



论文

嫦娥五号月球科学探测: 月壤和样品

嫦娥五号等着陆区的月壤微波热辐射特性及地质意义分析

孟治国^{①②*}, 唐天琦^{①②}, 董学纲^{①②*}, 常文清^{①②}, 邹猛^③, 张洪波^④, 王明常^①, 蔡占川^②, 平劲松^{④⑤}, 郑永春^④, 张渊智^{④⑤}, Alexander Gusev^⑥

① 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026;

② 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078;

③ 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022;

④ 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

⑤ 中国科学院大学天文与空间学院, 北京 100049;

⑥ 喀山联邦大学地质学院, 俄罗斯喀山 420008

*联系人, E-mail: mengzg@jlu.edu.cn, dongxg21@mails.jlu.edu.cn

收稿日期: 2022-07-25; 接受日期: 2022-01-01

国家重点研发计划(编号: 2021YFA0715104)、国家自然科学基金(编号: 42071309)、月球与行星科学国家重点实验室开放课题(澳门科技大学)(澳门 FDCCT 编号: 119/2017/A3)、澳门科学技术发展基金(编号: 0059/2020/A2)和吉林省自然科学基金(编号: 20220101159JC)资助项目

摘要 嫦娥三、四和五号的原位月壤探测为基于嫦娥一、二号卫星微波辐射计数据的月球科学研究提供了重要参考。论文基于嫦娥二号卫星微波辐射计数据, 生成了着陆区亮温图; 为了消除亮温随纬度变化的影响, 突出亮温与月壤成分之间的关系, 定义和制作了规则亮温图和亮温差图; 基于 Kaguya MI 数据, 制作了研究区氧化亚铁、氧化钛、单斜辉石和橄榄石含量图; 结合原位月壤探测成果, 系统分析了嫦娥三号、四号和五号着陆区月壤的微波热辐射特性。主要研究发现包括以下三点: (1) 嫦娥五号着陆区具有稳定的亮温表现, 表明该地区月壤成分随深度的变化不明显, 可以作为微波热辐射异常研究的重要参考; (2) 嫦娥三号着陆区月壤探测范围内存在分层结构, 以低频数据为代表的深层、以高频数据探测为代表的浅层和以可见光成果为代表的表层, 成分变化很大; (3) 在嫦娥四号着陆区发现并提出了微波冷异常的存在, 并初步分析了微波冷异常的成因机制。论文研究发现微波辐射计数据可用于月海玄武岩的识别, 可以为深化未来的月海岩浆演化研究提供重要的科学参考。

关键词 嫦娥计划, 月壤原位探测, 微波辐射计, 微波热辐射特性, 岩浆演化, 微波冷异常

PACS: 96.20.-n, 95.85.Bh, 95.55.-n, 95.55.Pe

引用格式: 作者 1, 作者 2, 作者 3. 题目(不超过 24 个汉字). 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 123456
Author A, Author B, Author C. Title (no more than 24 words) (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 123456, doi: 10.1360/SSPMA2016-00000

1 引言

我国嫦娥系列月球探测工程,首次携带了微波辐射计^[1],首次进行了月球背面南极艾肯盆地的着陆探测^[2],并首次采样带回了具有最小年龄的月海玄武岩^[3],在国际月球探测领域具有划时代的意义。

2013 年 12 月 2 日,我国成功发射了嫦娥三号(CE-3)卫星;2013 年 12 月 14 日,嫦娥三号成功在雨海西北部着陆。嫦娥三号卫星着陆地点位于月海盆地的北部(19.5115°W, 44.1213°N),海拔高度为-2.627 km(图 1a)。着陆点位于爱拉托逊纪地质单元内部,主要由中钛玄武岩构成^[4];距着陆位置约 15 km 的北部区域,分布着雨海纪低钛玄武岩。Xiao 等^[5]根据探月雷达探测结果和着陆点区域地质综合解译确定了超过 9 个地下层位,表明该地区自从雨海纪以来经历了复杂的地质过程。因此,嫦娥三号的着陆探测,对理解漫长的月海岩浆演化历史具有重要科学价值。

2018 年 12 月 8 日,嫦娥四号(CE-4)探测器成功发射。2019 年 1 月 3 日,嫦娥四号成功着陆在月球背面的南极艾特肯盆地冯卡门撞击坑内(177.5991°E, 45.4446°S, 图 1b),在国际上首次进行了月球背面着陆探测。目前,玉兔二号月球车已在月面稳定探测 41 个月昼,创造了世界月球车最长巡视工作记录,获取了大量探测数据。在国际上首次实现月球背面形貌、矿物组分和环境探测,获得了对月球背面形貌、内部物质组成、早期撞击历史、岩浆喷发历史、以及月壤形成机制和太空风化特性等的新认识^[6]。

嫦娥五号(CE-5)任务是我国探月三期计划的首个月球探测任务,所研制的嫦娥五号探测器是我国探月工程的第 5 个月球探测器。2020 年 12 月 1 日,嫦娥五号探测器成功着陆在吕姆克山脉以北预选着陆点(51.916°W, 43.058°N, 图 1c),2020 年 12 月 2 日,顺利完成月面自动钻取采样任务和月表采样任务,采集了 1731 g 月壤、岩石样本^[7]。Lin 等^[8]和 Che 等^[9]的测量结果显示,着陆区熔岩流异常年轻,约为 20 亿年^[3],显著年轻于 Apollo 和 Luna 计划返回的玄武岩(39~31 亿年)。对嫦娥五号月壤样品的精确定年,可以有效提高撞击坑年代学在 10~30 亿年之间定年精度,对揭示月球年轻火山活动的成因和性质、深入

理解晚期月球内部物质组成和热演化历史具有重要意义^[10]。

嫦娥三、四和五号着陆设备上都携带有成分探测装置和测月雷达设备,可以有效获取巡视区的月表物质成分信息和浅表层的分层结构信息,对拓展星载遥感数据的应用研究具有十分重要的参考价值^[5, 9, 11]。

在国内外月球探测方面,我国嫦娥一、二号卫星首次搭载了微波探测仪(Microwave Radiometer, MRM),获取了多次覆盖全月球表面的亮温数据^[12]。亮温数据反映了月球表层、次表层的物理特性、内部演变过程、外部各种因素对月球的影响以及月球与周围环境之间的关系与能量交换,在月球科学、宇宙科学及地球科学等研究中具有重要意义。同时,微波具有一定的穿透性,MRM 数据也是获得月壤密度、成分、介电常数以及内部热流等参数的极佳数据源^[12-17]。Meng 等^[18]首次将 MRM 数据应用于雨海地质研究,取得了有别于可见光成果的研究发现。胡硕等^[19]在冯卡门撞击坑,也发现了具有异常亮温特征的月壤物质。但是, Meng 等^[18]和胡硕等^[19]对微波与可见光探测结果部分不完全吻合的现象,缺乏有效的科学验证。嫦娥三和四号的着陆区正好位于异常微波亮温区。因此,综合嫦娥三、四和五号的原位月壤探测成果,能够为理解月壤的微波热辐射异常提供极好的参考。

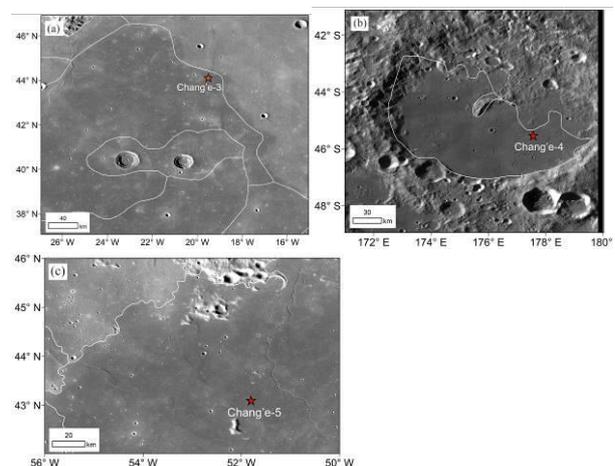


图 1 着陆区月球勘测轨道飞行器相机广角相机影像:(a)嫦娥三号,(b)嫦娥四号,(c)嫦娥五号着陆区。图中,红星代表着陆点位置;白线是嫦娥三、四和五号着陆区分别由 Hiesinger 等^[20]、Stuart-Alexander^[21]和 Qian 等^[22]划分的地质单元边界。

Figure 1 Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) wide angle camera (WAC) images of landing regions of (a) CE-3, (b) CE-4,

and (c) CE-5. Here, the red stars represent the landing sites, and the lines in white are the basaltic boundaries of CE-3, 4 and 5 landing regions interpreted by Hiesinger et al.^[20], Stuart-Alexander^[21], and Qian et al.^[22], respectively.

论文基于嫦娥二号卫星微波辐射计数据,系统分析了嫦娥三、四和五号着陆区的亮温特征;结合原位月壤探测成果,综合对比分析了嫦娥三、四、五号着陆区的月壤微波热辐射特性,探讨了异常亮温表现可能的成因机制。这些结果对拓展微波辐射计数据的应用、深入理解月壤的微波热辐射特性具有重要意义。

2 数据处理

从 2010 年 10 月 15 日到 2011 年 5 月 20 日,嫦娥二号 MRM 对月球表面进行了约 5000 小时的观测,工作频率包括 3.0 GHz、7.8 GHz、19.35 GHz 和 37 GHz^[16, 17]。嫦娥二号 MRM 的积分时间是 200 ms,观测角度为 0°,温度敏感度优于 0.5 K^[16, 17]。嫦娥二号卫星飞行高度约为 100 km,MRM 在 3.0 GHz 通道的空间分辨率约为 25 km,剩余三个通道的空间分辨率约为 17.5 km。本文采用的是经过系统校正和几何校正的 2C 级数据产品,该数据可以从中国探月工程数据发布和信息服 务系统 (https://moon.bao.ac.cn/ce5web/searchOrder_pdsData.search) 获得。嫦娥二号微波辐射计数据的细节描述可以参考 Cai 等^[23]和 Zheng 等^[16]。

2.1 微波亮温制图

本研究采用 Zheng 等^[16, 17]的时角分析方法,计算原始亮温数据点的月球地方时,将原始亮温数据点归类于 24 个月球时。然后,对原始亮温数据点进行散点分析,观测各个时间段的亮温点的覆盖范围,确定适合成图的时间。根据散点图分布特征,原始亮温数据点沿东西方向的空间分辨率约为 1°,而沿南北方向具有分辨率相对较高;考虑到同一时角条件下亮温沿东西方向的变化相对较小^[18],因此,采用线性插值方法,生成白天和夜晚时刻的着陆区域亮温图,空间分辨率为 0.25° × 0.25°。

亮温随纬度的变化(简称纬度效应)是制约微波辐射计数据应用于研究月壤热物理参数的主要问题之一^[18]。由于着陆区均在中纬度地区,亮温随纬度(表面温度)变化非常明显。为了削弱亮温的纬度效应,Meng 等^[18]提出了规则亮温制图和亮温差制图方法,

这两种方法很好的突出了亮温与月壤热物理特性的关系。

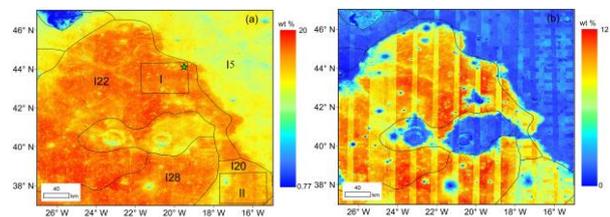
制作规则亮温(Normalized Brightness Temperature, nTB)图,需要先在每个纬度范围内上选择一个标准亮温点。生成标准亮温时,需结合月表坡度、铁钛含量和岩块丰度等资料,保证所有选择亮温点位置具有相近的月表环境。根据所选择的亮温数据,做亮温随纬度变化的拟合曲线,将拟合值定义为该纬度的标准亮温。最后,每个纬度上的亮温除以所在纬度对应的标准亮温,即可得到研究区的规则亮温图。

亮温差(Brightness Temperature Difference, dTB)定义为同一频率条件下,同一位置不同观测时刻的亮温值做相减处理。研究中,一般采用白天和夜晚亮温数据做亮温差图,可以明显突出亮温与月壤物性参数的关系。

白天和夜晚的规则亮温表现,反映了月表月壤的物质成分特征;多通道微波亮温差数据,反映了对应微波波长可穿透深度范围内的月壤成分特征^[18]。因此,综合规则亮温和亮温差图,对追踪浅表层月壤物质成分分布具有重要意义。

2.2 月壤成分分布图

本研究基于 Kaguya 卫星多波段成像仪(MI)数据,采用了 Wang 等^[24]提供的方法,反演了研究区氧化亚铁(FeO)和氧化钛(TiO₂)含量;采用 Lemelin 等^[25]提供的方法,反演了研究区单斜辉石(Clinopyroxene)和橄榄石(Olivine)含量分布。图 2、3 和 4 分别是反演得到的嫦娥三、四、五号着陆区的氧化亚铁、氧化钛、单斜辉石和橄榄石含量分布图。图 2、3 和 4 中区域 I 为着陆点(绿色星号)所在区域,区域 II 是用于和区域 I 对比的典型区域。



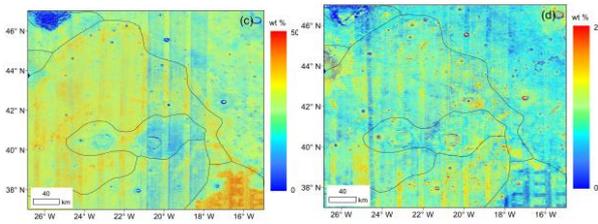


图 2 嫦娥三号着陆区域氧化亚铁、氧化钛、单斜辉石和橄榄石含量分布图。图中, I5、I20、I22 和 I28 是 Hiesinger 等^[20]识别的玄武岩单元。

Figure 2 FeO, TiO₂, clinopyroxene, and olivine abundances of CE-3 landing region. Here, the signals I5, I20, I22, and I28 are the basaltic units identified by Hiesinger et al.^[20].

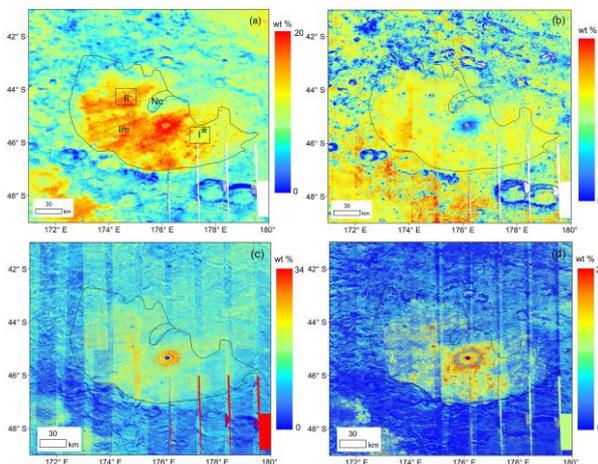


图 3 嫦娥四号着陆区域氧化亚铁、二氧化钛、单斜辉石和橄榄石含量分布图。图中, Im、Nc 是 Stuart-Alexander^[21]识别的地质单元。

Figure 3 FeO, TiO₂, clinopyroxene, and olivine abundances of CE-4 landing region. Here, the signals Im and Nc are the geologic units interpreted by Stuart-Alexander^[21].

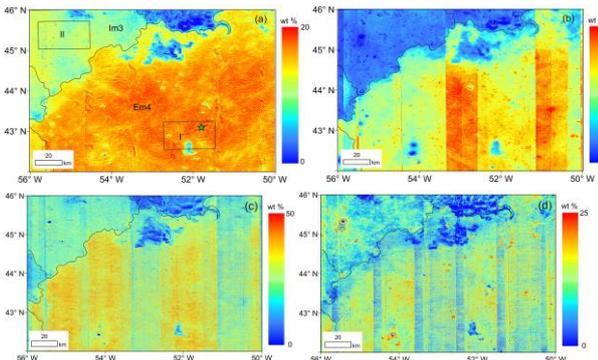


图 4 嫦娥五号着陆区域氧化亚铁、氧化钛、单斜辉石和橄榄石含量分布图。图中, Em4、Im3 等是由 Qian 等^[22]识别的玄武岩单元。

Figure 4 FeO, TiO₂, clinopyroxene and olivine abundances of CE-5 landing region. Here, the signals Em4 and Im3 are the basaltic units

identified by Qian et al.^[22].

图 2、3、4 表明, 嫦娥三号、四号和五号着陆区, 所在单元的 FeO 和 TiO₂ 含量都非常高, 明显高于相邻的玄武岩单元。相对来说, 嫦娥四号着陆点的四种矿物含量均明显低于嫦娥三号和五号着陆区, 也低于西北部以织女撞击坑 (176.15°E, 45.34°S) 为中心的区域。

统计结果表明 (表 1), 嫦娥三号和五号着陆区氧化亚铁含量最高, 分别为 18.3 wt.% 和 18.2 wt.%; 嫦娥五号着陆区的氧化钛含量略高于嫦娥三号着陆区。而嫦娥四号着陆区的氧化亚铁和氧化钛含量, 明显低于嫦娥三号和五号地区。

这里, 有两个问题需要注意:

1. 在嫦娥四号和嫦娥五号地区, 相对于周围单元来说, 着陆区不仅氧化亚铁和氧化钛含量高, 橄榄石和单斜辉石含量也高于周围单元。但在嫦娥三号着陆区, 所在 I22 单元的氧化亚铁、氧化钛和橄榄石含量明显高于南部 I20 单元, 但单斜辉石含量明显低于 I20 单元; 同时, 四种矿物含量, 在 I20 单元和 I28 单元的区分不明显。

2. 相对来说, 嫦娥三号和五号着陆区所在单元, 四种矿物成分的空间分布较为均匀。但在嫦娥四号着陆区所在单元, 矿物成分的空间分布非常不均匀, 且四种矿物出现高值的区域也不完全吻合。

嫦娥三、四、五号着陆区的矿物成分分布, 可以为理解着陆区月壤的微波热辐射特性提供重要参考。

表 1 嫦娥三、四、五号着陆区 (图 3、4 和 5 中的区域 I) 的矿物含量均值

Table 1 Average mineral abundances in CE-3, CE-4, and CE-5 landing sites (Region I in Figures 3, 4, and 5).

名称	含量 (wt.%)		
	CE-3	CE-4	CE-5
氧化亚铁	18.3	12.6	18.2
氧化钛	6.2	1.4	6.9
单斜辉石	28.2	14.2	33.1
橄榄石	14.2	7.5	13.2

3 着陆区微波热辐射特性

Campbell 等^[26]认为, 在月球表面, 微波的穿透

深度约为 10 至 20 倍波长,与目标区域的 FeO 和 TiO₂ 含量有关。嫦娥三号、四号和五号着陆区的 (FeO+TiO₂) 含量普遍较高。因此,微波穿透深度约为 10 倍波长,即四个通道的穿透深度约为 100 cm (3.0 GHz)、38.5 cm (7.8 GHz)、15.5 cm (19.35 GHz) 和 8.1 cm (37 GHz)。MRM 数据对可穿透深度范围内的温度和成分非常敏感;而可见光-热红外数据(包括 MI 数据)的穿透性极小,仅反映了月壤最表层的物质成分特征。因此,基于规则亮温和亮温差图,分析嫦娥三号、四号和五号着陆区浅层月壤的微波热辐射特性;结合 MI 数据成果,可以更深入地了解着陆区月壤的热物理特性和纵向分布特征。

3.1 嫦娥三号着陆区

嫦娥三号着陆区位于雨海北部, Hiesinger 等^[20]在该区域主要划分了两个期次的玄武岩:雨海纪玄武岩 (I5), 分布在着陆区东北部;爱拉托逊-雨海纪玄武岩 (I22), 分布在研究区西部;另外,在南部还分布有 2 个爱拉托逊-雨海纪玄武岩 (I28 单元和 I20 单元)。嫦娥三号着陆区位于 I22 单元。

图 5 是嫦娥三号着陆区白天和夜晚的规则亮温图。图 5 表明, I22 单元的规则亮温,白天明显高于 I5 单元,晚上则显著低于 I5 单元。基于理论模型,法文哲等^[28]、孟治国等^[29]认为, FeO 和 TiO₂ 含量较高的区域,白天呈现相对较高亮温,晚上的亮温则相对较低。嫦娥三号地区的亮温表现与基于理论模型的模拟结果吻合,也与图 2 中嫦娥三号地区具有相对较高的 FeO 和 TiO₂ 含量的反演结果一致。

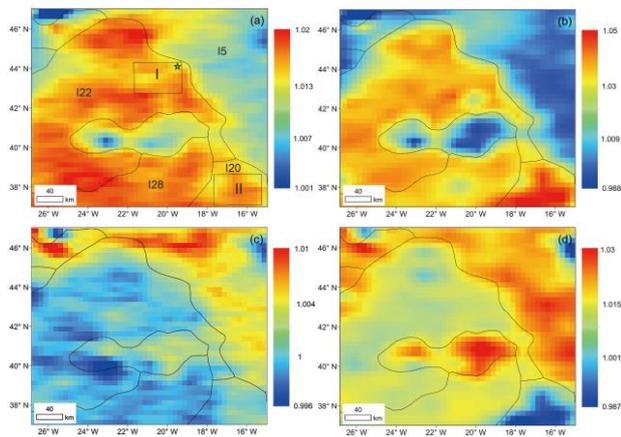


图 5 嫦娥三号着陆区域规则亮温图: (a) 3.0 GHz, 白天; (b) 37 GHz, 白天; (c) 3.0 GHz, 夜晚; (d) 37 GHz, 夜晚
Figure 5 nTB maps of CE-3 landing region: (a) 3.0 GHz, noon; (b) 37 GHz, noon; (c) 3.0 GHz, night; and (d) 37 GHz, night.

37 GHz, noon; (c) 3.0 GHz, night; and (d) 37 GHz, night.

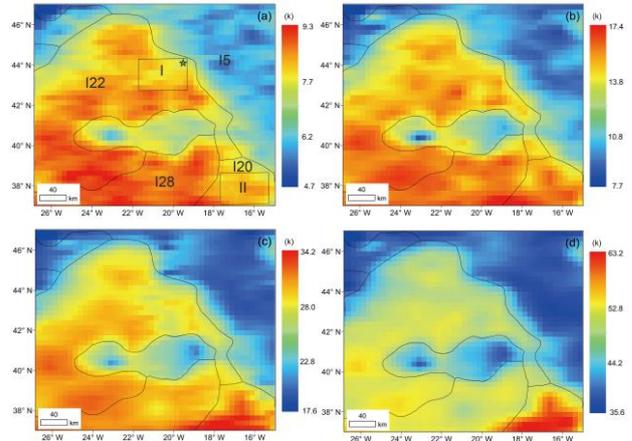


图 6 嫦娥三号着陆区域亮温差图: (a) 3.0 GHz; (b) 7.8 GHz; (c) 19.35 GHz; (d) 37 GHz

Figure 6 dTB maps of CE-3 landing region: (a) 3.0 GHz; (b) 7.8 GHz; (c) 19.35 GHz; and (d) 37 GHz.

图 6 是嫦娥三号着陆区的 4 个通道亮温差图,该图表明嫦娥三号着陆区所在的 I22 单元,亮温差明显高于东侧的 I5 单元,这与高的 FeO 和 TiO₂ 含量的反演结果一致。

图 5 和图 6 还表明, I22 与 I5、I22 和 I20 与南部 I28 单元的亮温边界,与可见光成果吻合的非常好;但是, I22 与 I28 单元之间的边界在规则亮温和亮温差图像上不显著,且两个单元的亮温没有出现明显的区分。

另外,东部 I5 单元和南部 I20 单元,亮温差随频率的变化比较稳定,分别显示出稳定的、相对较低和相对较高的亮温差。相对 I5 单元和 I20 单元来说, I22 单元的亮温差表现出明显的随频率变化的特征。统计结果表明(表 2),在 3.0 GHz 和 7.8 GHz, I22 单元与 I20 单元的亮温差相差不大,差值仅为 0.2 K 和 0.9 K;但在 19.35 GHz, I22 单元的亮温差略低于 I20 单元,差值约为 3.6 K;而在 37 GHz, I22 单元的亮温差明显低于 I20 单元,差值达到 21 K。

亮温差的这两种异常表现,是嫦娥三号着陆探测需要关注的科学问题之一。

表 2 嫦娥三号着陆区 I22 单元(区域 I)与 I20 单元(区域 II)的平均亮温差

Table 2 Average dTB of unit I22 (Region I) and unit I20 (Region II) in CE-3 landing site.

频率(GHz)	区域 I	区域 II
3	7.9 K	8.1 K
7.8	14.5 K	15.4 K
19.35	27.5 K	31.1 K
37	49.1 K	60.1 K

3.2 嫦娥四号着陆区

嫦娥四号着陆区位于 SPA 盆地中部的冯卡门撞击坑 (中心坐标 175.9°E, 44.8°S)。冯卡门撞击坑直径约为 180 km, 内部填充了雨海纪玄武岩 (Im 单元), 年龄约为 3.7 Ga^[30]。冯卡门撞击坑北部是莱布尼兹 (Leibnitz) 撞击坑, 东北部是芬森 (Finsen) 撞击坑, 东南部是阿尔德 (Alder) 撞击坑, 因此, 嫦娥四号着陆区表面受撞击事件溅射物的覆盖影响非常严重。另外, 图 3 表明, 冯卡门撞击坑表面广泛存在与撞击事件有关的、呈零星分布的成分异常, 这是由于早期月海玄武岩被后期撞击溅射物所覆盖、又被晚期的小型撞击事件挖掘出来。因此, 嫦娥四号着陆区的月壤经历了复杂的演化过程。

图 7 是嫦娥四号着陆区白天和夜晚的规则亮温图。图 7 表明, 冯卡门地区的规则亮温表现非常复杂, 主要表现在以下三个方面: (1) 这里没有出现与地质边界对应的规则亮温边界; (2) Im 单元的规则亮温表现出区域性特征, 相对来说, 单元内部北边规则亮温较低, 中部规则亮温较高, 而嫦娥四号着陆区所在的东部 (区域 I) 规则亮温较低, 表明 Im 单元内部的物质成分分布是不均匀的。(3) 嫦娥四号着陆区 (区域 I), 白天和晚上都出现了相对较低的规则亮温 (表 3), 目前的理论模型无法解译这一现象。

图 8 是嫦娥四号着陆区在 4 个通道的亮温差图。图 8 表明, 在 Im 单元中间, 出现了大致与 FeO 含量分布 (图 3a) 相吻合的高亮温差分布; 而在嫦娥四号着陆区 (区域 I) 也出现了相对较高亮温差, 区域 I 的亮温差在 7.8 GHz、19.35 GHz 和 37 GHz 为整个 Im 单元内部最高。

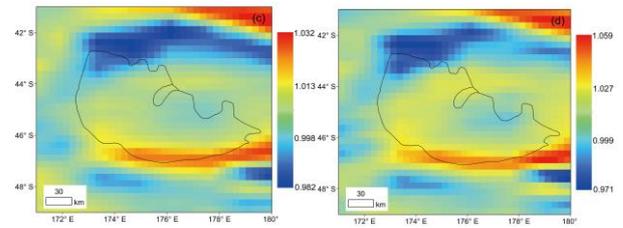
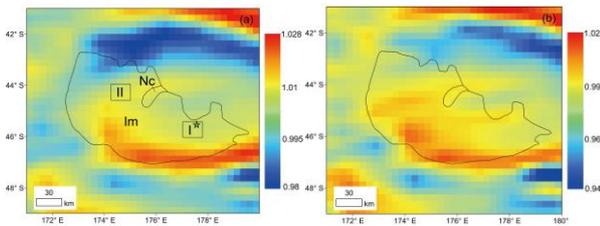


图 7 嫦娥四号着陆区域规则亮温图: (a) 3.0 GHz, 白天; (b) 37 GHz, 白天; (c) 3.0 GHz, 夜晚; (d) 37 GHz, 夜晚
Figure 7 nTB maps of CE-4 landing region at (a) 3.0 GHz, noon; (b) 37 GHz, noon; (c) 3.0 GHz, night; and (d) 37 GHz, night.

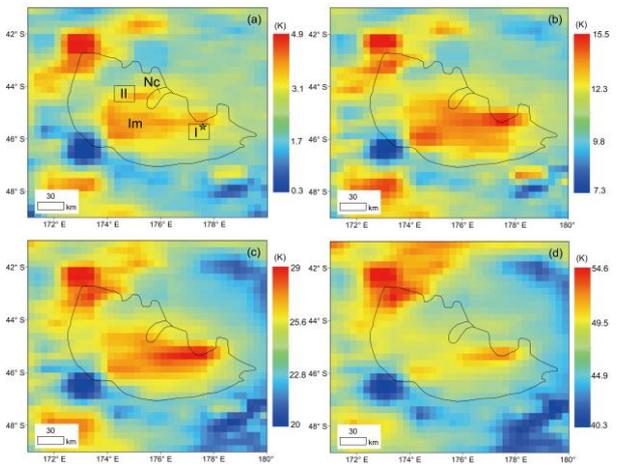


图 8 嫦娥四号着陆区域亮温差图: (a) 3.0 GHz; (b) 7.8 GHz; (c) 19.35 GHz; (d) 37 GHz
Figure 8 dTB maps of CE-4 landing region at (a) 3.0 GHz; (b) 7.8 GHz; (c) 19.35 GHz; and (d) 37 GHz.

表 3 嫦娥四号着陆区 I 与典型区域 II 的规则亮温平均值
Table 3 Average nTB of CE-4 landing site region I and typical region II.

频率(GHz)	区域 I		区域 II	
	白天	夜晚	白天	夜晚
3	1.006	1.004	1.007	1.005
7.8	1.004	0.99	1.009	1.001
19.35	1.001	0.996	1.003	1.007
37	0.991	1.007	0.996	1.02

这种异常规则亮温和亮温差表现, 是嫦娥四号着陆探测需要关注和解决的科学问题。

3.3 嫦娥五号着陆区

嫦娥五号着陆区位于风暴洋东北边界处, 主要由中钛、富含橄榄石的爱拉托逊纪玄武岩 (Em4 单元) 构成^[31]。根据样本测试结果, 嫦娥五号地区玄武岩的年龄约为 1.963 ± 0.057 Ga^[9]或 2.011 ± 0.050 Ga^[3], 是

目前月球上已返回样本中年龄最小的玄武岩。

图 9 是嫦娥五号着陆区白天和夜晚的规则亮温图。图 9 表明，嫦娥五号着陆区所在的 Em4 单元，相对于周围单元，白天的规则亮温都很高，晚上的规则亮温则最低。与嫦娥三号地区一样，嫦娥五号地区的亮温表现与基于理论模型的模拟结果吻合，也与图 4 中该地区具有相对较高的 FeO 和 TiO₂ 含量的反演结果一致。

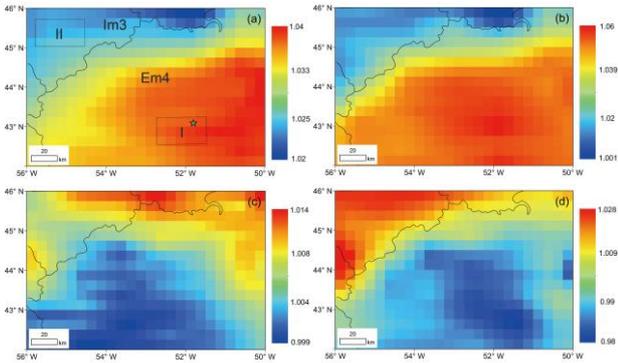


图 9 嫦娥五号着陆区域规则亮温图: (a) 3.0 GHz, 白天; (b) 37 GHz, 白天; (c) 3.0 GHz, 夜晚; (d) 37 GHz, 夜晚
Figure 9 nTB maps of CE-5 landing region at (a) 3.0 GHz, noon; (b) 37 GHz, noon; (c) 3.0 GHz, night; and (d) 37 GHz, night.

图 10 是嫦娥五号着陆区在 4 个通道的亮温差图。相对于嫦娥三号、四号地区，嫦娥五号地区的亮温差表现具有两个特点: (1) Em4 单元的亮温差最高，与该地区具有最高 FeO 和 TiO₂ 含量的反演结果吻合; (2) 相对于西北部 Im3 单元，在 4 个观测通道，Em4 单元均表现出较高的亮温差，亮温差随频率的变化稳定 (表 4)。

结合微波数据的穿透特征^[26, 32]，得到如下结论微波辐射计数据没有穿透该地区的月壤层，且该地区成分随深度的变化是均匀的。

Xie 等^[33]认为，长期的撞击作用会促使局部区域月壤混染来自其他地区的物质；但在嫦娥五号着陆区，亮温差随频率的变化稳定。表明，微波辐射计数据受溅射物覆盖的影响比较小，规则亮温和亮温差表现直接反映了 Em4 单元玄武岩物质的微波热辐射特性。

嫦娥五号着陆区稳定的亮温表现和高的 FeO 和 TiO₂ 含量，表明这里的月壤在微波辐射计数据可穿透的深度范围内 (约为 1 m)，成分是均匀的。因此，嫦娥五号着陆区可以作为新的月表定标场，月壤成分

相关的研究成果，不仅可以为未来星载可见光和微波遥感器的定标提供新的重要定标参数，而且为深入理解嫦娥三号和四号地区的异常亮温表现提供了重要参考。

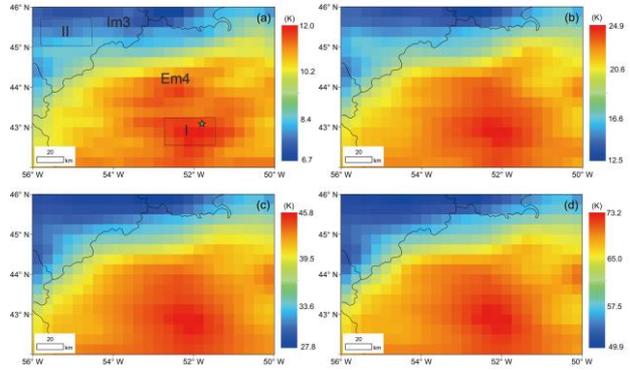


图 10 嫦娥五号着陆区域亮温差图: (a) 3.0 GHz; (b) 7.8 GHz; (c) 19.35 GHz; (d) 37 GHz
Figure 10 dTB maps of CE-5 landing region at (a) 3.0 GHz; (b) 7.8 GHz; (c) 19.35 GHz; and (d) 37 GHz.

表 4 嫦娥五号着陆区 Em4 单元 (区域 I) 与 Im3 单元 (区域 II) 的平均亮温差

Table 4 Average dTB in CE-5 landing site in Unit Em4 (Region I) and Unit Im3 (Region II).

通道(GHz)	区域 I	区域 II
3	11.6 K	7.8 K
7.8	24.1 K	15.2 K
19.35	44.3 K	30.2 K
37	71.3 K	52.2 K

4 结果和讨论

以嫦娥五号着陆区亮温表现为参考，对嫦娥三号和四号着陆区的亮温异常进行了评估，并发现了一些有意义的地质现象。

4.1 CE-3 着陆区的分层月壤结构分析

在嫦娥三号着陆区，相对于亮温随频率表现较稳定的 I20 单元和嫦娥五号着陆区的 Em4 单元，I22 单元表现出亮温差随频率变化相对较大的情况。

在嫦娥五号着陆区，Em4 和 Im3 单元的 4 通道亮温差差值分别是 3.8 K、8.9 K、14.1 K 和 19.1 K；而在嫦娥三号着陆区，I22 单元和 I20 单元的亮温差差值，在 3.0 GHz 和 7.8 GHz 仅为 0.2 K 和 0.9 K，在 19.35 GHz 为 3.6 K，而在 37 GHz 达到 21 K。即嫦娥

三号着陆区 I22 单元和 I20 单元的亮温差差值在低频非常小,而在高频过大。因此,在 1 米的深度范围内, I22 单元的月壤很可能存在分层结构。

图 6 和表 2 表明,在 3.0 GHz 和 7.8 GHz, I22 单元的亮温差略低于 I20 单元,且亮温差都明显高于东部 I5 单元,表明 100 cm 和 38.5 cm 的月壤深度范围内,两个单元 FeO 和 TiO₂ 含量接近,且都比较高;在 19.35 GHz 和 37 GHz, I22 单元的亮温差明显低于 I20 单元,表明在 15.5 cm 的月壤深度范围内 I22 单元的 FeO 和 TiO₂ 含量明显低于 I20 单元。因此,在 38.5 cm 和 15.5 cm 的月壤深度范围内, I22 单元应该存在月壤分层结构:下层以低频亮温数据为代表,具有较高的 FeO 和 TiO₂ 含量(该单元的第三层月壤);上层以高频亮温数据为代表,具有相对较低的 FeO 和 TiO₂ 含量(该单元的第二层月壤)。

但是,可见光探测结果表明, I22 单元的 FeO 和 TiO₂ 含量明显高于 I20 单元,与微波辐射计高频探测结果相反。因此,在 37 GHz 穿透深度范围内(8.1 cm),应该还存在一个分层:上层以可见光数据为代表,具有较高的 FeO 和 TiO₂ 含量(该单元的第一层月壤);下层为以高频数据为代表的第二层月壤。即在 1 米的深度范围内,嫦娥三号着陆区的月壤存在三个分层。

对月球次表层结构的研究和探测,对于研究太阳系的早期演化过程、月壤的演化过程、月壳组成成分以及太阳风和外来陨石等方面的科学信息具有重要意义^[34]。我国的嫦娥三号“玉兔号”巡视器搭载有测月雷达,有两个工作通道,第 1 通道的中心频率为 60 MHz,主要用于探测巡视路径下浅月壳的地质结构;第 2 通道的中心频率为 500 MHz,用于探测巡视区域月壤层的厚度和结构^[5]。Xiao 等^[5]根据探月雷达探测的结果和着陆点区域地质综合解释确定了超过 9 个地下层位,表明该地区自从雨海纪以来经历了复杂的地质过程。

但是,这些基于测月雷达数据得到的分层层位,都在 1 m 以上的月壤深度;由于雷达数据的分辨率和直达波的干扰,1 m 以内的月壤分层界面难以识别^[5]。因此,微波辐射计的探测发现,可以为未来进一步分析测月雷达数据,获取浅表层的分层月壤结构信息提

供重要支撑。

4.2 CE-4 着陆区的微波冷异常

图 7 表明,在嫦娥四号着陆区,这里白天和晚上的规则亮温都明显低于撞击坑底部 1m 单元的其他区域。这种热辐射异常是此前研究中都没有提及的,不仅有别于热红外研究中的冷点异常,而且也是基于我国嫦娥一号和二号卫星微波辐射计数据的独特的研究发现。因此,定义这种白天和晚上亮温都相对较低的微波热辐射异常为微波冷异常。

结合理论模型, Fa 等^[35]和孟治国等^[29, 36]认为,亮温的主要影响因素是(FeO+TiO₂)含量、岩块丰度、表面坡度等。但是,较高的(FeO+TiO₂)含量会造成白天的高亮温和晚上的低亮温,这就排除了(FeO+TiO₂)含量的影响。在月陆赫兹普龙撞击坑区域, Meng 等^[37]发现,较大的岩块丰度对亮温的影响是:白天, 37 GHz 为高亮温异常,而在 3.0 GHz 和 7.8 GHz 为低亮温异常,夜间则均表现为低亮温异常,因此,嫦娥四号着陆区的亮温表现也可以排除岩块丰度异常造成的影响。表面坡度则与地形有关,出现向阳坡的高亮温异常和背阳坡的低亮温异常,显然也不能解释嫦娥四号着陆区的微波冷异常。

基于 LRO 卫星 Diviner 数据, Bandfield 等^[38]和 Hayne 等^[39]也发现月表存在大量的夜间冷点,冷点地区的月壤热惯量比月表平均值低 10-30%。根据嫦娥四号探测器对着陆区月壤温度的就位测量结果, Xiao 等^[40]认为研究区的月壤热导率极低。这些发现表明,嫦娥四号着陆区的微波冷异常,很可能是低的月壤热惯量和热导率等因素造成的;由于月球表面的能量主要来自太阳辐射^[41],极低的热导率使得表层以下的月壤温度相对较低,从而导致了嫦娥四号着陆区白天和晚上的亮温均低于周围地区。

但是,目前仍缺乏对微波冷异常性质和形成的探讨。从亮温差图(图 8)来看,在微波冷异常区域,出现了较大的昼间和夜间亮温差,与该地区相对较高的氧化亚铁含量一致,表明嫦娥四号着陆区亮温表现还是受月壤成分的控制。考虑到氧化亚铁、单斜辉石、橄榄石含量不能解释该地区的微波冷异常。因此,我们假设,可能存在一种未知成分,造成了嫦娥四号着陆区的微波冷异常;由于具有相同的形成演化机制,

该未知成分具有与氧化亚铁相近的空间分布特征。

根据样品测量结果,可以得到嫦娥五号着陆区详细的月壤矿物成分含量^[3](表 5)。而在嫦娥四号着陆区, Qiao 等^[42]根据 Kaguya MI 数据,估算得到冯·卡门撞击坑地区斜长石(PLAG)含量约为(~54 wt.%)、斜方辉石(OPX)约为(~24 wt.%)、橄榄石(OL)约为(~9 wt.%)。Li 等^[43]采用修正高斯模型对玉兔二号的原位测量的 VNIS 数据进行解混,得到 CE4_0015 观测点低钙斜长石(LCP)、高钙斜长石(HCP)、橄榄石(OL)的丰度比为 42%:10%:48%, CE4_0016 观测点 LCP、HCP、OL 的丰度比为 38%:7%:55%。Liu 等^[44]基于玉兔二号 VNIS 光谱仪获得的原位光谱,采用光谱指数模型和修正高斯模型,估算了嫦娥四号着陆区的月壤矿物组分特征,并通过混合 CPX、OPX、OL 和 PLAG 这 4 种矿物制备了 9 个嫦娥四号着陆区模拟月壤样本,其中第 6 号模拟月壤样本的 TiO₂ 含量与嫦娥四号着陆区最接近,测量结果见表 5。表 5 表明,除了 SiO₂、Al₂O₃、MgO、Na₂O 和 K₂O,嫦娥四号地区月壤的主要矿物成分含量均低于嫦娥五号地区,尤其是 FeO(嫦娥四号模拟样本为 Fe₂O₃)、TiO₂ 和 CaO 含量的差异非常明显。根据前述讨论,FeO 和 TiO₂ 不能解释嫦娥四号地区的微波冷异常。因此,未来研究中需要关注 SiO₂、Al₂O₃、MgO、Na₂O、K₂O 和 CaO 成分对亮温的影响。但是,嫦娥四号着陆区的矿物化学成分只是模拟月壤的分析结果,不一定能代表嫦娥四号着陆区真正的矿物成分;同时,也不排除是某种含量极少的化学成分造成的影响,如 MnO 和 P₂O₅。

目前嫦娥四号还在工作寿命期,期待能有更多更详细的成分数据成果的出现。未来,需要根据矿物和成分含量的对比,结合地面仿真实验,来进一步确认微波冷异常的成因机制。

表 5 嫦娥五号着陆区月壤样品^[3]和嫦娥四号着陆区模拟月壤样品(第 6 个样本)^[44]的矿物成分及含量

Table 5 Mineral composition of lunar regolith samples from CE-5^[3] and CE-4 (No.6 regolith simulant by Liu et al.^[44]) landing sites.

矿物成分	含量 (wt.%)	
	CE-4	CE-5
SiO ₂	53.6	42.2
TiO ₂	0.69	5.0

Al ₂ O ₃	12.24	10.8
FeO	-	22.5
Fe ₂ O ₃	9.26	-
MnO	0.13	0.28
MgO	11.99	6.48
CaO	7.51	11.0
Na ₂ O	3.67	0.26
K ₂ O	0.4	0.19
P ₂ O ₅	0.05	0.23
Total	99.61	98.94

4.3 MRM 数据的潜在地质价值

以嫦娥五号着陆区为参考,在嫦娥三号着陆区,有两个有意义的地质现象需要注意。

(1) 微波辐射计数据对月海玄武岩的代表性

Hiesinger 等^[45, 46]、Haruyama 等^[47]和 Kramer 等^[48]对不同期次玄武岩识别的主要依据之一是 FeO 和 TiO₂ 含量。月球上没有液态水, Meng 等^[49]通过对月表亮温和 FeO、TiO₂ 含量的对比分析,认为在局部范围内亮温的控制因素是 FeO 和 TiO₂ 含量。因此,从原理上来说,嫦娥一号和二号微波辐射计数据可以用来识别和区分不同期次的玄武岩。

在嫦娥三号和五号地区,亮温表现与基于可见光数据划分的玄武岩单元边界出现了极好的吻合。在嫦娥三号地区, I22 和 I20 单元与东部 I5 单元、I22 和 I28 单元与南部 I20 单元亮温边界与地质单元边界吻合极好;在嫦娥五号着陆区, Em4 单元与西北部的 Im3、Im2 单元等,亮温边界与地质单元边界吻合得非常好。这表明,微波辐射计数据可以用于月海玄武岩单元的识别研究,作为可见光成果的有效补充。

但是在 3.1 节的分析中,我们发现,在嫦娥三号着陆的 I22 单元,与相邻的 I28 单元,无论是白天和晚上的规则亮温图,还是亮温差图,都没有明显差异。这两个单元的 FeO 和 TiO₂ 含量接近(图 2),橄榄石和单斜辉石含量也没有明显差异,部分支撑了基于微波辐射计数据的研究发现。值得注意的是, Wu 等^[27]基于高分辨率影像 LROC 窄角相机数据、高光谱影像(月球矿物测绘仪和嫦娥一号干涉成像光谱仪数据)、多波段影像(LROC WAC 和 Clementine UV-VIS 数据)、70 cm 波长的地基雷达数据、地形数据等对嫦娥三号着陆区进行了研究,获得了细致的地质图和年

轻的年龄, 包括清晰的、不同阶段的熔岩流面; 通过分析雨海北部的地质、构造和成分特征, 也将 I22 和 I28 合并为一个单元。Morgan 等^[50]基于地基雷达的雨海玄武岩研究, 也没有发现 I22 单元和 I28 单元之间边界的存在。因此, 微波辐射计对 I22 单元和 I28 单元玄武岩的识别是可靠的, 两者应该是一个单元。相对来说, 微波具有一定的穿透性; 在微波可穿透的月壤深度范围内, 物质成分受溅射物覆盖污染和空间风化的影响较弱^[51], 这在接近月陆的玄武岩地区表现的更加明显。因此, 微波辐射计数据可以用来识别不同期次的月海玄武岩物质, 作为可见光研究成果的重要补充。

(2) 嫦娥三号着陆区亮温成果的地学价值

在月球科学研究中, 玄武岩单元 FeO 和 TiO₂ 含量与年龄的关系尚未有定论。基于微波辐射计数据的 I20 和 I22 单元亮温特征的探讨, 对深入理解 FeO 和 TiO₂ 含量与年龄的关系具有重要的参考意义。

I20 和 I22 单元的年龄, 也是雨海单元玄武岩研究中争议的焦点之一。在基于可见光数据的 I20 和 I22 单元研究中, I22 单元的 FeO 和 TiO₂ 含量高于 I20 单元^[20]。在美国 USGS 提供的 1: 500 万比例尺月球地质图中, 将 I20 和 I22 单元都列入了爱拉托逊纪^[52]; Hiesinger 等^[20]的研究结果认为, I22 单元的年龄为 2.96 Ga, 晚于 I20 单元的年龄 3.01 Ga; 在我国最新完成的 1: 250 万比例尺月球地质图中^[53], 将两个单元都列入 Emt 单元, 其中 I22 单元对应部分的年龄为 2.29 Ga、I20 单元对应部分的年龄为 2.31 Ga。因此, 至少在爱拉托逊纪, 玄武岩单元 FeO 和 TiO₂ 含量有随年龄减少而增大的趋势。

但是, 综合月球最新探测数据, Wu 等^[27]的研究认为 I20 单元的年龄 (2.26 Ga) 晚于 I22 单元 (2.35 Ga)。这就给玄武岩单元 FeO 和 TiO₂ 含量与年龄的研究带来了不确定性, 即二者之间的关系是复杂的。

微波辐射计数据为理解 I20 和 I22 单元的成分和年龄的关系提供了新的支撑。根据 4.1 节的分层月壤结构研究成果, I22 单元第一层月壤 (小于 8.1 cm) 的 FeO 和 TiO₂ 含量高于 I20 单元, 但第二层月壤 (大于 15.5 cm) FeO 和 TiO₂ 含量明显低于 I20 单元。Campbell 等^[26]的研究也发现雨海西部的中部地区 (大

致对应 I20 单元), 具有最高的 FeO 和 TiO₂ 含量。第一层月壤厚度较小, 如果以第二层月壤为代表, I20 单元的 FeO 和 TiO₂ 含量要高于 I22 单元。

因此, 基于微波辐射计数据的研究成果, 再次证实了该结论: 至少在爱拉托逊纪, 玄武岩 FeO 和 TiO₂ 含量有随年龄的减小而增大的趋势。微波辐射计数据为月海岩浆演化历史的探讨提供了新的重要参考, 值得进一步研究。

5 结论

本研究基于嫦娥二号卫星微波辐射计数据, 综合嫦娥三号、四号和五号的原位测量结果, 系统分析了综合嫦娥三号、四号和五号着陆区月壤的微波热辐射特性。主要研究发现包括:

(1) 嫦娥五号着陆区具有稳定的亮温和亮温差表现, 表明微波辐射计数据没有穿透该地区的月壤, 且该地区月壤成分随深度的变化均匀, 可以作为未来星载可见光和微波遥感器的定标场, 也为研究嫦娥三号和四号着陆区月壤的微波热辐射特性提供参考。

(2) 以嫦娥五号为参考, 在嫦娥三号着陆区发现亮温差随频率的相对变化不均匀, 表明在 1 m 的月壤深度范围内, 存在三个分层结构, 下层月壤 FeO 和 TiO₂ 含量较高, 第二层月壤 FeO 和 TiO₂ 含量较低, 表层月壤 FeO 和 TiO₂ 含量较高。

(3) 在嫦娥三号着陆区, 发现 I22 单元与 I28 单元可以合并为一个单元, 而 I22 单元的 FeO 和 TiO₂ 含量要低于南部 I20 单元, 部分支撑了岩浆演化观点: 玄武岩 FeO 和 TiO₂ 含量有随年龄的减小而增大的趋势。

(4) 相比较于嫦娥五号着陆区亮温, 在嫦娥四号着陆区发现并提出了微波冷异常的存在, 初步推测其成因是该地区月壤具有较低的热惯量和热导率, 并从矿物成分角度初步探讨了微波冷异常的性质和形成机制。

嫦娥三号、四号和五号着陆区的亮温对比, 表明微波辐射计数据可用于月海玄武岩的识别, 可以作为目前基于可见光的月海玄武岩研究的重要补充, 也为进一步分析嫦娥三号、四号和五号的原位测量数据提供了重要参考。

致谢 本研究所使用的 LROC WAC 影像和 Kaguya MI 数据由行星数据系统获取, 嫦娥二号卫星微波辐射计数据由探月工程数据发布与信息服务系统获取。在此表示感谢。

参考文献

- 1 Jiang J S, Wang Z Z, Li Y. Study on theory and application of CE-1 microwave sounding lunar surface (in Chinese). *Strategic Study of CAE*, 2008, (06): 16–22 [姜景山, 王振占, 李芸. 嫦娥 1 号卫星微波探月技术机理和应用研究. *中国工程科学*, 2008, (06): 16-22]
- 2 Huang J, Xiao Z Y, Flahaut J, et al. Geological Characteristics of Von Kármán Crater, Northwestern South Pole-Aitken Basin: Chang'E-4 Landing Site Region. *J Geophys Res*, 2018, 123(7): 1684-1700
- 3 Li C L, Hu H, Yang M F, et al. Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'E-5 mission. *Natl Sci Rev*, 2022, 9(2): nwab188
- 4 Qiao L, Xiao Z Y, Zhao J N, et al. Subsurface structures at the Chang' e-3 landing site: Interpretations from orbital and in-situ imagery data. *J Earth Sci*, 2016, 27(4): 707-715
- 5 Xiao L, Zhu P M, Fang G Y, et al. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang'E-3 mission. *Science*, 2015, 347(6227): 1226-1229
- 6 Wu R Y, Yu D R, Wang C, et al. Technological breakthrough and scientific achievement of Chang'e-4 project (in Chinese). *Sci Sin Inf*, 2020, 50(12): 1783–1797 [吴伟仁, 于登云, 王赤, 等. 嫦娥四号工程的技术突破与科学进展. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(12): 1783-1797]
- 7 Zhang S, Chen L P, Li T Y, et al. The positioning accuracy of the Lunar surface sampling and packaging mission of the Chang' e-5 probe (in Chinese). *Acta Geod et Cartogr Sin*, 2002, 51(5): 631–639 [张烁, 陈丽平, 李铁映, 等. 嫦娥五号探测器月面采样封装任务的定位精度. *测绘学报*, 2022, 51(05): 631-639]
- 8 Lin H L, Li S, Xu R, et al. In situ detection of water on the Moon by the Chang'E-5 lander. *Sci Adv*, 2022, 8(1): eab19174
- 9 Che X C, Nemchin A, Liu D Y, et al. Age and composition of young basalts on the Moon, measured from samples returned by Chang'e-5. *Science*, 2021, 374(6569): 887-890
- 10 Liu S Y, Zhou Q, Li Q L, et al. Chang'e-5 samples reveal two-billion-year-old volcanic activity on the Moon and its source characteristics (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2021, 51(12): 2048–2055 [刘守偈, 周琴, 李秋立, 等. 嫦娥五号样品揭示月球 20 亿年前火山活动及源区性质. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(12): 2048–2055]
- 11 Zeng Q H, Chen S B, Zhang Y Z, et al. Mineralogical and chemical properties inversed from 21-lunar-day VNIS observations taken during the Chang'E-4 mission. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 15435
- 12 Jiang J S, Wang Z Z, Zhang X H, et al. China probe CE-1 unveils world first Moon-globe microwave emission map—the microwave Moon some exploration results of Chang'E-1 microwave sounder (in Chinese). *Remote Sens Tech & App*, 2009, 24(04): 409–422 [姜景山, 王振占, 张晓辉, 等. 微波月亮——人类对月球的全新视角——中国“嫦娥一号”卫星微波探测仪若干探测结果. *遥感技术与应用*, 2009, 24(04): 409–422]
- 13 Keihm S J, Cutts J A. Vertical-structure effects on planetary microwave brightness temperature measurements: Applications to the lunar regolith. *Icarus*, 1981, 48(2): 201-229
- 14 Keihm S J. Effects of subsurface volume scattering on the lunar microwave brightness temperature spectrum. *Icarus*, 1982, 52(3): 570-584
- 15 Keihm S J. Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping. *Icarus*, 1984, 60(3): 568-589
- 16 Zheng Y C, Chan K L, Tsang K T, et al. Analysis of Chang'E-2 brightness temperature data and production of high spatial resolution microwave maps of the Moon. *Icarus*, 2019, 319: 627-644
- 17 Zheng Y C, Tsang K T, Chan K L, et al. First microwave map of the Moon with Chang' E-1 data: The role of local time in global imaging. *Icarus*, 2012, 219(1): 194-210
- 18 Meng Z G, Hu S, Wang T X, et al. Passive Microwave Probing Mare Basalts in Mare Imbrium Using CE-2 CELMS Data. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 2018, 11(9): 3097-3104
- 19 Hu S, Meng Z G, Zhu Y Z, et al. Microwave Emission Features of Von Kármán Crater Revealed by Chang'E-2 CELMS Data (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2018, 5(01): 20–26 [胡硕, 孟治国, 朱蕴哲, 等. 基于“嫦娥 2 号” CELMS 数据的冯·卡门撞击坑微波辐射特性. *深空探测学报*, 2018, 5(01): 20–26]
- 20 Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G, et al. Ages of mare basalts on the lunar nearside. *J Geophys Res*, 2000, 105(E12): 29239-29275
- 21 Stuart-Alexander D E. Geologic map of the central far side of the Moon. Technical Report, US Geological Survey Report.

- 1978
- 22 Qian Y Q, Xiao L, Zhao S Y, et al. Geology and Scientific Significance of the Rümker Region in Northern Oceanus Procellarum: China's Chang'E - 5 Landing Region. *J Geophys Res*, 2018, 123(6): 1407-1430
- 23 Cai Z, Lan T. Lunar Brightness Temperature Model Based on the Microwave Radiometer Data of Chang' e-2. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2017, 55(10): 5944-5955
- 24 Wang X M, Zhang J H, Ren H F. Lunar surface chemistry observed by the KAGUYA multiband imager. *Planet Space Sci*, 2021, 209: 105360
- 25 Lemelin M, Lucey P G, Miljković K, et al. The compositions of the lunar crust and upper mantle: Spectral analysis of the inner rings of lunar impact basins. *Planet Space Sci*, 2019, 165: 230-243
- 26 Campbell B A, Carter L M, Hawke B R, et al. Volcanic and impact deposits of the Moon's Aristarchus Plateau: A new view from Earth-based radar images. *Geology*, 2008, 36(2): 135-138
- 27 Wu Y Z, Li L, Luo X X, et al. Geology, tectonism and composition of the northwest Imbrium region. *Icarus*, 2018, 303: 67-90
- 28 Fa W Z, Jin Y Q. Global inventory of Helium-3 in lunar regoliths estimated by a multi-channel microwave radiometer on the Chang-E 1 lunar satellite (in Chinese). *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(32): 3097-3101 [法文哲, 金亚秋. “嫦娥一号”多通道微波辐射计测量估算全月球月壤层氦 3 含量. *科学通报*, 2010, 55(32): 3097-3101]
- 29 Meng Z G, Yang G D, Ping J S, et al. Influence of (FeO+TiO₂) abundance on the microwave thermal emissions of lunar regolith (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2016, 46(05): 720-729. [孟治国, 杨国东, 平劲松, 等. (FeO+TiO₂)含量对月壤微波热辐射的影响. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46(05): 720-729]
- 30 Ding C Y, Xiong S T, Li J, et al. Yutu-2 radar observation of the lunar regolith heterogeneity at the Chang'E-4 landing site. *Astron Astrophys*, 2022.
- 31 Hou X T, Fu X H, Qiao L, et al. Absolute model ages of three craters in the vicinity of the Chang'E-5 landing site and their geologic implications. *Icarus*, 2022, 372: 114730
- 32 Meng Z G, Chen S B, Zheng Y C, et al. Mare Deposits Identification and Feature Analysis in Mare Australe Based on CE - 2 CELMS Data. *J Geophys Res*, 2020, 125(7)
- 33 Xie M G, Xiao Z Y, Zhang X Y, et al. The provenance of regolith at the Chang'E - 5 candidate landing region. *J Geophys Res*, 2020, 125(5): e2019JE006112
- 34 Ding C Y, Feng J Q, Zheng L, et al. A Review of Applications of Radar-Detection Techniques in Lunar Explorations (in Chinese). *Astron Res & Technol*, 2015, 12(02): 228-242 [丁春雨, 封剑青, 郑磊, 等. 雷达探测技术在探月中的应用. *天文研究与技术*, 2015, 12(02): 228-242]
- 35 Fa W Z, Wicczorek M A. Regolith thickness over the lunar nearside: Results from Earth-based 70-cm Arecibo radar observations. *Icarus*, 2012, 218(2): 771-787
- 36 Meng Z G, Li C, Ping J S, et al. Analysis About Landing Site Selection and Prospective Scientific Objectives of the Von Kármán Crater in Moon Farside (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2018, 5(01): 3-11 [孟治国, 李翠, 平劲松, 等. 月面冯·卡门撞击坑的着陆选址和科学探测目标浅析. *深空探测学报*, 2018, 5(01): 3-11]
- 37 Meng Z G, Lei J T, Xiao Z Y, et al. Re-Evaluating Influence of Rocks on Microwave Thermal Emission of Lunar Regolith Using CE-2 MRM Data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2022, 60: 1-12
- 38 Bandfield J L, Song E, Hayne P O, et al. Lunar cold spots: Granular flow features and extensive insulating materials surrounding young craters. *Icarus*, 2014, 231: 221-231
- 39 Hayne P O, Bandfield J L, Siegler M A, et al. Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *J Geophys Res*, 2017, 122(12): 2371-2400
- 40 Xiao X, Yu S, Huang J, et al. Thermophysical properties of the regolith on the lunar farside revealed by the in-situ temperature probing of Chang' E-4 mission. *Natl Sci Rev*, 2022
- 41 欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社. 2005
- 42 Qiao L, Ling Z, Fu X, et al. Geological characterization of the Chang'e-4 landing area on the lunar farside. *Icarus*, 2019, 333: 37-51
- 43 Li C L, Liu D W, Liu B, et al. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials. *Nature*, 2019, 569(7756): 378-382
- 44 Liu C, Liu L, Chen J, et al. Mafic mineralogy assemblages at the Chang' e-4 landing site: A combined laboratory and lunar in situ spectroscopic study. *Astron Astrophys*, 2022, 658
- 45 Hiesinger H, Head Iii J, Wolf U, et al. Ages and stratigraphy of mare basalts in oceanus procellarum, mare nubium, mare cognitum, and mare insularum. *J Geophys Res*, 2003, 108(E7)
- 46 Hiesinger H, Head J W, Wolf U, et al. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: A synthesis. *Recent Advances and Current Research Issues in Lunar Stratigraphy*. 2011
- 47 Haruyama J, Ohtake M, Matsunaga T, et al. Long-lived volcanism on the lunar farside revealed by SELENE Terrain Camera. *Science*, 2009, 323(5916): 905-908
- 48 Kramer G Y, Jaiswal B, Hawke B R, et al. The basalts of Mare Frigoris. *J Geophys Res*, 2015, 120(10): 1646-1670
- 49 Meng Z, Yang G, Ping J, et al. Influence of (FeO+TiO₂) abundance on the microwave thermal emissions of lunar

- regolith [J]. *Sci China Earth Sci*, 2016, 59(7): 1498-1507.
- 50 Morgan G A, Campbell B A, Campbell D B, et al. Investigating the stratigraphy of Mare Imbrium flow emplacement with Earth - based radar [J]. *J Geophys Res Planets*, 2016, 121(8): 1498-1513.
- 51 Lei J T, Meng Z G, Wang Y Z, et al. Potential Applications of CE-2 Microwave Radiometer Data in Understanding Basaltic Volcanism in Heavily Ejecta-Contaminated Mare Frigoris. *Remote Sens*, 2022, 14(11)
- 52 Fortezzo C M, Spudis P D, Harrel S L. Release of the digital unified global geologic map of the Moon at 1: 5,000,000-Scale; In: *The 51st Lunar and Planetary Science Conference*, Houston: Lunar and Planetary Institute, 2020. 2760
- 53 Ji J Z, Guo D J, Liu J Z, et al. The 1:2,500,000-scale geologic map of the global Moon. *Sci Bull*, 2022, 67(15): 1544-1548

Analyzing the Microwave Thermal Emission Features of Lunar Regolith in Chang'E Landing Sites and Its Geologic Significance

MENG ZhiGuo^{1,2*}, TANG TianQi^{1,2}, DONG XueGang^{1,2*}, CHANG WenQing^{1,2}, ZOU Meng³, ZHANG HongBo⁴, Wang MingChang¹, CAI ZhanChuan², PING JinSong^{4,5}, ZHENG YongChun⁴, ZHANG YuanZhi^{4,5} and Alexander GUSEV⁶

¹ College of Ge exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

² The State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China;

³ Key Lab of Bionic Engineering (Ministry of Education), Jilin University, Changchun 130022, China;

⁴ National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁵ School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁶ Institute of Geology, Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia

The in-situ lunar regolith explorations of Chang'E 3, 4, and 5 landing sites provide an important reference for lunar research based on microwave radiometer (MRM) data from Chang'E 1 and 2 satellites. In order to eliminate the influence of brightness temperature with latitude and highlight the relationship between brightness temperature and lunar regolith composition, the normalized brightness temperature and brightness temperature difference maps were defined and produced. Based on Kaguya MI data, we calculated the FeO, TiO₂, clinopyroxene, and olivine abundances of Chang'E 3, 4, and 5 landing sites. Combined with the in-situ exploration results, the microwave thermal emission properties of the regolith in Chang'E 3, 4, and 5 landing regions were systematically analyzed. The main findings are as follows. (1) the Chang'E 5 landing region has a stable brightness temperature performance, indicating that the variation of lunar regolith composition with depth is not obvious in this area, which can be used as an important reference for microwave thermal radiation anomaly research; (2) there is a stratified structure within the lunar regolith detection range of Chang'E 3 landing region, with the lower layer represented by low-frequency data, the middle layer represented by high-frequency data, and the upper layer represented by optical results, composition changes greatly; (3) the presence of cold microwave anomalies were found and proposed in the Chang'E 4 landing region, and its nature and formation was preliminarily analyzed. It is found that the microwave radiometer data can be used for the identification of mare basalt, which can provide an important scientific reference for deepening future studies on the evolution of lunar mare magma.

Chang'E mission, in-situ exploration of lunar regolith, microwave radiometer, microwave thermal emission properties, basaltic volcanism, microwave cold anomaly

PACS: 96.20.-n, 95.85.Bh, 95.55.-n, 95.55.Pe

doi: 10.1360/SSPMA2016-00000

