https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.016



月球正面火山复合体穹窿形貌特征识别和聚类分析

殷浩林¹,黄 倩^{1*},陈雨超¹,赵健楠²

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,湖北武汉 430074
 中国地质大学地质探测与评估教育部重点实验室,湖北武汉 430074

摘 要:月球火山穹窿是了解月球火山活动的重要窗口.利用高分辨率多源遥感数据,对月球正面的3个火山复合体 区(Marius Hills和 Rümker Hills位于风暴洋克里普地体,Gardner在风暴洋克里普地体外)里发育的火山穹窿进行形貌 和铁钛元素特征提取,利用这些特征参数进行层次聚类分析,并将所有穹窿划分为7个聚类(DC1~DC7);然后结合流 变学、年代学和区域地质背景对3个火山复合体区的火山活动特征进行了综合分析.Marius Hills发育的火山穹窿数量 多,高度和坡度较高,以中高钛为主,穹窿代表类型为DC7,岩浆活动时间跨度大(约2.6 Ga)、周期长,表明该区域存在 多期次不同特征的火山活动.Rümker Hills发育的火山穹窿数量少,高度和坡度居中,以低钛为主,穹窿代表类型为 DC1和DC4,活动时间相对集中(约0.8 Ga).Gardner及其周边区域发育的穹窿呈环状和带状分布,高度和坡度较低,以 中低钛为主,岩浆活动时间持续约1.0 Ga,穹窿代表类型为DC6,该区域发生了多期次且复杂多样的火山活动.本研究 揭示了月球正面火山复合体岩浆活动的复杂性,这种复杂性可能与岩浆源区及生热元素的不均匀分布情况有关. 关键词:月球;火山复合体;穹窿;特征提取;聚类分析;遥感.

中图分类号: P691 **文章编号:** 1000-2383(2024)03-1104-15

Morphological Identification and Clustering Analysis of Domes in the Lunar Large Volcanic Complexes

收稿日期:2022-11-28

Yin Haolin¹, Huang Qian^{1*}, Chen Yuchao¹, Zhao Jiannan²

- 1. Hubei Subsurface Multi-Scale Imaging Key Laboratory, School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
- Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Lunar volcanic domes are essential windows into the volcanic activities of the Moon. This study uses high-resolution multi-source remote sensing data to extract the morphological features and Fe-Ti contents of volcanic domes developed in the three large volcanic complexes (Marius Hills and Rümker Hills in the PKT region, and Gardner outside the PKT area) on the lunar nearside. Hierarchical clustering analysis is performed with these parameters and all domes are classified into seven dome clusters (DC1 – DC7). Comprehensive analyses of the rheology, chronology, and geological background of the three large volcanic complexes are carried out. Our results show that the Marius Hills developed a large number of volcanic domes

引用格式:殷浩林,黄倩,陈雨超,赵健楠,2024.月球正面火山复合体穹窿形貌特征识别和聚类分析.地球科学,49(3):1104-1118.

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2021YFA0715100);国家自然科学基金项目(No. 42030108);地质探测与评估教育部重点实验室主任 基金项目(No. GLAB2022ZR09);中央高校基本科研业务费专项(No. CUG2106122).

作者简介:殷浩林(1998-),男,硕士研究生,主要从事行星遥感与地球物理的综合研究.ORCID:0000-0002-5467-8023.E-mail: 13026159616@163.com

^{*}通讯作者:黄倩, ORCID: 0000-0003-0141-7919. E-mail: qianhuang@cug. edu. cn

Citation: Yin Haolin, Huang Qian, Chen Yuchao, Zhao Jiannan, 2024. Morphological Identification and Clustering Analysis of Domes in the Lunar Large Volcanic Complexes. *Earth Science*, 49(3):1104–1118.

with large height and slope, dominated by medium to high TiO₂ contents, and the representative group of the domes is DC7. The geological age of the Marius Hills has a wide time span (~2.6 Ga), indicating a long-lasting volcanic activity in this region with multiple sources and phases. The volcanic domes developed in the Rümker Hills are small in number, moderate in height and slope, and dominated by low TiO₂ contents. The representative groups of domes in this region are DC1 and DC4. Rümker Hills has a relatively concentrated geological time period (~0.8 Ga), but with multiple phases of volcanic activities. The domes developed in the Gardner and its surroundings are either radially or annularly distributed, with low height and slope, dominated by low to medium TiO₂ contents, with magmatic activity lasting about 1.0 Ga. The representative group of the domes in the Gardner region is DC6, and multiple phases and complicated volcanic activities have occurred in this region. This study suggests the complexity of the magmatic activities of the lunar volcanic complexes, which may be related to different magma sources and the existence of heat-producing elements.

Key words: Moon; volcanic complexes; dome; feature extraction; clustering analysis; remote sensing.

0 引言

火山活动是月球最主要的内动力地质作用之一,对月球火山活动开展研究是理解月球深部物质成分、热状态及其演化的关键,是研究月球地质历史和热演化的重要窗口(林杨挺,2010;徐义刚,2010; Zhang et al., 2018;乔乐等,2021).对比研究月球不同火山活动的规模、持续时间和形成机制,有助于掌握月球火山活动的规律,从而更加深刻地从类比行星学的角度理解地球火山活动(杨蔚等,2022).

月球火山活动在月表产生了一系列多样化的 火山地貌特征,正面月海区域大型火山复合体保 留了丰富的火山建造遗迹,包括瓣状悬崖、蜿蜒月 溪、火山穹窿等,这些火山地貌记录着月海早期火 山活动的历程和特征.其中,月球火山穹窿在空间 分布、形貌和物质组成上存在明显差异,可能记录 了不同演化阶段岩浆的特点,是研究月海热演化 历史的重要对象(Zhang et al., 2018;乔乐等, 2021;杨蔚等,2022).前人利用月球影像和高程数 据对月球火山穹窿的形貌开展了大量的识别研 究,在月球表面识别出数百个火山穹窿,这些火山 穹窿主要聚集在月球正面月海区域,如 Mare Tranquillitatis、Mare Insularum 以及风暴洋中几个 大型的火山复合体 Marius Hills 和 Rümker Hills (Head and Gifford, 1980; Wöhler et al., 2006, 2007; Wöhler and Lena, 2009; Lena et al., 2013; Zhao et al., 2017; Arya et al., 2018; Zhang et al., 2018; Huang et al., 2020; Chen et al., 2021). 获取 这些火山穹窿的形貌学信息,如穹窿直径、高程、 侧边坡度等,并利用这些信息分析穹窿的流变学 成因,有助于分析不同火山区域岩浆活动的差异 性(Wöhler et al., 2006, 2007; Chen et al., 2021).

Head and Gifford (1980)利用月球轨道器 (Lunar Orbiter)和阿波罗(Apollo)探测器获取的影 像数据,结合早期美国地质调查局(USGS) 1:1000000地质图成果,基于形态学及其相似特征 解译,将月海区域200多个直径在3~17 km的火山 穹窿定性地分成了7类,主要依据是火山穹窿形态 与类地行星的相似性对比.Wöhler et al.(2006)利用 火山穹窿的3个光谱特征和5个形貌特征参数(直 径、高程、侧边坡度、体积和形态因子),采用主成分 分析法(principal component analysis,简称 PCA),定 量地将月球月海区域的火山穹窿分成了 A~D 四 类.其中A类穹窿直径小(5~13 km),侧边坡度低 (<1.0°),具有较高的TiO,含量(质量分数).B类穹 窿具有中等的TiO2含量,基于穹窿半径和侧边坡度 可被进一步划分为 B_1 (侧边坡度>2°,直径6~ 15 km)和B₂(侧边坡度<2°,直径8~15 km).C类穹 窿中直径(13~20 km)或体积(7~50 km³)相对较 大、 TiO_2 含量较低的为 C_1 类;直径(8~17 km)和体 积($<17 \text{ km}^3$)相对较小、TiO₂含量相对较高的为C₂ 类.D类为更大更复杂的火山复合体区域,靠近月球 Arago地区,具有高的TiO2含量,侧边坡度为1.3°~ 1.5°, 跟 Head and Gifford (1980) 中的第7类一致. Wöhler et al.(2007)在进一步检测 Head and Gifford (1980)和 Wöhler et al. (2006)火山穹窿的基础上, 增 加了E类(直径<6km,TiO2含量中等),并更进一 步根据侧边坡度将其划分为E₁(侧边坡度2.0°~ 4.0°)和E₂类(侧边坡度<2.0°);考虑到分类的完整 性,将Head and Gifford(1980)的第6类划分为了G 类,其侧边坡度均高于6.0°.更进一步的,利用形貌 学计算得到穹窿的流变学属性,依据这些属性特 征, Wöhler et al. (2007)将月海火山穹窿划分为 R₁~R₃三类.R₁类的岩浆粘滞度为10⁴~10⁶ Pa•s,包 含了月海 Milichius/T.Mayer 区域和 Mare Tranquillitatis 北部的两个相似穹窿; R_2 类包含了 Mare Tranquillitatis 北部的平缓穹窿, 岩浆粘滞度为 $10^2 \sim$ 10^4 Pa·s; R_3 类包含了靠近 Hortensius 和 T.Mayer 区 域、相对陡峭的穹窿, 岩浆粘滞度为 $10^6 \sim 10^8$ Pa·s. 最 后, Wöhler *et al.*(2007)将基于形貌和光谱属性划分 的穹窿类别与基于流变学属性划分的穹窿类别进行 对比, 构建了两类分类体系的关系.其中 R_1 属于 B_2 、 C和 E_2 类, R_2 为 A和 E_2 类, R_3 包含 B_1 和 E_1 类, 显示出 具有更陡峭侧边坡度的火山穹窿粘滞度相对更高.

前人对火山穹窿的识别和分类为我们理解火 山穹窿的形貌和流变学属性提供了较好的依据. Lena et al.(2013)对前期火山穹窿的识别和分类工 作进行了汇总;但是,这些前期工作都是基于定性 和半定量的方式.其中Head and Gifford(1980)仅 考虑了火山穹窿的形貌特征;Wöhler et al.(2006) 虽然考虑了火山穹窿的形貌和流变学特征,并使用 了PCA方法对这些穹窿进行了分类,但是分类的 过程也是半定量的.前人虽然对全月海区域的火 山穹窿进行了集中分类,但是缺少对这些分类结果 与区域火山活动的相关性分析.此外,准确地提取 火山穹窿的形貌学参数,如直径、高程、侧边坡度和 体积等,是进行流变学分析和穹窿分类的基础,以 往基于低分辨率高程获取的穹窿形貌参数存在一 定的误差,不利于穹窿形貌和流变学的精细分类.

Chen et al.(2021)利用高分辨率月球影像和 高程数据,获取了位于Mare Tranquillitatis北部 Gardner火山及其附近的火山穹窿形貌学、矿物 学和流变学参数,利用非监督学习的方法对这些 穹窿进行聚类分析,结果显示穹窿直径、面积、体 积和侧边坡度是穹窿聚类分析的最优特征参数, 并将该地区的穹窿划分为4类;在对不同穹窿类别 和空间分布分析的基础上,发现不同穹窿类别与岩 浆期次间可能存在相关性,为探究穹窿形貌和 流变学特征与岩浆活动的关系提供了新思路.

为了进一步探究不同区域火山穹窿类别以 及岩浆活动的相似性和差异性,本文选取位于月 球正面风暴洋克里普区域(较富集高放射性生热 元素)的 Marius Hills和 Rümker Hills,以及位于风 暴洋克里普区域外的 Gardner火山复合体区开展 研究,这些区域均发育有一定数量的火山穹窿, 对这些穹窿进行精细的形貌学和矿物学分析, 获取与穹窿成因相关的流变学特征,在此基础 上利用机器学习聚类分析方法,结合火山区综合 定年结果,尝试获取不同火山复合体各自和相 互间岩浆活动的相关性和差异性特征,为解释 月球正面火山活动特征和演化历史提供支撑.

1 地质背景

自阿波罗时代起,研究者就观测到月球表面广 泛分布着由岩浆活动形成的地貌特征,主要包括熔 岩流(lava flows)、蜿蜒月溪(sinuous rilles)、穹窿 (domes)、火山锥(cones)和火成碎屑沉积物(pyroclastic deposit)等.月球正面月海平原上有些区域分 布有大量的火山形貌特征,被称为火山复合体(volcanic complex),这些区域可能是形成大型月海溢流 玄武岩平原的源区 (Whitford-Stark and Head, 1977),是研究月球火山活动的重要地质单元. Spudis et al. (2013) 利用美国月球勘察轨道号 (LRO)获取的高分辨率影像和高程数据,对月球 上8个大型火山复合体的火山地质特征进行了分 析,在这8个火山复合体中(图1,白色圆圈),Marius Hills、Rümker Hills和Gardner表面或周边均发 育有多个火山穹窿(图1,红色箭头),这些火山穹 窿信息记录了火山复合体岩浆的活动特征,是人 们进行火山穹窿与岩浆活动分析的最佳场所.

1.1 Marius Hills

Marius Hills 火山复合体(14°N,52°W,直径 ~330 km)位于风暴洋克里普区域中部,地形隆起约 2.2 km,面积约为35 000 km²,发育有300多个火山 穹窿和火山锥,具有丰富的皱脊和蜿蜒月溪构造 (Weitz and Head, 1999; Heather *et al.*, 2003; Lawrence *et al.*, 2013).Lawrence *et al.*(2013)利用LRO 探测器获取的多源遥感数据详细分析了 Marius Hills 区域150多个火山穹窿和90个火山锥的形貌 特征,结合表面粗糙度信息,获取了该区域从低矮 穹窿到陡峭火山锥的丰富信息,揭示了该区域多样而复杂的岩浆喷发条件.Arya *et al.*(2018)利用 印度月船一号(Chandrayaan-1)和日本月亮女神 (Kaguya)遥感探测数据对 Marius Hills 地区的106 个穹窿/火山锥进行了测绘,提取了这些火山穹窿 的形貌学参数,并在此基础上计算了流变学参数.

1.2 Rümker Hills

Rümker Hills火山复合体(41°N, 58°W, 直径~70 km)位于风暴洋克里普区域北部, 其面积约为5 000 km², 相较于周边的月海平原有 200~



图1 月球正面高程分布

Fig.1 Elevation map of the lunar nearside

图中白色圆圈为8个火山穹窿复合体,黑色虚线内为风暴洋克里普(Procellarum KREEP terrane,简称PKT)区域,红色箭头指示发育有多个火山穹窿的 Marius Hills、Rümker Hills和Gardner火山穹窿复合体,据Huang et al. (2020)修改

1 300 m 的地形隆升,发育有火山穹窿、月溪和熔岩流等构造(Zhao *et al.*, 2017).Zhao *et al.*(2017)在 Rümker Hills 区域识别出 22 个火山穹窿,并将该地区的穹窿划分为平缓穹窿和陡峭穹窿,分别代表不同阶段火山活动的期次.

1.3 Gardner

Gardner 火山复合体 (16°N, 34°E, 直径 ~70 km)位于静海北部边缘,克里普区域外,地形隆 起约1.6 km,表面发育火山穹窿和月溪.其顶部显 示了一连串不规则的坑状凹陷构造,可能构成了一 个喷发火山口复合体(Wood et al., 2005).Huang et al.(2020)利用新近获取的多源遥感数据,对Gardner火山区形貌、化学成分、地质年代以及深部结构 等进行了综合分析,获取了该区域17个火山穹窿的 形貌参数.Chen et al.(2021)识别出Gardner及其周 边静海区域的54个火山穹窿,获得综合形貌、铁钛 含量、流变学属性等多个特征参数,利用机器学习 聚类方法将这些穹窿划分成了4个类别,并揭示 了 Gardner 及其周边地区不同阶段不同特征的火 山活动.Qiao et al. (2021)识别了静海区域283个 已知和疑似的月海穹窿,综合形貌特征、化学组 成、年代属性对该区域穹窿的火山成因进行了详 细分析,并讨论了静海区域早期的火山活动特征.

对不同火山复合体区的穹窿进行系统地形 貌识别和特征参数提取,是开展不同火山复合 体区岩浆活动特征对比的基础.因此,首先需 要采用高精度的月球遥感影像和高程数据对不 同火山区穹窿形貌进行统一识别和特征提取.

2 数据和方法

2.1 数据

为了对3个火山穹窿复合体区域进行穹窿形 貌的识别和提取,本文采用了日本Kaguya探测器 上搭载的地形相机(terrain camera,简称TC)获取 的TC morning 低太阳高度角影像和数字地面模 型(digital terrain model,简称DTM),分辨率均为 10 m/pixel.该数据覆盖度均匀、分辨率高,可以有 效保证3个火山区穹窿的精细识别和特征提取.

为了获取火山穹窿的物质成分信息,本文采 用美国克莱门汀(Clementine)探测器搭载的紫外 可见光(UVVIS)相机获取的多光谱数据,反演月 表铁钛元素丰度.UVVIS多光谱数据分辨率约为 100 m/pixel,拥有415、750、900、950和1000 nm 五个波段,本文使用其415、750和950 nm 三个波 段的反射率值估算火山穹窿的铁钛元素丰度. 2.2 穹窿识别方法

2.2.1 穹窿识别 月球上火山穹窿构造具有独特的 形貌特征,利用遥感图像对火山穹窿轮廓的提取主要 有人工目视识别和自动算法提取两种方式.目前穹窿 轮廓的自动提取算法包括基于数字图像处理技术 (Podobnikar, 2012)、基于坡折(Euillades *et al.*, 2013) 以及基于闭合等高线(Bohnenstiehl *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2019)等.尽管自动算法在进行大范 围遥感目标识别中具有一定的优势,但是人工



图2 火山穹窿识别示意

Fig.2 Schematic diagram of volcanic dome identification

a. TC morning影像图; b. 地形图上覆山体阴影图; c. 坡度图; d. 地形和山体阴影叠加图,上覆等高线间隔为50 m; e. 左图为地形和山体阴影 叠加图,右图为沿左图中白色直线AB、CD方向的高程剖面图.图 c~e 中黑色曲线为根据底图描绘的火山穹窿轮廓

目视识别是进行算法验证的基础.因此,小范围的火山穹窿形貌精细识别一般采用人工目视识别方法(Wöhler et al., 2006; Lena et al., 2013; Zhao et al., 2017; Chen et al., 2021; Qiao et al., 2021).本文利用高分辨率TC morning影像数据和DTM高程数据,基于ArcGIS平台,利用人工目视识别来提取 Marius Hills、Rümker Hills、Gardner区域的火山穹窿.具体步骤为:

(1)利用 TC morning 影像数据、DTM 高程 图及其生成的山体阴影图初步确定穹窿的位置(图 2a~2b).

(2)依据 DTM 生成的坡度图、等高线图、高程 剖面图(图 2c~2e),按照坡度增大区域、等高线闭合 情况与高程剖面上升拐点来绘制穹窿的边界轮廓.

(3)对比前人在 Marius Hills、Rümker Hills、 Gardner 区域识别的火山穹窿点位和形态特征.

2.2.2 穹窿参数提取 火山穹窿特征参数的提取工作有助于分析穹窿的差异性,探究穹窿 所反映的区域火山活动特征.本文研究的火 山穹窿度量参数包括穹窿的形貌特征、熔岩 流流变学属性和铁钛元素含量.

(1)形貌参数.获取火山穹窿的轮廓后,穹

窿的形貌参数可以基于 DTM 数据计算得到. 综合前人关于穹窿形貌参数的定义(Wöhler et al., 2006; Grosse et al., 2012; Liu et al., 2019), 本文提取了穹窿的面积(A)、直径(D)、高度 (H)、平均侧边坡度(Slope)、表面体积(SV)和 形态因子(f)共6种形貌特征.这些形貌特征与 穹窿的形成时间、退化状况及其岩浆供给机 制有一定的关联性(Baratoux et al., 2009).

穹窿面积(A)可由穹窿轮廓内像元数 量获得;假设穹窿底面平整且轮廓近圆形, 穹窿直径(D)可通过下式获得:

$$D = 2\sqrt{A/\pi} \ . \tag{1}$$

穹窿高度(H)为穹窿最高点与其边界最低点之间的高差;平均侧边坡度(Slope)可由高度(H)和直径(D)通过下式给出:

$$Slope = \tan^{-1} \left(\frac{2H}{D} \right). \tag{2}$$

穹窿表面体积(SV)为穹窿表面与其轮 廓最低点所在平面之间的体积;形态因子 (f)代表穹窿与圆柱体的相像程度,其值越 靠近1则穹窿越像圆柱体,其计算公式如下:

$$f = \frac{SV}{\pi H \left(D/2 \right)^2} \,. \tag{3}$$

(2)流变学参数.火山活动中熔岩流的 属性决定着穹窿形貌的发育状况.本文基于 上述穹窿的形貌参数,使用 Wöhler *et al.* (2007)中的流变学模型来计算火山穹窿形 成过程中的熔岩流参数,包括熔岩流粘稠度 (η)、溢流速率(E)和溢流持续时间(Te). 该模型假设岩浆从水平面中心的通道喷出, 将逐步冷却的熔岩流看作宾汉流体,其主要 属性有屈服强度和塑性粘稠度(Wilson and Head, 2003).形成穹窿熔岩流的塑性粘 稠度η(单位: Pa•s)可由下式进行估计:

 $\eta(\tau) = 6 \times 10^{-4} \tau^{2.4}, \tag{4}$

其中, *τ* 表示熔岩流的屈服强度(单位: Pa), 可由下式给出:

$$\tau = \frac{0.323H^2\rho g}{D/2},\tag{5}$$

其中,重力加速度 $g = 1.63 \text{ m/s}^2$, ρ 为熔岩流的密度,将其设为2000 kg/m³(Wöhler *et al.*, 2007), 假设更高的熔岩流密度 ρ 将使粘稠度(η)以一个 恒定的系数增加,对于 ρ =2800 kg/m³的高岩 浆密度,这个系数为2.2,对于月海穹窿广泛的 粘稠度(η)范围,这个数值与用 ρ =2000 kg/m³ 得到的数值相比差别不大(Wöhler *et al.*, 2007).

假设熔岩流前端的运移只受冷却作用的 限制,其溢流速率(E)可通过下式计算得到:

$$E = \frac{0.323^{1/2} 300 \kappa (D/2)^2}{0.65^{5/2} 0.72H},$$
(6)

其中, κ 表示熔岩流的热扩散率,其值约为 10^{-6} m²/s (Wilson and Head, 2003;Wöhler *et al.*, 2007).

最后熔岩流的溢流持续时间(Te)可以由穹窿表面体积(SV)与溢流速率(E)的比值获得:

$$Te = SV/E . \tag{7}$$
2.3 铁钛含量

月表铁含量可以帮助区分月海物质和高 地物质,对探讨区域岩浆活动性质具有重要意 义(Lawrence *et al.*, 2002);月表钛含量是月海 玄武岩的划分标准之一,Giguere *et al.*(2000)利 用遥感数据得到了基于氧化钛含量的月海玄武 岩分类标准:极低钛(<1.0%,质量分数,后 同)、低钛(1.0%~4.5%)、中钛(4.5%~7.5%)、 高钛(7.5%~10.0%)和极高钛(>10.0%)玄武 岩.火山穹窿不同的钛丰度可能指示其表面 玄武岩不同的岩浆归属.

利用 Clementine UVVIS 多光谱数据,月表的铁钛元素丰度可以由前人提出的经验公式反演获得,本文使用了 Lucey *et al.*(2000)中的算法来计算穹窿的氧化铁质量含量:

$$\operatorname{FeO}(\%) = 17.427 \times \left\{ -\arctan\left[\left(R_{950}/R_{750} - 1.19\right)/\left(R_{750} - 0.08\right)\right] \right\} - 7.565, \quad (8)$$

其中, R₇₅₀、R₉₅₀分别代表月表750、950 nm波段处的反射率.

为了更精确地得到火山穹窿的氧化钛质 量含量,本文使用了Gillis *et al.*(2003)在Lucey *et al.*(2000)基础上修正后的氧化钛反演算法:

$$\operatorname{TiO}_{2}(\%) = 0.14 + 0.24 \times \arctan\left(\frac{R_{415}/R_{750} - 0.36}{R_{750} + 0.012}\right)^{15.5},$$

$$\overset{\mathfrak{U}}{=} R_{415} \leqslant 0.065 \ \Bar{H} \ \Bar{R}_{415}/R_{750} > 0.59$$

$$\operatorname{TiO}_{2}(\%) = 1.715 \ 9 \times \arctan\left(\frac{R_{415}/R_{750} - 0.36}{R_{750} + 0.012}\right)^{9.8817},$$

$$(9)$$

其他情况

其中, R_{415} 代表月表 415 nm 波段处的反射率.

本 文 将 各 个 火 山 穹 窿 轮 廓 范 围 内 的 铁 钛 含 量 平 均 值 视 作 其 铁 钛 元 素 特 征 .

2.4 聚类分析

层次聚类(Hierarchical Clustering)是一种比较 经典的机器学习聚类分析方法.本研究具体使用了 MATLAB中的 pdist、linkage和 cluster函数进行详 细的层次聚类分析,具体步骤为:

(1)找到数据集中每一对对象之间的相 似性或不相似性.在这一步中,使用 pdist 函 数计算对象之间的距离.

(2)将对象分组为一个二元分层的聚类树.在这一步中,使用linkage函数将相近的对象连接起来.linkage函数使用步骤(1)中产生的距离信息来确定对象之间的接近程度.当对象被配对成二进制群组时,新形成的群组被归入更大的群组,直到形成分层的聚类树.

(3)将层次树切割成聚类.在这一步中, 使用 cluster 函数来修剪层次树底部的分支, 并将每个切口下面的所有对象分配给一个聚 类,这就创建了一个数据的分区.cluster 函数 可以通过检测层次树中的自然分组或通过在 一个任意点切断层次树来创建这些聚类.

3 穹窿形貌成分和流变学分析

为了在3个火山复合体区建立统一的穹窿识别体系,从而更好地对这些穹窿进行对比分析,本 文在 Marius Hills、Rümker Hills 区域以及 Gardner 及其周边地区分别识别了105、17和39个穹窿(图 3),其位置与Zhao et al.(2017)、Arya et al.(2018)、 Chen et al.(2021)、Qiao et al.(2021)中所识别的部 分穹窿位置一致.其中,Marius Hills发育的火山 穹窿数量最多,和Rümker Hills一样多数穹窿均分 布在火山地形隆起区域,而Gardner火山区的穹窿 多呈环状或放射状分布在其周边东南侧区域.

在获取单个火山穹窿的轮廓后,基于DTM高 程数据,本文提取了每个火山穹窿的面积(A)、直径 (D)、高度(H)、平均侧边坡度(Slope)、表面体积 (SV)和形态因子(f)共6种形貌特征参数.将D、H、 SV代入公式(4)~(7)可以获得3个流变学参数,分 别是熔岩流粘稠度(η)、溢流速率(E)和溢流持续时 间(Te).图4~图6显示了3个火山复合体区域的6 个典型火山穹窿参数统计图,三个火山复合体区穹 窿直径(D)跨度为1~15 km,其中95%以上的穹窿 集中在2~12 km,高程(H)变化在50~600 m,平均 侧边坡度(Slope)从1°变化到13°,表面体积(SV)可 以从0变化到22 km³.三个区域的熔岩流粘稠度(η) 和溢流速率(*E*)均较低,其中形成Rümker Hills和 Gardner 区域穹窿的熔岩流粘稠度主要集中在 $0.01 \sim 10.00 \times 10^6$ Pa·s; Marius Hills 区域的粘稠度跨 度较大,变化范围为 $0.30 \sim 252.26 \times 10^6$ Pa·s.穹窿的 溢流速率整体较低,大多在100 m³/s以下,其中 Marius Hills和Rümker Hills的溢流速率相近,变化 范围分别是 $2.76 \sim 73.39$ m³/s和 $12.78 \sim 79.01$ m³/s, Gardner 及其周边存在10个穹窿,其熔岩流的 溢流速率在100 m³/s以上,最高达303.15 m³/s.

为了更好地对比不同火山复合体区穹窿的形貌 学、矿物学和流变学特征,图7显示了所有参数的概率 密度统计情况.从图7a中可以看出,穹窿直径主要集 中在2~12 km, Marius Hills区域穹窿直径大小一致 度较高, Gardner区域直径大于10 km的穹窿占该地 区总数的比例较其他区域大; Marius Hills区域穹窿 整体最高,跨度范围最大,高程集中在100~450 m,整 体高度最低的是Gardner及其周边区域的穹窿,高程 集中在50~150 m的范围内, Rümker Hills区域的穹 窿高度介于两者之间,高程集中在100~200 m(图 7b); 从图7c中可以看出,穹窿平均侧边坡度最高为 Marius Hills区域(约3°~7°),其次为Rümker Hills区 域(约2°~5°),最低为Gardner区域(约1°~3°).三个 火山区穹窿的表面体积集中在0~6 km³, 仅有少数 穹窿的表面体积集中在0~6 km³, 仅有少数





图 a~c 依次为 Marius Hills、Rümker Hills、Gardner 火山复合体的影像图(Kaguya TC morning);图 d~f 依次为 Marius Hills、Rümker Hills、Gardner 火山复合体的地形图(TC DTM).图 a~f中白色曲线代表火山穹窿的轮廓





Fig.4 Histograms of typical parameters of the volcanic domes in the Marius Hills

a. 穹窿直径(D);b. 穹窿高度(H);c. 穹窿平均侧边坡度(Slope);d. 穹窿表面体积(SV);e. 穹窿熔岩流粘稠度(η);f. 穹窿熔岩流溢流速率(E)



Fig.5 Histograms of typical parameters of the volcanic domes in the Rümker Hills



Fig.6 Histograms of typical parameters of the volcanic domes in the Gardner





a. 穹窿直径(D);b. 穹窿高度(H);c. 穹窿平均侧边坡度(Slope);d. 穹窿表面体积(SV);e. 穹窿形态因子(f);f. 穹窿熔岩流粘稠度(η);g. 穹窿 熔岩流溢流速率(E);h. 穹窿熔岩流溢流持续时间(Te);i. 穹窿 FeO含量;j. 穹窿 TiO₂含量

(图 7d). 从图 7e 中可以看出, Marius Hills 和 Gardner区域穹窿的形态因子相近(峰值在0.4~0.5之 间),均较Rümker Hills区域穹窿的形态因子小 (峰值在 0.5~0.6 之间),显示出 Rümker Hills 火山 穹窿的形态比另外两个区域更趋向于圆柱状.图 7f~7h显示出形成月球穹窿的熔岩整体粘滞度较 小、溢流速率较低、熔岩溢流持续的时间较短.其 中 Gardner 火山穹窿熔岩流的溢流持续时间最短, 主要集中在 0~2 a 之间: Marius Hills 和 Rümker Hills的溢流持续时间整体较长且跨度较大(图7h). 从图 7i 和图 7i 中可以看出,三个区域穹窿均呈现高 铁(FeO 丰度在15%~20%)特征, Marius Hills 区 域穹窿 FeO 含量最高, Rümker Hills 区域最低, Gardner区域居中.Rümker Hills区域穹窿整体为低 钛(TiO₂)特征(峰值含量在2%~3%),Gardner及 其周边区域穹窿呈现中低钛的特征(峰值含量在 2%~4%), Marius Hills 区域穹窿 TiO₂含量跨度较 大(3%~12%),具有低钛至高钛的整体覆盖.

对比参数概率密度(图7)可以看出,Marius Hills区域火山穹窿整体高度高、侧边坡度大、铁钛 含量均较其他两个区域高,其跨度较大的高度、熔 岩流粘稠度、熔岩流持续时间以及TiO₂含量, 显示该区域可能经历了复杂多样的火山活动.

4 穹窿聚类

形貌、表面元素和流变学特征显示不同火山 复合体区穹窿之间存在一定的相似性和差异性. 综合所有参数信息对火山穹窿特征进行定性定量 分析,有助于深入了解与火山穹窿形成和演化相 关的信息.聚类是一种有效发现未知数据内在规 律的机器学习方法.本文基于提取出的穹窿直径 (D)、高度(H)、平均侧边坡度(Slope)、表面体积 (SV)、形态因子(f)以及铁钛含量 (FeO,TiO_2) 共 7个特征参数,利用 MATLAB 中的层次聚类 (hierarchical clustering)算法,尝试对所有区域穹 窿进行聚类分析.考虑到3个流变学参数是由D、 H、SV计算而来,为了避免参数间的高相关性影 响聚类结果,因此没有将流变学参数加入到聚类 分析.聚类结果显示,三大火山复合体区的161个 穹窿共可被划分为7个类别(DC1~DC7).为了便 于对不同区域火山穹窿类别的分布差异进行分析, 图 8 和图 9 分别显示了 3 个火山区域的聚类分布结 果和典型类别火山穹窿 3D 地形和高程剖面图.

如图 8a 所示, Marius Hills火山区穹窿被划分为 4类,分别是 DC3、DC5、DC6 和 DC7.该区域 80% 以 上的穹窿归属于 DC7,覆盖了整个火山区, DC7 是 该区域最具代表性的穹窿类别,数目为 85个.图 9g 显示了位于 Marius Hills高原顶部典型的 DC7 类火 山穹窿形貌特征,直径为 7.06 km,相对高程 497 m,平均侧边坡度为 8.02°,表面体积 7.55 km³, FeO 含量为 19.07%, TiO2含量为 7.04%. DC5 和 DC6 的火山穹窿数目较少,分别是 8 和 10个,多分布 在 Marius 高地的西南部. DC3 是该区域独有的穹窿 类别,其数量仅有 2个,均位于 Marius Hills高原顶 部,该类别穹窿的面积小,坡度较陡.图 8a 中黑圈所 示的典型 DC3 类穹窿直径为 3.39 km,相对高程为 315 m,平均侧边坡度 10.52°,表面体积为 1.18 km³ (图 9c), FeO 含量为 19.29%, TiO2含量为 6.00%.

Rümker Hills 火山区的穹窿被划分为3类 (DC1、DC4和DC6,图8b).DC1和DC4的数目 均为7个,在火山区广泛发育.DC1主要分布在 Rümker Hills高原的北部边缘,其面积较小且形 状不规则,北部典型的DC1穹窿如图9a所示,该 穹窿直径4.53km,高程为148m.DC4穹窿分布 较为广泛,该类穹窿的规模更大,直径为 8.90km,高程为417m,中心发育有火山口(图 9d).DC6穹窿数目为3个,集中出现在Rümker Hills南部的地形隆起处,面积较DC4的穹窿小.

如图 8c 所示, Gardner 火山区穹窿类别最多, 包含 6类(DC1、DC2、DC4、DC5、DC6、DC7).其 中 DC6 穹窿数目最多,呈环状和放射状分布在 Gardner 火山区的东侧和南侧,该类别的穹窿形 状偏圆,坡度较缓,顶部可能伴有中心坑状构造 (图 9f),是该区域最具代表性的穹窿类别.DC2 是 Gardner 独有的穹窿类别,发育在 Gardner 火山 区的南侧,该类穹窿整体比较低矮平缓,面积相 较于其他穹窿有着明显的增大(图 9b).DC1 穹 窿只有 3个,分布较为分散.DC4和 DC5 穹窿均 只有 1个,分别位于 Gardner 火山区的中部和最 西侧.DC5穹窿的面积较大,相比 DC2 穹窿高度 更高,坡度更陡(图 9e).Gardner 南侧也发育了 2个在 Marius Hills 广泛分布的 DC7 穹窿类别.

从以上聚类结果可以看出,三个火山区主要火 山穹窿分布类型各不相同,Marius Hills火山区主要 分布有 DC7 类穹窿,其特有的穹窿类型为 DC3; Rümker Hills主要分布有 DC1和 DC4穹窿;Gardner





a. Marius Hills; b. Rümker Hills; c. Gardner.图 a~c中黑色圆形标识为在每一类中选取的具有代表性的火山穹窿,将在图9中作细节展示



图 9 典型火山穹窿的三维渲染图、高程图、高程剖面

Fig.9 3D-rendering images, elevation maps, and profiles of the representative volcanic domes 图 a~g依次为层次聚类结果中 DC1~DC7类别的典型火山穹窿(图 8 黑色圆形标识),其中图 c、g 中的穹窿来自 Marius Hills 地区;图 a、d 中的 穹窿来自 Rümker Hills 地区;图 b、e、f中的穹窿来自 Gardner 地区.每个穹窿都选取了沿直线 AB、CD方向具有代表性的高程剖面

火山区及周边的穹窿类型较多,主要分布有 DC6穹窿,其特有的穹窿类型为DC2.

5 讨论

如前所述, Marius Hills、Rümker Hills、Gardner 三个火山复合体区域的穹窿形貌、成分、流变学特 征存在一定的相似性和差异性.利用层次聚类分析 方法,将形貌和铁钛含量这7个特征参数进行综合 考虑,结果显示3个火山复合体区穹窿的主要聚类 类型各不相同.为了进一步探索研究火山穹窿对火 山复合体区火山活动和演化的指示性,本文将结合 火山区的年代学属性和相关地质背景展开讨论.

5.1 火山区年龄和元素分布

前人利用撞击坑统计定年法对火山复合体区 的地质年龄进行了详细研究.Hiesinger et al.(2016) 测定 Marius Hills 区域部分穹窿的绝对模式年龄为 1.03~3.65 Ga,与其相邻的27个玄武岩区域的绝对 模式年龄为1.20~3.69 Ga,其中24个玄武岩区域的 年龄处在 3.00~3.50 Ga 之间 .Zhao et al. (2017) 对 Rümker Hills 区域3个玄武岩地质单元进行撞击坑 统计定年,结果分别为3.71 Ga、3.58 Ga和3.51 Ga, 对该区域相对陡峭穹窿的定年结果为2.91 Ga和 3.04 Ga,相较平缓穹窿的定年结果为 3.53 Ga 和 3.43 Ga. Huang et al. (2020)对 Gardner 区域中不同 地质单元进行定年,结果显示 Gardner 火山区域在 2.96~3.90 Ga的时间范围内存在多期火山活动.从 定年结果可以看出, Marius Hills 火山区年龄跨度较 大(2.66 Ga),可以从晚雨海纪跨越到爱拉托逊纪. Rümker Hills和Gardner火山区年龄跨度较小,分别

是大约 0.8 Ga 和 1.0 Ga, 年龄集中在晚雨海纪.

前期研究显示,月海玄武岩的年龄与其钛含量 可能存在一定的相关性(Morota et al., 2011: Sato et al., 2017). Morota et al. (2011)利用 Kaguva 高分 辨率影像数据测定了风暴洋 KREEP 区域 49个年 轻月海单元的年龄,发现该区域年轻的玄武岩单元 往往呈现高钛特征,而低钛玄武岩主要出现在早期 的火山活动中.Sato et al.(2017)使用WAC多光谱 数据计算了月海区域的 TiO,含量,结合年龄对比 发现早期的月海玄武岩(>2.6 Ga)具有较大范围 的 TiO, 丰度变化(0~10%), 而相对比较年轻的月 海单元(<2.6 Ga)主要呈现高钛的特点(TiO,平均 值为6.8%,最小是4.5%).为了更好地讨论3个火 山区穹窿钛含量变化情况,将所有穹窿的TiO。含 量进行投图,如图10b所示.Rümker Hills区域火山 穹窿(绿色圆点)整体表现为低钛(TiO₂<4%)特征 且年龄均大于 2.91 Ga. Gardner 及其周边区域火 山穹窿(蓝色圆点)主要呈现出中低钛特征 (TiO₂<7%),该区域穹窿的年龄均大于2.96 Ga. Marius Hills 区域火山穹窿(橙色圆点)主要呈现 出中高钛特征(4%<TiO2<10%),年龄跨度较大 (1.03~3.65 Ga). 从图 10b 中还可以看出, 三个火 山区穹窿均为高铁特征(Marius Hills>Gardner> Rümker Hills), 且 FeO 与 TiO₂ 含 量 呈 正 相 关.

从3个火山区穹窿铁钛特征和年龄关系可以看出,年龄较老的Rümker Hills和Gardner 火山区整体表现为低钛和中低钛特征,年龄 跨度较大的Marius Hills火山区也显示出高钛 穹窿年龄年轻、中低钛穹窿年龄较老的特征.



图 10 三大火山复合体区穹窿形貌(直径与高程)和元素成分(TiO₂与FeO)对比

Fig.10 Comparison of morphology (diameter vs. elevation) and elemental composition (TiO₂ vs. FeO) of domes in the three volcanic complexes

5.2 风暴洋克里普 PKT 与静海区域火山穹窿 的差异性

三个火山复合体穹窿间的相似性和差异性也可能与所处区域地质背景有一定的关系.Marius Hills、Rümker Hills两个火山穹窿区位于风暴洋克里普PKT区域(图1黑色虚线),这是月球上一处具有独特化学组分特征的区域,以富含不相容元素(KREEP)而闻名(Lawrence *et al.*, 1998).PKT中高含量的放热元素可能是产生和维持该地区月海玄武岩火山活动的一个重要因素(Wieczorek and Phillips, 2000).嫦娥五号返回品月壤样的放射性同位素测量结果表明,PKT拥有月球上最年轻的月海玄武岩(Li *et al.*, 2021).Gardner位于PKT外,静海北部,其中静海是月球上最古老的月海之一(Hiesinger *et al.*, 2000;Qiao *et al.*, 2021).

位于古老静海区域的 Gardner 及其周边的火 山穹窿相较于另外两个火山区域存在一些显著的 差异.首先在形貌属性上,Gardner区域的火山穹 窿在直径上与另外两个区域相当,但是在高度、平 均侧边坡度、表面体积上整体都较小,表明Gardner地区的火山穹窿在同等直径下更加低矮平缓 (图 10a),并且整体的规模较小.其次在流变学属 性上,形成 Gardner 穹窿的熔岩流粘稠度整体最 低,溢流时的速率最大,溢流所持续的时间最短, 指示在该地区火山活动中部分低粘稠度的熔岩流 在短时间内迅速流动,形成了较为低矮平缓的穹 窿构造.位于 PKT 区域的 Marius Hills 和 Rümker Hills 熔岩流溢流持续时间较长,最终形成了体积 较大的火山穹窿,这可能与PKT地区受所富集的 放热性元素作用相关.从大尺度上来看, Marius Hills 地区在1.03~3.69 Ga的时间内长期存在火山 活动,这在一定程度上可能也得益于放热性元素 的支持.从图 10a 中可以看出,位于 PKT 中的两 个火山区穹窿的直径和高程呈明显的正相关,同 等直径下 Marius Hills 地区穹窿更高更陡,可能与 该地区拥有多期次且较年轻的岩浆活动有关.

6 结论

月球火山穹窿是了解月球火山活动的重要窗口.本文利用高分辨率影像和高程数据,对月球正面Marius Hills、Rümker Hills和Gardner三个典型火山复合体区的穹窿进行目视识别,分别获取了105、17和39个火山穹窿轮廓,并提取了这些穹窿的形貌

学参数.利用形貌学参数,结合一定的流体运动假设,计算得到了形成穹窿时熔岩的流变学参数.此外,还利用多光谱数据计算得到了穹窿的平均铁钛含量.为了更进一步探索不同火山区穹窿的相似性和差异性,利用层次聚类算法对形貌学和铁钛含量等7个特征参数进行聚类分析,结果显示3个火山复合体区的穹窿可被划分为7个类别.最后,结合不同火山区年代学和所处区域地质背景,对3个火山复合体区的穹窿构造演化特征进行了综合分析.

研究结果显示, Marius Hills 发育的火山穹窿数 量最多,穹窿整体高度和坡度较高(既有平缓穹窿 也有陡峭穹窿),表面以中高钛为主,穹窿代表类型 为DC7(共可以划分为4个聚类),岩浆活动时间跨 度大(1.03~3.69 Ga,约2.6 Ga)、周期长,显示该区 域存在多期次、不同特征的火山活动.Rümker Hills 发育的火山穹窿数量少(以平缓穹窿为主),穹窿的 高度和坡度介于 Marius Hills 和 Gardner 之间,表面 总体为低钛特征,穹窿代表类型为DC1和DC4(共 可以划分为3个聚类),岩浆活动时间相对集中(约 0.8 Ga),经历了多期次的火山活动.Gardner及其周 边区域发育的穹窿呈环状和带状分布,穹窿整体高 度和坡度较低(以平缓穹窿为主),表面以中低钛为 主,岩浆活动时间较为集中(约1.0Ga),穹窿代表类 型为DC6(共可以划分为6个聚类),显示区域在较 长时间内发生了多期次且复杂多样的火山活动.此 外,位于PKT区域的Marius Hills和Rümker Hills的 熔岩流溢流持续时间较长,最终形成了体积较大的 火山穹窿,这可能与PKT地区受所富集的放热性元 素作用相关.本研究揭示了月球正面火山复合体岩 浆活动的复杂性,这种复杂性可能与岩浆源区及生 热元素的不均匀分布情况有关.值得进一步考虑的 是,嫦娥五号玄武岩研究显示年轻月海玄武岩源 区并不富集克里普元素(Tian et al., 2021),该采 样区域位于 Rümker Hills 火山复合体附近.因此, 在后续的工作中需要进一步考虑放射性元素在 主导火山复合体穹窿形貌形成和演化上的作用.

致谢:感谢两位审稿人对本文提出的宝贵 修改意见和建议!

References

Arya, A. S., Rajasekhar, R. P., Sur, K., et al., 2018. Morphometric and Rheological Study of Lunar Domes of Marius Hills Volcanic Complex Region Using Chandrayaan - 1 and Recent Datasets. *Journal of Earth System* Science, 127(5): 70. https://doi.org/10.1007/s12040 - 018-0971-y

- Baratoux, D., Pinet, P., Toplis, M. J., et al., 2009. Shape, Rheology and Emplacement Times of Small Martian Shield Volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 185(1-2): 47-68. https://doi.org/ 10.1016/j.jvolgeores.2009.05.003
- Bohnenstiehl, D. R., Howell, J. K., White, S. M., et al., 2012. A Modified Basal Outlining Algorithm for Identifying Topographic Highs from Gridded Elevation Data, Part 1: Motivation and Methods. *Computers & Geosci*ences, 49: 308-314. https://doi. org/10.1016/j. cageo.2012.04.023
- Chen, Y. C., Huang, Q., Zhao, J. N., et al., 2021. Unsupervised Machine Learning on Domes in the Lunar Gardner Region: Implications for Dome Classification and Local Magmatic Activities on the Moon. *Remote Sensing*, 13(5): 845. https://doi.org/10.3390/rs13050845
- Euillades, L. D., Grosse, P., Euillades, P. A., 2013. NET-VOLC: An Algorithm for Automatic Delimitation of Volcano Edifice Boundaries Using DEMs. *Computers & Geosciences*, 56: 151-160. https://doi.org/10.1016/j. cageo.2013.03.011
- Giguere, T. A., Taylor, G. J., Hawke, B. R., et al., 2000. The Titanium Contents of Lunar Mare Basalts. *Meteorit*ics & Planetary Science, 35(1): 193-200. https://doi. org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01985.x
- Gillis, J. J., Jolliff, B. L., Elphic, R. C., 2003. A Revised Algorithm for Calculating TiO₂ from Clementine UV-VIS Data: A Synthesis of Rock, Soil, and Remotely Sensed TiO₂ Concentrations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E2): 5009. https://doi. org/ 10.1029/2001je001515
- Grosse, P., van Wyk de Vries, B., Euillades, P. A., et al., 2012. Systematic Morphometric Characterization of Volcanic Edifices Using Digital Elevation Models. *Geomorphology*, 136(1): 114-131. https://doi.org/10.1016/j. geomorph.2011.06.001
- Head, J. W., Gifford, A., 1980. Lunar Mare Domes: Classification and Modes of Origin. *The Moon and the Planets*, 22(2): 235-258. https://doi. org/10.1007/ BF00898434
- Heather, D. J., Dunkin, S. K., Wilson, L., 2003. Volcanism on the Marius Hills Plateau: Observational Analyses Using Clementine Multispectral Data. Journal of Geophysical Research (Planets), 108(E3): 5017. https:// doi.org/10.1029/2002JE001938
- Hiesinger, H., Gebhart, J., van der Bogert, C. H., et al.,

2016. Stratigraphy of Low Shields and Mare Basalts of the Marius Hills Region, Moon. The 47th Lunar and Planetary Science Conference, Houston.

- Hiesinger, H., Jaumann, R., Neukum, G., et al., 2000. Ages of Mare Basalts on the Lunar Nearside. Journal of Geophysical Research: Planets, 105(E12): 29239-29275. https://doi.org/10.1029/2000je001244
- Huang, Q., Zhao, J. N., Wang, X. M., et al., 2020. A Large Long-Lived Central-Vent Volcano in the Gardner Region: Implications for the Volcanic History of the Nearside of the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 542: 116301. https://doi. org/10.1016/j. epsl.2020.116301
- Lawrence, D. J., Feldman, W. C., Barraclough, B. L., et al., 1998. Global Elemental Maps of the Moon: The Lunar Prospector Gamma-Ray Spectrometer. *Science*, 281 (5382): 1484-1489. https://doi. org/10.1126/science.281.5382.1484
- Lawrence, D. J., Feldman, W. C., Elphic, R. C., et al., 2002. Iron Abundances on the Lunar Surface as Measured by the Lunar Prospector Gamma-Ray and Neutron Spectrometers. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 107(E12): 5130. https://doi. org/10.1029/ 2001JE001530
- Lawrence, S. J., Stopar, J. D., Hawke, B. R., et al., 2013. LRO Observations of Morphology and Surface Roughness of Volcanic Cones and Lobate Lava Flows in the Marius Hills. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(4): 615-634. https://doi.org/10.1002/jgre.20060
- Lena, R., Wöhler, C., Phillips, J., et al., 2013. Lunar Domes: Properties and Formation Processes. Springer & Praxis Publishing, Chichester.
- Li, Q. L., Zhou, Q., Liu, Y., et al., 2021. Two-Billion-Year-Old Volcanism on the Moon from Chang'E-5 Basalts. *Nature*, 600: 54-58. https://doi.org/10.1038/ s41586-021-04100-2
- Lin, Y. T., 2010. Key Issues of the Formation and Evolution of the Moon. *Geochimica*, 39(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. J., Li, C. L., Wang, W. R., et al., 2019. Extraction of Lunar Domes from Chang'E-2 Data with New Method. *Icarus*, 321: 29-33. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.10.030
- 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. Journal of Geophysical Research: Planets, 105(E8): 20297-20305. https://doi.org/10.1029/1999je001117

- Morota, T., Haruyama, J., Ohtake, M., et al., 2011. Timing and Characteristics of the Latest Mare Eruption on the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(3-4): 255-266. https://doi.org/10.1016/j. epsl.2010.12.028
- Podobnikar, T., 2012. Detecting Mountain Peaks and Delineating Their Shapes Using Digital Elevation Models, Remote Sensing and Geographic Information Systems Using Autometric Methodological Procedures. *Remote Sensing*, 4(3): 784-809. https://doi.org/ 10.3390/rs4030784
- Qiao, L., Chen, J., Ling, Z. C., 2021. Volcanic Landforms on the Moon. Acta Geologica Sinica, 95(9): 2678– 2691 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, L., Head, J. W., Wilson, L., et al., 2021. Mare Domes in Mare Tranquillitatis: Identification, Characterization, and Implications for Their Origin. Journal of Geophysical Research (Planets), 126(9): e06888. https://doi.org/10.1029/2021JE006888
- Sato, H., Robinson, M. S., Lawrence, S. J., et al., 2017. Lunar Mare TiO₂ Abundances Estimated from UV/Vis Reflectance. *Icarus*, 296: 216-238. https://doi.org/ 10.1016/j.icarus.2017.06.013
- Spudis, P. D., McGovern, P. J., Kiefer, W. S., 2013. Large Shield Volcanoes on the Moon. Journal of Geophysical Research: Planets, 118(5): 1063-1081. https://doi.org/10.1002/jgre.20059
- Tian, H. C., Wang, H., Chen, Y., et al., 2021. Non-KREEP Origin for Chang' E-5 Basalts in the Procellarum KREEP Terrane. *Nature*, 600: 59-63. https://doi. org/10.1038/s41586-021-04119-5
- Weitz, C. M., Head, J. W. III, 1999. Spectral Properties of the Marius Hills Volcanic Complex and Implications for the Formation of Lunar Domes and Cones. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 104(E8): 18933– 18956. https://doi.org/10.1029/1998je000630
- Whitford-Stark, J. L., Head, J. W., 1977. The Procellarum Volcanic Complexes: Contrasting Styles of Volcanism. Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, 3: 2705-2724.
- Wieczorek, M. A., Phillips, R. J., 2000. The "Procellarum KREEP Terrane": Implications for Mare Volcanism and Lunar Evolution. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8): 20417-20430. https://doi.org/10.1029/ 1999je001092
- Wilson, L., Head, J. W., 2003. Lunar Gruithuisen and Mai-

ran Domes: Rheology and Mode of Emplacement. *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 108(E2): 5012. https://doi.org/10.1029/2002JE001909

- Wöhler, C., Lena, R., 2009. Lunar Intrusive Domes: Morphometric Analysis and Laccolith Modelling. *Icarus*, 204 (2): 381-398. https://doi. org/10.1016/j. icarus.2009.07.031
- Wöhler, C., Lena, R., Lazzarotti, P., et al., 2006. A Combined Spectrophotometric and Morphometric Study of the Lunar Mare Dome Fields near Cauchy, Arago, Hortensius, and Milichius. *Icarus*, 183(2): 237-264. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.03.003
- Wöhler, C., Lena, R., Phillips, J., 2007. Formation of Lunar Mare Domes along Crustal Fractures: Rheologic Conditions, Dimensions of Feeder Dikes, and the Role of Magma Evolution. *Icarus*, 189(2): 279-307. https:// doi.org/10.1016/j.icarus.2007.01.011
- Wood, C. A., Higgins, W., Pau, K. C., et al., 2005. The Lamont - Gardner Megadome Alignment: A Lunar Volcano - Tectonic Structure? The 36th Annual Lunar and Planetary Science Conference, League City.
- Xu, Y. G., 2010. Mare Basalts and Lunar Evolution. *Geochi*mica, 39(1): 50-62 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W., Hu, S., Li, Q. L., et al., 2022. How Long Has Lunar Volcanism Lasted? *Earth Science*, 47(10): 3789-3791 (in Chinese).
- Zhang, F., Zhu, M. H., Bugiolacchi, R., et al., 2018. Diversity of Basaltic Lunar Volcanism Associated with Buried Impact Structures: Implications for Intrusive and Extrusive Events. *Icarus*, 307: 216-234. https://doi. org/10.1016/j.icarus.2017.10.039
- Zhao, J. N., Xiao, L., Qiao, L., et al., 2017. The Mons Rümker Volcanic Complex of the Moon: A Candidate Landing Site for the Chang' E-5 Mission. Journal of Geophysical Research: Planets, 122(7): 1419-1442. https://doi.org/10.1002/2016je005247

中文参考文献

- 林杨挺,2010.月球形成和演化的关键科学问题.地球化 学,39(1):1-10.
- 乔乐,陈剑,凌宗成,2021.月球火山作用的地貌学特征.地 质学报,95(9):2678-2691.
- 徐义刚,2010.月海玄武岩与月球演化.地球化学,39(1): 50-62.
- 杨蔚,胡森,李秋立,等,2022.月球火山活动究竟能持续多 久?地球科学,47(10):3789-3791.