

“嫦娥4号”月球背面着陆区月壳及深部结构特征

黄倩¹, 王太茂², 赵健楠², 孟治国³

(1. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院 地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 武汉 430074;

2. 中国地质大学 地球科学学院 行星科学研究所, 武汉 430074;

3. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026)

摘要: 深部月壳和月幔物质结构是月球科学探测的关键问题之一。“嫦娥4号”初步将月球背面南极-艾肯 (South Pole-Aitken, SPA) 盆地内的冯·卡门 (Von Kármán) 撞击坑作为着陆点, 具有重要的科学价值。结合月球重力、地形、布格重力、月壳厚度等地球物理数据, 综合对冯·卡门撞击坑的月壳及其深部结构特征进行了分析。结果显示: 冯·卡门撞击坑重复撞击到南部的冯·卡门M撞击坑上, 后者的中央峰具有明显的布格正重力异常和线性的布格重力梯度特征, 显示出高密度的幔部物质向上涌起; 冯·卡门撞击坑极有可能穿透了该区域的整个月壳, 并挖掘出了深部月幔的物质; 该区域南部月壳厚度较薄小于5 km, 北部平均月壳厚度在15~20 km, 月壳平均密度为 $2.630 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 比背面高地月壳密度高, 且平均孔隙度为9%, 低于月球的平均孔隙度12%。

关键词: 月球; 嫦娥4号; 冯·卡门撞击坑; 月壳; 深部结构

中图分类号: P184

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)01-0041-09

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2018.01.006

引用格式: 黄倩, 王太茂, 赵健楠, 等. “嫦娥4号”月球背面着陆区月壳及深部结构特征[J]. 深空探测学报, 2018, 5 (1) : 41-49.

Reference format: HUANG Q, WANG T M, ZHAO J N, et al. Crustal and subsurface structures of Chang'E-4 lunar farside landing-site[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5 (1) : 41-49.

0 引言

深部月壳和月幔的物质成分及结构是当月球科学的关键问题之一^[1], 对于我们了解月球形成初期的分异作用, 探究月球的二分性(即月球正面和背面的地貌、结构、物质成分、月壳厚度的分布等所具有的明显差异)的成因具有重要意义。但是目前尚无法通过遥感手段直接获得准确的深部月壳和月幔的成分, 也未采集到月球深部的岩石样品。对于深部结构, 则是利用月震、月球重力场和地形等数据进行研究。

月球背面的月壳较为古老, 布满大小不等的撞击坑和撞击盆地, 是研究早期撞击历史和深部物质组成最好的场所。作为月球最古老、最大的撞击盆地, 南极-艾肯 (South Pole-Aitken, SPA) 盆地是最有可能挖掘出月幔物质的盆地, 其峰环、盆地内以及溅射毯的撞击熔融层及撞击熔融角砾岩都是很好的月幔物质取样地区。虽然挖掘出的月幔物质可能被月壤及玄武岩覆盖, 但后期形成的撞击坑又可重新将月幔物质暴露出来。因此SPA盆地是探测和研究深部月壳及月幔

物质的理想区域。SPA内的多个盆地都被建议作为着陆探测区及采样点, 如该盆地东部的阿波罗 (Apollo) 盆地^[2]和薛定谔 (Schrödinger) 盆地^[3]等。

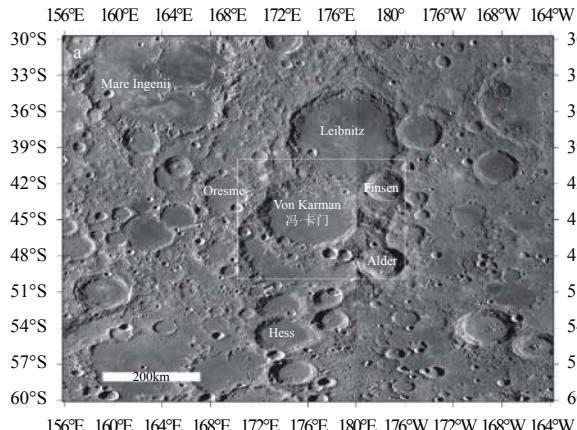
中国预计在2018年发射“嫦娥4号”月球探测卫星, 开展月球背面软着陆和巡视探测, 实现工程技术和空间科学的双重跨越和创新^[4]。“嫦娥4号”任务的工程目标主要有两个: ①实现人类首次月球背面软着陆和巡视勘察; ②首次实现地月L2点中继星对地对月的测控和数传中继。科学目标主要包括以下3个方面: ①月基低频射电天文观测与研究; ②月球背面巡视区形貌和矿物组分探测与研究; ③月球背面巡视区浅层结构探测与研究。遵循工程技术上可行、科学上有特色的原则, 初步考虑将“嫦娥4号”的着陆区选为月球背面南极-艾肯盆地内的冯·卡门 (Von Kármán) 撞击坑内^[4], 该撞击坑具有较高的科学探测价值, 且地势较为平坦, 可以同时满足科学和工程上的要求^[5]。本文依据月球现有高分辨率重力和地形等数据, 获取了表征冯·卡门撞击坑深部结构的布格重力异常、布格重力梯度、月壳厚度和孔隙度等信息, 针对冯·卡门撞击坑的月壳

和深部结构特征进行综合分析, 为“嫦娥4号”的科学目标的实现提供知识支撑和技术支持。

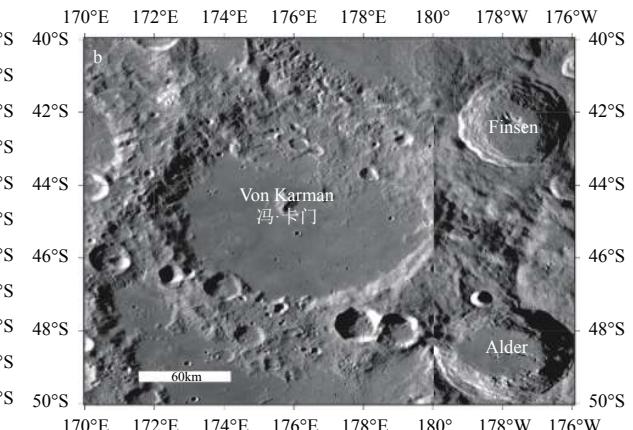
1 着陆区地质背景

冯·卡门撞击坑位于SPA盆地的中部, 纬度跨度为42°~48°S, 经度跨度为172°~180°E, 直径为172 km, 中心坐标为(44.8°S, 175.9°E)。紧邻冯·卡门北部的撞击坑是莱布尼兹(Leibnitz)撞击坑, 撞击坑直径约250 km, 参见图1(标注了撞击坑Leibnitz, Finsen和

Alder等的位置)。冯·卡门撞击坑东部南北各有一个较小的撞击坑, 分别是北部的梵森(Finsen)和南部的阿尔德(Alder), 直径均在75 km左右(图1(a))。从图1(b)中可以看出, 冯·卡门撞击坑的南部地势较为平坦, 覆盖有大量的玄武岩, 相对东部的梵森和阿尔德年龄偏老。撞击坑中部的中央峰有部分的缺失, 仅保存了北部的隆起区域。冯·卡门撞击坑以南还存在较大且明显的撞击坑边缘, 显示在冯·卡门撞击坑形成前该区域已经存在一个更大的撞击坑。



(a) 冯·卡门区域影像图



(b) 图(a)白色线框内影像图

图1 嫦娥4号着陆区冯·卡门区域影像图(基于LRO WAC影像图, 分辨率为100米/像素)

Fig. 1 Image of the Chang'e-4 candidate landing site, Von Kármán crater area on the lunar farside (based on LRO WAC image data, 100 m/pixel)

前人针对冯·卡门撞击坑的研究主要集中在形貌学和地质学方面。前期结果显示, 冯·卡门撞击坑内充填有大量的玄武岩^[6], 同时, 该撞击坑叠置在另一个较大的古老撞击坑冯·卡门M(Von Kármán M)之上, 后者仅出露南部坑缘(图1)。图2显示了图1(a)区域的地形图, 该图基于月球勘测轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)上搭载的月球轨道器激光高度计(LOLA)获取的地形数据。从图中可以很明显的看出, 冯·卡门撞击坑整体地势比较平坦, 平均高程范围为-6~-5 km, 从影像和地形图上较难分辨出冯·卡门和北部的莱布尼兹的交切关系, 两者地质年龄相近。从影像和地形图上很明显可以看出, 冯·卡门是冯·卡门M上一个新覆盖的撞击坑, 年龄较冯·卡门M年轻。

利用日本“月亮女神号”(Kaguya)的高分辨率影像图, Haruyama等^[7]给出了SPA盆地大部分撞击坑内玄武岩的地质年龄, 冯·卡门撞击坑内玄武岩的模式年龄在3.35 Ga, 冯·卡门M撞击坑内玄武岩的模式年龄在3.38 Ga, 北部的莱布尼兹撞击坑内玄武岩的模式年龄在3.44 Ga^[7], 均属于月球的雨海纪。近期研究者利用LRO上搭载的宽角相机(Wide-Angle Camera, WAC)获取的高分辨率影像图, 对该区域的玄武岩进行了重

新定年, 结果显示冯·卡门撞击坑南部玄武岩的年龄在3.15 Ga, 北部玄武岩的地质年龄为3.75 Ga, 南部和北部的玄武岩年龄具有一定的差异性^[8]。

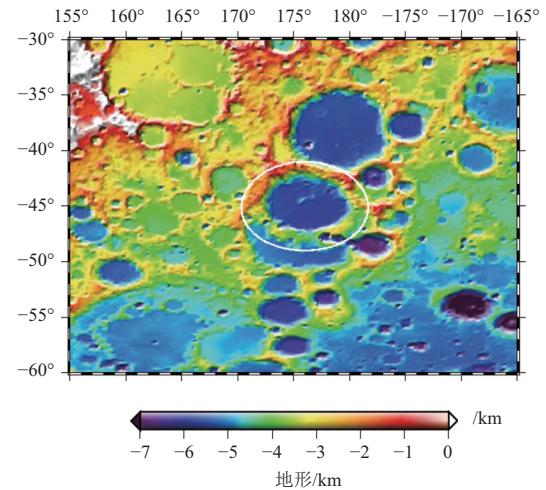


图2 冯·卡门撞击坑及其周边区域地形图
(基于LOLA激光测高数据, 256像素/度)

Fig. 2 Topography map of the Von Kármán crater region
(based on LOLA data, 256 pixels/degree)

图3为冯·卡门区域的地质图^[9], 红色Im表示暗色玄武岩平原物质, 浅蓝色Ig表示覆盖有撞击坑的沟槽

和山丘, Im和Ig都属于雨海纪。Nc是比雨海(Imbrium)撞击盆地老比酒海(Nectaris)撞击盆地年轻的地质单元。该图来源于美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS), 截取自1:5 000 000月球背面中央区域地质图(<https://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/usgs/I1047/150dpi.jpg>), 截取范围为170°~190°E, 30°~50°S。从图中可以看出冯·卡门南部玄武岩覆盖区年龄为雨海纪, 该地质图显示的冯·卡门和莱布尼兹撞击坑与日本“月亮女神号”撞击坑定年获得的年龄结果一致^[7]。Snape^[5]利用早期日本“月亮女神号”获取的地形和重力数据, 分析得出SPA区域的月壳厚度较薄^[10], 由于冯·卡门重复撞击到一个年龄稍老的冯·卡门M撞击坑上, 该撞击坑很有可能穿透了整个SPA盆地月壳, 并挖掘出了部分月幔物质。

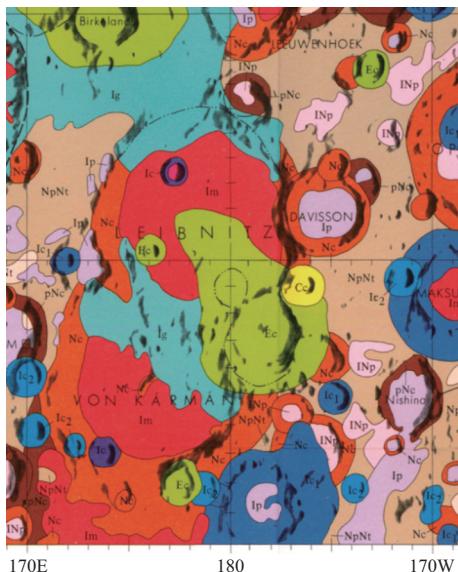


图3 冯·卡门区域地质图

Fig. 3 The geological map of Von Kármán region

美国国家研究委员会(National Research Council)2007年出版的《月球科学探测白皮书》给出冯·卡门区域的研究目标有如下几点^[1]: ①确定冯·卡门撞击坑中玄武岩的年龄(可能的SPA的年龄), 进而对月球的撞击年龄进行约束; ②研究该区域可能穿透了月壳并到达月幔的小撞击坑, 从而研究月球的深部结构; ③研究不同地质单元富含钍(Th)、氧化亚铁(FeO)的月球岩石和玄武岩样本等, 获取这些岩石的年龄、分布特征以及起源特征等信息; ④研究月球背面玄武岩的起源、成分和年龄的多样性; ⑤通过检测熔岩席的情况来估计目前月球背面的岩浆分异特征等。因此, 该区域具有较高的研究价值, 特别是在研究月球深部物质和结构特征上。鉴于以往对该区域的研究主

要在地形和地貌特征上, 本文将利用现有的月球地球物理等探测数据, 综合对该区域的壳幔深部结构进行分析和研究, 为后期“嫦娥4号”的工程和科学目标实施提供一定的数据支撑。

2 着陆区月壳和深部结构特征

在研究地球的壳幔圈层结构中, 地震波数据是最为精确和有效的数据来源。但是在行星研究中, 相对缺乏地震波的数据信息, 仅Apollo时期有月球正面的月震观测数据。在行星壳层和深部结构研究中, 多是采用重力场分析方法^[11]。重力场是内部物质分布的函数, 通常结合表面的地形和一定的地球物理假设, 可以对行星的深部物质结构进行分析。本文将利用最新获取的月球重力和地形等地球物理数据, 综合对冯·卡门撞击坑的壳层和深部结构特征进行分析。

2.1 重力和地形

2.1.1 重力、地形导纳和相关函数

行星体的重力和地形通常以球谐函数的形式表示, 其中重力和地形分别可以表示成

$$g(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l g_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1)$$

$$h(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l h_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi) \quad (2)$$

其中: l 和 m 分别为球谐函数的阶和次; g_{lm} 和 h_{lm} 分别为重力和地形的球谐函数系数。频率域重力和地形的导纳 $Z(l)$ (Admittance) 和相关 $\gamma(l)$ (Correlation) 可以表示为^[12]

$$Z(l) = \frac{S_{hg}(l)}{S_{hh}(l)} \quad (3)$$

$$\gamma(l) = \frac{S_{hg}(l)}{\sqrt{S_{hh}(l)S_{gg}(l)}} \quad (4)$$

其中: $S_{hg}(l)$ 为重力和地形的交叉功率谱; $S_{hh}(l)$ 和 $S_{gg}(l)$ 分别为地形和重力的自相关谱。

在频率域, 重力和地形的关系通常可以表示成^[11]

$$g_{lm} = Q_{lm} h_{lm} + I_{lm} \quad (5)$$

其中: Q_{lm} 为线性转换方程; I_{lm} 是未被模型表示的部分重力场信息, 主要是重力场中的噪声。假设 I_{lm} 与地形无关, 可以直接利用公式(3)和(4)计算重力和地形的频谱信息 $S_{hh}(l)$ 、 $S_{gg}(l)$ 和 $S_{hg}(l)$, 以及它们的比值关系导纳 $Z(l)$ 和相关 $\gamma(l)$ 。如果可以构建一个合适的重力和地形关系模型 Q_{lm} , 并利用这个关系模型得到模拟的频谱信息与实际的观测值进行拟合, 便

可以求得与模型相关的地球物理参数。例如，假设行星体的岩石圈是漂浮着的薄弹性球壳，如果将地形看作是表面载荷，可以得到重力和地形的线性转换模型 Q_{lm} 。经过简单的关系换算得到导纳和相关的表达式为

$$Z(l) = f(\rho_c, \rho_m, \nu, E, T_e, T_c, z, g, R) \quad (6)$$

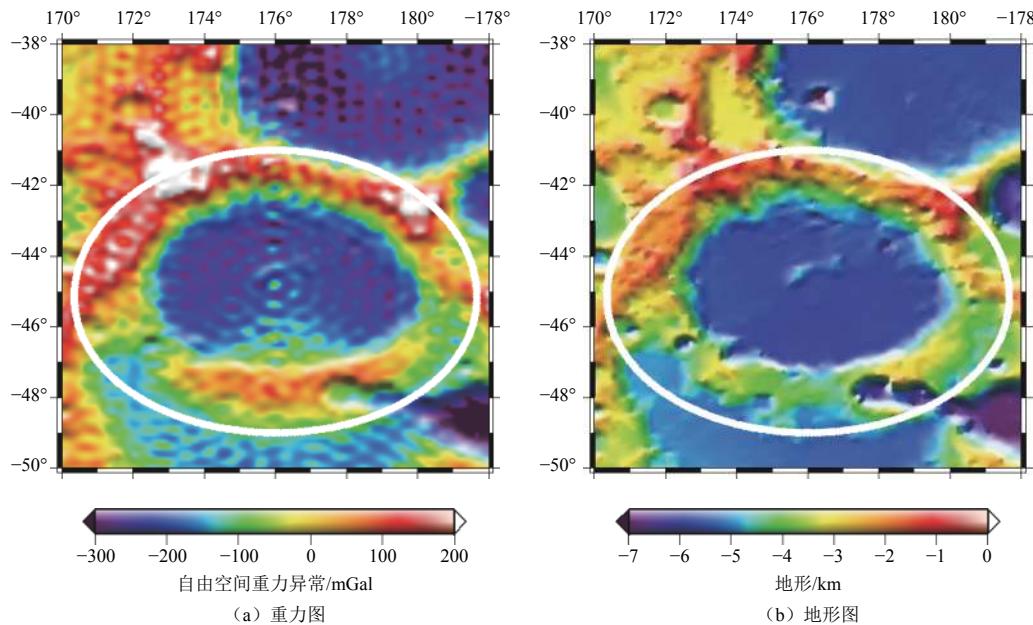


图4 冯·卡门区域的重力和地形图

Fig. 4 Gravity and topography map of Von Kármán

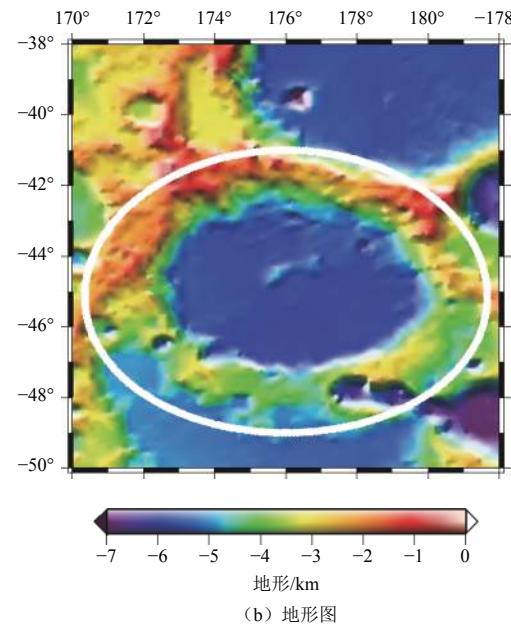
2.1.2 重力和地形数据

本研究所采用的地形和重力数据均来自行星数据系统 (Planetary Data System, <http://pds-geosciences.wustl.edu/>)，其中地形数据来自LRO上搭载的激光高度计LOLA^[13]，采用的是2 050阶次球谐函数模型 (http://pds-geosciences.wustl.edu/lro/lro-l-lola-3-rdr-v1/lrolol_1xxx/data/lola_shadr/)，格网化展开到0.1°，空间分辨率为3 km。2011年末发射升空的美国“圣杯号” (Gravity Recovery and Interior Laboratory, GRAIL; 月球重力重建与内部结构实验室) 探测器所获史无前例高精度月球重力场探测数据^[14]。故重力场数据采用了最新公布的1 500阶次球谐函数模型 (http://pds-geosciences.wustl.edu/grail/grail-l-lgrs-5-rdr-v1/grail_1001/shadr/)，该模型是采用了GRAIL所有观测弧段的数据，重力场观测数据的有效敏感度在900阶^[15-16]。

利用球谐函数处理软件SHTOOL (<https://shtools.oca.eu/shtools/>)^[17]，将重力和地形球谐函数分别展开，其中重力数据截取到900阶次，通过内插计算得到0.1°的格网模型。图4显示了冯·卡门区域的重力和地

$$\gamma(l) = 1 \text{ 或 } -1 \quad (7)$$

可见，导纳分别是壳密度 ρ_c ，幔密度 ρ_m ，柏松比 ν ，杨氏模量 E ，弹性厚度 T_e ，月亮厚度 T_c ，载荷埋藏深度 z ，星体重力加速度 g ，以及星体半径 R 等参数的函数。通过对比实测和模型获取的导纳值，可以对这些参数进行求解，但是实施该模型的前提是重力和地形必须具有较高的相关度。



(b) 地形图

形对比图。从图中可以看出，冯·卡门撞击坑的重力和地形具有较好的一致性，撞击坑中央重力值较为均匀，平均值在-200 mGal，与撞击坑高边缘对应的重力值也较高，具有明显的环状特征。但是，相对于南部地势较低的边缘，撞击坑南部边缘的重力值正异常明显偏高。

2.1.3 重力和地形导纳和相关结果

为了得到2.1.1给出的冯·卡门区域的导纳和相关函数，需要获取该区域局部的重力和地形频谱信息。采用球冠局部化频谱分析方法^[18-19]，以冯·卡门为中心，对重力 g 和地形 h 均施加合适的频谱窗口，并尽量减少窗口外频谱对分析区域内重力和地形频谱的干扰。根据冯·卡门的实际地形和重力分布，对比了不同的球冠窗所获取的局部重力和地形导纳，最终选取了4°作为最佳频谱窗口，如图4中白色圆圈所示，可以有效地包括冯·卡门区域，并避开北部的莱布尼兹撞击坑。为确保99%以上的有效地形和重力信号都集中在球冠中，所选取的带宽为 $L_w = 65$ 。同时，为了避开低阶项潮汐和自转等因素的影响，这里仅分析 $L_w + 3$ 和 L_{data} —

L_w 区间的导纳， $L_{\text{data}} = 550$ 是所采用的重力场的最高阶次，对应了GRAIL重力场实际观测的有效阶次^[15-16]。

图5显示了该区域实测的局部导纳，导纳误差和相关函数曲线，黑色表示导纳及其误差，蓝色表示相关。在所选取的窗口内、有效阶数为68~485阶。从图中可以看出，冯·卡门区域的导纳和相关曲线变化较为复杂，重力和地形在130阶以前相关度呈现下降又上升的趋势，相关度从68阶的0.89逐步下降到94阶的0.72，

自94阶开始逐步上升到130阶的0.98，并趋于稳定。但是在高阶上并不算稳定，呈现波浪形特征，自280阶后重力地形呈现明显的相关度降低趋势，且频谱信号不够平滑和稳定。冯·卡门区域如此复杂的导纳和相关频谱曲线，显示出该区域较为复杂的重力地形相关特性，因此较难使用2.1.1中简单的载荷加载模型对该区域的地球物理特性进行解释，需要考虑更为复杂的模型关系。

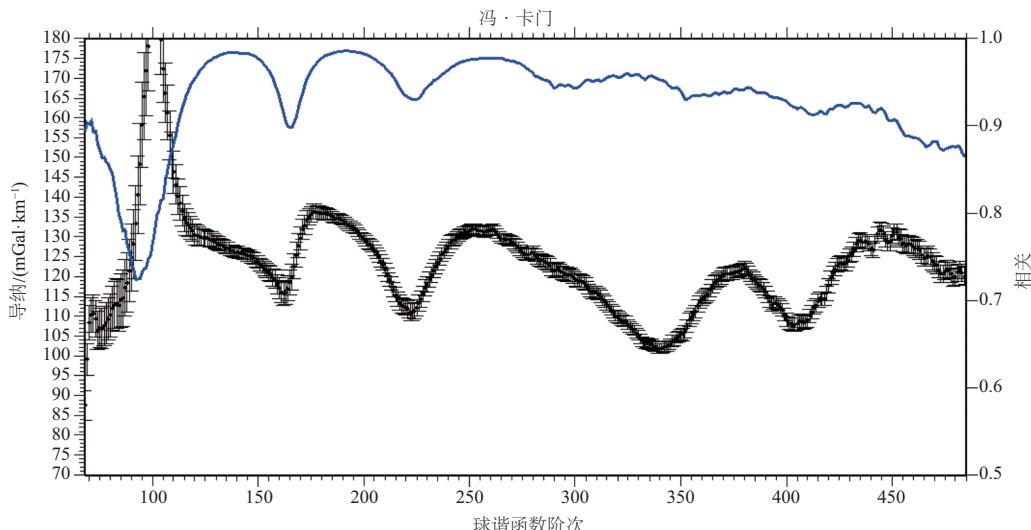


图5 冯·卡门区域局部化的导纳和相关曲线

Fig. 5 Observed localized correlation (blue) and admittance (black) of the Von Kármán region

2.2 布格重力和重力梯度

由于观测到的重力信号主要是表面地形和内部密度变化的函数，因此为了研究月球的深部结构，一般需要从观测重力值中去除地形引起的重力信号。Lemoine等采用最新的GRAIL和LRO地形数据，获得了月球1 200阶次的布格重力场球谐函数模型^[16]，在行星数据系统PDS上可以下载（http://pds-geosciences.wustl.edu/grail/grail-l-lgrs-5-rdr-v1/grail_1001/shadr/）。该模型考虑月亮的平均密度为 $2\ 500\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，并且采用了9阶次的有限功率地形改正^[20-21]。虽然布格重力场的球谐系数能达到1 200阶，但是实际上由于受到重力观测噪声、计算布格重力异常向下延拓误差放大等因素的影响，布格重力异常的有效阶次在550阶左右^[15-16]。实际计算中，将布格重力异常的阶次截断到550阶，得到了冯·卡门区域的布格重力异常，如图6所示。从图中可以看出，在图4中显示重力异常偏高的南部边缘，对应了较高的布格重力异常，并向撞击坑中央区域延伸。从图1和图2中放大的影像和地形图可以看出，该区域明显聚集的正的重力异常可能对应了冯·卡门M撞击坑的中

央峰隆起，该撞击坑中央部分在地形上完全被冯·卡门撞击坑所覆盖，但是深部的重力异常信息得到了较好的保留。从图6中还可以看出，整个冯·卡门撞击坑的北部，未受到中央峰高布格重力异常影响的区域，所显示的布格重力异常特征较为均一，平均值在-100 mGal。

为了进一步详细的描述冯·卡门南部的重力异常特征，我们进一步分析了该区域的布格重力梯度。在空间域直角坐标系下，布格重力位的二阶水平梯度分量可以用 Γ_{yy} 、 Γ_{xx} 、 Γ_{xy} 来表示，由此3个分量，可以计算出布格重力水平梯度张量的两个特征值 $(\Gamma_{11} \text{ 和 } \Gamma_{22})$ ，分别代表了布格重力位的最大和最小曲率。将两个特征值归一化，得到最大幅值的水平梯度值

$$\Gamma_{hh} = \begin{cases} \Gamma_{11} & \text{if } \Gamma_{11} > \text{abs}(\Gamma_{22}) \\ \Gamma_{22} & \text{if } \Gamma_{11} < \text{abs}(\Gamma_{22}) \end{cases} \quad (8)$$

布格重力梯度是重力异常的二阶导数，可以用于提取一些线性特征，并对应地下断裂构造、不同岩性地质体的边界带，以及其他具有一定密度差异的构造。Andrews-Hannas等^[22]采用重力梯度特征值方法成功地对月球风暴洋地区的重力梯度边界进行了提

取和分析。在该方法中, 正的表示线性异常的重力异常信号, 在布格重力梯度中显示为线性的负梯度异常。从图6中可以看出, 冯·卡门南部边缘正的布格重力异常, 对应了非常明显的负的异常梯度信息, 沿冯·卡门撞击坑南部边缘呈现一定的线性特征分布, 显示该区域可能形成了比较明显的岩墙, 长

度接近180 km。因此, 在形成冯·卡门M撞击坑后有大量的岩浆向上侵入, 由此可以推测, 在冯·卡门撞击坑覆盖到冯·卡门M撞击坑后, 极有可能挖掘出了深部幔的物质, 这些物质极有可能跟后期岩浆喷发后形成的玄武岩进行混合, 且从现有分辨率的矿物元素图中较难分辨出来。

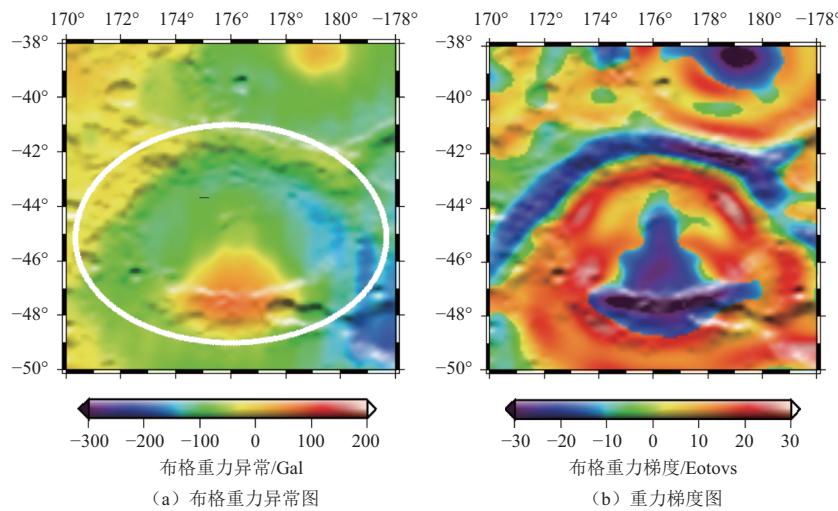


图6 冯·卡门区域的布格重力异常和最大重力梯度

Fig. 6 Bouguer gravity anomaly and Bouguer gravity gradient map of Von Kármán

2.3 月壳厚度、密度和孔隙度

重力地形、布格重力以及布格重力梯度等信息较直观地反应出了撞击坑可能的深部结构特征。从前面的综合分析可知, 冯·卡门区域具有较为复杂的重力、地形和布格异常关系, 该撞击坑与冯·卡门M撞击坑的特殊交错关系, 使得该区域对于研究月球的月幔物质以及SPA盆地的热演化历史提供了良好的区域条件。利用重力和地形等地球物理数据, 还可以通过联合解算, 获得表征月球月壳特征的定量结果, 如月壳厚度、月壳密度和孔隙度等信息, 为进一步分析月壳的深部结构特征提供依据。

月壳厚度是研究月球形成和演化的重要参数。采用GRAIL重力和LRO地形数据, Wieczorek等^[20]计算得到了最新的月壳厚度模型。该模型采用的是有效截断阶次为310阶的重力场和地形数据, 在计算的过程中考虑到了月表的物质成分信息^[23]、月壳的平均密度以及孔隙度等信息, 并以Apollo 12和14月震波观测数据获取的平均月壳厚度为锚定点, 综合详细的分析了月壳的厚度和分布情况。Wieczorek等^[20]计算出月壳的平均密度为 $2550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 并给出了4种不同的计算模型结果。其中模型1给出的月壳平均厚度为34 km, 最小厚度为0.6 km, 月球的平均孔隙度为12%, 月幔密度为

$3220 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。图7显示了该模型给出的冯·卡门区域的月壳厚度结果。从图中可以看出, 冯·卡门区域的月壳厚度较为不均一, 南部呈圆盘状的薄月壳对应了冯·卡门M撞击坑的中央, 该区域的平均月壳厚度在5 km左右。冯·卡门撞击坑北部的月壳厚度较为均一, 介于15~20 km之间, 比月壳的平均厚度稍薄。

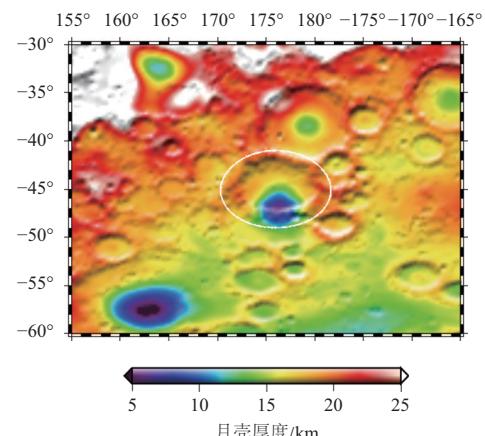


图7 冯·卡门区域的月壳厚度图

Fig. 7 The crustal thickness map of Von Kármán

在月壳厚度计算中, 月壳的密度是决定月壳厚度结果的关键性参数。在月球的形成和演化过程中, 月

壳在45亿年期间遭受了大量的撞击，形成了现今千疮百孔的月表形貌特征。重力是地形和壳密度的函数，结合一定的频谱分析方法，Wieczorek等^[20]获得了月球高地以及SPA区域的平均月壳密度，如图8（左）所示。从图中可以看出，冯·卡门区域的平均月壳密度在 $2630 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，稍高于月球的平均月壳密度 $2550 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。冯·卡门区域的平均月壳密度与北部的莱布尼兹和南部的冯·卡门M区域具有较好的一致性。假设月壳表面的物质在一定深度上是均一的，结合月壳的平均密度和表面的矿物物质密度，就可以计算得到月壳的孔隙度，该参数可以很好地反应月壳的物理属性。通过分

析月球岩石密度和表面矿物的关系，可以构建月表FeO和TiO₂与月表岩石密度的公式，利用“月球勘探者号”（Lunar Prospector）上搭载的伽马射线谱仪获取得到的月球全球铁钛含量，可以获得月球表面的矿物密度^[23]，如图8（右）所示。从图中可以看出，冯·卡门区域的平均月壳物质密度在 $2890 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，且与周边的撞击坑的物质密度具有较好的一致性。利用月壳平均密度和矿物密度，可计算得到冯·卡门区域的孔隙度约为9%，稍小于模型1的平均孔隙度12%。由此可见，该区域经过多次撞击后，月壳发生了多次熔融，最后凝结成了较为致密的玄武岩物质。

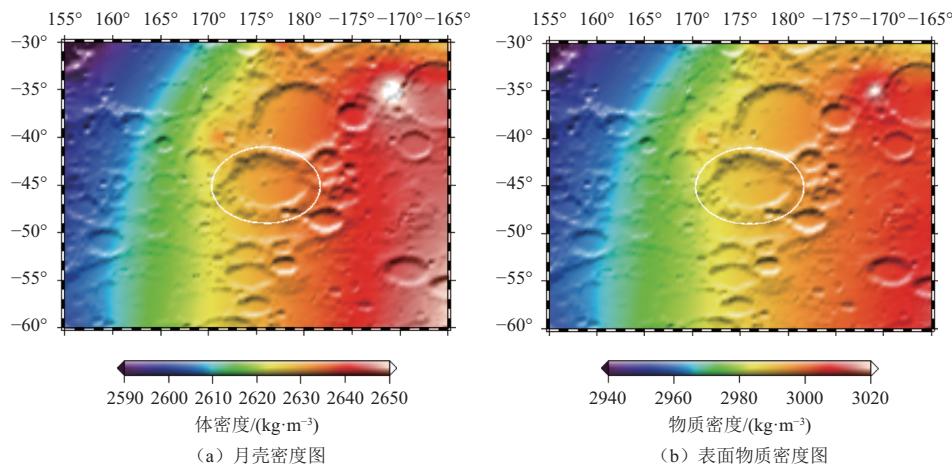


图8 冯·卡门区域的月壳密度和表面物质密度

Fig. 8 The crustal bulk density and grain density of the Von Kármán region

3 结 论

“嫦娥4号”着陆器和巡视器将于2018年后在月球背面SPA盆地内的冯·卡门撞击坑着陆，有望实现人类首次月球背面软着陆和巡视勘察。本文通过最新的月球重力、地形等数据，综合对冯·卡门撞击坑及其邻近区域的重力、地形、布格重力异常、布格重力梯度、月壳厚度、月壳密度，以及孔隙度等表征该区域月壳及其深部结构特性的数据进行了分析，发现该区域与南部稍老的冯·卡门M具有复杂的交错关系，具有一定的科学价值。SPA盆地内的冯·卡门撞击坑叠置在冯·卡门M撞击坑上，极有可能穿透月壳并挖掘到了月幔物质，在整个撞击过程中，该区域发生了大范围的局部熔融，冷凝后形成了较为致密的玄武岩结晶层，密度较斜长石的月壳高。本文获得的冯·卡门区域的月壳和深部结构特征等信息，可为“嫦娥4号”进行着陆和巡视探测的科学研究提供一定的数据支撑。

致谢 本文由国家自然科学基金项目（11403020, 41371332）资助，在此表示感谢！

参 考 文 献

- [1] National Research Council. Scientific context for the exploration of the Moon: a national research council space science board study[R]. Washington D. C.: National Academies Press, 2007.
- [2] 肖龙, 乔乐, 肖智勇, 等. 月球着陆探测值得关注的主要科学问题及着陆区选址建议[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(2): 029602.
- [3] XIAO L, QIAO L, XIAO Z Y, et al. Major scientific objectives and candidate landing sites suggested for future lunar explorations (in Chinese) [J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 029602.
- [4] KRING D A, KRAMER G Y, COLLINS G S, et al. Peak-ring structure and kinematics from a multi-disciplinary study of the Schrödinger impact basin[J]. Nature Communications, 2016(7): 13161.
- [5] 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(2): 111-117.
- [6] 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(2): 111-117.
- [7] SNAPE J F, FAGAN A L, ENNIS M E, et al. Science-rich mission sites within South Pole-Aitken basin, Part 2: Von Kármán crater[C]//The 41th Lunar and Planetary Science Conference. USA:

- [s.n.], 2010.
- [6] WILHELM S E, MCCUALEY J F, TRASK N J. The geologic history of the moon[M]. USA: U.S. Geol. Sur. Prof, 1987.
- [7] HARUYAMA J, JOSSET J L. Long-lived volcanism on the lunar farside revealed by SELENE Terrain Camera.[J]. *Science*, 2009, 323(5916): 905-908.
- [8] PASCKERT J H, HIESINGER H, BOGERT C H V D. Lunar farside volcanism in and around the South Pole-Aitken Basin[J]. *Icarus*, 2017, 299: 538-562.
- [9] WILHELM S. Geologic map of the central far side of the Moon[Z]. USGS, <https://www.lpi.usra.edu/resources/mapcatalog/usgs/l1047/150dpi.jpg>
- [10] ISHIHARA Y, GOOSSENS S, MATSUMOTO K, et al. Crustal thickness of the Moon: implications for farside basin structures[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(19): 82-90.
- [11] WIECZOREK M A. Gravity and topography of the terrestrial planets[J]. *Treatise on Geophysics*, 2007a(10): 165-206.
- [12] DORMAN L M, LEWIS B T R. Experimental isostasy: theory of the determination of the Earth's isostatic response to a concentrated load[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(17): 3357-3365.
- [13] SMITH D E, ZUBER M T, NEUMANN G A, et al. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(18): 109-118.
- [14] ZUBER M T, SMITH D E, WATKINS M M, et al. Gravity field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) mission[J]. *Science*, 2013, 339(6120): 668-71.
- [15] KONOPLIV A S, PARK R S, YUAN D N, et al. High-resolution lunar gravity fields from the GRAIL primary and extended missions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(5): 1452-1458.
- [16] LEMOINE F G, GOOSSENS S, SABAКА T J, et al. GRGM900C: A degree 900 lunar gravity model from GRAIL primary and extended mission data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(10): 3382.
- [17] WIECZOREK M. SHTOOLS: Tools for working with spherical harmonics[J]. *Astrophysics Source Code Library*, 2014: 20-26.
- [18] WIECZOREK M A, SIMONS F J. Localized spectral analysis on the sphere[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 2010, 162(3): 655-675.
- [19] 黄倩, 肖龙, 平劲松, 等. 月球Marius Hills盾形火山密度和岩石圈弹性厚度[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013(11): 1395-1402.
- [20] HUANG Q, XIAO L, PING J S, et al. Density and lithospheric thickness of the Marius Hills shield volcano on the Moon (in Chinese) [J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2013, 43: 1395-1402.
- [21] WIECZOREK M A, NEUMANN G A, NIMMO F, et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL.[J]. *Science*, 2013, 339(6120): 671-675.
- [22] WIECZOREK M A, PHILLIPS R J. Potential anomalies on a sphere: Applications to the thickness of the lunar crust[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1998, 103(E1): 1715-1724.
- [23] ANDREWS-HANNA J C, ASMAR S W, KIEFER W S, et al. Ancient igneous intrusions and early expansion of the Moon revealed by GRAIL gravity gradiometry[J]. *Science*, 2013, 339(6120): 675.
- [24] HUANG Q, WIECZOREK M A. Density and porosity of the lunar crust from gravity and topography[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2012, 117(E5): 81-88.

作者简介:

黄倩(1983-), 女, 博士, 主要研究方向: 行星地球物理。

通信地址: 湖北省武汉市鲁磨路388号地球物理与空间信息学院(430074)

电话: (027)67883381

E-mail: qianhuang@cug.edu.cn

Crustal and Subsurface Structures of Chang'E-4 Lunar Farside Landing-Site

HUANG Qian¹, WANG Taimao², ZHAO Jiannan², MENG Zhiguo³

(1. Hubei Subsurface Multi-scale Imaging Key Laboratory, Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
2. Planetary Science Institute, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
3. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: As the selected landing-site for Chinese Chang'e-4 mission, the Von Kármán crater, located in the central region of the South Pole-Aitken (SPA) basin, opens an important window to study the lunar farside crust. In this paper, the newly obtained gravity, topography, Bouguer gravity/gradient and crustal thickness data are used to comprehensively study the crustal and subsurface structures of the Von Kármán crater. Results show that the Von Kármán crater is located in the northern part of a pre-existed impact crater Von Kármán M, which has obvious central positive Bouguer gravity anomaly and linear Bouguer gravity gradient features, indicating possible dikes and dense materials beneath the crater. The Von Kármán crater is likely to penetrate through the entire crust of the SPA and excavated the deep mantle materials. The crustal thickness map shows that the southern crust of the Von Kármán crater is as thin as 5km and the northern area has an average crust thickness between 15 and 20km. The bulk density of the Von Kármán crater is $2630\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, which is about $100\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ higher than that of the farside highland crust. The grain density of this region is $2890\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, suggesting an average porosity of 9%, which is slightly lower than that of the lunar crust.

Key words: Moon; Chang'e-4 mission; Von Kármán crater; lunar crust; subsurface structures

High lights:

- Comprehensive geophysical data have been used to study the crustal and subsurface structures of the Von Kármán crater.
- The Von Kármán crater possess obvious central positive Bouguer gravity anomaly and linear Bouguer gravity gradient features, indicating possible dikes and dense materials beneath the crater.
- The Von Kármán crater is likely to penetrate through the entire crust of the SPA and excavated the deep mantle materials.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]