中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 3 期: 261 ~ 280
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述

绕月探测工程的初步科学成果

欧阳自远[①②*], 李春来[①], 邹永廖[①], 张洪波[①], 吕昌[①], 刘建忠[①], 刘建军[①], 左维[①], 苏彦[①], 温卫斌[①], 边伟[①], 赵葆常[③], 王建宇[④], 杨建峰[③], 常进[⑤], 王焕玉[⑥], 张晓辉[⑦], 王世金[⑦], 汪敏[①], 任鑫[①], 牟伶俐[①], 孔德庆[①], 王晓倩[①], 王芳[①], 耿良[①], 张舟斌[①], 郑磊[①], 朱新颖[①], 郑永春[①], 李俊铎[①], 邹小端[①], 许春[①], 施硕彪[①], 高亦菲[①], 高冠男[①]

① 中国科学院国家天文台, 北京 100012;
② 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002;
③ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119;
④ 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
⑤ 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;
⑥ 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
⑦ 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190
* E-mail: ouyangzy@bao.ac.cn

收稿日期: 2009-06-15; 接受日期: 2009-11-16

摘要 嫦娥一号是我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 日受控落月于 52.36°E, 1.50°S 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, 一共获得了 1.37 TB 的原始科学探测数据, 在此基础上目前已生产出约 4 TB 科学应用数据产品. 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”在内的一系列科学成果, 圆满实现了预期的各项科学目标, 为推动我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.

关键词
绕月探测工程
嫦娥一号
月球探测数据

1 概述

1.1 月球探测概况

月球是人类开展深空探测的首选目标, 也是人类开展太阳系空间探测的理想基地和前哨站. 月球拥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的贡献. 月球表面具有高真空、无全球性磁场、弱重力、高洁净和地质构造稳定的特殊环境, 建立月球天文观测基地和科学实验基地、生物制品和新材料研制基地、对地观测站和深空探测前哨站等均具有重大的科技、经济和社会发展意义[1,2].

引用格式: Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, et al. The primary science result from the Chang'E-1 probe. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-0058-3

21 世纪伊始, 月球探测进入了又一个活跃期, 各航天大国(组织)开始了以重返月球为目标的新的探月行动, 已经发射的月球探测器包括欧盟的 SMART-1、日本的 Selene (Kaguya)、中国的嫦娥一号、印度的 Chandrayaan-1 和美国的 LRO 等. 这些月球探测工程在月表形貌[3,4]、内部结构[5,6]、物质成分[7~11]、月球空间环境[12]以及月表水冰的探测[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 23 日, 国务院总理温家宝亲自签发、批准了我国月球探测一期工程即“绕月探测工程”的立项. 4 月, 国防科工委正式宣布绕月探测工程立项启动. 相继, 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, 绕月探测工程完成了初样阶段的研制和建设工作, 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, 协调确定了系统间的技术接口, 明确了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. 全面开展了质量清查和全系统复核复算工作，以确保全系统的可靠性.

2007 年是绕月探测工程的决胜年, 嫦娥一号月球探测器成功发射升空.

1.2 嫦娥一号月球探测器的奔月过程与在轨运行

北京时间 2007 年 10 月 24 日 18 时 05 分, 嫦娥一号在西昌卫星发射中心成功发射升空. 火箭点火 148 秒后, 火箭一、二级分离; 第 271 秒, 火箭二、三级分离; 第 1249 秒, 火箭三级二次点火; 第 1373 秒, 火箭三级二次发动机关机; 火箭点火 24 min 后, 星箭成功分离, 长征三号甲火箭圆满完成了其历史使命. 嫦娥一号准确入轨, 进入轨道倾角为 31°、近地点高度 205 km、远地点高度 50900 km、周期约 16 h 的地球调相轨道.

2007 年 10 月 30 日 17 时, 嫦娥一号探测器飞行至周期为 48 h 的轨道, 远地点距离地球约 119800 km, 开创了我国最远航天测控的新纪录. 2007 年 10 月 31 日 17 时 15 分, 嫦娥一号于近地点点火, 卫星运行速度由 10.33 km/s 增加到 10.58 km/s, 进入远地点为 410000 km 的奔月轨道.

2007 年 11 月 5 日 11 时 41 分, 嫦娥一号被月球“成功捕获”, 进入周期为 12 h, 近月点为 211 km, 远月点为 8500 km 的绕月轨道, 嫦娥一号成为我国的第一颗月球卫星——月球环绕轨道器.

2007 年 11 月 7 日 8 时 24 分, 嫦娥一号开始进行第三次近月制动, 探测器绕月球的运行周期缩短为 127 min, 进入距月面 200 km 高的极轨工作轨道, 开始检查卫星, 调整平台状态, 为科学探测做好准备.

嫦娥一号从发射升空到准确进入环月工作轨道, 经历了主动段、调相轨道段、地月转移轨道段和环月轨道段 4 种不同的轨道, 实施了 1 次远地点变轨、3 次近地点变轨、1 次中途修正、3 次近月制动等 8 次变轨过程(图 1). 历时 13 天 14 小时 19 分, 行程约 2.09×10^6 km.

2007 年 11 月 20 日 16 时 49 分, 嫦娥一号探测器上的 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上的科学探测数据. 2007 年 11 月 26 日, 我国首次月球探测工程第一幅月面图像发布. 2008 年 11 月 20 日, 我国首次月球探测工程全月球影像图发布.

2009 年 3 月 1 日, 嫦娥一号受控撞击月球的 52.36°E, 1.50°S 的丰富海区域, 比预期 1 年的工作寿命延长 4 个多月, 圆满完成了各项科学探测使命.

嫦娥一号探测器在轨运行 495 天, 搭载的 8 台(套)有效载荷工作正常, 一共取得 1.39 TB 的原始科学探测数据, 地面应用系统处理出 0, 1, 2 和 3 级科学数据产品约 4 TB, 并已陆续发布给全国相关的科学家开展探测数据的应用研究.

2 科学目标和有效载荷配置

2.1 科学目标

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. 科学目标的选择, 既要与国际科学前沿接轨, 又要紧密结合我国现阶段的国情国力和现有的工程技术能力, 要有限目标、突出重点、有所创新、形成特色; 月球探测的短期目标与长远目标相结合, 循序渐进与分阶段发展相结合. 经过近 10 年的论证, 绕月探测工程遴选了 4 项科学目标[16]:

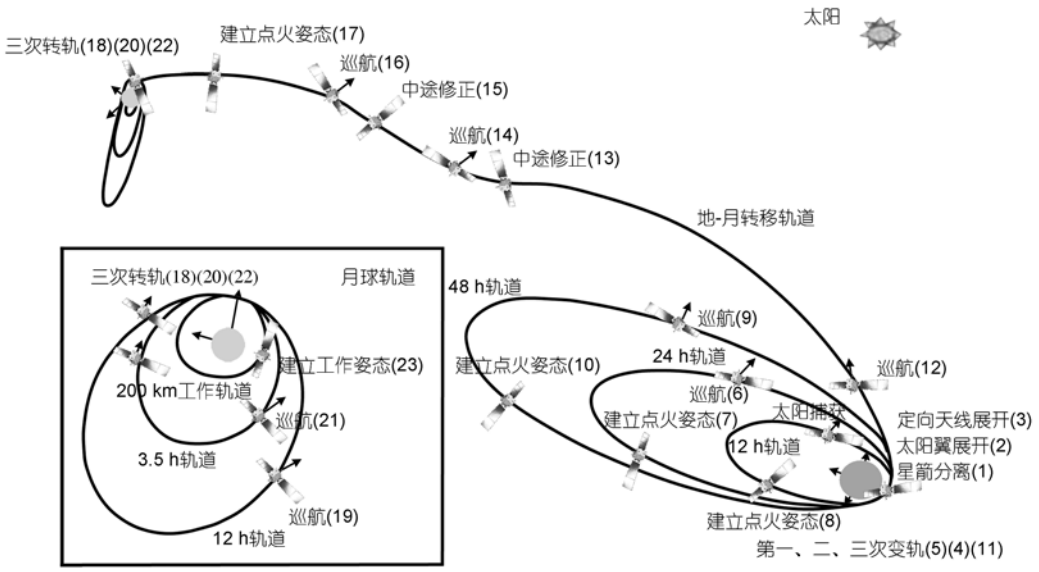


图 1　嫦娥一号探测器飞行程序图

(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、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 ^{3}He 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层对近月空间环境的影响.

4 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.

2.2　有效载荷配置

为实现绕月探测工程规定的 4 项科学目标, 嫦娥一号共搭载 8 台(套)有效载荷. 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]. 探测原理和科学任务、载荷技术指标要求如表 1 所示.

3　科学探测数据的获取

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”, 宣布绕月探测工程取得圆满成功; 11 月 27 日, 激光高度计等其他 7 台有效载荷也相继开机工作, 开始全面获取科学探测数据.

嫦娥一号在轨运行期间所开展的科学探测主要集中在两个正飞期, 即 2007 年 11 月 20 日至 2008 年 1 月 27 日期间和 2008 年 5 月 1 日至 8 月 3 日期间, 开机最长的载荷, 其探测时间为 147 天. 8 台探测仪器获得原始探测数据总量约 1.39 TB, 经处理生产了各级标准数据产品以及 3 级应用数据产品, 目前总数据量约 4 TB(表 2), 各级数据产品的定义见表 3, 其中 2 级和 3 级数据产品已发布给全国科学家开展深入的科学探测数据应用研究.

表 1　嫦娥一号的有效载荷

科学目标	有效载荷配置	探测原理和科学任务	载荷技术指标
获取月球表面三维立体影像	CCD 立体相机	获取月球表面同一地区的三条相互重叠影像带(前视影像、中视影像和后视影像), 重建月表立体影像	光谱范围: 500~750 nm 光学通道数: 1 个 幅宽: 60 km 基高比: ≥0.6 成像区域: 70°N~70°S 像元空间分辨率(星下点): 120 m
	激光高度计	发射激光束到月球表面, 并接收月表后向散射的激光信号, 通过测量激光往返延迟时间来计算卫星到月表的距离, 换算月面高程	距离测量范围: (200±25) km 月面足印大小: 小于ϕ200 m 激光波长: 1064 nm 激光能量: 150 mJ 脉冲宽度: 5~7 ns 激光重复率: 1 Hz 接收望远镜口径: 140 mm 望远镜焦距: 538 mm 距离分辨率: 1 m 距离误差: 5 m
分析月球表面元素含量和物质类型的分布特点	干涉成像光谱仪	获取月球表面的光谱信息, 分析月球表面的物质组成	幅宽: 25.6 km 月表像元分辨率: 200 m 成像区域: 70°S~70°N 光谱范围: 0.48~0.96 μm 光谱通道数: 32 谱段 像元数: 256×256(2×2 像元合并后); S/N: ≥100
	γ射线谱仪	通过测量月球表面物质发射的γ射线, 获得月球表面的元素含量与分布特征	主探测器碘化铯晶体: ϕ118×78 mm 反符合晶体: 底厚 30 mm, 侧厚 30 mm 仪器能量分辨: 9%^{137}Cs@662 keV 探测能量范围: 300 keV~9 MeV 探测能道数: 512 或 1024
	X 射线谱仪	探测月球表面元素受宇宙射线激发产生的荧光 X 射线能谱, 获得月球表面主要元素的含量和分布	探测器有效面积: 17 cm^2 探测能区: 1~60 keV 分辨率: ≤10%@59.5 keV(硬 X 射线), ≤600 eV@5.95 keV(软 X 射线) 月面本征分辨率: 170 km × 170 km(轨道高度为 200 km 时) 太阳监测器探测能区: 1~10 keV 太阳监测器分辨率: ≤600 eV@5.95 keV
探测月壤特性	微波探测仪	测量不同波段的月球微波亮度温度, 探测月壤特性, 并对月球的 ^{3}He 资源量和分布进行评估	频率(GHz): 3.0(±1%), 7.8(±1%), 19.35(±1%), 37(±1%) 积分时间(ms): 200(±15%) 温度分辨率(K): ≤0.5 线性度: ≥0.99
探测地月空间环境	高能粒子探测器	测量月球空间的重离子和质子的能量和通量, 研究近月空间环境的变化规律	电子: 2 个能道(E1: ≥0.095 MeV; E2: ≥2.2 MeV) 质子: 6 个能道 P1: 4~8 MeV; P2: 8~15 MeV; P3: 15~32 MeV; P4: 32~70 MeV; P5: 70~160 MeV; P6:160~400 MeV
	太阳风离子探测器	探测近月空间太阳风中的低能离子的成分及空间分布, 分析平静和高速太阳风等离子体的特征量	探测能量: 0.05~20 keV 能道划分: 48 能道 太阳风速度: 150~2000 km/s 瞬时视场: 6.7°×180° 接收角: 6.7°×15°

表 2　各级数据产品的数据量(数据单位 MB)

	CCD 立体相机	干涉成像光谱仪	激光高度计	γ射线谱仪	X 射线谱仪	微波探测仪	高能粒子探测器	太阳风离子探测器	总计
原始数据									1389641
0 级科学数据	433730	692464	5766	72788	45792	30272	1524	97794	1380130
1 级科学数据	30696	201385	9845	22188	19524	17206	3459	30734	335037
2 级科学数据	78029	560332	926	37318	56005	1334	6335	79370	819649
3 级科学数据	3500		2.39	42			108	7623	11273
总计	545955	1454181	16537	132336	121321	48812	11426	215521	3935730
数据特性	全月球 100%覆盖	南北纬 70°范围内 84%区域	912 万个全球数据	累积 88 天数据	累积 74 天数据	约 8 次全月球覆盖	累积 120 天数据		

表 3　数据产品级别定义

级别	英文名称	数据描述	备注
原始数据	Raw data	数传接收机输出的基带数据	
0 级数据产品	Level 0A	经过帧同步、解扰、RS 译码、解包、解压, 并打上时标的原始数据	数据按有效载荷区分
	Level 0B	0A 级数据经过排序、去重复和两站优化拼接后, 带有必要辅助数据的数据产品	密云和昆明两站数据优化拼接
1 级数据产品	Level 1	0B 级数据进行物理量转换处理和格式重整, 带有相关描述信息的数据	格式重整和数据校正的内容因有效载荷而不同
2 级数据产品	Level 2	1 级数据进行辐射、几何、光度等校正后的数据产品, 根据有效载荷不同细分为 2A, 2B 和 2C 等级别	
3 级数据产品	Level 3	在 2 级数据产品的基础上, 经过深加工获得的数据产品	亦称应用数据. 包括: 几何精校正产品、影像图产品等

4　科学应用的初步成果

利用嫦娥一号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.

4.1　获取月球表面三维影像

行星表面地形地貌特征的辨识和划分, 一直是行星探测最基础性的重要内容. 行星地形地貌特征可以为天体本身的现状和演化历史提供最直接的证据. 对全月球进行三维立体成像, 可以获得最真实、最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, 基岩出露较少[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, CCD 立体相机和激光高度计已经获得了包括南北纬 70°以及南北纬 70°~90°在内的全月球的影像数据, 完全实现了对全月面的覆盖, 并于 2008 年 11 月 12 日公开发布了主要利用正视影像拼接而成的全月球影像图[18]; 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 7 km 的伪彩色月球渲染地形图(DEM)、极区南北纬 70°~90°以内空间分辨率为 4 km 的伪彩色月球渲染地形图(DEM), 并在 2008 年 7 月底向全国相关单位提供了空间分辨率为 10 km 的伪彩色月球渲染地形图(DEM). 目前, 激光高度计已经获得了 900 余万个有效高程数据, 并制作了全月空间分辨率 3 km 的伪彩色月球渲染地形图(DEM).

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、激光高度计测距数据处理方法、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.

在地面应用系统开发的软硬件环境基础上, 月球三维地形数据处理方面已经取得如下成果:

(1) 2007 年 11 月 26 日根据最初 19 轨 CCD 正视影像图的一部分, 绘制并公开发布第一幅月面平面图像, 见图 2.

(2) 2007 年 11 月 26 日公开发布第一幅月面图的三维影像, 见图 3.

(3) 一些典型地区地形地貌特征平面和三维影像, 主要有各月海、海湾、各主要山脉、月湖、月谷、月溪和嫦娥撞击坑、张衡撞击坑、郭守敬撞击坑、万户撞击坑、第谷撞击坑等各类月表典型地貌单元平面与三维影像.

(4) 利用 CCD 立体相机的 313 轨图像数据, 拼接制作了 70°S~70°N 的月球影像图; 利用 CCD 立体相机的 276 轨极区图像数据, 编制了 70°~90°S 和 70°~90°N 两极地区的影像图. 使用以上 589 轨的图像数据, 完成了比例尺为 1∶250 万的全月球影像图.

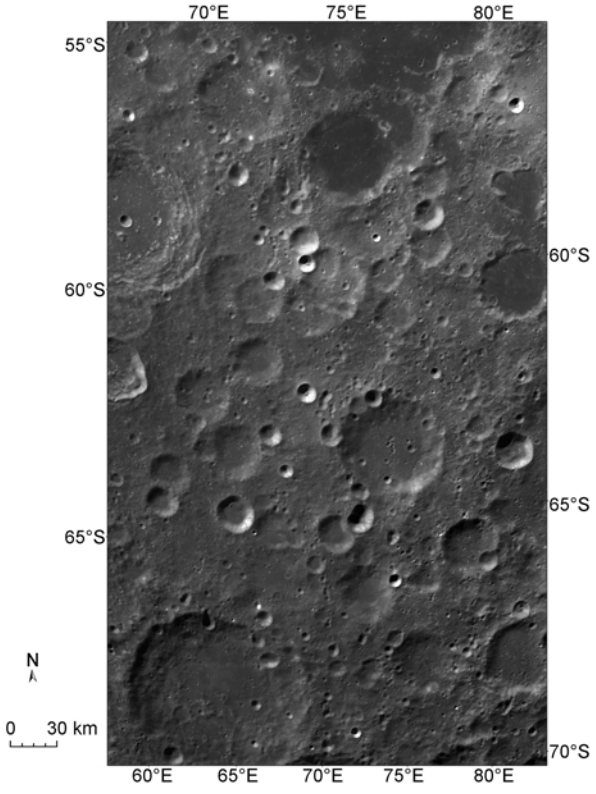


图 2 中国首次月球探测工程第一幅月面图像

2008 年 7 月底完成全月球影像图的制作(图 4)[18], 并于同年 11 月 12 日公开发布.

(5) 2008 年 8 月初利用激光高度计获取的 912 万个有效高程数据制作完成了全月空间分辨率为 3 km 的 DEM 图. 下面分别列出了北极地区、南极地区、月球正面、月球背面 4 个区域的 DEM 图(图 5, 6).

(6) 利用 CCD 立体相机制作的 500 m DEM 数据制作了一些典型月表地貌单元的 3D 景观数据(图 7)[19].

(7) 正在绘制中的月球三维影像图、撞击坑大小与分布图、月球线性和环形构造图、月球构造区划图, 将相继公布发表.

4.2 物质成分探测

我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的类型与分布上, 获取月球表面某些元素的分布图. 根据元素分布的特点和干涉成像光谱数据, 粗略划分克里普岩、斜长岩和玄武岩的分布, 评估月球某些矿产资源如钛铁矿、稀土与放射性元素等的开发利用前景.

在月球物质成分探测方面, 嫦娥一号搭载了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有效载荷. 用我们研制完成的高地斜长岩质模拟月壤[20]和月海玄武岩质模拟月壤[21], 对这三台仪器进行了标定.

截止 2008 年 10 月 24 日, 伽马射线谱仪共获取约 2105 h 的有效探测数据. 当前已完成 U, K 和 Th 等元素含量分布图的编制(图 8 和 9), 相继再完成其他元素的含量分布图; X 射线谱仪共获取了 1761 h 的有效探测数据. 根据 X 射线谱仪的探测方案, 在太阳活动水平是 A1 级的情况下, 需要至少 10 个月的有效数据积累, 才能获取全月球 Mg, Al 和 Si 元素的含量和分布. 由于 2008 年太阳活动的水平仅为 A0.37 级, 在 2007 年 12 月 31 日至 2008 年 1 月 2 日之间太阳发生了一次比较大的 X 射线爆发, 该段时间中所获取的数据能够进行 Mg, Si 和 Al 元素含量与分布反演, 该段时间的探测数据大约覆盖了月面 3×10^6 km^2 的范围. 因此 X 射线谱仪的数据只能制作 Mg, Al 和 Si 元素的局部含量和分布图.

干涉成像光谱仪的探测数据已经覆盖了月球南北纬 70°范围内约 84%面积, 根据 Lucey 等[22]利用不

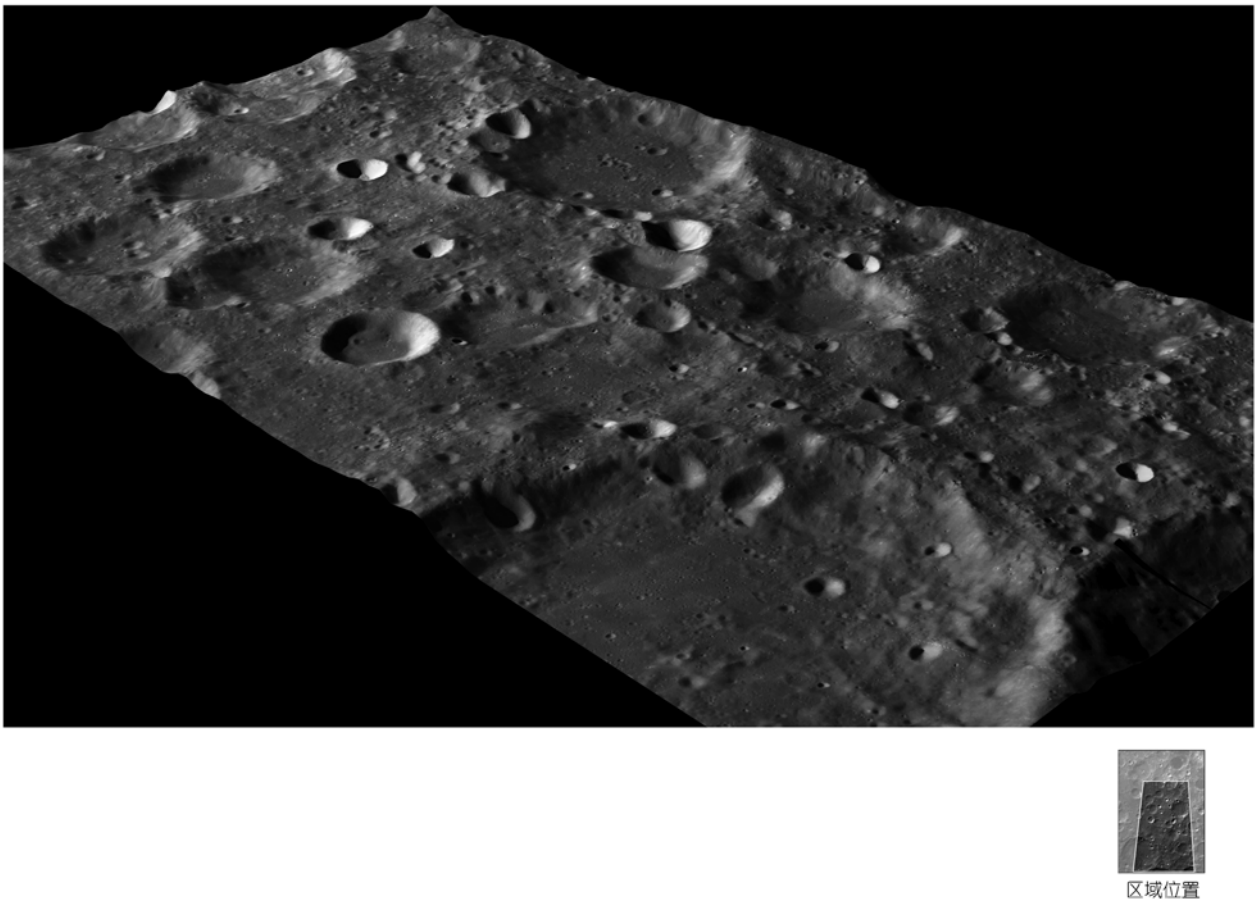


图 3　中国首次月球探测工程第一幅月面图像局部三维景观图

据文献[18, 19]

同波段光谱反射率及其比值开展 FeO 和 TiO_2 的反演方法, 对于 FeO 含量, 可以采用 946 和 757 nm 波段反射率计算; 对于 TiO_2, 可以采用 488 和 757 nm 波段反射率计算. 通过对 FeO 和 TiO_2 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.

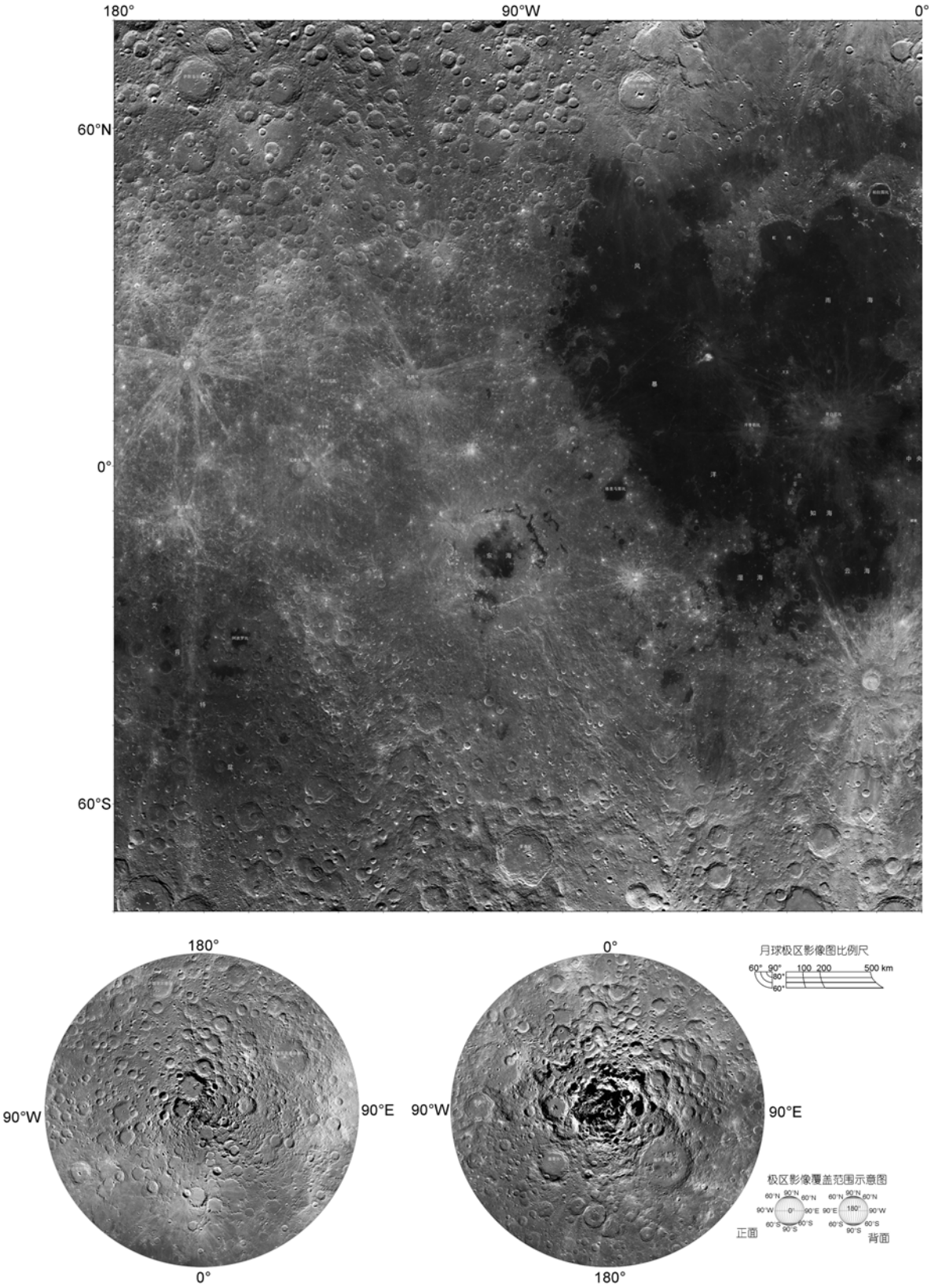
4.3　月壤特性探测

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, 结合返回的月壤分析数据, 估算月球表面 ^{3}He 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[27~30].

微波探测仪已经获得了 8 次全月球覆盖的数据, 可以满足月壤基本特性反演的需求.

针对微波探测仪的数据特点, 我们开展了以下工作: 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、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.

目前已有文献根据嫦娥一号获得的微波辐射亮度温度, 采用月尘-月壤-月岩三层模型的数学分析方法, 初步解析出月壤厚度[24~30]. 而实际上, 月壤厚度反演的模型与算法, 需要根据月球表面风化层的结构模型, 建立月表亮温贡献的物理模型. 月球表面风化层结构模型的建立是一个从简单到复杂, 考虑因素逐渐增加的过程. 无论是月壤-月岩双层模型, 还是月尘-月壤-月岩三层模型, 都是一个相对简单的模型, 在今后的工作中, 将根据对月球表面特性的理解, 逐


180°
90°W
0°
60°N
0°
60°S
180°
90°W
90°E
0°
0°
90°W
90°E
180°
月球极区影像图比例尺
60° 90° 100 200 500 km
80°
60°
极区影像覆盖范围示意图
正面
背面

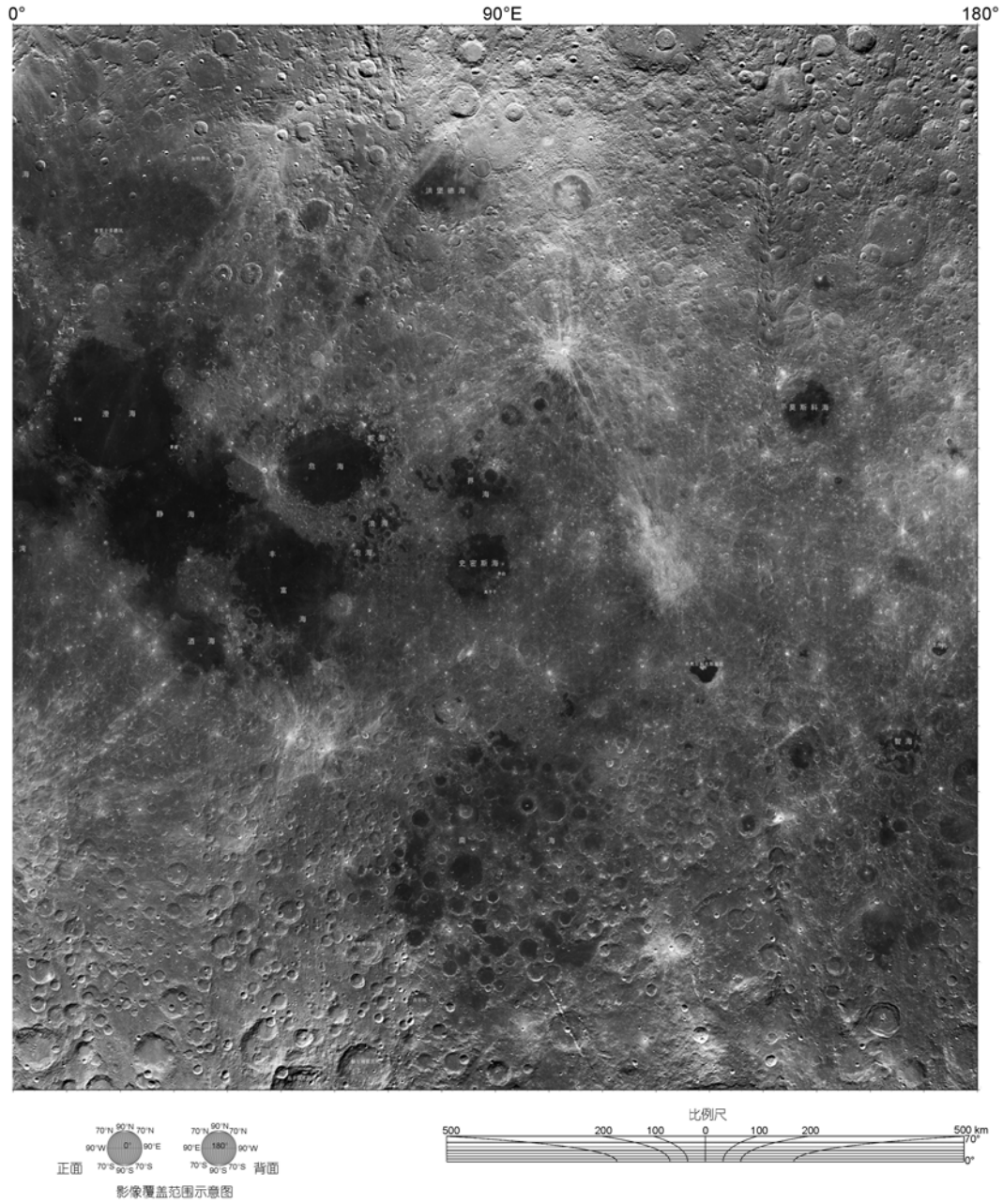


图 4　中国首次月球探测工程全月球影像图[18]

中国首次月球探测工程全月球影像图是由嫦娥一号 CCD 立体相机拍摄的 589 轨影像数据, 经辐射校正、几何校正、光度校正后镶嵌而成. 嫦娥一号的飞行轨道为 200 km 高的极轨圆轨道, CCD 相机采用线阵推扫方式获取月面图像, 图像幅宽 60 km, 空间分辨率 120 m. 图像数据获取于 2007 年 11 月 20 日至 2008 年 7 月 1 日, 覆盖 180°W~180°E, 90°N~90°S 之间的范围. 图幅左边的影像图为正轴等角割 35°墨卡托投影, 包括 70°N~70°S 之间的区域, 约占全月球面积的 94%. 图幅右边为月球南北极区影像图, 包括 60°N~90°N, 60°S~90°S 区域, 采用等角割 70°方位投影

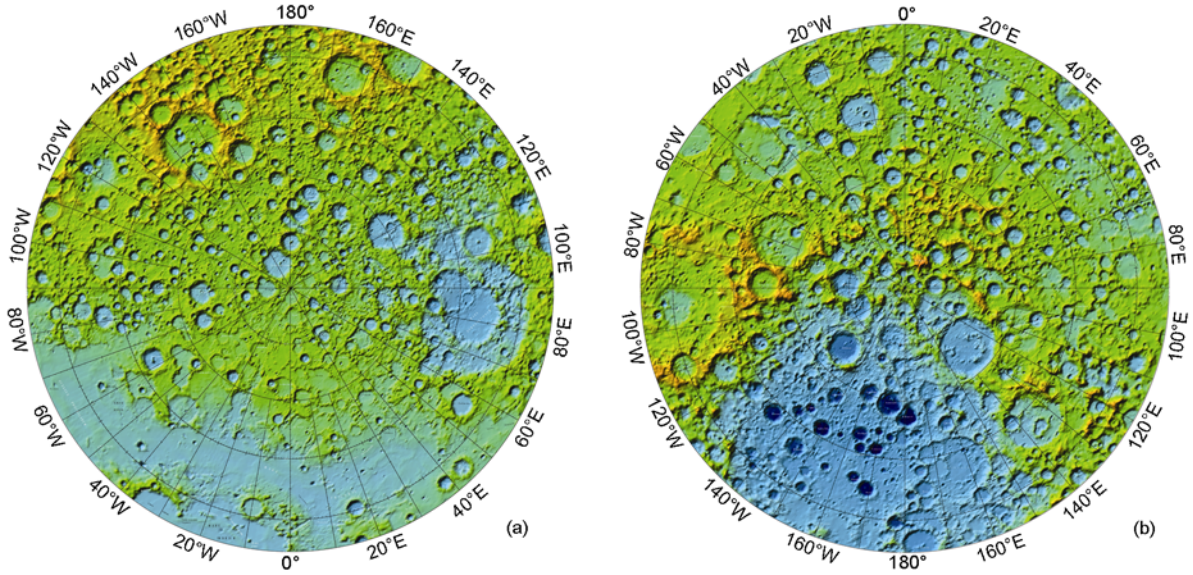


图 5　根据激光高度计探测数据制作的全月球 DEM 图

(a) 月球 45°~90°N; (b) 月球 45°~90°S

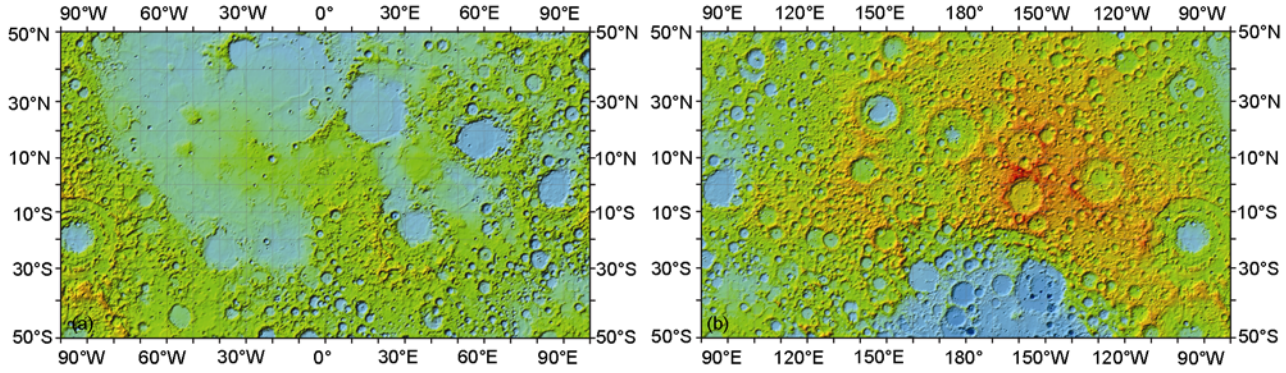


图 6　根据激光高度计探测数据制作的全月球 DEM 图

(a) 月球正面; (b) 月球背面

步完善这一模型, 特别是考虑月球表面粗糙度、月壤物质均匀性和分层、月壤中石块的散射效应等物理因素, 使这一模型更符合月球的实际情况. 此外, 目前的月壤厚度研究结果中, 没有考虑微波亮温数据的精度及其对厚度计算结果的影响程度.

目前, 已经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, 其中第一个正飞期的亮度温度分布图如图 10 和 11 所示.

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. 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, 因此亮度温度相对较高; 高地(月陆)分布的是斜长岩, 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, 因此亮度

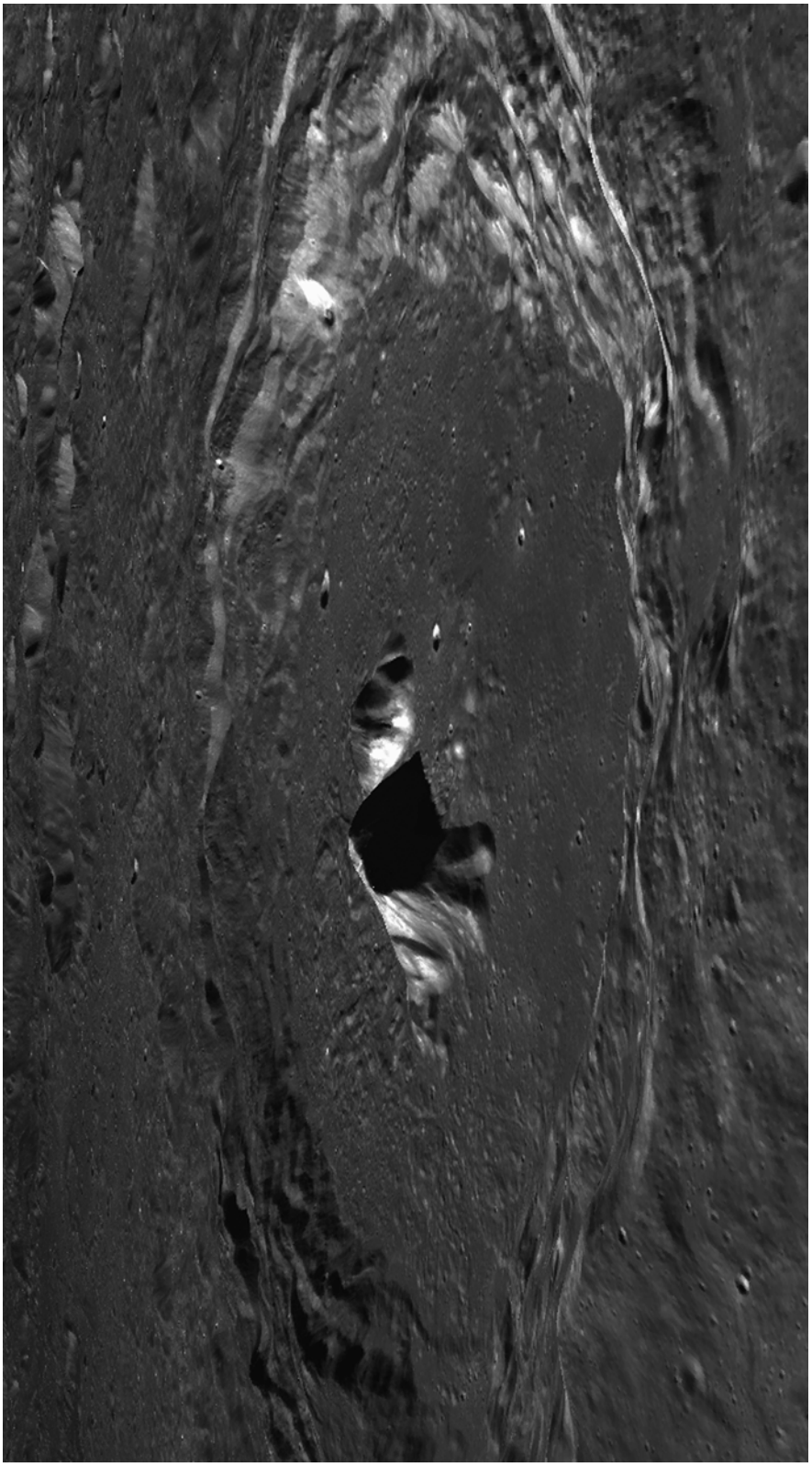


图 7　带中央锥撞击坑 3D 景观示意图

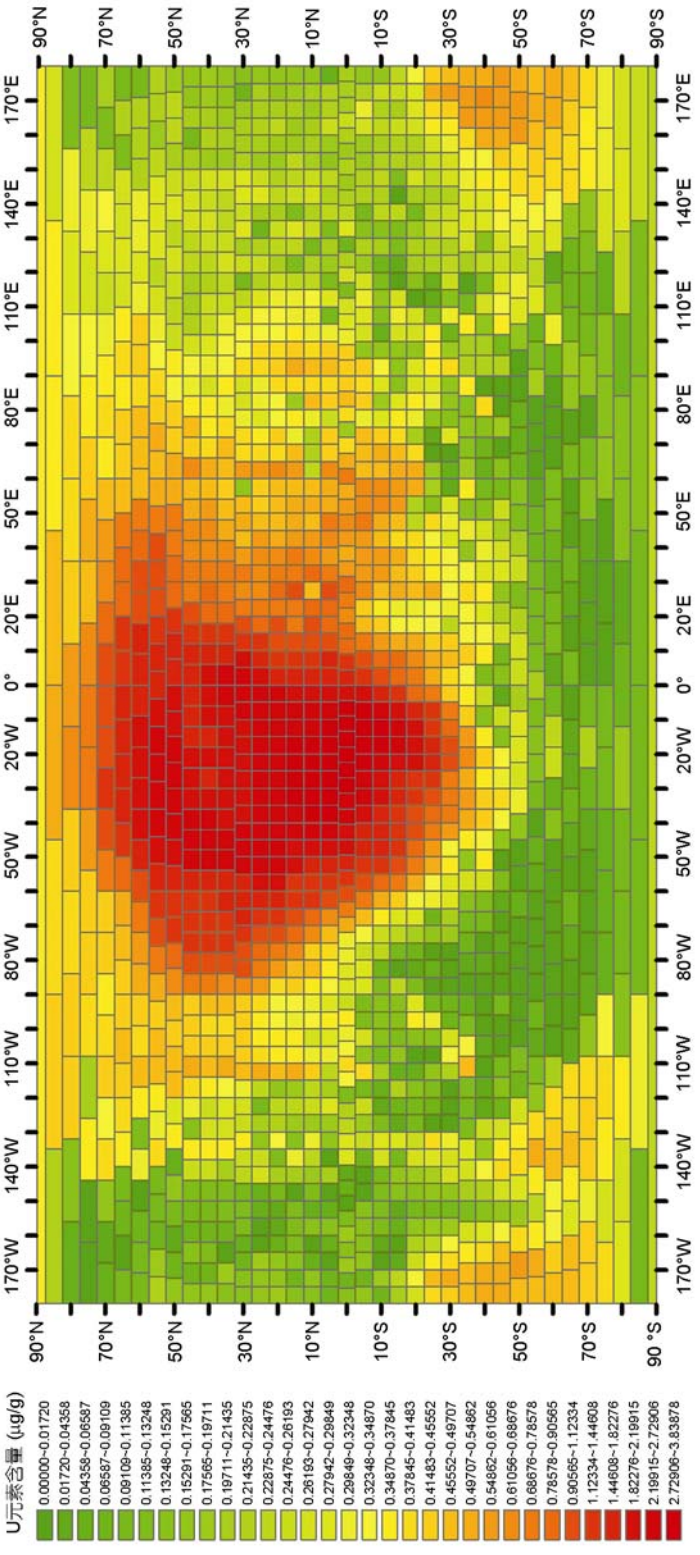


图 8　U 元素的全月含量分布

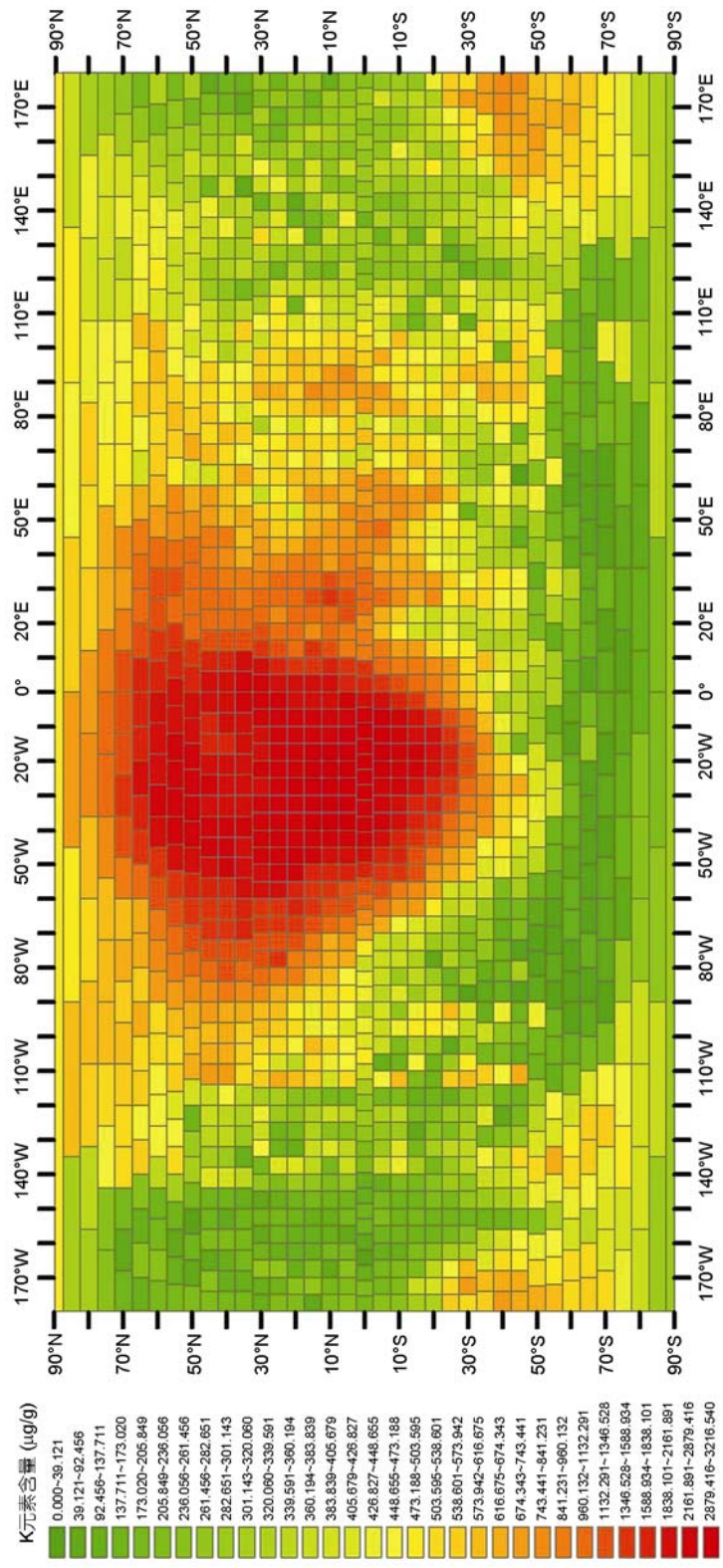


图 9　K 元素的全月含量分布

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.

4.4 空间环境探测

在嫦娥一号月球探测器上安装了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 4 个空间区域. 上述 3 台载荷于 2007 年 11 月 26 日开始开机探测, 截止到 2008 年 10 月 24 日太阳风离子探测器共获取了 2852 h 科学数据; 太阳高能粒子探测器共获取了 2868 h 科学数据.

高能粒子探测器在行星际空间中的数据相对较平静, 很少有明显计数; 在磁鞘和磁尾中 0.1~2 MeV 电子能档偶有计数(图 12).

图 13 所示的三部分空间区域(行星际空间、磁鞘和磁尾)的太阳风等离子体具有鲜明的不同特点. 在行星际空间, 太阳风等离子体密度相对较大, 温度较低, 扰动相对较小; 在磁鞘区, 等离子体温度较高, 扰动增加; 在地球磁尾区, 等离子体密度低温度最高.

嫦娥一号太阳风离子探测器还探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.

4.5 受控撞击月球

嫦娥一号完成一年在轨运行任务后, 根据探测器的状态, 嫦娥一号又进行了 4 个多月的在轨试验, 然后在 2009 年 3 月 1 日在地面控制下实施了撞击月球的轨控试验. 嫦娥一号经轨道调整、速度减为 1.627 km/s 后, 目标瞄准撞击点, 在距离月面 59 km 的高度, CCD 立体相机开机拍照. CCD 立体相机的照片记录了 1469 km 撞击过程的月面影像(图 14). 16 时 13 分 10 秒, 嫦娥一号准确撞击在月球 52.36°E, 1.50°S 的丰富海预定撞击点.

5 结果与讨论

我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 日公开发布了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 912 万个有效高程数据, 绘制了精确的全月数字高程图. 目前正在绘制比例尺 1∶250 万、等高距小于 500 m、覆盖 90°N~90°S 的月球数字地形图, 以期获得在数据覆盖范围上、数据制作方法上、数据质量上和月表地形特征与细节反映上都超越前人的、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, 形成了自己的特色. 获得多次覆盖的四波段全月球亮度温度数据, 初步结果表明, 亮度温度不仅与月球的物质成分有密切的关系, 而且与地形地貌的变化关系密切.

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数据. 通过数据的分析, 可以知道嫦娥一号所经历的空间区域、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. 月球作为一个无大气弱磁化的障碍物, 和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问题之一. 在嫦娥一号之前, 对月球等离子体和辐射环境的探测集中于月球表面或是地球磁尾远处, 在 200~100 km 高度的月球轨道上还没有空间环境数据的连续观测.

关于月球物质成分的探测, 正在绘制 U, Th, K, Mg, Al, Si, Fe 和 Ti 八类元素的含量与分布以及其他元素的区域性分布的反演, 圈定月面 KREEP 岩、月海玄武岩和高地斜长岩的分布. 利用我国的多源探测数据获得更为精细的构造专题图件.

总之, 绕月探测工程是我国迈向太空的第一步, 通过嫦娥一号为期一年的在轨业务运行, 获得了大量的探测数据, 在月球基础科学和太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

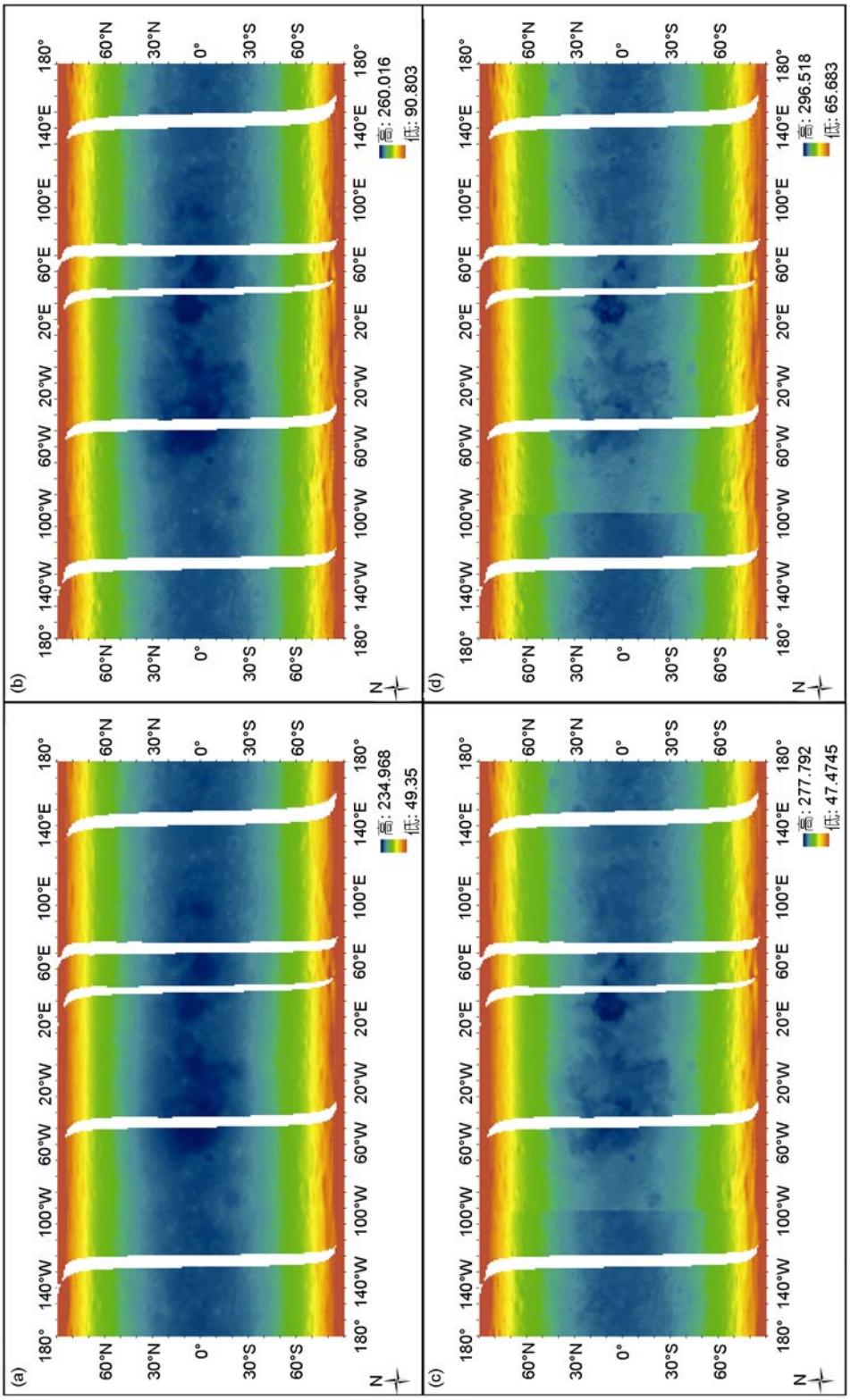


图 10　月球白昼亮度温度分布图

轨道 315~624. (a) 3.0 GHz; (b) 7.8 GHz; (c) 19.35 GHz; (d) 37.0 GHz

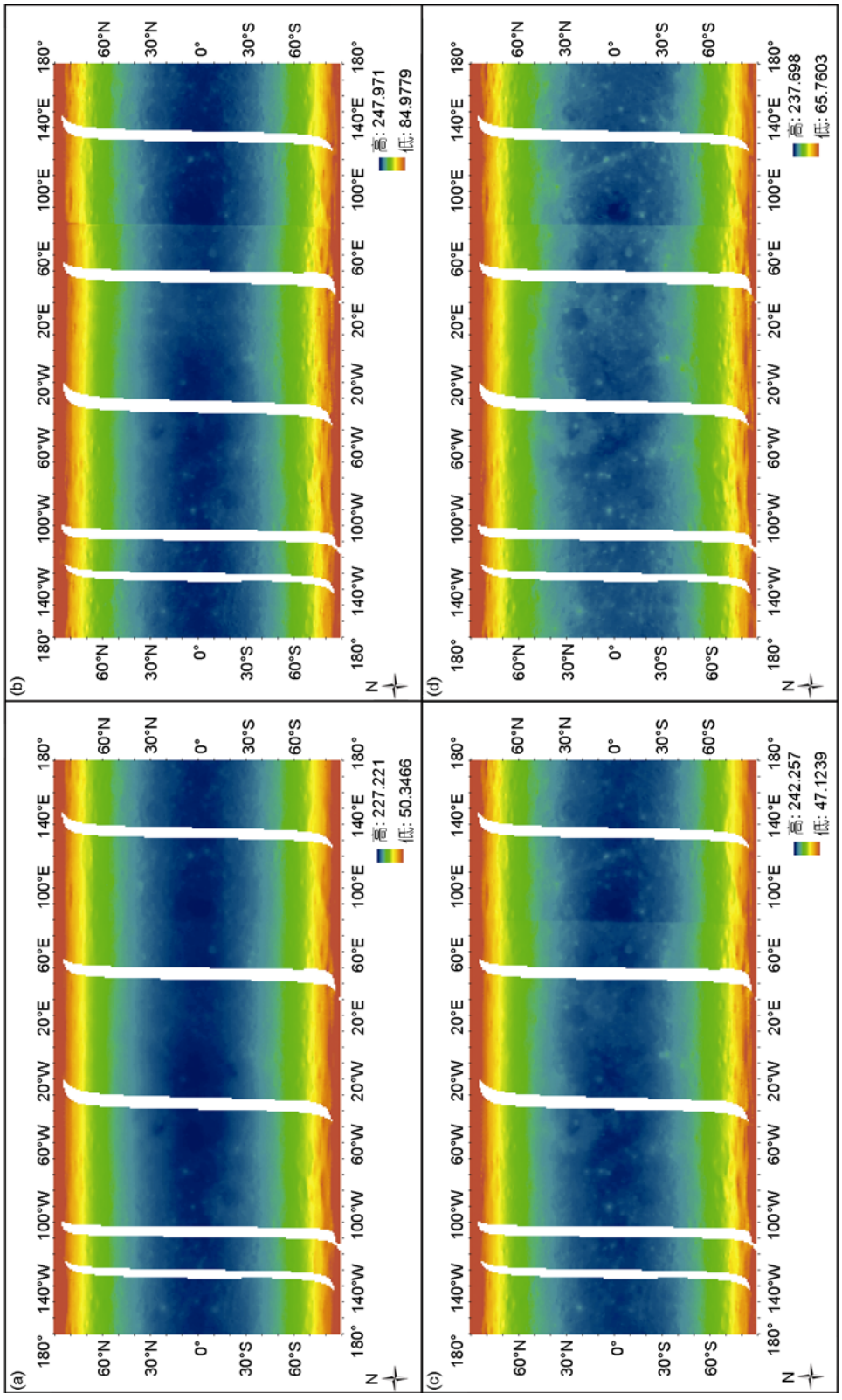


图 11　月球黑夜亮度温度分布图

轨道 315~624. (a) 3.0 GHz; (b) 7.8 GHz; (c) 19.35 GHz; (d) 37.0 GHz

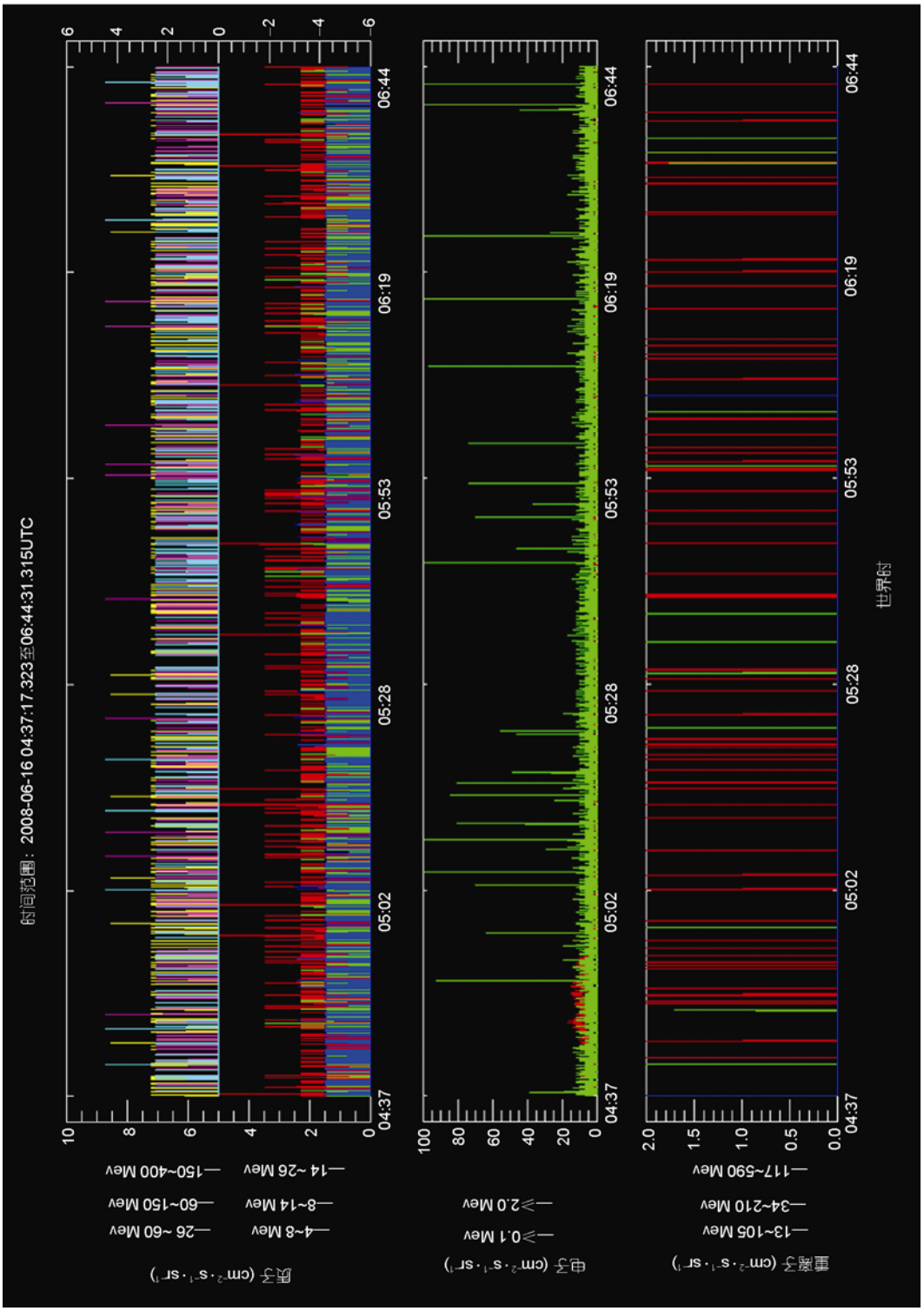


图 12　磁鞘中的高能粒子探测器数据

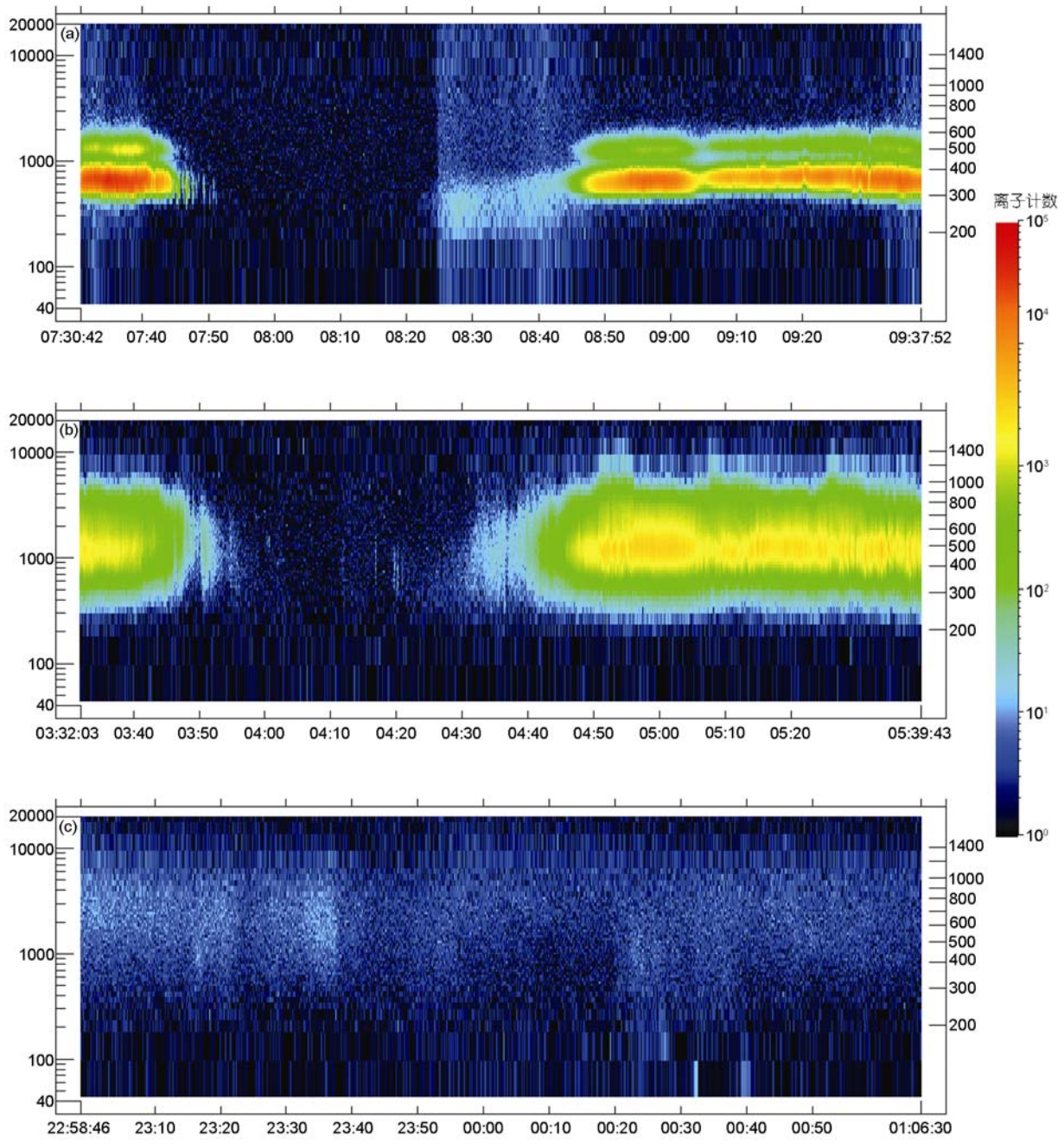


图 13　嫦娥一号探测到的不同空间区域低能离子能谱

(a) 在行星际空间中的低能离子能谱(数据来源于第 600 轨); (b) 在地球磁鞘中的低能离子能谱(数据来源于第 236 轨); (c) 在地球磁尾中的低能离子能谱(数据来源于第 539 轨); (a)和(b)中的计数率极低区为嫦娥一号飞越月球背面屏蔽区的探测数据. 纵坐标轴为太阳风离子探测器 B (SWIDB)的能量, 单位: eV

果将陆续发表.

月球探测工程是我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, 为我国月球及深空探测和科学研究作出新的更大贡献.

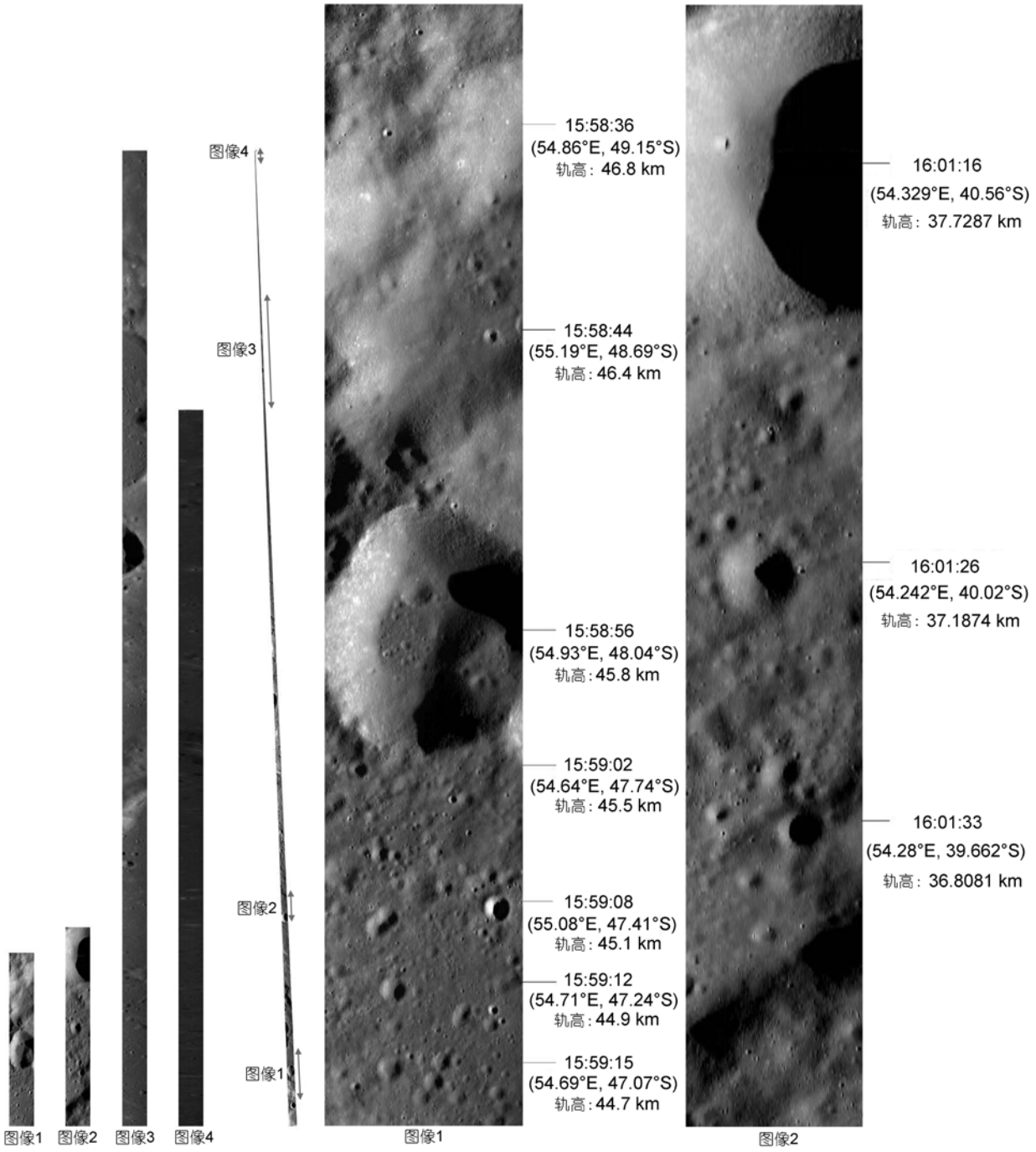


图 14　嫦娥一号受控撞击月球过程的 CCD 影像图

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. 感谢审稿人提出的建设性意见. 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.

参考文献

1 欧阳自远. 月球科学概论. 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. 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. Science, 2009, 323: 897—900
4 Haruyama J, Ohtake M, Matsunaga T, et al. Long-lived volcanism on the lunar farside revealed by SELENE terrain camera. Science, 2009, 323: 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. Science, 2009, 323: 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). Science, 2009, 323: 900—905
7 Ohtake M, Matsunaga T, Haruyama J, et al. The global distribution of pure anorthosite on the moon. Nature, 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. Earth Planet Space, 2008, 60: 283—292
9 Alha L, Huovelin J, Nygard K, et al. Ground calibration of the Chandrayaan-1 X-ray Solar Monitor (XSM). Nucl Instrum Methods, 2009, 607: 544—553
10 Grande M, Maddison B J, Howe C J, et al. The C1XS X-ray spectrometer on Chandrayaan-1. Planet Space Sci, 2009, 57: 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. Planet Space Sci, 2009, 57: 725—734
12 Nishino M N, Maezawa K, Fujimoto M, et al. Pairwise energy gain-loss feature of solar wind protons in the near-moon wake. 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. Science, 2008, 322: 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. Science, 2009, 326: 565—568
15 Pieters C M, Goswami J N, Clark R N, et al. Character and spatial distribution of OH/H_2O on the surface of the moon seen by M3 on Chandrayaan-1. Science, 2009, 326: 568—572
16 Ouyang Z Y, Jiang J S, Li C L, et al. Preliminary scientific results of Chang'E-1 lunar orbiter. Chin J Space Sci, 2008, 28: 9—17
17 中国科学院地球化学研究所. 月质学研究进展. 北京: 科学出版社, 1977
18 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. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 294—306
19 Liu J J, Ren X, Mu L L, et al. Automatic DEM Generation from CE-1's CCD Stereo Camera Images. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference. 2009 March 23—27, Woodlands, Texas, 2009. 2570
20 Li Y Q, Liu J Z, Yue Z Y. NAO-1: A lunar highland soil simulant developed in China. J Aerosp Engrg, 2009, 22: 53—57
21 Zheng Y C, Wang S J, Ouyang Z Y, et al. CAS-1 lunar soil stimulant. Adv Space Res, 2009, 3: 448—454
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 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. Geochim Cosmochim Acta, 2005, 69: A805
24 金亚秋, 法文哲, 徐丰. 月球表面微波主被动遥感的建模模拟与反演. 遥感技术与应用, 2007, 22: 129—134
25 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. 中国工程科学, 2008, 10: 16—22
26 李芸, 王振占, 姜景山. 月表温度剖面对于"嫦娥一号"卫星微波探测仪探测亮温影响的模拟研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1045—1058
27 李雄耀, 王世杰, 陈丰, 等. 月壤厚度的研究方法与进展. 矿物学报, 2007, 27: 64—68
28 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. 空间科学学报, 2007, 27: 55—65
29 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. 自然科学进展, 2006, 16: 86—94
30 张德海, 张晓辉, 王振占, 等. "嫦娥一号"微波探测仪探测月壤厚度机理和地面验证实验. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39: 1097—1104