



虹湾地区月球卫星遥感地质解析制图

陈圣波*, 孟治国, 崔腾飞, 连懿, 王景然, 张旭晴

吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

*E-mail: chensb@jlu.edu.cn

收稿日期: 2010-05-31; 接受日期: 2010-08-09

国家高技术研究发展计划(编号: 2008AA12A212, 2010AA122203)和国家自然科学基金(批准号: 40901187, 40901159)资助项目

摘要 月球卫星遥感的目标就是利用地质概念研究月球表面特性、深部结构和演化历史. 以月球正面雨海虹湾地区为例, 利用 Clementine UV/VIS 数据提取 TiO_2 和 FeO 的含量图. 基于 SELENE TC 图像, 完成虹湾地区撞击坑和地层单元的解译, 并由此利用撞击坑直径-频率统计方法获取虹湾地区不同地层单元的形成年龄. SELENE 的重力场模型(SGM90d)揭示虹湾与雨海的重力特征差异, 表现为独立的地质单元. 嫦娥一号微波辐射计数据反演的月壤厚度与 SELENE 的数字地形模型在空间分布上有对应关系. 综合这些多源遥感信息, 表明虹湾与雨海无论深部结构还是表面沉积作用都表现为独立地质单元; 虹湾形成后, 经历了多期次沉降活动、沉积作用和撞击作用, 表现为目前探测的状态. 虹湾地区遥感地质解析结果将为未来潜在登月点选择或采样等提供科学依据.

关键词 虹湾, 遥感地质, 制图, Clementine, SELENE, 嫦娥一号

PACS: 95.55.Pe, 95.85.-e, 96.20.Dt, 96.20.Br

1 前言

自 1990 年以后, 多国相继发射了新的月球探测卫星, 开始了新一轮的月球探测高潮, 获取了越来越多的月球卫星遥感数据. 代表性的月球探测卫星包括美国的 Clementine(1994 年 1 月 25 日)、日本的 SELENE(2007 年 9 月 14 日)、中国的嫦娥一号(2007 年 10 月 24 日)、印度的 Chandrayaan-1(2008 年 10 月 22 日)、美国的 LRO 和 LCROSS(2009 年 6 月 18 日)等. 这样, 新的月球遥感地形、多光谱、高光谱和微波数据能够满足更高精度的月表地质解析制图^[1-4].

月球卫星遥感的目标就是利用地质概念研究月球表面特性、深部结构和演化历史^[5]. Apollo 计划前的月球卫星遥感地质制图满足随后登月点的选择,

提出月球地质问题, 而登月后的探测结果则来验证遥感地质解析结果, 进而解决这些月球地质问题^[6,7]. 在 20 世纪 60 年代晚期, 美国地质调查局通过月球卫星数据首先制作了 44 幅月球地质图. 月球地层基础也被建立起来, 满足了月球地质制图的需要, 由此推动月球地球科学的快速发展^[4,8]. 月表的岩石矿物成分是研究其形成和地质演化的重要依据, 而月表反射光谱能够将月表采样点已知的地质特征扩展到区域和全月球地质研究^[9,10], 如利用 Clementine 紫外-可见光的比值图像来估算月海玄武岩中的 TiO_2 和 FeO 含量^[11-13], 由此研究月表区域地质历史^[14], 其中月表撞击坑尺寸-频率分布是目前应用最广泛的月表区域地质年龄确定方法^[15,16]. 主动微波中的雷达和被动微波中辐射计能够探测月表碎屑沉积物的分层

厚度及其岩石矿物含量和分布^[17-21]。月表重力、磁性等地球物理特性探测能够研究月球深部结构, Apollo 计划以后在月表发现许多新的重力异常, 如质量瘤等^[22,23]。因此, 综合不同月球卫星数据, 在月球卫星发射计划完成后都得到了新的月表地质、物理和化学成分信息, 加深月球地质科学的认识^[1,24]。目前, 月表已经开展遥感地质综合解析制图的地域有月球的阿里斯塔克高原(Aristarchus Plateau)^[1]、马里乌斯(Marius)地区^[2]、南北极(Mest 2007)^[25]、哥白尼(Copernicus)地区^[4]、云海(Nubium)地区^[14]、拉塞尔(Lassell)地区^[26], 以及 Apollo 登月点等。

选择遥感地质综合解析的地域一方面考虑其地质意义, 另一方面是作为未来的登月采样点^[3,25,27]。月球正面雨海虹湾地区作为未来中国登月采样的潜在地域, 该研究将综合 Clementine, SELENE, 嫦娥一号等月球卫星数据, 提取该区地形、元素成分、碎屑沉积物的厚度和年龄, 以及虹湾-雨海地区重力异常特征等, 进行遥感地质综合解析制图, 将为未来的登

月采样等提供科学依据。

2 虹湾地理位置

月球正面虹湾(Sinus Iridum)作为雨海(Mare Imbrium)西北部重要的海湾, 中心经纬度为 44.1°N/31.5°W, 直径 259 km, 底部面积 47750.927 km²。虹湾西北部被侏罗山脉(Montes Jura)环绕, 并与比安钦尼(Bianchini)和莫帕屠伊斯(Maupertuis)撞击坑相邻。虹湾分别通过其两端的赫拉克莱特(Heraclides)和拉普拉斯(Laplace)海角与雨海相邻(图 1), 其中围绕虹湾, 根据不同的影像特征, 从东北角开始按照逆时针方向依次选择四个子区及其对应的高分辨率图像, 分别在图 1 上标记为 I-IV 区, 满足随后不同地层单元地质年龄的统计计算。

3 数据处理

研究中首先将 Clementine, SELENE, 嫦娥一号

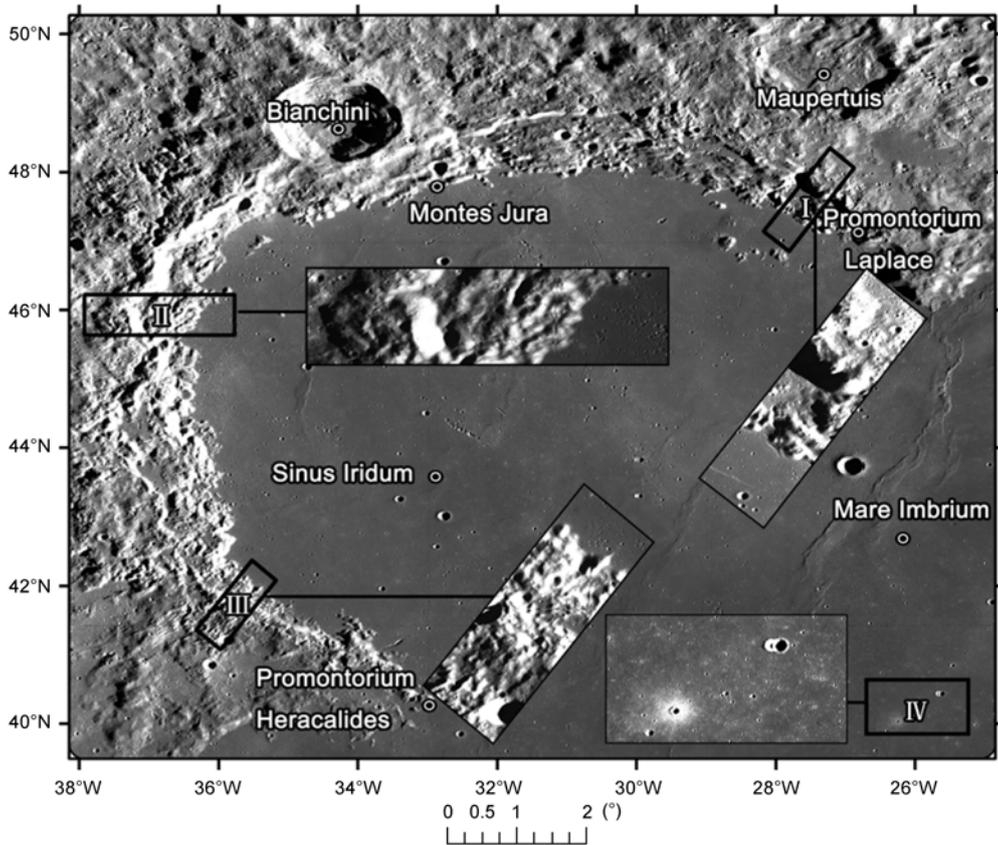


图 1 虹湾地理位置

等月球卫星数据统一到相同的 GCS_Moon_2000 基准(椭球体: Moon_2000_IAU_IAG)和经纬度坐标系统上, 然后通过处理分别提取虹湾地区地形、元素成分、碎屑沉积物的厚度和年龄, 以及虹湾-雨海地区重力异常特征等。

3.1 Clementine 数据处理

Clementine 卫星在轨搭载 UV/Visible 相机、近红外相机、激光高度计等 7 个不同的仪器。其中, UV/Visible 相机有 6 个波段, 中心波长(FWHM)分别是 415 nm(40 nm), 750 nm(10 nm), 900 nm(30 nm), 950 nm(30 nm), 1000 nm(30 nm) 和一个宽通道 400~950 nm。相机视场为 $4.2 \times 5.6^\circ$, 在 400 km 高的月球轨道上像幅为 40 km。图像矩阵为 288×384 像素, 像素分辨率在 100~325 m 之间变化。基于 2005 版统一月球控制网络(ULCN2005)的 UV/Visible 相机数据产品校正到相同的简单圆柱投影上, 分辨率为 303 像素/度。目前, UV/Visible 相机的多光谱数据已被成功应用到月表矿物元素成分分析中, 建立了月表 TiO_2 和 FeO 含量分析算法^[11,28]。

月表 TiO_2 和 FeO 含量算法为

$$\text{TiO}_2\% = 3.708 \left\{ \arctan \left[\frac{R_{415} / R_{750} - 0.42}{R_{750}} \right] \right\}^{5.979}, \quad (1)$$

$$\text{FeO}\% = -17.427 \arctan \left[\frac{R_{950} / R_{750} - 1.19}{R_{750} - 0.08} \right] - 7.565, \quad (2)$$

其中 $\text{TiO}_2\%$ 和 $\text{FeO}\%$ 分别是它们的含量百分比, R_{415} , R_{750} , R_{950} 分别是 UV/Visible 相机 415, 750 和 950 nm 三波段的反射率。

根据算法(1)与(2)式, 利用 Clementine UV/Visible 数据计算得到虹湾地区 TiO_2 和 FeO 的含量图(图 2)。从图 2 看出, 虹湾地区 TiO_2 含量比雨海低、比周围高地高, 而且虹湾内 TiO_2 含量与周围界限清晰, 表现为独立单元, 但其分布仍然不均匀, 说明有不同的形成期次, 岩性有差异; 相对相邻的雨海和高地, 虹湾地区 FeO 含量最高, 而且界限清晰。另外, 虹湾内 FeO 含量虽然差异不明显, 但与 TiO_2 含量呈正相关。虹湾周围高地外侧有一明显环行 FeO 低值带。

3.2 SELENE 数据处理

日本 SELENE(SELEnological and Engineering Explorer)卫星作为 Apollo 计划后最大的月球卫星探

测计划, 搭载多波段成像仪(MI)、成像光谱仪(SP)、地形相机(TC)、激光高度计(LALT)等 15 种仪器, 将采集月球矿物元素成分、地理、表面和深部构造、重磁场等数据信息, 有助于更好地理解月球的起源和演化。

3.2.1 LISM 数据

SELENE 卫星上 LISM 是三个高性能光学设备总称, 即多波段成像仪(MI)、成像光谱仪(SP)、地形相机(TC), 提供月球精确的地形、地质和矿物信息, 其中 TC 和 MI 都是两组相机, 完成月面连续的推扫成像, 可见光波段空间分辨率分别为 10 和 20 m, MI 近红外波段空间分辨率为 62 m。TC 完成月面波长在 430~850 nm 之间的全色立体成像, MI 波段设置类似 Clementine 卫星 UV/Visible 相机和近红外相机, 共 9 个波段。LISM 数据简单圆柱投影(Simple Cylindrical)校正到 GCS-Moon-2000 基准和经纬度坐标系统后裁剪得到虹湾地区 TC 图像(图 1), 满足撞击坑和遥感地质解译制图需要^[15]。

3.2.2 数字地形模型

激光高度计(LALT)的激光波长为 1064 nm, 激光输出能量为 100 mJ, 脉冲重复频率 1 Hz, 距离向精度为 5 m。LALT 测量的点数大约是 600 万, 是 ULCN2005 模型的 10 倍多。根据 LALT 数据解算生成的高精度全月球数字地形模型, 分辨率为 16 像素/度(图 3)^[29]。

从图 3 看出, 虹湾内地形从东南向西北倾斜, 最低点在西北部侏罗山内侧, 深度超过 3000 m, 但虹湾内总体地形坡度小于 2° , 适合未来月球车登陆采样。侏罗山内侧较陡, 为多级阶地。同时, 侏罗山外侧也比较陡, 形成了相对高的台地。台地最高高度为 1000 m, 与湾内最大高差达 4700 m。

3.2.3 重力场模型

SELENE 卫星包括主卫星、子卫星(Vstar)和中继卫星(RSAT), 并开发了一个卫星到卫星的多普勒跟踪子系统实现月球背面卫星的轨道跟踪。通过处理这些卫星跟踪数据, 首次建立一个适合月球正面和背面的重力场模型(SGM90d)^[23]。由此, 得到虹湾-雨海地区布格重力异常图(图 4)。

从图 4 看出, 研究区东南角高的重力正异常为

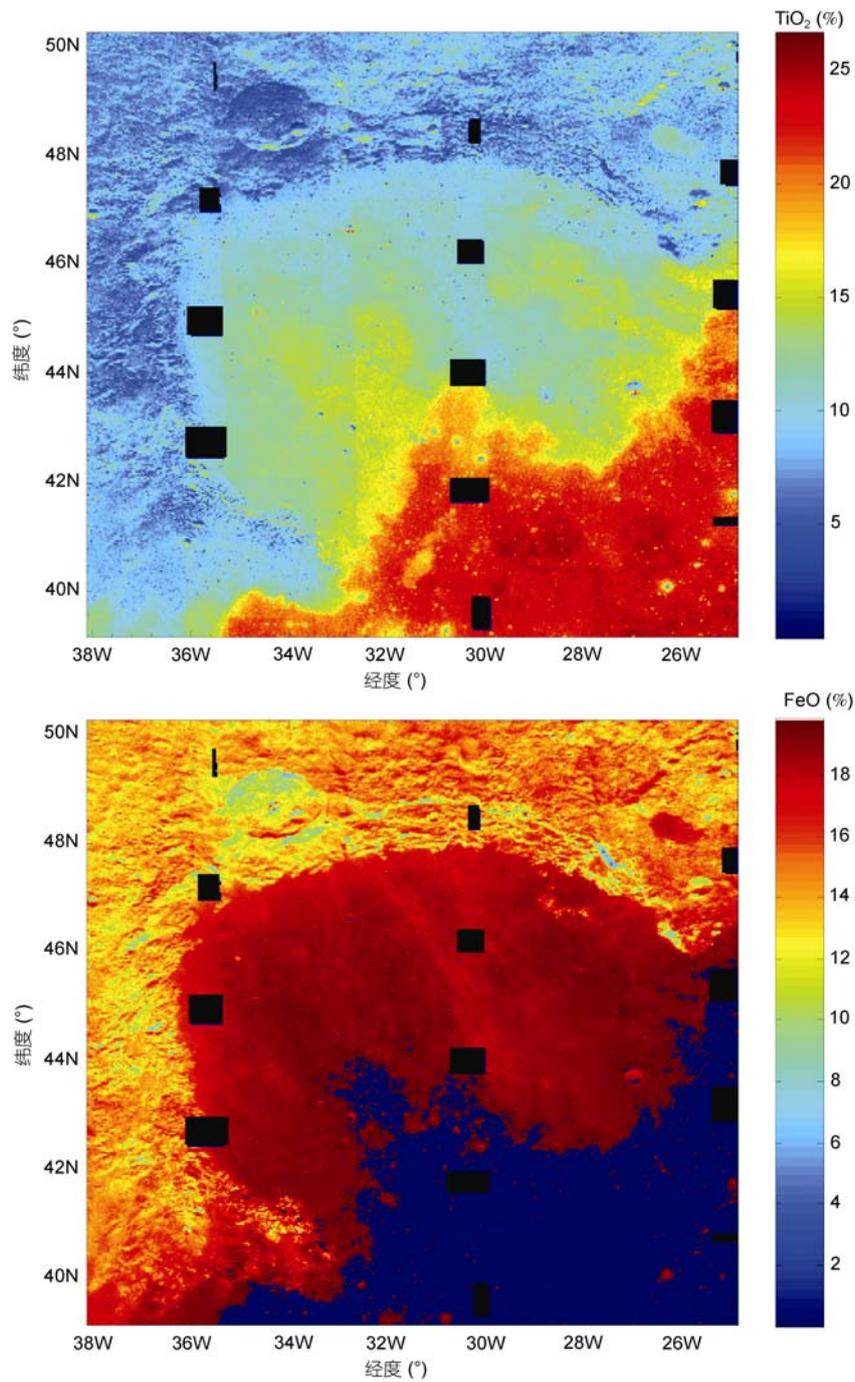


图2 虹湾地区 TiO_2 和 FeO 含量图

350 mGal, 在雨海的中心, 是月球正面 5 个主要的质
量瘤之一. 雨海中心的外围则环绕系列重力负异常.
虹湾中心为一北东向重力负异常-240 mGal, 外围台
地为重力高值异常, 与地形高差呈现明显的镜像关
系. 但是, 虹湾与雨海相连的低地形为两高重力正异

常, 在两海角连线的外侧, 与该区低地形没有镜像关
系, 并与虹湾中心北东向重力负异常延伸方向平行.
虹湾与雨海的重力特征差异说明它们的形成演化表
现为独立的地质单元, 以虹湾两海角北东向连线外
侧为深部构造分隔线.

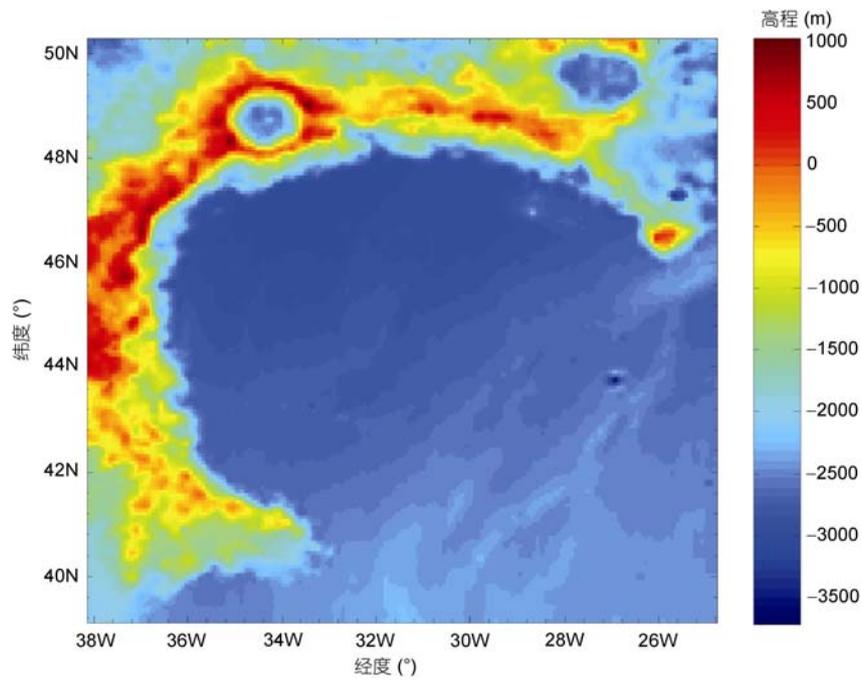


图3 虹湾地区数字地形模型

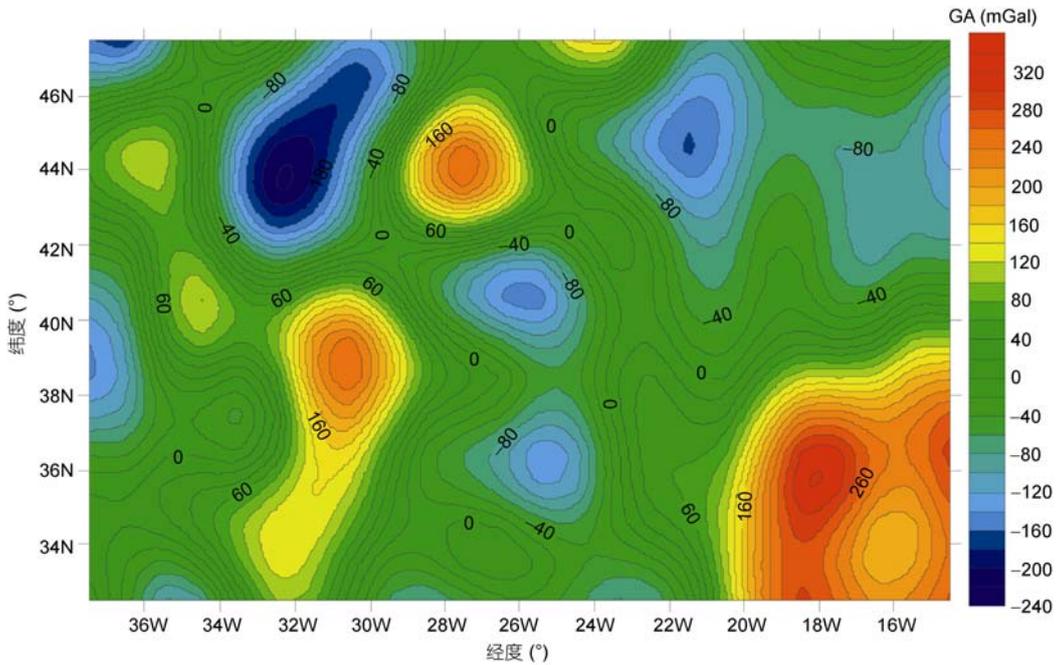


图4 虹湾-雨海地区布格重力异常图

3.3 嫦娥一号数据处理

嫦娥一号卫星搭载 CCD 相机、激光高度计、干涉成像光谱仪、微波辐射计等 9 种仪器, 其中微

波辐射计的工作频率为 3.0, 7.8, 19.35 和 37 GHz, 对应的空间分辨率分别为 56.0, 35.0, 35.0 和 35.0 km, 灵敏度为 0.5000. 微波辐射计的探测目标就是估算

月壤厚度. 根据微波辐射传输理论和二流近似原理, 建立了月壤中的微波辐射传输模型, 并由此实现月壤厚度的查找反演^[18].

在微波辐射计观测方向角 θ_0 上, 亮温 T_B 由来自致密介质的辐射 T_{B1} 和来自下垫面的辐射 T_{B2} 组成

$$T_B = T_{B1} + T_{B2} = T_{1up} + T_{1dn} + T_{2up}, \quad (3)$$

其中

$$T_{1up} = \int_0^d \frac{1-r_{p1}}{1-L} k_{a1}(z) T(z) \sec \theta_1 e^{-\int_0^z k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz'} dz, \quad (4a)$$

$$T_{1dn} = \int_0^d \frac{(1-r_{p1})r_{p2}}{1-L} k_{a1}(z) T(z) \sec \theta_1 \times e^{-\left(\int_z^d k_{a1}(z') \sec(\theta_1 + \theta_x) dz' + \int_0^d k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz'\right)} dz, \quad (4b)$$

$$T_{2up} = \int_d^\infty \frac{(1-r_{p1})(1-r_{p2})}{1-L} k_{a2}(z) T(z) \sec \theta_2 \times e^{-\int_d^z k_{a2}(z') \sec \theta_2 dz'} \cdot e^{-\int_0^d k_{a1}(z') \sec \theta_1 dz'} dz, \quad (4c)$$

这里考虑了下界面倾斜, 倾角为 θ_x ; θ_1 和 θ_2 分别是微波在月壤和月岩中的入射角, 满足折射定理; $p = h, v$, 分别代表波的水平 and 垂直极化; $K_{a1}(z)$ 和 $K_{a2}(z)$ 分别是深度 z 处月壤、月岩的吸收系数, 它们与月壤和月岩的介电常数有关; r_{p1} 和 r_{p2} 分别为真空-月壤界面1和月壤-月岩界面的有效反射率, 它们是月壤和月岩的介电常数实部的函数; d 为月壤厚度; $L = \frac{r_{p1}r_{p2}e^{-2\int_0^d k_{a1}(z) \sec \theta_1 dz}}{1-L}$, 且 $1/(1-L)$ 为多次反射系数; $T(z)$ 是月壤内部的温度梯度函数. 由此, 得到月壤厚度反演的查找表. 结合嫦娥一号卫星微波辐射计在3 GHz测量的月面微波亮温, 实现虹湾地区月壤厚度的反演(图5).

从图5看出, 虹湾内月壤厚度较低, 平均厚约3 m, 外围台地月壤较厚, 达15 m, 向外依次变薄. 另外, 虹湾内相对雨海, 月壤厚度反而变薄, 而且二者有明显的界限.

4 遥感地质解析

通过SELENE TC图像光谱和纹理特征的增强处理, 并结合Clementine卫星UV/Visible相机数据所提取的TiO₂和FeO含量图, 同时兼顾嫦娥一号微波辐

射计数据所反演的月壤厚度和地形特征, 完成虹湾地区遥感图像的可视化解译, 识别出虹湾地区月表19类不同的地质单元. 根据美国地质调查局(USGS)所划分的月表地层单位^[8], 完成虹湾地区遥感地质解译制图(图6).

同时, 基于SELENE TC图像, 选择4个不同子区(I-IV), 分别解译出撞击坑的分布(如图1). 并利用地理信息系统软件(ArcGIS), 统计撞击坑直径-频率分布, 由此计算4个不同子区由内向外不同地层单元的地质年龄^[15,30](如表1). 采用的地质年龄计算公式为

$$N_{cum}(D \geq 1 \text{ km}) = 5.44 \times 10^{-14} \times (e^{6.93t} - 1) + 8.38 \times 10^{-4}t, \quad (5)$$

其中 t 是地质年龄, N_{cum} 是每平方公里上直径>1 km的撞击坑个数.

综合虹湾地区多源遥感信息, 可以看出其形成和演化的特征. 得到的认识归纳为:

4.1 虹湾与雨海的关系

虹湾(Sinus Iridum)作为雨海(Mare Imbrium)的海湾, 沿虹湾两海角连线方向上相连. 但是虹湾在雨海火山喷发前已经存在, 大面积火山喷发物(Elm)向虹湾方向漫延, 覆盖在虹湾不同期次的地层单元(Im1, Im2和Ccsc)上, 地形上从雨海向虹湾方向缓缓倾斜.

从虹湾-雨海地区重力异常图上, 虹湾为重力负异常, 外围为重力正异常; 而雨海中心则为重力正异常, 外围为重力负异常. 沿虹湾两海角北东连线方向表现为明显的重力梯度带, 说明它们在深部结构上不同.

虹湾-雨海地区月壤覆盖较薄, 而且虹湾内比雨海地区更薄. 从虹湾与雨海地层单元的成分上也明显不同. 虹湾内是FeO含量高值区, 雨海则为低值区, 二者界限清晰; 雨海TiO₂含量为高值区, 虹湾内TiO₂含量中等, 二者界限也清晰. 因此, 无论从雨海和虹湾的深部结构, 还是表面沉积物的空间关系和化学成分上都不同, 说明它们在形成机制或年代上的差异.

4.2 虹湾的形成与演化

虹湾内地层单元主要有三期次, 从老到新依次为Im1(3.13 Ga), Im2(3.06 Ga)和Ccsc, 后期地层覆盖

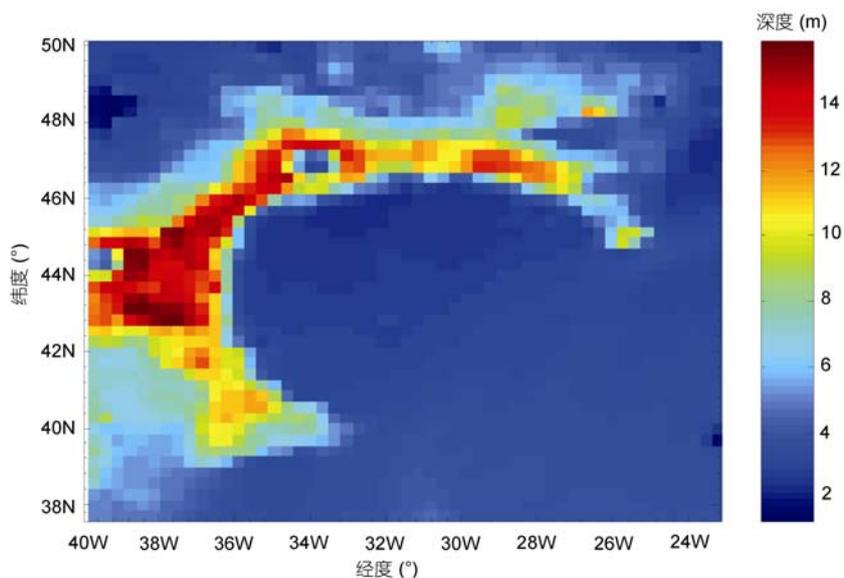


图 5 虹湾地区反演的月壤厚度图

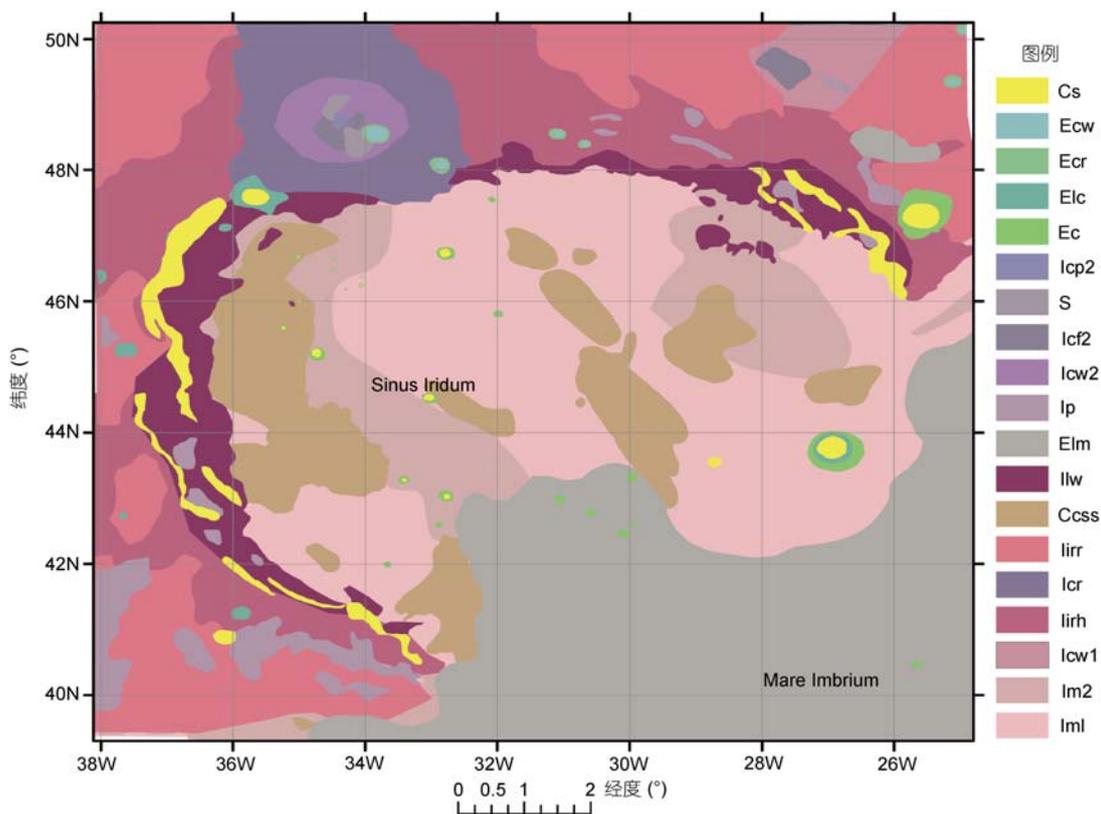


图 6 虹湾地区遥感地质解译制图

在前期地层上, 这种地层间的相对新老关系与其撞击坑尺寸-频率统计年龄一致. 三期地层总体呈北西

向分布, 但其上覆盖的月壤等厚度线则呈北东向, 向北西方向依次变薄, 说明可能与雨海火山喷发活动

表1 虹湾地区主要地层单元及其地质年龄

分区	地层单位	岩性	地质年龄(Ga)
I	Im2	月海火山沉积物	3.06
	Iiw	前雨海纪裸露基岩、虹湾或者雨海盆地撞击后弹射物及其再改造的混合物	4.02
	Cs	斜坡上多期沉降而裸露岩石碎片	3.92
	Ip	当地火山熔岩流动填充到低洼区火山碎屑物	
	Iirh	台地上虹湾内部撞击弹射碎屑物	4.03
II	Ccsc	次生火山口聚集区	
	Im2	月海火山沉积物	3.06
	Iiw	前雨海纪裸露基岩、虹湾或者雨海盆地撞击后弹射物及其再改造的混合物	4.02
	Cs	斜坡上多期沉降而裸露岩石碎片	3.92
	Iirh	台地上虹湾内部撞击弹射碎屑物	4.03
	Iirr	台地外围沉积的虹湾内撞击弹射碎屑物	4.05
III	Im1	月海火山沉积物	3.13
	Iiw	前雨海纪裸露基岩、虹湾或者雨海盆地撞击后弹射物及其再改造的混合物	4.02
	Ip	当地火山熔岩流动填充到低洼区火山碎屑物	
	Cs	斜坡上多期沉降而裸露岩石碎片	3.92
	Iirh	台地上虹湾内部撞击弹射碎屑物	4.03
IV	Elm	雨海火山沉积物	2.62

密切相关. 相对而言, Im2 中 FeO 和 TiO₂ 含量都相对较高, Ccsc 中 FeO 和 TiO₂ 含量则相对较低, 而 Im1 中 FeO 和 TiO₂ 含量相对中等.

虹湾内壁有多级阶地, 有裸露的斜坡(Cs)、裸露的基岩和多期次火山活动混合沉积物(Iiw)、低洼地填充火山碎屑物及风化和撞击溅射堆积物(Ip). Iiw 中前雨海纪裸露基岩、撞击后弹射物及其再改造的混合物主要发生在 4.02 Ga. Cs(3.92 Ga)为虹湾多期次沉降或风化侵蚀形成的斜坡. Ip 主要为发生的低洼地填充堆积.

虹湾外围台地上沉积的雨海纪撞击坑溅射碎屑物(Iirh), 年龄相对较老, 是区内较老的地质单元(4.03 Ga). 虹湾台地外围沉积的虹湾内撞击后弹射物(Iirr)大致发生在 4.05 Ga, 部分覆盖在较老的地形上.

总之, 虹湾在前雨海纪 4.0 Ga 左右发生一次较强的地质活动, 形成虹湾雏形, 外围抬升成为台地, 中心沉降后发生大面积沉积; 由于中心多次沉降, 边缘形成多级阶地, 斜坡上出露有基岩(Iiw), 年龄与台地上碎屑沉积物相当, 其中部分为基岩风化侵蚀而裸露的斜坡(Cs), 年龄相对较新, 主要发生在雨海纪(3.92 Ga); 爱拉托逊纪后期(3.0 Ga)虹湾先后发生多次沉积作用(Im1 和 Im2). 而且, 虹湾内分布多块次生火山活动相对集中区(Ccsc), 其中西南部对应于地下重力负异常的中心. 哥白尼纪以来撞击坑多, 形态

保存完好.

5 结论

月球正面雨海虹湾地区作为未来中国登月采样的潜在地区. 该研究利用 Clementine UV/Visual 数据提取虹湾地区 TiO₂ 和 FeO 的含量图. 基于 SELENE TC 图像, 完成虹湾地区撞击坑和地层单元的解译, 并由此利用撞击坑直径-频率统计方法获取虹湾地区不同地层单元的地质年龄. SELENE 的重力场模型(SGM90d)揭示虹湾与雨海的重力特征差异, 表现为独立的地质单元. 嫦娥一号微波辐射计数据反演的月壤厚度与 SELENE 数字地形模型在空间分布上相对应.

综合虹湾地区多源遥感信息, 雨海和虹湾无论其深部结构, 还是表面沉积物的空间关系和化学成分上都不同, 说明它们在形成机制或年代上的差异. 虹湾在前雨海纪左右发生一次较强的火山活动, 形成虹湾雏形; 当外围抬升成为台地(Iirr 和 Iirh), 斜坡上则有裸露的基岩(Iiw 和 Cs), 低洼区被填充(Ip), 主要发生在雨海纪(3.92 Ga); 爱拉托逊纪后期虹湾内多次沉降并发生大面积沉积(Im1 和 Im2); 哥白尼纪以来局部撞击坑多, 总体形态保存完好. 因此, 虹湾地区代表了从前雨海纪、雨海纪、爱拉托逊纪和哥白尼纪多期地质事件, 代表了月球丰富的地质演化历史.

而且, 虹湾内部总体地形坡度小于 2° , 相对比较平坦, 质意义和地形起伏特征, 虹湾地区可以作为未来登月计划中的预选区。适合月球车软着陆和采样需要。因此, 综合考虑其地

致谢 感谢国家天文台提供嫦娥一号卫星微波辐射计数据。

参考文献

- 1 Lough T A, Gregg T K P. Geologic mapping of the Aristarchus Plateau region on the Moon. In: 41st Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2010
- 2 Yingst R A, Gregg T K P. Lunar geologic mapping: a preliminary map of a portion of the Marius Quadrangle. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2009
- 3 Ghent R R, Campbell B A, Hawke B R, et al. Remote sensing and geologic studies of the southeastern quadrant of the Moon. In: 37th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2006
- 4 Gaddis J A, Skinner Jr, Hare T, et al. Lunar geologic mapping: preliminary results for the Copernicus Quad. In: 36th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2005
- 5 Moore H J. Geologic interpretation of lunar data. *Earth Sci Rev*, 1971, 7(1): 5—33
- 6 Hawke B R, Head J W. Lunar KREEP volcanism: geologic evidence for history and mode of emplacement. In: 9th Lunar and Planet Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1978. 3285—3309
- 7 Head J W. Lunar highlands volcanism: Geologic and remote sensing data on domes of possible extrusive origin. In: 10th Lunar and Planet Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1979. 61—62
- 8 Wilhelms Don E, McCauley J F. Geologic map of the Near side of the Moon. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 1971
- 9 Elphic R C, Lawrence D J, Feldman W C, et al. Lunar Fe and Ti abundances: comparison of Lunar Prospector and Clementine data. *Science*, 1998, 281: 1493—1496
- 10 Cahill J T S, Lucey P G, Wieczorek M A. Compositional variations of the lunar crust: Results from radiative transfer modeling of central peak spectra. *J Geophys Res*, 2009, 14: E09001
- 11 Lucey P G, Blewett D T, Jolliff B L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images. *J Geophys Res*, 2000, 105: 20297—20305
- 12 Gillis J J, Jolliff B L, Korotev R L. Lunar surface geochemistry: global concentrations of Th, K, and FeO as derived from lunar prospector and Clementine data. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 3791—3805
- 13 Gillis-Davis J J, Lucey P G, Hawke B R. Testing the relation between UV-vis color and TiO₂ content of the lunar maria. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 6079—6102
- 14 Tompkins S, Pieters C M, Mustard J F. Distribution of materials excavated by the lunar crater Bullialdus and implications for the geologic history of the Nubium region. *Icarus*, 1994, 110: 261—274
- 15 Haruyama J, Ohtake M, Matsunaga T, et al. Long-lived volcanism on the lunar farside revealed by SELENE Terrain Camera. *Science*, 2009, 323: 905—908
- 16 Hiestinger H, Head III J W, Wolf U, et al. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts in Mare Frigoris and other nearside maria based on crater size-frequency distribution measurements. *J Geophys Res*, 2010, 5: E03003
- 17 Thompson T W, Masursky H, Shorthill R W, et al. A comparison of infrared, radar, and geologic mapping of lunar craters. *The Moon*, 1974, 10: 87—117
- 18 孟治国. 月壤参数的辐射传输模拟和查找反演技术研究. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 2008
- 19 王振占, 李芸, 姜景山, 等. 用“嫦娥一号”卫星微波探测仪亮温反演月壤厚度和³He资源量评估的方法及初步结果分析. *中国科学D辑: 地球科学*, 2009, 39(8): 1069—1084
- 20 Ono T, Kumamoto A, Nakagawa H, et al. Lunar radar sounder observations of subsurface layers under the nearside maria of the Moon. *Science*, 2009, 323: 909—912
- 21 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 Geophys Res*, 2009, 114: E11004
- 22 Scott D H. The geologic significance of some lunar gravity anomalies. *Geochim Cosmochim Acta*, 1974, 3(Suppl 5): 3025—3036

- 23 Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Farside gravity field of the Moon from four-way Doppler measurements of SELENE(KAGUYA). *Science*, 2009, 323: 900—905
- 24 Hawke B R, Giguere T A, Blewett D T, et al. Remote sensing and geologic studies of the northeastern portion of the lunar nearside: final results. In: 40th Lunar and Planet Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2009
- 25 Mest S C. Updated geologic and geomorphic maps of the lunar north and south poles. In: 38th Lunar and Planet Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2007
- 26 Muller A, Hawke B R, Lucey P G, et al. Remote sensing and geologic studies of the Lassel region of the Moon. In: 17th Lunar and Planet Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1986. 571—578
- 27 Moss B E, Haskin L A. Toward systematic estimation of the origins of regolith materials that might be sampled during a lunar highland geologic traverse. In: 25th Lunar and Planet Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1994. 943—944
- 28 Pieters C, Shkuratov Y, Kaydash V, et al. Lunar soil characterization consortium analyses: Pyroxene and maturity estimates derived from Clementine image data. *Icarus*, 2006, 184: 83—101
- 29 Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry. *Science*, 2009, 323: 897—900
- 30 岳宗玉, 刘建忠, 吴淦国. 应用面向对象的方法对月球撞击坑进行自动识别. *科学通报*, 2008, 53(22): 2809—2813