月球Gardner火山区地质特征及其火山活动历史

王太茂¹, 赵健楠¹, 黄倩^{2*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 行星科学研究所, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)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

*联系人, E-mail: qianhuang@cug.edu.cn

收稿日期: 2018-08-04; 接受日期: 2018-11-01; 网络出版日期: 2019-01-08

国家自然科学基金(编号: 11403020)和中国博士后科学基金(编号: 2018M630889)资助项目

摘要 Gardner火山区位于月球正面东侧, 澄海与静海之间, 区域内发育有丰富的火山形貌特征, 是研究月球火山活动及其热演化的理想对象. 本文利用新近获得的高分辨率影像、高程及多光谱等数据, 对Gardner火山区地形地貌、元素分布等进行了详细的分析. 研究表明, 该区域存在穹窿、山脊、陡崖等多种地貌, 区域表面铁钛丰度分别为11–17 wt%和1–3 wt%. 结合撞击坑统计定年结果, 本文认为Gardner区域在酒海纪晚期至雨海纪(3.90–3.54 Ga)经历了三期火山活动, 产物以低钛玄武岩为主, 其喷发规模随时间变化逐步减小. 该区域漫长的火山活动历史使其成为研究月球火山作用和热演化的理想区域, 可作为我国未来月球探测任务的备选着陆点.

关键词 Gardner火山区, 地质特征, 火山活动, 月球

PACS: 96.20.Br, 96.20.Dt, 96.20.Ka, 96.30.Bc

1 引言

月球火山区的表面地质特征和深部结构等相关信息是月球地质历史的重要记录, 是研究月球热演化的重要窗口^[1–4]. 月球火山区主要集中在月球正面月海区域, 这些区域保留了丰富的火山地貌, 是研究月球火山活动的重要对象.

Spudis等人^[5]利用月球高分辨率影像数据进行了详细的分析, 总结出月球正面8个大型火山地貌富集区, 其中, 位于月球正面东侧澄海与静海之间的Gardner火山区(16.3°N, 34.1°E; 直径约70 km; 图1)可能为一座大型盾形火山, 但Spudis等人^[5]主要对Gardner区

域进行了简单的形貌学描述, 缺乏对该区域的地形地貌和元素成分等方面的详细研究. 此外, 前人也对该区域开展了初步的研究. Wood等人(2004, <http://www.lpod.org/archive/LPOD-2004-09-26.htm>)认为Gardner区域为“megadome”, 即超级穹窿(图2(a)). Gardner火山区由于其复杂的地形地貌被认为是月球最古老的火山穹窿之一, Wilhelms和McCauley^[6]在阿波罗计划时期的1:5000000月球地质填图中认为该区域主体在雨海纪形成, 但西部也有前雨海纪地层存在, 其北部的Gardner撞击坑可能形成于爱拉托逊纪. 近年来, 对地层交切与叠覆关系的研究发现, Gardner火山区的年龄可能大于3.8 Ga^[5].

引用格式: 王太茂, 赵健楠, 黄倩. 月球Gardner火山区地质特征及其火山活动历史. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 049601

Wang T M, Zhao J N, Huang Q. The Gardner volcanic complex on the Moon: Geological characteristics and its volcanic history (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 049601, doi: [10.1360/SSPMA2018-00275](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00275)

图 1 (网络版彩图)月球正面Gardner及其周边区域地形图(基于LOLA高程数据, 简单圆柱状投影), 其中黑色方框表示Gardner区域

Figure 1 (Color online) Topographic map of the Gardner volcanic complex and surrounding areas (based on LOLA data, simple cylindrical projection). The black box indicates the location of the Gardner region.

Gardner火山区位于月球正面的静海北部边缘, 西邻澄海, 火山区北部与高地相连, 且存在区域内最大的撞击坑Gardner撞击坑, Gardner区域除北部外其余三面被静海环绕. 由于该区域处于澄海、危海与静海交界处, 复杂的地质背景导致Gardner火山区的成因存在广泛争议^[5,7-11], 如撞击成因、火山喷发成因、构造成因以及多种成因共同作用. Wood等人^[7]认为Gardner区域可能未受撞击作用影响, 具备典型的火山建造特征. Tye和Head^[8]认为Gardner区域可能为包括静海及部分澄海、危海、丰富海在内的大型撞击盆地环状构造的组成部分, 受撞击作用影响, 深处熔岩喷发至月表, 形成熔岩高原. 通过对Gardner及其周边区域重力特征的研究, Zhang等人^[9]认为该区域可能由于撞击或撞击作用引起的构造运动(如澄海的形成)诱发岩浆侵入, 导致后期喷发事件. Gardner火山区面积较小(约4800 km²), 且处于Cauchy大型火山区的北部, 因此该区域也曾被认为是Cauchy的寄生盾形火山^[5]. Gardner区域成因的多样性进一步显示了该地区地质过程的复杂性.

本文将综合利用新近获得的高分辨率月球遥感数据, 对Gardner火山区进行详细的地形地貌和月表元素分析, 识别该区域内可能存在的火山构造特征, 并综合这些特征, 对该区域进行详细的地质定年和火山活动期次研究.

2 数据和方法

由于Gardner火山区面积较小, 为了更好地研究该地区的地形地貌特征, 本文采用了分辨率较高的日本“月亮女神(Kaguya)”地形相机(Terrain Camera, TC)影像及其数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据^[12,13]. TC相机成像波段为430–850 nm, 可获得morning, evening和ortho三种太阳高度角的影像, 本文采用morning太阳高度角下的影像(TC Morning Map). TC相机获取的影像数据通过摄影测量方法的解算, 可得到月表数字高程模型(TC DEM), 其影像及DEM数据的分辨率均为10 m^[12,13].

美国月球勘测轨道飞行器搭载的激光高度计

图 2 (网络版彩图) (a) Gardner区域影像图(数据来源为TC Morning Map, 兰勃特投影). 黄色方框表示了本文其他图片所处的位置, 蓝色箭头指向区域内陡崖, 红色方框表示图2(b)–(d)位置. (b) Gardner撞击坑影像图; (c) 区域东部陡崖影像图; (d) 月溪影像图

Figure 2 (Color online) TC Morning Map of the Gardner region (Lambert conformal conic projection). Yellow boxes indicate the locations of other figures in this study. Blue arrows point to the locations of the Gardner plateau. Red boxes indicate the locations of Figures 2(b)–(d). (b) The Gardner Crater in the north of the Gardner volcanic complex; (c) scarps in the east of the Gardner volcanic complex; (d) a rille in the south of the Gardner volcanic complex.

(LOLA)获取的高程数据可以用来进行月球表面地质特征的识别与研究, 其垂向精度最高可达0.1 m, 径向精度达1 m^[14,15]. 本文采用LOLA获取的全月数字高程模型对Gardner区域的地质背景进行分析, 其分辨率为1024像素/度.

月表铁钛元素含量变化及其分布对于了解月壳成分及区域地质演化历史起着至关重要的作用. 美国克莱门汀(Clementine)探测器搭载的紫外-可见光(Ultraviolet and Visible, UVVIS)相机获取的多光谱数据可以用来进行铁钛元素含量反演. Clementine UVVIS数据共包含5个波段, 波长范围在415–1000 nm之间, 其空间分辨率约为200 m^[16]. 本文利用Clementine UVVIS所获取

的多光谱数据, 基于Lucey等人^[17]提出的反演算法, 对Gardner区域的铁钛元素丰度进行反演, 反演算法如下:

$$\text{FeO (wt\%)} = -17.427 \times \arctan[(R_{950}/R_{750} - 1.19)/(R_{750} - 0.08)] - 7.565, \quad (1)$$

$$\text{TiO}_2 \text{ (wt\%)} = 3.708 \times [\arctan(R_{415}/R_{750} - 0.42)/R_{750}]^{5.979}, \quad (2)$$

式中, R_{415} , R_{750} , R_{950} 为光谱数据在415, 750和950 nm波段处的反射率值.

3 Gardner区域地形地貌分析

区域内发育有穹窿、月溪、疑似破火山口等多种火山地貌特征, 以及撞击坑、陡崖、断层等各类地貌类型, 该区域中部发育有明显的具有陡峭边缘的凹陷区域, 本文称之为中央凹陷区(图2(a)和3). 为进一步对Gardner区域地形地貌进行解析, 本文利用Kaguya的DEM数据制作了该区域的高程图(图3).

该区域高程介于–3300–600 m之间, 总体起伏较大, 高出周边地区约1600 m, 最高点位于西部陡崖顶部, 高程约为600 m, 最低点为Gardner撞击坑底部, 约–3300 m. 由中部向四周, 该地区地形呈现明显的低-高-低分布特点, 即中部凹陷区地势较低, 从凹陷区向外, 地势先升高再降低. 同时, 区域西部整体较东部更为陡峭, 且地形较为多样, 可能指示西部区域更为古老, 在漫长的地质演化过程中经历了复杂的改造作用.

在Kaguya TC影像数据的基础上, 结合高程数据, 本文对Gardner火山区包括撞击坑、穹窿、山脊、陡崖和疑似断层等在内的重要地质特征进行了解译.

3.1 撞击坑

区域内存在大量撞击坑, 且多为直径小于1 km的简单碗状撞击坑, 部分撞击坑可观察到明显的退化现象. 区域西部撞击坑密度较大, 退化严重, 可能指示了较老的表面年龄; 东部区域表面相对平坦, 撞击坑发育较少, 其年龄应较年轻. 区域内可见少量呈现不规则形状密集分布的撞击坑群和呈线性分布的链状坑, 它们可能是区域周边较大撞击坑(如区域西北部的Vitruvius撞击坑; 图3)的二次撞击坑.

区域内最大撞击坑为北部的Gardner撞击坑(中心经纬度: 33.8°E, 17.7°N; 图2(b)), 它处于Gardner火山区

图 3 (网络版彩图)区域内穹窿、中央凹陷区分布图。黑色实线表示穹窿范围,黄色方框表示文中其他构造位置。底图为TC DEM叠加在TC影像数据上合成(兰勃特投影)

Figure 3 (Color online) Distribution of domes and the central depression identified in this study. Black lines indicate domes. Yellow boxes indicate the locations of other features in this study. The background is the TC Morning Map overlaid by TC DEM data (Lambert conformal conic projection).

的北部边缘,且与高地相连,地势西北低,西南高,两者高程相差约500 m,这表明该撞击坑可能形成于北部高地与南部Gardner火山区的交界处。在月球表面由简单撞击坑转变为复杂撞击坑的过渡直径一般在10–20 km之间^[4,18], Gardner撞击坑直径约为25 km,处于月球简单-复杂撞击坑过渡直径附近,因此该撞击坑形态上已显示出复杂撞击坑的部分特点,在其底部可见隆起区域,隆起高度约100 m,很可能为小型的中央隆起。

3.2 陡崖与山脊

陡崖主要分布在区域的東西两侧边缘与中央凹陷区的边缘(图2(a))。中央凹陷区陡崖以南北两侧最为明显,其坡度变化较大(6°–12°),北部陡崖沿北东向延伸约17 km,高差约为300 m,南部陡崖沿南西向延伸约14 km,高差约为200 m。中央凹陷区的陡崖将该区域与四周隔开而呈不规则多边形(图2(a)和3),该区域长约11 km,宽约21 km,区域内部地形相对平坦,低于周

围地表平均约200 m。中央凹陷区以西的区域表面较为粗糙,撞击坑密度较大,而东部区域表面较为光滑,撞击坑密度相对较小。

与中央凹陷区陡崖相比,东西两侧陡崖坡度更大,西侧陡崖约为13°–19°,由Gardner区域向月海倾斜,陡崖平均高差约1200 m(图4(a)和(c))。西侧坡面较为光滑未见明显的撞击坑,可能是由坡面物质崩塌移动所致。东侧陡崖平均坡度约为18°,但与西侧陡崖相比,东侧陡崖坡面延伸较短,陡崖高程差也较小,约为150–500 m,坡面同样较为光滑(图2(c))。鉴于陡崖坡面的特殊性,本文推测东西两侧陡崖的形成应与撞击事件有关。

区域内山脊主要集中在西部边缘地区,沿区域边缘随机分布,走向不一,长度为12–16 km,宽度为3–5 km。由于区域西侧部分山脊与陡崖共生,导致山脊顶部与周围地表的高差最高可达1.6 km。

3.3 其他线性构造

区域内线性构造除山脊、陡崖外,主要有月溪和疑似断层。与月球表面的Marius Hills等火山区域相比^[19], Gardner火山区月溪分布较少,在区域的南部边缘发育有一窄而短的小型月溪,宽约250 m,长约3.5 km(图2(d))。区域西南部发育一条曲折延伸的线性凹陷(图4(b)),长约25 km,宽度0.7–2 km不等,深度约为50 m(图4(d)和(e))。该线性构造由中央凹陷沿南西向延伸,在其中部向西转折延伸约4 km,接着沿南西向延伸至静海边缘。该构造左侧高度明显高于右侧(图4(d)和(e)),地形较为陡峭,且相对于月溪而言弯曲度较小,结合该区域的地质背景,本文推测其可能为断层构造。

3.4 穹窿

Gardner火山区及其周边月海区域有多处火山穹窿发育,研究人员^[5,8]已在研究区域附近开展了初步的火山穹窿识别工作,但受到高分辨率影像覆盖范围的限制,对穹窿的识别与形貌特征研究仍不完善。本文利用高分辨率影像及DEM数据,结合以前的研究成果,在Gardner火山区附近共识别出4座穹窿(图3)。穹窿形态大部分呈圆-椭圆型,其规模大小由1.8 km×2.0 km至5.3 km×5.8 km,穹窿高度从80–800 m不等。区域内已识别穹窿多分布于边缘,中部较少发育,穹窿侧面坡度为3°–18°,根据前人对穹窿的划分标

图 4 (网络版彩图) (a) 区域西侧山脊(陡崖)影像图. (b) 疑似断层影像图. (c)–(e)为沿AA', BB'和CC'方向剖面图. 数据来源为 TC Morning Map (简单圆柱状投影)
Figure 4 (Color online) (a) Massif (scarp) in the west margin of the Gardner volcanic complex. (b) A possible fault in the Gardner volcanic complex. The topographic profiles along the transects AA', BB', and CC' marked in (a) and (b) are shown in (c)–(e). All the TC Morning Maps in Figure 4 are presented in simple cylindrical projection.

准^[20,21], 可分为陡峭型穹窿和低缓型穹窿, 其中陡峭型穹窿3座(侧面坡度 $>5^{\circ}$), 低缓型穹窿1座(侧面坡度 $<5^{\circ}$), 具体参数见表1.

区域内穹窿一般缺少顶部凹陷及流动构造等常见的喷出型穹窿特征^[22], 仅区域东部低缓型穹窿可见顶部凹陷(图5(a)). 该穹窿大致呈椭圆形, 底部直径约为4 km, 高约100 m, 地形平缓, 侧面坡度约为 3° , 其顶部凹陷直径约600 m, 深度约为40 m(图5(b)), 二者规模大致在“基座直径-顶部凹陷直径”趋势线上, 符合Head和Gifford^[20]对穹窿分类标准中的第一类. 由于该穹窿顶部凹陷所处的特殊位置及其异常的深度/直径比值

(1/15), 本文认为其可能为穹窿顶部的破火山口.

4 铁钛元素丰度反演

铁钛元素含量对于判断岩石类型、区分岩浆活动期次和划分月表地质单元具有重要意义. 鉴于此, 本文利用Clementine UVVIS数据进行反演^[17,23,24]得到该区域的铁钛元素丰度图(图6). 从铁钛元素丰度图中可以看出, Gardner大部分区域FeO含量为11–17 wt%, 平均含量约为14 wt%(图6(a)); Gardner火山区95%以上区域TiO₂含量在1–3 wt%之间, 平均含量约为1 wt%(图6(b)); 区域南部的静海区域铁元素含量约为18 wt%, 钛含量约为6 wt%; 区域北部的高地部分铁含量约为12 wt%, 钛含量约为0–1 wt%. 与周围区域相比, Gardner火山区铁钛元素含量明显低于其南部的静海区域而高于北部的高地区域, 按照Giguere等人^[25]对月球玄武岩的划分标准, Gardner火山区玄武岩属于低钛玄武岩.

Gardner火山区局部地区的铁钛含量也表现出一定的变化. 区域南部的铁钛含量变化较大, 且在东南部与相邻的静海表面具有相近的铁钛含量. 位于区域西

表 1 Gardner区域穹窿参数表

Table 1 Parameters of the domes on the Gardner volcanic complex and surrounding areas

编号	经度(E)	纬度(N)	规模(km)	高度(m)	坡度($^{\circ}$)	类型
1	32.48 $^{\circ}$	16.01 $^{\circ}$	5.3 $\times$ 5.8	800	17.7	陡峭
2	32.59 $^{\circ}$	15.70 $^{\circ}$	2.4 $\times$ 2.8	180	10.2	陡峭
3	35.36 $^{\circ}$	15.36 $^{\circ}$	1.8 $\times$ 2.0	90	5.7	陡峭
4	34.36 $^{\circ}$	15.55 $^{\circ}$	3.2 $\times$ 4.5	80	2.9	低缓

图 5 (网络版彩图) (a) 典型穹窿及其顶部凹陷(参见图3和表1中的编号4), 底图为TC DEM叠加在TC影像数据上合成, 简单圆柱状投影. (b) (a)中沿AA'方向剖面图

Figure 5 (Color online) (a) TC-based topographic map for the number 4 dome indicated in Figure 3 and Table 1 (simple cylindrical projection). (b) Topographic profile along AA' in (a).

图 6 (网络版彩图) (a)和(b)为Gardner火山区铁钛元素丰度图(兰勃特投影). 黑色虚线为Gardner火山区轮廓线, 白色虚线为各分区界线, 黑色多边形内为撞击坑统计定年范围, 白色方框内为Gardner撞击坑

Figure 6 (Color online) (a) FeO and (b) TiO₂ abundance maps of the Gardner volcanic complex (Lambert conformal conic projection). The black dotted lines indicate the boundary of the Gardner region. The white dotted lines indicate the boundary of different geological units defined by compositional variation. Crater size-frequency distribution measurements were performed within the areas surrounded by the black solid polygons. The white box indicates the location of the Gardner Crater.

北部的Gardner撞击坑的内壁及溅射物的不同位置显示出较大的铁钛含量差异, 其西北部表现出低铁低钛的特点, 铁含量在8 wt%左右, 而东南部的铁含量可达18 wt%, 钛含量也较西北部更高. 这可能是因为Gardner撞击坑位于高地与Gardner火山区的交界处, 因而其西北部显示出高地物质的铁钛特征, 而东南部则显示了Gardner火山区内玄武岩的铁钛特征. 此外, 撞击坑内壁上的高铁特征与Gardner火山区北部表面的低铁性质存在明显的差异, 这可能是由于Gardner区域表面

被来自于高地的溅射物覆盖, 或该区域经历了多期的火山活动, 也可能为岩浆在上升过程中混染了月壳成分导致元素含量异常^[5,9]. 根据铁钛元素含量的分布, 结合地形地貌特征, 本文认为Gardner火山区的原始范围如图6所示.

5 撞击坑统计定年

地质年龄是研究地质演化历史的基础, Neukum等

人^[26]将撞击坑直径-频率测量结果与月球岩石样品的放射性同位素年龄相结合, 提出了通过撞击坑统计以获得月球表面绝对模式年龄的方法. 本文即采用撞击坑直径-频率分布定年方法对研究区域的绝对模式年龄进行了确定.

由于不同期次火山活动的元素成分、地形地貌等地质特征存在差异, 本文依据区域铁钛元素含量、撞击坑密度及形貌特征等^[27], 在Gardner火山区表面划分出3个不同的分区(图6). A区铁钛元素含量较高, 地形陡峭, 撞击坑密集且退化严重; B区呈现低铁低钛的元素分布特征, 地形相对平坦; C区地形平坦, 铁钛含量比A和B区高.

本文采用Kaguya的月表影像数据TC Morning Map, 在各分区内选取地形较为平坦且二次撞击坑分布较少的匀质区域^[28]进行了撞击坑统计定年, 其原理主要基于 Neukum等人^[29,30]提出的撞击坑产生函数和年代学曲线. 为了提高定年结果的可靠性, 在统计过程中尽可能避开了如山脊、月溪等地形较复杂的区域, 并且将密集分布的撞击坑群或撞击坑链排除在外^[18,31]. 统计区域及定年拟合结果如图6和7以及表2所示. R1-R3为A, B和C区域内选取的撞击坑统计定年范围. 其中, B区由于受撞击坑及地貌等因素影响地形复杂, 导致适合进行撞击坑统计定年的区域范围较小.

定年结果显示, A-C区域的定年结果依次为3.90, 3.67, 3.54 Ga. Gardner火山区最古老的地区为A区域, 年龄为3.90 Ga, 最年轻的地区为C区域, 年龄为

3.54 Ga, 这表明该区域在3.90–3.54 Ga之间经历了多期的地质活动.

6 讨论: 区域火山活动历史

Gardner火山区多样的火山地貌、变化的铁钛元素丰度以及不同的年龄分区都指示该区域经历了复杂的火山活动历史. 区域定年结果表明, Gardner区域表面年龄在3.90–3.54 Ga之间, 年代跨度从酒海纪晚期至雨海纪, 表明该区域具有漫长的火山活动历史, 经历了多期火山作用. 区域内A区代表了3.90 Ga左右发生的最早期的火山活动, 该期火山活动形成的玄武岩主要出露在区域西南部, 以相对较高的铁钛元素丰度为特征. 随后, 在3.67 Ga左右, 区域内发生了第二期大规模火山活动, 覆盖了Gardner火山高原除西南部外的大部分区域(B区), 该期火山活动形成的玄武岩具有区域内最低的铁钛元素丰度. C区域代表了发生在3.54 Ga左右的第三期火山活动, 该期火山活动范围相对较小, 主要位于区域东南部. 该期次的玄武岩具有Gardner区域相对最高的铁钛元素丰度, 但元素丰度的分布并不均匀, 在空间上存在一定的变化, 可能是受到下伏的第二期次玄武岩以及研究区域周围月海玄武岩的影响.

根据定年结果, 第二期与第三期火山活动时间相隔较短(0.13 Ga), 由于存在一定的定年误差, 因而二者有可能为同期火山作用的产物. 但是, 雨海纪

图7 Gardner火山区撞击坑统计定年结果图, (a)–(c)分别为图6中A–C区域定年结果

Figure 7 (a)–(c) Absolute model ages of the plateau-forming units (A–C in Figure 6) on the Gardner volcanic complex.

表 2 各区域撞击坑统计定年结果**Table 2** Dating results of the three geological units in the Gardner volcanic complex

区域	面积(km ²)	撞击坑总数	累积分布频率(km ⁻²)	定年结果(Ga)
R1	285.702	55	0.0332	$3.90^{+0.032}_{-0.040}$
R2	70.976	23	0.00903	$3.67^{+0.044}_{-0.063}$
R3	249.043	97	0.00549	$3.54^{+0.027}_{-0.034}$

(3.85–3.2 Ga)为月球火山活动规模最大的时期, 频繁的火山活动可导致同一区域内发生多期时间相隔较近的岩浆喷发作用, 如静海与虹湾地区^[27,31,32]. 同时, 两期火山活动的铁钛元素含量差异相对明显, 高于Lucey等人^[17]提出的1.29 wt%(FeO)与1.00 wt%(TiO₂)数据误差项, 排除了数据本身对区域划分的影响. 因此, 综合地质特征与定年结果, 本文认为第二期与第三期火山活动为两次独立的地质事件.

多期次的火山活动喷发出大量的熔岩, 导致了Gardner火山高原的形成. Huang等人^[33]利用高分辨率重力和地形数据对包括Gardner在内的8个火山穹窿区域进行了反演计算, 得到该区域的壳密度与布格重力异常. 经计算, Gardner区域壳密度为3060 kg m⁻³, 明显高于高地的月亮密度2550 kg m⁻³^[34], 表明该区域的壳密度较高, Gardner区域被高密度的火山物质充填. Gardner区域的布格重力异常显示正异常特征, 表明区域下部具有高密度物质, 即可能存在冷凝的岩浆房或岩床. Gardner火山区的重力与密度特征表明该区域岩浆可能侵入月壳后通过火山通道喷发至月表^[35].

结合Gardner火山区的地形地貌特点, 本文对不同期次岩浆的喷出形式进行了推断. 第一期的火山活动由于较为古老, 多被后期的玄武岩覆盖, 因此难以判断其喷发形式. 第二期火山活动中形成了环绕中央凹陷分布的玄武岩区, 而中央凹陷位于区域顶部中心, 边缘陡峭且不规则, 与撞击成因的凹陷存在明显差异. 与周边区域相比, 中央凹陷呈现明显的塌陷负地形特征, 与地球破火山口具有相似的特征^[36,37], 因而很可能同样为破火山口, 且是第二期火山活动中岩浆的主

要喷出通道. 第三期火山活动范围较小, 其分布区不与中央凹陷相连. 但是, 区域内西北部海拔较高处存在一座火山穹窿(图3), 因而该期岩浆很可能是经火山穹窿喷出, 并覆盖了穹窿周围及东南部海拔较低的区域.

综上所述, 研究区域经历了从酒海纪至雨海纪的3个期次的火山活动, 其喷发形式从早期的中心式大规模喷发转变为晚期的小规模穹窿式喷发.

7 结论

本文利用现有的高分辨率月球影像数据、地形数据以及多光谱数据, 对Gardner区域的地形地貌、铁钛元素丰度、地质定年等进行了较为详细的解译与分析, 并对其火山活动进行了一定的探讨. 本文主要结论如下:

(1) Gardner火山区高出周边区域约1.6 km, 区域内地形复杂, 发育有穹窿、月溪、疑似破火山口等众多火山形貌. 表面撞击作用发育, 部分撞击坑有明显退化现象, 说明该区域受火山活动影响显著且年龄较老, 是进行月球火山活动研究的理想区域.

(2) Gardner区域岩性以低钛玄武岩为主, 铁钛元素丰度及定年结果显示该区域经历了三期火山活动, 活动时间在3.90–3.54 Ga之间, 年代跨度从酒海纪晚期至雨海纪, 且随时间变化火山活动呈现由大规模喷发到局部喷发的特点.

(3) Gardner区域中央凹陷区可能发育有塌陷的火山口, 该火山口被周边三期玄武岩所环绕. 密度及深部重力特征显示该区域被高密度火山物质充填且下伏有致密岩浆房, 岩浆可能通过火山通道喷发至月表.

Gardner火山区复杂多样的火山地貌特征、漫长的火山活动历史使其成为研究月球火山作用的理想对象. 因而, 本文建议该区域可作为未来登月探测及取样的备选着陆点. 通过对该区域不同地质单元的样品进行采集和分析, 将可获得月球不同地质历史时期的岩浆特征信息, 为了解月球的热演化历史提供有力的支撑^[21,32,38,39].

致谢 感谢USGS和JAXA提供的月球探测遥感数据.

参考文献

- 1 Ouyang Z Y. Introduction to Lunar Science (in Chinese). Beijing: China Aerospace Publishing House, 2005 [欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005]
- 2 Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, et al. New Views of the Moon. Chantilly V A: Mineralogical Society of America, 2006
- 3 Xu Y G. Mare basalts and lunar evolution (in Chinese). *Geochimica*, 2010, 39: 50–62 [徐义刚. 月海玄武岩与月球演化. *地球化学*, 2010, 39: 50–62]
- 4 Xiao L. Planetary Geology (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2013 [肖龙. 行星地质学. 北京: 地质出版社, 2013]
- 5 Spudis P D, McGovern P J, Kiefer W S. Large shield volcanoes on the Moon. *J Geophys Res Planets*, 2013, 118: 1063–1081
- 6 Wilhelms D E, McCauley J F. Geologic map of the near side of the Moon (Map I-703). Denver: US Geological Survey, 1971
- 7 Wood C A, Higgins W, Pau K C, et al. The Lamont-Gardner megadome alignment: A Lunar volcano-tectonic structure? In: 36th Lunar and Planetary Science Conference. Texas: Lunar and Planetary Institute, 2005. #1116
- 8 Tye A R, Head J W. Mare Tranquillitatis: Distribution of mare domes, relation to broad mare rise, and evidence of a previously unrecognized basin from LOLA altimetric data. In: 44th Lunar and Planetary Science Conference. Texas: Lunar and Planetary Institute, 2013. #1319
- 9 Zhang F, Zhu M H, Bugiolacchi R, et al. Diversity of basaltic lunar volcanism associated with buried impact structures: Implications for intrusive and extrusive events. *Icarus*, 2018, 307: 216–234
- 10 Michaut C, Pinel V. Magma ascent and eruption triggered by cratering on the Moon. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 6408–6416
- 11 Evans A J, Soderblom J M, Andrews-Hanna J C, et al. Identification of buried lunar impact craters from GRAIL data and implications for the nearside maria. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 2445–2455
- 12 Haruyama J, Matsunaga T, Ohtake M, et al. Global lunar-surface mapping experiment using the Lunar Imager/Spectrometer on SELENE. *Earth Planet Sp*, 2008, 60: 243–255
- 13 Haruyama J, Hara S, Hioki K, et al. Lunar global digital terrain model dataset produced from SELENE (Kaguya) terrain camera stereo observations. In: 43th Lunar and Planetary Science Conference. Texas: Lunar and Planetary Institute, 2012. #1200
- 14 Smith D E, Zuber M T, Jackson G B, et al. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the lunar reconnaissance orbiter mission. *Space Sci Rev*, 2010, 150: 209–241
- 15 Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA). *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L18204
- 16 Nozette S, Rustan P, Pleasance L P, et al. The Clementine mission to the Moon: Scientific overview. *Science*, 1994, 266: 1835–1839
- 17 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 Geophys Res*, 2000, 105: 20297–20305
- 18 Melosh H J. Impact Cratering: A Geologic Process. New York: Oxford University Press, 1989
- 19 Greeley R. Lava tubes and channels in the lunar Marius Hills. *Moon*, 1971, 3: 289–314
- 20 Head J W, Gifford A. Lunar mare domes: Classification and modes of origin. *Moon Planets*, 1980, 22: 235–258
- 21 Zhao J N, 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 Geophys Res Planets*, 2017, 122: 1419–1442
- 22 Huang J, Xiao L, He X, et al. Geological characteristics and model ages of Marius Hills on the Moon. *J Earth Sci*, 2011, 22: 601–609
- 23 Lucey P G, Blewett D T, Hawke B R. Mapping the FeO and TiO₂ content of the lunar surface with multispectral imagery. *J Geophys Res*, 1998, 103: 3679–3699
- 24 Gillis J J, Jolliff B L, Elphic R C. A revised algorithm for calculating TiO₂ from Clementine UVVIS data: A synthesis of rock, soil, and remotely sensed TiO₂ concentrations. *J Geophys Res*, 2003, 108: 5009
- 25 Giguere T A, Taylor G J, Hawke B R, et al. The titanium contents of lunar mare basalts. *Meteoritics Planet Sci*, 2000, 35: 193–200
- 26 Neukum G, Koenig B, Fechtig H, et al. Cratering in the Earth-Moon system—Consequences for age determination by crater counting. In: 6th Lunar and Planetary Science Conference. New York: Lunar and Planetary Institute, 1975. 2597–2620
- 27 Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G, et al. Ages of mare basalts on the lunar nearside. *J Geophys Res*, 2000, 105: 29239–29275
- 28 Shirley K A, Zanetti M, Jolliff B, et al. Crater size-frequency distribution measurements and age of the Compton-Belkovich volcanic complex.

- [Icarus](#), 2016, 273: 214–223
- 29 Neukum G, Ivanov B A, Hartmann W K. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. [Space Sci Rev](#), 2001, 96: 55–86
- 30 Michael G G, Neukum G. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Partial resurfacing events and statistical age uncertainty. [Earth Planet Sci Lett](#), 2010, 294: 223–229
- 31 Zhao J N, Huang J, Xiao L, et al. Crater size-frequency distribution measurements and age determination of sinus Iridum (in Chinese). *Earth Sci-J China Univ Geosci*, 2013, 38: 351–361 [赵健楠, 黄俊, 肖龙, 等. 撞击坑统计定年法及对月球虹湾地区的定年结果. *地球科学*, 2013, 38: 351–361]
- 32 Qiao L, Xiao L, Zhao J N, et al. Geological features and magmatic activities history of sinus Iridum, the Moon (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2013, 43: 1370–1386 [乔乐, 肖龙, 赵健楠, 等. 月球虹湾地区地质特征解译及岩浆活动历史研究. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43: 1370–1386]
- 33 Huang Q, Xiao Z, Xiao L. Subsurface structures of large volcanic complexes on the nearside of the Moon: A view from GRAIL gravity. [Icarus](#), 2014, 243: 48–57
- 34 Wicczorek M A, Neumann G A, Nimmo F, et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL. [Science](#), 2013, 339: 671–675
- 35 Huang Q, Xiao L, Ping J S, et al. Density and lithospheric thickness of the Marius Hills shield volcano on the Moon (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2013, 43: 1395–1402 [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. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43: 1395–1402]
- 36 Charles F. *Volcanoes of the Solar System*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996
- 37 Rosaly M C, Tracy K P. *Volcanic Worlds—Exploring the Solar System’s Volcanoes*. Chichester: Praxis, 2004
- 38 Xiao L, Qiao L, Xiao Z Y, et al. Major scientific objectives and candidate landing sites suggested for future lunar explorations (in Chinese). [Sci Sin-Phys Mech Astron](#), 2016, 46: 029602 [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. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 029602]
- 39 Qian Y Q, Xiao L, Zhao S Y, et al. Geology and scientific significance of the Rümker region in Northern Oceanus Procellarum: China’s Chang’E-5 landing region. [J Geophys Res Planets](#), 2018, 123: 1407–1430

The Gardner volcanic complex on the Moon: Geological characteristics and its volcanic history

WANG TaiMao¹, ZHAO JianNan¹ & HUANG Qian^{2*}

¹ Planetary Science Institute, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

² Hubei Subsurface Multi-scale Imaging Key Laboratory, Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Lunar volcanic complexes are prominent features with a high concentration of various volcanic characteristics. They are ideal objects to study the lunar nearside volcanic activity and its thermal evolution. The Gardner volcanic complex is located in the nearside of the Moon, between Mare Serenitatis and Mare Tranquillitatis. It has a series of volcanic features, such as domes and rilles, which make it an ideal object to study the lunar volcanic history. In this study, we make use of recent high-resolution lunar images (Terrain Camera, TC) and multispectral data (Clementine UVVIS) to study the topography, geomorphologic features, iron and titanium contents, and the geochronology of the Gardner volcanic complex. We identified and analyzed different geomorphologic features, such as impact craters, domes, massifs, scarps, and a suspected fault. Spectral analyses indicated that the Gardner region is covered by low-Ti basalt. Absolute model ages of the different units in the Gardner region were obtained using crater size-frequency distribution (CSFD) measurement. The results show that Gardner may have experienced three periods of volcanic activities, which were aged between Nectarian and Imbrium. The volcanic eruption may decrease with time. The relatively high crustal density and the positive Bouguer gravity anomaly of Gardner show that the Gardner volcanic complex is composed of dense volcanic materials on the surface and in the subsurface. An irregular steep-sided depression is located in the central area of the Gardner plateau, which is different from the depression caused by impacting. We suggest that this depression could be a caldera and is once a possible vent responsible for the emplacement of surrounding lava flows. The long history of volcanic activities in this region makes it an ideal area to study the lunar nearside volcanism and thermal evolution, and we suggest it as a candidate landing site for China's future lunar exploration missions.

Gardner volcanic complex, geological characteristic, volcanic activity, Moon

PACS: 96.20.Br, 96.20.Dt, 96.20.Ka, 96.30.Bc

doi: [10.1360/SSPMA2018-00275](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00275)