

史密斯海月球长期科研站选址与潜在科学目标分析

孟治国^{1,2}, 常文清¹, 沈朝³, 平劲松^{4,5}, 黄少鹏⁶, 蔡占川², 张渊智^{4,5}

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 2. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078; 3. 哈尔滨工业大学建筑学院, 哈尔滨 150006; 4. 中国科学院国家天文台射电天文研究部, 北京 100101; 5. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049; 6. 深圳大学土木与交通工程学院, 深圳 430071)

摘要: 月球史密斯海(Mare Smythii)位于月球正面与背面的交界处,具有丰富的地质单元和科学价值。结合SLDEM 2015高程数据、克莱门汀紫外/可见光数据、“月神1号”(Selene-1)多波段成像仪数据和“嫦娥二号”(Chang'E-2, CE-2)微波辐射计数据,对史密斯海的地质、地形、物质成分和微波热辐射等特征进行了系统分析。在此基础上,从科研、资源和能源的角度,建议建立以(88°E, 1°N)为中心的月球长期科研站;最后,结合月表地形特征设计了3条巡视路线,初步确定和规划了14个以月球科学和资源利用为目标的值得探测的考察点并分析了其科学价值。论文的研究结果对我国未来建设长期运行的月球科研站具有重要的参考价值。

关键词: 月球长期科研站; 史密斯海; 地质重要性; 地形; 亮温

中图分类号: P184

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2022)05-0521-11

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2022.20220028

引用格式: 孟治国, 常文清, 沈朝, 等. 史密斯海月球长期科研站选址与潜在科学目标分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(5): 521-531.

Reference format: MENG Z G, CHANG W Q, SHEN C, et al. Site selection and potential scientific targets analysis of mare smythii for constructing long-term lunar research station[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2022, 9(5): 521-531.

引言

月球是地球的近邻,不仅可以提供太阳系演化的信息,而且拥有丰富的资源^[1]。20世纪50~70年代,迎来了第一轮探月高潮。随着时代的发展,对月球探测的目的,已经转变为对月球资源的综合利用和相关科学问题的探究。随着探月次数的增加,科学家们获取了大量的星载和地基探测数据,对月球火山活动和热历史、月球二分性以及月球资源的勘探和利用等关键月球科学问题的了解和认识已经取得了很大的进步^[2]。建设月球科研站,进行资源开发利用和综合探测已成为深化月球科学研究的共识,是世界各国激烈竞争的目标之一。

对于月球科研站的选址,前人做了大量的工作^[3-8]。Duke等^[9]提出了针对不同科学目标的3种月球科研站选址原则,包括了月球科学、资源利用和月球定居。中国于2021年发布的航天白皮书《2021中国的航天》,其中之一就是建设以月球科学和资源开发利用为目标的月球科研站^[10]。肖龙等^[2]结合国际行星科学界共同关

注的热点月球科学问题,依据未来15年(即2016—2030年)内中国可能具备的探测能力,系统分析了中国月球着陆探测值得关注的科学问题,主要包括深部月壳和月幔的成分、火山活动和热历史、月球撞击历史与模式年龄、内部结构、水及挥发份、月壤和月尘的性质以及月球资源等7个方面,并提供了18个备选着陆区。

由于技术的限制,前期着陆月球探测侧重于短周期、短距离的探索性研究,距离最长的前苏联“月球车2号”(Lunokhod 2)也仅探测了39 km^[11]。随着技术的进步,建设针对上述目标的长期、长距离、多目标的月球着陆探测已成为可能^[11]。针对丰富海(Mare Fecunditatis)地区,Zhao等^[11]设计了包括7个科学目标、探测距离达1 408 km、为期5年的月球探测计划。Robinson等^[12]所提出的Intrepid计划,在风暴洋地区设计了一个探测距离为1 800 km的为期4年的着陆探测计划。

但是,目前尚缺乏在中低纬度地区建设针对长期稳定的、综合性的月球科研站的选址研究。相对来说,纬度较低的史密斯海(Mare Smythii)是位于月球

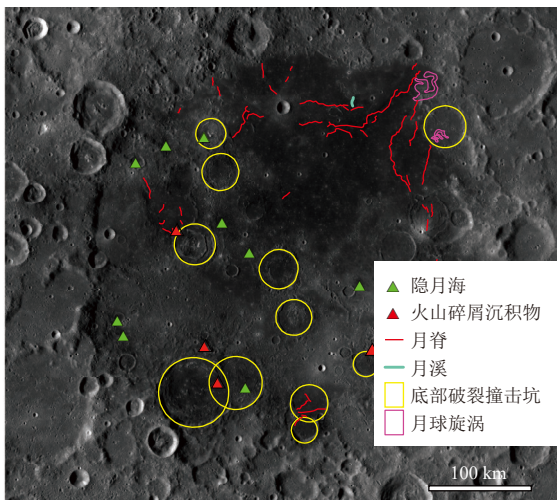
收稿日期: 2022-04-04 修回日期: 2022-06-04

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0715104); 国家自然科学基金(42071309); 月球与行星科学国家重点实验室开放课题(澳门科技大学)(119/2017/A3); 吉林省自然科学基金(20220101159JC); 澳门科学技术发展基金(0059/2020/A2)

正面和背面交界处的最大的规则月海，其特殊的地理位置和丰富的地质特征对实现Duke等^[9]和肖龙等^[2]所提出的科学目标提供观测支撑。因此，本文拟综合月球历史和最新探测成果，对建设史密斯海长期月球科研站的科学根据做全面说明。



(a) 位置图

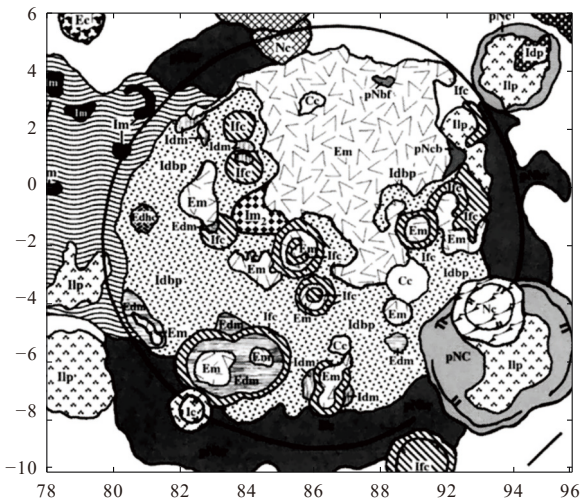


(b) 影像图

图1 史密斯海影像图 (底图为LRO卫星广角相机影像)

Fig. 1 LRO wide angle camera image of Mare Smythii

基于月球轨道和“阿波罗”(Apollo)照片等数据，Wilhelms等^[14]首次绘制了史密斯海地质图。基于克莱门汀数据，Gillis等^[15]重新认识了史密斯海的地质特征，提供了新的地质单元识别和年代确认(图2)。



注: Em代表爱拉托逊纪玄武岩, Edm代表爱拉托逊纪暗色月幔物质, Im₂代表雨海纪玄武岩, Ifc代表雨海纪底部破裂撞击坑物质, Idbp代表雨海纪暗色盆地平原物质, Idp代表雨海纪暗色平原物质, Cc代表哥白尼纪撞击坑物质, Ic代表雨海纪撞击坑物质, Nc代表前酒海纪撞击坑物质, pNbf代表盆地底部物质, pNc代表前酒海纪撞击坑物质。

图2 史密斯海地质图^[15]

Fig. 2 Geological map of Mare Smythii^[15]

图1和图2表明，盆地内部存在丰富的地质特征和地貌特征。

1 地质和地貌特征

史密斯海中心经纬度约为(87°E, 1°S)，形成于前酒海纪(3.92 Ga之前)^[13]，火山活动一直持续到爱拉托逊纪。史密斯盆地是月球最古老的规则撞击盆地之一^[13](见图1)。

1.1 地质特征

1) 玄武岩

玄武岩是月海火山活动的主要产物，源于部分熔融的月幔物质喷发。对月海玄武岩的研究，可以获取月球热演化历史等重要信息。

盆地存在两个期次的玄武岩，包括爱拉托逊纪玄武岩(Em单元)和雨海纪玄武岩(Im₂单元)。

Em单元玄武岩广泛分布在盆地东北部，面积达32 000 km²。盆地中部和西南部的底部破裂撞击坑中，也有小面积独立分布，总面积约9 000 km²。这种不连续、孤立Em单元玄武岩的存在，在月球表面也是很少见的。

Im₂单元玄武岩，仅分布在Runge撞击坑和Haldane撞击坑之间，总面积约为1 741.9 km²。

2) 底部破裂撞击坑

图1(b)和图2表明，盆地中存在着多达11个中等尺度的雨海纪底部破裂撞击坑(Ifc单元)。其中，在撞击坑Runge、Camoens、Kiess、Widmannstatten、Helmert、Kao和Swasey的底部，分布Em单元玄武岩。在撞击坑Haldane、Doyle、Warner和McAdie的内坡，出现了Em单元玄武岩。另外，部分撞击坑之间还出现了小面积分布的Im₂和Em单元玄武岩。

3) 火山碎屑堆积物

图2表明，在盆地西南部，存在爱拉托逊纪暗色月

幔物质 (Edm单元), 分布在Haldane撞击坑附近、Kiess和Widmannstatten撞击坑底部和以 (84.4°E, 5°S) 和 (90.2°E, 5.6°S) 为中心的区域, 该物质主要由火山碎屑堆积物组成^[16]。

火山碎屑堆积物来自月幔深处, 是火山活动的产物, 富含玻璃和钛, 是月球原始岩浆最可能的代表, 是了解月球深部的“探针”^[17-18]。

4) 隐月海 (Cryptomare)

隐月海是被撞击溅射物所覆盖的玄武岩 (图3), 记录了3.8~4.35 Ga月海岩浆活动的信息。主要分布在盆地西南部Idbp单元中的隐月海, 为远端盆地溅射物类型^[19], 面积约为 $3.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[20], 参见图1 (b)。隐月海对认识史密斯海的早期岩浆活动具有重要的地质意义。

5) Idbp单元

该单元分布在盆地西南部, 是大面积连续分布的雨海纪暗色平原。Gillis等^[20]认为该单元形成是由于早期月海玄武岩被周围高地溅射物所覆盖, 可能是高地物质和火山物质混合物或来自危海盆地的溅射物。

月球正面的大部分盆地被月海玄武岩填充, 从而掩盖了月海火山作用的早期阶段。由于史密斯海晚期火山作用是部分填充, 这为研究月海火山作用填充过程的早期阶段提供了契机^[15]。

月球重力场研究结果表明, 史密斯海存在较薄的月亮和较大的重力异常。但是, 史密斯海不均匀的岩浆分布和部分填充的玄武岩特征, 与当前普遍认为的月球正面和背面二分性的成因相矛盾^[16, 21]。因此, 史密斯海的着陆探测将为深化当前月海岩浆演化研究提供极高的科学价值。

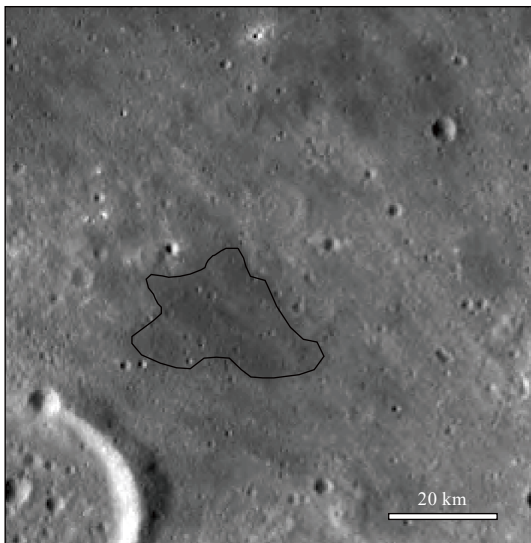


图 3 隐月海LRO卫星广角相机影像 (黑线所示)
Fig. 3 LRO wide angle camera image of Cryptomare (Indicated by the black line)

1.2 地貌特征

1) 皱脊

皱脊是月表线性构造, 能反映区域性的构造特征和应力状态^[22]。图1 (b) 和图2表明, 史密斯海盆地皱脊主要分布在东北部Em单元^[2]。其中最主要的两条是 (参见图4): Dorsa Dana, 呈近北东走向, 长度约为148.7 km; Dorsum Cloos, 呈近南北走向, 长度约为90.5 km。

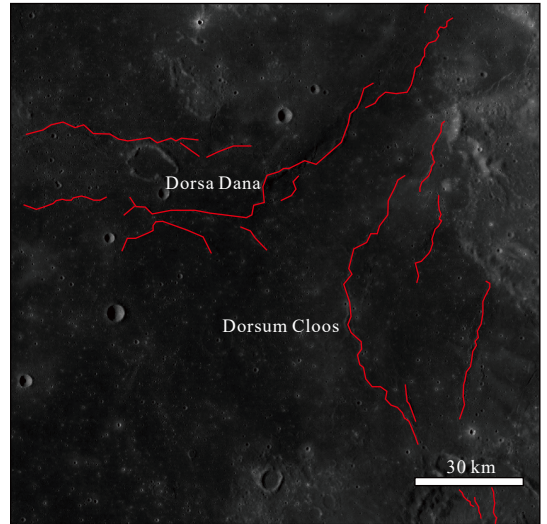


图 4 史密斯海皱脊分布图 (底图为LRO卫星广角相机影像)^[22]
Fig. 4 Wrinkle ridges in Mare Smythii (The basemap is the LRO wide angle camera image)^[22]

2) 月溪

月溪是月球表面一种具有负地形的线性结构, 一般认为是熔岩通道坍塌所造成的^[23]。月溪等线性构造的形态特征和分布规律对于理解其所指示的地质构造演化规律具有重要的价值。在史密斯海东北部Em单元中存在一条明显的月溪 (图5), 长约10.6 km, 深约14 m。

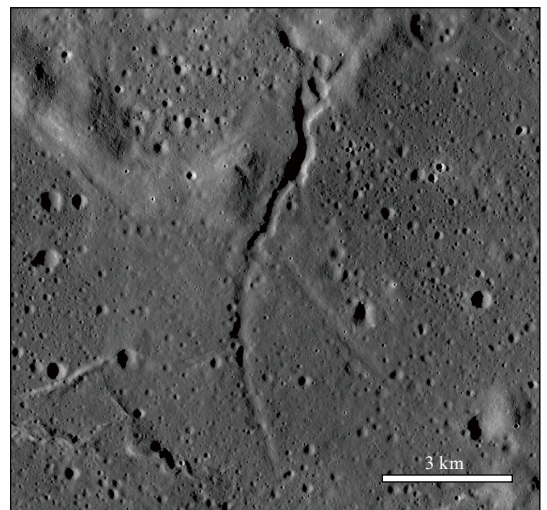


图 5 史密斯海中的一条月溪图 (底图为Kaguya地形相机影像)
Fig. 5 One rill in Mare Smythii (The basemap is the Kaguya terrain camera image)

3) 月球漩涡

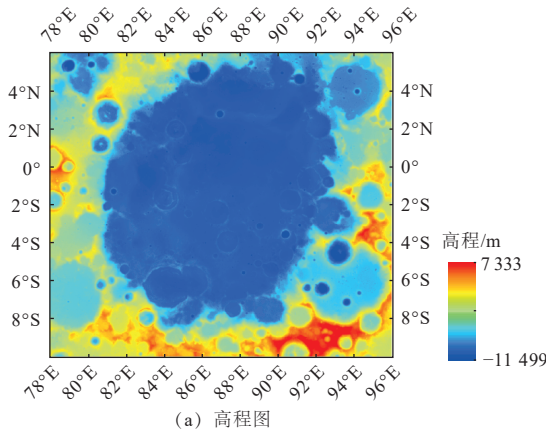
月球漩涡是高反照率的环状和带状,与月球磁异常相关^[24],至今仍是月球科学最著名的谜团之一,对了解月球磁场的形成与演化具有积极的帮助^[25]。在史密斯海东北部Em单元,Denevi等^[24]发现了两处月球漩涡(图6),分布在以(91.5°E, 3.4°S)和(91.9°E, 1.9°S)为中心的区域,面积分别为338.7 km²和57.8 km²。

2 地形特征

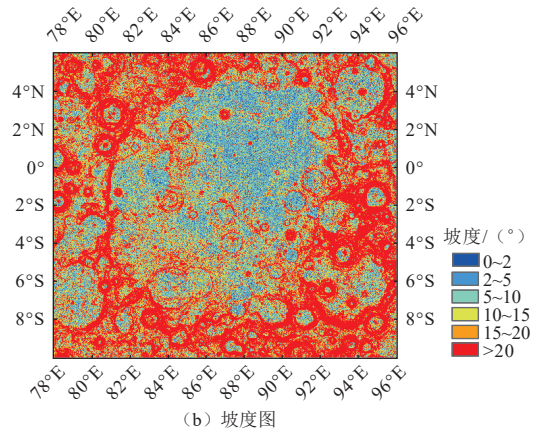
地形是月球科研站选址首要考虑的因素之一^[26]。基于SLDEM 2015高程数据,系统分析了史密斯海的地形特征,参见图7(a);并采用最大平均值法得到史密斯海地区的坡度,图7(b)^[27]。

史密斯盆地比北部月陆低约5 km,比南部月陆低约7 km。内部最高点约为-2 275.4 m,最低点约为-5 589.4 m。盆地平均高程约为-2 952.4 m。

图7(b)表明,盆地坡度最大值约为56.6°,平均坡度约为5.3°。东北部Em单元平均高程约为-3 372.3 m,平均坡度为3.8°。地形起伏较大、存在多个较大撞击坑



(a) 高程图



(b) 坡度图

图7 史密斯海高程图和坡度图

Fig. 7 Elevation map and Slope map of Mare Smythii

3 物质成分特征

基于克莱门汀卫星紫外/可见光数据,采用Lucy方法^[28],反演了月表(FeO+TiO₂)含量(FTA)。基于“月神1号”卫星多波段成像仪数据,采用Lemelin等方法^[29],反演了单斜辉石(CPX)和橄榄石(OL)含量(参见图8)。

图8表明,史密斯海内部的不同地质单元的FTA、CPX、OL含量,呈明显的不均匀分布。

东北部Em单元FTA、CPX、OL含量最高,且呈大面积连续分布。Em单元FTA含量最高值约为33.1 wt.%,平均值约为19.1 wt.%; CPX最高值约为40.4 wt.%,平均值约为22.5 wt.%; OL最高值约为24.9 wt.%,平均值约为9.3 wt.%。

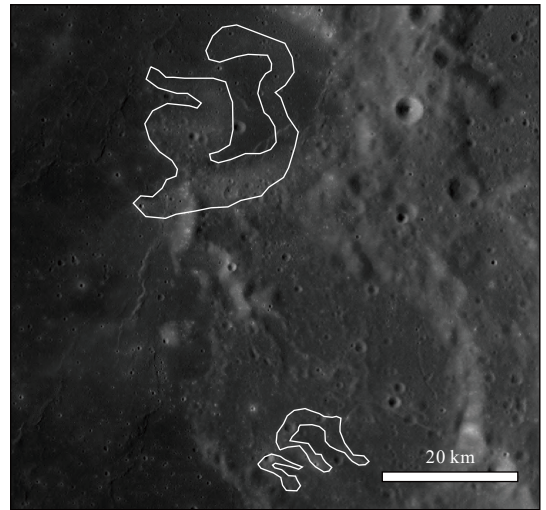


图6 史密斯海漩涡的LRO卫星广角相机影像(白线所示)

Fig. 6 LRO wide angle camera image of lunar swirls in Mare Smythii (Outlined by the white line)

的Idbp单元,平均高程约为-2 911.9 m,平均坡度为5.5°。

年龄较新的Em单元,地形起伏小,撞击坑数量少,完全可以满足探测器着陆要求,是建设月球长期科研站的理想区域。

西南部Idbp单元的FTA、CPX和OL含量,北部要高于南部。FTA最高值约为19.9 wt.%,平均值约为10.18 wt.%; CPX最高值约为22.4 wt.%,平均值约为19.6 wt.%; OL最高值约为23.6 wt.%,平均值约为9.1 wt.%。

Edm单元,FTA含量最高值出现在Kiess撞击坑外部,达16.3 wt.%, CPX平均含量约为12.6 wt.%, OL平均含量约为11 wt.%。

隐月海地区,平均FTA含量约为14.8 wt.%, CPX含量约为21.9 wt.%, OL含量约为12.79 wt.%。

在底部破裂撞击坑Ifc单元,在出现坑底玄武岩的撞击坑中,FTA含量最高出现在Runge撞击坑,参见图9(a),达23.5 wt.%。FTA含量最低出现在

Swasey撞击坑, 参见图9 (b), 达11.4 wt.%. 在内坡出现玄武岩的撞击坑中, FTA含量最高值出现在Haldane撞击坑, 见图9 (c), 达13.3 wt.%. FTA含量最低出现在Doyle撞击坑, 见图9 (d), 达10.6 wt.%. 在坑间出现玄武岩的区域, FTA最高出现在Haldane撞击坑和Runge撞击坑之间以(85.5°E, 2.9°S)为中心的区域, 达22.6 wt.%. CPX和OL在这些区域的平均含量没有明显的规律性特征。

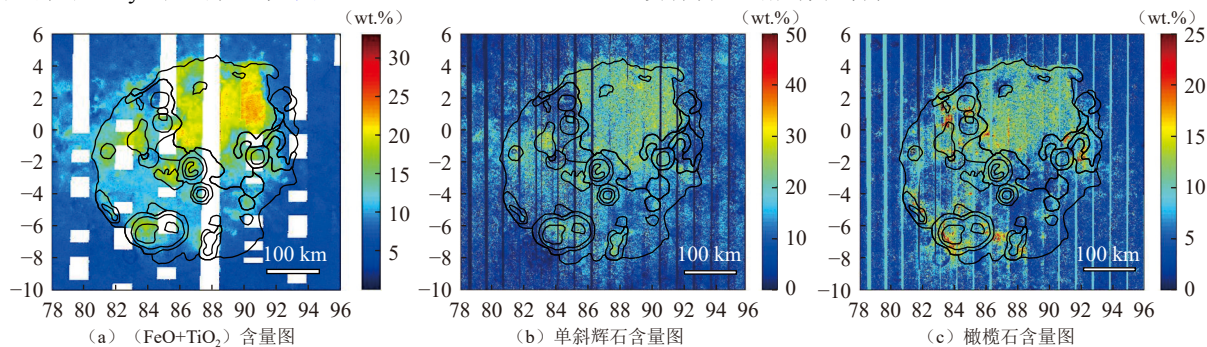


图 8 史密斯海成分图 (黑线表示Gillis等^[15]的地质界线)

Fig. 8 Composition maps of Mare Smythii (The black line denote the geologic boundaries of Gillis et al^[15])

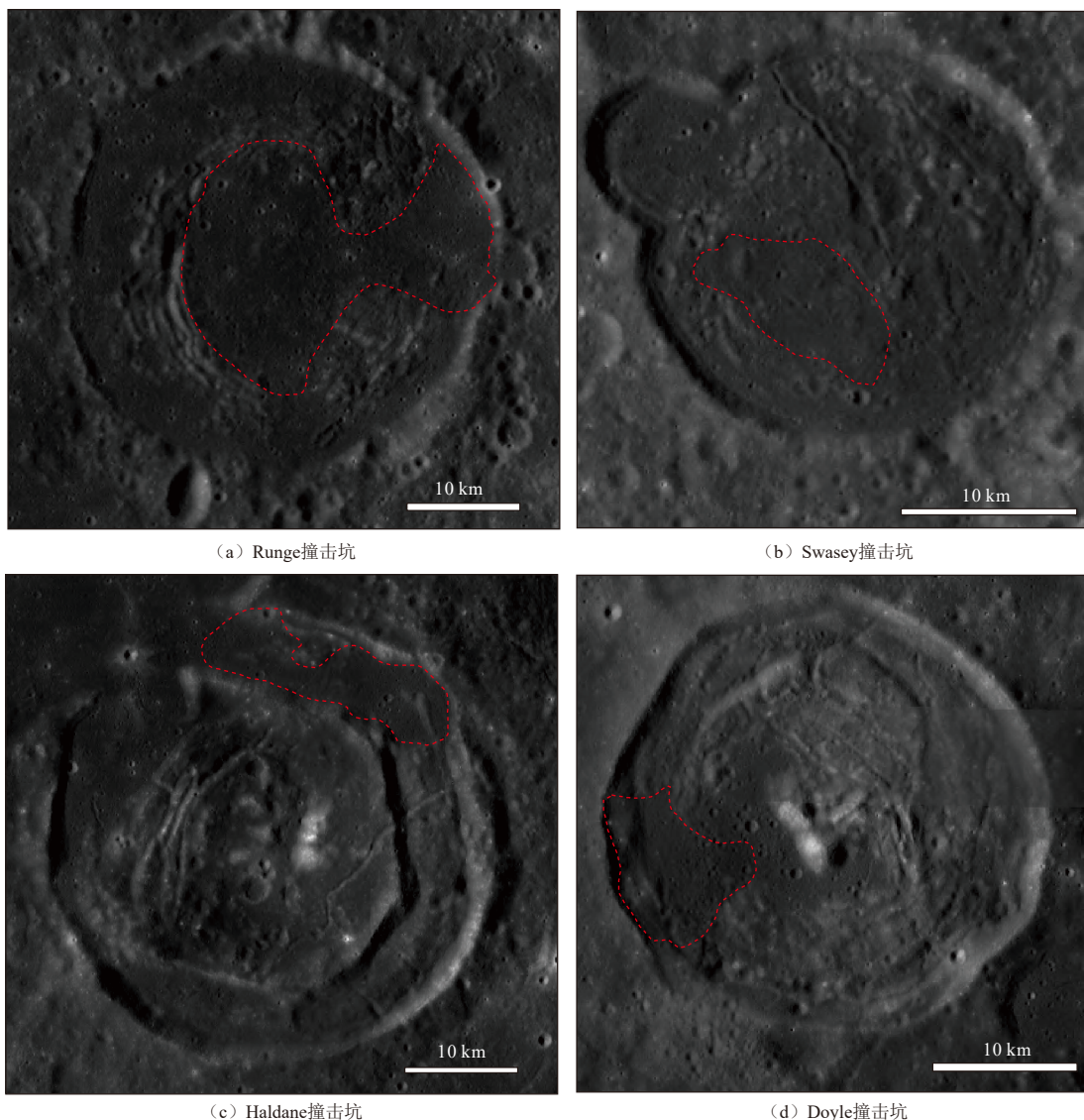


图 9 典型底部破裂撞击坑的LRO卫星广角相机影像 (图中红色虚线指示了玄武岩范围)

Fig. 9 LRO wide angle camera images of typical floor-fractured craters (Mare basalts are outlined by the red dotted lines)

4 微波热辐射特征

基于“嫦娥二号”卫星微波辐射计数据,分析了盆地物质的热物理特征(图10)。研究中根据Liu等^[30]方法制作了史密斯海白天和夜晚亮温图(图10)。

图10表明,史密斯海出现了异常亮温表现。主要表现在以下几点。

1) 基于理论模型的数值模拟结果,FTA含量越

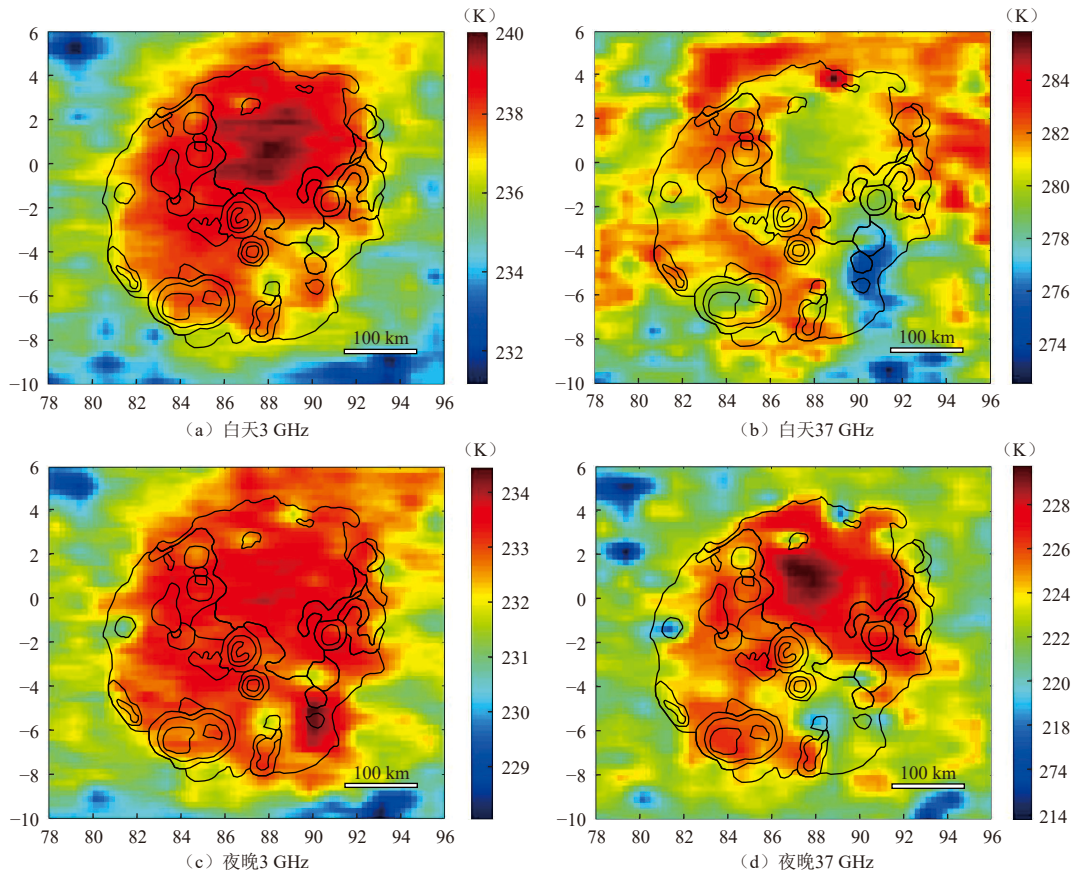


图10 史密斯海亮温图(黑线表示Gillis等^[45]的地质界线)

Fig. 10 Brightness temperature maps of Mare Smythii(The black line denote the geologic boundaries of Gillis et al^[45])

2) Em单元的37 GHz亮温,白天明显低于其它单元;夜晚以(88°E, 1°N)为中心,出现了异常高亮温区,与理论模拟结果相反。考虑到微波的穿透特征,这种高亮温表现表明,Em单元表层,很可能存在一种储热能力极强的物质,造成了白天的异常低亮温和夜晚的异常高亮温。但是,当前的月球科学研究中,尚缺乏对这种特殊物质的认识。

3) 在Swasey撞击坑周围,白天和夜晚的37 GHz亮温图上,都出现了极低亮温值。这也不符合数值模拟结果。造成这种异常亮温表现的地质成因机制,目前尚缺乏研究。

4) Ishiyama等^[35]基于LRS数据,发现了可能代表不同深度玄武岩分布的3个环形构造。将这3个环形构

高,白天的亮温越高,晚上越低^[31]。在Em单元,白天:3 GHz出现了盆地最高亮温,符合基于理论模拟结果^[30-31];夜晚:3 GHz亮温与周围单元的差异不明显,与基于理论模拟结果相悖。根据东海、莫斯科海和云海等地区相似的高亮温异常,Meng等^[32-34]认为很可能是较高的下垫面温度造成的,这对重新认识浅层月亮的温度不均匀性具有重要意义。

造叠加在夜晚的37 GHz亮温图上(图11),发现内环大致与异常高亮温区吻合,而中环基本上包括了高亮温异常区。同时,Liu等^[30]发现中环的东部存在皱脊。但是,亮温异常与皱脊和环形构造关联的地质涵义是什么,目前也缺乏足够的研究。

5 科研站选址建议及科学目标实现

综合史密斯海的地质、成分、亮温研究成果,建议以Em单元内部的37 GHz夜晚高亮温异常区为参考,即在以(88°E, 1°N)为中心的区域(点A),建设史密斯海月球长期科研站,并根据坡度图,见图7(b)和10 m空间分辨率的TC(地形相机)影像规划了3种巡视路线(图12)。主要科学依据如下:

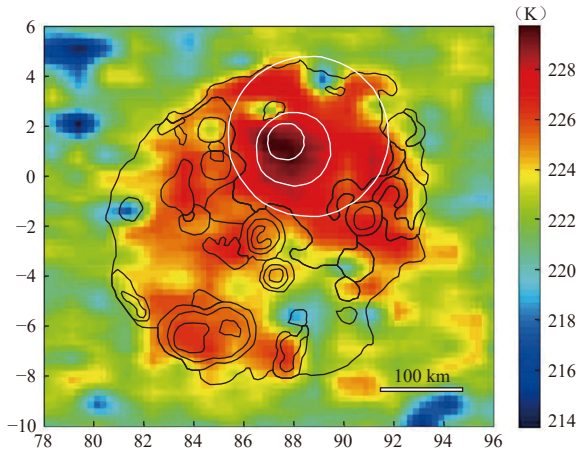


图 11 夜间 37 GHz 亮温与 Ishiyama 等^[35]基于 SELENE/LRS 数据提取的环形构造 (白色环线) 叠加

Fig. 11 37 GHz brightness temperature maps overlaid by ring structures (white circles) identified by Ishiyama et al^[35] based on SELENE/LRS data

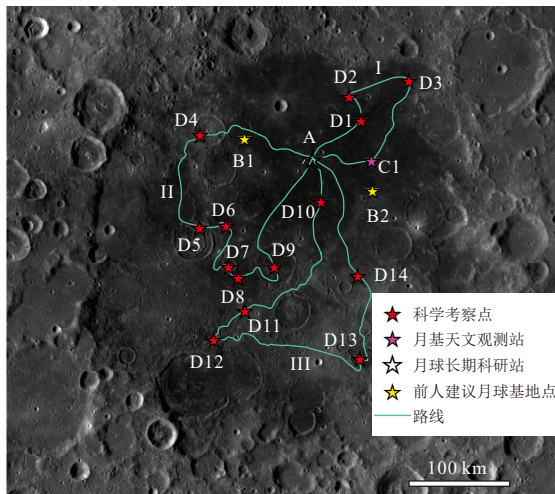


图 12 月球长期科研站选址、考察点分布和巡视路线规划 (底图为 LRO 卫星广角相机影像)

Fig. 12 Site selection, candidate exploring sites, and proposed routes of long-term lunar research station (The basemap is a LRO WAC map)

1) 区域撞击坑数量较少, 平均高程为 $-3\ 902.1\ \text{m}$, 平均坡度为 3.2° , 基本上都能满足探测器的着陆要求。

2) 选址区域的 FTA、OL 和 CPX 含量较高。统计结果表明, FTA 平均含量约为 $20.2\ \text{wt.}\%$, 厚度达 $400\ \text{m}$ 以上。这些氧化物可用于生产氧气, 提取金属铁、钛等, 以满足可能的人类长期驻留的生活需求。同时, 具有高 TiO_2 含量的月壤, ^3He 含量也高^[36], 满足月球基地建设对资源利用的科学目标。

同时, FTA 含量从一定程度上能够反映玄武岩年龄, 辉石记录了月球岩石形成的条件和演化历史。OL 是月球岩浆冷却结晶后析出的矿物之一, 在年轻的月海玄武岩中含量较高^[22]。因此, 对选址区的原位成分探测, 对月球地质演化研究具有重要的约束意义。

3) 从维持科研站运行所需能量的角度来看, 这里位于低纬度地区, 具有最强的月表光照强度; 相对于光照强度偏弱的高中纬度地区, 这里是月球上白天获取太阳能的最理想区域之一。另外, 根据微波探测成果, 这里是月球上为数不多的、具有浅表层热异常的区域; 较高的下垫面温度 (可能仅为几 K), 不仅能为月球长期科研站的维护节约能源, 也是研究浅层月亮异常热活动特征的理想区域。

4) 建议在距离 A 点往东约 $60\ \text{km}$ 的区域 (90°E , 1°N) (C1 点), 建设对空间探测的毫米波、亚毫米波天文设备, 用以开展月基空间射电天文研究, 以减少地球辐射的影响; 同时, 相对于中、高纬度地区, 位于赤道附近的月基天文观测站, 可以实现全域对空探测, 是开展空间射电研究的理想场所。

另外, 在科研站附近开展原位月壤内部热流探测和物质成分探测, 验证基于微波辐射计数据的亮温异常发现, 以及所推测的尚未被确认的、具有极强储热能力的物质, 相关研究对重新认识月壳的纵向物质成分不均匀性, 具有重要的参考意义。

基于轨道遥感数据, Spudis 等^[16]建议建立以 (90°E , 0°N) 为中心的月球基地 (B2), 可开展地质科学考察和月球资源的利用和开发; 基于克莱门汀数据和月球勘探号数据, Taylor 等^[37]建议建立以 (85.8°E , 1.7°N) 为中心的月球基地 (B1), 可以满足科学和资源需求, 并可进行屏蔽地球无线电波的天文观测。相对来说, 本研究所建议的月球长期科研站区域 (A), 位于史密斯海氧化物含量最高的区域, 且具有最强的月壤内部热异常和表面特殊物质, 相对于 B1 和 B2 点可以更好地开展月球科学研究和资源利用; 所建立的 C1 点同样可以开展长期空间天文观测, 实现与 B1 点相同的空间射电观测, 且与 A 点具有更好的地面可达性和更多的无地球辐射影响时间。

以月球长期科研站 A 为中心, 还可以开展如下所述的长距离、多目标的重要科研任务:

1) 开展皱脊、月溪和漩涡的考察。在 D1 点开展皱脊的考察。对于皱脊的形成主要有 3 个假说: 构造起因^[38]、火山作用^[23]以及构造和火山共同作用^[39]。对 D1 点的原位探测, 将是月球上首次以皱脊为目标的科学考察; 相关研究成果不仅可以对皱脊成因进行探究, 而且对进一步解释微波热异常的成因机制以及基于 LRS 数据所发现的环形构造与微波热异常相吻合的地质涵义, 具有重要科学价值。

在 D2 点开展月溪考察。月溪的形成表明玄武岩具有较高的熔融温度、较低的黏度和较大的喷发速率。

因此,对D2点考察将极大丰富岩浆活动信息的研究^[40]。

在D3点开展月球漩涡的考察。目前,月球涡旋的成因有3种假说:彗星撞击^[41]、太阳风偏移^[42]和月尘搬运^[43]。对D3点的考察,对揭示月球漩涡的形成和演化机制具有重要意义。

结合地形特征,设计探测路线I:考察车从A点出发,沿路线I对D1点、D2点、D3点;在途中经过C1点,路线总长约312.5 km。该路线主要岩性为Em单元玄武岩。

2)开展底部破裂撞击坑的综合考察。史密斯海地区存在11个中等尺度的底部破裂撞击坑,根据成分、玄武岩出现位置和年龄,选择以下几个区域进行底部破裂撞击坑的综合考察。

Runge撞击坑(D9点),在坑底分布有Em单元玄武岩,是底部破裂撞击坑内部FTA含量最高的地方。

Haldane撞击坑(D5点),在撞击坑内坡上发育有Em单元玄武岩,是内坡出现玄武岩的底部破裂撞击坑中FTA含量最高的地方。

在Haldane撞击坑和Runge撞击坑之间,出现了小面积连续分布的Em单元玄武岩和Im₂单元玄武岩,选择以(85.5°E, 2.9°S)为中心的区域(D8点)进行Em单元考察,选择以(85.3°E, 1.1°S)为中心的区域(D6点)进行Im₂单元玄武岩考察。

Doyle撞击坑(D4点),内坡上发育有Em单元玄武岩,是内坡出现玄武岩的底部破裂撞击坑中FTA含量最低的地方。

Talbot撞击坑(D7点),为非底部破裂撞击坑,对该撞击坑的考察用于与底部破裂撞击坑进行对比。

结合地形特征,设计考察路线II:从A点出现,依次对D4点、D5点、D6点、D7点、D8点和D9点进行原位考察,路线总长约560.3 km。该路线经过的Em单元玄武岩长度约为326.6 km,经过Im₂单元玄武岩长度约为27.9 km,经过Idbp单元的长度约为205.8 km。

目前,对于底部破裂撞击坑的形成机制,有岩浆侵入^[44]和黏性松弛^[45]两个解释模型。通过原位考察,对深化当前的底部破裂撞击坑的成因机制和月球的动力学演化机制研究,以及深化当前的月海岩浆演化历史研究,具有重要科学价值。

3)开展盆地底部物质成分的综合考察。目前,对西南部的Idbp单元物质成分具有争议。Conca等^[46]基于“阿波罗15”(Apollo-15)的X射线荧光数据认为Idbp单元为高地物质与火山物质的混合物,基于反照率和撞击坑数据,Stewart等^[47]认为该单元为来自危海盆地的溅射物,而基于克莱门汀数据,Gillis等^[15]则认

为Idbp单元是早期玄武岩与高地物质等比例混合的结果。因此,在Idbp单元设置考察点D11,该点的考察成果,对确定Idbp的物质成分特征及其地质意义具有重要科学价值。

在火山碎屑堆积物Edm单元设置考察点D12。火山碎屑堆积物代表了深部月幔(300~400 km)的物质成分特征^[48],因此,对D12点的考察,对研究月球火山活动历史和月球热演化历史等具有重要的意义^[17]。

在Swasey撞击坑(D13点)开展低亮温异常的成因机制研究。在37 GHz亮温图上,白天和夜晚都出现了低亮温异常,目前尚缺乏对此类冷异常成因机制的研究。因此,对D13点原位考察,对拓展我国独有、世界唯一的“嫦娥一号”“嫦娥二号”卫星微波辐射计数据的应用具有重要价值。同时,Swasey撞击坑(D13点),坑底发育有Em单元玄武岩,是坑底出现玄武岩的底部破裂撞击坑中FTA含量最低的地方,因此,在D13点可以同时开展底部破裂撞击坑考察,与第II巡视路线联合,深化底部破裂撞击坑形成机制的认识。

在D14点开展隐月海考察,其代表了月球早期的岩浆活动。当前对隐月海的研究主要是基于可见光数据进行的推测分析,尚缺乏对隐月海的空间分布机制的研究。对D14点的考察,将对进一步探测隐月海的面积、体量提供标准,为拓展基于星载遥感数据的隐月海探测、研究早期月球火山活动规模提供了一个重要参考。

在巡视路线上,除了长期科研站所在的A点,建议在亮温异常与Ishiyama等^[35]所发现的环形构造吻合的区域(88.3°E, 0.3°S),增加考察点D10点,对所发现的环形构造吻合的成因及所代表的地质涵义进行考察。

结合地形特征,设计考察路线III:从A点出发,沿路线III对D10点、D11点、D12点、D13点和D14点进行原位考察,路线总长约669.7 km。其中,经过Em单元的长度约为180.7 km,经过Edm单元的长度约为13.3 km,经过Idbp单元的长度约为475.7 km。

值得注意的是,史密斯海为部分填充,而路线III几乎经过了史密斯海所有主要的玄武岩单元。因此,对路线III的考察,将有助于重建月球早期撞击事件的物质成分演化历史和月海岩浆演化历史。

6 结 论

本文基于SLDEM 2015数据、克莱门汀紫外可见光数据、“月神1号”多波段成像仪数据、“嫦娥二号”微波辐射计数据,通过对史密斯海地质、地形、物质成分、微波热辐射等特征的系统分析,进行了史密斯海

月球长期科研站的选址建议及分析。主要成果如下:

1) 从科学研究、天文观测和满足长期驻留所需要的能源和资源需要等角度,分析了在史密斯海建立月球长期科研站的重要价值;

2) 针对史密斯海的构造特征、底部破裂撞击坑成因机制和盆地底部物质成分分布等科学目标,设计了3条巡视路线,共计14个考察点;

以长期驻留的月球科研站为中心,这3条路线可以分别进行巡视,在条件允许的情况下也建议开展对2条或3条路线的同时巡视。在后一种情况下,建议结合最新地球物理探测手段,进行史密斯海内部结构的系统探测,深化对科学考察目标的研究。

相对于前人的月球着陆区选择工作,本研究提出了以满足人类长期驻留需求为目标的科研站建议;同时,广泛存在的底部破裂撞击坑以及底部、内坡和坑间不同期次玄武岩的出现、存在争议的Idbp物质以及强烈的微波热异常和造成浅表层异常的特殊物质的存在,都表明了史密斯海具有极高的科考价值。在史密斯海建立月球长期科研站,开展系统、综合的科学探测,将有助于重建月球早期撞击事件的物质成分演化历史和月海岩浆演化历史,对推动月球科学发展具有重要意义。

致谢: 本研究所使用的WAC影像、SLDEM 2015高程数据、“月神1号”卫星多波段成像仪数据、克莱门汀卫星紫外/可见光数据由行星数据系统获取,TC影像数据由Kaguya科学数据档案获取,“嫦娥二号”卫星微波辐射计数据由探月工程数据与信息服务系统获取。在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 裴照宇,刘继忠,王倩,等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. *科学通报*, 2020, 65(24): 2577-2586.
- PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q, et al. Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. *Chin Sci Bull*, 2020, 65(24): 2577-2586.
- [2] 肖龙, 乔乐, 肖智勇, 等. 月球着陆探测值得关注的主要科学问题及着陆区选址建议[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46(2): 9-30.
- XIAO L, QIAO L, XIAO Z Y, et al. Major scientific objectives and candidate landing sites suggested for future lunar explorations[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46(2): 9-30.
- [3] BURKE J D. Merits of a lunar polar base location [C]//Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century. Hoston, USA: [s.n.], 1985.
- [4] 张焯, 杜宇, 李飞, 等. 月球南极探测着陆工程选址建议[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2020, 7(3): 232-240.
- ZHANG H, DU Y, LI F, et al. Proposals for lunar south polar region soft landing sites Selection[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(3): 232-240.
- [5] BASILEVSKY A T, KRASILNIKOV S S, IVANOV M A, et al. Potential lunar base on Mons Malapert: topographic, geologic and trafficability considerations[J]. *Solar System Research*, 2019, 53(5): 383-398.
- [6] 肖龙, 黄俊, 赵佳伟, 等. 月面熔岩管洞穴探测的意义与初步设想[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(11): 86-99.
- XIAO L, HUANG J, ZHAO J W, et al. Significance and preliminary proposal for exploring the lunar lava tubes[J]. *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48(11): 86-99.
- [7] HAWKE B R, COOMBS C R, CAMPBELL B A, et al. Remote sensing of regional pyroclastic deposits on the north central portion of the lunar nearside[J]. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, 1991, 21: 377-89.
- [8] COOMBS C R, HAWKE B R, ALLEN C C. Exploring aristarchus plateau as a potential lunar base site[J]. *ASCE*, 1998, 10: 608-615.
- [9] DUKE M B, MENDELL W W, ROBERTS B B. Strategies for a permanent lunar base[J]//Lunar Base Agriculture: Soils for Plant Growth, 1989: 23-35.
- [10] 中国政府网. 2021中国的航天[EB/OL]. (2022-01-28). http://www.gov.cn/zhengce/2022-01/28/content_5670920.htm.
- [11] ZHAO S Y, QIAN Y Q, XIAO L, et al. Lunar mare fecunditatis: a science-rich region and a concept mission for long-distance exploration[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 2072-4292.
- [12] ROBINSON M S, BLEWETT D T, FRANK E, et al. Intrepid: lunar roving prospector[C]//The AGU Fall Meeting. San Francisco, CA, USA: [s. n.], 2019.
- [13] HIESINGER H, HEAD J W, WOLF U, et al. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts in Mare Frigoris and other nearside maria based on crater size and frequency distribution measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(E3): E03003.
- [14] WILHELMS D E, EL-BAZ F. Geologic map of the east side of the Moon[M]. USA: U. S. Geol. Surv, 1977.
- [15] GILLIS J J, SPUDIS P D. Geology of the Smythii and Marginis region of the Moon: using integrated remotely sensed data[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2000, 105(E2): 4217-4233.
- [16] SPUDIS P D, HOOD L L. Geological and geophysical field investigations from a lunar base at Mare Smythii[J]. *Nasa Johnson Space Center*, 1992(1): 163-174.
- [17] HIESINGER H, HEAD J W III. New views of lunar geoscience: an introduction and overview[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2006, 60(1): 1-81.
- [18] HOWARD K A. Avalanche mode of motion: Implications from lunar examples[J]. *Science*, 1973, 180(8): 1052-1055.
- [19] HAWKE B R, GIGUERE T A, GADDIS L R, et al. Cryptomare and pyroclastic deposits on the northern east side of the Moon[C]// Lunar & Planetary Science Conference. [S.l.]: Lunar and Planetary Science Institute, 2013.
- [20] WHITTEN J L, HEAD J W. Lunar cryptomaria: physical characteristics, distribution, and implications for ancient volcanism[J]. *Icarus*, 2015, 247: 150-171.
- [21] YINGST R A, HEAD J W. Characteristics of lunar mare deposits in Smythii and Marginis basins: implications for magma transport mechanisms[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1998,

- 103(E5): 11135-11158.
- [22] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [23] WATTERS T R, SCHULTZ R A. Planetary tectonics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [24] DENEVI B W, ROBINSON M S, BOYD A K, et al. The distribution and extent of lunar swirls[J]. *ICARUS*, 2016, 273: 53-67.
- [25] EL-BAZ F. The alhazen to abul wafa swirl belt: an extensive field of light-colored sinuous markings[J]. Apollo 16: Preliminary Science Report, 1972: 29-93.
- [26] MENGES J D, CANNON K M. The search for natural landing pads on the Moon and Mars[C]// 53rd Lunar and Planetary Science Conference. [S. l.]: LPSC, 2020.
- [27] MCDONNELL R A, LLOYD C, BURROUGH P. Principles of geographical information systems[M]. USA: Oxford University Press, 1998.
- [28] 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]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E8): 20,279-20,305.
- [29] LEMELIN M, LUCEY P G, SONG E, et al. Lunar central peak mineralogy and iron content using the Kaguya multiband imager: reassessment of the compositional structure of the lunar crust[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(5): 869-887.
- [30] LIU C, MEI L S, MENG Z G, et al. Special thermophysical features of floor materials in mare Smythii indicated by CE-2 CELMS data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 8135-8143.
- [31] MENG Z G, HU S, WANG T X, et al. Passive microwave probing mare basalts in mare imbrium using CE-2 CELMS data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(9): 3097-3104.
- [32] MENG Z G, ZHANG J D, TANG Z S, et al. Microwave thermal emission features of mare orientale revealed by CELMS data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, 10(99): 5402-5405.
- [33] MENG Z G, CHEN S B, WANG Y Z, et al. Complex mare deposits revealed by CE-2 CELMS data in mare nubium[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 2475-2484.
- [34] MENG Z G, CHEN S B, WANG Y Z, et al. Reevaluating mare moscoviense and its vicinity using Chang'e-2 microwave sounder data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 535-539.
- [35] ISHIYAMA K, KUMAMOTO A. Volcanic history in the Smythii basin based on SELENE radar observation[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1-10.
- [36] FA W Z, JIN Y Q. Global inventory of Helium-3 in lunar regoliths estimated by a multi-channel microwave radiometer on the Chang-E 1 lunar satellite[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55: 4005-4009.
- [37] TAYLOR L A, TAYLOR D. Location of a lunar base: a site selection strategy[C]// Fifth International Conference on Space. [S. l.]: IAF, 1996.
- [38] STROM R G. Lunar mare ridges, rings and volcanic ring complexes[J]. *The Moon*, 1972, 51(11): 187-215.
- [39] 岳宗玉. 月球构造特征与遥感影像解译初步研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.
- [40] HURWITZ D M, HEAD J W, WILSON L, et al. Origin of lunar sinuous rilles: modeling effects of gravity, surface slope, and lava composition on erosion rates during the formation of Rima Prinz[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2012, 117(E12): E00H14.
- [41] SCHULTZ P H, SRNKA L J. Cometary collisions on the Moon and Mercury[J]. *Nature*, 1980, 284(5751): 22-26.
- [42] HOOD L L, WILLIAMS C R. The lunar swirls; distribution and possible origins[C]//The 19 Lunar and Planetary Science Conference. Houston, TX: Lunar and Planetary Institute, 1989.
- [43] GARRICK-BETHELL 1, HEAD J W, PIETERS C M. Spectral properties, magnetic fields, and dust transport at lunar swirls[J]. *Icarus*, 2011, 212(2): 480-492.
- [44] SCHULTZ P H. Floor-fractured lunar craters[J]. *Moon*, 1976, 15(3-4): 241-73.
- [45] HALL J L, SOLOMON S C, HEAD J W. Lunar floor-fractured craters: evidence for viscous relaxation of crater topography[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 105(E8): 20297-20305.
- [46] CONCA J, HUBBARD N. Evidence of early volcanism in Mare Smythii[C]//Lunar and Planetary Science Conference. Hoston USA: Lunar and Planetary Institute, 1979.
- [47] STEWART H E, WASKOM J D, DEHON R A. Photogeology and basin configuration of Mare Smythii[C]//Lunar and Planetary Science Conference. Hoston USA: Lunar and Planetary Institute, 1975.
- [48] DELANO J W. Pristine lunar glasses: criteria, data, and implications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91: 201-213.

作者简介:

孟治国(1978-),男,教授,主要研究方向:月球微波遥感。

通讯地址:长春市西民主大街938号,吉林大学地球探测科学与技术学院(130026)

电话:18643062191

E-mail: mengzg@jlu.edu.cn

常文清(1996-),男,硕士生,主要研究方向:遥感原理和应用研究。

通讯地址:长春市西民主大街938号,吉林大学地球探测科学与技术学院(130026)

电话:18300635170

E-mail: Changwq20@mails.jlu.edu.cn

Site Selection and Potential Scientific Targets Analysis of Mare Smythii for Constructing Long-Term Lunar Research Station

MENG Zhiguo^{1,2}, CHANG Wenqing¹, SHEN Chao³, PING Jinsong^{4,5}, HUANG Shaopeng⁶,
CAI Zhanchuan², ZHANG Yuanzhi^{4,5}

(1. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. The State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China;

3. College of Architecture, Harbin Institute of Technology University, Harbin 150006, China;

4. Radio Astronomical Division, National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100101, China;

5. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

6. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 430071, China)

Abstract: The Moon is the nearest neighbor of the Earth and the first planet for human deep space exploration. Thus, the construction of long-term lunar research station will be great significant to further explore the deep space in 21st century. Mare Smythii is located at the junction of the lunar farside and nearside, and it is rich in the geological diversities and scientific values. In this paper, combined with the SLDEM 2015 elevation data, Clementine UV/VIS data, Kaguya MI data, and Chang'E-2 microwave radiometer data, the geological significance, topography, material composition, and microwave thermal emission features of Mare Smythii are thoroughly analyzed. Then, the region centered at (88°E, 1°N) is proposed for constructing the long-term lunar research station with high priority from the perspectives of scientific research, resources, and energy. Finally, three routes are outlined according to the surface topography, and 14 candidate exploring sites are planned aiming to scientific studies and resource utilizations. This study is of essential significance for the construction of the long term lunar research stations in future.

Keywords: long-term lunar research station; Mare Smythii; geological importance; topography; brightness temperature

Highlights:

- The region centered at (88°E, 1°N) is identified to build the scientific station in Mare Smythii.
- Seven candidate sites are planned and their geological significances are provided.
- For the first time, the Chang'E-2 microwave radiometer data are employed as one of the important references in the site selection of the lunar bases.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 刘勇]