

绕月探测工程科学应用研究进展*

欧阳自远^{1,2} 李春来¹ 邹永廖¹ 刘建忠¹

(1 中国科学院国家天文台 北京 100101

2 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

摘要 我国月球探测工程分为“绕、落、回”三期实施。其中一期即绕月探测工程,其主要科学探测任务是对月球开展全球性、整体性和综合性的科学探测,包括以下4项科学目标:获取月球表面三维立体影像;分析月球表面元素含量和物质类型的分布特点;探测月壤特性;探测地月空间环境。在这4个科学目标中以全月球数字地图和三维立体影像图的获取为重点目标,结合物质成分探测、月壤特性探测和空间环境探测的成果,既与国际月球探测的发展趋势接轨,又有自己的创新特色。本文将主要介绍中科院在绕月探测工程中主要获得的科学研究成果。

关键词 探月工程,科学成果,嫦娥一号,月球轨道器,月球

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2009.05.010

1 引言

我国载人月球探测工程分为“绕、落、回”三期实施。其中一期即绕月探测工程,于2004年2月立项启动,2007年10月成功发射,2009年3月1日嫦娥一号卫星(CE-1)成功受控落月,整个工程取得圆满成功。

在月球探测工程中,中科院承担的主要任务包括:立项论证阶段负责探月工程科学目标的论证与制定,根据科学目标的要求提出有效载荷需求和配置方案,参与探月工程总体方案论证与编制;实施阶段,承担工程地面应用系统、卫星系统有效载荷分系统和测控系统 VLBI 测轨分系统的研制、建设与卫星在轨业务运行期间的任务执行等任务。

绕月探测工程的主要科学探测任务是对月球开展全球性、整体性和综合性的科学

探测,包括以下4项科学目标:(1)获取月球表面三维立体影像;(2)分析月球表面元素含量和物质类型的分布特点;(3)探测月壤特性;(4)探测地月空间环境。

4个科学目标中以全月球数字地图和三维立体影像图的获取为重点目标,结合物质成分探测、月壤特性探测和空间环境探测的成果,既与国际月球探测的发展趋势接轨,又有自己的创新特色^[1]。

为实现工程的4项科学目标,CE-1共搭载了 CCD 立体相机、激光高度计、干涉成像光谱仪、 γ 射线谱仪、X 射线谱仪、微波探测仪、高能粒子探测器和太阳风离子探测器等8种有效载荷。这8种有效载荷由中科院的5个研究所负责研制。

2007年10月24日18时05分,CE-1卫星在西昌卫星发射中心成功发射升空,进入地球调相轨道;10月31日,卫星进入奔

* 收稿日期:2009年9月4日

月轨道;11月5日,卫星成功被月球捕获;11月7日,卫星进入距月面200km高的预定工作轨道;11月20日8种有效载荷陆续开机,标志着CE-1正式开始实施科学探测任务,这也是CE-1经历的第一个正飞期。

CE-1在轨运行期间,因能源供应问题,分为正飞期和侧飞期。正飞期,卫星处于地球、太阳和月球的三体定向状态,太阳帆板对准太阳,获得能源供给;探测仪器对准月球开展科学探测;发射天线对准地球,进行探测数据传输和通信。受太阳、地球、月亮、卫星相互关系的影响,每隔3个月,CE-1需要变换飞行姿态,进入侧飞状态以尽可能多地获取太阳能,这个阶段的探测仪器由于没有对准月球而无法开展探测。

2008年1月28日,卫星进入第一个侧飞期,侧飞期间,没有开展科学探测活动。

2008年5月1日进入第二个正飞期,各探测仪器重新开机工作,首先实现了月球南北纬70度以内范围全部图像的获取,完成了工程任务规定的图像数据获取任务,并在7月1日实现了两极地区图像数据的覆盖,CCD相机超额完成探测任务;其他7台载荷也获得了大量的科学探测数据。

2008年8月4日—11月5日卫星转入第二个侧飞期。

2008年10月24日,卫星完成了1年的预定运行寿命,转入延寿期,主要开展了卫星导航新技术、热控技术、太阳帆板和变轨等试验,系统、大量的科学探测活动不再进行。2009年3月1日16时13分10秒,CE-1准确落于月球东经52.36度、南纬1.50度的丰富海区域,实现了预期目标,为绕月探测工程画上圆满的句号。

根据《绕月探测工程科学数据发布管理办法》,自2008年7月开始,北京大学、南京大学、复旦大学、吉林大学、同济大

学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、成都理工大学、海南大学、解放军信息工程大学、国防科学技术大学、中国地质大学(武汉)、国土资源部航空物探遥感中心、中科院地质与地球物理所、中科院地球化学所、中科院遥感应用所、中科院空间科学与应用研究中心、中科院紫金山天文台、探月与航天工程中心、香港中文大学、香港科技大学、澳门科技大学等23所大学和7家科研机构,获得了发布的探测数据,用于科学研究。此外,根据中欧探月工程的合作协议,欧洲空间局(ESA)也获得了协议中规定的相关探测数据。

2 绕月探测的科学成果

2.1 已完成的科学成果

(1) CCD立体相机和激光高度计联合用于获取月球表面三维立体影像。由中科院西安光机所研制的CCD立体相机和上海技物所研制的激光高度计获得了包括南北纬70度以及南北纬70—90度在内的全月球的影像数据,完全实现了对全月面的覆盖。通过对所获取探测数据的处理,分阶段地取得如下主要成果:2007年11月26日,利用CCD立体相机获取的影像数据,制作并公布了第一幅月面图像及其三维影像(图1),利用第一个正飞期获取的300多万个月面高程数据制作了空间分辨率为7km的数字高程模型(DEM)图、极区南北纬70—90度

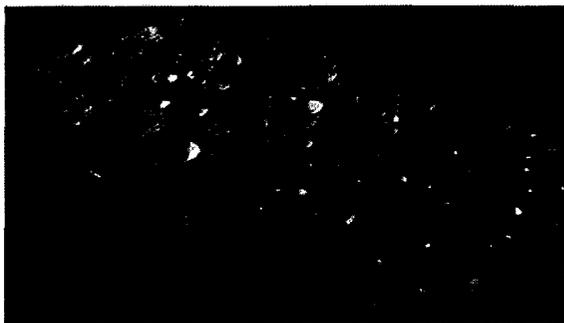


图1 中国首次月球探测工程第一幅月面图像局部三维景观图

以内空间分辨率为 4km 的 DEM 图;2008 年 7 月,利用 CCD 立体相机正视影像拼接完成了全月球影像图的制作,并于同年 11 月 12 日正式公开发布;2008 年 8 月,利用激光高度计获取的 916 万个有效高程数据制作完成全月球空间分辨率 3km 的 DEM 图(图 2)。

(2) 干涉成像光谱仪、 γ 射线谱仪及 X 射线谱仪联合实现探测月球表面元素含量和物质类型分布。由中科院西安光机所、紫金山天文台和高能所分别研制的干涉成像光谱仪、 γ 射线谱仪和 X 射线谱仪完成了探测月表物质成分的科学任务。这 3 台科学仪器获取的数据用于分析月球表面元素含量和物质类型的分布特点,绘制相关元素的全月球含量与分布图、粗略划分岩石类型,研究月球的化学演化。

截至 2008 年 10 月 24 日, γ 射线谱仪共获取约 2 105 小时的有效探测数据,现已完成 U、K、Th 3 种元素的含量分布图的制作,目前正在完成其他元素的含量分布图的制作工作;X 射线谱仪共获取了 1 761 小时的有效探测数据,现已制作出 Mg、Al、Si 元素的局部含量和分布图的制作;干涉成像光谱仪的探测数据已经覆盖南北纬 70 度范围内约 84% 面积,通过对 FeO、TiO₂ 元素含量的反演,结合 γ 射线谱仪和 X 射线谱仪探测的元素含量与分布数据,相互融合进行克

里普岩、斜长岩和玄武岩的粗略划分。

(3) 微波探测仪用于探测月壤特性。由中科院空间中心研制的微波探测仪获取了全月面的探测数据,通过分析处理,目前完成了全月球亮度温度分布图的制作,开展了月壤厚度信息反演的研究工作,分析月球表面年龄及其分布特征,结合返回的月壤分析数据^[2],进而估算月球表面氦-3 和其它气体的含量、分布特征及资源量。这也是国际上第一次进行全月球的月壤厚度探测。

针对微波探测仪的数据特点,绕月探测工程地面应用系统开展了以下工作:确定月球周围影响微波探测仪冷空定标的射电源,对数据处理方法作了评估和修正;对亮度温度观测数据进行了划分升降轨、划分昼夜和剔除异常值的处理;进行了月壤厚度反演模型的构建和算法实现。目前,已完成亮度温度数据处理软件的研制和全月亮度、温度分布图的制作(图 3)。通过对月球表面的亮度温度分布图的分析,发现了月球表面的亮度、温度分布明显受到月球地形的影响,并与月球表面的物质分布存在明显的相关性。

(4) 高能粒子探测器及太阳风离子探测器用于探测月球轨道空间环境。由中科院空间中心研制的 1 台太阳高能粒子探测器和 2 台太阳风离子探测器于 2007 年 11 月 26 日开始开机探测,截至 2008 年 10 月 24 日太阳风离子探测器共获取 2 852 小时数据;

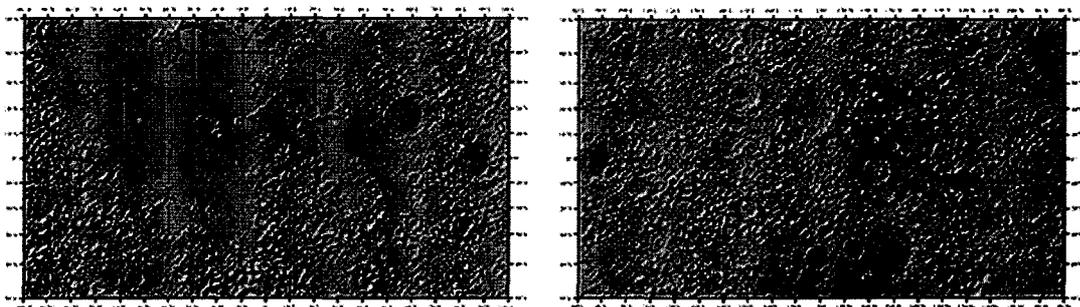


图 2 根据激光高度计探测数据制作的全月球 DEM 图(左:月球正面;右:月球背面)

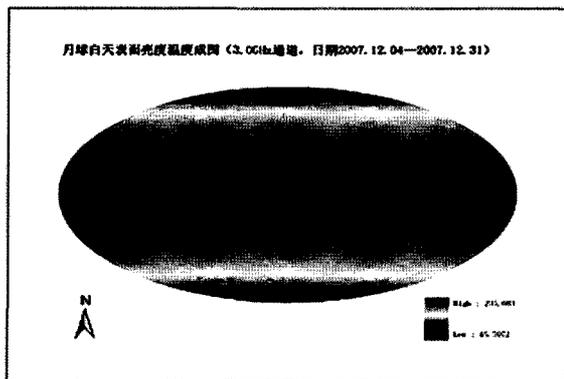


图3 月球表面亮度温度分布图

太阳高能粒子探测器共获取 2 868 小时的数据。在轨运行期间,CE-1 曾多次经过月球背面的屏蔽区、行星际空间、地球磁层的磁鞘和磁尾区 4 个空间区域。其中,高能粒子探测器在太阳风中的数据相对较平静,很少有明显计数;在磁鞘和磁尾中电子的 0.1MeV 档时有计数。通过太阳风离子探测器的数据,我们看到行星际空间太阳风等离子体密度相对较大、温度低,扰动相对平静;磁鞘等离子体温度高,扰动增加;地球磁尾里的等离子体密度低,分布非热平衡分布。同时,太阳风离子探测器还监测到月球两极日夜交界面附近从日侧向夜侧速度逐渐增加的粒子流、月球向阳面的太阳风离子反射现象等空间环境事件,这些事件揭示了太阳风中的等离子体物理过程以及与月球的相互作用过程,将加深我们对太阳风与无大气弱磁化天体相互作用的认识。

2.2 任务结束后预计完成的科学研究成果

根据任务书的要求,预计在 2009 年 10 月提交的最终成果有:(1)三维数字地形图:利用激光高度计和 CCD 立体相机的数据完成全月球的 1:250 万三维数字地形图;(2)物质成分图件与说明书:完成天然放射性元素 U、Th、K 元素的全月球分布图;完成 Fe、Ti、Mg、Al、Si 的区域分布图;完成月球表面主要岩石类型分布图;完成区域月球地质-

构造图;(3)提交月壤厚度分布特征及 ^3He 资源量估算和研究报告;(4)提交近月空间环境与太阳活动关系研究报告。

3 绕月探测工程科学研究成果的特点

绕月探测工程是我国的首次月球探测工程,不仅圆满完成了预定工程目标,而且取得了一批具有国际先进水平的科学研究成果,为人类的月球探测和月球科学研究做出了贡献。

3.1 全月球影像图

与目前国际上已有的月球影像图相比,利用 CE-1 卫星获得数据制作的全月球影像图与国际已经公布的成果相比,具有以下一些优势:

(1) 唯一覆盖全月面的影像图。利用 CE-1 卫星探测数据制作的全月球影像图,覆盖整个月球表面。美国阿波罗系列探测任务制作的月表地形图仅仅覆盖了月面南北纬 20 度范围的区域;尽管利用克莱门汀月球探测器获取的探测数据制作的地形图虽然覆盖全月面,但是由于轨道设计、数据缺失等因素的影响,月表很多处地形数据是通过数值插值的方法进行补充的。

(2) 数据处理方法和精度上全球相对一致性的特点。CE-1 卫星制作的全月球影像图,是借助卫星摄影测量技术利用 CCD 立体相机与激光高度计科学探测数据联合处理的结果^[3];阿波罗系列探测器获取的地形数据是分别采用图像数据、雷达高度计、激光高度计等不同仪器独立处理结果的综合,并且是多次探测任务成果的综合;克莱门汀月球探测器的地形图像是由激光高度计测距数据和图像数据处理结果的综合,两极地区的地形数据是利用图像数据借助卫星摄影测量技术制作的,南纬 79 度—北纬 81 度

之间是利用激光高度计数据制作的;另外美国地质调查局发布的 2005 月球控制网数据中包含 1 套覆盖全月球表面的地形图,是联合多次月球探测任务(不同历史时期的月表地形测绘技术手段与探测水平都存在明显差异)获取的数据综合处理得到的;日本月亮女神号探测任务只提供了用激光高度计的探测数据制作的月面高程模型图。因此,CE-1 卫星的月表地形数据在数据处理精度上更具有全球相对一致性,而不会因为处理方法不同、探测任务不同等在局部区域出现明显差异。

(3)平面位置与高程测量精度方面具有明显的优势。CE-1 卫星制作的月表地形图在平面定位、高程测量精度方面具有全球相对一致性,而其它探测任务在月表局部区域存在明显差异;因此,CE-1 获取的全月面影像图在相对平面位置与高程测量精度方面具有明显的优势。

(4)全月表地形地貌特征的精确反映优势。阿波罗系列探测任务得到的是空间分辨率为 500m 左右的规则格网数据(反映了月面南北纬 20 度以内月表地形地貌特征);克莱门汀号月球探测器得到的是空间分辨率 0.25 度(相当于 7.5km)左右的规则格网数据;美国地质调查局 2005 月面控制网提供的月表地形数据是空间分辨率为 1.9km 的规则格网(该数据主要是在克莱门汀号月球探测器激光高度计探测数据基础上制作的,仅提供了对全月表地形地貌特征的概略反映);日本月亮女神号探测任务提供了等高距为 1km 的月面高程模型图。CE-1 可以制作全月球空间分辨率为 500m 的规则格网数据(提供了对全月表地形地貌特征的精确反映),因此对全月球表面地形细节的反映相对其他国家的月球探测卫星的成果具有明显优势。

3.2 物质成分探测

物质成分探测在月球探测的历史上一直是作为一项重要的探测内容,阿波罗系列和月球勘探者号(Lunar Prospector, LP)携带的 γ/X 射线谱仪,克莱门汀号月球探测器搭载的多光谱成像仪,欧空局的智慧一号(SMART-1)以及日本的月亮女神号等卫星都探测了月球表面的元素和矿物的分布。相比较而言,CE-1 卫星在物质成分探测方面具有如下特点:

(1)CE-1 的 γ 射线谱仪的晶体选用 CsI(Tl),与阿波罗 15 号、16 号、月球勘探者号、克莱门汀号、智慧一号相比较,CE-1 γ 射线谱仪的探测器有效面积大,能量分辨率高,全能峰效率高,力学性能好,比较适合做空间探测。

(2)CE-1 的三种有效载荷有机结合,可以完成 U、Th、K、Mg、Al、Si、Fe、Ti 共 8 个元素含量分布特征的探测任务,而且 U、Th、K 可以完成全月面含量分布特征。月球勘探者号探测数据中只有 Th、K、Fe、Mg、Ti 5 种元素的含量和分布特征得到真正体现;CE-1 的干涉成像光谱仪有 32 个谱段,比克莱门汀号探测器紫外-可见光谱仪的 5 个谱段多,光谱分辨率高。与月球勘探者号的探测相比,CE-1 最大的特点就是携带了干涉成像光谱仪,可以获得月球表面的光谱图像数据,并利用光谱数据开展月表主要矿物的定性识别和定量反演。CE-1 的 X 射线谱仪在能量分辨率优于智慧一号的小型成像 X 射线谱仪。在日本的月亮女神号探测器上,也同样搭载了三类物质成分探测的科学探测仪器,与 CE-1 基本相当。但由于月亮女神号上的 γ 谱仪采用高纯锗探测器,对环境的要求高,航天适应能力差,在发射后 1 个月即发生了故障。另外,月亮女神号上的 X 射线谱仪在轨开机后由于电子学噪声很大,被迫

关闭了 3/4 的探测单元。目前日本月亮女神号上的三类探测器只有零星的报告。

总之,CE-1 在一次探测中搭载了三类成分探测的仪器,包括探测元素的 γ 射线谱仪和 X 射线谱仪以及探测矿物的干涉成像光谱仪在探测谱段和能力上等与国外的每个单次探测任务相比具有一定的优势。

3.3 月壤特性探测

微波探测仪的科学目标是利用微波辐射信号对月球表面物质的穿透传播特性,从表征月球物质微波辐射的亮度温度数据中,获取月球月壤的厚度信息;获得月球黑夜的微波遥感信息和获得月球两极的微波遥感信息。月球微波遥感信息的获取和月壤特性信息的反演将丰富人类对月球的认识。

利用微波探测仪对月球开展被动微波遥感探测在国际上尚属首次,利用微波探测仪开展月壤厚度的探测已经成为中国月球探测工程的重要特色。目前,利用 CE-1 微波探测仪获得的科学数据,获得了覆盖全月球的亮度温度数据,其空间分辨率、温度分辨率和表面覆盖率都是任何地基观测手段所无法比及的。

微波探测仪的探测数据表明,月球表面亮度、温度不仅与物质成分有密切的关系,而且与地形地貌的变化关系密切,这些现象说明微波探测数据中隐含了许多值得探讨的科学问题,有可能获得创新性的成果。

与此同时,微波探测仪探测数据也表明月球亮度、温度的变化受很多外界因素的影响,获得准确可靠的月球亮度、温度并反演月壤厚度还有大量的后续工作要做。

3.4 空间环境探测

在 CE-1 运行的 1 年当中,高能粒子探测器和太阳风离子探测器连续开机,首次对月球空间环境进行了长时间不间断的监测,取得了月球空间环境的第一手资料。通过数

据的分析,可以知晓 CE-1 绕月各阶段所经历的各类空间区域、事件以及影响飞行器工作的空间环境因素,充分实现了对月球空间环境监测的科学目标。

月球作为一个无大气、弱磁化的天体,其与太阳风的相互作用过程一直是行星际空间物理领域关心的重要科学问题。在 CE-1 之前,对月球等离子体和辐射环境的观测集中于月球表面或月球尾迹远处,200km—100km 高度月球轨道上还没有空间环境数据的连续观测。CE-1 的空间环境数据第一次将这一区域内的等离子体现象呈现于人们面前,为更好地观察太阳风与月球的相互作用打开了一扇窗,为更深入地认识太阳风和无大气弱磁化天体相互作用的细节做出了重要的贡献。目前,从高能粒子探测器和太阳风离子探测器的数据里可以识别出了日夜交界面加速的粒子流和太阳风离子反射现象,很有可能做出有价值的科学发现。

总之,作为我国第一个月球探测器,CE-1 卫星在 4 项科学探测任务中都获得了大量的探测数据,在月球基础科学、数据处理和反演方法等各个方面都取得了丰硕的成果,超额完成了全月球影像图、全月球数字高程模型图和月球三维数字地图的研制任务,完成了月壤特性探测与月球厚度反演、地月空间环境以及物质成分的探测的任务,实现了“有限目标、突出重点、有所创新、形成特色”的总体目标,圆满实现了预定的科学目标,为后续月球探测工程任务的实施与科学研究奠定了坚实的基础。

主要参考文献

- 1 欧阳自远. 月球科学概论. 中国宇航出版社, 北京:2005, 362.
- 2 Zou Y L, Xu L, Ouyang Z. Noble gases in the lunar regolith. Chinese Journal of Geochemistry, 2003

- (22).
- 3 Li C L, Liu J J, Mu L L. *et al.* A New Global Image of the Moon by Chinese Chang'E Probe. 40th Lunar and Planetary Science Conference, Houston, 2009.
- 4 Zheng Y C, Bian W, Su Y, *et al.* Brightness temperature distribution of the moon: result from Chinese Chang'E-1 Lunar Orbiter. Goldschmidt Conference Abstracts 2009, 2009.
- 5 Zheng Y C, Ouyang Z Y, Blewett D T. Implanted Helium-3 Abundance Distribution on The Moon. Lunar and Planetary Science XXXIX, Houston, 2008.

Progress of Scientific Application and Research of China's Circumlunar Exploration Program

Ouyang Ziyuan^{1,2} Li Chunlai¹ Zou Yongliao¹ Liu Jianzhong¹

(1 National Astronomical Observatories, CAS 100012 Beijing

2 Institute of Geochemistry, CAS 550002 Guiyang)

There are three periods in China's Lunar Exploration Program, "circling round the moon, landing on the moon and returning," among which the program of the first period is the circumlunar exploration program, and its main scientific exploration task is to conduct global, integral and comprehensive scientific exploration, including the following four scientific goals. They are: obtaining global three-dimensional image of the lunar surface; analyzing the distribution characteristics of the chemical element abundance and material types or mineral compositions of the lunar surface; exploring the physical properties of lunar regolith layer; detecting space environment between the earth and the moon. Among these four scientific goals, the obtaining of the numerical map of the whole moon and three-dimensional image map is the key goal, combining with the results of the detection of material composition, the physical properties of lunar regolith layer, and space environment, and this not only can connect rail with the development trend of the international lunar exploration, but also we have our own innovation characteristics. This paper mainly introduces the main achievements of the Chinese Academy of Sciences obtained in China's Circumlunar Exploration Program.

Keywords China's Lunar Exploration Program, scientific results, CE-1, lunar orbiter, moon

欧阳自远 男,中国科学院院士,第三世界科学院院士,中科院地球化学研究所研究员,中科院国家天文台高级顾问,中国月球探测工程首席科学家。积极参与并指导中国月球探测的近期目标与长远规划的制订,具体设计国内首次月球探测的科学目标与载荷配置和第二三期月球探测的方案与科学目标。兼中国科学技术协会委员,贵州省科学技术协会主席,中国矿物岩石地球化学学会理事长,中国地质学会副理事长,中国空间科学学会副理事长,国际环境科学中国委员会副主席,国际岩石圈中国委员会,国际地圈生物圈对比计划中国委员会及国际空间研究中国委员会委员,《环境科学》、《黄金科技》、《矿物岩石地球化学通报》及《地质地球化学》杂志主编。E-mail: ynzhang@bao.ac.cn