

doi:10.3969/j.issn.0253-9608.2010.05.001

嫦娥一号的初步科学成果

欧阳自远^① 李春来^② 邹永廖^③ 刘建忠^④ 刘建军^⑤

①中国科学院院士,中国科学院国家天文台,北京 100012;中国科学院地球化学研究所,贵阳 550002;②③④⑤研究员,中国科学院国家天文台,北京 100012

关键词 绕月探测工程 嫦娥一号卫星 月球探测数据 科学成果

嫦娥一号卫星是中国发射的第一个月球轨道探测器,是中国月球探测工程“绕”、“落”、“回”发展战略的第一步。嫦娥一号卫星于2007年10月24日在西昌卫星发射中心成功发射,2009年3月1日受控落于东经52.36度、南纬1.50度的丰富海区域,在轨运行495天,比预期一年的工作寿命延长4个多月,一共取得了1.37TB的原始科学探测数据。通过对这些科学探测数据的初步分析和应用研究,已经获得了包括“中国首次月球探测工程全月球影像图”等在内的一系列科学成果,为推动中国月球科学和天体化学的研究和后续月球探测工程的开展奠定了重要基础。

1 引言

月球是人类飞出自己的“摇篮”——地球开展深空探测的首选目标,也是人类向太阳系空间开展探测的理想基地和前哨站。月球具有的丰富的矿产资源、能源资源和特殊的空间环境条件,已经展现出广阔的开发利用前景,并将推动新技术的进步,特别是航天技术、信息技术和光电技术等高新技术的发展,从而对人类社会的可持续性发展作出重要贡献^[1-2]。

21世纪伊始,月球探测进入了又一个活跃期,已经发射的探月卫星包括欧空局的SMART-1,日本的Kaguya(辉夜姬),中国的“嫦娥一号”,印度的Chandrayaan-1(月船1号)和美国的LRO(月球勘测轨道器)等。这些月球探测工程在探测月表形貌^[3-4]、内部结构^[5-6]、物质成分^[7-11]、月球空间环境^[12],以及月表水的探测^[13-15]均取得了新的进展,对月球科学研究影响深远。

2004年1月中国月球探测一期工程即“绕月探测工程”批准立项。原国防科工委、总装备部、中国科学院和航天科技集团全面部署,开展各项准备工作。绕月探测工程构建起运载火箭系统、卫星系统、测控系统、发射场系统和地面应用系统五大系统。这一年成为绕月探测工程的启动年。

2005年是绕月探测工程的攻坚年,完成初样阶段的研制和建设,通过各项试验、技术攻关和系统集成,解决了大量关键技术问题,协调确定系统间的技术接

口,明确正样阶段的技术状态和工作计划,转入正样研制阶段。

2006年是绕月探测工程的决战年,完成了全部正样产品的研制任务。绕月探测工程全面开展质量清查、全系统质量复核复算以确保可靠性增长。

2007年是绕月探测工程的决胜年,北京时间2007年10月24日18时05分04秒,嫦娥一号卫星在西昌卫星发射中心成功发射升空。

嫦娥一号卫星从发射升空到准确进入环月工作轨道,一共经历了主动段、调相轨道段、地月转移轨道段和环月轨道段等四种不同的轨道。历时13天14小时19分,行程约209万km。

2007年11月20日16时49分,嫦娥一号卫星上的CCD立体相机开机。中国科学院国家天文台的北京密云地面站和云南昆明地面站同时接收到来自嫦娥一号卫星上的科学探测数据。

2009年3月1日,嫦娥一号卫星受控撞击月球的东经52.36°、南纬1.50°的丰富海区域,比预期1年的工作寿命延长4个多月,圆满完成各项科学探测使命。

嫦娥一号卫星在轨运行495天,搭载的8台(套)科学仪器工作正常,一共取得1.37TB的原始科学探测数据,地面应用系统研制的0,1,2,3级科学数据产品约4TB,并已陆续发布给全国相关的高等院校和研究院所的科学家开展探测数据的应用研究。2010年5月,嫦娥一号所获得的全部科学探测数据,在绕月探测工程地面应用系统的网站上对外公布,供全世界的科技工作者研究使用。

2 嫦娥一号卫星的科学目标与有效载荷配置

绕月探测工程的主要任务是对月球开展全球性、整体性和综合性的探测。经过近 10 年的论证,绕月探测工程遴选了四项科学目标^[16]:

(1) 获取月球表面三维立体影像。划分月球地形和地貌单元;统计撞击坑大小与密度,计算月球表面年龄,恢复月球早期演化历史;分析月面构造,编制月面断裂和环形构造影像和月球构造区划图,研究月球地质构造的演化历史。

(2) 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。

(3) 探测月壤特性。测量全月球不同波段的微波辐射亮度温度,反演月壤厚度的信息,评估月壤中氦-3 的资源量与分布。

(4) 探测地月空间环境。探测地月空间高能粒子和太阳风离子的成分、通量、能谱及其随时空的变化特征,研究太阳活动和地球磁场对近月空间环境的影响。

为实现绕月探测工程规定的四项科学目标,嫦娥一号卫星共搭载 8 台(套)科学仪器。其中, CCD 立体相机和激光高度计联合实现获取月球表面三维立体影像;干涉成像光谱仪、 γ 射线谱仪、X 射线谱仪联合实现分析月球表面元素含量和物质类型的分布特点;微波探测仪获取月球微波亮度温度数据,探测月壤特性;1 台高能粒子探测器和 2 台太阳风离子探测器联合探测地月空间环境^[16]。

四个科学目标中以全月数字地图和三维立体影像图的获取为重点目标,结合反演月壤厚度的信息、物质

成分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。

3 嫦娥一号的初步科学成果

2007 年 11 月 20 日 16 时 49 分整, CCD 相机开机工作,标志着嫦娥一号卫星科学探测正式开始。11 月 26 日,温家宝总理亲自发布“中国首次月球探测工程第一幅月面图像”;11 月 27 日,激光高度计等其他 7 台科学仪器也相继开机工作,开始全面获取科学探测数据。利用嫦娥一号卫星获得的科学探测数据,目前已经获得如下初步科学研究成果。

3.1 全月球影像图和月球标准基础地图

对全月球进行三维立体成像,可以获得最真实、大量的月球表面信息,成为月球地质和地貌单元划分的最原始资料。由于月球自形成以来一直受到小天体的频繁撞击、太阳风和宇宙射线的轰击、长期昼夜温差的剧烈变化,表面覆盖了一层 5~20 m 厚的尘土与角砾,基岩外露较少^[17],因此月球构造岩浆活动和演化的许多信息不得不从月球的地形地貌中提取,这就赋予了月球地形地貌研究的重要意义^[1]。

2008 年 7 月,嫦娥一号卫星 CCD 立体相机共获得 508 轨南北纬 70° 以内和 589 轨南北纬 70~90° 极区的全月球影像数据,第一次实现了月球表面的 100% 覆盖。并于 2008 年 11 月 12 日公开发布主要利用正视影像拼接而成的“全月球影像图”,其在几何配准精度、数据的完整性与一致性、图像色调等方面均明显优于国际上已有的各类全月球影像图,是当前国际上数据覆盖最全、质量最好的全月球影像图。

(嫦娥一号月球基础影像图)

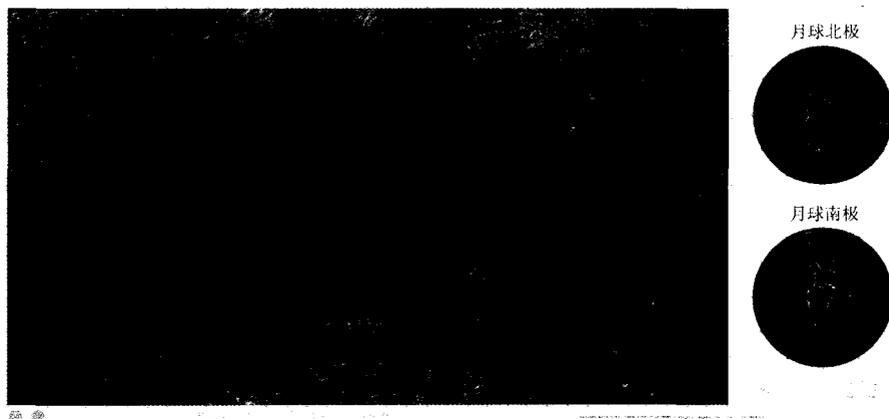


图 1 中国首次月球探测工程全月球正视影像图

利用嫦娥工程多种数据源解算得到全月球地形数据,对全月球图像数据进行了正射校正,修正了图像的几何变形、空间位置和像元灰度,获得了“全月球正射影像图”(见图1)。这是迄今为止国际上变形程度最低、位置精度最高、图像色调最一致和空间覆盖最完整的全月球影像图,将成为新的月球“标准像”——月球基础地图(Lunar base map)。

3.2 全月球数字高程模型(DEM)和三维月球地形图

嫦娥一号卫星激光高度计共获得了约916万个月表测高数据,是目前国际上最多的测高采样数据。全部采用激光测高数据制作了空间分辨率为3 km左右的全月球数字高程模型(DEM),图2和图3分别列出了北极地区、南极地区、月球正面、月球背面等4个区域的DEM图。嫦娥一号的DEM图在精度和分辨率上明显优于美国ULCN2005,与日本SELENE激光高度计DEM模型相当。

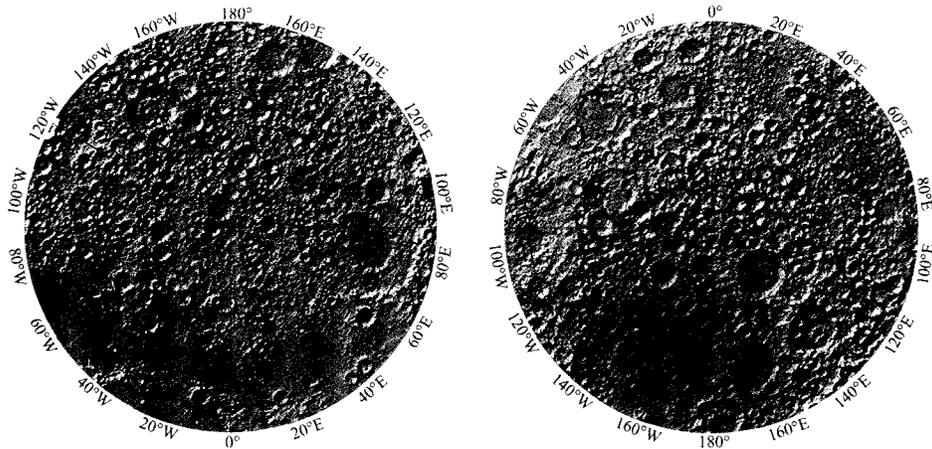


图2 根据激光高度计探测数据制作的全月球DEM图(左:月球北纬45~90°;右:月球南纬45~90°)

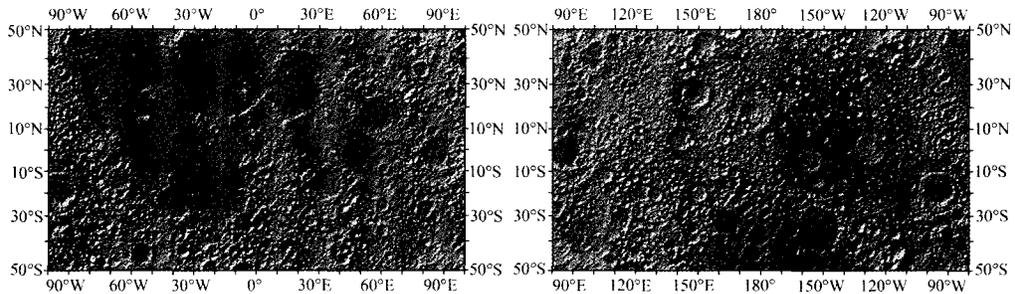


图3 根据激光高度计探测数据制作的全月球DEM图(左:月球正面;右:月球背面)

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,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DEM包含约7 500万个有效测点,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(包括数字高程模型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。

3.3 建立月球影像数据和激光高度计数据的处理方法

围绕获取月表三维影像图,地面应用系统有针对性

地开展了一系列的科学实验,主要集中在CCD立体相机图像数据处理与全月球平面图像数据拼接关键技术方法,月表三维影像制作关键技术方法^[20],激光高度计测距数据处理方法^[21],激光高度计高程数据处理方法,激光高度计伪彩色月球渲染地形图(DEM)制作方法,CCD立体相机图像数据与激光高度计测距数据联合处理方法等。研制了CCD立体相机图像处理软件、激光高度计数据处理软件、月表三维影像演示成果摄影测量数据处理软件、月表三维影像标准产品生产软件等软件产品。

3.4 铀、钍、钾的全月球含量分布图

中国首次月球探测在月球化学元素和物质成分方

面的探测重点放在某些关键性元素和岩石类型和分布上,获取月球表面某些元素的分布图。在嫦娥一号卫星上搭载了 γ 射线谱仪、X射线谱仪和国际月球探测方案中尚未使用过的干涉成像光谱仪三台科学仪器。

嫦娥一号卫星伽马射线谱仪共获取了1 103轨有效探测数据,累计时间约2 120.8 h。地面应用系统对伽马射线数据进行了处理,当前已完成U, Th, K的元素含量分布图的编制(图4,见封二);X射线谱仪共获取了1 761 h的有效探测数据。可以进行Mg, Si, Al元素含量与分布反演,目前已经完成了Mg, Al元素的局部含量和分布图的编制。

3.5 月球多光谱图像

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200 m,光谱范围为480~960 nm,共有32个谱段,光谱分辨率为7.6~29 nm。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。

根据Lucey等^[22]利用不同波段光谱反射率及其比值开展FeO, TiO₂元素的反演方法,对于FeO含量,可以采用946 nm和757 nm波段反射率计算;对于TiO₂,可以采用488 nm和757 nm波段反射率计算(图5,见封二)。

3.6 全月球4频段月表微波辐射亮度温度数据

利用微波辐射技术,获取月球表面月壤的厚度信息,从而得到月球表面年龄及其分布特征,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和其他气体的含量、分布特征及资源量^[23-26]。这也是国际上第一次进行全月球的月壤厚度探测^[27-28]。

嫦娥一号微波辐射计共获取了1 690轨探测数据,数据累积时间约2 642 h,数据多次覆盖了全月球表面。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,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,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,评估氦-3资源。

在月球表面的亮度温度分布中,特别是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(图6,见封三)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。通过亮度温度图和月球反射光谱图的比对,可以清晰地看出,亮度温度图中赤道附近暗黑色的斑块是月球正面的广阔的月海区。这是由于月海主要分布的是玄武岩,玄武岩一般是由铁、钛含量较高的钛铁矿和含铁、镁质的硅酸盐矿物组成,介电损耗较高,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,斜长岩是由富含铝、钙的硅酸盐矿物组成,介电损耗较低,微波辐射穿透较深,主要反映月球表层至一定深度的信息,因此亮度温度相对较低。说明月球的亮度温度分布和物质组成存在明显的相关性。

3.7 近月空间高能粒子和太阳风离子数据

在嫦娥一号月球探测卫星上安装一台太阳高能粒子探测器和两台太阳风离子探测器,进行月球轨道空间环境探测。嫦娥一号在轨运行期间,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四个空间区域。上述3台科学仪器于2007年11月26日开始开机探测,其中高能粒子探测器共获取了1 846轨有效探测数据,累积时间为2 868.5 h;太阳风离子探测器获取了1 815轨有效探测数据,累积时间为2 852.3 h,其中约60%的轨数处于太阳风中。

对嫦娥一号卫星空间环境探测数据的初步分析和对比研究,发现它们与地球磁场和月表带电粒子之间相互作用过程中的一些独特物理现象,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0.1 MeV档时有计数(图7,见封三)。

图8所示的三部分空间区域的太阳风等离子体具有鲜明的不同特点。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,呈现非热平衡分布。

嫦娥一号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和与月球相互作用过程,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,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。进一步深入的分析与对比研究,有望获得更多的科学发现。

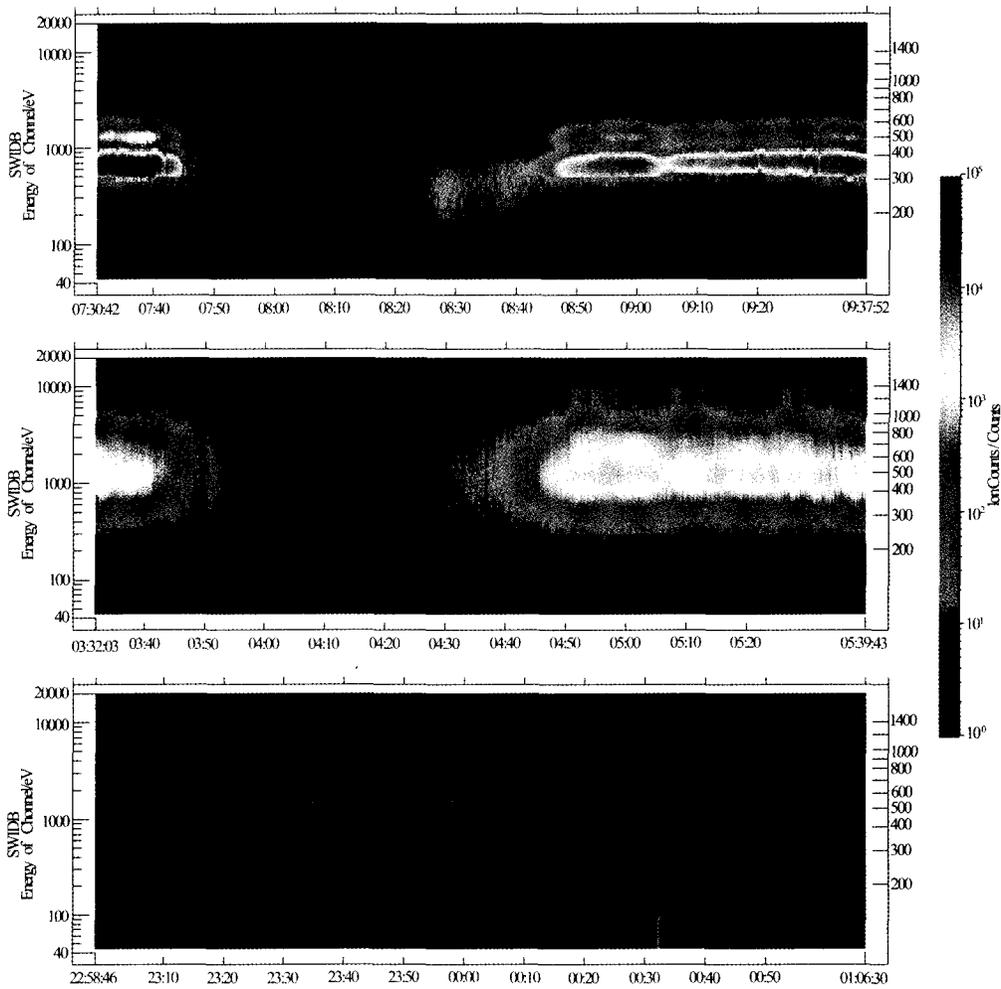


图8 嫦娥一号卫星探测到的不同空间区域低能离子能谱

上图:在行星际空间中的低能离子能谱(数据来源于第600轨);中图:在地球磁鞘中的低能离子能谱(数据来源于第236轨);下图:在地球磁尾中的低能离子能谱(数据来源于第539轨);上图和中图中的计数率极低区为嫦娥一号卫星飞越月球背面屏蔽区的探测数据

4 结果与讨论

中国首次月球探测工程的成功实施,突破了一批具有自主知识产权的核心技术和关键技术,取得多项重大科技创新成果。在数据处理与反演技术上取得了一批具有自主知识产权的技术,如 CCD 立体相机图像处理与全球平面图像数据拼接关键技术方法研究、月表三维影像制作关键技术方法、激光高度计测距数据处理方法、CCD 立体相机图像数据与激光高度计数据联合处理方法、以及高背景微弱信号的提取方法等。

截止到 2008 年 7 月已经获得了包括南北纬 90° 在内的全月球的影像数据,并于 2008 年 11 月 12 日公开发

布主要利用正视影像拼接而成的全月球影像图;激光高度计也已经获得 916 万个有效高程数据,可绘制精确的全月数字高程图。已经完成为比例尺 1 : 250 万、等高距小于 500 m、覆盖 N90°~S90°月球数字地形图,是目前国际上数据覆盖最全、质量最好的全月球数字地图。

作为国际上首次开展的利用微波探测仪开展月壤特征、反演月壤厚度的探测也获得了成功,获得多次覆盖的四波段全月球亮度温度数据,形成了自己的特色。

高能粒子探测器和太阳风离子探测器在环月期间获得大量有意义的的数据。通过数据的分析,可以知晓嫦娥一号探测卫星所经历的空间区域、事件以及影响飞行器工作的空间环境因素,充分实现了对近月空间环境监测的科学目标。

关于月球物质成分的探测,已完成 U, Th, K 等元素

的全球含量分布图的研制,正在进行 Mg, Al, Fe, Ti 等元素含量与分布区域性分布的反演,将进一步圈定月面 KREEP 岩、月海玄武岩和高地斜长岩的类型。

总之,绕月探测工程是中国迈向深空的第一步,通过嫦娥一号卫星为期一年的在轨业务运行,获得了大量的探测数据,在月球基础科学和深空数据处理和反演方法等各个方面都取得了丰硕的成果,这些成果将陆续发表。

月球探测工程是中国首次开展对地球以外天体的直接探测,我们将组织全国各有关方面的科技力量,深入开展月球科学研究,最大限度地发挥首次月球探测工程的科学效益,为中国月球及深空探测和科学研究作出新的更大贡献。

致谢 绕月探测工程是运载火箭系统、卫星系统、测控系统、发射场系统和地面应用系统团结协作的结晶。作者特别感谢国防科工委、总装备部、航天科技集团公司、中国科学院国家天文台、空间中心、西安光机所、紫金山天文台、高能物理所、上海技物所等单位参与探月工程的全体科技人员,因为他们的共同努力,才使月球的科学探测得以成功。在科学数据接收、处理和应用研究方面,我们得到了国内相关高校和科研院所的大力支持,本文的成果是我们合作研究的结果。限于篇幅,不能列出所有对本文有贡献的人员名单,在此向他们表示诚挚谢意。

(2010年9月29日收到)

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 362.
- [2] HEIKEN G H, VANIMAN D T, FREND B M. Lunar sourcebook—a user's guide to the moon[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 735.
- [3] ARAKI H, TAZAWA S, NODA H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry[J]. Science, 2009, 323(5916): 897-900.
- [4] HARUYAMA J, OHTAKE M, MATSUNAGA T, et al. Long-lived volcanism on the lunar farside revealed by SELENE Terrain Camera[J]. Science, 2009, 323(5916): 905-908.
- [5] ONO T, KUMAMOTO A, NAKAGAWA H, et al. Lunar radar sounder observations of subsurface layers under the nearside Maria of the Moon[J]. Science, 2009, 323(5916): 909-912.
- [6] NAMIKI N, IWATA T, MATSUMOTO K, et al. Farside gravity field of the Moon from four-way Doppler measurements of SELENE (Kaguya) [J]. Science, 2009, 323(5916): 900-905.
- [7] OHTAKE M, MATSUNAGA T, HARUYAMA J, et al. The global distribution of pure anorthosite on the Moon[J]. Nature, 2009, 461: 236-240.
- [8] OGAWA K, OKADA T, SHIRA K, et al. Numerical estimation of lunar X-ray emission for X-ray spectrometer onboard SELENE[J]. Earth Planets Space, 2008, 60(4): 283-292.
- [9] ALHA L, HUOVELIN J, NYGARD K, et al. Ground calibration of the Chandrayaan-1 X-ray Solar Monitor (XSM) [J]. Nucl Instrum Methods, 2009, 607(3): 544-553.
- [10] GRANDE M, MADDISON B J, HOWE C J, et al. The C1XS X-ray spectrometer on Chandrayaan-1[J]. Planet Space Sci, 2009, 57(7): 717-724.
- [11] CRAWFORD I A, JOY K H, KELLETT B J, et al. The scientific rationale for the C1XS X-ray spectrometer on India's Chandrayaan-1 mission to the Moon[J]. Planet Space Sci, 2009, 57(7): 725-734.
- [12] NISHINO M N, MAEZAWA K, FUJIMOTO M, et al. Pair-wise energy gain-loss feature of solar wind protons in the near-Moon wake[J]. Geophys Res Lett, 2009, 36, L12108, doi: 10.1029/2009GL039049.
- [13] HARUYAMA J, OHTAKE M, MATSUNAGA T, et al. Lack of exposed ice inside lunar south pole Shackleton crater [J]. Science, 2008, 322(5903): 938-939.
- [14] SUNSHINE J M, FARNHAM T L, FEAGA L M, et al. Temporal and spatial variability of lunar hydration as observed by the deep impact spacecraft[J]. Science, 2009, 326(5952): 565-568.
- [15] PIETERS C M, GOSWAMI J N, CLARK R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H₂O on the surface of the Moon seen by M3 on Chandrayaan-1[J]. Science, 2009, 326(5952): 568-572.
- [16] OUYANG Z Y, JIANG J S, LI C L, et al. Preliminary scientific results of Chang'E-1 lunar orbiter[J]. Chin J Space Sci, 2008, 28(5): 9-17.
- [17] 中国科学院地球化学研究所. 月质学研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [18] LIU J J, REN X, MU L L, et al. Automatic DEM generation from CE-1's CCD stereo camera images[C]//40th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas, March 23-27, 2009: 2570.
- [19] LI C L, LIU J J, MU L L, et al. A new global image of the moon by Chinese Chang'E Probe[C]//40th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas, March 23-27, 2009: 2568.
- [20] 李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(3): 294-306.
- [21] 王文睿, 李斐, 刘建军, 等. 基于嫦娥一号激光测高数据的月球三轴椭球体模型[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(8): 1022-1030.
- [22] LUCEY P G, BLEWETT D T, JOLLIFF B L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images[J]. J Geophys Res, 2000, 105(E8): 20297-20305.
- [23] 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): A805.
- [24] 金亚秋, 法文哲, 徐丰. 月球表面微波被动遥感的建模拟拟与反演[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(02): 129-134.
- [25] 李雄耀, 王世杰, 陈丰, 等. 月壤厚度的研究方法进展[J]. 矿物学报, 2007, 27(01): 64-68.
- [26] 法文哲, 金亚秋. 三层月壤模型的多通道微波辐射模拟与月壤厚度的反演[J]. 空间科学学报, 2007, 27(01): 55-65.
- [27] 法文哲, 金亚秋. 月球表面多通道辐射亮度温度的模拟与月壤厚度的反演[J]. 自然科学进展, 2006, 16(1): 86-94.
- [28] 姜景山, 王振占, 李芸. 嫦娥一号卫星微波探月技术机理和应用研究[J]. 中国工程科学, 2008, 10(06): 16-22.

- [51] 贺金生,陈伟烈. 陆地植物群落物种多样性的梯度变化特征[J]. 生态学报, 1997, 17(1): 91-99.
- [52] COLWELL R K, HURTT G C. Nonbiological gradients in species richness and a spurious Rapoport effect[J]. *American Naturalist*, 1994, 144(4): 570-595.
- [53] COLWELL R K, LEES D C. The mid-domain effect: geometric constraints on the geography of species richness[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15(2): 70-76.
- [54] COLWELL R K, RAHBK C, GOTELLI N J. The mid-domain effect and species richness patterns: what have we learned so far? [J]. *American Naturalist*, 2004, 163(3): E1-E23.
- [55] CURRIE D J, KERR J T. Tests of the mid-domain hypothesis: a review of the evidence[J]. *Ecological Monographs*, 2008, 78(1): 3-18.
- [56] HUTCHINSON G E. Homage to Santa-Rosalia or why are there so many kinds of animals[J]. *American Naturalist*, 1959, 93(870): 145-159.
- [57] CLARK J S. Beyond neutral science[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2009, 24(1): 8-15.
- [58] GRAVEL D, CANHAM C D, BEAUDET M, et al. Reconciling niche and neutrality: the continuum hypothesis[J]. *Ecology Letters*, 2006, 9(4): 399-409.
- [59] TILMAN D. Niche tradeoffs, neutrality, and community structure: a stochastic theory of resource competition, invasion, and community assembly[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 10854-10861.
- [60] ADLER P B, HILLERISLAMBERS J, LEVINE J M. A niche for neutrality[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(2): 95-104.
- [61] HERAULT B. Reconciling niche and neutrality through the Emergent Group approach[J]. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 2007, 9(2): 71-78.
- [62] HARRISON S, CORNELL H. Toward a better understanding of the regional causes of local community richness[J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(9): 969-979.
- [63] PIMM S L, RUSSELL G J, GITTELMAN J L, et al. The future of biodiversity[J]. *Science*, 1995, 269(5222): 347-350.
- [64] TANSLEY A G. The use and abuse of vegetational concepts and terms[J]. *Ecology*, 1935, 16: 284-307.
- [65] MACARTHUR R H, WILSON E O. The theory of island biogeography[M]. Princeton: Princeton University Press, 1967.
- [66] VOLKOV I, BANAVAR J R, HUBBELL S P, et al. Neutral theory and relative species abundance in ecology[J]. *Nature*, 2003, 424(6952): 1035-1037.
- [67] ETIENNE R S. A new sampling formula for neutral biodiversity[J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(3): 253-260.
- [68] CHAVE J, LEIGH E G. A spatially explicit neutral model of beta-diversity in tropical forests[J]. *Theoretical Population Biology*, 2002, 62(2): 153-168.
- [69] ZILLIO T, CONDIT R. The impact of neutrality, niche differentiation and species input on diversity and abundance distributions[J]. *Oikos*, 2007, 116(6): 931-940.
- [70] ZHOU S R, ZHANG D Y. A nearly neutral model of biodiversity[J]. *Ecology*, 2008, 89(1): 248-258.

Exploring Mechanisms of Biodiversity Patterns

LIU Yi-ning^①, QIAO Xiu-juan^②, TANG Zhi-yao^③

①② *Ph. D. candidate*, ③ *Associate Professor*, Department of Ecology, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract Decrease of species richness with either latitude or altitude is the most widely observed pattern in biogeography and ecology. In the last two hundred years, many hypotheses have been proposed to explain this pattern. In our paper, we summarized these hypotheses into three categories: contemporary climate, geological history, and random processes. Although most ecologists have their own preferences when explaining the geographic patterns of biodiversity, they agree that no single mechanism can explain all the patterns at different scales in different areas. Different processes function together to regular the distribution of biodiversity, therefore many hypotheses reconciled in explaining biodiversity patterns.

Key words biodiversity, biogeography, pattern, contemporary climate, geological history, random process

(责任编辑:方守狮)

(上接第 254 页)

The Primary Science Results from the Chang'e-1 Probe

OU-YANG Zi-yuan^①, LI Chun-lai^②, ZOU Yong-liao^③, LIU Jian-zhong^④, LIU Jian-jun^⑤

① *CAS Member*, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100012, China; Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China; ②③④⑤ *Professor*, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100012, China

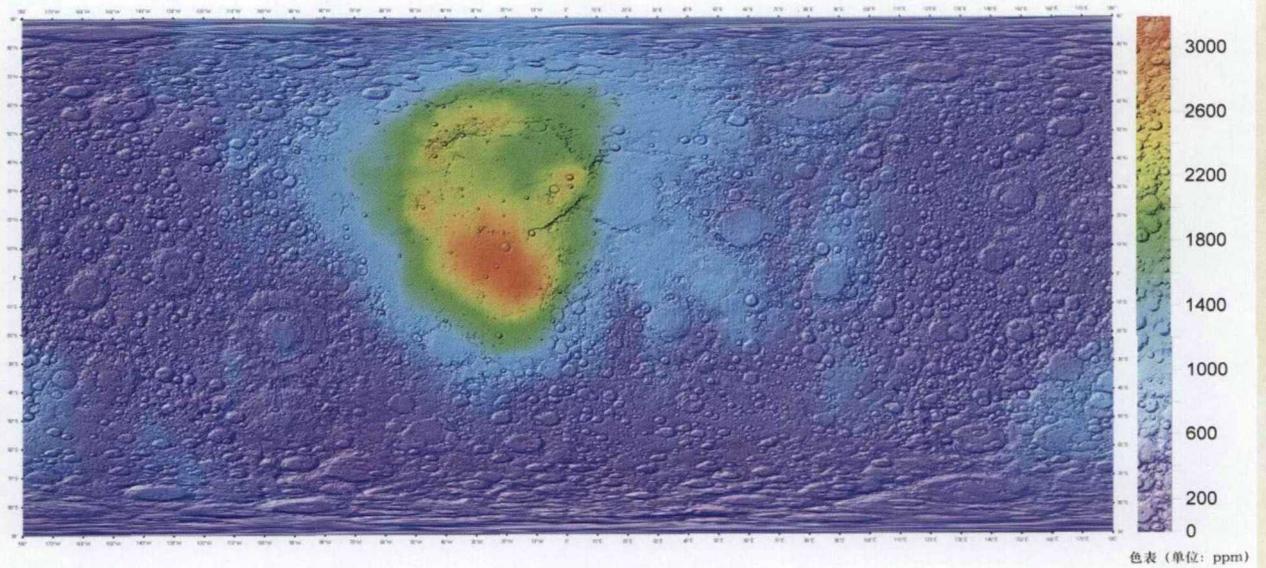
Abstract The Chang'e-1 orbiter is the first lunar probe of China. The lunar orbiting project is the first step of the "orbiting", "landing" and "returning" strategy of lunar exploration of China. The Chang'e-1 was successfully launched on Oct. 24th, 2007 at Xichang

Satellite Launch Center and was guided to crash the Moon on Mar. 1st, 2009, at 52.36E, 1.50S, in the north of Mare Fecunditatis. The total mission length is 495 days, exceeding the designed lifespan by about 4 months. The total amount of raw data is about 1.37TB, and 4TB of scientific data have been produced. By the analysis and application of these data, a series of science results have been achieved, especially "the global image of the Moon by the first lunar mission of China", the Chang'e-1 has made out its four scientific objectives, and provides foundations for the promotion of the lunar sciences and cosmochemistry in China and succeeding lunar exploration missions.

Key words lunar orbiting project, Chang'e-1, lunar exploration data, science results

(责任编辑:方守狮)

中国首次月球探测工程钾元素含量分布图

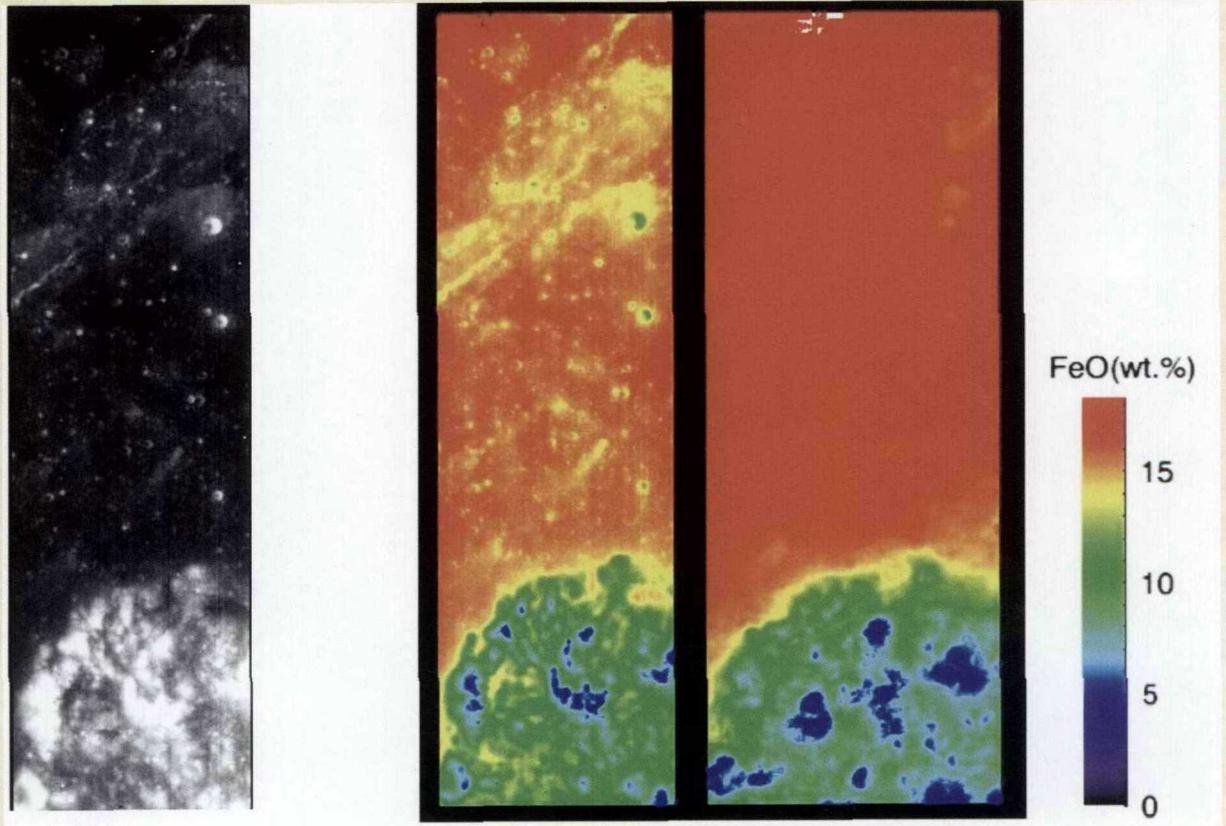


利用嫦娥一号伽马射线谱仪在200km卫星高度时获取的2105小时有效探测数据,按照赤道区域 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ ($150 \times 150\text{km}$)进行等面积网格划分,并融合DEM数据后,制作的全月钾元素含量分布图。

图4 K元素的全月含量分布

Chang'E-1 IIM

Clementine UVVIS



(1)

(2)

图5 利用嫦娥一号卫星干涉成像光谱仪科学数据获得的月球危海附近FeO含量分布图

参见“嫦娥一号的初步科学成果”一文

LUNAR BRIGHTNESS TEMPERATURE MAP (DAYLIGHT, 37GHz)

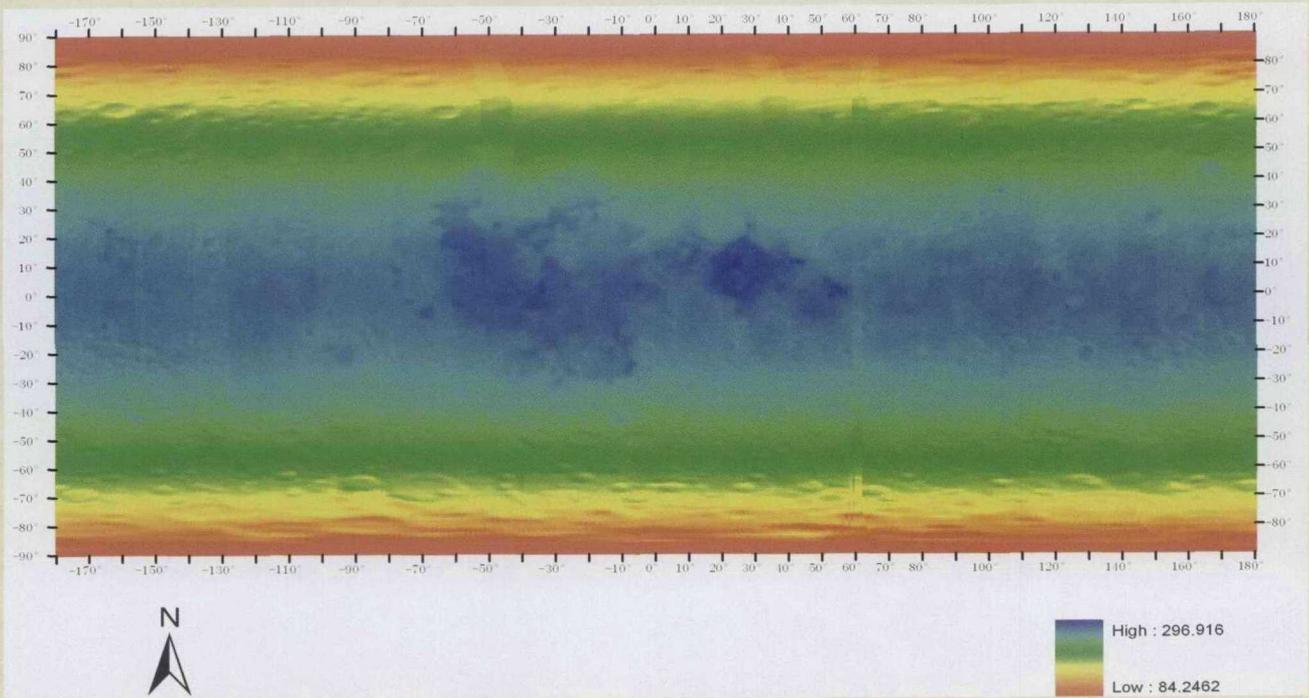


图 6 利用嫦娥一号卫星微波探测仪科学数据获得的月球的亮度温度分布图（黑夜315-624轨、37GHz、降轨）

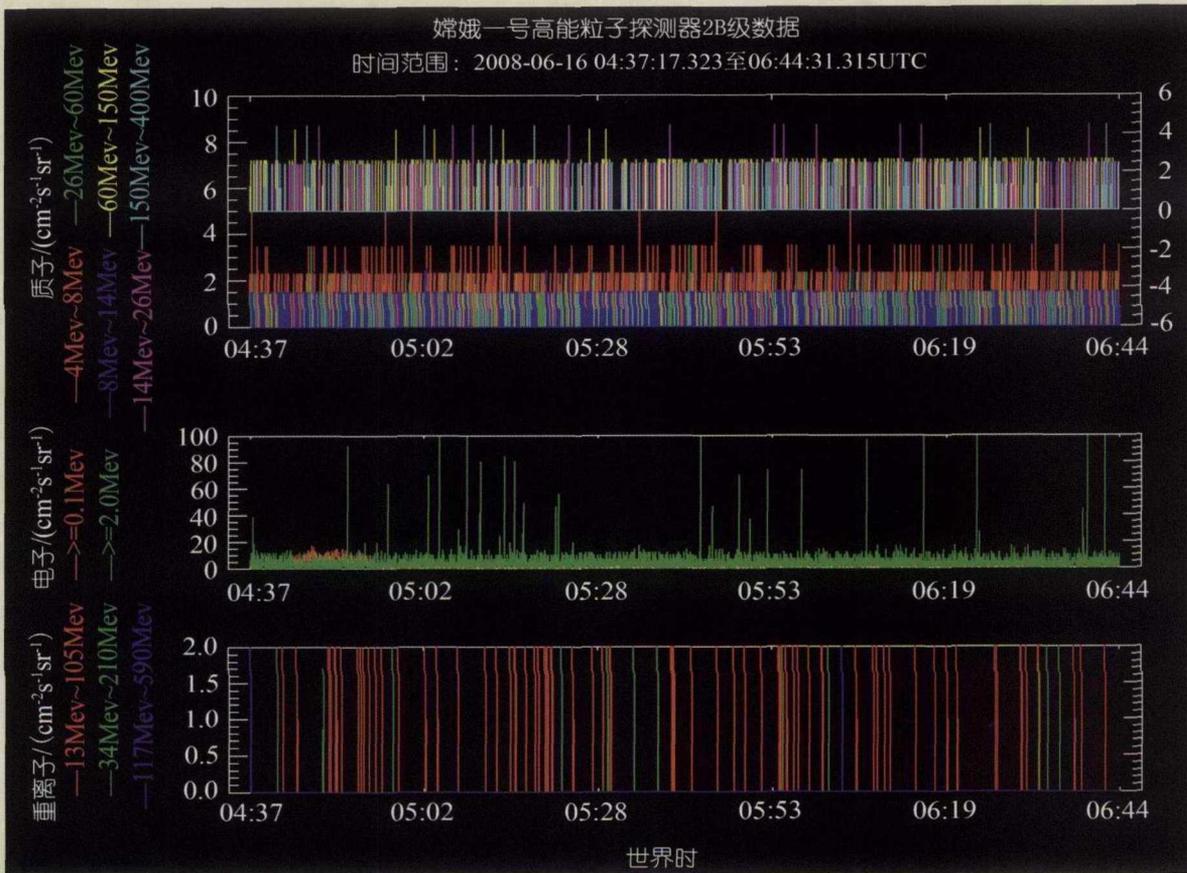


图 7 磁鞘中的高能粒子探测器数据

参见“嫦娥一号的初步科学成果”一文