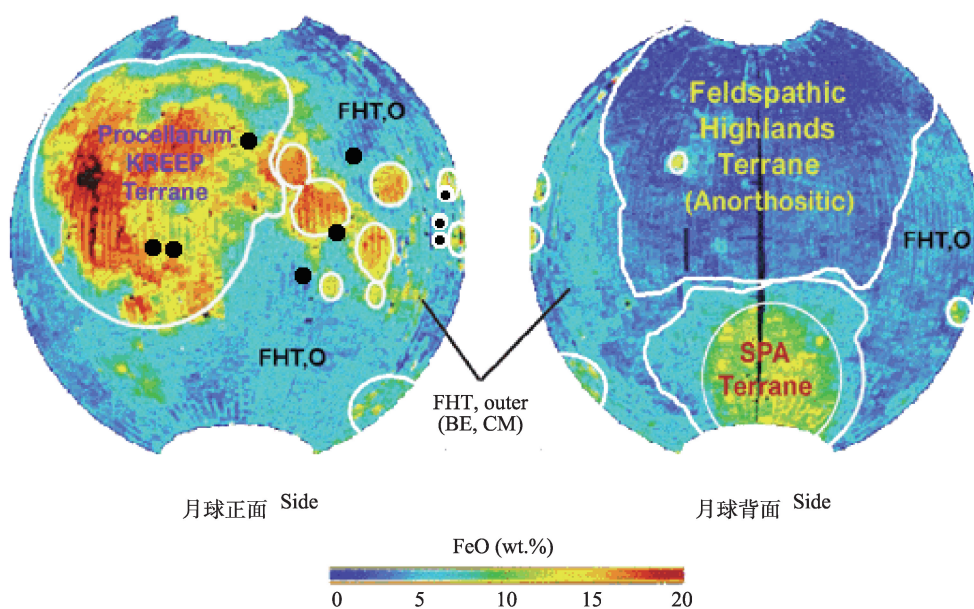


图4 月球的三大主要地质单元

纬45.46度,着陆点在月球背面南极艾特肯盆地区域内冯·卡门撞击坑(图5)。冯·卡门撞击坑约形成于45.5~39.2亿年前的前酒海纪,其名称取自匈牙利裔美籍工程师暨物理学家西奥多·冯·卡门(1881~1963年),1970年被国际天文学联合会批准接受。

巨大的撞击使月球背面来自月幔的大量物质被抛射出来,嫦娥四号对该区域进行着陆和巡视探测,有可能获取月亮不同深度,乃至撞击所挖掘出的月幔的矿物岩石信息。此外,盆地附近的高地斜长岩的物质也可能混入。同时,这也是研究39亿年的密集撞击事件的有利区域。通过嫦娥四号的探

测,我们将首次获得艾特肯盆地的就位探测信息,包括形貌、物质组成和浅表层结构等,从而能更好地认识月球正面和背面的差异,进而对月球的大撞击假说、岩浆洋结晶分异过程,以及早期的撞击历史等获得新的认识。

月球还有很多未解之谜,无论是岩浆洋假说,或其他有关月球壳-幔形成的模型,均不能解释月球表面所呈现出的极大不均一性。例如,月球背面主要为斜长岩高地,而正面为月海盆地;玄武岩主要分布在月球正面,并充填在月海盆地。来自遥感探测以及月球样品测试分析的数据研究表明,月球在地形地貌、表面物质成分、岩石类型、矿物组成以及内部结构方面都存在广泛的不均一性。引起这些差别的根本原因目前还不清楚,有待进一步研究,期待嫦娥四号能为我们开启这扇神秘的大门。

嫦娥四号任务中采用多种探测手段,将在国际上首次建立月球背面集地形地貌、地质构造、物质成分、浅层结构于一体的综合地质剖面,并建立区域性的地球化学与构造动力学演化模型。同时,嫦娥四号是探月工程四期的首次任务,后续将开展针对月球南极的探测任务,特别是南极采样返回任务,将让我们进一步深入和全面地认识月球的形成和演化。

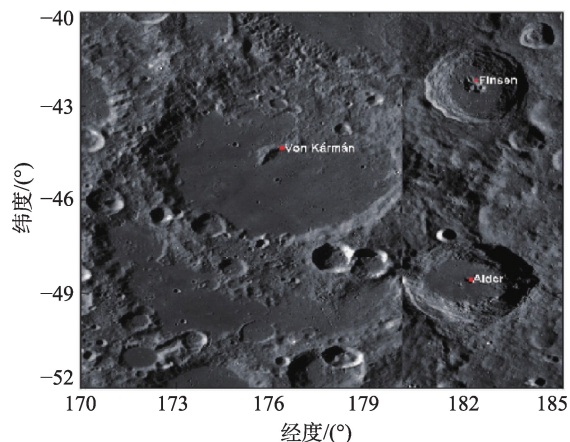


图5 嫦娥四号探测器的着陆区南极艾特肯盆地冯·卡门撞击坑