

中国月球探测进展(2001—2010年)

刘建忠¹, 欧阳自远¹, 李春来², 邹永廖²

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002; 2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

摘要: 21世纪是人类全面探测太阳系的新时代,而月球探测是人类探测太阳系的历史开端。中国的月球探测,首先经历了35年的跟踪研究和积累。通过系统调研苏、美两国月球探测的进展,综合分析深空探测的技术进步与月球和行星科学的研究成果,适时总结与展望深空探测的走向与发展趋势。在此基础上,又经历了长达十年的科学目标与工程实现的综合论证,提出了我国月球探测的发展战略与愿景规划。2004年我国首次月球探测工程立项启动,经过三年多的工程实施,于2007年10月24日成功发射“嫦娥一号”月球探测卫星。目前我国探月工程二期和三期工程都已完成立项任务,正在按预定的计划节点稳步推进。到2020年前我国将实现月面软着陆与月球样品的采集与返回。

关键词: 中国;月球探测;进展与展望

中图分类号:P184 文献标识码:A 文章编号:1007-2802(2013)05-0544-08

China National Moon Exploration Progress(2001-2010)

LIU Jian-zhong¹, OUYANG Zi-yuan¹, LI Chun-lai², ZOU Yong-liao²

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Twenty-first Century is the new era that human beings make a comprehensive exploration on the Solar system, and the Moon exploration is the beginning of the exploration history. After 35 years of follow-up study and accumulation, China National Moon Exploration has performed system research on the progress of the United States and Soviet Moon exploration, aggregate analysis to the technology development of deep space exploration and the research results of Moon and planet science, summed up timely the growth trend of deep space exploration and prospected. On this basis, we have putted forward the development strategy of China National Moon Exploration and vision planning by comprehensive demonstration of scientific objective and project implementation for 10 years. China National Moon Exploration project had a start at 2004. After 3 years of project implementation, We launched the “Chang’e I” lunar exploration satellite successfully in October 24, 2007. At present, China National Moon Exploration project of phase two and phase three have been completed the project establishment, and everything is predetermined steadily according to the plan node. By 2020, China will realize the lunar surface soft landing and the collection-return of lunar samples.

Key words: China; the Moon exploration; progress

1 概述

21世纪是人类全面探测太阳系的新时代。当代的太阳系探测以探测月球与火星为主线,兼顾其他行星、矮行星、卫星、小行星、彗星和太阳的探测,

研究内容涉及太阳系的起源和演化,各行星形成与演化的共性与特性,地月系统的诞生过程和相互作用,生命的起源与生存环境,太阳活动与空间天气预报,小天体撞击地球及由此诱发的气候、生态的环境灾变,评估月球与火星的开发前景,探寻人类

收稿日期:2013-05-17收到,07-02改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41373068)

第一作者简介:刘建忠(1968—),男,博士,研究员。研究方向:岩石学与地球化学。E-mail: liujz@nao.cas.cn.

移民地外天体的条件等重大问题。

月球是地球唯一的天然卫星,是离地球最近的天体。自古以来,她寄托着人类的美好愿望和浪漫遐想,见证着人类发展的艰难步伐,引出了许多神话传说与科学假说。月球也一直是人类密切关注和经常观测的天体,月球运动和月相的变化不仅对人类的生产活动发挥了重大作用,还对人类科学技术的发展和文明进步产生了广泛而深刻的影响。

月球探测是人类走出地球摇篮,迈向浩瀚宇宙的第一步,也是人类探测太阳系的历史开端。迄今为止,人类已经发射了 110 多枚月球探测器,美国实现了 6 次载人登月,人类共获得了 382 千克的月球样品。月球探测推动了一系列科学的创新与技术的突破,引领了高新技术的进步和一大批新型工业群体的建立,推进了经济的发展和文明的昌盛,为人类创造了无穷的福祉。当前,探索月球,建立月球基地,开发月球资源,已成为世界航天活动的必然趋势和竞争热点。我国在发展人造地球卫星和实施载人航天工程之后,适时开展了以月球探测为主的深空探测。这是我国科学技术发展和航天活动的必然选择,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。月球探测已成为我国空间科学和空间技术发展的第三个里程碑。

中国的月球探测,经历了 35 年的跟踪研究和积累。通过系统调研苏、美两国月球探测的进展,综合分析深空探测的技术进步与月球和行星科学的研究成果,适时总结深空探测的走向与发展趋势。在此基础上,又经历了长达十年的科学目标与工程实现的综合论证,提出了我国月球探测的发展战略与愿景规划,系统论证了首次绕月探测工程的科学目标、工程目标和工程的实施方案。2004 年初,中央批准月球探测一期工程——绕月探测工程立项启动。继而,月球探测二、三期工程列入《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020)》的重大专项开展论证和组织实施。2008 年探月工程二期立项启动,2010 年探月工程三期获得国家立项。

2 科学论证与工程实施

2000 年国务院新闻办公室发表了《中国的航天》政府白皮书,在白皮书中正式宣布了“开展以月球探测为主的深空探测的预选研究”作为我国航天发展近期发展的目标之一,为我国的航天发展做出了战略性的决策。

2.1 科学论证

2.1.1 科学论证历程 1989 年 7 月 20 日,在纪念

“阿波罗 11 号”登月 20 周年集会上,时任美国总统的老布什首次提出了“重返月球”计划,并引起了国际上强烈的反响。在随后的一、二年内,日本、欧空局推出了以月球、火星探测为主的深空探测计划。

美国的重返月球计划在我国也引起了强烈的反响。1991 年,时任“863 计划”航天领域的首席科学家闵桂荣院士就提出了中国也应该开展月球探测活动的建议,并成立了“863 月球探测课题组”。1993 年国家航天局组织专家论证,拟利用因其他任务延迟而空余的一枚“长征三号甲”火箭发射一颗人造物体硬着陆在月球的计划。但此次提出的计划因其科学目标不明确,缺乏先进性等原因未被国家批准。正是因为由于此次计划的流产,使得国内的科技工作者认识到科学目标是一项工程的灵魂,缺乏灵魂的工程是没有活力的。

1994 年,在天体化学家欧阳自远院士和空间探测专家楚桂柏研究员的带领下,一支集中了中科院地球化学研究所、空间科学与应用研究中心以及中国空间技术研究院等单位科学家和工程技术专家的研究队伍,经过一年多研讨、交流和论证,完成了第一个完整的月球探测可行性研究报告。通过分析国外月球探测活动的发展状况,探讨了我国开展月球探测的必要性,提出了中国月球探测的任务,论述了中国开展月球探测已具备的条件,提出了中国开展月球探测分阶段实施的设想,遴选了第一阶段的科学目标以及第一颗月球探测卫星方案的设想。但此次论证的方案最终也未能获得国家的批准。但方案中提出的科学目标与美国 1998 年发射的“月球勘探者号”基本一致,充分体现了中国科学家已经有能力把握国际月球探测的主旋律。

1998 年,在国家 863 计划项目的支持下,由中国科学院地球化学研究所天体化学研究室和空间科学与应用研究中心等单位的专家组成的专家组共同完成了中国月球探测发展战略的研究项目,提出了中国月球探测发展的总体规划设想。在 863 项目研究的基础上,中国科学院启动了知识创新方向性项目,支持以欧阳自远院士为首席科学家,国家天文台、地球化学研究所、空间中心、光电研究院、西安光机所、上海天文台、紫金山天文台等单位参加的研究队伍,开展“我国月球资源探测卫星科学目标研究”。2000 年该研究组完成了《我国月球资源探测卫星科学目标》的研究报告。该研究成果于 2000 年 8 月通过了由国防科工委组织的评审,评审组由王大珩、杨家骥、王希季、孙鸿烈、涂光炽、刘振兴、王水、朱能鸿、姜景山等 9 位院士和总装备部、航

天科技集团、科技部、中科院、高等院校的5位专家组成,具有广泛的代表性。评审组认为:“中国科学院提出的我国月球探测计划科学目标先进、明确,意义重大,合理可行,是对国际上已有的月球探测结果的重要发展;各项技术指标先进合理,均有创新特点,作为目标探测的重要起步,能获得有重大意义的新结果,又符合我国国情,在现有条件下可以实现。”这一重要的研究成果不但提出了现今被广泛接受并作为国家发展战略的“绕、落、回”三步走设想,而且所提出的月球探测一期工程科学目标和有效载荷配置方案后来全部被绕月探测工程所采纳,成为工程的设计输入。

2000年11月,国务院新闻办公室发表了《中国的航天》政府白皮书,在白皮书中正式宣布了“开展以月球探测为主的深空探测的预先研究”作为我国航天发展近期发展的目标之一。

2001年,中国科学院根据工程的论证情况以及我国科学探测有效载荷的研制和月球探测地面应用技术水平的现状,启动了以欧阳自远院士为首席科学家的“月球探测关键科学技术研究”项目。该项目于2003年完成研制,项目在前期研究的基础上,对月球探测卫星的科学目标进行了深化论证,提出了具体的探测任务、探测精度指标要求,特别地,项目重点对部分有效载荷、甚长基线干涉测量以及地面应用等关键技术进行了先期攻关。这样的先期布局,在绕月探测工程立项启动后显现出优势,上述几项工作都能在研制任务重,时间紧的情况下满足工程总体进度的要求,为绕月探测工程的圆满完成做出了贡献。

该项目组在完成月球探测一期工程有关科学论证工作的基础上,从2001年开始,在欧阳自远院士的带领下开始了月球探测二、三期工程科学目标与有效载荷的预先研究工作,2004年1月通过专家评审,为“月球探测二、三期工程”进入国家重大科技专项奠定了基础。

从2002年12月起,在孙家栋院士的领导下,来自中国科学院、航天科技集团、总装备部和高校的200多位专家,在原有工作的基础上,开始了“月球探测一期工程的综合立项论证”工作。以围绕实现科学目标为出发点,对卫星、运载火箭、测控、发射场以及地面应用等方面的总体方案、关键技术、经费等进行了全面、细致和深入的分析、论证,并于2003年3月完成了论证工作,提交了《月球探测一期工程的综合立项论证报告》以及《月球探测工程科学目标与发展战略》、《月球探测一期工程月球探

测卫星可行性论证报告》、《月球探测一期工程运载火箭可行性论证报告》、《月球探测一期工程发射场可行性论证报告》、《月球探测一期工程测控系统可行性论证报告》、《月球探测一期工程地面应用系统可行性论证报告》、《国外月球探测发展概况》等附件。

2003年2月28日,国防科工委召开了月球探测工程预发展会议,宣布成立以栾恩杰、孙家栋、欧阳自远为首的领导机构,负责月球探测工程预发展阶段的相关工作。

2003年4月,国防科工委下达了月球探测工程关键技术攻关重大背景型号预研项目,月球探测工程进入工程立项前的攻关阶段。

2003年9月27日,中央专委听取月球探测工程立项工作汇报,同意开展月球探测工程。

2004年1月23日,温家宝总理亲自签发,批准我国月球探测工程一期即“绕月探测工程”立项。

2004年4月,国家航天局正式宣布绕月探测工程立项启动。至此,历时10年的中国月球探测工程一期论证工作圆满结束,工程进入实施阶段。

2.1.2 我国月球探测发展战略 在2020年前,我国实施月球探测工程设想分为三个发展阶段,分别为一、二、三期工程。三个发展阶段循序渐进、分步实施、不断跨越,保持一定的连续性、继承性和前瞻性,构成协调完整的月球探测工程。

第一阶段(一期工程)(2007年前)绕月探测。研制和发射第一个月球探测器——月球探测卫星,主要进行月球科学探测和对有开发利用前景的月球能源与资源的分布与规律进行全球性、整体性与综合性的探测,并对月球表面的环境、地貌、地形、地质构造、月岩与月壤的成分与结构以及物理场进行探测。

第二阶段(二期工程)(2012年前后)月球软着陆和自动巡视勘察。这是第一期工程的跨越式发展。探测对象由“面”向区域性的“点、面、内部”一体化的综合性探测深入与发展。开展月球软着陆探测及月面巡视勘察,探测着陆区的地形地貌、地质构造、月壤厚度、月壳岩石结构与厚度、岩石的化学与矿物成份;探测月表的环境,进行高分辨率摄影和月岩的现场探测或采样分析;进行月基天文观测和空间环境的极紫外等监测;为后续月球探测提供月面环境、地形、月岩的化学与物理性质等数据。为此,月球探测第二期工程将研制和发射带有月球车的软着陆器。

第三阶段(三期工程)(2017年前后)自动采样

返回。将发射自动采样返回器,开展着陆区的地形地貌、地质构造、月壤厚度、月亮岩石结构与厚度、岩石的化学与矿物成分及月表环境的探测;进行高分辨率摄影和月岩的现场探测;对有价值的月壤和月岩进行自动采样,将采集的月壤和月岩样品运返回地球。对月球返回样品进行系统的岩石学、矿物学、同位素地质和地球化学的分析与研究,深化对地月系统(尤其对月球)的起源与演化的认识。实现科学研究和航天技术的跨越。

2.2 工程实施

如前所述,2004年1月23日温家宝总理签署命令,标志着我国的月球探测工程正式立项启动。

2.2.1 嫦娥一号任务 中国的月球探测工程被正式命名为“嫦娥工程”,目前已成功发射两颗“嫦娥”系列卫星——嫦娥一号和嫦娥二号。其中嫦娥一号卫星是我国首个月球探测器,2004年1月立项启动,历经2004立项开局,2005年技术攻坚,2006年工程决战,于2007年10月24日在西昌卫星发射中心成功升空,2007年11月20日搭载的CCD立体相机成功开机探测,并成功传回地球,在轨飞行了494天,完成预定的全部科学探测任务和空间技术试验任务后,于2009年3月1日在地面控制下成功撞击到月球表面的预定区域,为绕月探测工程画上了圆满的句号。

2.2.2 嫦娥二号任务 嫦娥二号卫星原来是嫦娥一号的备份星,经过技术改造作为探月工程二期的技术试验星于2010年10月1日发射,10月24日成功开机探测,并成功获取了月表的影像数据,经过7个多月的在轨运行,完成预定的科学探测任务和技术试验任务后,在地面的控制下于2011年06月09日下午4时50分05秒飞离月球轨道,飞向150万公里外的第2拉格朗日点进行深空探测。成为第一颗直接从月球轨道飞向深空轨道的卫星。

2.2.3 后续任务 目前探月工程二期的嫦娥三号任务已经进入正样研制期,预计在2013年前后发射。探月工程三期工程已完成立项,正在进行方案设计阶段的研制工作。

3 科学成果

据不完全统计,截至到2011年12月涉及嫦娥一号和二号科学探测数据的处理及其相关研究成果发表的科研论文已达到200余篇,出版图集2部,专著两部,研究内容包括绕月探测工程四项科学目标规定的所有领域。本文简要介绍其中具有代表性的研究成果。

3.1 嫦娥二号7米分辨率全月球影像图

2010年10月24日,“嫦娥二号”月球探测器搭载的CCD立体相机首次开机工作,并成功获取月表影像数据。按照“嫦娥二号”任务科学探测计划,到2011年5月20日,先后获取607轨100公里高度和15公里高度的月球影像数据。在此基础上,圆满完成7米分辨率全月球影像图的制作^[1](图1)。



图1 嫦娥二号7米分辨率全月球影像图^[1]

Fig.1 The Chang'e-2 full map of the Moon with 7 meters' resolution^[1]

“嫦娥二号”7米分辨率全月球影像数据,相对配准精度不超过两个像元,影像图的空间分辨率、影像质量、镶嵌精度、数据一致性和完整性等优于国际同类产品。

3.2 全月球数字高程模型和三维月球地形图

利用覆盖全月球的嫦娥一号立体相机三线阵CCD数据,采用三线阵数字摄影测量方法,解算了全月球的地形数据,制作了全月球三维数字地形产品^[2],数据全球平差的平面中误差为192 m,高程中误差为120 m;全月球数字高程模型DEM包含约7500万个有效测点,DEM空间分辨率达500 m,等高线数据的等高距达500 m。全月球数字地形图产品(包括DEM、正射影像和数字等高线图)在数据覆盖范围、平面定位与高程精度、空间分辨率等方面均明显优于国际现有全月球数字地形产品(图2)。

3.3 铀、钍、钾的全月球含量分布图

嫦娥一号卫星上搭载了 γ 射线谱仪、X射线谱仪和干涉成像光谱仪三台科学仪器。而在嫦娥二号卫星上搭载了经过改进的 γ 射线谱仪、X射线谱仪。目前嫦娥二号的 γ 射线谱仪、X射线谱仪数据正在分析和处理过程中,研究成果将陆续公布。

嫦娥一号卫星 γ 射线谱仪共获取了1103轨有效探测数据,累计时间约2120.8 hr。很多学者对于嫦娥一号伽马射线谱仪的探测数据开展了较多的研究工作^[3],从背景扣除,能峰累积以及元素反演等多个方面进行了研究工作,并获得了分辨率在150×150千米量级的U/Th/K等元素含量的全月面

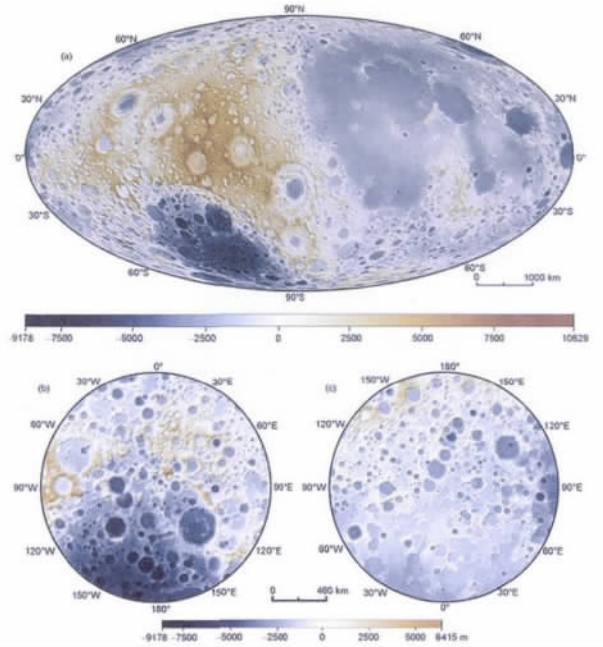


图2 嫦娥一号全月球数字高程模型(DEM)^[3]

Fig. 2 The global Lunar DEM model mapped with CE-1 LAM data^[3].

分布图(图3),为进一步开展月球形成和演化的研究提供了基础资料。

3.4 全月表矿物吸收中心分布图以及 Fe/Ti 元素含量分布的反演

嫦娥一号干涉成像光谱仪共获得了706轨有效探测数据,覆盖了月球南北纬70°以内84%的月表区域(相当于全月球的79%)。成像光谱数据的空间分辨率为200m,光谱范围为480~960nm,共有32个谱段,光谱分辨率为7.6~29nm。目前已经获得月表覆盖范围32个谱段的光谱分布图。嫦娥一号成像光谱数据的谱段,远比Clementine UVVIS光谱仪(5个谱段)多,且光谱分辨率高。围绕嫦娥一号干涉成像光谱仪获得的数据,国内外的学者开展了光度校正、反射率反演、元素反演以及矿物反演等多项研究,如南京大学吴昀昭等获得全月表矿物吸收中心分布图^[4](图4),中科院国家天文台凌宗成等获得了月表FeO、TiO₂等元素局部区域的分布特征^[5,6](见图5、6)。甘福平等获得了全月FeO、TiO₂等元素的分布图^[7](图7)。

3.5 全月球4频段月表微波辐射亮温数据

我国首次利用微波辐射技术,获取月球表面月壤的厚度信息,结合美国“阿波罗”和苏联“月球”返回的月壤样品分析数据,估算月球表面氦-3和其它气体的含量、分布特征及资源量。嫦娥一号卫星和二号卫星上搭载的微波探测仪具有相同的功能和性

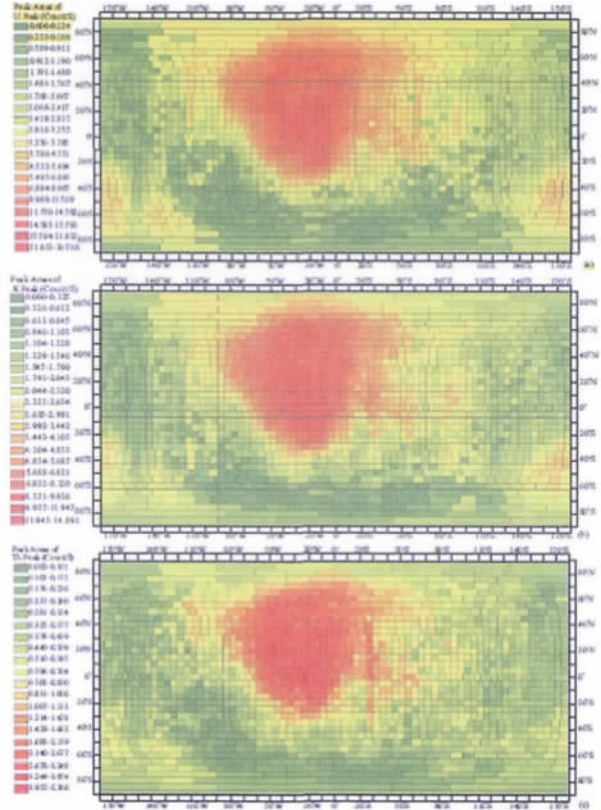


图3 嫦娥一号铀、钍、钾的全月球含量分布图^[3]

Fig. 3 The global distribution of U, Th, K elements with CE-1 GRS data^[3]

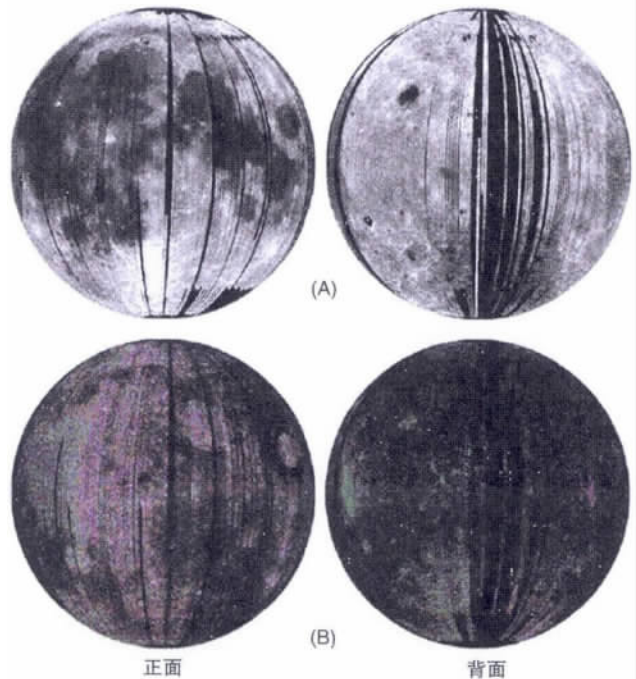
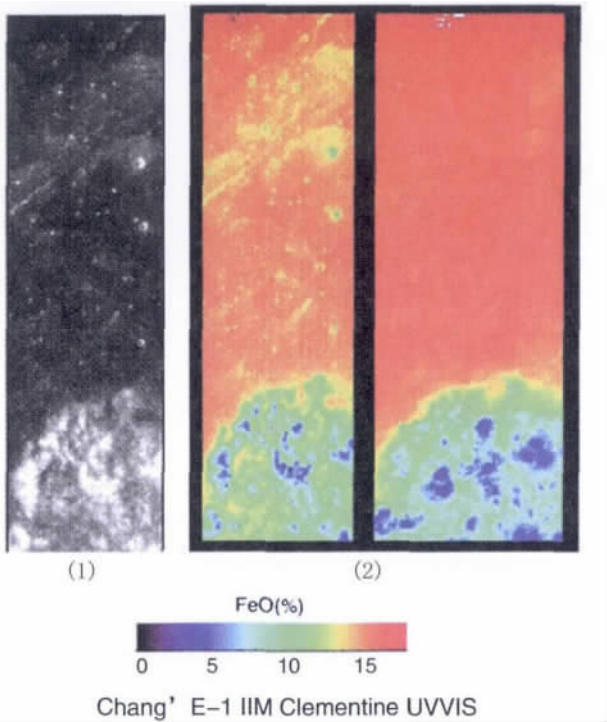


图4 正射投影全月表IIM 865 nm亮度图(a)和对应的铁镁质矿物吸收中心分布图(b)^[4]

Fig. 4 865nm mosaic image (a) and color-coded map of the absorption band center (b) with an Orthographic projection^[4]



Chang'E-1 IIM Clementine UVVIS

图 5 月球危海附近 FeO 含量分布图^[5]

Fig 5 Comparison of the iron abundance map between the Chang'E-1 IIM and the Clementine UV-VIS images^[5]

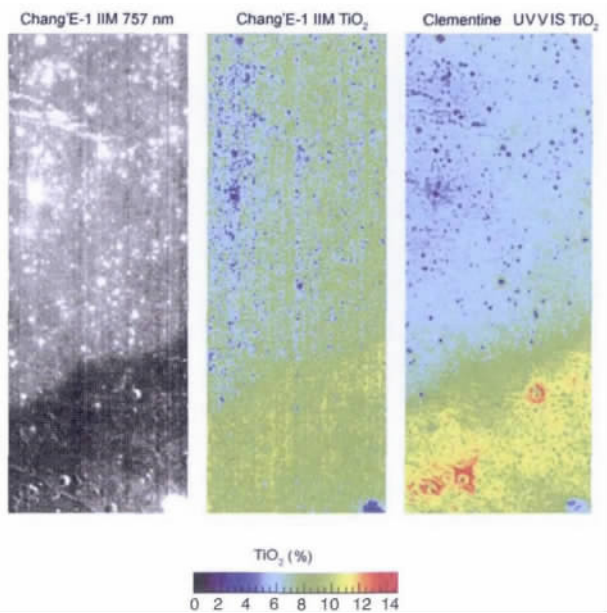


图 6 Apollo 16 附近高地区域的 757 nm 影像和 TiO₂ 含量分布图^[6]

Fig 6 Comparisons of titanium abundance near the MS2 mare region derived from Chang'E-1 IIM and Clementine UVVIS images^[6]

能,不同的是嫦娥一号轨道高度为 200 km,而嫦娥二号的轨道高度是 100 km,两颗卫星可以获得不同高度的探测数据,可以互相对比互相印证。目前嫦

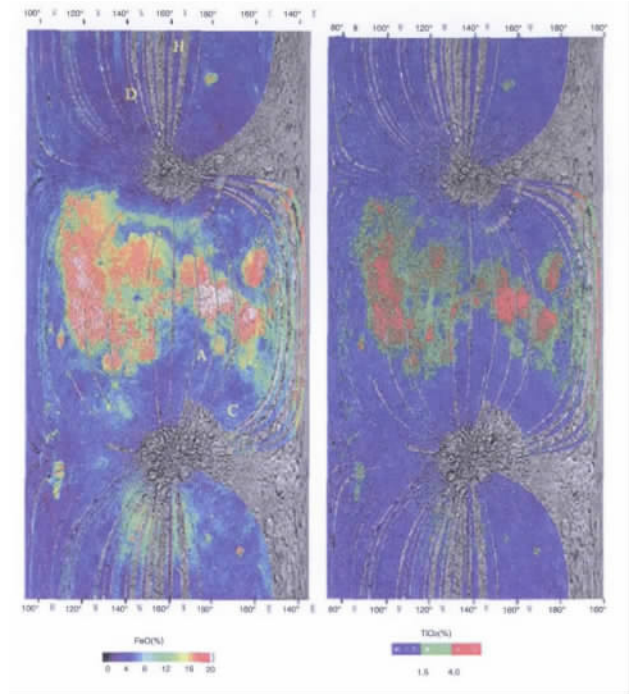


图 7 全月表 FeO(左)和 TiO₂(右)含量分布图^[7]

Fig 7 The distribution of FeO (left) and TiO₂(right) derived from Chang'E-1 IIM data^[7]

娥二号的数据正处于处理和分析的过程中。

而嫦娥一号微波辐射计共获取了 1690 轨探测数据,嫦娥微波数据包括 3.0 GHz、7.8 GHz、19.35 GHz 和 37.0 GHz 四个频率的微波辐射亮温(图 8),是国际上首次采用被动微波遥感技术测量全月球微波辐射信息^[8],进而探测月壤特性,反演月壤厚度。目前已处理得到全月球不同光照条件的微波辐射亮温,在此基础上进一步反演月壤厚度,评估³He 资源。

在月球表面的亮度温度分布中,特别是在 37.0 GHz 的亮度温度图中,可以明显分辨出月球上的月陆、月海和大型撞击坑,说明月球表面的亮度温度分布明显受到月球地形的影响。

在月球亮度温度分布图中,发现亮度温度分布与月球表面的物质分布存在明显的相关性。月海区主要分布的是玄武岩,微波辐射的穿透深度较浅,亮度温度相对较高;高地(月陆)分布的是斜长岩,微波辐射穿透较深,亮度温度相对较低。

3.6 近月空间高能粒子和太阳风离子数据

在嫦娥一号以及二号卫星上都安装一台太阳高能粒子探测器和两台太阳风离子探测器,进行地月以及近月空间环境探测。在卫星在轨运行期间,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等 4 个空间区域。

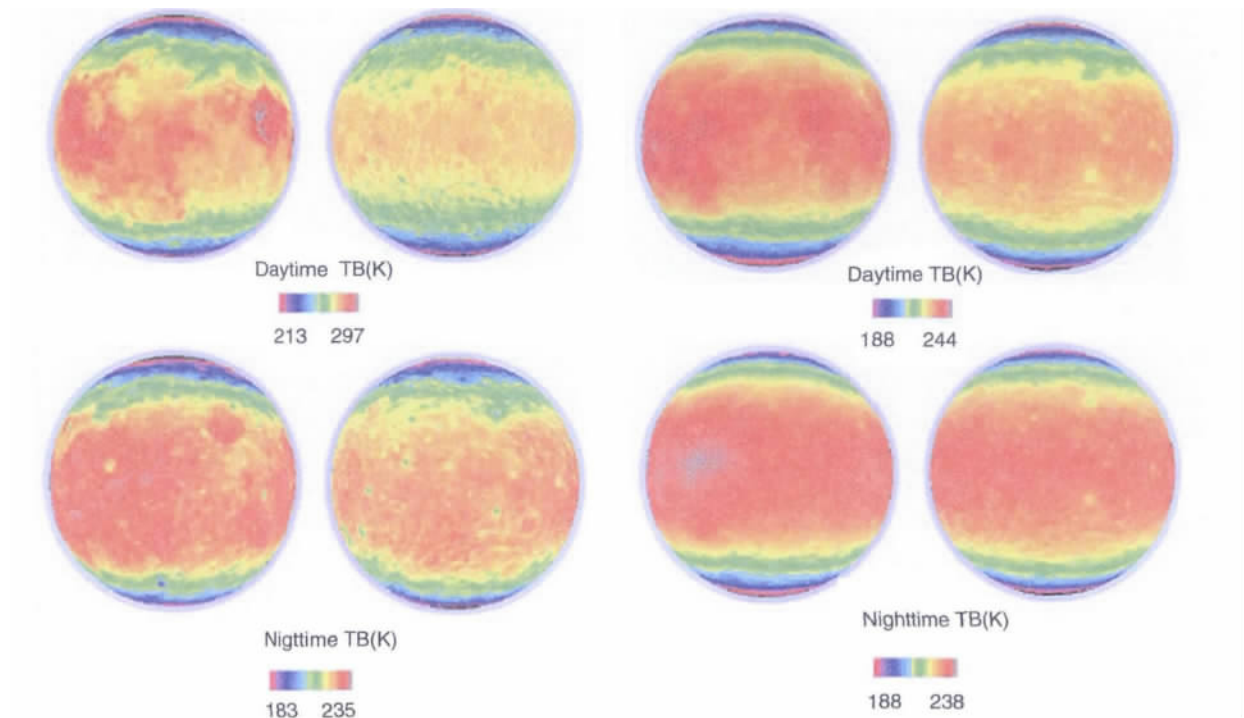


图 8 嫦娥一号卫星微波探测仪数据获得的月球的亮度温度分布图^[8]

Fig 8 TB images of the Moon obtained by Chang'E-1 microwave radiometer^[8]

其中嫦娥一号太阳风离子探测器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(图 9)^[9], 这些事件揭示了太阳风中的等

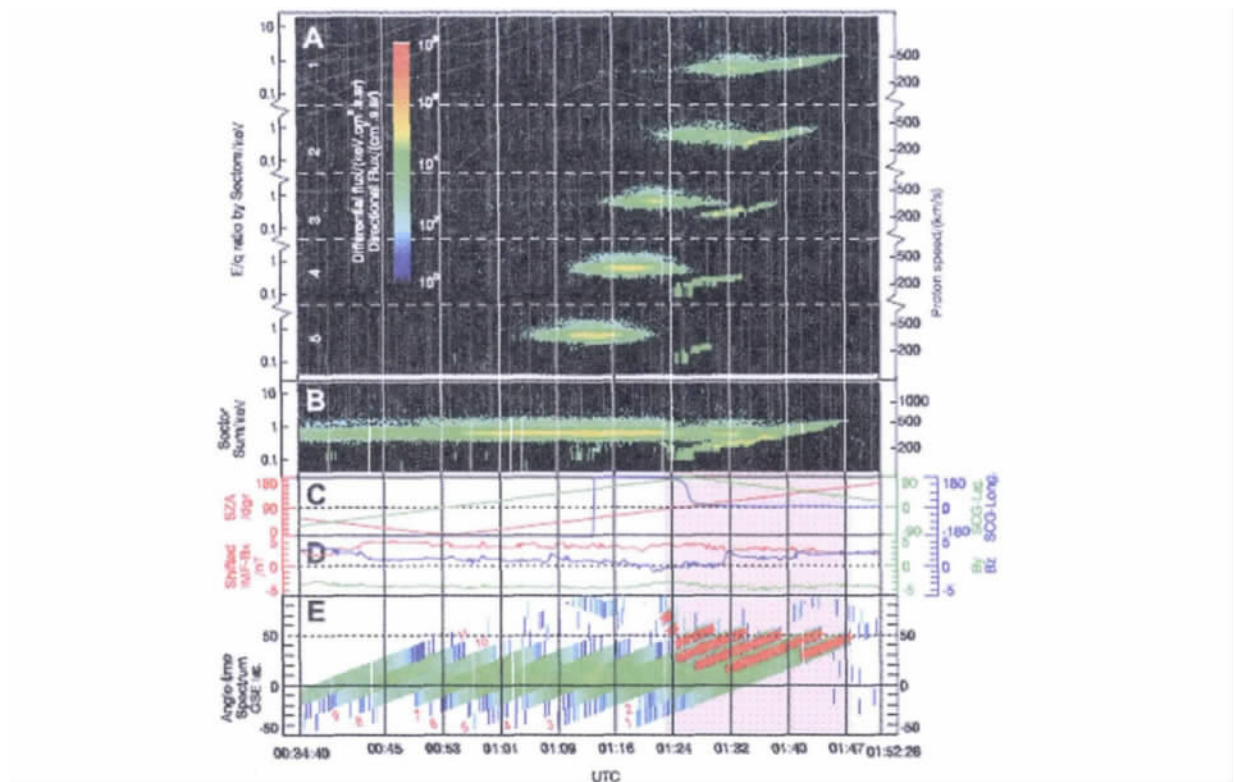


图 9 利用嫦娥一号卫星太阳风离子探测器的科学数据获得的月球两极日夜交界面粒子加速现象^[9]

Fig 9 Accelerated particles observed by solar wind ion detectors (SWIDs) on Chang'E-1 Spacecraft close to terminator regions of the Moon^[9]

离子体物理过程和与月球相互作用过程,将加深对太阳风与无大气弱磁化天体相互作用的认识,对丰富太阳辐射及其与地球磁场和行星(月球)的相互作用具有特殊的意义。利用嫦娥二号卫星太阳风离子探测器的科学数据中质子物理量的变化,证实了月面微磁层的存在^[10],为月球空间环境以及月球演化的研究提供了新的重要的参考(图 10)。

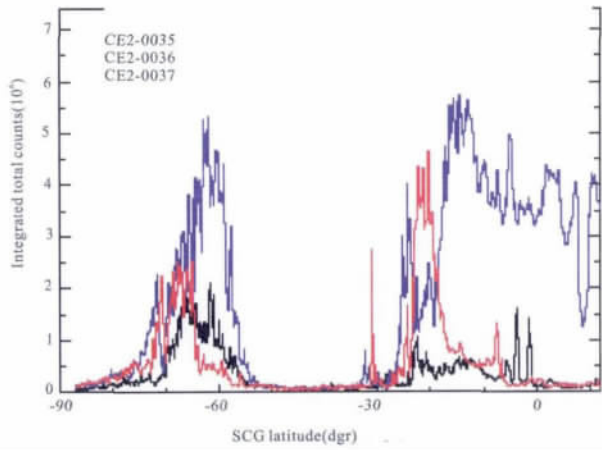


图 10 利用嫦娥二号卫星太阳风离子探测器的科学数据证实了月面微磁层的存在^[10]

Fig 10 The presence of the mini-magnetosphere confirmed by Chang'E-2 SWID's data^[10]

4 未来十年的展望

根据我国月球探测工程的发展战略,到 2020 年我国将完成无人月球探测三步走的宏伟蓝图,即在绕月探测工程成功的基础上,于 2012 年前后实现月球软着陆就位探测和月球车巡视勘察(探月工程二期),于 2017 年前后实现月面样品的采集与返回(探月工程三期)。并开展载人登月的论证工作。

其中探月工程二期的主要任务是“落月”,即把月球探测器发射至月球表面软着陆以精细探测着陆区的形貌、月壤和月岩成分以及月表环境,利用月球的独特环境开展天文观测和对地环境监测。

探月工程三期将实现月面样品的采集与返回,即发射月球采样返回探测器,在月面采集月壤与月岩样品并带回地球,在地面实验室开展精细的测试

与分析。

同时,未来十年结合我国载人航天工程的进展,开展载人登月工程可行性的论证工作,为实现中国人登上月球奠定基础。

参考文献 (References):

- [1] 探月工程科学成果编辑委员会. 嫦娥二号高分辨影像图集 [M]. 北京,地图出版社,2011.
- [2] Li C L, Ren X, Liu J J, et al. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model[J]. Sci. China Earth Sci., 2010, 53: 1582 - 1593, doi: 10.1007/s11430-010-4020-1.
- [3] Zou Yongliao, Zhang Liyan, Liu Jianzhong. Data analysis of the Chang'E-1 gamma-rayspectrometer and global distribution of U Th and K, Acta [J]. Geologica Sinica, 2011, 85(6): 1299-1309.
- [4] 吴昀昭, 郑永春, 邹永廖. 嫦娥一号 IIM 数据处理分析与应用之一: 全月表矿物吸收中心分布图[J]. 中国科学(物理学力学天文学), 2010, 40: 1343-1362.
- [5] Ling Z C, Zhang J, Liu J Z, Zhang W X, Bian W, Ren X, Mu L L, Liu J J, Li C L. Preliminary results of FeO mapping using Imaging Interferometer data from Chang'E-1 [J]. Chinese Sci. Bull., 2011, 56:376-379.
- [6] Ling Z C, Zhang J, Liu J Z, Zhang W X, Zhang G L, Liu B, Ren X, Mu L L, Liu J J, Li C L. Preliminary results of TiO₂ mapping using imaging interferometer data from Chang'E-1 [J]. Chinese Sci. Bull., 2011, 56:2082-2087.
- [7] Wu Y Z, Gan F P, Yan B K, Tang Z S. Global distribution of FeO and TiO₂ as derived from Chang'E-1 IIM data 42nd [A]. Lunar and Planetary Science Conference, 2011: 1223.
- [8] Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y. Dielectric properties of lunar material and its microwave penetration depth [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2005, 69(10): 805.
- [9] Wang X D, Bian W, Wang J S, Liu J J, Zou Y L, Zhang H B, Lv C, Liu J Z, Zuo W, Su Y, Wen W B, Wang M, Ouyang Z Y, Li C L. Acceleration of scattered solar wind protons at the polar terminator of the Moon: Results from Chang'E-1/SWIDs [J]. Geophys. Res. Lett., 37, L07203, doi:10.1029/2010GL042891.
- [10] Wang X Q, Cui J, Wang X D. The solar wind interactions with lunar magnetic anomalies: A case study of the Chang'E-2 plasma data near the Serenitatis antipode [J]. Advances in Space Research, 2012; 50 (12): 1600.