中国科学: 物理学 力学 天文学 2013 年 第 43 卷 第 11 期: 1370–1386
SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica phys.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

嫦娥专题·论文

月球虹湾地区地质特征解译及岩浆活动历史研究

乔乐, 肖龙*, 赵健楠, 黄倩

中国地质大学(武汉), 行星科学研究所, 武汉 430074
*联系人, E-mail: longxiao@cug.edu.cn

收稿日期: 2013-06-20; 接受日期: 2013-09-04
国家自然科学基金项目资助(批准号: 41373066, 41072045)

摘要 虹湾地区是我国嫦娥三号登月探测器的重要备选着陆区域之一, 其平坦的地形、复杂的演化历史和丰富的地质特征显示出良好的工程保障性和较大的科学价值. 该地区发育了丰富的地质特征, 包括月海皱脊、月溪、撞击坑和月坑链, 预示着该区域经历了复杂的地质演化历史. 但受探测数据分辨率等方面的限制, 前人对该地区岩浆活动的性质研究存在较大的差异, 在矿物学、地球化学特征以及典型地貌解译方面也存在诸多不足. 本文综合利用月球勘测轨道飞行器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)激光高度计(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)及相机(LROC)数据、克莱门汀(Clementine)紫外-可见光(UVVIS)多光谱数据和月球矿物制图仪(Moon Mineralogy Mapper (M^3))高光谱数据, 对虹湾地区的地形特征、物质成分及典型地貌特征进行了较为系统的解译和分析. 研究结果认为该区域经历了 4 次岩浆活动, 不同期次岩浆活动充填的玄武岩成分差别较大, 越往后期钛含量越高. 虹湾内部以成熟的富辉石岩石为主, 但是越往后期橄榄石含量逐渐增高, 而周边高地区域以富长石岩石为主, 在虹湾北部坑壁区域, 出露了一些富橄榄石岩石, 这些橄榄石可能来源于大型撞击作用挖掘的月幔物质. 虹湾地区地势比较平坦, 地质现象丰富, 利于开展着陆就位探测.

关键词 虹湾, 月球, 地质特征, 岩浆活动, 月球探测

PACS: 96.20.Br, 96.20.Dt, 96.20.Ka, 96.30.Bc, 91.40.Ac

doi: 10.1360/132013-297

1 引言

月球探测是一个国家科技水平和综合国力的重要体现, 它既是当代科学技术发展最前沿的领域之一, 也对一个国家的社会、经济、国防和科技等各方面具有全面带动作用. 继嫦娥一号、嫦娥二号发射成功以后, 嫦娥三号任务将在月表实现软着陆和巡视探测, 开展月表地形地貌与地质构造、矿物组成和化学成分、月球内部结构等一系列活动[1]. 位于月球正面雨海西北部的虹湾地区以其地势平坦等较高的工程保障性特点, 成为嫦娥三号登月探测器的重要备选着陆点 (http://news.xinhuanet.com/mil/2012-10/11/

引用格式: 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
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, doi: 10.1360/132013-297

c_123807057.htm), 从而成为最新的月球研究热点区域[2,3]. 同时虹湾内部还发育了大量的月海皱脊、月溪、撞击坑、月坑链等典型地貌, 这对于解释其成因与地质演化、印证月球早期的高密度撞击事件和岩浆活动历史具有重要启示意义, 使其成为月球地质学的重要研究区域[4,5].

Schaber[6]研究认为, 虹湾形成于雨海撞击事件之后的一次独立的撞击事件. 撞击作用形成了原始的"虹湾撞击坑(Iridum Crater)", 大量的撞击溅射碎屑堆积形成边缘隆起(Rim crest), 其中一部分构成了当今的侏罗山脉(Montes Jura). 其后虹湾和雨海盆地的玄武岩充填事件是虹湾地质演化历史上又一重要地质事件, 大量充填的玄武岩不仅覆盖了原始撞击坑底部, 还埋藏了侏罗山脉南东部和原始雨海盆地的部分内环, 利用撞击坑直径和深度关系推算出虹湾内部充填的玄武岩厚度大于 500 m[7].

虹湾地区经历了多次岩浆活动, 显示出地质历史的复杂性和多阶段性. 但是由于早期影像数据空间分辨率方面的限制, 对于不同期次岩浆活动的分布范围和时间跨度, 前人研究结果存在较大的差异. Hiesinger 等人[8]基于伽利略号(Galileo) Earth/Moon Encounter 2 (EM2)多光谱影像数据, 将虹湾内部划分为 4 个光谱相似性区域, 并利用月球轨道号(Lunar Orbiter, LO)影像数据和撞击坑统计方法计算出这 4 个区域的表面年龄介于 3.39–2.96 Ga. 虽然 Hiesinger 等人[8]的结果定年结果与 Schaber[6]的地层划定比较一致, 但两者对与各期次岩浆活动的分布范围划分存在较大的差异. Bugiolacchi 和 Guest[9]基于克莱门汀(Clementine)紫外-可见光(UVVIS)光谱数据和铁钛元素含量数据, 将虹湾内部月海区域划分为 3 个地层单元, 并利用撞击坑统计方法计算出 3 个单元的表面年龄分别为 3.31, 2.42 和 2.22 Ga, 但是与前人结果相比, Bugiolacchi 和 Guest 的定年结果整体偏年轻, 尤其是在北东部和中西部的部分区域, 定年结果显示为爱拉托逊纪地层单元(2.42 Ga), 较前人估算的年龄年轻. 另外, 限于数据光谱分辨率等方面的不足, 前人对虹湾内部不同时期充填的玄武岩的矿物学、地球化学特征研究不够, 而这对于制约不同地质历史时期岩浆活动的性质却是非常重要的.

除了地质过程的复杂性外, 虹湾地区还发育了丰富的地貌特征, 如皱脊、月溪、撞击坑. 在阿波罗探月时期编制的虹湾地区地质图中, 就标明虹湾地区分布了大量的月海皱脊和蜿蜒型月溪[6]. 这些地貌特征形态各异, 规模大小不一. 不同类型的地貌特征反映了不同时期的地质改造活动, 如环绕虹湾周围的侏罗山脉一般认为是在虹湾形成之时, 由大量的溅射物堆积而成[6], 而散布在虹湾内部的大量小型撞击坑、月海皱脊和月溪一般认为是岩浆活动结束后构造活动或撞击活动的结果. 但是由于早期数据空间分辨率的限制, 一些重要地貌特征, 如月坑链等, 并不能完全识别出来, 而一些重要地貌特征的定量化描述和研究也未能开展. 对于月溪、月坑链的成因也存在广泛的争议[10–16], 如关于月坑链就有 2 次撞击成因、构造成因以及岩浆活动成因等多种观点. 虹湾地区丰富的地貌特征进一步显示了该区域复杂的地质演化历史.

由此可见, 虹湾地区在工程探测和科学研究方面均显示出较大的重要性, 但是前人研究由于数据分辨率等方面的限制, 对虹湾地区岩浆活动的时间跨度、分布范围和岩浆性质研究存在较大的差异, 对矿物学、地球化学特征的研究和典型地貌特征的解译存在诸多不足. 因此, 利用新近获取的多源遥感探测数据对虹湾地区进行全新的研究将显著提高我们对该区域地质特征和演化历史的认识, 同时还可为我国嫦娥三号着陆巡航探测提供必要的科学信息, 深化探测目标, 使科学任务成果最大化. 本文综合利用月球勘测轨道飞行器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)激光高度计(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)及相机 (LROC)数据、Clementine UVVIS 多光谱数据和月球矿物制图仪(Moon Mineralogy Mapper (M^3))高光谱数据, 对虹湾地区的地形特征、物质成分、地貌特征进行了较为系统的解译与分析, 对该地区不同时期岩浆活动的性质、富橄榄石物质的来源、月海皱脊等地貌特征的起源进行了分析和探讨.

2 区域地质背景

虹湾位于雨海北西部, 纬度跨度为 40.53–48.01°N, 经度跨度为 36.38–25.82°W, 直径为 249.29 km, 中心坐标为 45.1°N, 31.67°W(基于 LOLA 2011 控制网). 从虹湾地区地形图(图 1)可以看出, 从北东部到南西部, 虹湾被侏罗山脉(Montes Jura)所环绕, 并与比安歧尼(Bianchini)、莫帕屠伊斯(Maupertuis)、夏普(Sharp)3 个较大的撞击坑相邻, 然后分别通过南西

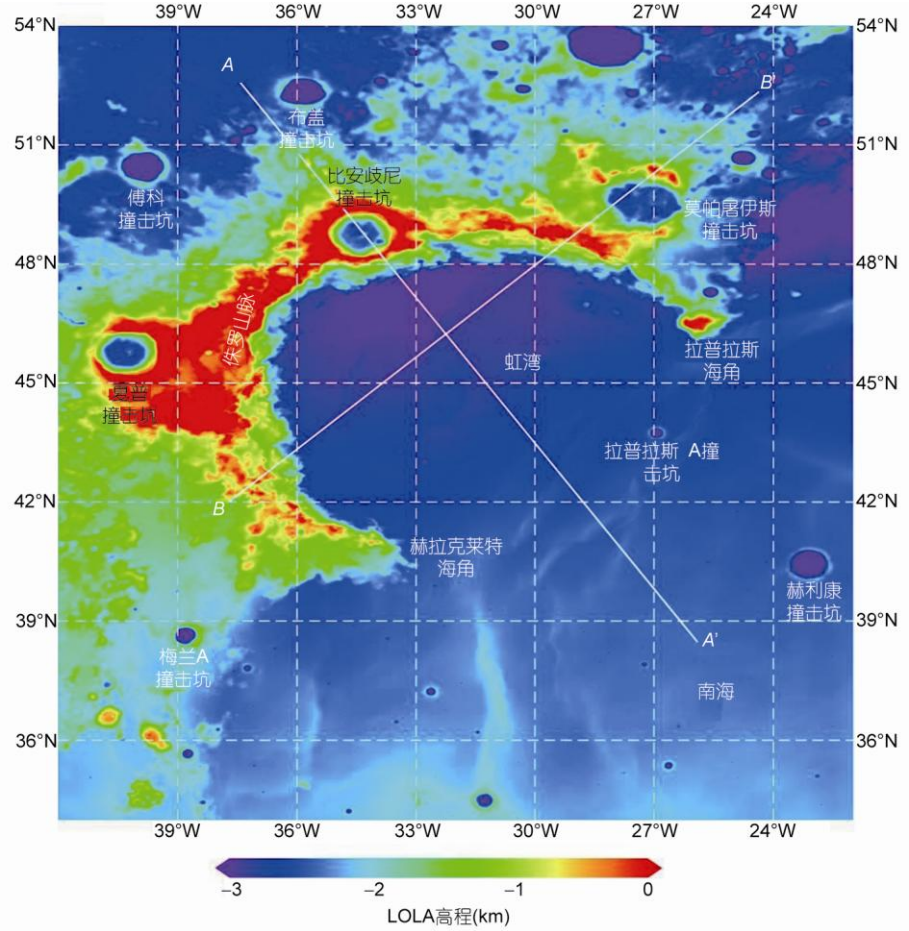


图 1　月球虹湾及周边区域地形图(基于 LOLA 激光测高数据, 256 像素/度)

文字标注了一些重要的地貌, 如侏罗山脉(Montes Jura)和拉普拉斯海角(Promontorium Laplace), 白色实线显示了图 2 中提取的高程剖面所在位置

Figure 1　Topography map of the Sinus Iridum and surrounding areas (based on LOLA data, 256 pixels/degree). Some key geographic features are labeled with their names, e.g., Montes Jura and Promontorium Laplace. The white solid lines show the location of elevation profile derived in Figure 2.

角的赫拉克莱特(Heraclides)海角和北东角的拉普拉斯(Laplace)海角与雨海相邻. 在虹湾和雨海的交界处, 存在一个较大的撞击坑, 拉普拉斯 A(Laplace A)撞击坑, 直径约 8 km.

前人对虹湾地区的研究主要集中在地层学方面. 最早在 Schaber[6]编制的虹湾地区 1:100 万地质图中, 基于 LO 系列探测器获得的月球较高分辨率影像(LO 4 影像: 90 m/像素, LO 5 影像: 7 m/像素), 通过研究不同地层单元的反照率、颜色和撞击坑密度, 以及相互之间的叠覆和交切关系, 将虹湾内部月海区域按照由老到新的顺序划分为 Im1, Im2 和 EIm 个地质单元, 其中 Im1 和 Im2 为晚雨海纪月海地层单元, 而 EIm 为爱拉托逊纪或雨海纪月海地层单元, 主要成分为火山成因的铁镁质熔岩流和熔结凝灰岩. 而散布在这些月海地层单元之上的则是最年轻的小型撞击坑地层单元, 包括爱拉托逊纪撞击坑地层单元(Ec 单元系列), 该类撞击坑没有相关的明亮辐射条纹, 另外还有哥白尼纪撞击坑地层单元(Cc 单元系列), 该类撞击坑周围有明亮的光环和辐射条纹. 同时还存在大面积的辐射块状单元和二次撞击坑链(Ccsc 单元), 可能是由哥白尼纪的哥白尼、阿里斯基尔、阿里斯塔克这几个大型撞击坑的撞击溅射物的二次撞击引起的[6]. 地层学分析结果表层虹湾地区经历了多次的岩浆充填事件, 岩浆活动时间从晚雨海纪跨度到爱拉

托逊纪.

3 虹湾地区地形分析

虹湾地区作为嫦娥三号登月探测器的重要备选着落点, 工程意义及科学价值都比较重大, 所以保证月球软着陆探测器的安全着陆、月球车的运移、月面试验的顺利开展等一系列活动的安全实施就显得尤为重要. 而着陆区域月球表面的地势陡峭或平坦状况、坡度、粗糙度等地形因子就对月面活动的安全性与可控性有着重要的影响. 本文基于 LOLA 月球高程数据, 建立了月球虹湾地区数字高程模型, 对虹湾地区的地形进行了定量化得描述.

3.1 LOLA 高程数据

LRO 上搭载的 LOLA 是一个多波束的激光高度计, 发射波长为 1064.4 nm, 发射频率为 28 Hz. 激光源发射的波束被一个衍射光学部件分离成 5 个输出波束, 每个波束的张开角为 100 mrad. 在 LRO 50 km 的轨道高度上, 每个激光波束在月球表面的光斑的直径约为 5 m. 这样, LOLA 每秒钟可以获取月表 140 个点的高程数据, 高程精度高达 0.1 m, 准确度达 1 m, 径向间隔为 57 m, 测量精度及密集程度比之前的 Clementine 探测器有很大的提高. LOLA 地形数据为定量分析月表微型地形及登月探测选址研究提供了强有力的数据支撑[17–19].

3.2 虹湾地区地形分析

分析虹湾地区 LOLA 高程数据(图 1, 参考月球椭球半径为 1737.4 km), 本文发现, 从大范围来讲, 虹湾地区和雨海北西部高程相当, 整体地势也较为平坦, 但与环绕其周围的侏罗山脉相比, 虹湾地区高程值大约介于–3000– –2000 m, 而侏罗山脉高程值一般都高于–2000 m, 虹湾地区呈现出明显的地势下陷, 显示出明显的撞击盆地特征. 同时, 从 LOLA 高程剖面(图 2)还可以很直观地发现撞击坑的边缘隆起, 以及 Bianchini 和 Maupertuis 撞击坑的中央峰. 在虹湾内部, 虽然整体地势较为平坦, 但是从南东部(与雨海接入处)向北西部(与侏罗山脉接入处)呈现一个下降的趋势, 高程从南东部的–2500 m 左右降到了北西部的–3000 m 以下, 高程降幅超过了 500 m(图 2(a)).

除了高程这一特性, 坡度和粗糙度也是描述地形特征的重要参数. 坡度是过地表任意一点的切平面与水平面的夹角, 表示了局部地表的倾斜程度. 坡度直接影响着地面物质流动和与能量转换的规模和强度[20], 对于未来登月探测器的着陆、运移、月面试验的开展都有重要影响. 本文基于高程数据(图 1), 在 3×3 栅格分析窗口中, 采用差分计算的方法计算出了每个像素点的坡度, 并制作了虹湾及周边区域坡度图(图 3). 可以看出在虹湾、雨海北西部区域内, 坡度都很小, 虹湾内部约 80%的区域坡度都在 1°以下, 而一些撞击坑坑壁处坡度较大, 如 Laplace A 撞击坑北部坑壁处的坡度高达 20°以上, 反映出了这些区域的地形陡峭特征.

粗糙度是反映地表侵蚀程度的指标, 粗糙度记录了行星表面侵蚀、沉降、堆积、充填等地质活动, 可用于不同地层单元间的相对定年, 并且是评价地面工程保障性的重要参数之一[21]. 粗糙度的计算方法很多, 其中均方根高度是一种比较常见的算法, 即计算基线范围内的所有高程点的均方根, 作为描述粗糙度的参数. 均方根高度可以很直观地描述了地面的绝对起伏幅度. Smith 等人[19]基于 LOLA 数据制作的全月 16 像素/度分辨率的均方根高度粗糙度数据, 该粗糙度数据的基线为 56 m, 本文利用该数据来描述虹湾地区的粗糙度. 从粗糙度图(图 4)可以看出, 虹湾地区整体地形粗糙度较小, 其内部超过 90%的区域均方根高差粗糙度均在 1.3 m 以下, 说明其内部大石块和巨型露头均很少出现, 仅在一些新鲜撞击坑处显示出较大的粗糙度, 可能是坑壁坍塌滑落的一些大块岩石所致. 从地形分析可以看出, 虹湾地区大面积的平坦区域和较少的大块岩石露头, 可为登月探测器的着陆、运移和月面试验的开展提供的良好的安全性保障.

4 虹湾地区元素与矿物成分分析

4.1 铁钛元素丰度反演

月球表面主要元素的丰度研究一直是月球科学领域的重要研究课题, 前人对此做出了大量的研究, 尤其是铁钛等重要元素的丰度定量反演. 这些元素丰度的差异性对于划分月表岩石类型、解译区域地质演化以及印证月球早期高密度撞击事件意义重大, Lucey、Gills 等人对此提出了多个反演算法[22–26]. 对虹湾地区进行铁钛等主要元素的丰度定量反演及区域间的元素丰度差异性比较对于评估该地区的科学

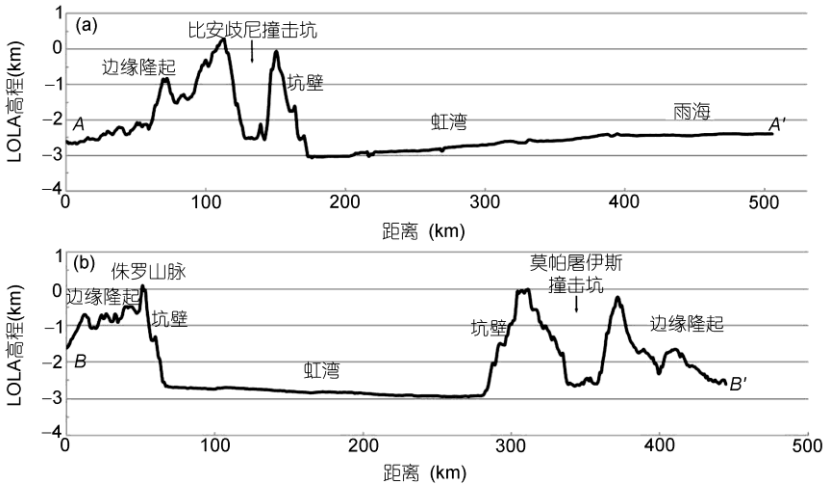


图 2　基于虹湾及周边区域 LOLA 高程数据(图 1)提取的高程剖面

(a) 北西-南东高程剖面(*AA*'), (b)南西-北东高程剖面(*BB*'). 文字及箭头标识了高程剖面所经过的地貌区域, 如坑缘隆起和撞击坑壁

Figure 2　Elevation profile derived from LOLA topography data (Figure 1). (a) Elevation profile from northwest to southeast (*AA*'), (b) Elevation profile from southwest to northeast (*BB*'). The arrows and labels mark the location of some typical landforms on the profiles, e.g., rim crest and crater wall.

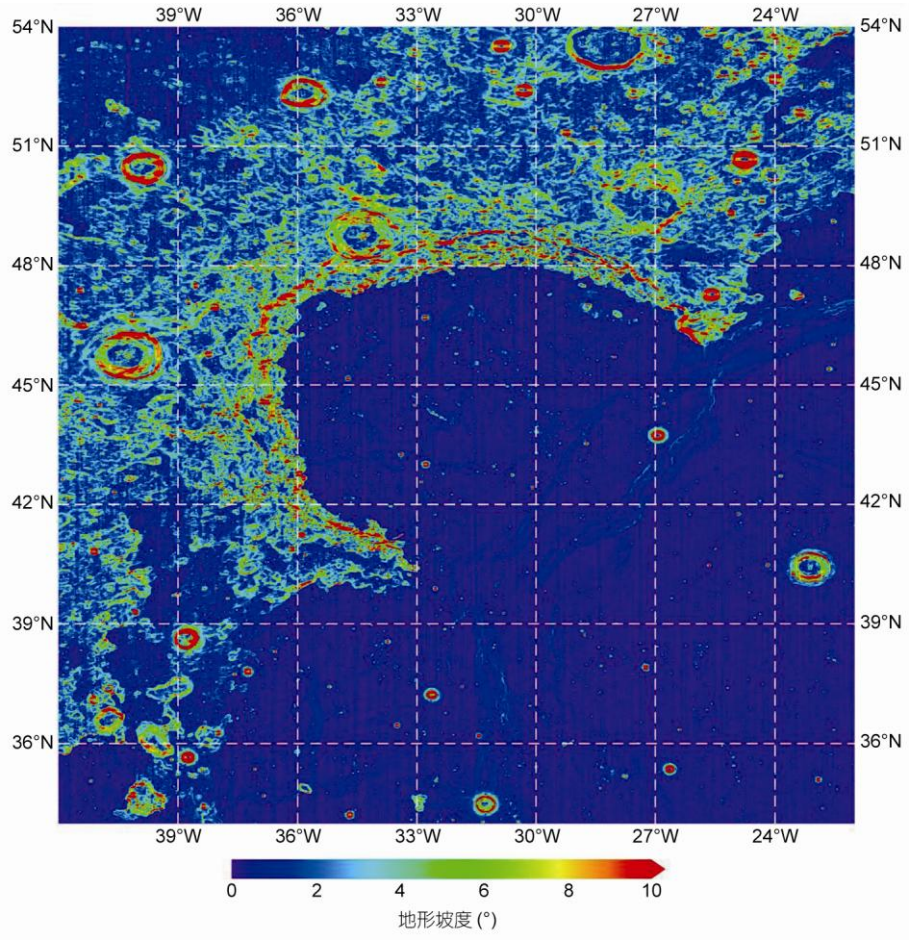


图 3　虹湾及周边区域坡度图(基于图 1LOLA 地形数据, 256 像素/度)

Figure 3　Surface slope map of the Sinus Iridum (based on LOLA topography data in Figure 1, 256 pixels/degree).

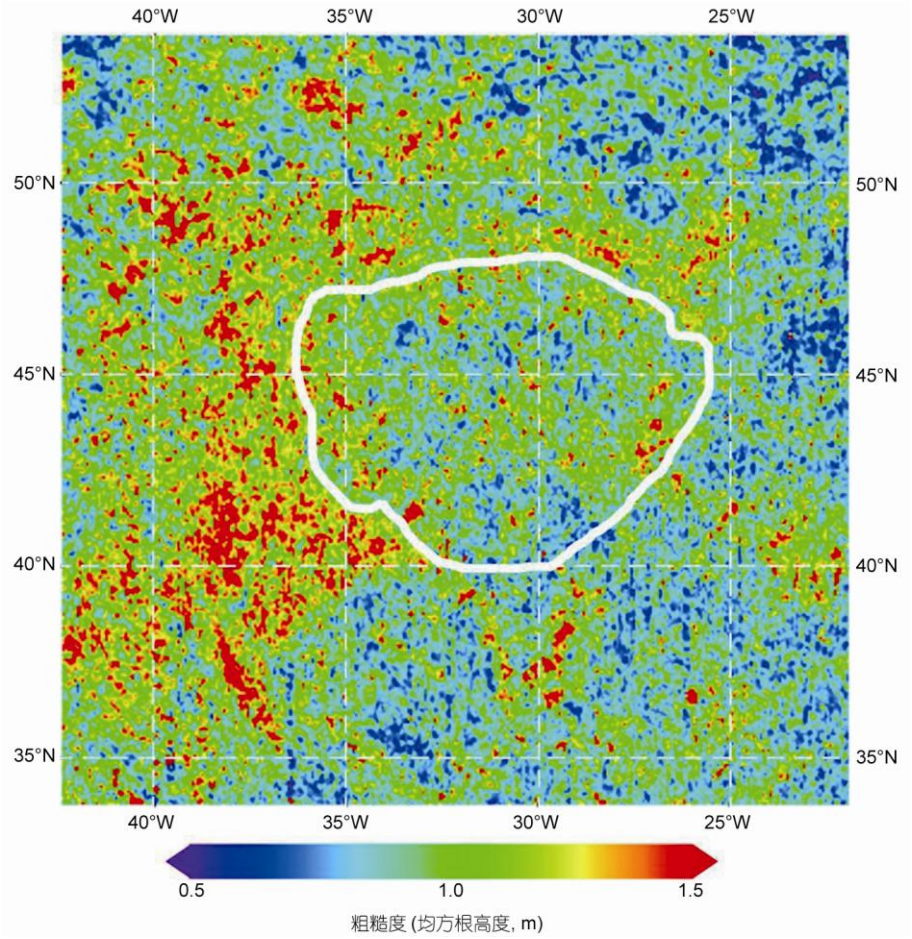


图 4　虹湾地区粗糙度图(基于 Smith 等人[19]数据, 16 像素/度)

图中白色曲线标注了虹湾地区的边界

Figure 4　Roughness map of the Sinus Iridum and surrounding areas (based on Smith at al.'s data[19], 16pixels/degree). The white curve represents the border of Sinus Iridum.

价值具有重要意义, 可以为嫦娥三号等登月探测器的着陆区选择提供理论参考, 另外当登月探测器的就位分析数据返回地球之后, 可以与本文的结果进行全方位的对比, 并对相关模型和理论进行验证, 进一步优化月球科学探测手段和方法.

全月的高空间分辨率成像光谱数据的获取为定量反演元素含量提供了重要的数据支撑, 如 Clementine UVVIS 数据, 其光谱覆盖范围为 415–1000 nm, 共有 5 个光谱波段, 空间分辨率为 115 m[27,28], Clementine UVVIS 数据可以在 USGS 网站上获取(http://webgis.wr.usgs.gov/pigwad/down/moon_dl.htm). 本文利用 Lucey[24]提出的算法对月球虹湾地区的 FeO 及 TiO_2 丰度进行了定量评估, 该算法如下:

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

$$\mathrm{TiO_2\ (wt.\%)} = 3.708\times(\arctan(R_{415}/R_{750}-0.42)/R_{750})^{5.979}, \quad (2)$$

其中 R_λ是 Clementine UVVIS 高光谱数据在λ波段的反射率(λ=415,750 或者 950 nm). 本文绘制了该区域铁钛元素丰度图(图 5).

从铁钛元素丰度图可以发现, 虹湾及雨海北西部地区的 FeO 含量普遍高于周围高地区域, 虹湾内部约 95%的区域 FeO 丰度在都在 14 wt.%–20 wt.%之间, 平均丰度为 16.2 wt.%. 而虹湾及周围高地区域的 TiO_2 含量普遍低于雨海地区, 虹湾内部约 90%的区域 TiO_2 丰度低于 5%, 平均丰度为 2.3 wt.%, 而雨海地区却显示为较高钛地区, TiO_2 丰度在 10 wt.%左右. 而陈圣波等人[3]的反演结果显示, 虹湾内部为高

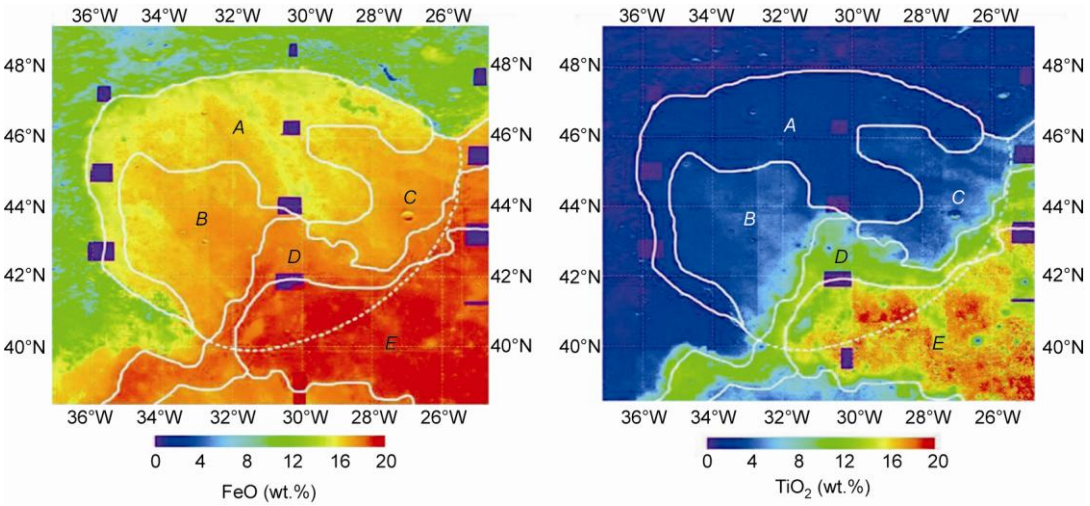


图 5　虹湾地区 FeO(左)和 TiO_2(右)丰度图(基于 Clementine UVVIS 数据, 100 m/像素, Lucey 2000[24]算法)

图中紫色块状区域为 Clementine UVVIS 数据未覆盖的区域, 图中的白色实线为按照铁钛元素丰度划定的分区, 预示了不同期次的岩浆充填事件

Figure 3　FeO (left) and TiO_2 (right) content of Sinus Iridum (based on Clementine UVVIS data, 100 m/pixels, Lucey et al.'s algorithm). The dark purple blocks are missing value areas, and the white curves represent different geological units based on the iron and titanium content, which may indicate multiple magma filling events.

铁中钛, 雨海地区为低铁高钛, 同时雨海地区的 TiO_2 含量最高可达 25wt.%以上. 而全月的遥感探测数据[23,29]和 Apollo 样品数据[30]均表明, 月海玄武岩一般铁含量较高, 而 TiO_2 含量的上限约为 14 wt.%. 本文铁钛元素反演结果更符合全月遥感探测结果和 Apollo 样品实测数据界定的范围.

在虹湾内部和雨海北西部不同区域, 铁钛元素丰度也存在着较大差异, 这预示着这些月海区域经历了多次岩浆活动, 且不同期次岩浆活动充填的玄武岩成分差别较大. 在定量分析铁钛元素丰度的基础上, 本文将虹湾和雨海北西部划分为 5 个成分相似性区域(图 5), 并统计了各个分区的铁钛元素含量均值(表 1). 可以看出不同分区的元素丰度差异较大, 尤其是 TiO_2 丰度. 同时本文利用 LRO 宽角相机(WAC, 100 m/像素)影像对每个分区进行了撞击坑统计定年[31]. 本文统计了直径大于 0.5 km 的各个直径级别上撞击坑的累计频率, 然后利用最小二乘拟合出撞击坑曲线(Neukum, 2001 中公式 2)[31], 然后带入月球撞击年代曲(Neukum, 2001 中公式 5)[31,32]获得绝对模式年龄, 同时根据 Arvidson 等人[33]的误差计算公式得到年龄误差. 本文计算得到了各个分区的表面年龄并指定了各个分区的地层名称(见表 2), 并和前人的地层单元划分和定年结果进行了对比[6,8,9,32,34], 其中 Im1 和 Im2 均为雨海纪地层单元, 但 Im1 老于 Im2, 而 Em1 和 Em2 均为爱拉托逊纪地层单元, 且 Em1 老于 Em2. 本文定年结果与 Hiesinger 等人[8]的结果较为接近, 两者在本文所划定的 5 个分区的定年结果相差均在 0.5 Ga 之内. 在虹湾西部(*B* 区)和北东部区域(*C* 区), 充填的玄武岩成分非常接近, 表面定年数据也很接近, 预示着这两个区域的玄武岩为同一次岩浆事件所充填, 这也印证了 Schaber[6]的地层划分顺序和赵健楠等人[32]的定年数据.

结合各地质单元的表面年龄数据和铁钛元素含量, 可以看出该区域的岩浆活动是从低钛向中钛逐步演化的, 前期多次岩浆活动充填的玄武岩覆盖了北部大面积区域(图 5 中 *A*, *B*, *C* 区), 且主要为低钛玄武岩, TiO_2 丰度均值介于 1.1–1.9 wt.%之间, 而在虹湾南部与雨海北西部区域(图 5 右中 D 和 E 区), FeO 及 TiO_2 含量均高于虹湾其他地区, FeO 均值达 18 wt.%左右, TiO_2 均值度介于 5.0–7.1 wt.%之间, 说明后期岩浆活动充填的玄武岩覆盖了虹湾南部和雨海北西部, 且主要为中钛玄武岩.

在雨海北西部的 Em2 单元玄武岩区域, 后期的撞击改造作用留下了大量撞击坑, 这些撞击坑直径不等, 挖掘深度也变化不一, 溅射出来的物质成分含量也相差很大, 有的较大撞击坑挖掘较深, 穿透了整

表 1　虹湾及雨海北西部各分区铁钛元素丰度均值统计

Table 1　Mean content of FeO and TiO_2 in each geological unit of Sinus Iridum and northwest Mare Imbrium

地层单元	虹湾	*A*	*B*	*C*	*D*	*E*	*B*+*C*
FeO 丰度均值(wt.%)	16.2	15.1	16.3	16. 6	17. 6	18.3	16.4
TiO_2 丰度均值(wt.%)	2.3	1.1	1. 9	1.9	5.0	7. 1	1.9

表 2　虹湾及雨海北西部各分区表面年龄

Table 2　Surface ages of each geological unit in Sinus Iridum and northwest Mare Imbrium

地层单元	数坑面积 (km^2)	统计的撞击坑数量	N(1)拟合值 (km^{-2})	表面年龄 (Ga)	误差 (Ga)	所属地层 (本文)	Hiesinger (2000)	Schaber (1969)	Bugiolacchi (2008)	Morota (2011)	赵健楠 (2013)
A	15021	128	0.00329	3.32	+0.06 /–0.08	Im1	3.26	Im1 /Im2	3.31		3.33
B	9069	172	0.00292	3.20	+0.07 /–0.11	Im2	3.01	Im1 /Im2	2.42		3.21
C	6588	102	0.00294	3.21	+0.09 /–0.15	Im2	3.39	Im1 /Im2	2.42 /3.31		3.21 /3.33
D	72312	62	0.00270	3.09	+0.15 /–0.29	Em1	3.26 /2.96	Im1 /EIm	2.42		2.60 /3.21
E	15861	82	0.00210	2.50	+0.26 /–0.27	Em2	2.96	EIm	2.22	2.29	2.60

个玄武岩地层, 将深部的高地物质挖掘了出来, 而有的小型撞击坑挖掘较浅, 仅仅穿透了表层的部分 Em2 单元物质. 结合撞击坑的挖掘深度和溅射物质的钛含量, 可以反映各个地层之间的覆盖关系, 并利用地形数据粗略计算各个地层的厚度[7]. 本文选取了几个具有代表性的撞击坑, 利用 TiO_2 含量判别了撞击溅射物质和撞击坑周围物质在撞击作用之前所属的地层, 同时 LOLA 高程数据分别测定了撞击坑底部和周围物质的高程, 两者高差即为撞击坑的挖掘深度, 同时按照"上新下老"的典型地层覆盖顺序, 我们认为该撞击坑的挖掘深度应该小于溅射物质在撞击作用之前所属地层底部的深度, 而大于该地层上一较新地层底部的深度(表 3). 综合表 3 中各地层底部的深度, 我们可以得到 Im1, Im2, Em1 和 Em2 地层的底部深部分别介于 443–475 m (取 450 m), 134–146 m (取 140 m), 73–76 m (取 75 m), 15–15.5 m (取 15 m). 结合表 3 和各地层单元的表面定年数据, 可以看出从表层到深部, 依次为 Em2, Em1, Im2, Im1 和原始高地单元, 各地层的厚度分别约为 15, 60, 65 和 310 m, 说明越往后期, 岩浆活动喷发的玄武岩量越小.

4.2　矿物学研究

M^3 是由 NASA 设计, 搭载在印度探月卫星"月船一号"上的一个推扫式成像光谱仪, 其探测光谱范围覆盖可见光到近红外(0.43–3.0 μm), 可以有效地探测到月球主要矿物的光谱吸收特征. 根据轨道高度等观测条件的不同, M^3 数据可分为不同的光学周期, 其中 OP2C 光学周期数据完全覆盖了虹湾地区. 在

表 3　雨海北西部 Em2 地层单元上的撞击坑及其挖掘地层情况统计

Table 3　Excavation depth and composition of craters in northwest Mare Imbrium (unit Em2)

编号	经度 (N)	纬度(W)	直径 (km)	挖掘深度 (m)	周围物质 TiO_2 含量 (所属地层)	溅射物 TiO_2 含量 (所属地层)	说明 a)
1	40.46	25.66	2.43	443	7.8 (Em2)	1.1 (Im1)	H_{Im1}>443m>H_{Im2}
2	41.75	24.92	2.57	475	7.2 (Em2)	0.3(高地)	475m>H_{Im1}
3	40.19	24.85	1.22	134	8.6 (Em2)	2.5 (Im2)	H_{Im2}>134m>H_{Em1}
4	38.46	26.25	1.25	146	7.5 (Em2)	1.3 (Im1)	H_{Im1}>146m>H_{Im2}
5	39.86	27.72	0.49	73	8.8 (Em2)	4.4 (Em1)	H_{Em1}>73m>H_{Em2}
6	40.37	24.87	0.87	76	8.1 (Em2)	2.9 (Im2)	H_{Im2}>76m>H_{Em1}
7	39.35	24.88	0.16	15	8.9 (Em2)	7.1 (Em2)	H_{Em2}>15m
8	39.88	27.34	0.25	15.5	8.3 (Em2)	5.9 (Em1)	H_{Em1}>15.5m>H_{Em2}

a) H_X=地层单元 *X* 底部的深度, *X*=Im1, Im2, Em1 或 Em2

OP2C光学周期成像条件下, M^3能在200 km的轨道高度以280 m/像素的分辨率获取月表成像光谱数据,数据有85个波段, 光谱分辨率介于20–40 nm[35]. 本文基于OP2C光学周期数据对虹湾地区矿物学特征进行了研究.

利用一些矿物指标参数可以较为全面地分析月表基本矿物特征, 这些参数表现了月表主要矿物的基本光谱特征, 如铁镁质硅酸岩、月壤成熟度和空间风化作用. 初步的分析结果显示, 光谱在1和2 μm波段附近的综合吸收深度, 以及1.58 μm波段处的反射率可以良好地表现月表主要矿物的分布特征, 其中1和2 μm处的综合吸收深度算法定义是:

$$\mathrm{IDB}(1\ \mu\mathrm{m})=\sum_{n=0}^{26}\left(1-\frac{R(789+20\mathrm{n})}{R\mathrm{c}(789+20\mathrm{n})}\right), \tag{3}$$

$$\mathrm{IDB}(2\ \mu\mathrm{m})=\sum_{n=0}^{21}\left(1-\frac{R(1658+40\mathrm{n})}{R\mathrm{c}(1658+40\mathrm{n})}\right), \tag{4}$$

其中R表示在指定波段处的反射率, $R\mathrm{c}$是相应波段处的包络线反射值(包络线的定义为跨越吸收谷的一条斜线), 789和1658是吸收谷起始波长(单位为nm), 20和40是波长采样间隔, n是吸收谷所跨越的波段数目[36, 37]. 基于此, 本文制作了虹湾地区矿物吸收特征参数影像(图6).

通过矿物在1和2 μm波段的吸收特征, 可以较为系统地表现月球主要矿物在虹湾地区的分布情况. 月球表面主要有3种矿物, 分别为斜长石、辉石和橄榄石, 其中辉石在1和2 μm波段均有较强吸收, 在矿物吸收特征参数影像上呈黄色至绿色; 橄榄石只在1 μm波段有较强吸收, 在参数影像上呈红色; 而斜长石缺失这两个波段范围的吸收特征, 显示出高反射特性, 在参数影像上呈蓝色. 从矿物吸收参数合成影像上可以明显地区分出虹湾内部、雨海北西部的月海区域与周围高地区域, 虹湾内部物质(如图6中*a*点)在1和2 μm光谱波段有较弱的吸收特征(图7(a)), 说明其组分中含有大量的辉石, 而较弱的吸收特征

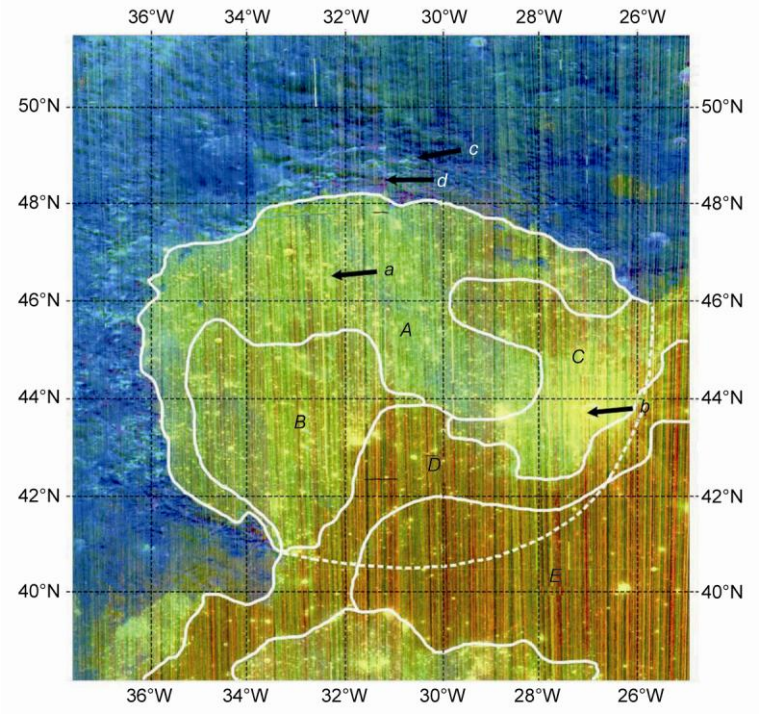


图6　虹湾地区矿物吸收特征参数假彩色合成影像(基于M^3光谱数据, 280 m/像素)

红通道是1 mm处的综合吸收深度, 绿通道是2 mm处的综合吸收深度, 蓝通道是1.58 mm处的反射率. 图中白色实线为按照铁钛元素含量划定的地质单元分区(见4.1节), 黑色箭头标识了4种代表性的矿物成分, 其相应M^3光谱见图7

Figure 6　Composite map of spectral parameters in the Sinus Iridum(based on M^3 data, 280 m/pixel). Red channel is the integrated band depth (IBD) at 1 μm, green channel is the IBD at 2 μm, and blue channel is the apparent reflectance at 1.58 μm. The white solid lines demarcate the boundaries of geological units divided based on chemical composition in section 4.1, and the black arrows indicate the location of some typical mineral composition, of which spectra are displayed in Figure 7.

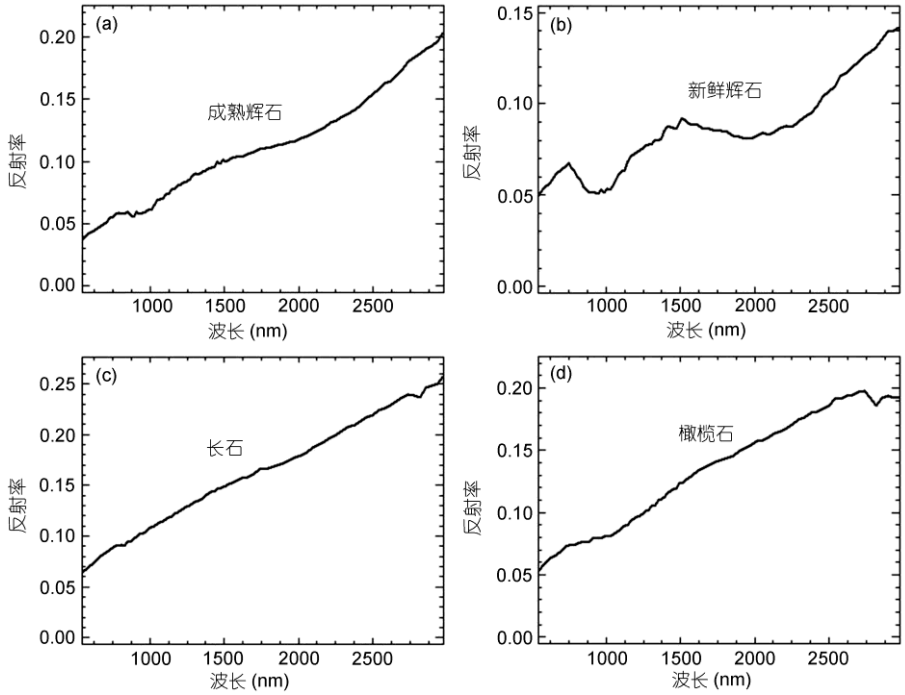


图 7　虹湾及周边区域四种代表性物质 M^3 反射率光谱(其相应位置见图 6)

(a) 虹湾内部的成熟富辉石岩石, (b) 新鲜撞击坑坑壁处的新鲜富辉石岩石, (c) 周边高地区域的富长石质岩石, (d) 虹湾北部坑壁处出露的富橄榄石岩石

Figure 7　Spectra of four typical materials in Sinus Iridum and surrounding areas, of which position are displayed in Figure 6. (a) mature pyroxene-rich rocks inside Sinus Iridum, (b) fresh pyroxene-rich rocks at the wall of fresh impact craters, (c) feldspathic materials on the surrounding highlands, (d) olivine-rich rocks in the north crater wall of Sinus Iridum.

推测可能是长期的空间风化作用所致. 作为对比, 在一些新鲜撞击坑(如拉普拉斯 *A* 撞击坑, 图 6 中 *b* 点, 5.3 节中对此撞击坑有较为系统的论述)的坑壁处, 出露了一些撞击挖掘出的新鲜富辉石岩石(如图 6 中 *b* 点), 其 M^3 光谱显示出较强的含铁矿物 1 和 2 μm 波段吸收特征(图 7(b)). 而围绕虹湾地区的侏罗山脉等高地区域(如图 6 中 *d* 点)普遍缺失 1 和 2 μm 光谱波段的吸收特征(图 7(c)), 显示出高反射特征, 主要以长石质矿物为主. 而在虹湾北部坑壁, 与侏罗山脉交接区域如图 6 中 *d* 点, 地物在 1 μm 光谱波段有较强的吸收特征, 而在 2 μm 处的吸收特征较弱(图 7(d)), 说明该区域存在着富橄榄石岩石.

在虹湾内部, 不同区域矿物成分仍然存在较大的差别, 本文将前文中按照铁钛元素含量划定的地层单元结果叠加在吸收参数合成影像上(图 6 中白色实线所划分的区域), 可以看出不同分区之间的色调差别, 显示出不同时期岩浆活动性质的差异, 其中从早期(图 6 中 *A* 区)到中期(图 6 中 *B* 和 *C* 区), 再过渡到晚期(图 6 中 *D* 和 *E* 区), 色调逐渐从黄绿色变为红黄色, 预示着岩浆活动充填的玄武岩中橄榄石含量逐渐增高, 其中在拉普拉斯 *A* 撞击坑周边的小范围区域, 分布了大量的新鲜溅射物.

5　重要地质特征解译

5.1　皱脊

皱脊是分布在月球表面的一种延伸较长的突起构造, 主要分布在月海地区. 典型的皱脊一般由上下两部分组成: 下部为宽广的相对平缓的弧形隆起, 上部为相对陡峭、狭窄且扭曲的山脊状构造[14,15]. 虹湾地区发育了大量的月海皱脊, 这些皱脊相互交汇、重叠或者排成梯队. 利用 LROC WAC (100 m/像素)图像和 LOLA 高程数据, 可以识别出虹湾地区发育了 7 组规模较大的月海皱脊, 它们的走向大致均为北东-南西向或近南北向, 其中最大的一组皱脊(图 8(a))位于虹湾和雨海交界处, 沿雨海边缘呈弧形延伸. 该皱

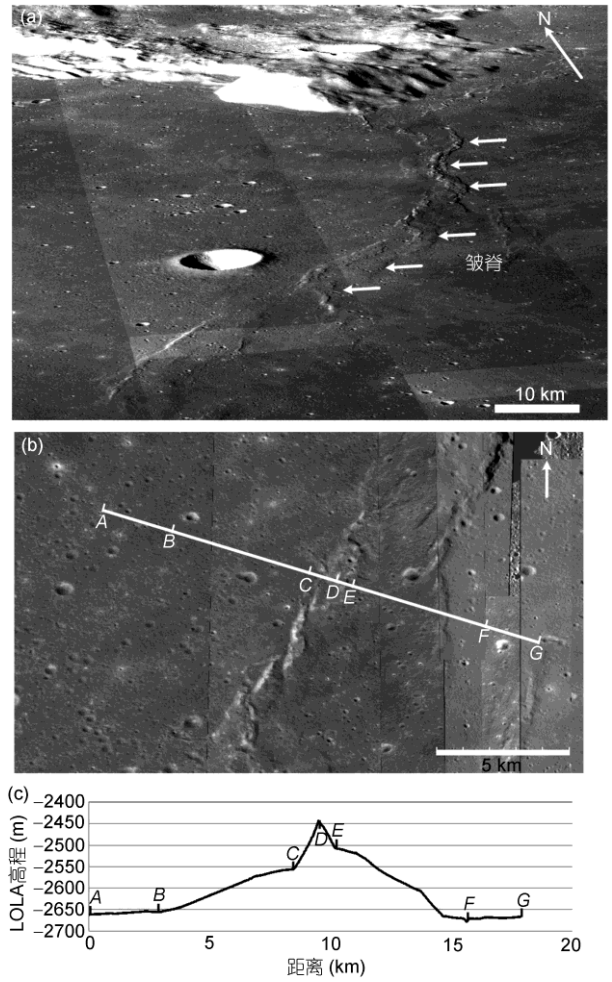


图 8　虹湾东部, 雨海边缘处发育的该地区最长的一条月海皱脊

(a)三维全景图(基于 LROC WAC 影像和 LOLA 高程数据, 100 m/像素), 图中白色箭头追踪了该皱脊的位置与走向, (b)该皱脊局部细节特征影像(LROC NAC 影像, 0.5 m/像素, 中心坐标为 44.28°N, 25.91°W), *C* 皱脊局部横切 LOLA 高程坡面, *B* 和 *C* 中字母标识了主要高程转折点, 其中 *BC* 和 *EF* 段为下部平缓隆起部分, *CDE* 段为上部陡峭脊状部分

Figure 8　The longest mare ridge in east Sinus Iridum, border to Mare Imbrium. (a) 3-D panoramic view of the ridge (based on LROC WAC image and LOLA topography data, 100 m/pixels), the white arrows point the location and trend. (b) Regional detailed image of this ridge (LROC NAC image, 0.5 m/pixels, centered at 44.28°N, 25.91°W). (c) Elevation profile across-cut the ridge from east to west. Major elevation turning points are labeled with letters in (b) and (c), the *BC* and *EF* parts are the lower board and gentle arch, *CDE* part is the upper shaper, steeper and twisted ridge structure.

脊在虹湾地区的长度超过 200 km, 从局部横切高程剖面(图 8*B*, *C*)可以看出, 底部宽度(图 8*B*, *C* 中 *BF* 段)约 13 km, 在纵向上可明显地分为下部平缓隆起(*BC* 和 *EF* 段)和顶部陡峭山脊(*CDE* 段), 下部平缓隆起部分两侧各宽约 5.5 km(*BC*=5.6 km, *EF*=5.4 km), 邻近虹湾一侧坡度较为平缓, 约 10°, 邻近雨海一侧较为陡峭, 坡度达 17°, 上部山脊部分横向宽度较窄(*CDE*=1.72 km), 但是非常陡峭, 坡度在 40°以上, 山脊顶部(*D* 点)高出月海表面(*F* 点)超过 200 m.

关于皱脊的成因, 目前还没有确定的解释, 有构造成因(褶皱或断层)和岩浆成因(火山作用或侵入作用)之争, 也有研究者认为皱脊是岩浆活动与构造运动共同作用的结果[15]. Strom[14]对围绕月海的环状皱脊的成因进行了研究, 认为该类皱脊是在月海形成后, 由沿撞击盆地环形边缘裂隙发生的火山活动形成. 而本文发现, 虹湾与雨海交汇处的月海皱脊穿越了不同的地层单元(Im1 和 EIm 单元[6]), 说明这些皱脊的形成是叠加在早期岩浆活动之后的构造作用; 再者, 在虹湾和侏罗山脉的交接区域, 皱脊仅存在月海区域, 说明地貌形态对皱脊的发育有一定的控制作用; 另外, 在皱脊区域也没有发现绳状等由岩浆活动形成的构造. 所以本文认为虹湾地区的皱脊是由于断层或褶皱等构造作用形成的.

5.2　月溪

月溪是月球表面狭长而凹陷的沟槽. 月溪据其形态可以分为三类: 蜿蜒型月溪、弓形月溪和直线型月溪. 蜿蜒型月溪形态较为弯曲, 一般被认为是熔岩流冲刷的痕迹或是熔岩管坍塌后的遗迹. 弓形月溪多呈光滑的弧形, 并且通常发育在月海的边缘, 它们可能是充填月海的熔岩冷却收缩而形成的裂谷. 直线型月溪一般较为平直, 多被认为是构造运动形成的沉陷结构[10, 11].

虹湾地区有大量月溪发育, 它们多分布在虹湾与侏罗山相接地带, 尤其是虹湾北部侏罗山脉山脚地区. 在虹湾北东部侏罗山脉山脚处发育有该区域内最长的一条月溪(图 9). 该月溪起源于虹湾外部、拉普拉斯海角以东约 25 km 处的一个椭圆形月坑(图 9(a)中 *H* 点), 在被一连串小型撞击坑(直径小于 1 km)部分掩埋之后, 继而蜿蜒向西延伸, 然后在拉普拉斯海角处转而向北西方向延伸, 直至侏罗山脉山脚, 并在途中被坑壁滑落的岩石碎屑所掩埋(图 9(a)中 *B* 点), 最终汇入虹湾内部一个小型月坑(图 9(a)中 *A* 点). 月溪总长度将近 70 km, 在虹湾内部长度超过 40 km, 最宽处约 500 m, 最窄处小于 100 m, 深度在 0.5–10 m 之

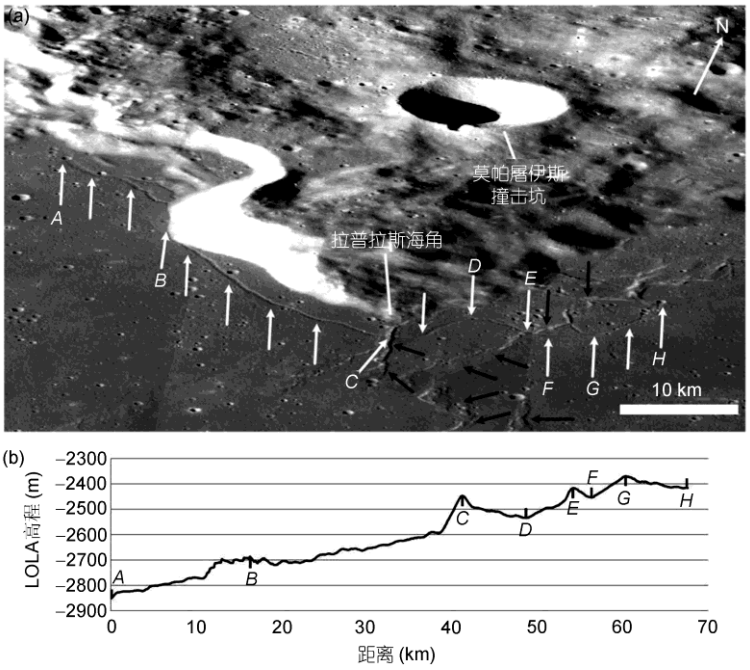


图 9　虹湾北东部沿侏罗山脉山脚发育的月溪

(a)三维全景图(基于 LROC WAC 影像和 LOLA 高程数据, 100 m/像素), (b)沿该月溪建立的高程坡面(基于 LOLA 高程数据), 图中白色箭头追踪了该月溪的延伸路径, 而黑色箭头标识了与该月溪交错的月海皱脊, 字母标识了沿月溪的主要转折点

Figure 9　Lunar rille along the foot of Montes Jura, northeast Sinus Iridum. (a) 3-D panoramic view of the lunar rille (based on LROC WAC image and LOLA topography data, 100 m/pixel). (b) Elevation profile along the rille. The white arrows point to the path of the rille, the black arrows point to the cross-cutting mare ridge, and the letters label major elevation turning points along the rille.

间. 以拉普拉斯海角为界, 该月溪可明显划分为两部分, 在东边的雨海区域, 该月溪成蜿蜒状, 并多次被皱脊所截断(图 9(a)中 *C* 和 *E* 点), 并在截断处显示出明显的地势隆起, 根据交切关系可以判断, 这些皱脊形成于月溪之后. 而在拉普拉斯海角以西的虹湾内部, 该月溪较为平直, 宽度也较为一致, 较少被撞击坑、皱脊所截断或掩埋.

5.3　月坑

大量的撞击事件在虹湾内部形成了大量的撞击坑, 这些撞击坑一般直径较小, 结构简单, 多呈碗型, 缺少中央峰构造. 其中最大的撞击坑为拉普拉斯 A (Laplace A)撞击坑, 它位于虹湾与雨海相接处, 中心坐标为 43.74°N, 26.93°W, 直径约 8 km (基于 LOLA 2011 控制网), 是典型的碗型撞击坑. 在拉普拉斯 A 撞击坑东部附近区域, 发育了若干条互相交织在一起的月海皱脊(图 10(a)). 从 LOLA 高程剖面(图 10(a), (b))可以发现, 该撞击坑坑壁顶端高出周围月海区域约 500 m, 高出撞击坑底部约 1700 m, 西部坑壁的坡度约为 26.5°, 东部坑壁的坡度约为 28.8°, 且从上部到下部坡度相对恒定. 撞击坑底部直径约 1.7 km, 在 LROC NAC 高空间分辨率影像下(图 10(c)和(d)), 撞击坑底部按形貌特征可分为两个部分: 西部的平坦区域和东部的崎岖区域. 西部平坦区域面积较小, 只有少量规模较小的隆起, 推测主要为一些撞击熔融物质在未完全固结是受外力变形所致, 或者底部岩浆上涌导致表层隆起, 并散布了一些从坑壁滑落的细小碎石. 而东部崎岖区域面积较大, 分布了大量规模较大的石堆和巨大碎石, 碎石的最大直径可达 30 m, 这些石堆推测可能为撞击过程后期坑底反弹, 导致表层以下岩浆上涌喷发到表层, 固结堆积形成大量的石堆(http://lroc.sese.asu.edu/news/index.php?/archives/343-Mounds-in-a-melt-pond.html). 而这种东西部差异可能是由于坑底不同区域在撞击过程中受力不均衡, 西部坑底受力更大, 反弹也更强烈, 导致深层岩浆喷发至表面, 而东部受力较小, 坑底反弹也较为

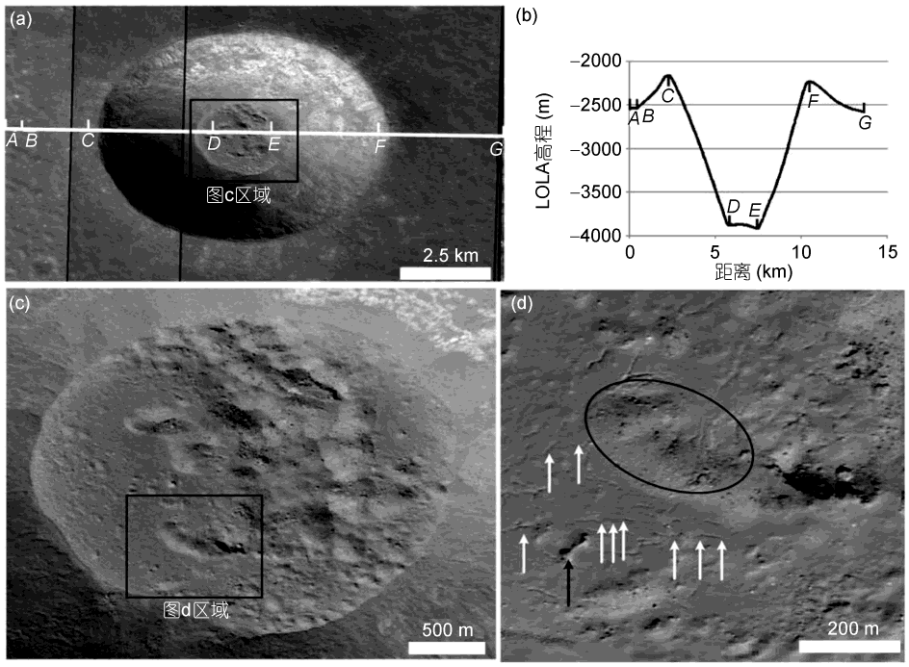


图 10　虹湾内部最大的撞击坑(拉普拉斯 A 撞击坑)

(a)撞击坑全局图(基于 LORC NAC 影像, 0.5 m/像素), (b)跨越该撞击坑提取的高程剖面(LOLA 高程数据), (c)撞击坑坑底全局特征影像(LROC NAC 影像, 0.5 m/像素), (d)撞击坑坑底局部细节特征影像(LROC NAC 影像, 0.5 米/像素), 其中黑色箭头指示了西部平坦区域内的小规模隆起, 而白色箭头指示了大量的裂隙, 黑色椭圆圈定了东部崎岖区域内一个典型的大石堆. 所有影像图件的上方指向北方

Figure 10　The largest impact crater in Sinus Iridum, Laplace A crater. (a) A panoramic view of the cratere (LROC NAC image, 0.5 m/pixel). (b) Elevation profile across the crater (LOLA topography data). (c) Overview image of the crater floor (LROC NAC image, 0.5 m/pixel). (d) Local detailed image of the crater floor (LROC NAC image, 0.5 m/pixel), the white arrow points to the small-scale uplift structures in west flat region, the whites arrows point to massive fractures, and black ellipse outlines a large rock mound in east rough region.

微弱, 未能带动深部岩浆穿透地表. 此外, 坑底西部平坦的撞击熔融区域发育了较多的裂隙, 这些裂隙可能是撞击熔融物质凝固收缩形成.

前人对月坑链的成因并没有统一的解释, Melosh 和 Whitaker[12]认为月坑链是由大型撞击坑的溅射物回落至月表而形成的二次撞击坑链, Melosh 和 Schenk[13]认为是流星体接近月球表面时, 因月球对其的引力致使其发生破碎, 这些破碎的流星体撞击月表而形成呈链状排列的撞击坑, 而肖智勇等人[16]则提出月表月坑链可能不是由撞击作用形成, 而是与构造运动或是岩浆活动有关.

本文认为虹湾地区月坑链按成因可分为两类. 第一类为哥白尼(Copernicus)、阿里斯基尔(Aristillus)等大型撞击坑的溅射物形成的二次撞击坑链(图 11(a)). 该类月坑链多分布在溅射物集中区域, 周围有密集的二次撞击坑, 月坑链整体形态近直线型, 反照率较高, 组成月坑链的月坑形状不规则, 呈拉长状, 部分月坑发生叠覆. 第二类为与岩浆作用有关的月坑链(图 11(b)), 它们可能是顶部塌陷了的熔岩管. 这类月坑链一般分布在火山地貌(如穹窿、皱脊)集中区域[14,16], 整体形态除直线型外, 还可能随月溪、熔岩管走向的改变而发生弯曲, 组成月坑链的月坑形状多为圆形, 边缘较为平整, 无明显突起, 缺少阶地状内部构造.

6　讨论

6.1　虹湾地区岩浆活动历史

虹湾内部充填的大量的玄武岩和广泛分布的月溪等火山构造证实了虹湾地区曾经经历过岩浆活动的历史. 但是对于虹湾地区岩浆活动的时间范围、活动次数等曾在较大的争议. Schaber[6]将虹湾内部月海区域划为北部广泛区域的 Im1 单元, 西部和东北部小范围区域的 Im2 单元, 以及南部和雨海交汇区域的

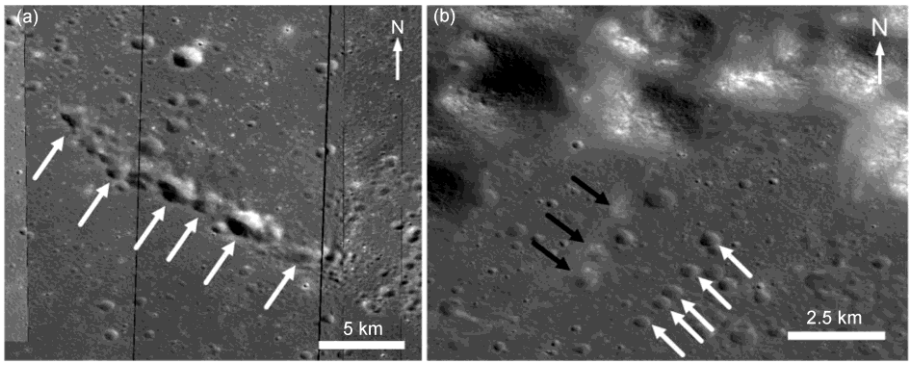


图 11　虹湾地区的月坑链

(a)二次撞击成因月坑链(LROC NAC 影像, 0.5 m/像素, 中心坐标为 44.27°N, 32.46°W), (b)可能的岩浆成因月坑链(LROC NAC 影像, 0.5 m/像素, 中心坐标为 48.03°N, 30.63°W). 图中白色箭头标识了月坑链, 而黑色箭头标识了月海皱脊

Figure 11　Crater chains in Sinus Iridum. (a) Secondary impact chains (LROC NAC images, 0.5 m/pixel, centered at 44.27°N, 32.46°W), (b) Possible magmatic origin crater chains (LROC NAC images, 0.5 m/pixel, centered at 48.03°N, 30.63°W). The white arrows point to the crater chains, and the black arrows point to the possible mare ridges.

EIm 单元, 其中 Im1 和 Im2 均为晚雨海纪地层单元, 且 Im1 地层老于 Im2 地层, 而 EIm 为爱拉托逊纪或雨海纪月海地层单元, 但是并没有给出绝对的地质年龄. Hiesinger 等人[8]基于 Galileo EM2 多光谱影像数据, 利用区域光谱差异性将虹湾内部依次划分为西部、中部、北东部和南部 4 个光谱相似性区域, 并利用撞击坑统计方法计算出这 4 个区域的表面年龄分别为 3.01,3.26,3.39 和 2.96 Ga. Hiesinger 等人[8]的结果定年结果与 Schaber 的地层划定相一致, 但是由于其区域划分仅仅是基于 Galileo EM2 光谱波段比值数据, 没有用到化学成分数据, 所以其区域划分结果存在不确定性和一定误差. Bugiolacchi 和 Guest [9]基于 Clementine UVVIS 光谱数据和铁钛元素含量数据, 将虹湾内部月海区域划分为北部广泛的低钛较老区域、东北部及中西部的低钛较新区域和南部雨海汇入处的高钛最年轻区域, 并利用撞击坑统计方法计算出 3 个区域的表面年龄分别为 3.31, 2.42 和 2.22 Ga, 与前人结果相比, Bugiolacchi 和 Guest 由于在区域划分时利用了化学成分数据, 区域划分结果较为细致和精确, 但是定年结果整体偏年轻, 如东北部和中西部的条带区域定年结果显示为爱拉托逊及地层单元(2.42 Ga), 而前人结果主要为晚雨海纪地层单元.

本文基于铁钛元素成分数据, 将虹湾内部划分为 4 组成分相似性区域, 预示了虹湾地区经历了 4 次岩浆活动, 通过撞击坑统计定年的方法, 计算出 4 次岩浆活动的年龄分别为 3.32 , 3.20–3.21 ,3.09 和 2.50 Ga. 岩浆活动充填的大量玄武岩覆盖了原始撞击坑的底部和雨海的外环, 但是 4 次岩浆活动充填的玄武岩成分差别很大, 且主要差别在于钛含量的高低. 发生在雨海纪的两次时间上较为接近的岩浆活动(Im1 和 Im2)充填的玄武岩覆盖了虹湾北部大面积区域, 主要为低钛玄武岩, 同时橄榄石含量较低, 而发生在晚雨海纪或爱拉托逊纪的两次较晚的岩浆活动(Em1 和 Em2)充填的玄武岩覆盖了虹湾南部和雨海北西部, 主要为中钛玄武岩, 且橄榄石含量较高. 另外, 4 次岩浆活动喷发的玄武岩量也差异很大, 越往后期喷发量越小, 从老到新, 岩浆活动形成玄武岩地层厚度分别为 310, 65, 60 和 15 m.

6.2　富橄榄石物质的来源

本文利用 M^3 成像光谱数据, 在虹湾北部坑壁发现了一些富橄榄石的岩石, 证实了 Yamamoto 等人[38]之前基于月亮女神(SELENE)光谱分析仪(Spectral Profiler, SP)数据的结果. 这些富橄榄石物质可能预示着某种深源特性, 对于解释虹湾和雨海的地质演化具有重要约束意义. 按照月球岩浆洋假说[39], 在全球性的岩浆洋结晶分异过程中, 橄榄石等富镁矿物首先在幔部富集, 然后可以通过以下途径运移到月表: (1)巨型撞击作用穿透月壳, 将幔部的橄榄石直接挖掘出来, 溅射至撞击坑周围[38]或者在中央峰富集[40]; (2)通过火山活动直接喷发或溢流到月表; (3)通过岩浆活动侵入到表层以下较浅的位置, 然后通过

撞击作用或者堆积物的滑落坍塌作用被挖掘出来. 虹湾地区的富橄榄石岩石主要分布在侏罗山脉山脚处的一些小山丘区域, 周围被月海玄武岩所围绕, 推测是从坑壁坍塌滑落形成的堆积物. 而最近 GRAIL 的重力场反演结果也显示, 雨海地区的月壳厚度较薄, 大约只有 10 km 左右[41]. 形成虹湾的巨型撞击作用很有可能穿透了月壳, 直接挖掘了来自幔部的物质. 所以, 虽然不排除其他来源的可能性, 但是虹湾地区出露的富橄榄石物质很有可能是撞击作用直接挖掘了来自幔部的深源物质, 然后溅射到撞击坑坑壁.

7 结论

本文利用新近获得的月球高空间分辨率、高光谱分辨率以及高精度地形数据, 对虹湾地区的地形特征、铁钛元素丰度、矿物学特征、地貌特征进行了较为系统的解译与分析. 本文结论如下:

(1) 虹湾内部整体地势较为平坦, 约 80%的区域坡度在 1°以下, 粗糙度也较小, 超过 90%的区域均方根高差粗糙度均在 1.3 m 以下, 大石块和巨型露头均很少出现. 良好的地形条件可为嫦娥三号等登月探测器的着陆、运移和月面试验的开展提供的良好的安全性保障.

(2) 虹湾及雨海西北部经历了 4 次岩浆活动, 活动时间介于 3.20–2.50 Ga. 4 次岩浆活动充填的玄武岩成分差别很大, 前期两次雨海纪岩浆活动充填的玄武岩覆盖了北部大面积区域, 且主要为低钛玄武岩, 而后期两次爱拉托逊纪岩浆活动充填的玄武覆盖了虹湾南部和雨海北西部, 且主要为中钛玄武岩, 同时橄榄石含量较高. 4 次岩浆活动喷发的玄武岩量也差别较大, 越往后期喷发量越小, 充填的玄武岩厚度从约 310 m 减到 15 m.

(3) 虹湾内部矿物成分以成熟的富辉石岩石为主, 但是越往后期橄榄石含量逐渐增高. 在一些新鲜撞击坑的坑壁处, 出露了一些撞击挖掘出的新鲜富辉石岩石, 周边高地区域主要以长石质矿物为主. 在虹湾北部坑壁, 与侏罗山脉交接区域, 出露了一些富橄榄石的岩石, 这些橄榄石有可能来源于大型撞击作用直接挖掘的幔源物质, 然后溅射到撞击坑坑壁.

(4) 虹湾内部皱脊、月溪、撞击坑分布广泛. 本文认为这些皱脊可能是由于断层或褶皱等构造作用形成的, 而月溪一般形成于皱脊之后, 并随着皱脊的隆起而抬升. 虹湾内部的撞击坑多为较小的碗形撞击坑, 而月坑链起源于二次撞击作用或者坍塌的熔岩管.

致谢 本文作者感谢 Junichi Haruyama 博士对于本文写作提出的宝贵意见, 感谢 USGS 和 NASA 提供的月球遥感探测数据.

参考文献

1 欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略. 地球科学进展, 2004, 19: 351–358
2 Zou X D, Liu J J, Mou L, et al. Topographic analysis of the proposed landing area of Sinus Iridum. In: European Planetary Science Congress 2012. Madrid: European Planetary Science Congress, 2012. 151
3 陈圣波, 孟治国, 崔腾飞, 等. 虹湾地区月球卫星遥感地质解析制图. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2010, 11: 1370–1379
4 Gong X, Jin Y Q. Diurnal physical temperature at Sinus Iridum area retrieved from observations of Chinese Chang'E-1 microwave radiometer. Icarus, 2012, 218(2): 807–816
5 Huang J, Xiao L, Yang J, et al. New model ages of mare material in Sinus Iridum, Moon. In: The 41st Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2010. 1184
6 Schaber G G. Geologic map of the Sinus Iridum quadrangle of the Moon, I-602 (LAC-24). Washington D C: US Geological Survey, 1969
7 Thomson B J, Grosfils E B, Bussey D B J, et al. A new technique for estimating the thickness of mare basalts in Imbrium Basin. Geophys Res Lett, 2009, 36(12): L12201
8 Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G, et al. Ages of mare basalts on the lunar nearside. J Geophys Res, 2000, 105(E12): 29239–29275
9 Bugiolacchi R, Guest J E. Compositional and temporal investigation of exposed lunar basalts in the Mare Imbrium region. Icarus, 2008, 197(1): 1–18
10 Greeley R. Lava tubes and channels in the lunar Marius Hills. Earth Moon Planet, 1971, 3(3): 289–314
11 Greeley R. Planetary landscapes. 2nd ed. New York: Chapman and Hall Ltd, 1994
12 Melosh H, Whitaker E A. Lunar crater chains. Nature, 1994, 369(6483): 713–714
13 Melosh H J, Schenk P. Split comets and the origin of crater chains on Ganymede and Callisto. Nature, 1993, 365(6448): 731–733

14 Strom R G. Lunar mare ridges, rings and volcanic ring complexes. In: Runcorn S K and Urey H C, eds. The Moon, Symposium 47 of the International Astronomical Union. Dordrecht: International Astronomical Union, 1972. 187–215
15 Yue Z Y, Ouyang Z Y, Li H B, et al. The origin and geological significance of lunar ridges. Chin J Geochem, 2007, 26(4): 418–424
16 肖智勇, 曾佐勋, 肖龙, 等. 月球哥白尼纪撞击坑底部链状坑的成因. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2010, 40(11): 1326–1342
17 Rosenburg M A, Aharonson O, Head J W, et al. Global surface slopes and roughness of the moon from the Lunar Orbiter Laser Altimeter. J Geophys Res, 2011, 116(E2): E02001
18 Smith D, Zuber M, Jackson G, et al. The Lunar Orbiter Laser Altimeter investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter mission. Space Sci Rev, 2010, 150(1): 209–241
19 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
20 汤国安, 刘学军, 闾国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法. 北京: 科学出版社, 2005
21 Shepard M K, Campbell B A, Bulmer M H, et al. The roughness of natural terrain: A planetary and remote sensing perspective. J Geophys Res, 2001, 106(E12): 32777–32795
22 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(E2): 1–18
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(E2): 3679–3699
24 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(E8): 20297–20305
25 Lucey P G, Taylor G J, Malaret E. Abundance and distribution of iron on the Moon. Science, 1995, 268(5214): 1150–1153
26 刘福江, 乔乐, 刘征, 等. 基于嫦娥一号干涉成像光谱仪吸收特征的月表钛含量评估. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2010, 40(11): 1316–1325
27 McEwen A, Robinson M. Mapping of the Moon by clementine. Adv Space Res, 1997, 19(10): 1523–1533
28 Nozette S, Rustan P, Pleasance L, et al. The Clementine mission to the Moon: Scientific overview. Science, 1994, 266(5192): 1835
29 Wu Y Z, Xue B, Zhao B C, et al. Global estimates of lunar iron and titanium contents from the Chang'E-1 IIM data. J Geophys Res, 2012, 117(E2): E02001
30 Papike J J, Hodges F N, Bence A E, et al. Mare basalts: Crystal chemistry, mineralogy, and petrology. Rev Geophys, 1976, 14(4): 475–540
31 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(1-4): 55–86
32 赵健楠, 黄俊, 肖龙, 等. 撞击坑直径频率分布测量方法在月球年代学中的应用. 地球科学: 中国地质大学学报, 2013, 38(2): 1–11
33 Arvidson R, Boyce J, Chapman C, et al. Standard techniques for presentation and analysis of crater size-frequency data. Icarus, 1979, 37(2): 467–474
34 Morota T, Haruyama J, Ohtake M, et al. Timing and characteristics of the latest mare eruption on the Moon. Earth Planet Sci Lett, 2011, 302(3-4): 255–266
35 Pieters C M, Boardman J, Buratti B, et al. The Moon Mineralogy Mapper (M3) on Chandrayaan-1. Curr Sci, 2009, 96(4): 500–505
36 Cheek L C, Pieters C M, Boardman J W, et al. Goldschmidt crater and the Moon's north polar region: Results from the Moon Mineralogy Mapper (M3). J Geophys Res, 2011, 116: E00G02
37 Mustard J F, Pieters C M, Isaacson P J, et al. Compositional diversity and geologic insights of the Aristarchus crater from Moon Mineralogy Mapper data. J Geophys Res, 2011, 116: E00G12
38 Yamamoto S, Nakamura R, Matsunaga T, et al. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE. Nature Geosci, 2010, 3(8): 533–536
39 Elkins Tanton L T, Van Orman J A, Hager B H, et al. Re-examination of the lunar magma ocean cumulate overturn hypothesis: Melting or mixing is required. Earth Planet Sci Lett, 2002, 196(3): 239–249
40 Pieters C M. Copernicus crater central peak: Lunar mountain of unique composition. Science, 1982, 215(4528): 59–61
41 Wieczorek M A, Neumann G A, Nimmo F, et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL. Science, 2012, 339(6120): 671–675

Geological features and magmatic activities history of sinus Iridum, the moon

QIAO Le, XIAO Long*, ZHAO JianNan & HUANG Qian

Planetary Science Institute, Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

The Sinus Iridum region is one of the most important candidate landing targets for Chinese lunar landing mission Chang'E-3 (CE-3). Because of its flat topography, complex evolution history and abundance of geological features, it shows great significance to both science and engineering. There are abundant geological features, such as winkle ridges, mare rilles, impact craters and crater chains in this region, indicating complex evolution history. In this paper, we use Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) Altimeter (LOLA) and Camera (LROC) data to characterize regional topography and geological features. We deduce the iron and titanium content from Clementine ultraviolet-visible (UVVIS) data and generate mineral absorption features from the Chandrayaan-1 Moon Mineralogy Mapper (M^3) imaging spectrum data. Results show that this region has experienced four magmatic events. The composition of these basaltic materials filled in different time changes from low-titanium basalts in earlier time to medium-titanium basalts in later time. The inner Sinus Iridum has a composition of mature and pyroxene-rich materials, but olivine abundance of these pyroxene-rich materials increases from old to young. The surrounding highlands have a dominantly feldspathic composition. In the north wall, there exposed some possible mantle origin olivine-rich materials. The comparable flat topography condition and abundant geological features make Sinus Iridum an excellent site to carry out in-site analyses and rover exploration.

Sinus Iridum, Moon, geological features, magmatic activities, lunar exploration

PACS: 96.20.Br, 96.20.Dt, 96.20.Ka, 96.30.Bc, 91.40.Ac

doi: 10.1360/132013-297