

基于嫦娥二号微波辐射计数据的月表低亮温差异异常提出和地质成因分析

孟治国¹, 赵瑞^{1,2}, 蔡占川³, 张小平³, 张渊智^{4,5}, 邹猛⁶

1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026;

2. 武警工程大学 信息工程学院, 西安 710018;

3. 澳门科技大学 月球与行星科学国家重点实验室, 中国 澳门 999078;

4. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

5. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 100049;

6. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022

摘要: 月表冷异常是月球科学研究关注的重要内容之一。相对于热红外冷点异常, 本文基于嫦娥二号微波辐射计数据, 结合月表Clementine UV-VIS、LRO Diviner和DEM数据, 首次在莫斯科盆地发现并提出了低亮温差异异常, 并在史密斯海确认了低亮温差异异常的存在; 以亮温差表现正常的嫦娥五号着陆区为参考, 发现当前已知成分无法解释低亮温差异异常的成因; 通过对阿波罗盆地和巴尔默隐月海地区低亮温差异异常的研究, 发现造成低亮温差异异常的物质很有可能来自撞击事件对月壳深部物质的挖掘, 代表了月壳成分在纵向分布上的不均匀性。论文结果对进一步研究月球撞击演化历史和浅层月壳物质成分特征提供了新的重要参考。

关键词: 低亮温差异异常, 微波辐射计, 亮温, 月壤成分, 地质意义

中图分类号: P691/P2

引用格式: 孟治国, 赵瑞, 蔡占川, 张小平, 张渊智, 邹猛. 2025. 基于嫦娥二号微波辐射计数据的月表低亮温差异异常提出和地质成因分析. 遥感学报, 29(2): 472-481

Meng Z G, Zhao R, Cai Z C, Zhang X P, Zhang Y Z and Zou M. 2025. Proposal and geological significance of lunar low brightness temperature difference anomaly based on CE-2 MRM data. National Remote Sensing Bulletin, 29(2): 472-481 [DOI: 10.11834/jrs.20244001]

1 引言

月壤热物理性质是了解月球热演化历史、地质演化过程、原位资源利用的关键 (Heiken 等, 1991), 以热红外、微波观测为代表的遥感技术极大增强了人们对月壤热物理性质的理解。

当前, 对月表热活动异常的描述、取得的研究成果主要基于地基和星载热红外数据, 包括冷点和热点异常。基于地基天文望远镜进行月食期间的红外热辐射图像扫描, 发现月表存在大量温度异常区, 其热辐射明显高于周围环境, 定义为“热点”异常 (Shorthill, 1960)。Shorthill 和 Saari (1965) 基于 1964 年的月食观测数据, 对月

表热点进行了系统研究, 发现其中 90% 的热点位于新鲜撞击坑附近。Buhl (1971) 基于理论模型、Bandfield 等 (2011) 和 Williams 等 (2017) 基于 LRO Diviner 数据, 确认较大的岩块丰度是夜间月表热点异常的主要成因。

除了热点异常, Mendell 和 Low (1975) 基于 Apollo 17 红外辐射扫描仪数据提出月球表面还存在冷点异常, 其温度明显低于周围环境。Bandfield 等 (2011) 基于 LRO Diviner 数据发现月表存在大量冷点; Bandfield 等 (2014) 明确了冷点的定义, 提出冷点很可能是撞击挖掘的底部物质造成的。

随着基于嫦娥一、二号卫星微波辐射计 MRM (Microwave Radiometer) 数据的月壤探测的深入开

收稿日期: 2024-01-03; 预印本: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42071309); 国家重点研发计划(编号: 2021YFA0715104); 吉林省自然科学基金(编号: 20220101159JC); 澳门科学技术发展基金(编号: 0014/2022/A1, 0034/2024/AMJ, 0008/2024/AKP)

第一作者简介: 孟治国, 研究方向为月球被动微波遥感。E-mail: mengzg@jlu.edu.cn

展,多通道、多时相的MRM数据对月表热异常提供了新的数据支持。Chan等(2010)、Zheng等(2019)、宫晓蕙和金亚秋(2012)、Hu等(2018)、Liu和Jin(2019)都对岩块丰度较大区域的亮温做了系统分析,结合理论模型,认为夜间37 GHz亮温图中出现的“冷点”异常区域与月食期间热红外图像上的“热点”异常区域相吻合;基于理论模型和月陆典型地区的研究发现,Meng等(2022)提出,月表岩块丰度大的地方,晚上表现为低亮温,白天则表现为高频的高亮温和低频的低亮温,明显有别于热红外研究成果。国际探月领域基于热红外数据对月表热异常的定义和探讨明显不足以描述当前的最新研究发现。

但是,基于MRM数据进行月表热异常研究的最大挑战,是亮温随纬度的巨大变化,远大于月表物质成分的影响(Meng等,2018)。为了消除亮温随纬度的变化,Meng等(2018,2019)提出了亮温差dTB(Brightness Temperature Difference)概念,明显增强了亮温与月表物质成分的关系。基于亮温差数据,Meng等(2020)在莫斯科盆地周围月陆地区发现并首次提出了月表可能存在低亮温异常,但对这种异常存在的可靠性及可能的成因机制均缺少讨论。

因此,本文拟基于理论模型和MRM数据,结合Clementine UV-VIS、LRO Diviner和DEM数据对月表低亮温异常的存在及可能的地质成因进行系统讨论,以期对月表物质成分研究提供新的科学支持。

2 研究方法

2.1 月表亮温模拟

基于辐射传输方程,采用常用的月壤—月岩模型(Keihm,1982;Feng等,2020),数值模拟月表的亮温特征(Meng等,2022)。在微波辐射计观测方向角 θ_0 下,月表亮温TB(θ)由来自月壤层的辐射TB₁和来自月岩层的辐射TB₂组成,其中TB₁又包括上行辐射TB_{1up}和下行辐射TB_{1down},TB₂只有上行辐射TB_{2up}。

$$TB = TB_1 + TB_2 = TB_{1up} + TB_{1down} + TB_{2up} \quad (1)$$

其中,

$$TB_{1up} = \int_0^d \frac{1-r_{p1}}{1-L} k_{a1}(z) T(z) \sec \theta_1 e^{-\int_0^z k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz'} dz \quad (2)$$

$$TB_{1down} = \int_0^d \frac{(1-r_{p1})r_{p2}}{1-L} k_{a1}(z) T(z) \sec \theta_1 e^{-\left(\int_z^d k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz' + \int_0^z k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz'\right)} dz \quad (3)$$

$$TB_{2up} = \int_d^\infty \frac{(1-r_{p1})(1-r_{p2})}{1-L} k_{a2}(z) T(z) \sec \theta_2 e^{-\int_d^z k_{a2}(z') \sec \theta_2 dz'} dz \cdot e^{-\int_0^d k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz'} \quad (4)$$

式中, d 是月壤层厚度; θ_1 和 θ_2 分别是微波在月壤和月岩中的出射角; $p=h$ 或 v 分别是水平极化和垂直极化; k_{a1} 和 k_{a2} 分别是月壤层和月岩层的吸收系数; $T(z)$ 是月壤温度廓线; r_{p1} 和 r_{p2} 分别是真空—月壤界面和月壤—月岩界面的反射率; $1/(1-L)$ 是多次反射系数。

介电常数是反射率 r_{p1} 、 r_{p2} 和吸收系数 k_{a1} 、 k_{a2} 的决定性因素之一。Heiken等(1991)建立了介电常数实部 ϵ' 、损耗角正切 $\tan \delta$ 与(FeO+TiO₂)含量 S (wt.%)之间的关系:

$$\begin{cases} \epsilon' = 1.919\rho, \\ \tan \delta = 10^{0.038S + 0.312\rho - 3.260} \end{cases} \quad (5)$$

式中, ρ 是月壤密度。结合式(1)–(5),可以建立月表亮温与FTA之间的关系。

研究中,下伏基岩的介电常数假设为 $6.15 + i0.155$ (Apollo 15计划第1555采样点)。月壤厚度假设为6 m,远大于3.0 GHz微波的穿透深度(Campbell等,2008)。假设月表温度为390 K(正午)、300 K(白天)和200 K(晚上)、100 K(午夜),基于式(1)和热传导模型,得到不同频率条件下亮温随着FTA的变化曲线(图1)。图1显示,随着FTA的增加,亮温在3.0 GHz通道变化幅度为23.5%,在37 GHz通道变化幅度为29.6%,表明FTA对亮温的影响非常大;随着频率的增加,FTA对亮温的影响增强。

Meng等(2018)在月表雨海物质研究中,首次提出了亮温差概念,定义为同一位置、同一频率条件下,不同观测时刻的亮温差值。图1表明,随着FTA的增加,亮温差呈增大趋势,明显大于亮温随FTA的变化。同时,随着频率的增加,亮温差随着FTA的增量变大。这些都为基于亮温差的月表物质成分研究提供了理论支持。同时,论文所提出的低亮温异常,是指在具有相近太阳辐射和月壤参数的相邻区域,亮温差值明显偏低。因此,数值模拟中所使用的月表温度对低亮温异常的认识没有影响。

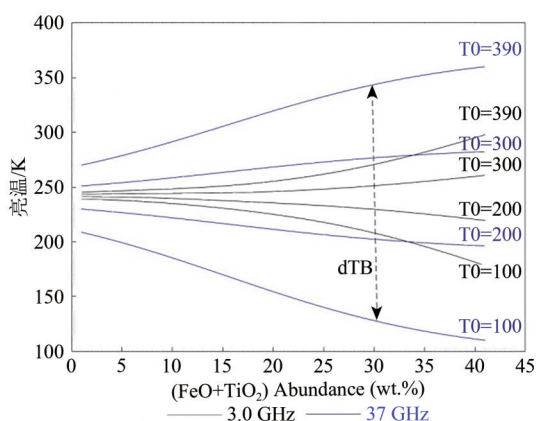


图1 不同表面温度条件下模拟亮温随FTA的变化
Fig. 1 Simulations of brightness temperature vary with FTA under different surface temperature

尽管存在不同观测时刻组合亮温差的选择,但正午和午夜的亮温差最大。因此,为了更好地理解月壤的热物理特性,本研究选择了正午12点和凌晨24点的亮温数据做差值处理,制作月表亮温差图。

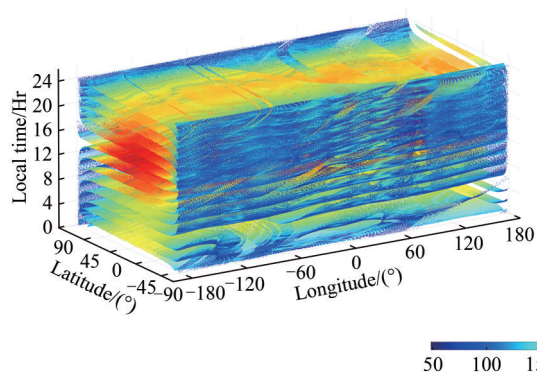
这里需要说明的是,Bugiolacchi等(2022)在月球背面月壤热物理性质的研究中也提出了亮温差定义,使用了37 GHz与3.0 GHz通道亮温的差值(ΔTB_{37-3}),与本文提出的亮温差有所不同。图1表明,

dTB相较于 ΔTB_{37-3} 对FTA变化的响应更为敏感;同时,同频率的亮温差值保留了微波的穿透特性,对重新认识月表物质成分特征具有重要价值。

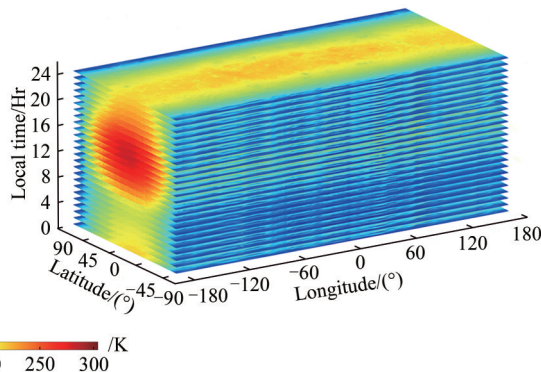
2.2 月表亮温差制图

嫦娥二号(Chang'E 2, CE-2)卫星于2010年10月1日成功发射,搭载4通道(3.0 GHz, 7.8 GHz, 19.35 GHz, 37 GHz)微波辐射计,观测角度为 0° ,空间分辨率分别约为25 km (3.0 GHz)、17.5 km (其他通道),观测时间从2010年10月15日起到2011年5月20日止。本文采用的是经过系统校正和几何校正的2C级数据产品,下载自中国探月工程数据发布和信息服务系统(<https://moon.bao.ac.cn> [2024-01-03]),详细的数据处理过程参考Cai和Lan(2017)和Zheng等(2019)。

由于嫦娥二号卫星获取的数据量有限,在较短的当地时间段内,MRM数据不足以覆盖整个研究区(图2(a))。Meng等(2023)提出以经、纬度二维空间为基础,将MRM数据点的观测时间视为第三维,采用基于Delaunay四面体剖分的重心插值方法构建适时月表亮温模型,制作全月微波亮温数据集,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (图2(b))。



(a) MRM数据点的三维欧氏空间分布
(a) Scatter plots of original MRM data in three-dimensional Euclidean space



(b) 24 h月表亮温数据集
(b) Generated 24 h lunar surface brightness temperature

图2 插值前、后月表MRM数据分布

Fig. 2 Comparison of original MRM points and generated TB dataset

亮温随纬度的变化非常大,在13时37 GHz通道可达200 K,远高于同一纬度上的变化(约22 K,赤道),严重制约了基于亮温数据的月球科学研究。为了消除亮温随纬度的变化,结合理论模型,Meng等(2018)提出了亮温差制图方法。多通道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。根据数值模拟结果,表面温度相差越大,亮温差值越大;因此,本研究采用正午12点和凌晨24点的亮温数据,制作了月表亮温差图(图3)。图3表明,FTA含量较高的月海玄武岩单元具有较高的亮温差,很好地突出了MRM数据与月壤热物理参数的关系。

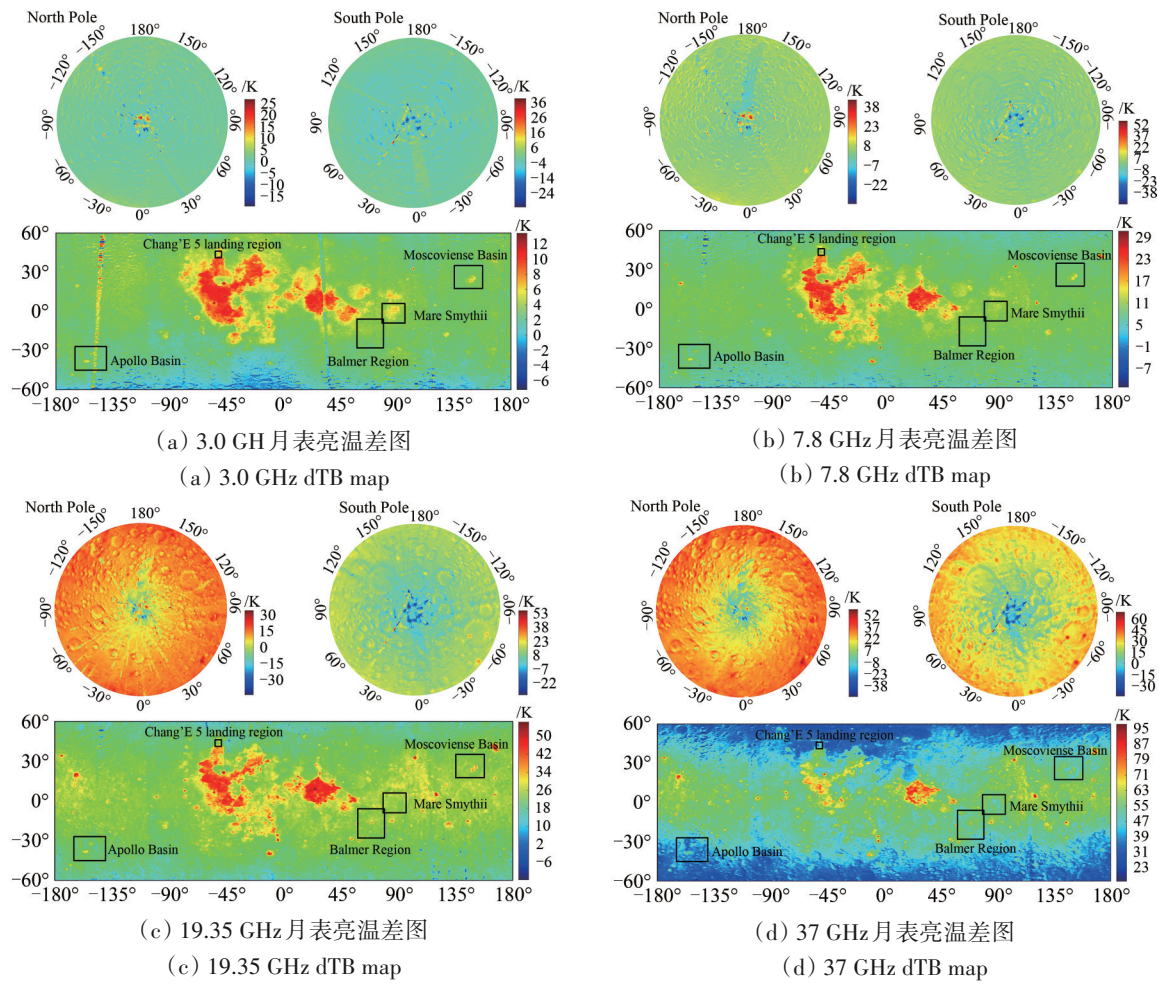


图3 月表多频亮温差分布

Fig. 3 Brightness temperature difference distribution of lunar surface at multiple frequencies

基于理论模拟和月表亮温差图，综合 Clementine UV-VIS 数据反演的氧化亚铁 (FeO) 和二氧化钛 (TiO₂) 含量数据 (Lucey 等, 2000)、LRO Diviner 数据反演的岩块丰度 RA (Rock Abundance) 数据 (Bandfield 等, 2011) 和高程 (DEM) 数据，论文对低亮温差异异常的提出、确认和可能的成因机制进行了系统分析。

3 低亮温差异的发现

低亮温差异异常的提出，是基于莫斯科盆地 (27.28°N, 148.12°E) 周围月陆地区的研究发现 (Meng 等, 2020)。莫斯科盆地位于月球背面高地，是长石质的多环撞击盆地，直径 420 km。

图 4 是莫斯科盆地的亮温差图。在莫斯科盆地东部和南部的月陆地区，存在一个明显的低亮温差异异常区域 (红色虚线范围)：同属于月陆地区，异常

区的亮温差明显小于西侧的月陆地区。异常区和西侧相邻地区的亮温差在 3.0 GHz 几乎相等；随着频率的增加，两侧的亮温差差值增大，在 7.8 GHz 相差约为 3 K，19.35 GHz 相差约 5 K，而 37 GHz 两者的亮温差差值达 7 K (表 1)，存在明显的东西差异。

以一个像元 (7.5×7.5 km²) 为单位，生成一个覆盖东部 (E) 和西部 (W) 月陆的圆形边界。选取 N 点 (图 4(d)) 为基准点，东部月陆位于方位角 0°—180°，西部月陆位于 180—360°，顺时针采集落在范围内的亮温差 (37 GHz)、FeO 含量、TiO₂ 含量、RA 和 DEM 数据 (图 5)。图 5 表明，莫斯科盆地南部的东侧和西侧月陆地区存在明显的亮温差差异，但是，FeO、TiO₂、RA 和 DEM 数据没有表现出相应的差异。统计结果 (表 1) 显示，亮温差异异常区和西侧月陆地区的 FeO、TiO₂ 和 RA

的差值仅为 2 wt.%、0.06 wt.%和 0.5%，平均高程仅相差 81 m。尽管成分、岩块和地形数据特征相近，但莫斯科盆地南部确实存在一个具有亮温差异常低的区域，成因未知。

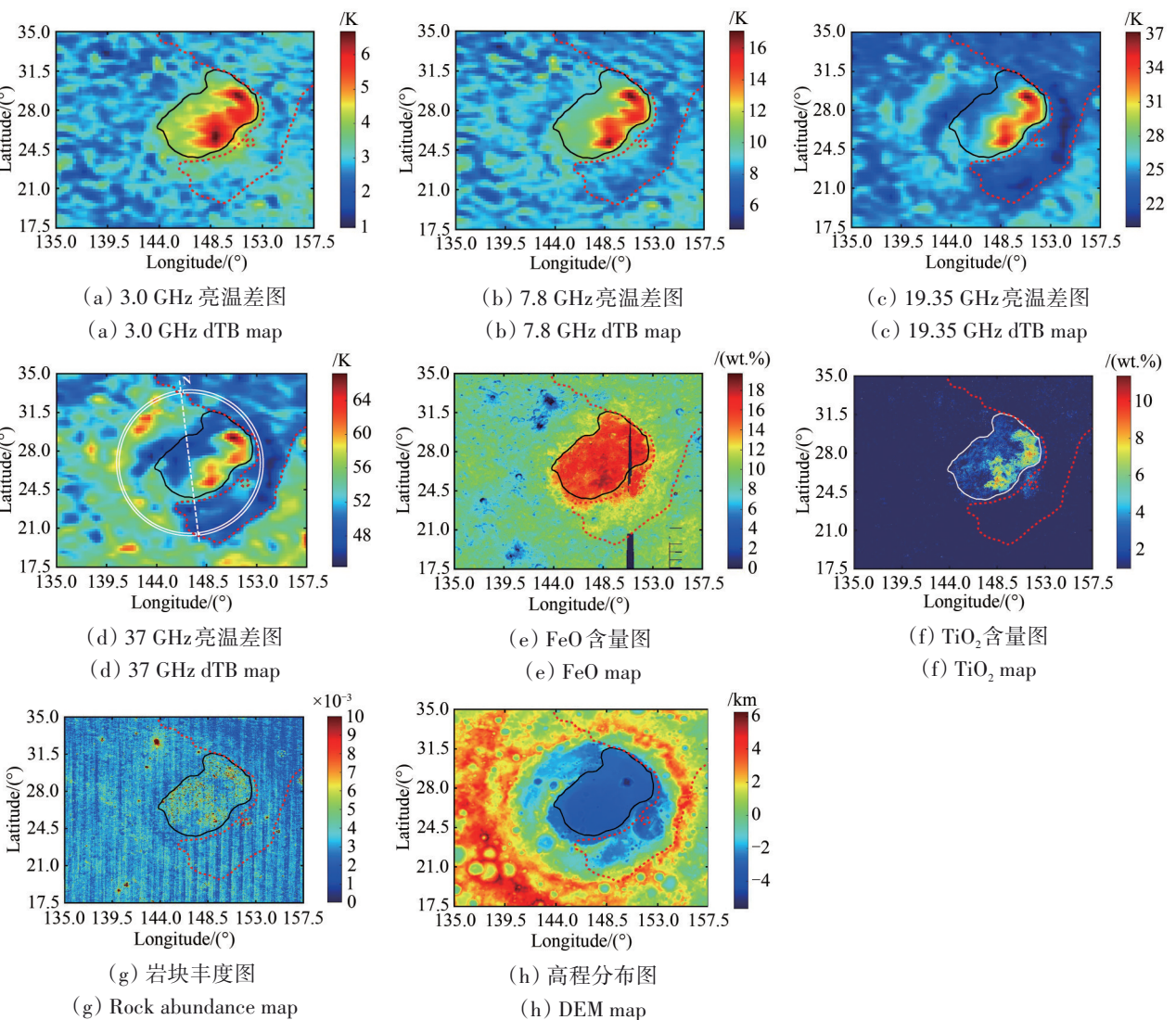


图 4 莫斯科盆地多频亮温差及钛铁含量等分布图(实线是盆地底部边界,红色虚线是低亮温差异常区域边界)

Fig. 4 Multi-factor distribution maps of Moscovian basin (Solid line: basin floor boundary, red dashed line: boundary of low dTB anomaly)

表 1 低亮温差异常区和西部月陆地区的亮温差、成分、地形的数据统计								
Table 1 Statistics of dTB, chemical abundance, topography data in the area of low dTB anomaly and western highland								
区域	亮温差/K				FeO/(wt.%)	TiO ₂ /(wt.%)	RA (10 ⁻³)	DEM/m
	3.0 GHz	7.8 GHz	19.35 GHz	37 GHz				
东部	2.85	7.89	22.19	48.47	10.61	1.06	2.89	626
西部	2.84	8.85	25.52	55.43	8.38	1	3.4	545

结合以上发现，我们提出了低亮温差异常概念：即在成分、地形和岩块条件相似的区域，出现了明显的低亮温差值，至少已知的成分和地形、岩块等因素，不能解释这种低亮温差异常的存在。

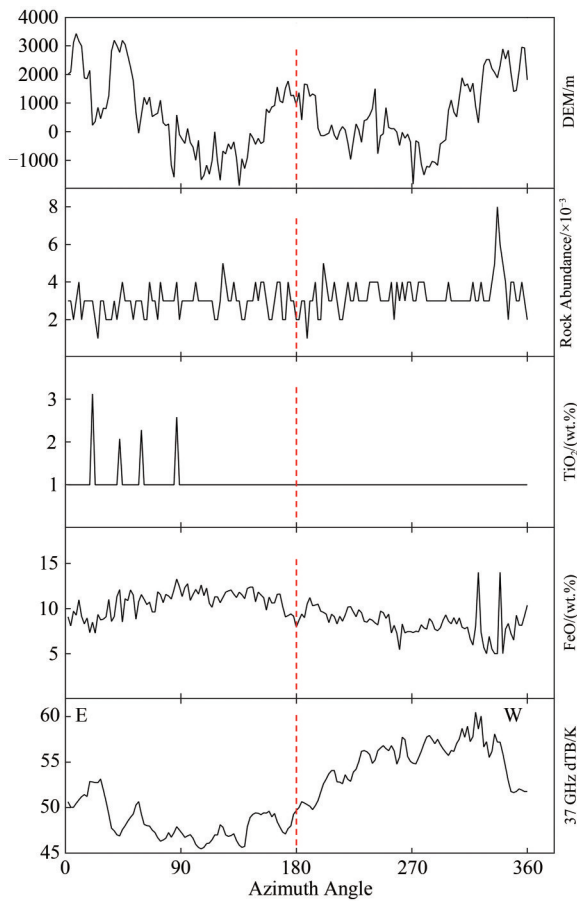


图5 dTB、FeO、TiO₂、RA、DEM沿采样区的剖面线
Fig. 5 Variation curves of dTB, FeO, TiO₂, RA and DEM along the profile line of the sampling area

4 低亮温差异异常的确认

在史密斯海 (2°S, 87°E) 地区, 确认了低亮温差异异常的存在。史密斯海形成于前酒海纪, 直径约 373 km, 在盆地东北部存在爱拉托逊纪玄武岩单元 (Em 单元) (Ji 等, 2022)。

Em 单元是史密斯海最新的玄武岩单元, 具有区域内最高的铁、钛含量分布。亮温差图 (图 6) 表明, 在 3.0 GHz 和 7.8 GHz, Em 单元具有最高的亮温差, 这与第二部分数值模拟结果吻合; 但是, 在 19.35 GHz 和 37 GHz, Em 单元的亮温差明显低于其他玄武岩单元甚至周围的月陆地区。

为了更好的理解这种差异, 我们引入了两个典型区域的月表参数统计值 (表 2), 包括同一纬度正常月陆 (B 区) (图 6 (d)) 和嫦娥五号着陆区 (53°W—51°W, 42°N—44°N) 的亮温差值, 孟治国等 (2023) 在研究中提出嫦娥五号着陆区具有正常亮温差表现, 且与 Em 单元具有相近的 FTA 含量。

表 2 表明, 史密斯海 Em 单元 (A 区) 的亮温差在 4 个频率上分别是 6.14 K、12.57 K、25.34 K 和 48.89 K。同 B 区相比, A 区在 3 GHz 和 7.8 GHz 的亮温差较 B 区高, 基本与理论模型吻合, 但在 19.35 GHz 和 37 GHz 则明显低于 B 区, 与理论模型相悖, 表现出明显的低亮温差异异常。

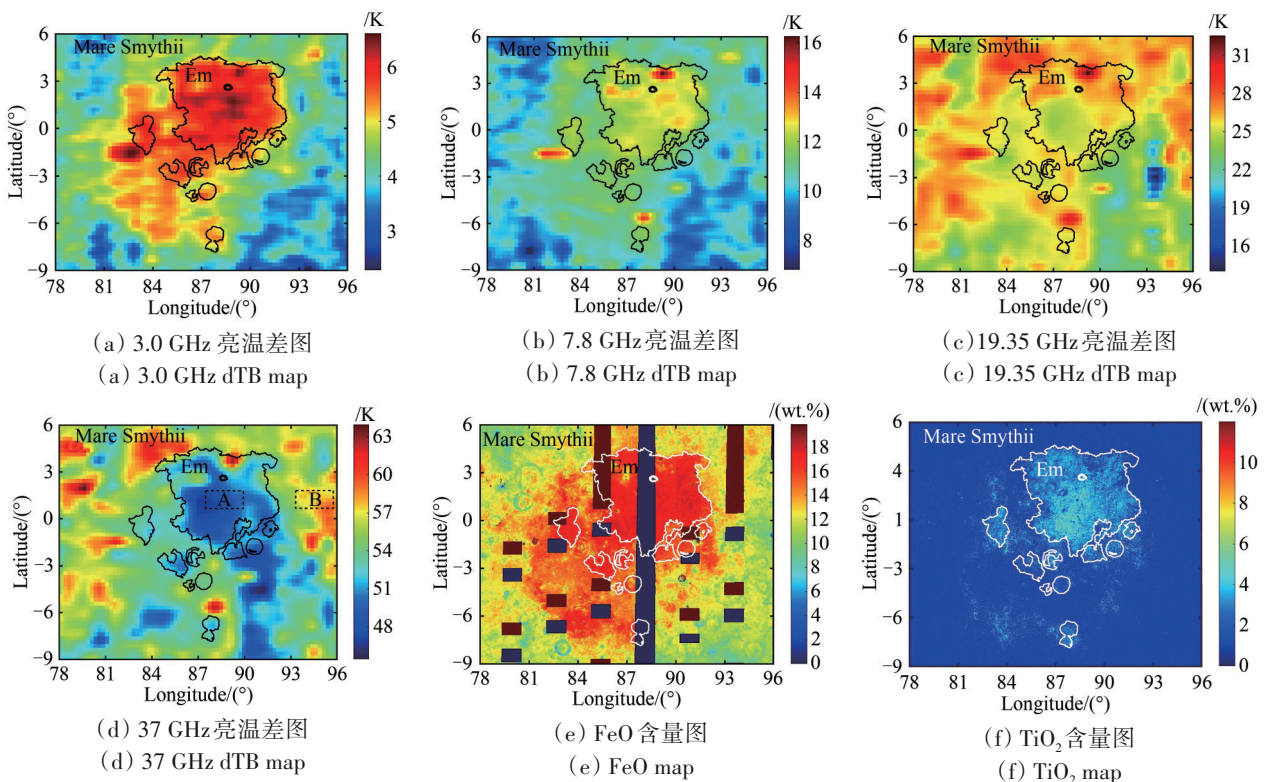


图6 史密斯海多频亮温差及钛铁含量分布图

Fig. 6 Multi-frequency dTB and FeO, TiO₂ distribution of Mare Smythii

表2 Em单元(A)、月陆地区(B)和嫦娥五号着陆区亮温差及成分数据统计

Table 2 Statistics of dTB and chemical abundance in the region of Em basalt unit (A), highland (B) and Chang'E 5 landing site

区域	亮温差/K				FeO/ (wt.%)	TiO ₂ / (wt.%)
	3.0 GHz	7.8 GHz	19.35 GHz	37 GHz		
A	6.14	12.57	25.34	48.89	17	3.66
B	4.15	10.87	26.72	57.93	14.65	1.00
嫦娥五号	8.12	17.98	34.16	57.62	17.59	6.29

嫦娥五号着陆区的亮温差在4个频率上的均值分别是8.12 K、17.98 K、34.16 K和57.62 K，明显高于B区，且随着频率的增加，两区域的亮温差逐渐增大，与数值模拟结果吻合。这种正常的亮温差表现也再次证明了史密斯海Em单元低亮温差异常存在的可能性。

5 低亮温差异异常的成因追踪

5.1 与嫦娥五号着陆区的成分比较

针对史密斯海Em单元的低亮温差异异常，初步推测很可能是一种目前尚未被确认的物质造成的。因此，我们从成分角度进行低亮温差异异常的成因追踪。

在嫦娥三、四、五号着陆区的微波热辐射特性的对比研究中，孟治国等（2023）提出嫦娥五号着陆区具有稳定的正常亮温表现。因此，以嫦娥五号着陆区为参考，为追踪史密斯海的低亮温差异异常成因提供参考。

研究中，采用了Yang等（2023）基于深度学习得到的月壤化学成分数据集和Lucey等（2000）基于Clementine UV-VIS数据得到的铁钛含量（表3）。表3表明，史密斯海（A区）和嫦娥五号着陆区在FeO、CaO、Al₂O₃和MgO含量上没有明显差别，不能用来解释低亮温差异异常的成因；A区的TiO₂含量较嫦娥五号着陆区低2.63 wt.%，而两者的亮温差差值达8.63 K，从第二部分的数值模拟来看，不足以支持史密斯海的低亮温差异异常的存在；尽管两个区域的SiO₂含量差值为3.72 wt.%，但SiO₂含量对微波辐射的影响非常有限（Heiken等，1991），也不能解释史密斯海低亮温差异异常的存在。

表3 嫦娥五号着陆区和A区的化学成分含量统计

Table 3 Chemical abundance of Chang'E 5 landing region and area A

化学成分	含量/(wt.%)	
	嫦娥五号	A区
FeO	17.59	17
TiO ₂	6.29	3.66
CaO	11.18	11.62
Al ₂ O ₃	14.12	15.54
MgO	8.78	9.03
SiO ₂	40.81	44.53

也就是说，当前已知的月壤成分数据不能解释月表低亮温差异异常的成因，即月表低亮温差异异常很可能是一种尚未被探测确认的成分造成的。

5.2 其他典型区的研究发现

在月表微波热辐射特性研究中，阿波罗盆地和巴尔默（Balmer）隐月海地区的研究发现为追踪低亮温差异异常的成因提供了有价值的线索。

阿波罗盆地（35.68°S，154°W）位于南极—艾肯盆地内，具有月球上最薄的月亮厚度。这里，在环形山的西部（C区）再一次发现了低亮温差异异常的存在（图7）。图7是阿波罗盆地的亮温差图。这里，作为具有同样形成机制的环形山，西部（C区）亮温差明显低于东部（D区）；在37 GHz通道，亮温差差异达7 K，确认西部（C区）存在低亮温差异异常。

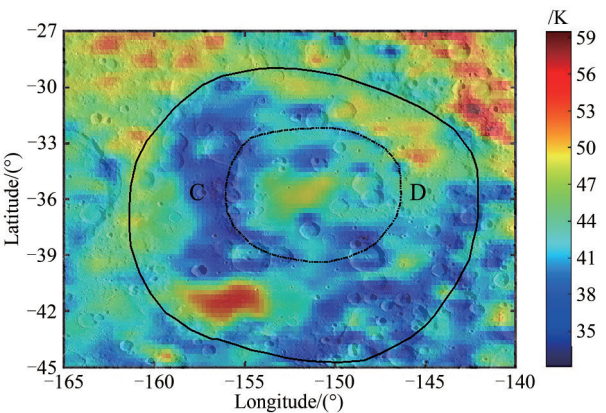


图7 阿波罗盆地37 GHz亮温差叠加广角相机影像（50%透明度）

Fig. 7 37 GHz dTB map of Apollo basin overlapping with Wide Angle Camera (WAC) image (50% transparency)

对于低亮温异常的成因, 已知成分无法解释这个低亮温异常的存在。因此, 根据低亮温异常出现的位置, 结合撞击坑成坑过程模型 (Yue 等, 2023), 即环形山物质来自撞击过程中的月壳深部物质反弹, 推测造成低亮温异常的物质, 很可能来自月壳深部。

在 Balmer 隐月海地区 (6°S — 28°S , 58°E — 79°E), 再次发现了低亮温异常的存在。Balmer 隐月海位于丰富海的东部, 形成于前酒海纪 (Hawke 等, 2005)。图 8 是 Balmer 区域 37 GHz 的亮温差图。环绕 Balmer 盆地和 Langrenus 撞击坑周围、Petavius 撞击坑东北部、Humboldt 撞击坑西部, 存在一条从东南向西部再向北部延伸的低亮温区域, 37 GHz 亮温差均值较周围低约 7 K, 确认为低亮温异常区域。研究中发现, 以 52 K 亮温差等值线为参考提取的异常区边界 (红线), 在 Langrenus、Petavius 和 Humboldt 撞击坑附近与 Hawke 等 (2005) 识别的撞击坑溅射物覆盖范围 (黄线) 出现了较好的吻合, 尤其是 Petavius 撞击坑东北部的溅射物覆盖区, 出现了极好的吻合 (黑色箭头)。这种位置上的吻合表明, 造成低亮温异常的物质很可能与月球较大规模的撞击事件有关; 这种物质很可能来自月壳深部, 通过撞击事件挖掘到月球表面。

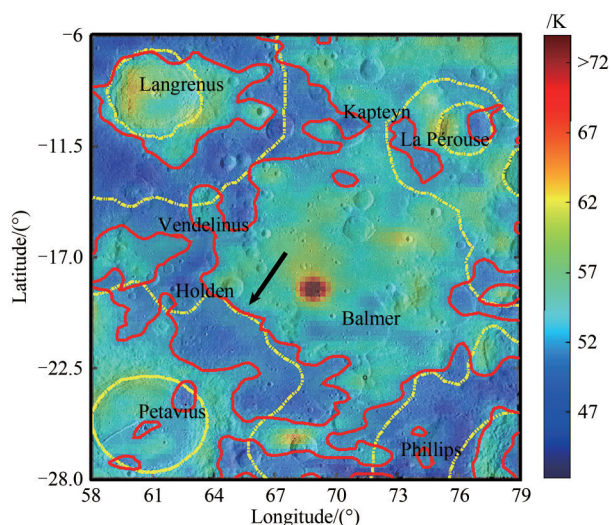


图 8 Balmer 区域 37 GHz 的低亮温异常区域 (红色线), Hawke 等 (2005) 确定的撞击溅射物范围 (黄色线), 叠置于 37 GHz 亮温差图和广角相机影像 (50% 透明度)

Fig. 8 37 GHz low dTB area (red lines), ejecta blanket (yellow lines) interpreted by Hawke et al. (2015) in Balmer region, overlapping with 37 GHz dTB map and WAC image (50% transparency)

也就是说, 月球表面很可能存在一种尚未被探测确认的物质, 该物质来自月壳深部, 代表了月壳物质在纵向分布上的不均匀性。

6 结 论

本研究基于嫦娥二号卫星微波辐射计数据, 综合 Clementine UV-VIS、LRO Diviner 和 DEM 数据, 系统地讨论了月表低亮温异常的存在和可能的地质成因, 主要研究发现如下:

(1) 首次在莫斯科盆地发现并提出了低亮温异常的概念。盆地周围具有相似成分和地形特征的东、南部月陆地区的 37 GHz 亮温差低于西侧, 定义为低亮温异常, 目前已知的成分、地形、岩块丰度都无法解释这种低亮温异常的成因。

(2) 在史密斯海地区, 确认了低亮温异常的存在。史密斯海的 Em 单元在 19.35 GHz、37 GHz 的亮温差均明显低于周围的月陆地区和嫦娥五号着陆区, 确认了低亮温异常的存在。

(3) 造成低亮温异常的物质很可能源于月壳深部。阿波罗盆地的低亮温异常出现在环形山西侧, Balmer 隐月海区域的低亮温异常与 Hawke 等 (2005) 识别的撞击坑溅射物覆盖区域出现了较好的吻合, 表明低亮温异常可能与大型撞击事件有关, 通过撞击事件挖掘到月球表面。初步推测月表很可能存在一种尚未被探测确认的物质, 代表了月壳物质在纵向分布上的不均匀性。

低亮温异常的发现为我们基于嫦娥一、二号卫星微波辐射计数据了解月壤的热物理特性提供了新的视角, 这种局部的、尚未被探测确认的物质也为追踪月球撞击演化历史、浅层月壳物质成分特征提供了新的科学支撑。

志 谢 本研究所使用的 LROC WAC 影像、LROC LOLA 数据和 Clementine UV-VIS 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; 感谢中国国家航天局为嫦娥五号任务提供了宝贵的嫦娥五号样品 (编号 CE5Z0806YJYX004)。

参考文献 (References)

- Bandfield J L, Ghent R R, Vasavada A R, Paige D A, Lawrence S J and Robinson M S. 2011. Lunar surface rock abundance and regolith

- finest temperatures derived from LRO Diviner radiometer data. *Journal of Geophysical Research*, 116: E00H02 [DOI: 10.1029/2011JE003866]
- Bandfield J L, Song E, Hayne P O, Brand B D, Ghent R R, Vasavada A R and Paige D A. 2014. Lunar cold spots: granular flow features and extensive insulating materials surrounding young craters. *Icarus*, 231: 221-231 [DOI: 10.1016/j.icarus.2013.12.017]
- Bugliacchi R, Hu G P and Zheng Y C. 2022. The moon in the microwave: shedding new light on the lunar farside. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127(5): e2021JE007039 [DOI: 10.1029/2021JE007039]
- Buhl D. 1971. Lunar rocks and thermal anomalies. *Journal of Geophysical Research*, 76(14): 3384-3390 [DOI: 10.1029/JB076i014p03384.]
- Cai Z C and Lan T. 2017. Lunar brightness temperature model based on the microwave radiometer data of Chang'e-2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10): 5944-5955 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2718027]
- Campbell B A, Carter L M, Hawke B R, Campbell D B and Ghent R R. 2008. Volcanic and impact deposits of the Moon's Aristarchus Plateau: a new view from Earth-based radar images. *Geology*, 36(2): 135-138 [DOI: 10.1130/G24310A.1]
- Chan K L, Tsang K T, Kong B and Zheng Y C. 2010. Lunar regolith thermal behavior revealed by Chang'E-1 microwave brightness temperature data. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1/2): 287-291 [DOI: 10.1016/j.epsl.2010.04.015]
- Feng J Q, Siegler M A and Hayne P O. 2020. New constraints on thermal and dielectric properties of lunar regolith from LRO diviner and CE-2 microwave radiometer. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(1): e2019JE006130 [DOI: 10.1029/2019JE006130]
- Gong X H and Jin Y Q. 2012. Diurnal change of thermal emission with "hot spots" and "cold spots" of fresh lunar craters observed by Chinese Chang'E-1. *Scientia Sinica Informationis*, 42(8): 923-935 (宫晓蕙, 金亚秋. 2012. "嫦娥一号"对月球新生环行山表面热辐射"热点"与"冷点"昼夜变化的观测. *中国科学: 信息科学*, 42(8): 923-935) [DOI: 10.1360/112012-222]
- Hawke B R, Gillis J J, Giguere T A, Blewett D T, Lawrence D J, Lucey P G, Smith G A, Spudis P D and Taylor G J. 2005. Remote sensing and geologic studies of the Balmer-Kapteyn region of the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110(E6): E06004 [DOI: 10.1029/2004JE002383]
- Heiken G H, Vaniman D T and French B M. 1991. *Lunar Sourcebook—A User's Guide to the Moon*. Cambridge: Cambridge University Press: 475-594
- Hu G P, Chan K L, Zheng Y C and Xu A A. 2018. A rock model for the cold and hot spots in the Chang'E microwave brightness temperature map. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(9): 5471-5480 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2817654]
- Ji J Z, Guo D J, Liu J Z, Chen S B, Ling Z C, Ding X Z, Han K Y, Chen J P, Cheng W M, Zhu K, Liu J W, Wang J T, Chen J and Ouyang Z Y. 2022. The 1:2,500,000-scale geologic map of the global Moon. *Science Bulletin*, 67(15): 1544-1548 [DOI: 10.1016/j.scib.2022.05.021]
- Keihm S J. 1982. Effects of subsurface volume scattering on the lunar microwave brightness temperature spectrum. *Icarus*, 52(3): 570-584 [DOI: 10.1016/0019-1035(82)90017-3]
- Liu N T and Jin Y Q. 2019. A radiative transfer model for MW cold and IR hot spots of Chang'e and diviner observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10): 8184-8190 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2918835]
- Lucey P G, Blewett D T and Jolliff B L. 2000. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8): 20297-20305 [DOI: 10.1029/1999JE001117]
- Mendell W W and Low F J. 1975. Infrared orbital mapping of lunar features//*Proceedings of the 6th Lunar Science Conference*. Houston: [s.n.]: 2711-2719
- Meng Z G, Chen S B, Wang Y Z, Wang T X, Cai Z C, Zhang Y Z, Zheng Y C and Hu S. 2020. Reevaluating mare moscoviene and its vicinity using Chang'e-2 microwave sounder data. *Remote Sensing*, 12(3): 535 [DOI: 10.3390/rs12030535]
- Meng Z G, Dong X G, Lei J T, Ping J S, Cai Z C, Zhang X P, Huang S P and Zhang Y Z. 2023. Constructing a complete brightness temperature dataset of the Moon with Chang'e-2 microwave radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 5302114 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3305298]
- Meng Z G, Hu S, Wang T X, Li C, Cai Z C and Ping J S. 2018. Passive microwave probing mare basalts in mare imbrum using CE-2 CELMS data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(9): 3097-3104 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2845417]
- Meng Z G, Lei J T, Xiao Z Y, Cao W, Cai Z C, Cheng W M, Feng X and Ping J S. 2022. Re-evaluating influence of rocks on microwave thermal emission of lunar regolith using CE-2 MRM data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4505112 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3112673]
- Meng Z G, Tang T Q, Dong X G, Chang W Q, Zou M, Zhang H B, Wang M C, Cai Z C, Ping J S, Zheng Y C, Zhang Y Z and Gusev A. 2023. Analyzing the microwave thermal emission features of lunar regolith in Chang'E landing sites and its geologic significance. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, 53(3): 239609 (孟治国, 唐天琦, 董学纲, 常文清, 邹猛, 张洪波, 王明常, 蔡占川, 平劲松, 郑永春, 张渊智, Gusev A. 2023. 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. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 53(3): 239609) [DOI: 10.1360/SSPMA-2022-0303]
- Meng Z G, Wang Y Z, Chen S B, Zheng Y C, Shi J C, Wang T X, Zhang Y Z, Ping J S and Hou L L. 2019. MTE features of Apollo basin and its significance in understanding the SPA Basin. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7): 2575-2583 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2916061]
- Shorthill R W, Borough H C and Conley J M. 1960. Enhanced lunar thermal radiation during a lunar eclipse. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 72: 481-485 [DOI: 10.1086/127584]
- Shorthill R W and Saari J M. 1965. Nonuniform cooling of the

- eclipsed Moon: a listing of thirty prominent anomalies. *Science*, 150(3693): 210-212 [DOI: 10.1126/science.150.3693.210]
- Williams J P, Paige D A, Greenhagen B T and Sefton-Nash E. 2017. The global surface temperatures of the Moon as measured by the diviner lunar radiometer experiment. *Icarus*, 283: 300-325 [DOI: 10.1016/j.icarus.2016.08.012]
- Yang C, Zhang X M, Bruzzzone L, Liu B, Liu D W, Ren X, Benediktsson J A, Liang Y C, Yang B, Yin M H, Zhao H S, Guan R C, Li C L and Ouyang Z Y. 2023. Comprehensive mapping of lunar surface chemistry by adding Chang'e-5 samples with deep learning. *Nature Communications*, 14(1): 7554 [DOI: 10.1038/s41467-023-43358-0]
- Yue Z Y, Li H C, Zhang N, Gou S and Lin Y T. 2023. Lunar evolution analysis based on numerical simulations of typical lunar impact craters. *Space: Science and Technology*, 3: 0084 [DOI: 10.34133/space.0084]
- Zheng Y C, Chan K L, Tsang K T, Zhu Y C, Hu G P, Blewett D T and Neish C. 2019. Analysis of *Chang'E-2* brightness temperature data and production of high spatial resolution microwave maps of the Moon. *Icarus*, 319: 627-644 [DOI: 10.1016/j.icarus.2018.09.036]

Proposal and geological significance of lunar low brightness temperature difference anomaly based on CE-2 MRM data

MENG Zhiguo¹, ZHAO Rui^{1,2}, CAI Zhanchuan³, ZHANG Xiaoping³, ZHANG Yuanzhi^{4,5}, ZOU Meng⁶

1.College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2.College of Information Engineering, Engineering University of PAP, Xi'an, 710018, China;

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

4.Key Laboratory of Lunar and Deep-space Exploration, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

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

6.Key Lab for Bionics Engineering of Education Ministry, Jilin University, Changchun 130022, China

Abstract: The thermal physical properties of lunar regolith are crucial for unraveling the moon's thermal history, geological evolution, and viability of in-situ resource utilization, and the thermal anomaly is a key area of interest. Microwave observations can reveal subsurface characteristics about lunar regolith from centimeters to meters in depth, and remarkably enhance our understanding of these properties. The microwave radiometer (MRM) onboard Chang'E-2 (CE-2) conducted passive microwave remote sensing of the moon at frequencies of 3.0, 7.8, 19.35, and 37 GHz from 2010 to 2011. The employment of multichannel, multitemporal MRM data provides a new perspective on thermal anomalies.

Considering that Brightness Temperature (TB) is strongly affected by latitude, the difference between the TB values of the same frequency generated at two dissimilar local times is introduced, named dTB, which indicates an excellent description of the thermophysical characteristics of the mare deposits in the wavelength-related penetration depth. Utilizing dTB obtained at 37 GHz, along with numerical simulations of brightness temperature, and integration with Clementine UV-VIS, LRO Diviner, and DEM data reveal the substantially low dTB at 37 GHz in the eastern and southern highlands of the Moscoviense basin. The statistical analysis of the anomalous region and the western highlands, the corresponding FeO, TiO₂, rock abundance, and DEM data do not show the same trend of change. Hence, the known compositional and topographical data cannot explain the genesis of the low dTB anomaly. The existence of low dTB anomalies is confirmed in Mare Smythii. Taking the highlands at the same latitude and the Chang'e-5 landing region with normal brightness temperature differences as references, the EM unit in Mare Smythii exhibits lower dTB at 19.35 and 37 GHz. Furthermore, comparative analysis with the compositional data from Chang'e-5 landing region reveals that currently known compositions cannot account for the low dTB anomalies. The anomaly may likely be due to a component that has not yet been detected or identified.

Additionally, the discovery of low dTB anomalies in the Apollo basin and Balmer region provides valuable clues for understanding these phenomena. Based on the impact cratering model, the low dTB anomaly in the Apollo basin is likely due to the rebound of deep lunar crustal materials during the impact process. The anomaly in the Balmer region corresponds with the location of the impact crater ejecta coverage, which suggests that the material causing the low dTB anomaly likely originated from the excavation of deep lunar crustal materials by impact events, which indicates vertical heterogeneity in the lunar crust's composition.

The discovery of low dTB anomaly provides a new insight for further research on the thermal radiative properties of lunar regolith, and the localized and previously undetected material offers innovative scientific views for investigating the moon's impact evolution history and the properties of shallow crust.

Key words: low brightness temperature difference anomaly, microwave radiometer, brightness temperature, regolith composition, geological significance

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42071309); National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFA0715104); Natural Science Foundation of Jilin Province of China (No. 20220101159JC); Science and Technology Development Fund (FDCT) of Macau (No. 0014/2022/A1, 0034/2024/AMJ, 0008/2024/AKP)