

# 基于场理论的“嫦娥4号”着陆区亮温时空分布特征研究

连懿<sup>1,2</sup>, 何龙<sup>1</sup>, 孟治国<sup>3</sup>, 平劲松<sup>2</sup>, 胡硕<sup>3</sup>, 曾晓明<sup>1</sup>

(1. 天津师范大学, 天津 300387; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 3. 吉林大学 长春 130021)

**摘要:** “嫦娥4号”(Chang'e-4)将首次实现在月球背面软着陆, 而着陆区初步定为月球背面南极-艾肯(South Pole-Aitken, SPA)盆地内的冯·卡门(Von Kármán)撞击坑。利用“嫦娥”微波辐射计穿透性强的特点, 针对微波辐射亮温缺乏场分析的问题, 从场观点出发利用SVD方法分析冯·卡门撞击坑的亮温时空分布特征。结果表明冯·卡门撞击坑的3 GHz昼夜亮温场和37 GHz昼夜亮温场之间存在显著的耦合模态, 同时在撞击坑内的亮温变化趋势相对一致; FeO+TiO<sub>2</sub>(FTA)含量高的区域其相关性较高, 也是亮温变化的关键区域, 但是其等值线密度和FTA含量没有明显相关关系, 主要和月表粗糙度相关。最后通过分析冯·卡门撞击坑的亮温时空分布特征综合地形特征、地层单元和物质化学成分等因素, 为Chang'e-4着陆区的选择提供了参考。

**关键词:** 嫦娥; 微波辐射计; 亮温; SVD方法

**中图分类号:** P184

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2018)01-0027-07

**DOI:** 10.15982/j.issn.2095-7777.2018.01.004

**引用格式:** 连懿, 何龙, 孟治国, 等. 基于场理论的“嫦娥4号”着陆区亮温时空分布特征研究[J]. 深空探测学报, 2018, 5(1): 27-33.

**Reference format:** LIAN Y, HE L, MENG Z G, et al. The research of temporal and spatial of microwave brightness temperature in Chang'e-4 landing area based on filed theory[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(1): 27-33.

## 0 引言

在重新火热的探月浪潮推动下, 虽然已经有多颗环绕探测器对月球背面进行了遥感探测, 但从未实现月球背面的软着陆。“嫦娥4号”即将填补人类历史上这一空白, 实现人类首次月球背面软着陆和巡视勘察, 着陆区初步定为月球背面的南极-艾肯盆地内的冯·卡门撞击坑<sup>[1]</sup>。

SPA盆地形成于前酒海纪, 直径约2 500 km, 是月球背面最大、最古老的撞击盆地, 是研究月球演化和月亮幔物质构成的核心区域<sup>[2-5]</sup>。国内外学者从多光谱、地形等角度均对该区域展开了相关研究<sup>[6-8]</sup>, 但SPA盆地受到撞击溅射物的混染影响比较严重, 同时可见光数据和近红外数据的穿透性相对较弱, 不能用于直接探测月球浅表层的地学信息。而“嫦娥”微波辐射计具有一定的穿透性, 同时其测量的亮温直接与月球浅表层的热物理参数和电性参数相关, 可在一定程度上弥补可见光和近红外的不足<sup>[9-10]</sup>。但是目前对于微波辐射亮温分布的研究主要从像元的角度展开, 雷利

卿基于统计的方式研究了月球微波辐射宏观分布规律及影响因素<sup>[11]</sup>。张卫国等通过研究南极地区昼夜辐射异常, 预测了水冰可能存在的区域<sup>[12]</sup>。Zheng<sup>[13]</sup>和Chan<sup>[14]</sup>等通过对“嫦娥”微波辐射计数据的时角校正, 研究月球昼夜亮温的变化异常区域, 发现了由于撞击坑形成年代不同造成的亮温变化差异。胡国平等对Apollo登月点处的亮温时变趋势进行了研究<sup>[15]</sup>。宫晓蕙等基于微波辐射计亮温数据, 研究昼夜时刻新老环形山的昼夜表面热辐射异常和高热传导高热惯性岩石块丰度分布的相关性<sup>[16]</sup>。朱永超等基于“嫦娥2号”微波辐射计37 GHz通道微波亮温数据, 计算了亮温数据月球地方时, 获取了月球不同时间段的12幅微波亮温分布图, 在此基础上分析了连续时间序列下的亮温时变特征<sup>[17]</sup>。孟治国等分析了FTA含量, 月壤的厚度等地学参数对亮温分布的影响<sup>[18-19]</sup>。上述研究均基于像元, 从亮温的时变趋势针对地学信息进行了深入挖掘, 取得了大量研究成果, 但是基于场的观点对微波辐射亮温时空分布特征的研究还相对不足。

收稿日期: 2017-11-14 修回日期: 2017-12-19

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金计划项目(043135202JW1718); 天津师范大学校开发基金(043-135202XK1604); 天津师范大学校博士基金(52XB1502)

因此,本研究拟从场的观点出发,基于“嫦娥”微波辐射计数据,利用SVD方法分析冯·卡门撞击坑亮温时空分布特征,以期为着陆区的合理选择提供有意义的参考。

## 1 研究区域地质概况

研究区位于SPA盆地中部冯·卡门(Von Kármán)撞击坑,直径约为186 km,中心坐标为(44.8 S, 175.9 E)。冯·卡门撞击坑具有明显的Th、Fe和Ti元素富集现象,其高程相对较低,具有独特的地貌类型,物质化学成分和地质年代具有很强的代表性,同时其内部地层异常空间分布很可能为研究该地区月壳和火山活动、月幔玄武岩起源提供有利的证据,具有较高的科学研究价值。图1为冯·卡门区域的地质图(由美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)提供的月球背面中央区域地质图),如图所示该区域共包含13类不同的地质单元,其中撞击坑内的主要地质单元是Im(月海暗色平原物质)、Ig(覆盖有撞击坑的沟槽和山丘)、Nc(次级撞击坑矿物)。其中Im和Ig都属于雨海纪,Nc则是属于雨海纪和酒海纪之间的地质单元。冯·卡门撞击坑内填充有大量的玄武岩,并且紧邻冯·卡门撞击坑南部有一个较大的撞击坑,该撞击坑北部已经完全被冯·卡门撞击坑覆盖,但从地质图上看该撞击坑也属于Im地质单元,因此该区域与冯·卡门撞击坑的成分差异相对较小。冯·卡门撞击坑表层月壤和下覆地层的主要差异应该体现在Im、Ig地质单元和Nc地质单元交界的区域,也是最有可能出现亮温时变异常的区域。

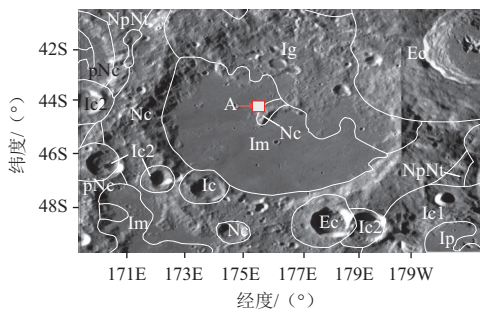


图1 冯·卡门撞击坑遥感地质解译图

Fig. 1 The remote sensing geological interpretation map of the Von Kármán Crater

## 2 亮温场的时域相关性分析

“嫦娥2号”微波辐射计的探测频率分别为3.0、7.8、19.35及37 GHz,每个频段的探测灵敏度均为0.5 K,空间分辨率为35~50 km。随着频率的不同其探测深度也不一样,不同频率的亮温数据分别代表不同深度月壤的微波辐射特征,利用这一特点可以对比分析其物

性的纵向差异。而SVD方法是以奇异值分解为核心的两个场相互性关系的分析方法,能够最大限度地分离出相互独立的耦合分布型和各自满足的正交性,揭示两场存在的时域相关性的空间联系。利用SVD方法对不同探测深度亮温场之间的时域相关性分析,可以深入挖掘月球浅表层的地质特征。

### 2.1 亮温数据处理

研究中需要对不同频率的亮温场进行时域分析,首先要获取亮温数据的时间序列,研究引入了时角的定义来表示月球地方时。通过地平坐标系到赤道坐标系的转化,将2C级亮温数据中的太阳入射角、方位角和采样纬度转化为对应的时角,其计算公式<sup>[13-14]</sup>如下

$$h = -\arctan(\sin \delta \times \tan i / (\cos \lambda - \sin \lambda \times \cos \delta \times \tan i)) \quad (1)$$

其中: $h$ 表示时角; $\delta$ 是太阳方位角,取值范围为 $[0, 2\pi]$ ;  $i$ 是太阳入射角,取值范围为 $[0, \pi]$ ;  $\lambda$ 是纬度,取值范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。

研究中以 $30^\circ$ 跨度的时角分布区间提取不同采样时间的亮温数据,然后利用克里金插值分别对每个区间的亮温数据进行插值和重采样(空间分辨率为 $0.5^\circ$ ),同时基于简单圆柱投影和GCS\_MOON\_2000坐标系进行全月亮温的填图,共生成12个时刻全月亮温分布图。图2为其中6个采样时刻( $-120^\circ, -60^\circ, 0^\circ,$

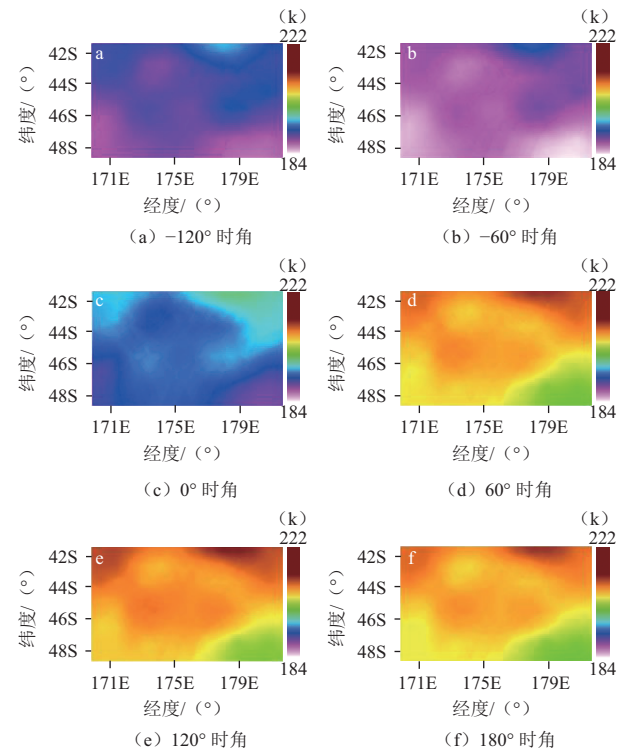


图2 37 GHz频率不同时间角的微波亮温图

Fig. 2 Microwave brightness temperature images of different time in 37GHz frequency channel

60°, 120°, 180°) 的37 GHz亮温场的分布, 结果表明亮温受物理温度的影响较大, 白天亮温值比夜晚整体较高; 在空间上随着纬度的升高, 亮温数据有明显降低的趋势。月表温度受太阳辐射影响很大, 但在一定深度以下, 月壤温度是恒定的<sup>[20]</sup>。因此, 亮温的变化也直接反映了相应的微波可穿透范围内月壤的热物理特性。

## 2.2 SVD算法

为了研究月壤不同深度的亮温时空变化特征的相关性, 研究中选取了微波辐射计最低频率, 即探测深度最深的3 GHz亮温数据作为SVD模型的左场, 最高频率通道的37 GHz亮温数据作为SVD模型的右场, 采用月球时间的一昼夜(共12个时刻)作时间序列, 进行SVD分析。研究中, 首先建立3 GHz和37 GHz的亮温要素场 $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}$ , 其中 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 空间点数均为 $m_1$ , 时间点数为12, 计算它们的标准化资料阵如下

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m_1 1} & x_{m_1 2} & \cdots & x_{m_1 n} \\ y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m_1 1} & y_{m_1 2} & \cdots & y_{m_1 n} \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y} &= \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m_1 1} & y_{m_1 2} & \cdots & y_{m_1 n} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

计算 $\mathbf{X}$ 和 $\mathbf{Y}$ 的交叉协方差阵 $\mathbf{C} = (\mathbf{X}\mathbf{Y}^T)/n$ ,  $\mathbf{C}$ 的形状为 $m_1$ 行 $m_1$ 列, 对协方差阵 $\mathbf{C}$ 进行SVD分解

$$\mathbf{C} = \begin{matrix} \mathbf{X} & \mathbf{Y}^T \\ (m_1 \times m_1) & (m_1 \times n)(n \times m_1) \end{matrix} = \begin{matrix} \mathbf{U} & \begin{bmatrix} \Sigma & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} & \mathbf{V}^T \\ (m_1 \times m_1) & (m_1 \times m_1) & (m_1 \times m_1) \end{matrix} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 的每一列都是一个空间分布函数; 每个场内空间型相互正交。左奇异向量 $\mathbf{u}_j$ , 表示第 $j$ 模态左场的空间分布; 右奇异向量 $\mathbf{v}_j$ 表示第 $j$ 模态右场的空间分布。把原观测场 $\mathbf{X}$ 投影到 $\mathbf{u}_j$ , 把 $\mathbf{Y}$ 场投影到 $\mathbf{v}_j$ , 即可得到第 $j$ 模态左右场的时间序列, 记为 $\mathbf{a}_j$ 和 $\mathbf{b}_j$

$$\mathbf{a}_j = \mathbf{u}_j^T \mathbf{X} \quad (4)$$

$$\mathbf{b}_j = \mathbf{v}_j^T \mathbf{Y} \quad (5)$$

在此基础上计算第 $j$ 模态的奇异值, 即 $\mathbf{a}_j$ 和 $\mathbf{b}_j$ 的协方差

$$\sigma_j = \text{Cov}(\mathbf{a}_j, \mathbf{b}_j) = \frac{1}{n} \mathbf{a}_j \mathbf{b}_j^T = \frac{1}{n} (\mathbf{u}_j^T \mathbf{X})(\mathbf{v}_j^T \mathbf{Y})^T = \mathbf{u}_j^T \mathbf{C}_{xy} \mathbf{v}_j \quad (6)$$

对于 $j$ 模态而言, 同类相关系数为该场的 $\mathbf{X}$ 的每个格点的序列与该场的时间系数做相关系数, 而异类相关系数则为该场的 $\mathbf{X}$ 的每个格点的序列与另一场的时间系数做相关系数, 其中异类相关系数表示两个亮温场之间的时域变化的相关性是研究的重点。3 GHz场 $\mathbf{X}$ (左场)的异类相关系数的求解公式为

$$\mathbf{r}(\mathbf{X}, \mathbf{b}_j) = \frac{\frac{1}{n} \mathbf{X} \mathbf{b}_j^T}{1 \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n b_{jt}^2}} = \frac{\frac{1}{n} \mathbf{X} (\mathbf{v}_j^T \mathbf{Y})^T}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n b_{jt}^2}} = \frac{\sigma_j}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n b_{jt}^2}} \mathbf{u}_j \quad (7)$$

而各模态的贡献率主要通过协方差平方和的贡献率表示, 其公式如下

$$\text{SCF}_j = \frac{\sigma_j^2}{\sum_{k=1}^r \sigma_k^2} \quad (8)$$

由此可知前4个模态的贡献率(表1), 其第1模态的贡献率达到99.95%, 因此这两个亮温场关系的主要特征主要来自第1模态。

表1 3 GHz与37 GHz昼夜亮温场SVD分析下前5对主分量模态

方差贡献率及相关系数

Table 1 Modal variance contributions and correlation coefficients of the first five pairs of principal components by SVD analysis of day and night brightness temperature filed in 3 GHz and 37 GHz frequency channel

项目	第1模态	第2模态	第3模态	第4模态	第5模态
方差贡献率/(%)	99.95	0.04	0.00	0.00	0.00
相关系数	0.669 7	0.646 5	0.758 4	0.871 8	0.816 4

## 3 结果与讨论

### 3.1 亮温时空分布特征

在3 GHz昼夜亮温场和37 GHz昼夜亮温场SVD分析中, 将针对贡献率最高的第一模态进行深入分析。其中从异类相关时间序列图(图3, 3 GHz的亮温为左场, 37 GHz的亮温为右场)可看出3 GHz昼夜亮温场和37 GHz昼夜亮温场之间存在显著的耦合模态, 从其所对应的时间序列也可以看出, 两个场的时间系数有明显的昼夜波动, 变化趋势也相对一致, 其在时角为-90°左右位置为时间序列上的增长趋势最强区域, 随后开始逐渐减缓, 到时角为0°时亮温开始有减少趋势, 而其中在时角为60°时3 GHz的亮温时间序列上有个峰值, 这可能是来自于月壤下垫面的热辐射能量。其中两个场第1模态的相关系数(表1)为0.669 7, 也表明其整体呈正相关。



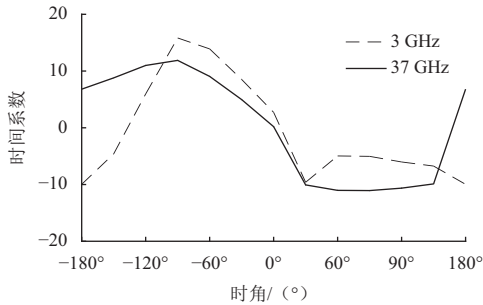


图3 SVD第1模式的左异类相关时间序列图

Fig. 3 The left intra class correlation time sequence coefficients map of the first model

SVD第1模式的左异类相关图(图4, 3 GHz的亮温为左场, 37 GHz的亮温为右场)表明撞击坑内部区域相关系数相对较高, 这一方面是因为该地相对平坦粗糙度较小, 同时以一定程度表示其纵向剖面的地质结构相对一致。结果表明在撞击坑边缘其等值线密度相对较高。这可能是由于地形起伏造成表面粗糙度变化较大而引发的亮温异常现象。

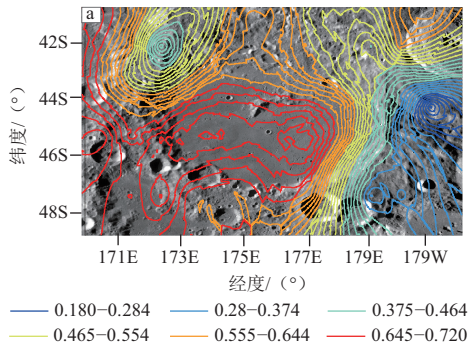


图4 SVD第1模式的左异类相关图

Fig. 4 The left intra class correlation coefficients map of the first model

### 3.2 亮温时空变化影响因素

根据辐射传输理论及相关研究表明与月壤介电常数密切相关的FTA含量、影响月表发射率的坡度等都是亮温的主要影响因素<sup>[21-23]</sup>。为了进一步分析冯·卡门撞击坑的亮温时空变化特征及其地学内涵, 研究中将考虑坡度数据和FTA含量对亮温场的影响。

#### 1) FTA含量

冯·卡门撞击坑FTA的反演主要是基于Clementine UVVIS数据利用Lucy等基于统计学方式建立的月表FeO含量和TiO<sub>2</sub>含量的反演算法实现的, 其公式如下

$$N_{\text{FeO}} = 17.427 \times \left( -\arctan \left( \frac{R_{950} - 1.19}{R_{750} - 0.08} \right) \right) - 7.656 \quad (9)$$

$$N_{\text{TiO}_2} = 3.708 \times \left( \arctan \left( \frac{R_{415} - 0.42}{R_{750}} \right) \right)^{5.979} \quad (10)$$

式中:  $R_{950}$ 、 $R_{750}$ 、 $R_{415}$ 分别是波长为950 nm、750 nm和415 nm时月球表面的反射率。基于上述模型即可得到冯·卡门撞击坑的FTA含量分布图(图5)。

将该分布图与将3 GHz昼夜亮温场的异类相关系数生成的等值线图进行比较, 结果表明在FTA含量高的区域其相关性较高, 也是亮温变化的关键区域, 但是其等值线的密度和FTA含量没有明显相关关系。这是由于月表FTA含量高的区域, 其月表介电常数相对较高, 表层月壤(37 GHz可探测深度范围的月壤)在整个纵向区间的辐射传输贡献率也相对较高, 因此3 GHz昼夜亮温场在该区域受到37 GHz亮温场的影响相对较大, 在图上的表示则是该区域的相关系数较高。

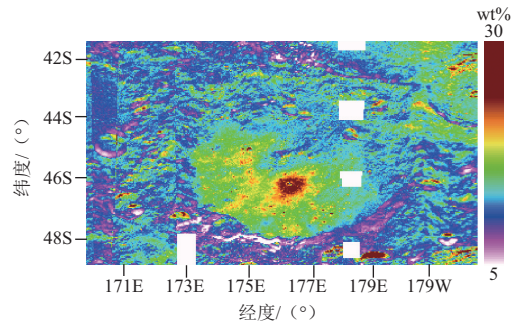


图5 冯·卡门撞击坑FeO和TiO<sub>2</sub>含量分布图

Fig. 5 The FTA distribution of Von Kármán crater

#### 2) 地形

地形(尤其是月表粗糙度)也是影响微波辐射特性的关键参数。图6是基于LOLA数据制作的研究区高程图, 可以看出, 冯·卡门坑内高程相对较小, 地势平坦, 在冯·卡门撞击坑的内部仅有一个中央峰, 适合着陆器实现软着陆需求。在此基础上, 研究中基于LOLA的高程数据对冯·卡门撞击坑的坡度和粗糙度进行了提取。

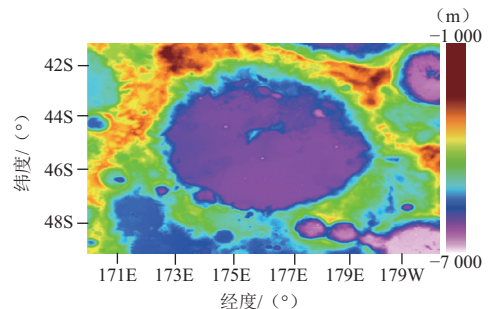


图6 冯·卡门撞击坑高程图

Fig. 6 The elevation map of the Von Kármán crater

坡度的提取是通过差分计算方法计算出了每个像素点的坡度(图7)。而粗糙度的提取是采用Rosenburg等提出的窗口分析方法, 选用1°×1°的窗口计算其均

方根高程<sup>[24-25]</sup>，公式如下

$$\sigma = \sqrt{\left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [h_i - \bar{h}]^2 \right)} \quad (11)$$

其中： $n$ 为剖面线中观测样本点个数； $h_i$ 为在给定剖面线的位置 $i$ 处高程值； $\bar{h}$ 为所有观测样本的平均高程。一般情况下，地表越粗糙，均方根高程越大。

结果如图8所示，能够直观地展现研究区粗糙度的整体分布情况。将该分布图与将3 GHz昼夜亮温场的异类相关系数生成的等值线图进行比较，结果表明地形对于相关系数的高低没有明显的影响。但是等值线的疏密程度和月表粗糙度趋势相对一致，表现为粗糙度越大的区域其等值线密度越密，粗糙度和坡度越小等值线越稀疏。

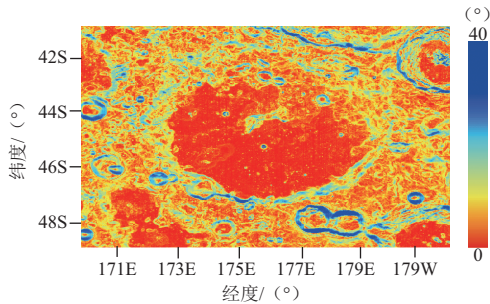


图7 冯·卡门撞击坑坡度图

Fig. 7 The slope map of the Von Kármán crater

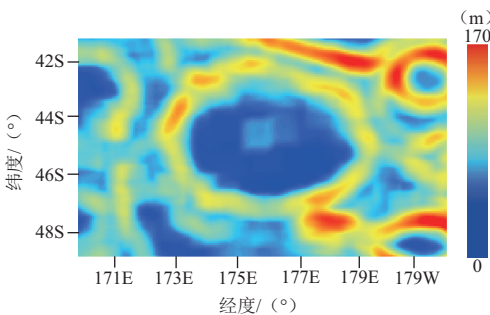


图8 冯·卡门撞击坑粗糙度图

Fig. 8 The roughness map of the Von Kármán crater

### 3.3 着陆区选取

基于SVD方法对亮温时空变化特征及其相关影响因素分析结果表明，影响亮温时空分布特征的主要因素是粗糙度，而与FTA等关系相对较弱。根据其亮温时空分布异常的特点，可选取撞击坑内3GHz昼夜亮温场的异类相关等值线相对较密集的A点（图1），作为“嫦娥4号”的预选着陆区。研究中认为该地区亮温变化异常的成因是由下垫面物质成分结构的差异造成；同时A点位于Nc地质单元和Im地质单元的交界处，其亮

温异常可能是由于下覆地层地质单元的差异造成的，在该区域开展测月雷达巡航，可能发现隐月海的地质界线，为隐月海的划分提供科学依据。对该地区的着陆巡航探测将为月球当前的热活动特征提供重要数据保障，为进一步研究月球热演化历史，以及浅层月亮热活动特征提供重要的证据。

同时坡度是影响着陆区选择的重要因素，利用坡度计算模型，对冯·卡门撞击坑进行了坡度求算，结果表明登陆点A的整体坡度较低，地势较平缓，适宜着陆器的着陆和巡航，且Fe和Ti等矿物元素的含量丰厚，适合进一步的勘探和研究。

## 4 结论

“嫦娥4号”着陆器和巡视器将于2018年前后首次实现在月球背面软着陆和巡视勘察。研究中基于“嫦娥”辐射计数据对每个采样点进行亮温时角校正，利用克里金插值方法，获取微波亮温时空分布数据，在此基础上对冯·卡门撞击坑预选着陆区以3 GHz昼夜亮温场为左场、37 GHz昼夜亮温场为右场进行SVD分析，深入挖掘其不同探测深度之间的亮温场时空分布特征的相关性。研究结果表明：

1) 3 GHz昼夜亮温场和37 GHz昼夜亮温场之间存在显著的耦合模态，其相关系数也较高。两个场时间系数虽有明显昼夜波动，变化趋势也相对比较一致，但在时角为60°时，3 GHz的亮温时间序列上有个峰值，这可能是来自于月壤下垫面的热辐射能量。

2) FTA含量高的区域其相关性较高，也是亮温变化的关键区域，但是其等值线的密度和FTA含量没有明显相关关系，主要和月表粗糙度相关。

3) 综合SVD分析结果、坡度、地层图和物质化学成分等因素，A区可以作为“嫦娥4号”着陆的优先选择区域，该区域亮温变化趋势相对剧烈，处于Im和Nc地质单元边界，FTA含量也相对较高，同时坡度平坦，在该区域开展科学探测可为月球当前的热活动特征提供重要数据保障，为进一步研究月球热演化历史，以及浅层月亮热活动特征提供重要的证据。

## 参 考 文 献

- [1] 吴伟仁,王琼,唐玉华,等.“嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J]. 深空探测学报, 2017, 4(02): 111-117.  
WU W R, WANG Q, TANG Y H, et al. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(02): 111-117.
- [2] SPUDIS P D, RIESSE R A, GILLIS J G. Ancient multiring basins on the moon revealed by clementine laser altimetry [J]. Science, 1994,

- 266: 1848-1851.
- [3] OHTAKE M, UEMOTO K, YOKOTA Y, et al. Geologic structure generated by large-impact basin formation observed at the South Pole-Aitken basin on the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(8): 2738-2745.
- [4] ZUBER M T, SMITH D E, LEMOINE F G, et al. The shape and internal structure of the moon from the Clementine mission [J]. *Science*, 1994, 266: 1839-1843.
- [5] 张健, 缪秉魁, 廖庆园, 等. 月球南极艾特肯盆地的地质特征: 探索月球深部的窗口[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2011, 30(02): 234-240+244.
- ZHANG J, MIAO B K, LIAO Q Y, et al. The geological characteristics of the South Pole-Aitken basin on the Moon: the window to explore the deep composition of the Moon [J]. *The Window to Explore the Deep Composition of the Moon*, 2011, 30(02): 234-240.
- [6] 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]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2000, 105(E8): 20297-20305.
- [7] YAN B K, WANG R S, GAN F P, et al. Minerals mapping of the lunar surface with clementine UV-VIS-NIR data based on spectra unmixing method and hapke model[C]// *Lunar and Planetary Science Conference*. USA: [s.n.], 2010.
- [8] OHTAKE M, MATSUNAGA T, HARUYAMA J, et al. The global distribution of pure anorthosite on the Moon[J]. *Nature*, 2009, 461(7261): 236.
- [9] MENG ZHIGUO, ZHAO RUI, CAI ZHANCHUAN, et al. Microwave thermal emission at tycho area and its geological significance[C]// *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. [S.l.]: IEEE, 2017.
- [10] MENG Z G, ZHANG J D, CAI Z C, et al. Microwave thermal emission features of Mare orientale revealed by CELMS Data[C]// *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. [S.l.]: IEEE, 2017. DOI(identifier) 10.1109/JSTARS.2017.2700397.
- [11] 雷利卿, 姜景山, 张晓辉, 等. 月球若干地区微波辐射特征研究[J]. *遥感技术与应用*, 2009, (04): 423-434.
- LEI L Q, JIANG J S, ZHANG X H, et al. Microwave radiation analysis for some regions on the Moon [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, (04): 423-434.
- [12] 张卫国, 姜景山, 刘和光, 等. 月球南极的微波辐射分布与异常[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2009, 39(08): 1059-1068.
- ZHANG W G, JIANG J S, LIU H G, et al. Distribution and anomaly of microwave emission at lunar south pole [J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 39(08): 1059-1068.
- [13] ZHENG Y C, TSANG K T, CHAN K L. First microwave map of the Moon with Chang'E-1 data: the role of local time in global imaging[J]. *Icarus*, 2012, 219: 194-210.
- [14] CHAN K L, KANG T T, KONG B, et al. Lunar regolith thermal behavior revealed by Chang'E-1 microwave brightness temperature data[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2010, 295(s 1-2): 287-291.
- [15] 胡国平, 陈柯, 李青侠, 等. 月球表面微波亮温的时变趋势[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(5): 64-67.
- HU G P, CHEN K, LI Q X, et al. Diurnal variation trend of microwave brightness temperature on the moon[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2013, 41(5): 64-67.
- [16] 宫晓蕙, 金亚秋. “嫦娥一号”对月球新生环形山表面热辐射“热点”与“冷点”昼夜变化的观测[J]. *中国科学: 信息科学*, 2012, 42(8): 923-935.
- GONG X H, JIN Y Q. Diurnal change of thermal emission with “hot spots” and “cold spots” of fresh lunar craters observed by Chinese Chang'E-1[J]. *Scientific Sinica Informationis*, 2012, 42(8): 923-935.
- [17] 朱永超, 郑永春, 邹永廖. 月球表面“冷点”和“热区”研究: 嫦娥二号微波亮温数据分析[J]. *矿物学报*, 2016(2): 231-240.
- ZHU Y C, ZHENG Y C, ZOU Y L. Cold spots and warm regions on the lunar surface: analysis of brightness temperatures data from Chang'E-2 microwave observation[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2016(2): 231-240.
- [18] 孟治国, 平劲松, 徐懿, 等. 厚度对月壤微波辐射亮温的影响[J]. *地理研究*, 2014, 33(6): 1015-1022.
- MENG Z G, PING J S, XU Y, et al. Influence of layer thickness on microwave emission of lunar regolith[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(6): 1015-1022.
- [19] MENG Z G, YANG G D, PING J S, et al. Influence of (FeO+TiO<sub>2</sub>) abundance on the microwave thermal emissions of lunar regolith[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59: 1498-1507, doi: 10.1007/s11430-016-5280-1.
- [20] ZHENG Y C, TSANG Z S, CHAN K L, et al. First microwave map of the Moon with Chang'E-1 data: the role of local time in global imaging [J]. *Icarus*, 2012, 219(1): 194-210.
- [21] 陈思, 孟治国, 张吉栋, 等. Tycho撞击坑地区微波热辐射特性研究 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46(2): 029608.
- CHEN S, MENG Z G, ZHANG J D, et al. Research on microwave radiation characteristics at Tycho crater area [J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2016, 46(2): 029608.
- [22] FANG T, FA W. High frequency thermal emission from the lunar surface and near surface temperature of the Moon from Chang'E-2 microwave radiometer [J]. *Icarus*, 2014, 232: 34-53.
- [23] MENG Z G, XU Y, CAI Z C, et al. Influence of lunar topography on simulated surface temperature[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54(10): 2131-2139.
- [24] ROSENBERG M A, AHARONSON O, HEAD J W, et al. Global surface slopes and roughness of the Moon from the Lunar Orbiter Laser Altimeter[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2011, 116(E2): 1161-1172.
- [25] 严艳梓, 汤国安, 熊礼阳, 等. 基于DEM的月球雨海地区粗糙度研究 [J]. *地理研究*, 2014, 33(8): 1442-1456.
- YAN Y Z, TANG G A, XIONG L Y, et al. Lunar surface roughness of Mare Imbrium based on DEMs[J]. *Geographical Research*, 2014, 33(8): 1442-1456.
- 作者简介:  
连懿(1986-), 男, 博士, 主要研究方向: 月球微波遥感。  
通信地址: 天津师范大学地理与环境科学学院(300387)  
电话: 18622798507  
E-mail: fishlice@163.com

# The Research of Temporal and Spatial Distribution of Microwave Brightness Temperature in Chang'E-4 Landing Area Based on Field Theory

LIAN Yi<sup>1,2</sup>, HE Long<sup>1</sup>, MENG Zhiguo<sup>3</sup>, PING Jingsong<sup>2</sup>, HU Shuo<sup>3</sup>, ZENG Xiaoming<sup>1</sup>

(1. Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2. The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

3. Jilin University, Changchun 130021, China)

**Abstract:** Chang'e-4 (CE-4) probe will achieve the first soft landing on the farside of the moon in the history of mankind, and the landing zone is tentatively fixed in the Von Karman impact crater which is in the South Pole-Aitken basin. In view of the lack of field analysis of microwave radiation brightness temperature, analyzed the brightness temperature's temporal and spatial distribution characteristics of Von Karman impact crater was analyzed based on the field and the penetrability of Chang'e Microwave radiometer. The results show that there is a significant couple mode between 3GHz diurnal brightness temperature field and 37GHz diurnal brightness temperature field, and the trend of brightness temperature appeared consistent in the crater. It also turns out that the area with high FeO+TiO<sub>2</sub> (FTA) content has a higher relativity, which is the key area of brightness temperature change. Nevertheless, the FTA content does not have significant impact on the density of contours. Contrarily, the density of contours is mainly influenced by the roughness of the moon's surface. Finally, the research provided a reference for the choice of landing zone of CE-4 probe by analyzing the temporal and spatial distribution characteristics of brightness temperature, stratigraphic unit, chemical constituents of substance and other factors in Von Karman impact crater.

**Key words:** Chang'e probe; microwave radiometer; brightness temperature; SVD method

## High lights:

- The brightness temperature's temporal and spatial distribution characteristics of Von Karman impact crater was analyzed based on the field and the penetrability of Chang'e Microwave radiometer.
- The area with high FeO+TiO<sub>2</sub> (FTA) content has a higher relativity, which is the key area of brightness temperature change.
- The density of contours is mainly influenced by the roughness of the moon's surface.
- The research provided a reference for the choice of landing zone of CE-4 probe.

[责任编辑：宋宏，英文审校：朱恬]