

“嫦娥五号”采样点周缘穹窿形貌特征及成因研究

吴文慧¹, 任鑫², 陈媛², 帕丽古力·杰恩斯¹, 孙国洋³

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012;
3. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要: “嫦娥五号”采样点周缘区域分布有吕姆克山(Mons Rümker)和梅朗(Mairan)火山穹窿构造。通过“嫦娥”影像和地形数据对两类穹窿的形貌特征和形成因素对比研究, 讨论穹窿的划分标准。共计圈定了Mons Rümker 13个月海穹窿和Mairan所在的4个非月海穹窿, 并计算了穹窿形成过程中的岩浆流变学参数。结果表明: Mons Rümker月海穹窿较为低缓, 按照坡度和高度划分为Mons Rümker第一类月海穹窿(坡度均 $< 5^\circ$, 高度200~400 m)和Mons Rümker第二类月海穹窿(坡度 $5^\circ \sim 7^\circ$, 高度300~600 m), 其中第二类较高陡的月海穹窿具有较高的黏度和更低的喷发速率。Mairan非月海穹窿更为高陡, 其岩浆喷发速率低于Mons Rümker月海穹窿, 岩浆粘度较高, 流动性较差, 喷发周期较长; 在空间上, Mairan所在的4个非月海穹窿呈线性展布, 其物质成分和形成时间相近, 表明彼此关联的可能性很大。

关键词: “嫦娥五号”采样点周缘区域; 火山穹窿构造; 穹窿形貌特征; 穹窿成因

中图分类号: P691

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)03-0321-08

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20210068

引用格式: 吴文慧, 任鑫, 陈媛, 等. “嫦娥五号”采样点周缘穹窿形貌特征及成因研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(3): 321-328.

Reference format: WU W H, REN X, CHEN Y, et al. Study on morphological characteristics and genesis of dome around Chang'E-5 sampling point[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(3): 321-328.

引言

月球火山穹窿构造是月球内部岩浆沿火山通道向月表运动或向外喷溢时形成的大型穹顶状隆起, 按照其所处的位置可以划分为月海穹窿与非月海穹窿^[1-2]。月海穹窿是指在月海区域可以观测到的一些起伏较低且具有隆起坑缘的穹窿状构造, 它们与地球和火星上小型低缓的盾形火山相似^[1]。在低太阳高度角影像上月海穹窿起伏较低(图1(a)中编号5~17区域), 其反射率通常低于临近高地火山成因的穹窿^[2]。在Clementine UVVIS假彩色合成图像上, 穹窿与周围月海色调差异非常明显(图1(b)、(d)、(f))。目前对非月海穹窿的定义尚不明确, 通常系指分布在邻近高地地区的“高陡”穹体, 呈近圆形, 少数由几个穹窿聚集而呈方形, 以具有较高的反射率和不同的矿物成分区别于月海区低缓的穹窿^[3]。月球表面雨海区格鲁伊图伊森(Gruithuisen)穹窿和风暴洋区梅朗(Mairan)穹窿(图1(c)、(e))都是典型的非月海穹窿^[2,4]。这种类型的穹窿在紫外线波段强烈吸收, 在低太阳高度角影像上起伏较大(图1(c)、(e)), 通常在红外-紫

外色差图像上非常明亮, 在0.40 μm 和0.56 μm 波段图像则非常暗^[2-3]。

中国首次月球采样返回任务月面采样点位于风暴洋区, 该区火山历史漫长, 形成了复杂多样的火山建造, 包括爆发式火山、穹窿和火山复合体等^[5]。以风暴洋南部的马里乌斯山(Marius Hills)区域为例, 以往研究表明该区域具有超过80个小型低缓的月海穹窿, 其形成过程可能与偏酸性的岩浆喷发、浅层岩盘的侵入, 或较大岩块被新熔岩覆盖有关^[6]。在风暴洋北部以吕姆克山(Mons Rümker)穹窿最为典型, 研究表明该区域共有22个月海穹窿, 依据坡度划分出高陡的穹窿($> 5^\circ$)和低缓的穹窿($< 5^\circ$), 分别代表了火山活动的不同阶段^[7]。除了月海穹窿之外, 在风暴洋区还存在另外一种高陡的非月海穹窿, 例如Gruithuisen和Mairan穹窿, 这种穹窿多分布于月海与高地之间, 是研究高地与月海地质演化关系的重要途径。

从以往研究来看, 穹窿划分和识别主要是基于其物质成分和形貌学特征。Zhao等^[7]对Mons Rümker穹窿的物质成分研究表明, Mons Rümker穹窿含有玄武岩

收稿日期: 2021-08-12 修回日期: 2021-10-14

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“嫦娥四号数据科学解译及着陆区地质背景研究”(11941002)

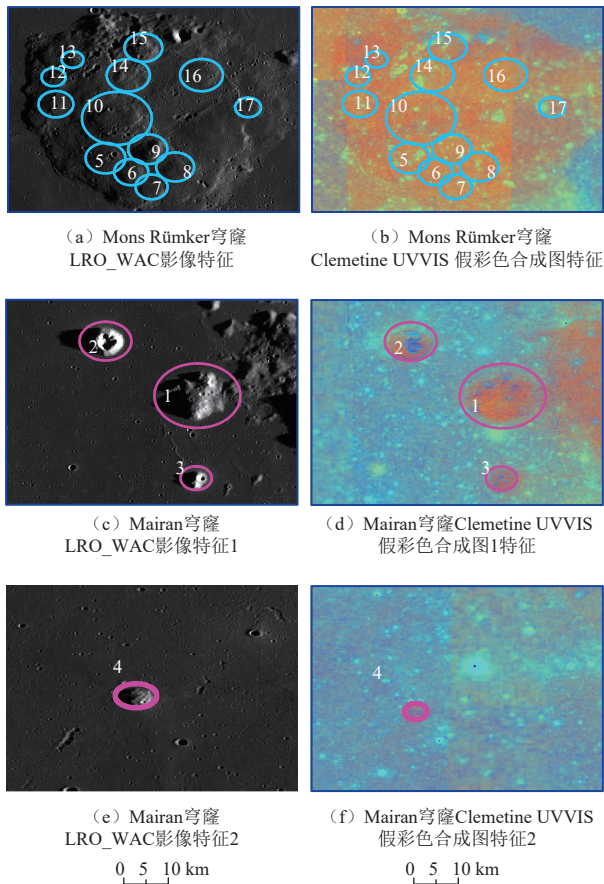


图1 风暴洋东北部穹窿LRO_WAC影像特征和Clemenine UVVIS假彩色合成图特征

Fig. 1 Northern Oceanus Procellarum domes CE2 LRO_WAC and Clemenine UVVIS false color composite image features

的成分, FeO含量较高, 硅质成分较低, 穹窿表面的新鲜撞击坑也显示穹窿FeO含量很高, 排除了是早期硅质成分的穹窿被晚期玄武质岩浆覆盖的可能性。文

献[8~10]总结了有关Mairan穹窿的遥感成分信息, 并指出该穹窿显示出与来自富含SiO₂、高度演化岩浆的长英质物质成分一致的光谱和形态属性, 与周围月海玄武岩及高地单元有明显区别。因此, 物质成分也是划分和识别穹窿的重要参考依据之一。

文献[11~13]结合穹窿物质成分信息(FeO和TiO₂含量)、形貌学参数(穹窿侧翼坡度、直径、高度、体积)和形成因素(喷发速率、喷发持续时间、岩浆黏度)将月球穹窿划分为7大类(表1)。其中, A~C类与Head等^[1]划分的1~3类月海穹窿一致。在阿拉戈(Arago)地区穹体更大, 形态也更为复杂, 而进一步划分出D类。此外, 具有中等TiO₂含量且直径小于6 km的穹窿划分为E类, 根据坡度可再划分为E₁(坡度2°~4°)和E₂(坡度<2°)两类。Lena等^[13]在Head等^[1]划分的第6类基础上对应划分了G、H类, G类坡度较高(>6°), 其特征与Gruihuisen高地穹窿一致, 呈高陡型; H类则根据坡度、直径及体积特征划分了3个亚类H₁(坡度<5°, 直径<5 km), H₂(坡度2°~5°, 直径5~15 km)和H₃(坡度5°~9°, 直径5~13 km)。

Mons Rümker月海穹窿与Mairan非月海穹窿代表了风暴洋北部的火山活动, 目前缺乏两者的对比研究及两类穹窿的划分标准, 对于两者之间有何种联系, 其形貌特征和流变学特征代表了怎样的岩浆过程还不清晰。特别是Mairan穹窿, 此前的研究大都基于单个穹窿的物质成分、演化过程及其与高地之间的关系, 并未将Mairan相关的非月海穹窿的形貌参数做详细研究; 尽管Mons Rümker穹窿研究程度很高, 但对于其

表1 月球喷出型穹窿划分表

Table 1 Division of lunar extrusive domes

类别	R_{415}/R_{750}	坡度/(°)	直径/km	体积/km ³	喷发速率/(m ³ ·s ⁻¹)	喷发时间/a	黏度/(Pa·s)
A	>0.64	0.3~1	5~13	<3	100~620	0.05~0.3	10 ² ~10 ³
B ₁	0.55~0.64	2~5.4	6~15	5~32	30~200	3~18	10 ⁶ ~10 ⁷
B ₂	0.55~0.64	1.3~1.9	8~15	2~21	80~170	0.7~1.2	10 ⁴ ~10 ⁵
C ₁	0.55~0.6	0.6~1.8	13~28	7~50	200~2 000	0.06~7	10 ⁴ ~10 ⁵
C ₂	0.6~0.64	1~2.5	8~17	4~17	100~300	0.5~7	10 ⁴ ~10 ⁵
D	>0.64	1.3~1.5	~25	40~67			
E ₁	0.58~0.62	2~4	<6	0.5~0.8	~25	1.0~1.7	10 ⁵ ~10 ⁶
E ₂	0.58~0.62	<2	<6	0.5~0.8	100~300	0.05~0.3	10 ⁵
G	0.55~0.6	>6	7~30	20~400	48~120	12.8~42	10 ⁸ ~10 ⁹
H ₁	0.62~0.68	<5	<5	<2	10~100	~2	~10 ⁶
H ₂	0.62~0.68	2~5	5~15	1~43	10~100	~4	~10 ⁶
H ₃	0.62~0.68	5~9	5~13	7~37	10~100	~10	~10 ⁷

注: 根据文献[13]修改。

形成因素并未进行定量化表达(如岩浆黏度、喷发速率, 喷发持续时间)。因此, 本文重点从穹窿形貌学和岩浆流变学参数对Mons Rümker和Mairan穹窿进行对比研究, 并解释这两类穹窿的形成过程, 以期能为中国首次月球样品采样点周缘地质背景研究提供支撑, 并为风暴洋区热演化史提供重要的参考依据。

1 穹窿的提取与分析方法

1.1 数据

为了更好地检查和识别“嫦娥五号”(CE-5)着陆区穹窿形貌特征和分布特征, 本文使用的影像数据有: “月球勘测轨道飞行器”(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)宽角相机低太阳高度角数据(LRO WAC)和Clementine UVVIS假彩色合成图像, 假彩色主要由 R_{750} 、 R_{415}/R_{750} 和 R_{950}/R_{750} 3个谱段合成; “嫦娥二号”(CE-2)空间分辨率为50 m/pixel的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和空间分辨率为50 m/pixel的数字正射影像图(Digital Orthophoto Map, DOM)。CE2TMap2015平面位置偏差在21~97 m

之间, 高程偏差在2~19 m之间。DEM用来提取着陆区穹窿的形貌参数, DOM数据为WAC图像、UVVIS图像几何配准提供基准底图, Clementine UVVIS假彩色合成图像用来验证分析穹窿的物质成分。上述数据特征如表2所示。

1.2 穹窿划分与识别依据

从引言提到的穹窿划分方案和识别特征来看, 形貌学参数和物质成分信息可以用来划分穹窿, 但是穹窿物质成分复杂, 仅从Clementine UVVIS假彩色合成图像上无法区别月海穹窿与非月海穹窿。因此, 本文对“嫦娥五号”采样点周缘区域Mons Rümker月海穹窿和Mairian非月海穹窿的划分主要是基于形态学分类, 采用人工方法检查识别。

1.3 穹窿定量刻画参数及其提取方法

在月海穹窿的分类和形成过程研究中, 通常采用直径、面积、高度、表面体积、坡度等形貌参数^[11-12](表3)。这些形貌参数既是划分穹窿类型的有力证据又是推测穹窿熔岩形成过程的最佳因素组合。穹窿形成过程中岩浆流变学参数, 如熔岩黏度 $\eta(\tau)$ 、喷发

表2 本研究中所使用的数据^[14-15]

Table 2 Data used in this study^[14-15]

数据名称	探测任务	空间分辨率/(m-pixel ⁻¹)	本文作用
LRO WAC (GLD100)	LRO, 2008年	100	确定穹窿的边界和位置
CE2_TMap2015_50 m的DEM数据产品	“嫦娥二号”, 2010年	50	提取形貌参数
CE2_TMap2015_50 m的DOM数据产品	“嫦娥二号”, 2010年	50	给WAC图像、UVVIS图像几何配准提供基准底图
Clementine UVVIS假彩色合成图像	“克莱门汀号”(Clementine), 1994年	200	做物质成分参考

表3 穹窿定量刻画参数

Table 3 Quantitative characterization parameters of dome

参数名称	参数定义	提取方法	其它说明
穹窿基底面积 A/km^2	轮廓线以内穹窿的表面面积	由轮廓限定的像素来确定	假设穹窿为标准圆形(见图2)
直径 D/m	穹体基底圆所在圆周过圆心任意两点的连线	$D = 2\sqrt{A/\pi}$	
高度 H/m	穹窿顶点与穹窿轮廓中最低点的差值	通过裁剪每个穹窿的DEM数据, 提取穹窿高程数据, 将最高点与最低点高程作差	
坡度 $Slope/(\circ)$	穹窿高度与穹体基底直径一半比值的反函数	$Slope = \arctan(2H/D)$	g 为月球重力加速度, 取 1.63 m/s^2 ; c_f^2 为熔岩流动有效厚度; κ 为熔岩的热扩散率, $\kappa \approx 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; SV 为穹窿表面积
屈服强度 τ/Pa	抵抗微量塑性变形的应力	$\tau = \frac{0.323H^2\rho g}{D/2}$	
塑性粘度 $\eta(\tau) / (\text{Pa}\cdot\text{s})$	当流体微团内微团之间发生相对滑移时, 内部产生的剪切应力(切向阻力)	$\eta(\tau) = 6 \times 10^{-4} \tau^{2.4}$	
喷发速率 $E (\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	从喷口喷出单位体积岩浆所花的时间	$E = \frac{0.323^{1/2}300\kappa \left(\frac{D}{2}\right)^2}{0.65^{5/2}c_f^2H}$	
喷发持续时间 T_c/s	熔岩喷发持续时间	$T_c = \frac{SV}{E}$	

注: 表中公式引自文献[17~18]。

速率 E 及熔岩喷发所持续的时间 T_e 决定了穹窿的形貌特征^[16]。Lione等^[17]假定喷出型穹窿是由平原的中央喷口喷发的岩浆堆积形成的,在此基础上提出穹窿形成过程中适用的流变模型。穹窿岩浆冷却的过程可以视为Bingham塑性模型^[18],可以用屈服强度 τ 和塑性黏度 $\eta(\tau)$ 两个参数来描述(表3)。本文将基于DEM数据量取风暴洋地区Mons Rümker和Mairan穹窿基底面积、高度和表面体积,结合流变学模型计算公式对月海穹窿和非月海穹窿岩浆过程进行定量刻画。

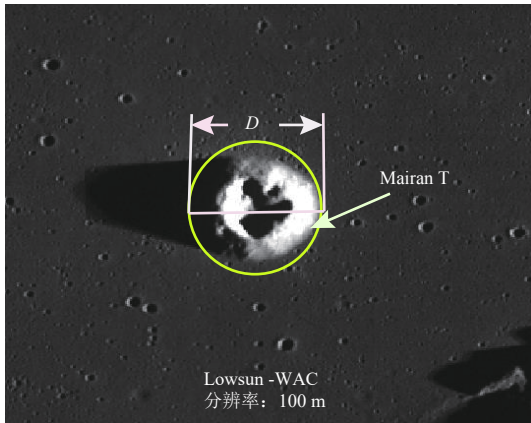


图2 穹窿参数表示
Fig. 2 Dome parameter representation

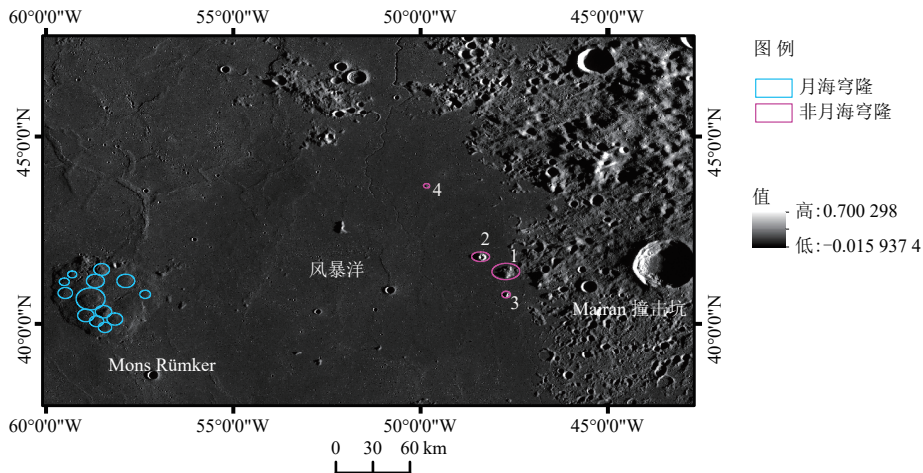


图3 风暴洋北部穹窿分布图
Fig. 3 Distribution of northern Oceanus Procellarum domes

在风暴洋Mons Rümker按照地形隆升程度排除了Zhao等^[7]统计的部分穹窿,在此基础上圈定了13个穹窿(表4,编号5~17,图1(a)),其中11号穹窿为新发现的穹窿。这些穹窿在形态上也成近圆形,表面比较光滑,相较于1~4号穹窿,其产状较为缓倾,根据坡度和高度变化情况可以进一步划分为两类,第一类月海穹窿坡度均 $< 5^\circ$,高度为200~400 m(6、7、8、

2 穹窿的特征及分类

2.1 穹窿形貌学特征及其分类

按照1.2小节中穹窿的识别方法,在以往研究基础上重新圈定了“嫦娥五号”采样点周缘区域Mons Rümker和Mairan大型火山构造上的17个穹窿(图3)。其中,Mairan非月海穹窿位于Mairan撞击坑以西,有4个“大型”的穹窿^[19](图3,编号1~4)。在空间上,上述4个穹窿紧邻高地,大致呈椭圆~近圆形,表面较为粗糙,其坡度均大于 7° 。Mairan 1号穹窿(Mairan Middle Dome)大致呈方形,规模较大,表面具向下延伸的沟纹和撞击坑,与高地相连,高度可达900 m;Mairan 2号穹窿(Mairan T Dome)峰顶具有火山口,穹窿产状陡峭,坡度可达 12° ,高度可达845 m,其峰顶坑直径明显大于相邻的穹窿(1、3、4号穹窿),可能是遭受后期撞击作用叠加加大的缘故;Mairan 3号穹窿(Mairan South Dome)的峰顶被撞击坑改造其原生的火山通道已无法识别,高度近500 m;Mairan 4号穹窿(Mairan Northwest Dome)位于上述穹窿的西北部,距离高地更远,规模较小,高度小于300 m,但仍比较陡峭。

10、11、14、16、17号);第二类月海穹窿坡度为 $5^\circ \sim 7^\circ$,高度为300~600 m(5、9、12、13、15号)。

2.2 穹窿流变学参数特征

Wilson等^[17]提出了在平面上形成穹窿的岩浆喷发定量处理模型,岩浆被视为Bingham流体。其中,采用屈服强度 τ 表示岩浆流动而必须具备的压力或应力;塑性黏度 $\eta(\tau)$ 度量喷发熔岩的流动性,与屈服强度 τ

表4 研究区穹窿形貌学参数和流变学特征参数提取结果

Table 4 Extraction results of dome morphological parameters and rheological characteristic parameters in the study area

穹窿类型	穹窿编号	经度/(°W)	纬度/(°N)	基底面积/ A/km^2	穹窿高度/ H/m	穹窿直径/ D/km	坡度/ $S/(\text{°})$	表面体积/ SV/km^3	屈服强度 τ/Pa	塑性黏度 $\eta(\tau)/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	喷发速率 $E/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	喷发持续时间 T_c/s
非月海穹窿	1	47.7	41.4	146.9	902.2	13.7	7.5	60.6	1.3×10^5	1.0×10^9	36.0	1.7×10^9
	2	48.4	41.8	48.2	845.4	7.8	12.2	20.4	1.9×10^5	2.9×10^9	12.6	1.6×10^9
	3	47.7	40.8	22.6	492.1	5.4	10.4	3.5	9.5×10^4	5.3×10^8	10.2	3.4×10^8
	4	49.9	43.7	11.6	266.3	3.8	7.9	2.3	3.9×10^4	6.2×10^7	9.7	2.4×10^8
月海穹窿	5	58.4	39.9	54.0	371.9	8.3	5.1	18.1	3.5×10^4	4.9×10^7	32.1	5.6×10^8
	6	58.7	40.1	61.1	318.5	8.8	4.1	10.9	2.4×10^4	2.0×10^7	42.5	2.6×10^8
	7	58.4	39.9	82.9	300.4	10.3	3.3	11.5	1.8×10^4	1.0×10^7	61.1	1.9×10^8
	8	58.2	40.1	75.2	324.5	9.8	3.8	18.7	2.3×10^4	1.7×10^7	51.3	3.6×10^8
	9	58.5	40.3	80.0	581.3	10.1	6.6	31.0	7.1×10^4	2.6×10^8	30.5	1.0×10^9
	10	58.8	40.6	227.7	493.6	17.0	3.3	86.6	3.0×10^4	3.4×10^7	102.1	8.5×10^8
	11	59.5	40.8	63.5	281.8	9.0	3.6	15.2	1.9×10^4	1.1×10^7	49.9	3.0×10^8
	12	59.5	41.1	30.4	390.3	6.2	7.2	9.7	5.2×10^4	1.2×10^8	17.2	5.7×10^8
	13	59.3	41.3	25.2	321.5	5.7	6.5	6.9	3.8×10^4	6.0×10^7	17.4	4.0×10^8
	14	58.7	41.1	97.2	363.0	11.1	3.7	28.3	2.5×10^4	2.1×10^7	59.2	4.8×10^8
	15	58.5	41.4	74.9	457.1	9.8	5.3	58.6	4.5×10^4	8.9×10^7	36.3	1.6×10^9
	16	57.9	41.2	95.9	305.7	11.0	3.2	25.7	1.8×10^4	9.5×10^6	69.4	3.7×10^8
	17	57.4	40.8	34.7	224.2	6.7	3.9	7.8	1.6×10^4	7.3×10^6	34.3	2.3×10^8

正相关。屈服强度 τ 根据Blake^[18]提出的公式来计算(表3),式中 ρ 代表岩浆密度。研究表明月海穹窿由月海玄武岩组成,其密度通常 $> 2\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$, Gruithuisen和Mairan非月海穹窿可能是由密度相当低的非玄武岩熔岩形成的^[17,20]。Wilson等^[17]将月海和非月海穹窿的岩浆黏度分为6个数量级,认为密度对岩浆黏度的影响并不大,本文中岩浆密度 ρ 均取 $2\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。另外,该模型采用岩浆喷发速率 E 来计算每秒从火山口喷出的岩浆体积,是一个与穹窿基底直径 D 、穹窿高度 H 和熔岩热扩散速率 κ 有关的变量。该变量假设熔岩流前部的运移会受到岩浆冷却的限制,基于熔岩流动有效真厚度 c_f^2 来计算,有效厚度可以视为穹窿穹顶及其外缘与周围表面之间的高度差,由穹窿的外部轮廓决定,可以用DEM数据提取,当穹窿形态复杂时该参数的提取也比较困难。月海穹窿熔岩流动有效真厚度 c_f^2 取值0.72,而Mairan非月海穹窿一般取0.7^[17]。熔岩喷发持续时间 T_c 是为了补充喷发速率 E 不够精准而提出的参数,可以用穹窿表面体积与喷发速率的比值来计算。

本文依据上述流变学参数及其计算公式(表3)对2.1节中圈定的穹窿进行了流变学参数的计算(表4)。计算结果显示,Mairan非月海穹窿(1~4号)岩浆黏度集中在 $\sim 6.2\times 10^7\sim 1.0\times 10^9\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,喷发速率则集中在 $9.7\sim 36.0\ \text{m}^3/\text{s}$,喷发持续的时间在 $2.4\times 10^8\sim 1.7\times 10^9\ \text{s}$,与表1中高陡型的G、H类穹窿的流变学特征极为相

似,反映出高黏度、低喷发速率的特征。表明这种类型的穹窿岩浆流动速率缓慢,喷发持续时间较长,岩浆缓慢冷却结晶,不断“堆积”形成的高陡的穹窿。

Mons Rümker月海穹窿的岩浆黏度集中在 $7.3\times 10^6\sim 2.6\times 10^8\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,喷发速率集中在 $17.2\sim 102.1\ \text{m}^3/\text{s}$,喷发持续的时间为 $1.9\times 10^8\sim 1.6\times 10^9\ \text{s}$,其流变学参数整体特征与表1中B、H₃类穹窿相似,与3.1节中根据形貌参数划分的Rümker第一类月海穹窿和第二类月海穹窿相对应,也可分为两类。其中,Mons Rümker第一类月海穹窿的岩浆流变学参数大致呈低黏度($7.3\times 10^6\sim 3.4\times 10^7\ \text{Pa}\cdot\text{s}$)、高喷发速率($34.3\sim 102.1\ \text{m}^3/\text{s}$)的特征,反映出穹窿在形成过程中岩浆流动速度较快,累计喷发的时间较短,形成宽缓、扁平的穹窿;而Rümker第二类穹窿则表现出较高的黏度($4.9\times 10^7\sim 2.6\times 10^8\ \text{Pa}\cdot\text{s}$)和喷发速率($17.2\sim 36.3\ \text{m}^3/\text{s}$),与Mairan 3、4号穹窿的塑性黏度及喷发持续时间相近,但岩浆喷发速率仍高于Mairan 3、4号穹窿,表明穹窿在形成过程中由于岩浆黏度升高,导致岩浆流动性变差,所以在相对高的喷发速率下形成较为高陡的穹窿。

3 穹窿对比分析及其划分标准

3.1 穹窿形貌学及岩浆流变学特征对比

本文根据穹窿位于月海或者紧邻高地,结合穹窿

形貌参数,将“嫦娥五号”采样点周缘区域穹窿划分为Mons Rümker月海穹窿(5~17号)和Mairan非月海穹窿(1~4号)。这两类穹窿在形态上均呈椭圆-近圆形,不同的是靠近高地的Mairan非月海穹窿更为高陡,其坡度均大于7°。Mons Rümker第一类月海穹窿(坡度均<5°,高度200~400 m)形态上表现为宽缓、扁平的特征。Mons Rümker第二类月海穹窿(坡度5°~7°,高度300~600 m)在基底面积、高度及坡度上与紧邻高地区的3、4号穹窿比较相似,较为高陡。

从岩浆喷发速率和岩浆黏度来看,Mairan非月海穹窿(1~4号,图3)的岩浆喷发速率总体低于Mons Rümker月海穹窿,但其岩浆黏度总体高于Mons Rümker月海穹窿。Mairan 1、2号穹窿相比Mairan 3、4号穹窿距离高地更近,其岩浆黏度很高。Mairan 3、4号穹窿形貌学特征更类似于Mons Rümker第二类月海穹窿,但其岩浆喷发速率和塑性黏度也大致符合低喷发速率、高黏度的规律。Mons Rümker第一类月海穹窿的岩浆喷发速率均比较高(34.3~102.1 m³/s)、岩浆黏度较低(7.3×10⁶~3.4×10⁷ Pa·s),其岩浆喷发表现出低黏度、高喷发速率的特征。

统计结果表明,Mairan 1号穹窿规模更大,因此其岩浆黏度很高,喷发速率也略高于Mons Rümker部分月海穹窿,喷发所持续的时间也显得更长。Mairan 2号穹窿的坡度在所有穹窿中最大,高度也接近1号穹窿,尽管其喷发速率较低,但其岩浆黏度很高,岩浆喷发持续的时间更长。因此,高黏度、低喷发速率和较长的喷发时间是形成“高陡”的重要因素,而要形成“大型”的穹窿则需要更多的岩浆累积。

Mons Rümker第一类月海穹窿的整体特征(包括形貌学参数及流变学参数)与表1中B₁类穹窿极为相似,表现出典型的月海穹窿的特征(位于月海、宽缓、低平,低黏度、高喷发速率)。Mairan 1、2号穹窿则更能体现典型非月海穹窿的特征(临近高地、高陡,高黏度、低喷发速率),而Mairan 3、4号穹窿距离高地较远,更有可能是月海穹窿与非月海穹窿的过渡类型,其形貌学参数和流变学参数特征更类似于表1中H₁类穹窿。

3.2 穹窿岩浆活动特征对比

Mons Rümker存在两种不同类型的月海穹窿(即本文中提到的Mons Rümker第一、二类穹窿),这两类穹窿在物质成分上相同,均富FeO、贫SiO₂,是Mons Rümker火山活动的产物^[7]。但这两种类型的穹窿在形态和流变学参数却略有差异,第二类穹窿显示出更为陡峭的特征,形成该类穹窿的岩浆黏度更高,表

明这两类穹窿可能经历了不同的演化过程。Zhao等^[7]的研究表明Mons Rümker低缓的穹窿形成时间(约3.5 Ga)与Mons Rümker玄武岩单元火山活动的时间(约3.71 Ga, 3.58 Ga和3.51 Ga)相隔较短,是Mons Rümker岩浆活动早期的产物,高陡的穹窿稍晚于Mons Rümker玄武岩单元形成时间(约3.51 Ga),其火山活动一直持续到了爱拉托逊纪(约3.0 Ga),是Mons Rümker火山活动末期的产物^[17]。上述年代学数据表明,Mons Rümker火山穹窿是在不同阶段形成的,高陡的穹窿岩浆喷发持续时间更长,在Mons Rümker岩浆活动末期,岩浆进一步冷却导致岩浆黏度升高,形成了较为高陡的月海穹窿。

Mairan非月海穹窿关联的4个穹窿(Mairan中部,Mairan T,Mairan南部和西北穹窿^[2,19],对应于本文非月海穹窿1~4号穹窿)在空间上呈线性排列(图3),它们之间的可能存在着某种联系。Wilson等^[12]从这些穹窿形态特征推断出形成这些穹窿的岩浆黏度往往高于典型的月海玄武岩,通过计算形成穹窿的岩浆的屈服强度、塑性黏度、喷发速率和持续时间进一步证实了其火山成因的穹窿岩浆特征一致。上述4个穹窿中,除中部穹窿与高地相连外,其余均位于月海区,临近高地。目前关于它们4个是否有关联,还是分别属于独立的火山喷发机构有不同的看法。本文更支持Glotch等^[9]提出的上述4个穹窿之间有关联的看法,主要有以下几点原因:①LRO WAC图像显示(图1(c)、(e)),Mairan中部穹窿与高地相连,但在物质成分上均富集SiO₂、贫FeO,与高地和月海玄武岩的物质成分有明显区别^[2,17];②Mairan中部穹窿岩浆活动始于约3.84±0.11 Ga,近乎同时(约3.75±0.1 Ga)形成了Mairan T和Mairan南部穹窿^[10,19],三者在形成时间上密切联系;③Mairan中部穹窿之所以与高原之间的界限不明显很可能是被后期不同期次的岩浆事件和撞击事件叠加改造形成的。在其形成阶段月海也相继出现火山活动(约3.73±0.1 Ga),之后主要有两期火山活动出现在Mairan中部穹窿和月海区域(约3.35±0.2 Ga)。第一期富硅贫铁的岩浆在Mairan中部穹窿的东部和南方顶部以及脊线处喷发,第二期由较低的SiO₂和较高的FeO成分的熔岩流(相较于形成穹窿顶峰熔岩的SiO₂、FeO含量)形成了Mairan中部穹窿的中央高原^[19,21]。因而上述Mairan穹窿更有可能是同一次岩浆事件中形成的,目前对于Mairan穹窿物质成分及年代学信息研究不全,特别是4号穹窿(即Mairan西北部穹窿),而且该穹窿与其它3个穹窿(1~3号)相隔较远,故而上述关联性还需进一步的工作去验证。

3.3 穹窿的划分标准

从Mons Rümker和Mairan火山穹窿构造的划分来看,月海穹窿与非月海穹窿的划分标准与穹窿的地理位置、形貌学参数、形成因素(岩浆流变学参数)及物质成分密切相关。依据穹窿与月海和高地的距离远近可以粗略划分出非月海穹窿和月海穹窿,但从Mons Rümker第二类月海穹窿与Mairan 3、4号非月海穹窿在形貌和流变学参数特征较为相似可以看出,高陡和低缓并不是区分这两类穹窿的唯一标志,而且高陡和低缓的临界值也没有固定标准。因此,两类穹窿的划分应当在形貌学的划分基础上,从穹窿与月海及高地的关系(地理位置、物质成分)、形成因素(岩浆喷发速率、岩浆黏度等)共同厘定。

4 结 论

1) 通过以上研究共验证了“嫦娥五号”采样点周缘区域月海穹窿13个(5~17号)、新发现穹窿1个(编号11)。这些穹窿包括低缓的、坡度小于 5° 、高度200~400 m的Mons Rümker第一类穹窿(6、7、8、10、11、14、16、17号)和坡度 $5^\circ\sim 7^\circ$ 、高度300~600 m的Mons Rümker第二类穹窿(5、9、12、13、15号);Mairan非月海穹窿4个(1~4号,其中3、4号较为低缓)。

2) 提取了穹窿的形貌参数(基底面积、高度、表面体积),结合公式计算了其余形貌参数(坡度、直径)和流变学特征参数(岩浆黏度、喷发速率、喷发持续时间等)。统计结果表明,Mons Rümker月海穹窿岩的浆喷发速率较高而岩浆黏度较低;Mairan非月海穹窿则呈现出高黏度、低喷发速率的特点。Mons Rümker第二类穹窿与Mairan 3、4号非月海穹窿在形貌上较为相似,但其喷发速率略高于Mairan 3、4号非月海穹窿。

3) 通过对比研究发现,月海穹窿与非月海穹窿的划分依据应该结合穹窿形貌参数、地理位置、岩浆的喷发速率和岩浆黏度等流变学参数特征来区分。非月海穹窿比较“高陡”、紧邻高地、高黏度、低的喷发速率以及月海穹窿(更适用于Mons Rümker第一类穹窿)远离高地、低缓、低黏度、高喷发速率的规律适用于本文提取的穹窿,但本文统计的数量少,未来需要在其它月海地区开展类似工作,研究该标准是否是普适性标准。

参 考 文 献

- [1] HEAD J W, GIFFORD A. Lunar mare domes: classification and modes of origin[J]. *The moon and the planets*, 1980, 22(2): 235-258.
- [2] HEAD J W, McCORD T B. Imbrian-age highland volcanism on the Moon: the Gruithuisen and Mairan domes[J]. *Science*, 1978, 199(4336): 1433-1436.
- [3] 何妹娟. 月表静海地区地质构造分布特征及其演化分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [4] HE S J. Distribution characteristics and evolution analysis of geological structures in the lunar surface Jinghai area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [5] KUSUMA K N, SEBASTIAN N, MURTY S V S. Geochemical and mineralogical analysis of Gruithuisen region on Moon using M3 and DIVINER images[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, 67(1): 46-56.
- [6] WHITFORD-STARK J L, HEAD J W. The Procellarum volcanic complexes—contrasting styles of volcanism[J]. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, 1977, 8: 2705-2724.
- [7] WEITZ C M, HEAD III J W. Spectral properties of the Marius Hills volcanic complex and implications for the formation of lunar domes and cones[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1999, 104(E8): 18933-18956.
- [8] ZHAO J, XIAO L, QIAO L, et al. The Mons Rümker volcanic complex of the Moon: a candidate landing site for the Chang'E-5 mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, 122(7): 1419-1442.
- [9] SCOTT D H, EGLETON R E, SMITH E I. Geologic map of the Rümker quadrangle of the Moon: 1973USGS.IM.805S[R]. [S. l.]: USGS, 1973.
- [10] GLOTCH T D, TIMOTHY D, LUCEY P, et al. The Mairan domes: silicic volcanic constructs on the Moon[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(21): 1-5.
- [11] LUCEY, PAUL G, BLEWETT, et al. 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.
- [12] WÖHLER, CHRISTIAN, LENA R et al. A combined spectrophotometric and morphometric study of the lunar mare dome fields near Cauchy, Arago, Hortensius, and Milichius[J]. *Icarus*, 2006, 183(2): 237-264.
- [13] WÖHLER C, LENA R, PHILLIPS J, et al. Formation of lunar mare domes along crustal fractures: Rheologic conditions, dimensions of feeder dikes, and the role of magma evolution[J]. *Icarus*, 2007, 189(2): 279-307.
- [14] LENA R, WÖHLER C, PHILLIPS J, et al. Lunar domes: properties and formation processes[M]. Italia: Springer Science & Business Media, 2013: 59-65.
- [15] 李春来, 刘建群, 任鑫, 等. 基于嫦娥二号立体影像的全月高精度地形重建[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(4): 485-495.
- [16] LI C L, LIU J, REN X, et al. Full month high-precision terrain reconstruction based on Chang'e-2 stereo image[J]. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 2018, 43(4): 485-495.
- [17] REN X, LIU J, LI C, et al. A global adjustment method for photogrammetric processing of Chang'E-2 stereo images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(9): 6832-6843.
- [18] CHEN Y, HUANG Q, ZHAO J, et al. Unsupervised machine learning on domes in the lunar gardner region: implications for dome classification and local magmatic activities on the Moon[J]. *Remote*

- Sensing, 2021, 13(5): 845.
- [17] LIONE W, HEAD J W. Lunar gruithuisen and mairan domes: rheology and mode of emplacement[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2003, 108(E2): 5012.
- [18] BLAKE S. Viscoplastic models of lava domes[M]. *Lava Flows and Domes*. Berlin: Springer, 1990.
- [19] BOYCE J M, GIGUERE T, MOUGINIS-MARK P, et al. Geology of Mairan middle dome: its implication to silicic volcanism on the Moon[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, 162: 62-72.
- [20] WIECZOREK M A, ZUBER M T, PHILLIPS R J, et al. The role of magma buoyancy on the eruption of lunar basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(1-2): 71-83.
- [21] WAGNER R, HEAD J, WOLF U, et al. Stratigraphic sequence and ages of volcanic units in the Gruithuisen region of the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2002, 107(E11): 14-1-14-15.

作者简介:

吴文慧(2001-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 资源勘查工程(固体矿产)。

通讯地址: 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院(100083)

E-mail: wenhuiwu@163.com

任鑫(1978-), 男, 副研究员, 主要研究方向: 行星遥感。本文通讯作者。

通讯地址: 中国科学院国家天文台月球与深空探测实验室(100012)

E-mail: renx@nao.cas.cn

Study on Morphological Characteristics and Genesis of Dome Around Chang'E-5 Sampling Point

WU Wenhui¹, REN Xin², CHEN Yuan², Paliguli-JIEENSI¹, SUN Guoyang³

(1. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

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

3. China Power Engineering Consulting Group North China Electric Power Design Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: Mons Rümker and Mairan volcanic dome structure are distributed around Chang'E-5 sampling point. At present, there is a lack of comparative research on their morphological characteristics, genesis and classification standards. Therefore, this paper compared the morphological characteristics and formation factors of the two types of domes through Chang'E image and topographic data, and discussed the division criteria of domes. In this study, 13 lunar mare domes of Mons Rümker and 4 non-mare domes of Mairan were delineated, and the magma rheological parameters during the formation of the domes were calculated. The results show that the Rümker lunar mare domes are relatively low and flat. According to the slope and height, the domes are divided into Rümker type I lunar mare dome (slope $< 5^\circ$, height 200-400 m) and Rümker type II mare dome (slope $5^\circ-7^\circ$, height 300-600 m). Among them, the second kind of higher and steeper lunar sea dome has higher viscosity and lower eruption rate. Compared with the Rümker mare dome, the Mairan non-mare dome is higher and steeper, and its magma eruption rate is generally lower than that of mare domes, with high magma viscosity, poor fluidity and long eruption cycle. Spatially, the four non-lunar mare domes where Mairan is located are linearly distributed and their material composition and formation time are similar, indicating that they are likely to be related to each other.

Keywords: surrounding area of Chang'E-5 sampling point; volcanic dome structure; morphological characteristics of dome; genesis of dome

Highlights:

- Using Chang'E image and morphological data, 17 volcanic domes around Chang'E 5 sampling point are delineated, of which the newly discovered dome is No. 11.
- Based on morphological and rheological characteristics, the characteristics of Rümker mare domes and Mairan non-mare domes around Chang'E-5 sampling point are compared.
- The division of lunar mare domes and non-lunar mare domes should be determined by using a combination of morphological parameters, geographical location, rheological parameters, material composition and other parameters.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]