月球吕姆克地区微波辐射特性及月壤参数反演研究

王雪影^{1,2}, 王振占^{1*}, 姜景山¹, 张德海¹

1. 中国科学院国家空间科学中心, 微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: wangzhenzhan@mirslab.cn

收稿日期: 2020-08-11; 收修改稿日期: 2021-01-28; 接受日期: 2021-02-07; 网络版发表日期: 2021-05-17

国家自然科学基金面上项目(批准号: 41771405)资助

摘要 嫦娥五号月球探测器预计将在月球风暴洋北部的吕姆克地区着陆并实施钻探采样. 为辅助确定采样点, 本文基于嫦娥微波探测仪数据首先对该区域的昼夜微波辐射特性进行了分析, 然后对月壤介电常数和厚度进行了反演. 由微波亮温图可知: 昼夜亮温随频率的变化规律不同, 白天37GHz亮温最高, 黑夜19.35GHz亮温最高; 三个高频通道的昼夜亮温分布不同, 尤其在南部; 吕姆克E区域白天亮温较高, 黑夜亮温较低, 昼夜温差较大. 月壤参数的反演结果表明介电常数西、北部低, 中、东部高, 吕姆克E附近区域值最大; 西北部月壤厚度大于6m, 其他绝大部分区域不超4m, 吕姆克E区域月壤最薄, 约2.5m. 考虑卫星的平稳着陆及钻孔采样, 建议着陆区选在月壤较厚的西北部, 并避开吕姆克E区域.

关键词 吕姆克地区, 微波探测仪, 亮温, 月壤介电常数, 月壤厚度

1 引言

中国的探月计划分为“绕”“落”“回”三步走的任务规划. 截至2019年“绕”和“落”已经完成, 第三步“回”计划由嫦娥五号完成(张曼倩, 2019). 嫦娥五号卫星是中国也是国际上继月球24号(苏联, 1976年)之后首次在月面采样并返回地球的卫星, 预计钻探深度不小于2m, 带回科学样品约2kg(Yue等, 2019). 2017年6月, 嫦娥五号月球探测器的着陆地点被确定为吕姆克地区, 该地区位于月球正面风暴洋的北部, 具有较长的火山历史和复杂的地质组成(Qian等, 2018).

针对嫦娥五号着陆区采样点位置的选取问题, 众多学者基于可见光和近红外数据对吕姆克地区的地形地质(Zeng等, 2017; Qian等, 2018; Li等, 2020)、月壤特性(Yue等, 2019; Qian等, 2020; Xie等, 2020)、撞击坑形态及分布(Wu等, 2018; Jia等, 2020)展开了研究. 此外, Hao等(2019)和钟振等(2020)基于激光高度计数据对吕姆克地区的光照与通信条件进行了研究; Campbell等(2009)使用地基雷达数据分析了吕姆克山地区穹隆形态; Chisenga等(2020)利用布格重力数据反演了吕姆克地区三维密度结构; Meng等(2020)基于嫦娥二号微波探测仪(Chang'E Lunar Microwave Sounder,

中文引用格式: 王雪影, 王振占, 姜景山, 张德海. 2021. 月球吕姆克地区微波辐射特性及月壤参数反演研究. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1018–1027, doi: 10.1360/SSTe-2020-0212

英文引用格式: Wang X, Wang Z, Jiang J, Zhang D. 2021. Research on microwave radiation features and lunar regolith parameters inversion of the Rümker region. Science China Earth Sciences, 64(6): 1005–1014, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9739-2>

CELMS)数据对该区域的热物理特性进行了分析, 并对Qian等(2018)划分的地质单元进行了修正.

嫦娥一号(CE-1)和嫦娥二号(CE-2)卫星上搭载的微波探测仪是国际上首次在月球轨道上对月球进行探测的被动微波探测器, 设置3、7.8、19.35和37GHz四个频率通道, 探测灵敏度为0.5K. 两星搭载的微波探测仪是相同的, 但CE-2卫星的飞行高度(100km)低于CE-1卫星(200km), 所以CE-2卫星具有更高的空间分辨率. 微波探测仪获取的亮温是月面温度、月面地形、介电常数及月壤厚度等月面参数综合作用的结果(王振占等, 2009), 通过建立亮温与物理化学参数的关系式可以对这些月亮参数直接进行反演. 基于CELMS亮温数据, 众多专家学者在月面区域微波辐射特性、温度剖面反演、月壤厚度和³He资源反演等方面展开了一系列的研究, 为人类进一步理解月球提供了新的视角. 本文基于CELMS数据对卫星着陆区域的昼夜微波辐射特性进行分析, 并对月壤介电常数和厚度进行反演, 为巡视路线的规划及样本开采点的确定提供参考.

2 吕姆克地区微波辐射特性分析

本研究划定的吕姆克地区的经纬度为35°~45°N, 53°~63°W, 分别包括嫦娥一号和二号微波探测仪6316和7864个数据点, 存在吕姆克山(58.1°W, 40.8°N)、璠曼(62.02°W, 35.38°N)、璠曼B(60.70°W, 37.46°N)、吕姆克E(57.14°W, 38.64°N)、吕姆克F(57.28°W, 37.26°N)等其他月表区域或撞击坑, 如图1所示. 其中, 吕姆克山是该区域内较突出的地质单元, 是一座庞大、高耸的盾状火山(Spudis等, 2013), 海拔高出周围区域约1000m.

本研究基于CE-1和CE-2的微波探测仪数据. 为了提高两星数据的一致性, 基于月球永久阴影区, 利用两步定标法对CE-2的CELMS数据进行了重新定标(王雪影等, 2020). 为了减小时间对亮温的影响, 首先对数据进行了时角校正(Zheng等, 2012), 然后选择当地时间22时至2时的数据和13时的数据分别作为午夜和正午数据, 并对选定的数据分别进行0.4°×0.4°的网格化处理并插值成图. 匹配后的两星亮温分布基本一致, 但由于CE-2卫星的分辨率较高, 能显示更多的细节, 故文中仅展示CE-2卫星的四通道昼夜亮温图, 如图2和3所示.

由图2可知, 在白天, 随频率的升高亮温变大,

图1 吕姆克地区Clementine 750nm波段影像(<https://astrogeology.usgs.gov>)

37GHz亮温最高, 且不同频率之间的亮温差异较大; 吕姆克E地区同邻近区域相比显现出较高的亮温, 在四个通道中均很明显; 对于3GHz, 亮温的纬度依赖性明显, 随纬度升高, 亮温降低; 三个高频通道的亮温分布趋势相似, 西北角为低亮温区, 东南角为高亮温区, 呈现近对角阶梯状分布特征.

从图3中可以看出: 由于没有太阳照射, 夜晚亮温要低于白天亮温, 频率之间的亮温差较小; 三个低频通道的亮温随频率升高而变大, 37GHz的亮温最小, 这可以解释为当表层被低热传导率的细粒月壤覆盖时, 太阳落山后表层的热量仍向下层传输, 从而导致次表面的温度呈现升高趋势(Zheng等, 2019), 而37GHz探测的表层由于没有大气的保温作用, 在太阳落山后温度骤降, 故在夜晚37GHz亮温最低, 而19.35GHz探测的次表层亮温最高; 吕姆克E地区在两个高频通道中显现出较低的亮温, 37GHz图中特征更为清晰; 与白天亮温不同, 两个低频通道具有纬度依赖性, 两个高频通道中西南角为高亮温区域.

为了减小昼夜温度对亮温影响, 更多地突出月壤参数信息, 引入昼夜亮温归一化系数 ρ (王振占等, 2012):

$$\rho = \frac{T_{\text{Bday}} - T_{\text{Bnight}}}{T_{\text{Bday}} + T_{\text{Bnight}}}, \quad (1)$$

式中, T_{Bday} 和 T_{Bnight} 分别代表白天和夜晚的亮温. 一般

图2 研究区白天亮温分布图

情况下, 介电常数较大的区域, 微波辐射来自月表浅层, 表层的昼夜温差较大会导致 ρ 较大; 月壤厚度较厚的地区, 月表在白天升温较慢, 夜晚降温也慢, 故昼夜温差小, ρ 也较小。图4为研究区四个频率亮温的归一化系数图。由图4可知, ρ 随频率的升高而增大, 即频率越高, 昼夜温差越大; 在四个频率下, 研究区的归一化系数整体呈现西低东高的趋势; 吕姆克E地区在四个频率下均具有较大的 ρ 值。

3 月壤参数的反演方法

3.1 利用CELMS数据反演月壤参数的原理

根据辐射传输理论, 微波探测仪接收到的来自月

球表面的辐射可以表示为(王振占等, 2009):

$$T_B = T_{BCosmic} + T_{BRegolith} + T_{BRock} \\ = r_0 T_{BC} + (1 - r_0) [T_{Bregolith} + T_{rock} (1 - r_h) \tau], \quad (2)$$

其中, r_0 是月表反射率; T_{BC} 为宇宙背景温度, 一般取2.7K; $T_{Bregolith}$ 是不同深度月壤层的亮温; T_{rock} 是底面岩石层的物理温度; r_h 是岩石表面的反射率; τ 是月壤的透过率。

在忽略月表粗糙度时, 月球表面反射率 r_0 可以表示为介电常数实部 ϵ' 的函数:

$$r_0 = 0.04218\epsilon' - 0.05482. \quad (3)$$

不同月壤层的亮温 $T_{Bregolith}$ 可以表示为有效温度 T_{eff} 和发射率 G 的乘积:

图3 研究区黑夜亮温分布图

$$T_{\text{Bregolith}} = GT_{\text{eff}}, \quad (4)$$

式中, G 表示在该频率下介质对于微波的吸收和传输的总能力, 是厚度 h (单位: m)的函数:

$$G(h) = a_1 \cdot e^{b_1 \cdot h} + c_1 \cdot e^{d_1 \cdot h}, \quad (5)$$

式中, T_{eff} 为有效温度, 与频率和厚度有关, 在一定厚度下某一个频率的 T_{eff} 可以用另外一个频率的 T_{eff} 二次多项式表示:

$$T_{\text{eff}(3)} = aT_{\text{eff}(7/19/37)}^2 + bT_{\text{eff}(7/19/37)} + c. \quad (6)$$

通过表面温度廓线的模拟发现(李芸等, 2009), 0.5~6m的温度可以用0.5m处的温度线性函数表示:

$$T_{\text{eff}(0.5 \sim 6\text{m})} = pT_{\text{eff}(0.5\text{m})} + q, \quad (7)$$

其中, 系数 p 是深度 h 的函数, q 是 h 和纬度 φ 的函数。

根据能量守恒定律, 发射率和透过率之和为1, 所以透过率可以表示为

$$\tau = 1 - G. \quad (8)$$

深度为 h 的底面的反射率 r_h 可以由双指数关系式拟合:

$$r_h = a_2 \cdot e^{b_2 \cdot h} + c_2 \cdot e^{d_2 \cdot h}. \quad (9)$$

式(5)和(9)中的 a_1 , b_1 , c_1 , d_1 , a_2 , b_2 , c_2 和 d_2 可以表示为 ϵ' 的函数(王振占等, 2009). 当把式(3)~(5)和式(8)、(9)代入式(2)时可以发现, 只有 ϵ' 、 h 和 T_{eff} 是未知的, 所以反演问题就转化为确定这三个参数的问题。

图4 研究区亮温归一化系数图

3.2 模拟亮温的计算

文中采用多层月壤的辐射传输模型(Burke等, 1979)来模拟亮温. 首先将月表分为月壤和月岩两层, 其中月壤层再细分成的45层(根据温度剖面确定每层厚度), 月岩层为第46层, 假定同一层内的温度恒定且复介电常数 ϵ 相同, 分层剖面如图5所示.

到达月表的第1层月壤的发射辐射可以表示为

$$\begin{aligned}
 T_{B1} &= (1 - r_0) \left[T_B(1) \cdot (1 - e^{-\sec\theta \gamma_1 \Delta Z_1}) \right. \\
 &\quad \left. + T_B(1) \cdot (1 - e^{-\sec\theta \gamma_1' \Delta Z_1}) \eta_2 e^{-\sec\theta \gamma_1' \Delta Z_1} \right] \\
 &= (1 - r_0) T_B(1) (1 - e^{-\sec\theta \gamma_1' \Delta Z_1}) \\
 &\quad \cdot (1 + \eta_2 e^{-\sec\theta \gamma_1' \Delta Z_1}).
 \end{aligned} \quad (10)$$

等式右侧第一项为第1层内的上行辐射, 第二项为第1层内的下行辐射在第1、2层的界面处的向上反射的辐射; $\gamma_1 = 2\text{Im}\left(2\pi\sqrt{\epsilon_1 - \sin^2\theta_1}\right)$ 是第1层月壤/月岩的吸收系数; θ_1 为第1层内波矢量与平面法线的夹角, 值域为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 满足反射和折射定律; ΔZ_1 为第1层月壤的厚度; r_0 为月表反射率, 水平极化和垂直极化表面反射率同辐射计观测方向角 θ_0 有关, 表示为

$$\begin{aligned}
 r_{0h} &= \left| \frac{\cos\theta_0 - \sqrt{\epsilon_1 - \sin^2\theta_0}}{\cos\theta_0 + \sqrt{\epsilon_1 - \sin^2\theta_0}} \right|^2, \\
 r_{0v} &= \left| \frac{\epsilon_1 \cos\theta_0 - \sqrt{\epsilon_1 - \sin^2\theta_0}}{\epsilon_1 \cos\theta_0 + \sqrt{\epsilon_1 - \sin^2\theta_0}} \right|^2.
 \end{aligned}$$

图5 多层月壤的辐射传输模型

η_2 为第2层与第1层交界处的反射率, 水平极化和垂直极化反射率分别为

$$\eta_{2h} = \left| \frac{k_2 - k_1}{k_2 + k_1} \right|^2, \quad \eta_{2v} = \left| \frac{\varepsilon_2 k_2 - \varepsilon_1 k_1}{\varepsilon_2 k_2 + \varepsilon_1 k_1} \right|^2,$$

其中, $k_i = \omega \sqrt{\mu \varepsilon_i}$ ($i = 1, 2$) 是第 i 层中的波束, $\varepsilon_i = \varepsilon'_i + i\varepsilon''_i$ 为复介电常数, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为频率, μ 为磁导率, 值取1.

第 j 层 ($j = 2, 3, \dots, 46$) 月壤/月岩的发射辐射同第1层的类似, 不同的是在传输到月表的过程中会经历上伏 $j-1$ 层月壤的衰减, 公式为

$$T_{Bj} = (1 - r_0) T_B(j) (1 - e^{-\sec \theta_j \gamma_j \Delta Z_j}) \cdot (1 + \eta_{j+1} e^{-\sec \theta_{j+1} \gamma_{j+1} \Delta Z_{j+1}}) \cdot \prod_{n=2}^j e^{-\sec \theta_n \gamma_n \Delta Z_n} (1 - \eta_n). \quad (11)$$

由式(10)和(11)可得到每层月壤/月岩到达月表的辐射, 45层月壤的发射辐射之和为月壤层对于月表辐射的贡献: $T_{Bregolith} = \sum_{m=1}^{45} T_{Bm}$; 当 $j=46$ 时, 式(11)所求即为

月岩层到达月表的发射辐射: $T_{BRock} = T_{B46}$; 此外, 部分被月表反射的冷空背景辐射 T_{BC} 也会进入辐射计的天线中: $T_{BCosmic} = r_0 \times T_{BC}$.

最终, 微波辐射计在观测角 θ_0 方向接收到的亮温包括月壤发射辐射亮温, 月岩的辐射亮温及月壤反射的宇宙背景亮温.

3.3 有效温度的修正

有效温度是指探测厚度内温度的综合贡献, 即加权平均温度(王振占等, 2009). 有效温度的准确性会直

接影响反演的介电常数的准确性. 由于没有可以直接得到有效温度的方法, 在实际的反演工作中, 有效温度是由模拟亮温据式(2)计算得到的. 由于模拟亮温存在误差, 所以需要得到有效温度进行修正. CELMS的37GHz测量的是月球表面的温度, 对厚度的变化不敏感, 所以可以将37GHz的昼夜亮温平均值作为衡量有效温度变化的一个标准. 为了确定有效温度同纬度的关系, 研究中选择不同纬度带(间隔10°, 带宽5°)的CE-2号37GHz昼夜亮温平均值作为参考来修正有效温度, 如式(12)所示, 其中亮温修正量与南北纬之间的关系分别用式(13)中的5次多项式来拟合, 拟合系数如表1所示, 其中的N指北半球, S指南半球.

$$T_{\text{eff}} = T_{\text{eff0}} + \Delta T_{\text{eff}}, \quad (12)$$

$$\Delta T_{\text{eff}} = p_5 \cdot \varphi^5 + p_4 \cdot \varphi^4 + p_3 \cdot \varphi^3 + p_2 \cdot \varphi^2 + p_1 \cdot \varphi + p_0, \quad (13)$$

式中, T_{eff0} 为模拟的有效温度, ΔT_{eff} 为有效温度的修正量, φ 为纬度(单位: °), 北纬用正数表示, 南纬用负数表示.

图6为CE-2号模拟的有效温度与实测37GHz昼夜平均亮温的关系, 80°S~80°N的37GHz亮温平均值是实测的, 这个范围以外的值是外推得到的. 由图6可知, 模拟有效温度在南北半球的对称性要优于实测亮温, 北极的实测亮温要低于南极. 在70°S~60°N之间, 模拟亮温比实测亮温低且差值随纬度变小而变大, 在赤道地区差值约为10K; 在70°S~90°S和60°N~90°N中, 模拟亮温大于实测亮温且差值随纬度升高变大, 在南北极处的差值分别可以达到25和38K. 综上可知, 模拟的有效温度在赤道和极区误差较大, 在中纬度地区误差较小.

3.4 铁钛含量的计算

月球表面的矿物主要由长石、辉石、橄榄石、钛铁矿及这些矿物产生的撞击熔融玻璃组成(McKay等, 1991). 一般来说, 月壤中铁钛矿物的存在会使得其介电常数升高, 进而影响月表微波辐射特征. 文中基于克莱门汀紫外和可见光(Clementine UVVIS)光谱数据和Lucey等(2000)模型计算得到的TiO₂和FeO含量如图7所示. 研究区内的FeO含量在13~23wt%之间, TiO₂含量在0~16wt%之间, 整体上西北角区域具有较低的铁钛含量, 东部要高于西部. 吕姆克山同周围区域相比具有明显的较低的铁、钛含量, 边界较清晰. 吕姆克E内

表 1 有效温度修正量的5次多项式拟合系数

南北纬	p_5	p_4	p_3	p_2	p_1	p_0
N	-3.1024×10^{-9}	-2.5372×10^{-6}	3.5388×10^{-4}	-1.6820×10^{-2}	0.1658	9.8626
S	2.7495×10^{-8}	3.1305×10^{-6}	7.8115×10^{-5}	-3.3689×10^{-3}	-6.3247×10^{-2}	9.8740

图 6 模拟的有效温度与实测37GHz亮温的关系

部铁含量较低,但以其为中心呈现出直径约76km的铁含量丰富的辐射状区域.四个撞击坑内部南侧区域出现了异常高的铁、钛含量,可能是因为地形对太阳辐射的不均匀反射导致计算得到的铁钛含量产生误差造成的.

4 吕姆克地区月壤参数反演结果及分析

4.1 月壤介电常数的反演结果及分析

据研究,月壤介电常数实部与密度呈指数关系(Olhoeft和Strangway,1975; Keihm,1984; Heiken等,1991),介电常数虚部除与实部有关外,还与月壤密度、频率和铁钛含量相关(Keihm, 1984; Heiken等,1991; Shkuratov和Bondarenko, 2001; Montopoli等,2011).大多学者认为 $\text{FeO}+\text{TiO}_2$ 总量是亮温的影响因素,张莉娟(2015)发现介电常数模型中铁钛含量的权重不同会对亮温产生影响,故提出了分别考虑 FeO 和 TiO_2 含量的新模型,如式(15)所示.基于以上分析,本文采用的介电常数模型如下:

$$\varepsilon' = 1.919\rho, \quad (14)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot 10^{a \cdot \text{Ti} + b \cdot \text{Fe} + c \cdot \rho - d}, \quad (15)$$

其中, $a=0.0174$, $b=0.0034$, $c=0.8572$, $d=3.6196$, ρ 为月壤密度.

当介电常数确定后,月面的密度 ρ_0 可以由式(14)确定,深层的密度可以由密度模型(式(16))计算得到

$$\rho(h) = \rho_0 + 0.62 - \frac{11.136}{h+18}. \quad (16)$$

由第3.1节可知,在介电常数反演过程中只有介电常数 ε' 和有效温度 T_{eff} 是未知的.反演时,首先根据经验给出介电常数实部初始值 ε_0 为2.8、上限1和下限8,并将 ε_0 代入多层月壤辐射传输模型中计算得到37GHz在0.5m处的模拟亮温,然后将模拟亮温和 ε_0 代入式(2)中计算得到对应的有效温度,并利用表1中的系数进行修正,最后通过不断地调整 ε_0 ($1 \leq \varepsilon_0 \leq 8$)使得修正后的有效温度与实测37GHz亮温的差值平方和最小,此时的 ε_0 即为最终结果,而介电常数虚部可以据式(15)计算得到.

图8是基于CE-1亮温数据反演的介电常数实部和虚部分布图.研究区的西北部和西部的介电常数较小,吕姆克E及其东部介电常数较高,吕姆克山位于高低介电常数的过渡区域.

图9是CE-1和CE-2反演的介电常数对比图,两星介电常数的相关性较高,说明反演的结果是有效的.由图中两组数据差值的均值和标准差可以看出重定标后的两星CELMS数据依旧存在偏差,该偏差可能由输入的温度廓线、介电常数廓线中的误差导致,后续进一步研究.

4.2 月壤厚度的反演结果及分析

基于月壤-月岩两层模型和被动微波辐射传输模型对月壤厚度进行反演,在反演的过程中,介电常数采用上一节反演的结果.首先由37GHz在0.5m处的有效温度据式(6)得到同深度下3GHz的有效温度,给定月壤厚度 h 的初始值 h_0 为0.5m、下限0.5m和上限6m(CELMS可探测范围的最大值),根据式(7)可以得到 h_0

 图 7 FeO(a)和TiO₂(b)含量分布图

图 8 介电常数分布图

(a) 实部; (b) 虚部

处的3GHz模拟有效温度, 然后通过不断地调整 h_0 ($6 \geq h_0 \geq 0.5$)使得3GHz实测亮温计算得到的有效温度与模拟有效温度的差值平方和最小, 此时的 h_0 即为最终求得的月壤厚度信息.

利用CE-1亮温数据反演得到的月壤厚度如图10所示, 研究区西北角月壤厚度较厚, 可超过6m. 除此外, 绝大部分区域的厚度分布较均匀且不超过4m. 吕姆克E区域由于撞击作用具有最小的月壤厚度, 约为2.5m. 结合图4、8可以发现: 研究区的西北部介电常数较小, 月壤厚度较厚, 在这两个因素的共同作用下该区域的归一化系数也较小; 吕姆克E地区介电常数较大, 月壤较薄, 对应其归一化系数较大. 不同参数之间良好的对

应性也从侧面证明了反演结果的可靠性.

5 结论

本文主要基于CELMS数据对吕姆克地区的微波辐射特性进行了分析, 并对月壤介电常数和厚度进行了反演. 通过对昼夜亮温图和归一化系数图分析发现: (1) 在白天, 频率越高, 亮温越大, 夜晚只有三个低频通道的亮温随着频率升高而增大, 37GHz亮温最低, 可能是表层月壤热传导率较低, 日落后热量仍向下传输, 次表层温度升高而表层由于缺乏保温作用温度骤降造成的; (2) 三个高频通道的昼夜亮温分布具有较大的差

图9 CE-1和CE-2介电常数对比

(a) 实部; (b) 虚部

图10 研究区的月壤厚度分布

异, 白天东南部为高温区, 夜晚西南部为高温区; (3) 吕姆克E区域白天表现为亮温热点, 夜晚为亮温冷点, 归一化系数较大。

从月壤参数的反演结果来看:

(1) 介电常数呈现西、北部低, 中、东部高的分布趋势, 吕姆克山位于高、低介电常数的过渡区域, 吕姆克E具有最高的介电常数。

(2) 研究区的西北部具有较高的月壤厚度, 大于

6m. 其他区域的厚度分布较均匀, 绝大部分不超过4m, 最小厚度位于吕姆克E区域, 约2.5m。

综上所述, 吕姆克地区月表成分不均匀, 铁钛多集中于中东部。研究区西北部月壤较厚, 介电常数较小, 昼夜温差也较小, 推荐作为卫星的着陆及钻探采样。吕姆克E地区月壤厚度较小, 介电常数较大, 昼夜温差也较大, 不适合卫星的平稳着陆及采样的进行, 建议避开该区域(嫦娥五号已于2020年底成功发射并采样返回, 受研究范围的限制, 实际的着陆位置并未包含在本研究范围内)。

本研究主要基于CELMS亮温数据, 数据样本较少, 部分区域的数据覆盖性较差, 因此在亮温图的细节上仍存在一些粗糙、分布不连续的现象。因此, 未来对于CELMS数据的深度挖掘和整理以及多源遥感数据的应用对月球的研究具有重要的意义。

参考文献

- 李芸, 王振占, 姜景山. 2009. 月表温度剖面对于“嫦娥一号”卫星微波深测仪探测亮温影响的模拟研究. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 1045-1058
- 王雪影, 王振占, 张德海, 姜景山. 2021. 嫦娥一号、二号卫星微波深测仪数据的交叉定标和一致性研究. 空间科学学报, 已录用
- 王振占, 李芸, 姜景山, 李涤微. 2009. 用“嫦娥一号”卫星微波深测仪

- 亮温反演月壤厚度和³He资源量评估的方法及初步结果分析. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 1069–1084
- 王振占, 李芸, 张德海, 姜景山. 2012. CE-2微波探测仪月表特性研究. 见: 第十届全国月球科学与比较行星学陨石学与天体化学学术研讨会. 桂林, 63–66
- 张莉娟. 2015. 基于嫦娥多通道辐射亮温数据的月壤介电常数反演研究. 硕士学位论文. 武汉: 华中科技大学. 1–80
- 张曼倩. 2019. 节节突破的中国深空探测. 国际太空, 9: 32–36
- 钟振, 张腾, 张杰, 陈世国. 2020. “嫦娥5号”登陆候选地Mons Rümker的光照与温度特征分析. 物理学报, 69: 341–349
- Burke W J, Schmugge T, Paris J F. 1979. Comparison of 2.8- and 21-cm microwave radiometer observations over soils with emission model calculations. *J Geophys Res*, 84: 287–294
- Campbell B A, Hawke B R, Campbell D B. 2009. Surface morphology of domes in the Marius Hills and Mons Rümker regions of the Moon from Earth-based radar data. *J Geophys Res*, 114: E01001
- Chisenga C, Yan J G, Zhao J N, Atekwana E A, Steffen R. 2020. Density structure of the Rümker region in the northern Oceanus Procellarum: Implications for lunar volcanism and landing site selection for the Chang'E-5 mission. *J Geophys Res Planets*, 125: e05978
- Hao W F, Zhu C, Li F, Yan J G, Ye M, Barriot J P. 2019. Illumination and communication conditions at the Mons Rümker region based on the improved Lunar Orbiter Laser Altimeter data. *Planet Space Sci*, 168: 73–82
- Heiken G, Vaniman D, French B M. 1991. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon. Cambridge: Cambridge University Press. 756
- Jia M N, Yue Z Y, Di K C, Liu B, Liu Z J, Michael G. 2020. A catalogue of impact craters larger than 200 m and surface age analysis in the Chang'E-5 landing area. *Earth Planet Sci Lett*, 541: 116272
- Keihm S J. 1984. Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping. *Icarus*, 60: 568–589
- Li B, Zhang J, Yue Z Y, Yao P W, Li C F, Chen S B, Qiao L, Fu X H, Ling Z C, Chen J, Liu S X. 2020. Deriving terrain factors from high-resolution lunar images: A case study of the Mons Rümker Region. *Geomorphology*, 358: 107114
- Lucey P G, Blewett D T, Jolliff B L. 2000. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *J Geophys Res*, 105: 20297–20305
- Meng Z G, Lei J T, Qian Y Q, Xiao L, Head J W, Chen S B, Cheng W M, Shi J C, Ping J S, Kang Z Z. 2020. Thermophysical features of the Rümker Region in Northern Oceanus Procellarum: Insights from CE-2 CELMS data. *Remote Sens*, 12: 3272
- Montopoli M, Di Carlofelice A, Tognolatti P, Marzano F S. 2011. Remote sensing of the Moon's subsurface with multifrequency microwave radiometers: A numerical study. *Radio Sci*, 46: RS1012
- McKay D S, Heiken G, Basu A, Blanford G, Simon S, Reedy R, French B M. 1991. Chapter 7: Lunar regolith in lunar sourcebook. A User's Guide to the Moon. New York: Cambridge University Press. 296–306
- Olhoeft G R, Strangway D W. 1975. Dielectric properties of the first 100 meters of the Moon. *Earth Planet Sci Lett*, 24: 394–404
- Qian Y Q, Xiao L, Yin S, Zhang M, Zhao S Y, Pang Y, Wang J, Wang G X, Head J W. 2020. The regolith properties of the Chang'e-5 landing region and the ground drilling experiments using lunar regolith simulants. *Icarus*, 337: 113508
- Qian Y Q, Xiao L, Zhao S Y, Zhao J N, Huang J, Flahaut J, Martinot M, Head J W, Hiesinger H, Wang G X. 2018. Geology and scientific significance of the Rümker Region in Northern Oceanus Procellarum: China's Chang'E-5 landing region. *J Geophys Res Planets*, 123: 1407–1430
- Spudis P D, McGovern P J, Kiefer W S. 2013. Large shield volcanoes on the Moon. *J Geophys Res Planets*, 118: 1063–1081
- Shkuratov Y G, Bondarenko N V. 2001. Regolith layer thickness mapping of the moon by radar and optical data. *Icarus*, 149: 329–338
- Wu B, Huang J, Li Y, Wang Y R, Peng J. 2018. Rock abundance and crater density in the candidate Chang'E-5 landing region on the Moon. *J Geophys Res Planets*, 123: 3256–3272
- Xie M G, Xiao Z Y, Zhang X Y, Xu A A. 2020. The provenance of regolith at the Chang'e-5 candidate landing region. *J Geophys Res Planets*, 125: e06112
- Yue Z, Di K, Liu Z, Michael G, Jia M, Xin X, Liu B, Peng M, Liu J. 2019. Lunar regolith thickness deduced from concentric craters in the CE-5 landing area. *Icarus*, 329: 46–54
- Zheng Y C, Tsang K T, Chan K L, Zou Y L, Zhang F, Ouyang Z Y. 2012. First microwave map of the Moon with Chang'E-1 data: The role of local time in global imaging. *Icarus*, 219: 194–210
- Zheng Y C, Chan K L, Tsang K T, Zhu Y C, Hu G P, Blewett D T, 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
- Zeng X G, Zou W, Zhang Z B, Liu Y X, Li C L. 2017. Topographic and geologic analysis of the Pre-selection landing sites for Chang'E 5 (CE-5) lunar sample returning mission of China. In: EGU General Assembly Conference Abstracts. 17

(责任编辑: 魏勇)