

月球静海环形凹陷穹丘的微波雷达散射特征分析

高强山^① 张锋^{*①} 党亚南^② 梁莉婷^① 牛胜利^① 殷浩林^{①③} 苏子昂^{①③}

^①(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

^②(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 环形凹陷穹丘(RMDS)是发育于月海玄武岩表面的一类小型穹隆构造。其平均高度仅3~4 m, 直径约200 m, 形态低缓; 因其数量巨大, 已成为理解月球火山活动与岩浆热力学行为的重要研究对象。尽管光学遥感观测结果支持RMDSs的火山作用成因机制, 但仍有学者提出了其他可能性。因此, 其成因的确证仍需更多地质证据的支撑。微波雷达因其穿透性而具备探测月面次表层结构与物理特性的独特优势, 然而截至目前, 针对RMDSs微波雷达散射特征的研究仍处于空白。该文重点利用星载雷达微型射频频仪(Mini-RF)和地基雷达阿雷西博(Arecibo)的S波段(波长12.6 cm)数据, 以静海盆地月海表面一RMDSs密集分布区为研究区, 开展其雷达后向散射功率和圆极化率(CPR)等特征分析。结果显示: (1) RMDSs以低后向散射功率为基本特征, 这与泡沫岩浆成因理论预测的雷达弱散射特征高度吻合。该理论认为, RMDSs表面约2~3 m深度范围内覆盖的亚毫米级细粒物质, 是导致其呈现低强度雷达散射回波的主要原因; (2) 受撞击作用、地形起伏及物质坡移等因素的影响, 部分RMDSs局部区域表现出不同程度的后向散射增强特征, 但长期风化会弱化这一特征; (3) RMDSs的雷达散射系数及CPR均值统计结果均与火山碎屑堆积物高度接近, 这表明二者的表面物理性质相似, 其表面物质颗粒尺度应与以微米至毫米级细颗粒为主的火山碎屑物相当。上述研究进一步证实, 多波段、高分辨率、多极化雷达数据能够为RMDSs的精细化研究提供更丰富的地质证据。这不仅深化了对RMDSs形成与演化机制的认识, 同时也为后续月表火山地貌的微波遥感探测研究提供了有价值的参考。

关键词: 环形凹陷穹丘; 微波雷达; 月海玄武岩; 火山作用; 月球

中图分类号: P184

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2026)x-0001-17

DOI: 10.12000/JR25193

CSTR: 32380.14.JR25193

引用格式: 高强山, 张锋, 党亚南, 等. 月球静海环形凹陷穹丘的微波雷达散射特征分析[J]. 雷达学报(中英文), 待出版. doi: 10.12000/JR25193.

Reference format: GAO Qiangshan, ZHANG Feng, DANG Yanan, *et al.* Microwave radar scattering characteristics of ring-moat dome structures in mare tranquillitatis on the moon[J]. *Journal of Radars*, in press. doi: 10.12000/JR25193.

Microwave Radar Scattering Characteristics of Ring-Moat Dome Structures in Mare Tranquillitatis on the Moon

GAO Qiangshan^① ZHANG Feng^{*①} DANG Yanan^② LIANG Liting^①
NIU Shengli^① YIN Haolin^{①③} SU Ziang^{①③}

^①(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

收稿日期: 2025-09-29; 改回日期: ; 网络出版: 2026-xx-xx

*通信作者: 张锋 zhangfeng@nssc.ac.cn *Corresponding Author: ZHANG Feng, zhangfeng@nssc.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62495034, 12273044, 12303065)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62495034, 12273044, 12303065)

责任主编: 陆萍萍 Corresponding Editor: LU Pingping

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

③(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The ring-moat dome structure (RMDS) is a small-scale domical landform that develops on the lunar mare basalt surface. With an average height of only 3–4 m and a mean diameter of approximately 200 m, these features display a low-relief morphology. Owing to their abundance, RMDSs have become an important subject for understanding lunar volcanic activity and magmatic thermodynamic processes. Although optical remote sensing observations support a volcanic origin for RMDSs, alternative hypotheses have been proposed. Therefore, confirming their genesis requires further geological evidence. Microwave radar provides a distinct advantage in probing the subsurface structure and physical properties of the Moon owing to its penetrative capability. However, to date, no studies have examined the microwave radar scattering characteristics of RMDSs. This paper therefore analyzes the radar backscatter power and circular polarization ratio (CPR) characteristics of RMDSs using S-band (12.6 cm wavelength) data acquired by the spaceborne Miniature Radio Frequency (Mini-RF) instrument and the ground-based Arecibo radar. The study area is a region densely populated with RMDSs on the mare surface within the Mare Tranquillitatis basin. The results indicate the following: 1) RMDSs exhibit low backscatter power, which is highly consistent with the weak radar scattering predicted by the foamy magma genetic model. According to this model, the primary cause of the low-intensity radar echo is the presence of submillimeter-scale fine-grained materials within the uppermost $\sim 2\text{--}3$ m depth range. 2) Influenced by impact cratering, topographic variations, and mass wasting, some RMDSs display localized enhancement of backscatter to varying degrees; however, prolonged space weathering diminishes this effect. 3) The mean statistical values of the radar backscatter coefficient and the CPR for RMDSs are remarkably close to those of pyroclastic deposits, indicating that their surface physical properties are analogous and that the particle size of their surface materials should be comparable to those of pyroclastic materials, which are predominantly fine-grained particles in the micrometer-to-millimeter range. These findings further confirm that multiband, high-resolution, and multipolarization radar data can yield richer geological evidence for the detailed investigation of RMDSs. This not only deepens the understanding of RMDS formation and evolutionary mechanisms but also provides a valuable reference for future microwave remote sensing exploration of lunar volcanic landforms.

Key words: Ring Moat Dome Structure (RMDS); Microwave radar; Mare basalt; Volcanism; The Moon

1 引言

火山作用是月球形成与演化过程中的重要内动力地质作用,是月球内部物质迁移与能量转化的关键体现,对塑造月表形貌及内部圈层结构具有深远影响。揭示月球火山作用不仅有助于追溯其热演化历史,也能为理解太阳系其他石质天体的形成与演化提供重要启示^[1–4]。月球火山作用最具代表性的产物之一,便是覆盖月表约18%的暗色调熔岩平原——月海^[5]。它们由月幔部分熔融产生的岩浆喷出月表后,在大型撞击盆地及其周边洼地中聚集冷凝而成。

月海表面发育多种火山地貌,其中一类数量最多、分布最广泛的小型火山地貌,近年来成为月球科学研究的热点。这类地貌的显著特征为:穹隆状熔岩丘的外缘被沟渠状的负地形所环绕。早在20世纪70年代,阿波罗任务获取的少量高清影像中便首次记录到此类地貌,并推测其为爱拉托逊纪晚期(约32~10亿年前)月海玄武岩侵位后的残留物^[6,7]。然而,此后的1977至2016年(近40年间隔),相关研

究几乎处于停滞状态。直至2017年,Zhang等人^[8]基于月球勘测轨道器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)获取的高分辨率影像数据,在月球正面一月海内发现该类地貌的密集分布区,并首次将其命名为“环形凹陷穹丘”(Ring-moat Dome Structure, RMDS)。随后,研究人员在几个月海中识别出超过8000个RMDSs^[9]。通过对大量样本的形貌参数测量, RMDSs的基本特征得以揭示:平均直径约200 m,最大超过1000 m;高度一般不超过20 m,均值仅3~4 m;地形坡度通常低于5°,而环形凹陷处可达10°;环绕凹陷的宽度为数十至200 m不等,深度则普遍仅数米。

随着研究的持续深入^[8–13], RMDSs已成为当前月球科学研究的热点之一^[14],并得到广泛报道^[1,4,15–21]。关于其成因机制,学界存在多种观点。Schultz等人^[7]最早推测, RMDSs可能是后期熔岩流包围的火山喷口及其喷出物堆积形成的,是熔岩流侵位并冷却固化后保留下来的一种表面形貌。在此基础上,Zhang等人^[8]结合月球表面低重力、近

真空的环境特征、对月球火山喷发机制的认识^[22,23]，以及地球溢流玄武岩区火山地貌与岩浆膨胀增生过程^[24,25]的类比分析^[9]，提出了泡沫岩浆成因理论模型^[12]。该模型认为，RMDSs形成于岩浆流动过程中一系列复杂的物理化学过程：熔岩流表面因辐射散热而快速冷凝成壳→结壳保温下的内部岩浆继续流动→晚期富含挥发分岩浆的注入→内部岩浆缓慢冷却、结晶→挥发分饱和、出溶并引起增压→冲破上覆岩壳→因内部减压促使岩浆泡沫化并溢出→质量加载导致地形压降，从而形成环形凹陷。此外，也有学者提出了浅部岩浆侵入模型^[26]和月壤的月震诱发球形聚集模型^[14]。然而，这些模型目前仍停留在假想阶段，缺乏地球物理模型的约束与验证。

RMDSs的形成年龄目前仍存在较大争议。含RMDSs的月海玄武岩单元撞击坑统计绝对模式年龄显示，其时间跨度介于距今10亿年至40亿年之间^[27]。按照常理，若RMDSs与其所在玄武岩单元同期形成，二者应具有一致的年龄。然而，Zhang等人^[10]发现部分RMDSs与直径<300 m的小型撞击坑存在叠加关系。对这些小型撞击坑的形貌年代学研究表明，其形成年龄可能在距今10亿年以内，暗示叠加其上的RMDSs也应该形成于该时期。若此推论成立，则意味着月球在距今10亿年内仍可能存在火山活动^[10]。

另一方面，平均年龄约35亿年的月海玄武岩单元表层普遍发育一层厚度约4~5米的月壤^[28]（即月表风化层）。成壤过程理论上应已破坏该厚度范围内的原始地貌，而RMDSs的平均高度约3~4 m，正处于这一破坏范围之内。然而，实际观测到的许多RMDSs却保存了清晰的形态与鲜明的轮廓。综上，若“泡沫岩浆”成因模型^[8,12]成立，则RMDSs年龄“理应较老”与观测所见的“似乎年轻”之间的矛盾，至今仍未得到合理解释^[10]。

尽管利用可见光学影像、紫外-红外光谱、地形数据等多源遥感数据，已对RMDSs取得上述系列研究成果，但截至目前，基于微波遥感的RMDSs散射特征研究仍属空白。根据泡沫岩浆成因理论，RMDSs形成初期表面覆盖一层约2~3米厚的亚毫米级玻璃质原始风化层，因此其雷达回波应表现为低后向散射强度^[12,29]。当前，地基雷达（如Arecibo）与星载雷达（如Mini-RF）的观测数据已覆盖月海绝大部分区域^[30,31]，月球合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）图像也已在月球火山科学领域得到广泛应用^[31-33]，包括月海玄武岩单元识别与火山活动历史研究^[34]、大型火山复合体综合研究^[35]、火山碎屑岩物理特性分析^[36]等。相较于紫

外-红外光谱波段，雷达的主要优势在于对风化层的穿透能力。雷达回波通常包含一定深度的次表层信息，穿透深度一般为雷达波长的10~20倍^[37]。这一特性有望为RMDSs相关争议问题的解决提供更多地质证据，特别是在形貌特征、次表层结构与物理特性等方面^[38]。

本研究基于已有的地基与星载雷达数据，以静海盆地RMDSs为研究对象，开展以下工作：（1）分析并归纳RMDSs的微波散射特征，挖掘其深层次结构与物理特性信息；（2）验证泡沫岩浆成因理论对雷达散射特征的预测结果；（3）为RMDSs形成与演化研究提供更多有价值的观测证据，并为未来月表雷达观测任务方案设计提供参考。

2 研究区地质背景

静海(Mare Tranquillitatis)位于月球正面东部，其形成时间可能追溯至前酒海纪^[39]，阿波罗11号登月舱曾在其西南部着陆。与其他质量瘤盆地不同，静海盆地（中心坐标：0.7°N, 23.4°E）的地理中心不存在重力异常，加之不规则的地形与边界轮廓，使其成为一个缺乏清晰环状结构的撞击盆地^[40]。静海盆地大部分区域被高钛玄武岩覆盖（TiO₂含量 > 6.0 wt.%）^[41,42]，可能源自月球岩浆洋(Lunar Magma Ocean, LMO)晚期冷却与岩浆分异形成的高钛铁矿地幔源区^[43]。上述特征使静海盆地成为研究月海填充过程与月球热演化的重要窗口。

综合考虑数据质量、覆盖程度及RMDSs密度分布，本研究选取的研究区域如图1中红框所示。该区域位于静海盆地中部，正是Zhang等人^[8]首次观测到RMDSs的地点。其中，图1(a)的底图为LROC WAC全月影像拼接图^[44]（分辨率约100米/像元）；图1(b)采用Kaguya TC evening影像为底图，其分辨率约8米/像元^[45]，高于WAC影像，在放大视图中能够更清晰地展示地形形态。

静海盆地是月海穹隆的高度聚集区^[46]及其玄武岩表面分布有大量RMDSs。最新研究已在该盆地内识别出超过6400个RMDSs^[11]，他们与周围撞击坑及其他火山地貌存在复杂的空间关系，例如部分RMDSs以较完好的形态出现在撞击坑边缘^[9]。通过对静海内200个小型盾状火山（即月海穹隆）与6400余个RMDSs的时空分布关系进行定量化统计分析，研究发现：除月海平原外，高/径比值相对较小的月海穹隆表面也分布有大量RMDSs，但他们的平均直径略小于周边月海平原上RMDSs的直径。这一现象可归因于以下两方面原因：首先，相较于短而较厚的熔岩流（即高/径比较大的月海穹

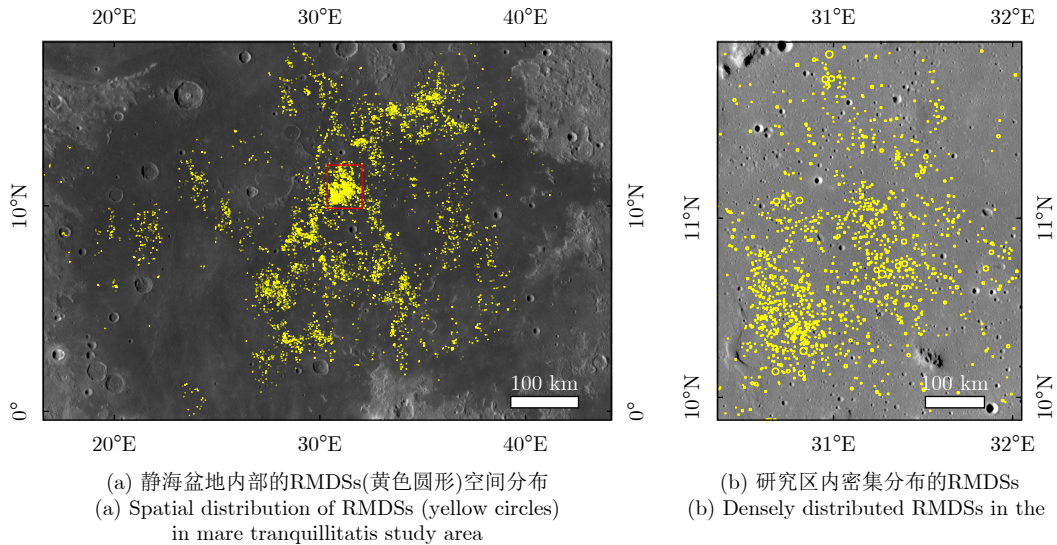


图1 研究区(红色矩形框)位置

Fig. 1 Location of the study area (red rectangular box)

隆),长而薄的熔岩流因上覆熔岩的静岩压力较小有利于内部挥发分出溶,从而诱发形成RMDs所必需的泡沫岩浆作用;其次,月海平原上RMDs的平均直径大于月海穹隆表面的RMDs,这可能是由于月海平原更为平缓的地形更有利于岩浆滞留(而不是快速流走)及随后的岩浆膨胀作用。上述机制共同为静海盆地内月海穹隆、RMDs及其他火山地貌之间的“伴生关系”提供了合理解释^[11]。

3 数据与方法

本研究所使用的光学影像和雷达数据主要来源于美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)行星数据系统(<https://pds-geosciences.wustl.edu/dataserv/moon.html>)。其中,光学影像数据包括:(1)LRO影像:由LRO卫星搭载的广角相机(Wide Angle Camera, WAC)获取的空间分辨率约100米/像元的影像,以及窄角相机(Narrow Angle Camera, NAC)获取的分辨率约0.3~2米/像元的高分辨率影像^[47];(2)Kaguya影像:由月亮女神号(Kaguya/SELENE)轨道器搭载的地形相机(Terrain Camera, TC)获取的影像^[45]。其中,约8米/像元的Kaguya TC evening map是在低太阳高度角(“黄昏”光照条件)下制作的全月面灰度影像镶嵌图,光影效果显著增强了地形起伏与细微结构的反差,特别适用于RMDs等小型火山构造的地质解译。为突出显示需要,我们在必要区域采用SLDEM高程数据作为底图(数据下载及相关信息详见链接:<https://pgda.gsfc.nasa.gov/products/54>)。

雷达数据主要包括地基阿雷西博(Arecibo)雷达

数据和LRO卫星搭载的微型射频仪雷达(Mini-RF)数据。其中,Arecibo地基雷达获取了月球正面P波段和S波段的雷达回波数据:S波段波长12.6 cm,频率2380 MHz,图像空间分辨率约80 m^[48],小于RMDs的平均直径(约200 m);P波段波长70 cm,频率430 MHz,分辨率约300 m^[31,49]。相比之下,S波段的空间分辨率更高,更适用于表征RMDs的微波散射特征。

Arecibo雷达向月表发射单一旋向的圆极化波,并由绿岸射电望远镜同时接收两个不同旋向的圆极化回波。其中,回波极化方向与发射波相同的称为同向圆极化(Same sense Circular polarization, SC),与发射波旋向相反的称为反向圆极化(Opposite sense Circular polarization, OC)。圆极化率(Circular Polarization Ratio, CPR)定义为SC与OC功率的比值。

雷达信号在遇到不同介电性质的物质界面(如石块、裂隙、空洞)时会发生散射。通常,这些介电性质发生变化的物理尺度需大于雷达波长的1/10^[31,50]。遥感雷达接收的主要是后向散射回波,包含的极化分量及其物理含义如下:(1)反向圆极化(OC),为后向散射的极化分量,包含月表光滑部分的强反射(即“准镜面”分量);(2)同向圆极化(SC),为后向散射的去极化分量,几乎不包含“准镜面”分量,由随机化散射主导^[31]。圆极化率(CPR)是反映月表波长尺度粗糙度的重要参数,其值越大,表明表面越粗糙。CPR除了与雷达频率和入射角有关外,还受月表坡度、风化层厚度、极区潜在水冰含量等多种因素影响^[31,50]。雷达散射回波功率灰度图像中的亮色表示后向散射功率高值,可反映月表及次表层相对粗糙的形貌特征(如分布有

较多石块的风化层); 暗色则表示低后向散射功率, 对应雷达波长尺度下的光滑月表。

星载雷达Mini-RF是一种采用混合双极化、双频模式的侧视SAR。其工作时发射S波段(波长12.6 cm, 频率2380 MHz)或X波段(波长4.2 cm, 频率7140 MHz)的圆极化信号, 包括基线模式(baseline)和放大模式(zoom)两种工作模式, 相应数据的分辨率分别为150 m和30 m^[51]。其中, 放大模式雷达数据经过月球坐标系统处理后, 分辨率可达15 m/pixel^[52], 足以识别小型撞击坑、小尺度火山地貌等小型地质单元^[30]。

Mini-RF接收两个正交的线极化回波, 利用这两个回波可计算Stokes参数(S_1, S_2, S_3, S_4), 进而生成SC, OC, CPR等表征后向散射特征的数据产品。这些参数为研究月球表层物质的物理特性(如介电常数、表面粗糙度)提供了客观依据。其中, S_1 代表回波总功率, 即两个正交线极化回波的功率之和^[52]。由于受人工处理痕迹影响较小, S_1 数据产品被广泛用于科学解译^[53,54]。

在运行初期, Mini-RF为单站雷达系统, 即收发天线均安装在同一轨道器上。2010年12月, 其发射机出现故障, 单站模式停止工作。2012年起, 其接收机与Arecibo望远镜的发射机组成双站雷达系统, 继续接收月球的S波段回波信号, 直至2020年因Arecibo设备损毁而终止^[55]。本研究主要聚焦于Mini-RF在单站雷达系统阶段获取的S波段数据, 即分辨率较高的放大模式数据产品。

Mini-RF采用简缩极化体制^[56], 可从中提取极化特征参数, 以获取雷达数据中更多的潜在散射信息。本研究根据Raney等人^[57]提出的m-chi分解方法, 对Mini-RF数据进行计算处理, 分别得到对应蓝色(B)、红色(R)、绿色(G)的数据, 并通过RGB图像合成方式生成伪彩色雷达图像。其中, 蓝色代表单次散射或布拉格(Bragg)散射, 红色代表二次散射, 绿色代表体散射或随机极化散射, 合成色则表示多种散射类型共同存在。

针对Mini-RF S_1 图像数据, 为在局部分析中突出RMDSs的主要散射特征并便于解译, 同时压制可能的噪声信号, 本研究利用ArcGIS 10.7软件空间分析模块中邻域分析的焦点统计(Focal Statistics)工具, 对雷达图像进行了平滑处理。对于每个待平滑点, 以该点为中心, 沿序列方向左右各取3个采样点作为步长, 构成一个 3×3 矩形窗口, 计算窗口内所有数据的均值作为该点的平滑值。通过逐点移动窗口, 即可实现对整个序列的滑动平均。

4 结果与讨论

本部分从宏观整体雷达图像散射特征、局部精细雷达图像散射特征及数值统计3个层面, 逐步解析研究区内RMDSs的物质特性与相关地质信息, 并与月球其他形貌的散射特征统计结果进行对比。

4.1 全局宏观分析

研究区整体的雷达图像如图2所示, 包括地基雷达Arecibo的P波段(数据编号: canon_dep_level2, canon_rat_level2)和S波段(数据编号: sband_08n038_scp, sband_08n038_cpr), 以及星载雷达Mini-RF的S波段(数据编号: lsz_06589_2s1_eku_10n031_v1, lsz_06589_2cp_eku_10n031_v1)的功率图像与CPR值图像。其中, 图2(e)和图2(f)右上角的箭头及数字分别指示Mini-RF雷达信号的照射方向与角度。

Arecibo和Mini-RF的散射功率图像显示RMDSs在雷达亮色与暗色区域均有分布。Arecibo P波段信号穿透深度较大, 其散射功率图像(图2(a))显示研究区内存在线性亮色调特征, 反映了穿越该区域的线性构造。通过与可见光影像比对(如图2(e)、图2(f)), 这些亮色调区域对应西北—东南走向的撞击坑密集分布区(可能为外来辐射纹或二次撞击区域), 以及火山、山脉等地形起伏较大的地貌单元。RMDSs在P波段散射功率图像上既有亮色分布, 也有暗色分布(图2(a))。Arecibo S波段散射功率图像(图2(c))显示, 大多数RMDSs分布在低后向散射区域, 部分紧邻亮色调区域, 其中亮色区域主要对应撞击坑及其溅射毯。Mini-RF散射功率图像(图2(e))同样显示, RMDSs在雷达亮色调与暗色调月海区域均有分布, 处于亮色调区域的RMDSs明显受到撞击坑及其溅射物的影响。RMDSs在雷达亮色与暗色区域均有分布, 说明其后向散射回波功率不足以改变所在区域的雷达散射背景。这一现象只能由其回波强度较低来解释, 据此推断RMDSs具有弱后向散射特征。

Arecibo与Mini-RF的CPR图像均显示, RMDSs在高、低CPR值区域均有分布(图2(b)、图2(d)), 即蓝色调(低值)与黄、红色调(高值)区域均可见RMDSs分布, 但绝大部分RMDSs(黑点)位于低值蓝色调区域, 仅少量分布在高值黄色调区域。

由于不同波长雷达信号的穿透深度存在差异, RMDSs在P波段与S波段的高、低值区域分布数量也有所不同。Arecibo P波段穿透深度最大但分辨率较低, 其CPR值(图2(b))主要反映地下相对较深的地形及较大尺度地质构造的影响(如撞击坑及其

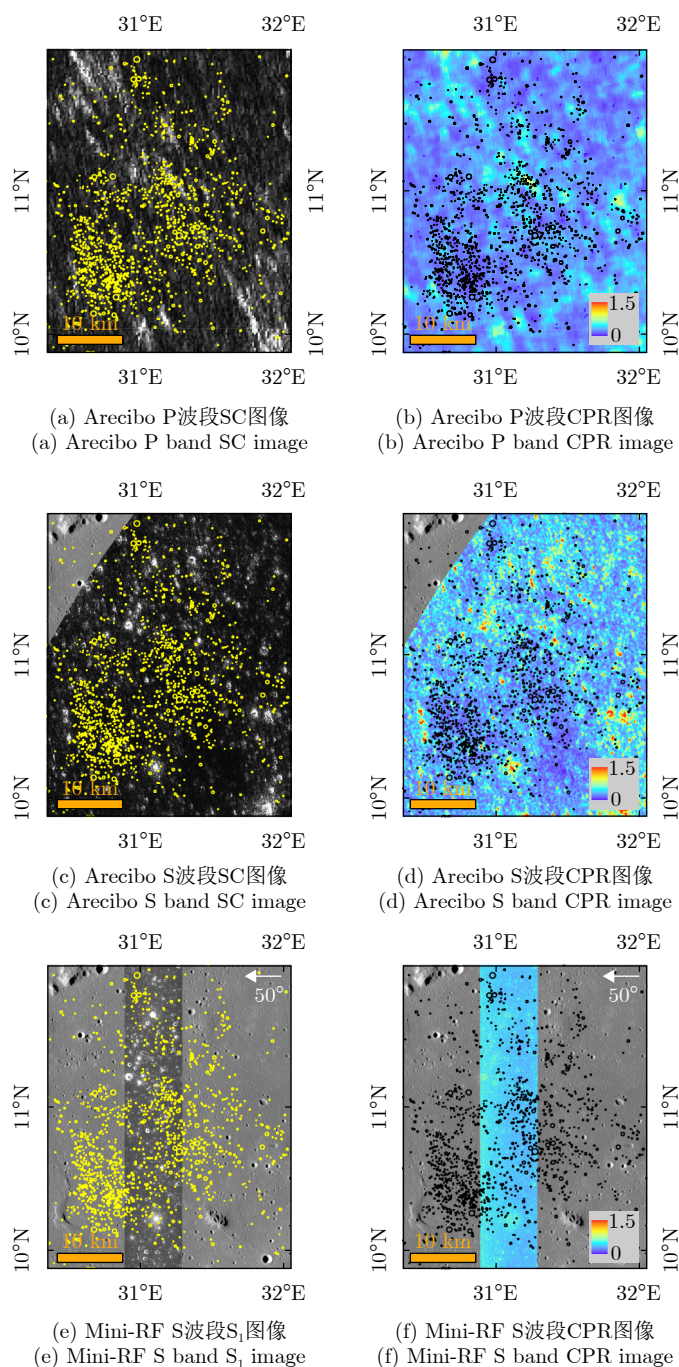


图2 研究区雷达图像(底图为Kaguya TC evening map)

Fig. 2 Radar images of the study area (The base map is the Kaguya TC evening map)

溅射物、线性构造等地形变化较大的粗糙地形), 小型撞击坑的SAR特征易被背景信号平均而难以区分。相比之下, Arecibo S波段CPR图像(图2(d))中 高值位置明显增多, 表明研究区内部分粗糙地形 (如小型撞击坑) 的深度相对较浅, 且S波段能够更 清晰地突出显示这类小型撞击坑及其周缘溅射物 (如图2(d)中黄、红色亮点)。

Mini-RF CPR图像(图2(f))显示其值域范围相 对较小, 这与其观测模式有关^[53]。与Arecibo图像

中CPR值变化相对平滑的特征不同, Mini-RF的 CPR高低值变化更为复杂(即高低值突变较快), 可能原因是该波段穿透深度小、分辨率高, 对月表数 量众多的小型撞击坑较为敏感; 而地基雷达的长波 段图像(如P波段)因分辨率较低, 能够将小型撞击 坑的信号与月海低功率背景相平均。

4.2 局部分析

局部区域RMDSs的个体散射特征分析主要采

用高分辨率LRO NAC影像与Mini-RF图像相结合的方法。由于NAC与Mini-RF图像像素分辨率不同(分别为0.5~2 m, 约15 m), 首先需利用ArcGIS软件的地理信息配准功能对二者进行地理匹配。选择形貌显著的撞击坑作为配准点, 以确保NAC影像与雷达图像在局部分析区域内具有良好的匹配与叠置效果。本部分所使用的图像均为小于 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 范围的切割图像, 为最大程度减少形变, 我们对每幅图像均进行独立配准处理, 以保证较高的配准精度。此外, 本节展示的Mini-RF雷达图像均为图2(e)雷达图像的局部放大图。研究表明, 位于雷达图像亮色调区域的RMDSs主要受撞击作用影响, 可分为以下3种情形。

情形一, 指受撞击坑溅射物显著影响的RMDSs。图3(a)中白色箭头所指的6个RMDSs位于一个碗形撞击坑的溅射物范围内, Mini-RF S1图像显示该撞击坑溅射物呈现强散射回波(即亮色调, 图3(b))。根据经典半经验模型, 撞击坑连续溅射物厚度随距离增加呈-3次方衰减^[58]。对于简单碗形撞击坑, 其连续溅射物的覆盖范围通常为坑缘以外1~2倍坑半径(R)的距离; 超出此范围, 溅射物过渡为以撞击坑为中心呈向外辐射分布的线性条纹, 即图3(b)和图3(c)中的亮色调辐射纹。

除这6个明显受撞击坑溅射物影响的RMDSs外, 区域内其他RMDSs均位于雷达功率图像的低值区(图3(b))。在极化分解伪彩色图像(图3(c))中, 溅射物覆盖范围之外的RMDSs主要呈现为蓝色, 表明其回波为表面散射类型, 缺乏次表层散射回波; 而处于溅射物覆盖范围内的RMDSs则呈现红色、绿色及合成色, 说明其回波成分包含二次散射和体散射类型, 应源于月表及次表层的溅射物碎石块。

根据RMDSs的成因理论模型^[8-12], RMDSs作为岩浆就位过程中的表面产物, 其年龄应与其所在的基岩玄武岩相同。相较之下, 后生成因的撞击坑, 其形成时间必然晚于下伏的基岩玄武岩及其上的RMDSs。因此, 图3中发育明显辐射纹的撞击坑, 其溅射物势必对影响区域内的RMDSs产生物理破坏和物质混染。这些溅射物富含大量未风化、棱角分明的厘米级及以上岩石碎块, 导致表面异常粗糙, 在雷达图像上展现为高回波功率的“亮晕”^[59]。由此可见, 与可见光影像(图3(a))相比, 雷达图像能够清晰识别并界定撞击坑溅射物(包括坑缘溅射席和辐射纹)的更大影响范围(图3(b)和图3(c)), 这得益于S波段信号的穿透性及其对厘米至分米尺度碎块等散射体的敏感性。因此, 雷达数据有助于揭示RMDSs表面与次表层更多的地质信息。

情形二, 指与撞击坑在空间上部分重叠的RMDSs。此类RMDSs因撞击挖掘作用, 导致毗邻撞击坑一侧发生物质坍塌或滑移(图4(a)), 这可能是雷达图像上出现大面积亮色调特征(图4(b))的主要原因; 而对侧距撞击坑较远的部分则表现为雷达暗色调特征。极化分解图像(图4(c))显示, 叠加区域以蓝绿色调为主, 对应单次散射和体散射。相比之下, 图4(d)中的示例则呈现出不同特征: 除了其顶部因小型撞击坑影响而在雷达图像上显示为亮色调外(图4(e)), 其北侧与撞击坑的叠加区域并未出现明显的大面积亮色调特征。然而, 极化分解图像(图4(f))却同样显示该区域以蓝绿色调为主, 对应单次散射和体散射两种回波类型。

基于对上述情形一的分析, 本文认为撞击坑的相对年龄(即其溅射物的风化程度)是导致上述两种截然不同雷达响应的主要原因。图4(a)中, RMDSs右侧的撞击坑年龄较年轻, 辐射纹经历的风化时

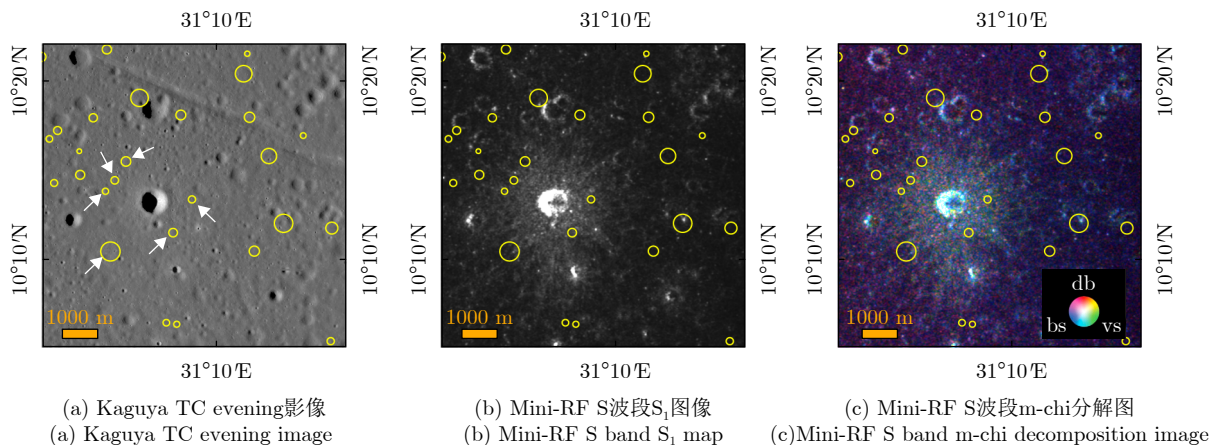


图3 一撞击坑溅射物范围内的RMDSs

Fig. 3 RMDSs located within the ejecta deposit of an impact crater

间较短,其边缘溅射物富含厘米级以上的碎石。加之地形导致的物质坡移和基岩出露,这些因素共同导致RMDSs与撞击坑叠加区域表面粗糙,在雷达图像上呈现出代表高回波功率的“亮色调”特征(图4(b))。相比之下,图4(d)中与该RMDS部分叠加的撞击坑年龄可能更老。经过长时间的空间风化,其表面辐射纹退化程度较高,以细粒月壤和小尺度碎石为主,导致叠加区域表面粗糙度相对较低,因此未出现明显的“雷达亮色调”特征(图4(e))。综上,通过两个实例的对比可以推断,起主导作用的并非地形因素,而是表面粗糙纹理。

上述雷达散射特征支持“RMDSs形成早于撞击坑”的结论。首先,根据已有理论模型^[8,12],RMDSs作为熔岩流地貌,应与所在熔岩同时形成,而撞击坑则是熔岩流就位之后形成的,因此RMDSs的形成早于撞击坑。其次,若RMDSs形成晚于毗邻的撞击坑,则根据叠置关系,流动的岩浆应流入撞击坑,但可见光影像中并未观测到此现象。此外,图4中RMDSs朝向撞击坑一侧出现缺失,可能由撞击破坏及后续物质垮塌所致。这些特征均表明,图4中两处RMDSs形成在先,撞击事件发生在后。

撞击事件使得RMDSs面向撞击坑一侧可能被溅射物覆盖和扰动,其与撞击坑重叠区域坡度较

大,物质向下坡移形成线性或波状纹理,成为粗糙面,加之坑壁处易出露基岩与碎石,这些粗糙形貌均会增强雷达后向散射,从而呈现亮色调特征(图4(b))。反之,若撞击坑形成在先、RMDSs形成在后,则坑壁处的粗糙形貌与物质将被熔岩流及RMDSs形成时产生的亚毫米级细粒物质覆盖,与周围平坦月海一样,整体应表现为雷达暗色特征。此外,若撞击坑经历了长期风化,其表面将逐渐缺乏厘米级及更大尺度的碎石,转而以细粒月壤为主。这种相对光滑的表面,会使其在雷达图像中呈现与周围月海相似的较弱回波强度。

情形三,指表面遭受不同程度撞击的RMDSs。图5(a)中白色箭头所指的两个直径较大的RMDSs(800~1000 m)表面发育有高反照率的小型撞击坑。由于遭受的太空风化作用较弱,这类在可见光影像上呈较高反射率的撞击坑通常较为年轻,并在雷达图像上呈现亮色调(图5(b),黄色箭头)。值得注意的是,其右上和右下两个小型RMDSs因表面无明显撞击坑,在雷达图像上呈现暗色调(图5(b),白色箭头),与周边无亮色调撞击坑及辐射纹的月海区雷达背景无明显差异。极化分解图像(图5(c))显示,该区域整体以蓝色背景为主,其他显著的合成颜色主要分布于高反照率小型撞击坑的位置。

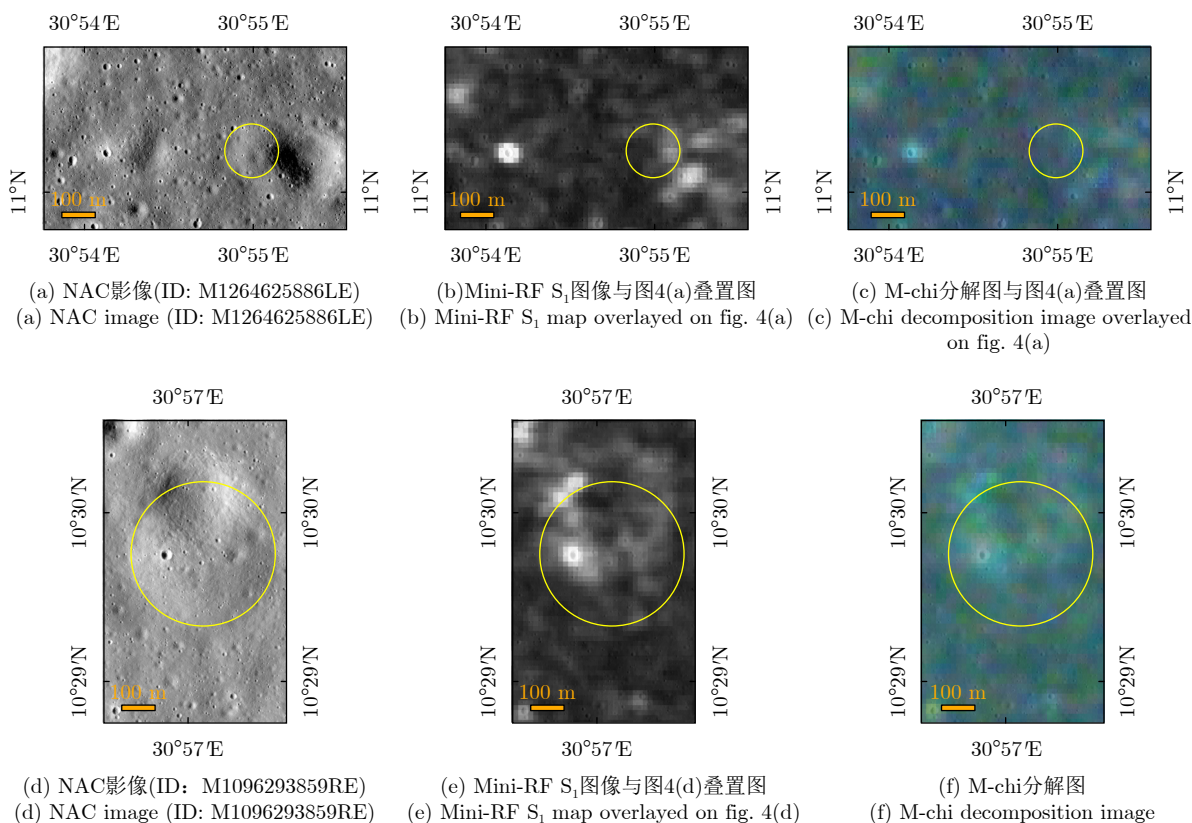


图4 与撞击坑部分重叠的RMDSs

Fig. 4 RMDSs partially overlapping an impact crater

综上所述，对受撞击因素影响而呈现雷达亮色调的RMDSSs的具体分析表明，这些RMDSSs自身的表面物质应以低后向散射功率为主，这与泡沫岩浆成因理论模型所预测的雷达弱散射特征^[12]相吻合。该理论认为，RMDSSs形成初期，最外层由亚毫米尺度的破碎物质(即自生月壤层，为泡沫岩浆破裂形成的碎屑表层沉积)组成，其物理特性与撞击成因的月壤层相似^[29]。

无论RMDSSs表层是撞击成因月壤还是次表层自生月壤层，其沉积物粒度均不满足S波段电磁波散射的尺度条件(约0.1~1.25 m^[30])。Apollo月壤样品的电磁性质测定结果表明，S波段信号在月球典型风化层中的穿透深度为1~2 m^[51,60]。因此，RMDSSs表层厚度不等的细粒破碎物质可能是造成RMDSSs呈现低后向散射功率的重要原因。

本文推测，导致RMDSSs后向散射功率低的其

他潜在原因还包括：(1) RMDSSs整体地形平缓，低矮且坡度较小，其雷达散射截面与周边月海起伏地形的散射截面差异不显著；(2)高分辨率NAC影像仅在太阳光照射角度较低(如入射角84.23°，接近平行入射)时才能清晰呈现RMDSSs形貌特征，而随着太阳照射角度增大，利用NAC影像识别RMDSSs的难度逐渐增加^[9]。然而，Mini-RF信号的照射角度约为50°，在月海平坦地形的入射角为48°~54°^[52]，可能对识别RMDSSs地形特征产生一定影响；(3)相较于NAC影像的分辨率(约0.3-2 m/pixel)与RMDSSs的规模(平均直径约200 m)，现有雷达图像空间分辨率较低，难以对RMDSSs的形貌特征(尤其是环形凹陷等小尺度地形变化)进行精细成像。

4.3 CPR值统计分析

本研究选取静海内一个较大区域(图6(a))进行

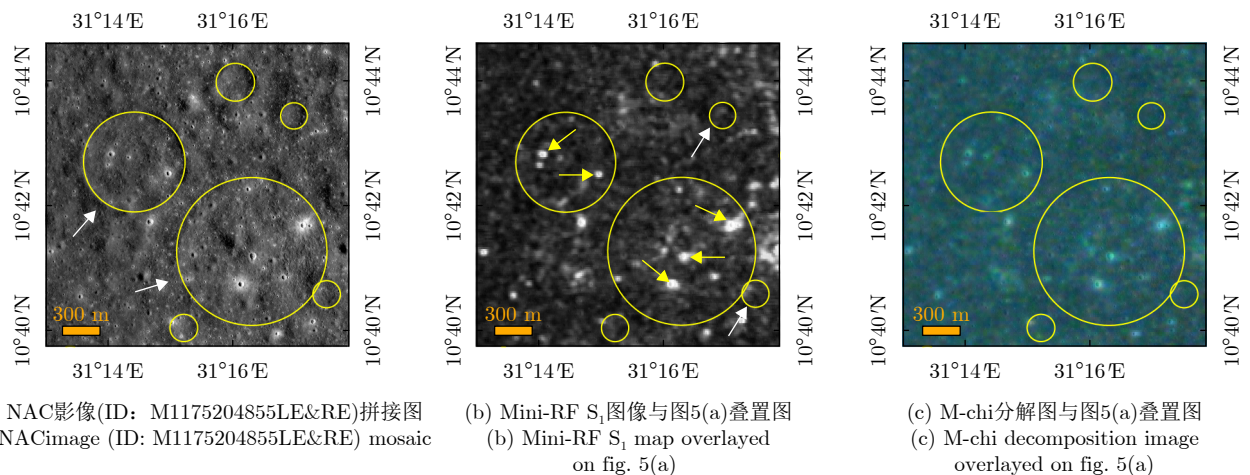


图 5 表面有小型撞击坑的RMDSSs

Fig. 5 RMDSSs with small impact craters on the surface

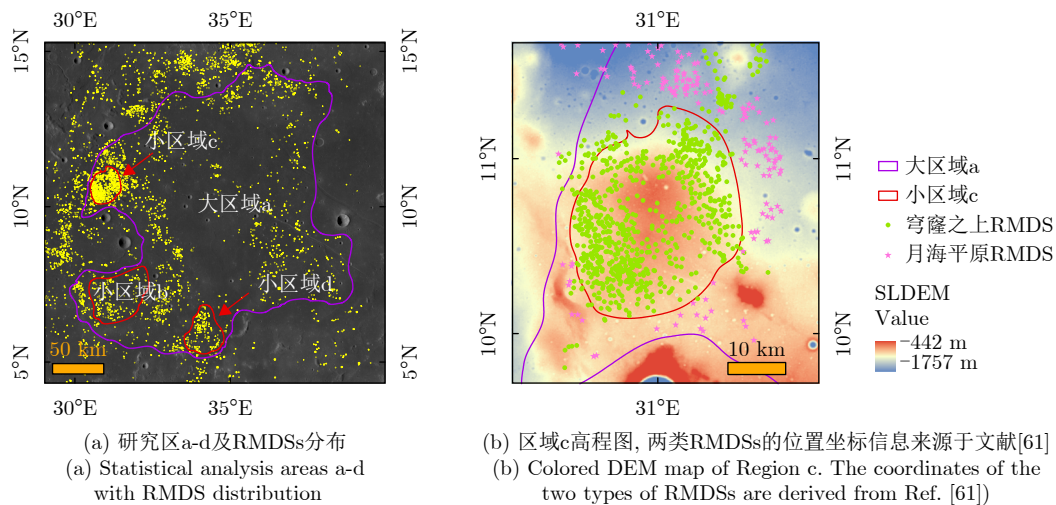


图 6 静海CPR值统计分析区域划分与区域c地区的RMDSSs分布图

Fig. 6 Statistical zoning of CPR values in Mare Tranquillitatis and distribution of RMDSSs in Region C

CPR值统计分析。该区域(命名为区域a, 紫色多边形范围内)包含2834个RMDSs, 采用Arecibo S波段CPR数据作为分析的基础数据。在区域a内部进一步划分出3个子区域(区域b、区域c、区域d)。4个区域(区域a-区域d)的划定原则为避开较大撞击坑及坡度较大的地形。总体而言, 月球月海区域地形相对平坦, 其中图6中的c区域为一约20 km × 25 km的火山穹隆, 高度约100 m, 侧翼坡度约0.57°, 可视为非常平缓的地形。因此, 在研究区范围的选择上, 本研究已最大程度降低地形对CPR值的潜在影响。

RMDSs在4个区域内的分布密集程度不同: 区域c内RMDSs的点密度最大, 且绝大多数发育于一个月海穹隆之上(图6(b)), 而区域b和区域d内的点密度相对较小。统计分析方法如下: 首先, 提取4个区域内每个RMDS中心位置对应的CPR值作为统计值, 并以统计直方图展示其数值分布规律; 其次, 提取每个区域内所有CPR值作为月海的统计值, 以直方图展示其数值分布规律; 最后, 将二者的统计结果叠置于同一图中进行对比。

由于RMDSs与月海的样本数量不在同一量级, 为直观展示对比效果, 统计图中对二者的频数直方

图进行了高度对齐处理, 并左右分设频数纵坐标, 二者共用表示CPR数值的横坐标。统计结果(图7)显示: 相较于所在区域的月海, RMDSs在大区域a内呈现更低CPR值的分布倾向; 而在其余3个小区内, RMDSs与月海的CPR值分布规律基本一致。就3个小区域而言, 区域c的月海CPR值最低(峰值小于0.3), 而区域b和区域d的月海CPR峰值均 ≥ 0.3 。

区域a内RMDSs与月海CPR值统计分布规律不一致的原因, 可能在于该区域统计范围过大。无RMDSs分布区域内存在的撞击坑、月堑等较大起伏地形, 使得月海整体CPR值偏高(图7(a)); 而RMDSs分布数量较多的3个小区内, 月海CPR值整体偏低, 说明RMDSs在粗糙度较大的月海区域出现的数量较少, 可能的原因为地形起伏较大的粗糙地区拥有的地质条件能够产生RMDSs的概率降低, 或其表面RMDSs被后期撞击成壤作用破坏和改造的几率增加。在这3个小区内, RMDSs与月海的CPR值分布规律基本一致, 进一步表明RMDSs与其所在月海的地质背景存在密切联系。

区域c内RMDSs点密度最大且CPR值最低, 除RMDSs自身的物质属性外, 还可能受以下3方面因

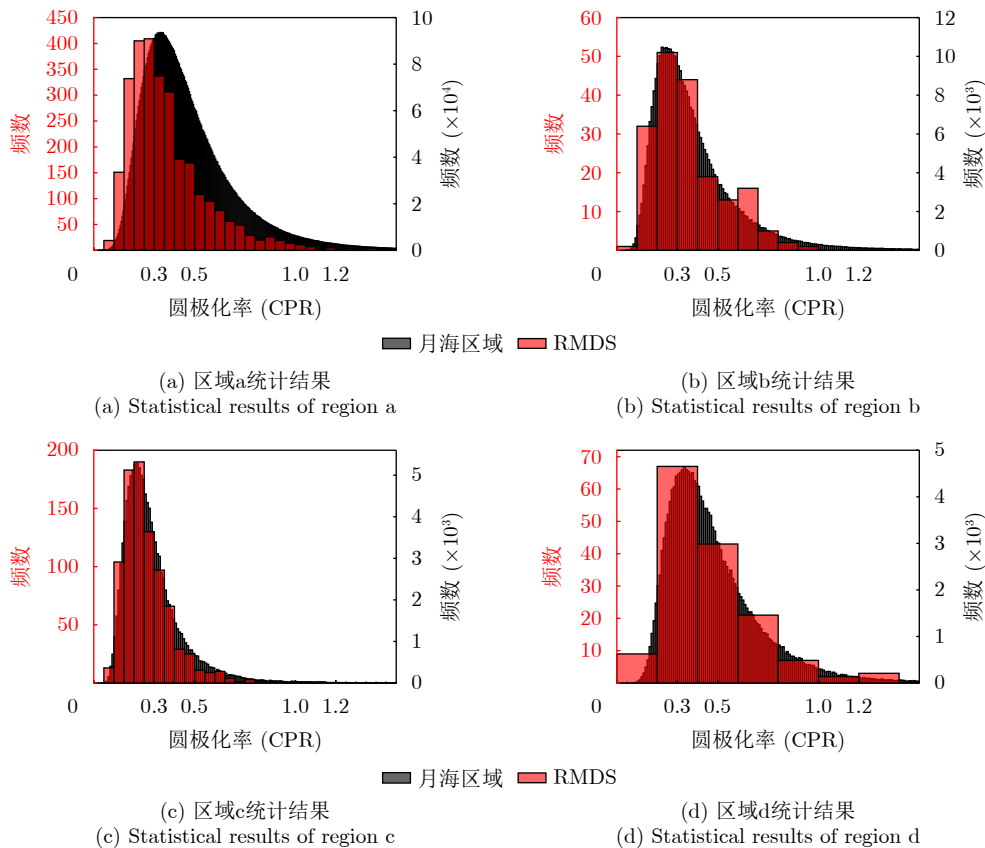


图7 RMDSs及其所在月海CPR值的统计直方图

Fig. 7 Statistical histograms of CPR values of RMDSs and their host mare

素的影响：其一，多数RMDSSs倾向于在中高钛含量的月海区域发育^[9]，而钛铁矿含量与雷达CPR值之间存在负相关性^[62]；其二，区域c内的RMDSSs发育于月海穹隆之上(图6(b))，形貌学测量结果表明，发育有RMDSSs的月海穹隆具有相对较低的坡度^[11]，而低坡度地形通常对应低CPR值^[31]；其三，低CPR值可能对应较低的撞击坑数量与密度，从而显著降低先前形成的RMDSSs被破坏的概率，使其完好保存至今的几率更高。

4.4 与其他火山地貌的散射特征对比分析

OC散射系数主要反映月表形貌的“光滑”特性，与CPR表征的粗糙程度属于不同物理特征。为此，本节基于OC和CPR值，开展了RMDSSs与其他火山地貌的对比研究。

所选RMDSSs均为文中4.2局部分析小节所展示的样本，其雷达数据的均值与标准差通过ArcGIS软件提取完成。具体操作分为两步：首先，将每个RMDSSs边界内的所有像元值从整体数据中提取出来(即图5中黄色圆内部区域)；然后，在该范围内应用焦点统计工具进行邻域分析，每个像元的值代表原图像对应位置邻域内的统计结果(此处为均值和标准差)。提取OC系数所用Mini-RF数据编号为lsz_06589_2oc_eku_10n031_v1，其他月球火山地貌的雷达散射特性数据引自Zhao等人^[63]的研究成果。

均值和标准差统计结果如图8和表1所示。受撞击溅射物覆盖的RMDSSs散射强度均值，与不规则月海斑块(IMP)s内撞击溅射物及石块富集的粗糙地形散射强度较为接近；表面发育亮色小型撞击坑及

未受撞击影响的RMDSSs，二者散射强度均值差异不大，且与火山碎屑堆积物的散射强度相近；而与撞击坑叠置的RMDSSs散射均值则介于上述两类之间。

上述结果表明，RMDSSs表面在未受撞击显著影响的情况下，其雷达散射特征与火山碎屑堆积物相似，表面月壤颗粒可能与火山碎屑物质尺度相当(后者富含火山玻璃，粒径为微米至毫米级，粒度较细且均匀)。与Zhao等人^[63]的统计数据相比，RMDSSs的CPR标准差较大，主要原因可能在于其表面积较小(平均直径约200 m)，导致用于计算均值的样本数较少。

相较于“浅部岩浆侵入模型^[26]”和“月震诱发的月壤球形聚集模型^[14]”，本研究的雷达数据分析结果更支持RMDSSs的“泡沫岩浆模型^[8,9,12]”。浅部岩浆侵入模型需要验证风化层之下是否存在断层，而现有SAR数据的探测深度仅限于月表风化层，因此无法对该模型提供有效约束。

关于月震诱发的月壤球形聚集模型，月壤与火山碎屑的成因存在根本差异：月壤主要由撞击搅拌作用改造而成，火山碎屑则是火山喷出物。这一成因差异导致前者颗粒形态复杂、结构松散、孔隙度较高，后者颗粒形态规则、致密、孔隙度低，且含有较高钛铁矿等组分。综合以上特征，火山碎屑的介电常数往往高于月壤^[64]。对雷达探测而言，纯净的火山碎屑表现为“松软、均质、吸波”的暗色毯子，其低CPR与低后向散射的组合特征，是将其从普通月壤背景中区分出来的关键标志。本研究中RMDSSs的CPR值及散射强度均与火山碎屑相当，因此不支持月震诱发模型。值得注意的是，提出该

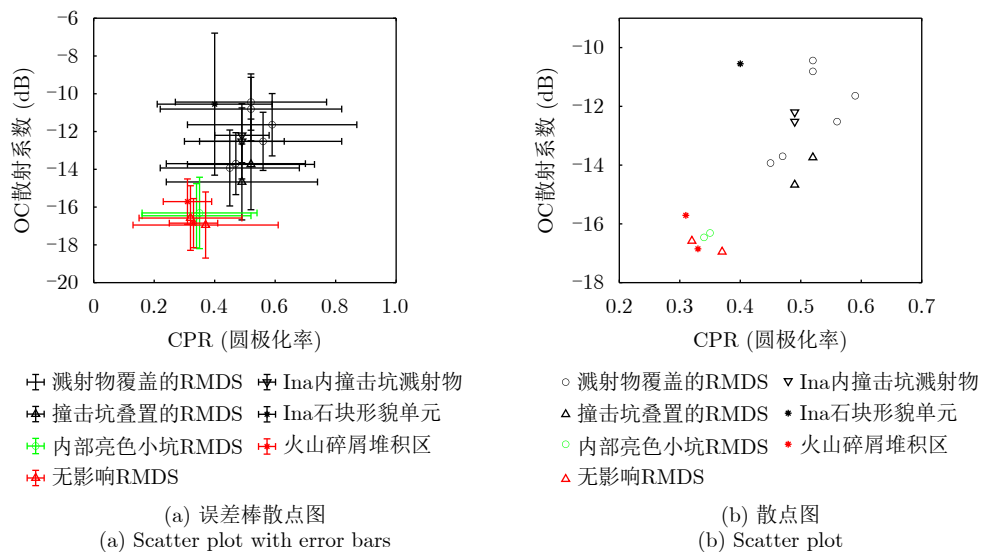


图 8 RMDSSs、不规则月海斑块Ina及火山碎屑堆积物的OC散射系数与CPR值散点图

Fig. 8 Scatter plots of RMDSSs, irregular mare patch Ina, and pyroclastic deposits in terms of OC scattering coefficient and CPR values

表 1 RMDSs与其他火山地貌的雷达散射特征均值统计表
Tab. 1 Statistical results of mean radar scattering characteristics for RMDSs and other volcanic landforms

特征描述	OC散射系数(dB)	CPR值	样本数
撞击坑溅射物覆盖的RMDSs	-13.70±1.64	0.47±0.23	256
	-12.52±1.54	0.56±0.26	172
	-11.64±1.65	0.59±0.28	118
	-13.93±2.01	0.45±0.23	1063
	-10.81±1.68	0.52±0.30	188
与撞击坑叠置的RMDSs	-10.44±1.49	0.52±0.25	150
	-13.74±2.40	0.52±0.21	771
表面有亮色小坑的RMDSs	-14.67±2.01	0.49±0.25	96
	-16.46±1.70	0.34±0.18	4711
无撞击作用影响的RMDSs	-16.31±1.89	0.35±0.19	2486
	-16.95±1.75	0.37±0.24	155
火山碎屑堆积物	-16.58±1.71	0.32±0.17	171
	-15.71±1.20	0.31±0.08	/
Ina月海斑块内石块单元	-16.85±1.30	0.33±0.08	/
	-10.55±3.76	0.40±0.19	/
月海斑块内退化撞击坑溅射物	-12.20±1.45	0.49±0.09	/
	-12.52±1.99	0.49±0.14	/

模型的作者在文献中也强调,这一推测目前尚无任何物理模型支持,尤其无法解释RMDSs边缘存在环形凹槽的现象。

5 存在问题与展望

尽管RMDSs后向散射功率增强的现象可能源于撞击作用的影响,但研究中也发现,部分RMDSs局部呈现较高雷达散射强度的现象可能由其他因素所致。以图9中的示例为例,两个RMDSs的侧翼部分(除小型撞击坑对应区域外)在雷达图像上均出现了亮色调特征(图9(b)和图9(e)),但NAC影像(图9(a)和图9(d))显示,这些亮色调部分并非受撞击坑影响(即无碗形撞击坑的高反照率辐射纹穿过其表面),却依然产生了较强的雷达散射回波。极化分解图像(图9(c)和图9(f))显示,这两个RMDSs表面主要呈现蓝、绿和混合色,分别代表表面单次散射、体散射和三种散射的任意组合模式。

出现上述特征的原因可能包括:(1)月壤蠕虫形成的波浪形粗糙纹理。自RMDSs形成后,其侧翼具有一定坡度(通常不超过 10°),经历百万年至数十亿年的空间风化作用(尤其是纳米级至百米级

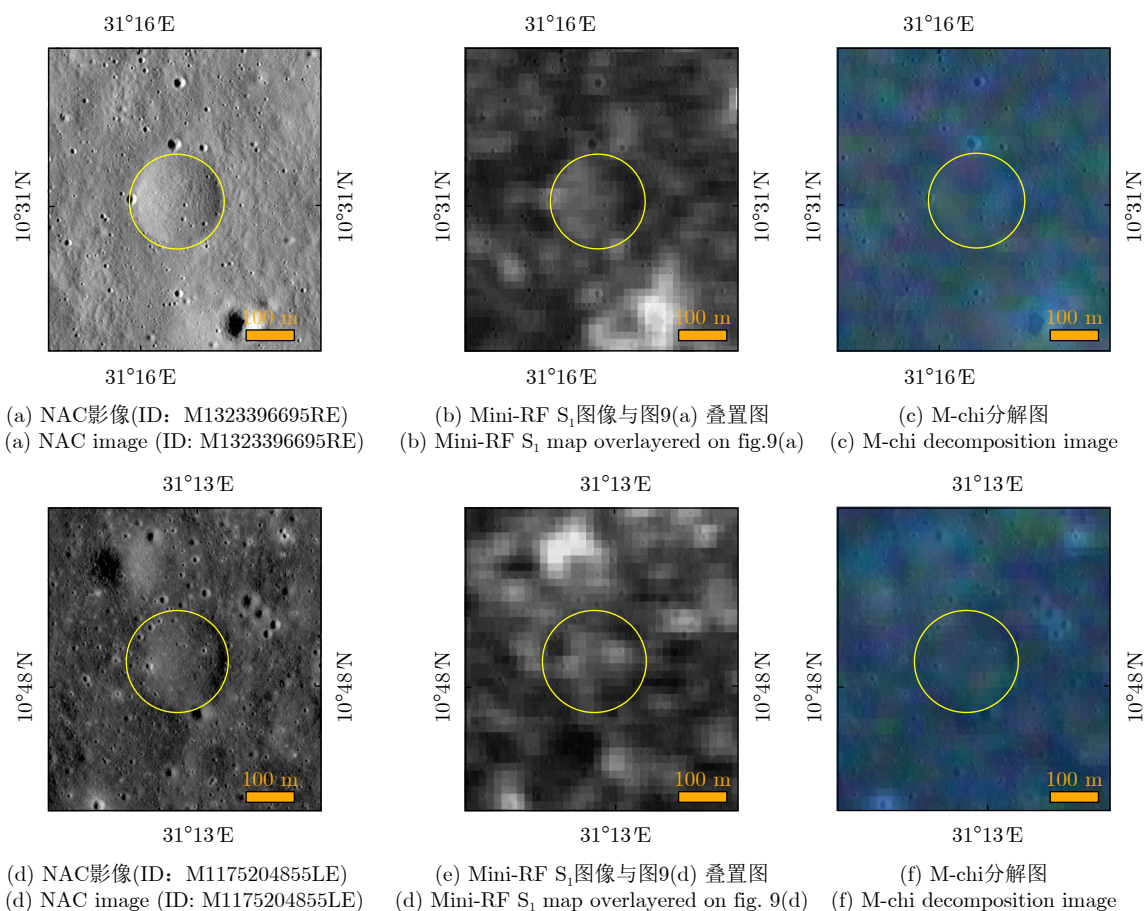


图 9 非撞击因素引起RMDSs局部出现较高雷达散射强度的案例

Fig. 9 Cases of locally elevated radar scattering intensity of RMDSs caused by non-impact factors

撞击作用), 表面形成一层风化层(即月壤层)。历史撞击与月震事件引起的月表晃动可能诱发其表面或侧翼发生物质坡移, 形成波浪形粗糙纹理, 进而引起雷达信号增强。(2)环形凹陷等地形因素。如图9(f)所示, 此RMDSs东南侧绿色更为显著。NAC影像(图9(d))显示, 环形凹陷的右侧部分宽度较大且深度较深, 凹陷底部与中央穹丘斜坡的地形特征可能满足雷达信号产生二次散射类型回波增强的几何条件, 类似于撞击坑底部与斜坡之间的地形特征^[57]。此外, 右侧斜坡正好朝向Mini-RF信号的入射方向, 有利于产生较强的功率回波。

此外, 部分RMDSs呈串珠状线性排列(图10)。此处使用的Mini-RF数据编号为lsz_06589_2s1_eku_17n032_v1, 图10(b)左上角橙色箭头标注了雷达照射方向与角度。图10(a)中, 白色箭头所指的两个直径最大的RMDSs存在部分叠置, 叠置区发育一圆形凹陷, 凹陷右侧边缘呈现强后向散射(即亮色调)。由于雷达照射方向由左向右, 凹陷左侧坑缘处于照射遮挡区, 导致后向散射回波强度较低(即暗色调)。

相比之下, 中间两个RMDSs相邻区域亦有一凹坑(图10(a)下面白色箭头), 其周缘呈现一圈雷达亮色调环。推测可能有两方面原因: (1)该凹坑为撞击成因, 雷达亮色环对应撞击坑溅射毯的分布范围, 尤其相连的两个RMDSs表面均表现为强散射回波, 而不同于上述两个RMDSs中间凹坑仅右侧呈现亮色调; (2)该凹坑为内生成因, 即岩浆由内向外排出后引发的真空塌陷。此坑四周的雷达高强度回波信号, 可能由左侧较大凹坑(图10(a)黄色箭头所指)引起。该大坑虽非圆形轮廓, 其是否为撞击成因尚难定论, 但其右侧坑壁出现的线性波纹暗示曾发生强烈的表层物质坡移运动。中间两个RM-

DSs与凹坑相连一侧同样发育线性波纹, 据此推断该处经历了同样显著的坡移运动, 这很可能是导致强后向散射回波的主要诱因。

针对上述RMDSs雷达散射特征存在的多解性问题, 未来应引入高分辨率地形高程数据, 详细分析更多RMDSs个体的雷达散射特征与地形及表面粗糙度的相关性。鉴于不同波长雷达信号的穿透深度存在差异, 后续研究应考虑结合多波长雷达数据及其多极化数据产品, 尤其是高空间分辨率的雷达数据, 综合分析导致RMDSs局部雷达后向散射增强的主要因素, 为其成因及相关内外动力地质过程提供可靠和可验证的地质证据。

展望未来, 新型雷达探测成像技术有望实现对RMDSs的更高精度成像, 为其地质解译提供更丰富的信息。自2020年Arecibo雷达损毁退役后, 美国地基绿岸雷达安装了Ku波段(波长 ~ 2 cm)发射机, 并借助超长基线阵列雷达天线接收回波信号, 实现了对Apollo 15着陆区和第谷撞击坑区域 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 分辨率的高精度成像^[65,66], 是目前分辨率最高的月球地基雷达图像数据。Ku波段波长较短, 有望获取RMDSs表面物性的更多信息, 并与现有长波长(如S波段、P波段)雷达数据进行对比分析, 从而推演RMDSs由浅至深的次表层结构与物理特性。

此外, 即将实施的嫦娥七号任务计划开展L波段(波长 ~ 24 cm)与Ku波段的高分辨率月表SAR成像^[67,68]。其高质量雷达数据有望为RMDSs特征精细化研究带来重要契机, 例如解译单个及成簇RMDSs的雷达散射特征, 并结合其所在月海及其他地形地貌特征进行对比分析, 有望揭示不同火山地貌的成因及其内在联系, 为理解月球火山作用及其热演化历史提供关键信息约束。

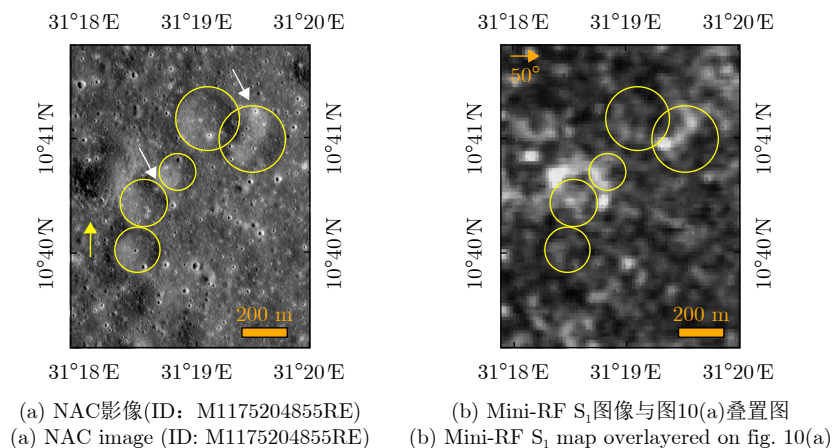


图 10 串珠状(或链状)RMDSs的雷达信号散射特征

Fig. 10 Radar scattering characteristics of beaded (or chain) RMDSs

6 结论与认识

月球上发育有丰富的火山地貌特征,解析其成因对于认识以火山活动为表征的月球热演化历史,以及在内外动力地质作用共同影响下的月球演化过程具有重要意义。环形凹陷穹丘(RMDSs)是近年来月球科学领域备受关注的一类火山地貌特征。尽管关于其成因所涉及的地质过程与形成时代仍存在诸多争议与不确定性,但已有研究成果已使一系列“未知”逐渐明朗,使其成为窥探月球火山活动与内部热动力学过程的重要窗口。

目前尚未开展针对RMDSs的微波遥感研究。为此,本文聚焦月球大型撞击盆地——静海,选取其内部RMDSs点密度最大的区域作为研究区,基于地基与星载雷达的后向散射功率数据及CPR数据,结合光学影像资料,采用从宏观到微观、从整体分布到个案分析的研究思路,对研究区内的RMDSs开展微波遥感初步探究,并与月球其他火山地貌的雷达散射特征进行对比分析。

本研究获得的主要结论与认识归纳如下:

(1) RMDSs与其所在的月海玄武岩均以低后向散射功率为基本特征,地形、表面粗糙度及成分可能是主要影响因素。(2)火山碎屑由气泡爆裂将喷射到空中的岩浆打碎滴落形成。RMDSs的散射系数与CPR统计均值均接近火山碎屑堆积物,表明其表层物质粒度与火山碎屑物相当(富含微米至毫米级细颗粒物),说明RMDSs的形成与岩浆中气体出溶和释放方式密切相关。若上述分析成立,则首次从SAR角度为泡沫岩浆成因理论模型提供了新的佐证,与该模型预测的“减压导致岩浆泡沫化,岩浆溢出后的冷却与排气过程形成表层初始月壤物质”相吻合。(3)部分RMDSs因受撞击作用影响,出现不同程度的散射功率增强现象。这主要是由于撞击事件破坏了原有的风化层结构,挖掘、改造并暴露出较大尺度的岩石块体或颗粒,但也可能由地形因素或表面松散风化层发生向下坡移(如长期月壤坡向蠕动形成线性波纹,增加局部粗糙度)等因素引起。若撞击或地形引起的RMDS表面粗糙度因长期风化而弱化,转而以为以细粒月壤为主的相对光滑表面,会使在雷达图像中呈现与周围月海相似的较弱回波强度。研究中也观察到RMDSs具有多样化的形貌特征,暗示其初始形成条件与后期外动力改造程度共同主导了RMDSs的不同演化路径。利用SAR独特的物理探测与穿透优势,可为未来深入研究RMDSs的形成与演化提供重要方向。(4)未来获取不同波长、更高分辨率的多极化雷达观测数据,有望实现对RMDSs次表层结构与物质特性的更好成像,为其精细化研究带来重要契机。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参考文献

- [1] 乔乐, 陈剑, 凌宗成. 月球火山作用的地貌学特征[J]. 地质学报, 2021, 95(9): 2678–2691. doi: [10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021264](https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021264).
- [2] 杨蔚, 胡森, 李秋立, 等. 月球火山活动究竟能持续多久?[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3789–3791. doi: [10.3799/dqkx.2022.810](https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.810).
- [3] 肖龙, 钱煜奇, 乔乐, 等. 月球火山活动及热演化历史研究进展[J]. 中国科学基金, 2022, 36(6): 841–850. doi: [10.16262/j.cnki.1000-8217.20221208.010](https://doi.org/10.16262/j.cnki.1000-8217.20221208.010).
- [4] 肖龙, 黄俊, 肖智勇, 等. 太阳系天体火山地质作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(11): 2457–2481.
- [5] XIAO Long, QIAN Yuqi, QIAO Le, *et al.* Advances in the study of lunar volcanism and thermal evolution[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(6): 841–850. doi: [10.16262/j.cnki.1000-8217.20221208.010](https://doi.org/10.16262/j.cnki.1000-8217.20221208.010).
- [6] WHITTEN J L and HEAD J W. Lunar cryptomaria: Physical characteristics, distribution, and implications for ancient volcanism[J]. *Icarus*, 2015, 247: 150–171. doi: [10.1016/j.icarus.2014.09.031](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.09.031).
- [7] SCHULTZ P H and GREELEY R. Ring-moat structures: Preserved flow morphology on lunar Maria[C]. The 7th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Houston, USA, 1976: 788–789.
- [8] SCHULTZ P H, GREELEY R, and GAULT D E. Degradation of small mare surface features[C]. The 7th Lunar and Planetary Science Conference Proceedings, The Woodlands, Houston, USA, 1976: 985–1003.
- [9] ZHANG Feng, HEAD J W, BASILEVSKY A T, *et al.* Newly discovered ring-moat dome structures in the lunar Maria: Possible origins and implications[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(18): 9216–9224. doi: [10.1002/2017GL074416](https://doi.org/10.1002/2017GL074416).
- [9] ZHANG Feng, HEAD J W, WÖHLER C, *et al.* Ring-moat dome structures (RMDSs) in the lunar Maria: Statistical, compositional, and morphological characterization and assessment of theories of origin[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2023, 128: e2022JE007416. doi: [10.1029/2022JE007416](https://doi.org/10.1029/2022JE007416).

- Research: Planets, 2020, 125(7): e2019JE005967. doi: [10.1029/2019JE005967](https://doi.org/10.1029/2019JE005967).
- [10] ZHANG Feng, HEAD J W, WÖHLER C, *et al.* The lunar mare ring-moat dome structure (RMDS) age conundrum: Contemporaneous with Imbrian-aged host lava flows or emplaced in the Copernican?[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(8): e2021JE006880. doi: [10.1029/2021JE006880](https://doi.org/10.1029/2021JE006880).
- [11] ZHANG Feng, HEAD J W, WILSON L, *et al.* Insights into lunar basaltic volcanism from mare domes superposed by ring-moat dome structures (RMDSs) in Mare Tranquillitatis[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2024, 129(8): e2023JE007969. doi: [10.1029/2023JE007969](https://doi.org/10.1029/2023JE007969).
- [12] WILSON L, HEAD J W, and ZHANG Feng. A theoretical model for the formation of Ring Moat Dome Structures: Products of second boiling in lunar basaltic lava flows[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2019, 374: 160–180. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2019.02.018](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.02.018).
- [13] 党亚南, 张锋, 苏子昂, 等. 月球Marius Hills火山复合区火山机构与环形凹陷穹丘的空间分布特征研究[J]. *矿物学报*, 2025, 45(6): 1115–1124. doi: [10.3724/j.1000-4734.2025.45.099](https://doi.org/10.3724/j.1000-4734.2025.45.099).
DANG Yanan, ZHANG Feng, SU Ziang, *et al.* A study on the spatial distribution characteristics of volcanic edifices and ring-moat dome structures in the Marius Hills Volcanic Complex on the Moon[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2025, 45(6): 1115–1124. doi: [10.3724/j.1000-4734.2025.45.099](https://doi.org/10.3724/j.1000-4734.2025.45.099).
- [14] FITZ-GERALD B. Lunar section circular[EB/OL]. https://britastro.org/document_folder/baa-document-store/sections/lunar-section/lunar-section-circulars-1965-present, 2021 (November), 58(11): 14-28.
- [15] XIAO Long and HEAD J W. Geological characteristics of the Moon[M]. *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. Oxford University Press, Oxford, 2020. doi: [10.1093/acrefore/9780190647926.013.90](https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.90).
- [16] JOLLIFF B L. Science and exploration of the Moon: Overview[M]. *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*. Oxford University Press, Oxford, 2021. doi: [10.1093/acrefore/9780190647926.013.19](https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.19).
- [17] ZHAO Siyuan, QIAN Yuqi, XIAO Long, *et al.* Lunar Mare Fecunditatis: A science-rich region and a concept mission for long-distance exploration[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1062. doi: [10.3390/rs14051062](https://doi.org/10.3390/rs14051062).
- [18] HEAD J W, WILSON L, HIESINGER H, *et al.* Lunar mare basaltic volcanism: Volcanic features and emplacement processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2023, 89(1): 453–507. doi: [10.2138/rmg.2023.89.11](https://doi.org/10.2138/rmg.2023.89.11).
- [19] ZHAO Jiannan, QIAO Le, ZHANG Feng, *et al.* Volcanism and deep structures of the Moon[J]. *Space: Science & Technology*, 2023, 3: 0076. doi: [10.34133/space.0076](https://doi.org/10.34133/space.0076).
- [20] ZHU Kai, LIU Jianzhong, MICHAEL G, *et al.* Evolution of the lunar tectonic framework and structures[J]. *Space: Science & Technology*, 2024, 4: 0110. doi: [10.34133/space.0110](https://doi.org/10.34133/space.0110).
- [21] KANG Zhizhong, XU Xiaojian, XU Yi, *et al.* Shallow subsurface structure of the Moon: Key questions for future exploration[J]. *Space: Science & Technology*, 2024, 4: 0173. doi: [10.34133/space.0173](https://doi.org/10.34133/space.0173).
- [22] HEAD J W and WILSON L. Generation, ascent and eruption of magma on the Moon: New insights into source depths, magma supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 2: Predicted emplacement processes and observations)[J]. *Icarus*, 2017, 283: 176–223. doi: [10.1016/j.icarus.2016.05.031](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.05.031).
- [23] WILSON L and HEAD J W. Generation, ascent and eruption of magma on the Moon: New insights into source depths, magma supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 1: Theory)[J]. *Icarus*, 2017, 283: 146–175. doi: [10.1016/j.icarus.2015.12.039](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.12.039).
- [24] HON K, KAUAHIKAUA J, DENLINGER R, *et al.* Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: Observations and measurements of active lava flows on Kilauea Volcano, Hawaii[J]. *GSA Bulletin*, 1994, 106(3): 351–370. doi: [10.1130/0016-7606\(1994\)106<0351:EAIOPS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1994)106<0351:EAIOPS>2.3.CO;2).
- [25] SELF S, KESZTHELYI L, and THORDARSON T. The importance of pahoehoe[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1998, 26: 81–110. doi: [10.1146/annurev.earth.26.1.81](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.26.1.81).
- [26] GARRICK-BETHELL I and SERITAN M R K. Laccolith model for lunar ring-moat dome structures[C]. The 52nd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Houston, USA, 2021: 2369.
- [27] HIESINGER H, HEAD III J W, WOLF U, *et al.* Ages and stratigraphy of lunar mare basalts: A synthesis[M]. AMBROSE W A and WILLIAMS D A. *Recent Advances and Current Research Issues in Lunar Stratigraphy*. Boulder: Geological Society of America, 2011: 1–51. doi: [10.1130/2011.2477\(01\)](https://doi.org/10.1130/2011.2477(01)).
- [28] BART G D, NICKERSON R D, LAWDER M T, *et al.* Global survey of lunar regolith depths from LROC images[J]. *Icarus*, 2011, 215(2): 485–490. doi: [10.1016/j.icarus.2011.07.017](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.07.017).
- [29] HEAD J W and WILSON L. Rethinking lunar mare basalt regolith formation: New concepts of lava flow protolith and evolution of regolith thickness and internal structure[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(20): e2020GL088334. doi: [10.1029/2020GL088334](https://doi.org/10.1029/2020GL088334).
- [30] CAHILL J T S, THOMSON B J, PATTERSON G W, *et al.* The Miniature Radio Frequency instrument’s (Mini-RF) global observations of Earth’s Moon[J]. *Icarus*, 2014, 243:

- 173–190. doi: [10.1016/j.icarus.2014.07.018](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.07.018).
- [31] CAMPBELL B A. Planetary geology with imaging radar: Insights from earth-based lunar studies, 2001–2015[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2016, 128(964): 062001. doi: [10.1088/1538-3873/128/964/062001](https://doi.org/10.1088/1538-3873/128/964/062001).
- [32] KELLER J W, PETRO N E, VONDRAK R R, *et al.* The lunar reconnaissance orbiter mission – six years of science and exploration at the Moon[J]. *Icarus*, 2016, 273: 2–24. doi: [10.1016/j.icarus.2015.11.024](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.11.024).
- [33] THOMPSON T W, CAMPBELL B A, and BUSSEY D B J. 50 years of Arecibo Lunar Radar mapping[J]. *URSI Radio Science Bulletin*, 2016, 2016(357): 23–35. doi: [10.23919/URSIRSB.2016.7909801](https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2016.7909801).
- [34] MORGAN G A, CAMPBELL B A, CAMPBELL D B, *et al.* Investigating the stratigraphy of Mare Imbrium flow emplacement with Earth-based radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, 121(8): 1498–1513. doi: [10.1002/2016JE005041](https://doi.org/10.1002/2016JE005041).
- [35] CHAUHAN M, BHATTACHARYA S, SARAN S, *et al.* Compton-Belkovich Volcanic Complex (CBVC): An ash flow caldera on the Moon[J]. *Icarus*, 2015, 253: 115–129. doi: [10.1016/j.icarus.2015.02.024](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.02.024).
- [36] TRANG D, GILLIS-DAVIS J J, LEMELIN M, *et al.* The compositional and physical properties of localized lunar pyroclastic deposits[J]. *Icarus*, 2017, 283: 232–253. doi: [10.1016/j.icarus.2016.09.025](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.09.025).
- [37] CAMPBELL B A, CARTER L M, HAWKE B R, *et al.* Volcanic and impact deposits of the Moon’s Aristarchus Plateau: A new view from Earth-based radar images[J]. *Geology*, 2008, 36(2): 135–138. doi: [10.1130/G24310A.1](https://doi.org/10.1130/G24310A.1).
- [38] 陆萍萍, 高瑶, 孟昕雨, 等. 合成孔径雷达月球探测研究进展[J]. *遥感学报*, 2025, 29(2): 342–361. doi: [10.11834/jrs.20254003](https://doi.org/10.11834/jrs.20254003).
LU Pingping, GAO Yao, MENG Tingyu, *et al.* Research progress on Synthetic Aperture Radar in lunar exploration[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29(2): 342–361. doi: [10.11834/jrs.20254003](https://doi.org/10.11834/jrs.20254003).
- [39] WILHELMS D E, MCCAULEY J F, and TRASK N J. The geologic history of the Moon[R]. U.S. Geological Survey Professional Paper 1348, 1987. doi: [10.3133/pp1348](https://doi.org/10.3133/pp1348).
- [40] NEUMANN G A, ZUBER M T, WIECZOREK M A, *et al.* Lunar impact basins revealed by Gravity Recovery and Interior Laboratory measurements[J]. *Science Advances*, 2015, 1(9): e1500852. doi: [10.1126/sciadv.1500852](https://doi.org/10.1126/sciadv.1500852).
- [41] STAID M I, PIETERS C M, and HEAD III J W. Mare Tranquillitatis: Basalt emplacement history and relation to lunar samples[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1996, 101(E10): 23213–23228. doi: [10.1029/96JE02436](https://doi.org/10.1029/96JE02436).
- [42] RAJMON D and SPUDIS P. Distribution and stratigraphy of basaltic units in Maria Tranquillitatis and Fecunditatis: A Clementine perspective[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2004, 39(10): 1699–1720. doi: [10.1111/j.1945-5100.2004.tb00067.x](https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00067.x).
- [43] SHEARER C K, HESS P C, WIECZOREK M A, *et al.* Thermal and magmatic evolution of the Moon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60(1): 365–518. doi: [10.2138/rmg.2006.60.4](https://doi.org/10.2138/rmg.2006.60.4).
- [44] WAGNER R V, SPEYERER E J, ROBINSON M S, *et al.* New mosaicked data products from the LROC team[C]. The 46th Lunar and Planetary Science Conference, Texas, USA, 2015: 1473.
- [45] HARUYAMA J, OHTAKE M, MATSUNAGA T, *et al.* Planned radiometrically calibrated and geometrically corrected products of lunar high-resolution Terrain Camera on SELENE[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(2): 310–316. doi: [10.1016/j.asr.2007.04.062](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.04.062).
- [46] QIAO Le, HEAD J W, WILSON L, *et al.* Mare domes in mare tranquillitatis: Identification, characterization, and implications for their origin[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2021, 126(9): e2021JE006888. doi: [10.1029/2021JE006888](https://doi.org/10.1029/2021JE006888).
- [47] ROBINSON M S, BRYLOW S M, TSCHIMMEL M, *et al.* Lunar reconnaissance orbiter camera (LROC) instrument overview[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1/4): 81–124. doi: [10.1007/s11214-010-9634-2](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9634-2).
- [48] CAMPBELL B A, CARTER L M, CAMPBELL D B, *et al.* Earth-based 12.6-cm wavelength radar mapping of the Moon: New views of impact melt distribution and mare physical properties[J]. *Icarus*, 2010, 208(2): 565–573. doi: [10.1016/j.icarus.2010.03.011](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.03.011).
- [49] CAMPBELL B A, CAMPBELL D B, MARGOT J L, *et al.* Focused 70-Cm Wavelength radar mapping of the Moon[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(12): 4032–4042. doi: [10.1109/TGRS.2007.906582](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.906582).
- [50] CARTER L M, CAMPBELL D B, and CAMPBELL B A. Geologic studies of planetary surfaces using radar polarimetric imaging[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(5): 770–782. doi: [10.1109/JPROC.2010.2099090](https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2099090).
- [51] NOZETTE S, SPUDIS P, BUSSEY B, *et al.* The lunar reconnaissance orbiter miniature radio frequency (Mini-RF) technology demonstration[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1/4): 285–302. doi: [10.1007/s11214-009-9607-5](https://doi.org/10.1007/s11214-009-9607-5).
- [52] CARTER L M, NEISH C D, BUSSEY D B J, *et al.* Initial observations of lunar impact melts and ejecta flows with the Mini-RF radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E12): E00H09. doi: [10.1029/2011JE003911](https://doi.org/10.1029/2011JE003911).
- [53] CARTER L M, CAMPBELL B A, NEISH C D, *et al.* A comparison of radar polarimetry data of the moon from the LRO Mini-RF instrument and earth-based systems[J]. *IEEE*

- Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 1915–1927. doi: [10.1109/TGRS.2016.2631144](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2631144).
- [54] FASSETT C I, BRAMSON A M, CAHILL J T S, *et al.* Improved orthorectification and empirical reduction of topographic effects in monostatic Mini-RF S-band observations of the Moon[J]. *The Planetary Science Journal*, 2024, 5(1): 4. doi: [10.3847/PSJ/ad0a61](https://doi.org/10.3847/PSJ/ad0a61).
- [55] MORGAN G A, JAWIN E R, CAMPBELL B A, *et al.* Radar perspective of the Aristarchus pyroclastic deposit and implications for future missions[J]. *The Planetary Science Journal*, 2023, 4(11): 209. doi: [10.3847/PSJ/ad023a](https://doi.org/10.3847/PSJ/ad023a).
- [56] NORD M E, AINSWORTH T L, LEE J S, *et al.* Comparison of compact polarimetric synthetic aperture radar modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 174–88. doi: [10.1109/TGRS.2008.2000925](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2000925).
- [57] RANEY R K, CAHILL J T S, PATTERSON G W, *et al.* The *m-chi* decomposition of hybrid dual-polarimetric radar data with application to lunar craters[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E12): E00H21. doi: [10.1029/2011JE003986](https://doi.org/10.1029/2011JE003986).
- [58] MCGETCHIN T R, SETTLE M, and HEAD J W. Radial thickness variation in impact crater ejecta: Implications for lunar basin deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 20(2): 226–236. doi: [10.1016/0012-821X\(73\)90162-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90162-3).
- [59] THOMPSON T W, ZISK S H, SHORTHILL R W, *et al.* Lunar craters with radar bright ejecta[J]. *Icarus*, 1981, 46(2): 201–225. doi: [10.1016/0019-1035\(81\)90209-8](https://doi.org/10.1016/0019-1035(81)90209-8).
- [60] CARRIER III W D, OLHOEFT G R, and MENDELL W W. Physical properties of the lunar surface[M]. HEIKEN G, VANIMAN D, and FRENCH B M. Lunar Sourcebook. New York: Cambridge University Press, 1991: 475–567.
- [61] ZHANG Feng, HEAD J W, WILSON L, *et al.* The data presented in Figure 6, the 120 mare domes hosting no RMDs shown in Fig. 5, and all the RMDs (more than 6400 in number) identified in Mare Tranquillitatis[EB/OL]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8009470>, 2023.
- [62] CARTER L M, CAMPBELL B A, HAWKE B R, *et al.* Radar remote sensing of pyroclastic deposits in the southern Mare Serenitatis and Mare Vaporum regions of the Moon[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114(E11): E11004. doi: [10.1029/2009JE003406](https://doi.org/10.1029/2009JE003406).
- [63] ZHAO Fei, GAO Yao, DANG Yanan, *et al.* Refining constraints on the origin of lunar irregular mare patches via Mini-RF and DFSAR Data analysis[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 8213–8229. doi: [10.1109/JSTARS.2024.3364830](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3364830).
- [64] CHUNG D H, WESTPHAL W B, and SIMMONS G. Dielectric properties of Apollo 11 lunar samples and their comparison with earth materials[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(32): 6524–6531. doi: [10.1029/JB075i032p06524](https://doi.org/10.1029/JB075i032p06524).
- [65] TAYLOR P A, WILKINSON S R, PAGANELLI F, *et al.* NGRADAR: The highest resolution images of the Moon ever taken from the ground[C]. The 54th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Houston, USA, 2023: 2086.
- [66] WILKINSON S R, HANSEN C, ALEXIA B, *et al.* A planetary radar system for detection and high-resolution imaging of nearby celestial bodies[J]. *Microwave Journal*, 2022, 65(1): 22–42.
- [67] WANG Yingjie, WANG R, LIU Kaiyu, *et al.* Lunar microwave imaging radar (LMIR)[C]. The 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Leipzig, Germany, 2022: 1–3.
- [68] WANG Chi, JIA Yingzhuo, XUE Changbin, *et al.* Scientific objectives and payload configuration of the Chang'E-7 mission[J]. *National Science Review*, 2024, 11(2): nwad329. doi: [10.1093/nsr/nwad329](https://doi.org/10.1093/nsr/nwad329).

作者简介

高强山，博士，主要研究方向为雷达图像处理，建模及地质过程解译。

张 锋，研究员，主要研究方向为类地行星表面特征、成因及相关地质过程研究，尤其火山地质学。

党亚南，助理研究员，主要研究方向为行星表面水文地貌特征及其成因、月球火山地貌的SAR特征分析等。

梁莉婷，副研究员，主要研究方向为极化分解理论、极化散射建模及SAR遥感应用。

牛胜利，博士，主要研究方向为行星遥感与地质学。

殷浩林，博士，主要研究方向为行星遥感与地球物理。

苏子昂，硕士，主要研究方向为月球火山地貌的形貌特征与演化分析。

(责任编辑：于青)