

doi:10.13745/j.esf.2014.06.019

# 月球东海盆地的矿物光谱特征及遥感探测

孙灵芝<sup>1</sup>, 凌宗成<sup>1,2,\*</sup>, 刘建忠<sup>3</sup>

1. 山东大学空间科学研究院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 山东 威海 264209

2. 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100012

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002

SUN Lingzhi<sup>1</sup>, LING Zongcheng<sup>1,2,\*</sup>, LIU Jianzhong<sup>3</sup>

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment; Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China

2. Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

**SUN Lingzhi, LING Zongcheng, LIU Jianzhong. The spectral characteristics and remote detection of minerals in lunar Orientale Basin. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 188-203**

**Abstract:** Orientale Basin is one of the youngest lunar impact basins. The topography and minerals distribution of Orientale Basin will provide information on the basin forming process and lunar evolution history. As shown by data from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA), Orientale Basin is a well-preserved multi-ring impact basin. We discovered various mineral types like spinel, crystalline plagioclase, pyroxene and olivine in Orientale Basin using hyperspectral data from Moon Mineralogy Mapper (M<sup>3</sup>). The spectra of mineral mixtures are deconvoluted by Modified Gaussian Model(MGM). The minerals distribution of Maander Crater are mapped by the method of Spectral Angle Mapper (SAM). Our findings of pure crystalline plagioclase are consistent with the recent lunar missions (e. g., Kaguya) and can provide new constraint for the lunar magma ocean hypothesis. The spinel was found in the central peaks of Lowell Crater with the aid of Multi-band Imager (MI) data to validate the discovery. The mineral mixture of spinel and crystalline plagioclase was also found in Maander Crater, which suggests that spinel might have a broader distribution in the Outer Rook Ring of Orientale Basin.

**Key words:** Orientale Basin; spinel; crystalline plagioclase; Modified Gaussian Model; Moon Mineralogy Mapper

**摘要:** 东海盆地是月球上最年轻的大型撞击盆地之一, 其地形地貌和矿物与岩石类型分布将有助于我们深入理解月球撞击盆地形成过程和地质演化历史。LOLA 高程数据揭示东海盆地为保存完好的多环撞击盆地。基于月球矿物绘图仪(M<sup>3</sup>)反射率数据, 在东海盆地发现了尖晶石、辉石、结晶斜长石、橄榄石等矿物, 采用修正高斯模型(MGM)进行混合矿物光谱分解获取了矿物端元, 利用光谱角分类方法(SAM)作出了 Maander 撞击坑的主要矿物分布图。发现的纯结晶斜长石矿物与最近其他月球探测(如 Kaguya)相吻合, 为月球岩浆洋模型提供了新约束条件。在 Lowell 撞击坑中央峰发现尖晶石分布, 并利用多光谱成像仪(MI)数据进行了验证; 利用 MGM 方法, 在 Maander 建造上发现结晶斜长石与尖晶石的混合矿物, 我们通过分析认为东海盆地的尖晶石在外卢克山脉上可能有更广泛的分布。

**关键词:** 东海盆地; 尖晶石; 结晶斜长石; 修正高斯模型; 月球矿物绘图仪

中图分类号: P184.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2014)06-0188-16

收稿日期: 2014-07-11; 修回日期: 2014-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(11003012, U1231103, 41373068, 41473065); 山东省自然科学基金项目(ZR2011AQ001); 中国科学院月球与深空探测重点实验室开放基金项目; 山东大学自主创新基金项目(2013ZRQP004); 山东大学(威海)优秀研究生科研创新基金项目(yjs13026)

作者简介: 孙灵芝(1990—), 女, 硕士研究生, 行星科学专业。E-mail: sunlz@mail.sdu.edu.cn

\* 通讯作者简介: 凌宗成(1981—), 男, 博士, 副教授, 行星科学专业, 主要从事行星科学教学、行星遥感与光谱学、行星样品及环境相互作用等研究工作。E-mail: zcling@sdu.edu.cn

## 0 引言

近年来随着世界各国月球探测器(如日本“月亮女神”号(Kaguya)、我国“嫦娥一号”(Chang'E-1)、印度“月船一号”(Chandrayaan-1)以及美国的“月球勘测轨道飞行器”(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)等)的成功发射,获取更高空间和光谱分辨率的数据成为可能,特别是一些多光谱和高光谱遥感数据的获取,有助于对月球矿物和成分展开深入研究。搭载于“月船一号”上的“月球矿物绘图仪”(Moon Mineralogy Mapper, M<sup>3</sup>)即是已有的水平最高的月球遥感探测载荷,它不但具有高光谱分辨率,且首次将光谱覆盖范围拓展到 3 μm,非常有利于对特殊月球物质(如 H<sub>2</sub>O/OH)的光谱特性及分布研究。

东海盆地位于月球正面西侧边缘,是月球上最年轻的撞击盆地(3.8 Ga),同时也是月球上最大的撞击盆地之一(直径约 930 km)<sup>[1-2]</sup>。与月球正面的其他大型撞击盆地(如酒海等)不同,东海盆地中央充填的岩浆量较少,因而拥有保存完好的多环建造<sup>[3-4]</sup>。对于东海地区的矿物分布,前人已经做过一定的分析<sup>[1,3-6]</sup>。早在 1984 年 Spudis 等<sup>[3]</sup>通过对地基望远镜所获取的月球光谱进行研究,认为东海盆地位于月球正面的溅射物,其矿物成分以斜长岩质(Aorthosite)为主。Ohtake 等<sup>[4]</sup>利用 Kaguya 的多光谱成像仪(Multiband Imager, MI)数据在月球上找到了纯斜长岩(Pure Anorthosite),并给出了纯斜长岩的主要分布位置。近年来, M<sup>3</sup> 数据由于具有较高的空间和光谱分辨率,得到了广泛应用并取得了诸多成果。Whitten 等<sup>[1]</sup>认为,东海盆地的月海沉积里的主要矿物为辉石,矿物成分(Fe<sup>2+</sup>和 Ca<sup>2+</sup>)变化主要来源于横向或者侧向的高地物质混合,月海玄武岩的 TiO<sub>2</sub> 含量范围在 3%~7%。Cheek 等<sup>[5]</sup>利用 Hapke 模型对光谱进行了混合,并将东海地区的斜长岩按纯度划分为 3 个等级,并给出了它们的主要分布范围,其中东海盆地最纯的斜长岩(99%~100%)主要分布在内卢克山脉上。Spudis 等<sup>[6]</sup>对东海地区的撞击熔融体进行了研究,认为 Maunder 建造主要由苏长斜长岩构成,且未经岩浆分异过程。

为更全面了解东海盆地矿物类型和分布特征,深入理解月球大型撞击对原始月壳的改造作用,本

文综合采用多种遥感数据对该区域地质单元的光谱特征及矿物成分进行探测与分析。其中,利用 LRO 的激光高度计(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)数据分析东海的地形和主要地质建造;以 M<sup>3</sup> 高光谱数据为主,结合“嫦娥一号”干涉成像光谱仪(IIM)数据和 Kaguya MI 数据,依据光谱特征对东海盆地主要矿物类型进行识别与填图;对某些混合矿物光谱,利用修正高斯模型进行解卷积,以判断其中的端员矿物种类。

## 1 数据与研究方法

M<sup>3</sup> 是美国 NASA 研制的新一代月球探测高光谱仪器,于 2008 年 10 月搭载印度“月船一号”探测器升空。M<sup>3</sup> 作为一个高光谱成像仪,其科学目标是对月表的主要矿物和岩石成分进行识别与填图<sup>[7]</sup>。月球镁铁质矿物的吸收特征主要位于可见近红外波段,而 M<sup>3</sup> 的光谱覆盖范围在 430~3 000 nm,而且具有较高的光谱分辨率(20~40 nm)<sup>[7]</sup>,可以对月球矿物展开全面而深入的研究。M<sup>3</sup> 有两种工作模式:全球模式和目标模式。在全球模式下轨道高度为 100 km,获取的数据有 85 个波段,空间分辨率为 140 m/pixel<sup>[1]</sup>。本研究使用的数据为全球模式探测所获取。我们使用高程数据为空间分辨率为 128 pixel/degree 的 LOLA DEM 数据。FeO 和 TiO<sub>2</sub> 含量来源于“嫦娥一号”(CE-1)干涉成像光谱仪(IIM)数据<sup>[8]</sup>。

我们将 M<sup>3</sup> 第一个光学周期 B(Optical Period 1B, OP1B)时间段内拍摄的高光谱图像进行几何校正和数据镶嵌,拼出了一幅东海地区的高光谱图像,并利用这幅图像进行光谱分析。由于所获取的 M<sup>3</sup> 全球模式数据的前两个波段数据缺失,我们去除了这两个波段,所以实际使用的数据有 83 个波段,波段范围是 540~2 976 nm,后文中进行 MGM 建模时,不再对波段的范围进行说明。

本研究首先利用 LOLA 高程数据和 M<sup>3</sup> 反射率数据简介东海地区的地质背景和主要地质建造特征。在此基础上,利用 M<sup>3</sup> 高光谱成像数据对东海盆地的主要矿物进行识别与分布填图。具体数据处理流程为:将 M<sup>3</sup> 二级反射率数据进行地面真值(ground truth)校正,计算若干吸收特征的积分深度(Integrated Band Depth, IBD),作出 IBD 假彩色图像,根据图像识别矿物类型并判断矿物分布,提取相

应感兴趣区域的光谱数据, 结合光谱特征和元素含量等信息对矿物类型进行深入分析。

由于光谱仪所获得的一般为月球表面矿物的混合光谱, 不容易区分, 我们使用修正高斯模型 (Modified Gaussian Model, MGM) 对混合矿物光谱进行特征峰位分析, 以期能够识别出混合矿物的端员和组分<sup>[9-12]</sup>。MGM 首先由 Sunshine 等<sup>[9]</sup> 提出, 这种方法利用物质的光谱解算出特征吸收峰的主要参数, 包括吸收中心、半高全宽和吸收峰强度。与 Hapke 的辐射传输模型相比, MGM 不依赖于端员矿物光谱, 而直接对未知混合矿物的光谱进行分解, 将端员矿物的特征吸收峰从混合矿物吸收峰里面解算出来。Sunshine 等<sup>[10-11]</sup> 通过实验测试发现, MGM 可以很好地将辉石和辉石的混合物——橄榄石等矿物的特征吸收峰识别出来, 并且不容易受到矿物的颗粒粒径大小的影响。因此, 我们将使用 MGM 方法, 对东海盆地发现的几种混合矿物 (如尖晶石与结晶斜长石等) 进行分析。

## 2 东海盆地的地质背景和地形

东海盆地位于月球正面西侧边缘, 是月球上最

年轻的撞击盆地之一, 形成于前雨海纪时期 (图 1)<sup>[1]</sup>。由于东海盆地的岩浆填充较少, 所以其拥有保存完好的多环状盆地结构。东海盆地有 4 个较为明显的环状结构, 从外向内依次为: (1) 科迪勒拉山脉 (Cordillera Mountainring), 直径约 930 km, 是一圈面向盆地内部的断崖, 其界定了东海盆地的主要范围; (2) 外卢克山脉 (outer rook ring, ORR), 直径约 620 km, 由一系列交错连接的山丘组成; (3) 内卢克山脉 (inner rook ring, IRR), 直径约 480 km, 主要由一些孤立的的山丘组成, 这些山丘是由一系列复杂撞击坑的中央峰形成的; (4) 中央月海玄武岩沉积, 即东海, 直径约 320 km, 东海由于热沉降效应下陷了约 3 km, 所以海拔相对周围较低 (图 1)<sup>[1,13]</sup>。

东海盆地的 4 个环界定了盆地内 3 个主要的岩浆沉积: 东海 (Mare Orientale)、春湖 (Lacus Veris) 和秋湖 (Lacus Autumni) (图 2)。东海位于盆地中央的最内环以内, 是盆地内最大的一个月海玄武岩沉积区域, 面积有约 90 000 km<sup>2</sup><sup>[14]</sup>。位于东海西南部的一个长方形的月海玄武岩沉积也被划分到东海的范围内。春湖位于内卢克山脉和外卢克山脉环之间, 面积约为 12 500 km<sup>2</sup>, 由 5 个较大的熔岩池和散落分布在周围一些小熔岩池组成, 它们集中分布在

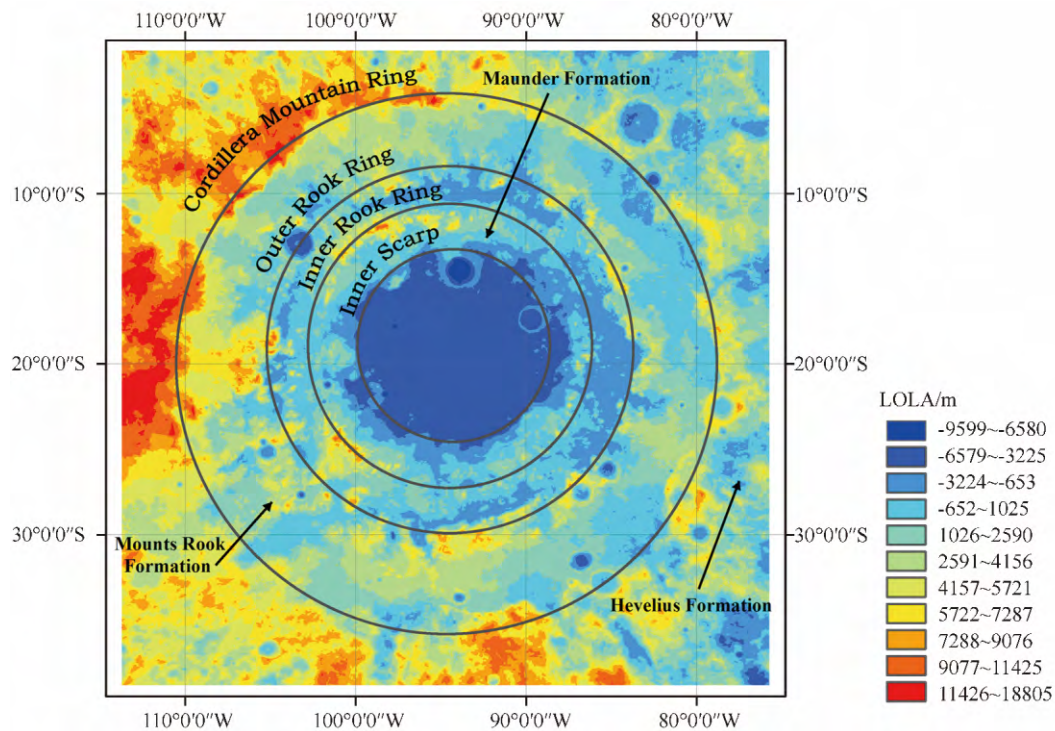


图 1 东海地区高程图像 (LOLA)

Fig. 1 The DEM image of Orientale Basin (LOLA)  
东海的 4 个环和 3 个主要建造已经标注在图上。

一个从东海的西北偏北延伸到东面的条带状区域<sup>[15]</sup>。秋湖面积约为5 000 km<sup>2</sup>, 位于东海内部的外卢克山脉与科迪勒拉山脉之间, 由3个较浅的熔岩池组成, 同样是呈条带状分布, 从东北偏东延伸到东海东部区域。除此之外, 在东海盆地的西南部, 有一个中心位于外卢克山脉环上的暗环(Dark Ring), 主要由火山碎屑岩沉积构成<sup>[1]</sup>。

东海盆地有3个与盆地撞击作用相关的沉积建造, 从内到外依次为 Maunder 建造、Mounts Rook 建造和 Hevelius 建造(图1)<sup>[16]</sup>。Maunder 建造主要位于外卢克山脉以内, 以港湾状环绕东海分布, 为撞击熔融体沉积; 主要包含一些较平滑的平原(海拔较低区域)和一些起伏较大的岩浆沉积, 这种地形显示 Maunder 建造可能包含撞击熔融体的不同岩相<sup>[5, 16]</sup>。

坡度图是描述地形的重要参数。坡度的定义是任意一点的切平面与水平面的夹角, 表示局部地区的倾斜程度<sup>[17]</sup>。我们基于 LOLA 的数字高程数据计算出了东海盆地的坡度(图3)。可以看到, 东海盆地在其几个环状构造的断崖附近坡度较大, 有些地方可以到 40°~70°甚至 70°以上, 除此之外则主要是在盆地内大型撞击坑的边缘有较大坡度。3个主要建造的坡度在 20°以内, 月海玄武岩沉积地区坡度较小, 基本在 10°以内。

### 3 东海盆地内主要矿物的光谱特征及分布

#### 3.1 东海地区主要矿物

矿物的吸收峰深度通常与矿物的组分和含量相关, 通常可以直接利用光谱吸收峰来判断矿物类型,

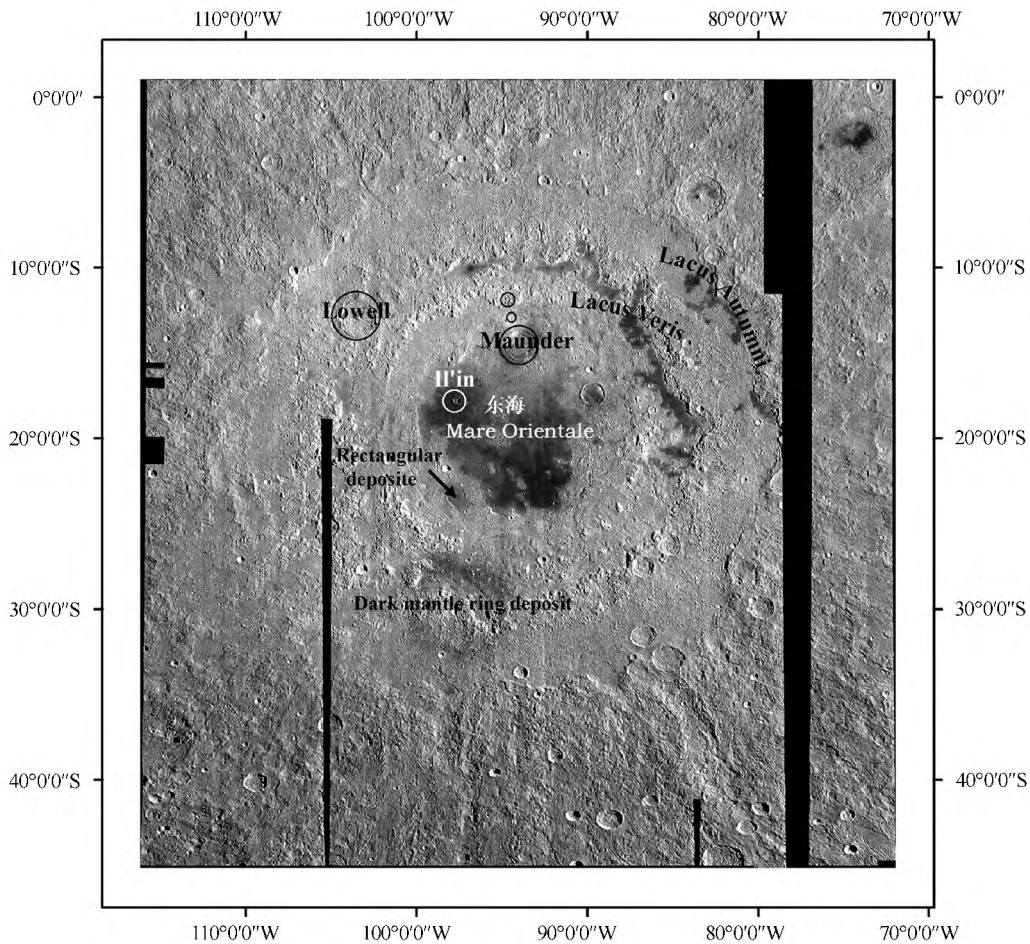


图2 东海盆地 2 986 nm 反射率图像

Fig. 2 The 2986 nm reflectance image of Orientale Basin

这个波段可以很好地反映地形。东海地区的一些主要撞击坑和月海沉积也标注在图上。

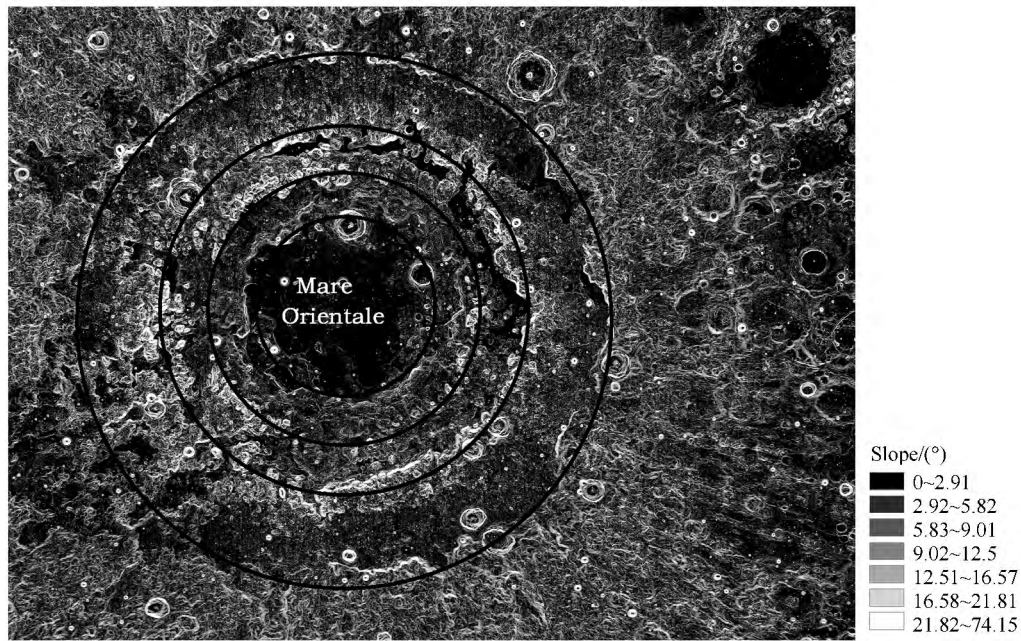


图3 东海盆地表面坡度图

Fig. 3 The surface slope map of Orientale Basin

表1 IBD参数及运算公式表示

Table 1 The parameters and definitions of IBD

参数	吸收峰位置	矿物类型	连续统	波段加和范围	公式
IBD1250	1 250 nm	结晶斜长石	1 029~1 578 nm	1 029~1 578 nm	$IBD1250 = \sum_{n=0}^{27} 1 - \frac{R(1029 + 20n)}{R_c(1029 + 20n)}$
IBD1000	1 000 nm	辉石和橄榄石	730~1 578 nm	810~1 508 nm	$IBD1\ 000 = \sum_{n=0}^{35} 1 - \frac{R(810 + 20n)}{R_c(810 + 20n)}$
IBD2000	2 000 nm	辉石和尖晶石	1 528~2 537 nm	1 858~2 417 nm	$IBD2000 = \sum_{n=0}^{14} 1 - \frac{R(1858 + 40n)}{R_c(1858 + 40n)}$

注:  $R_c$  为连续统上对应该波长的数值。

但是  $M^3$  所获取的高光谱遥感数据受到信噪比等因素的限制,通过反射率光谱或者简单的波段比值来判断矿物类型较难实现。IBD 是研究  $M^3$  数据比较常用的参数,即在一个吸收峰附近的范围内对所有波段的吸收深度进行加和,可以反映矿物的吸收峰深度。因此将几个主要吸收峰的 IBD 合成假彩色图,一方面可以减弱信噪比对吸收峰的影响,另一方面可以更加直观地判断主要矿物的分布和相对含量大小。我们所使用的 IBD 计算方法和具体参数见表 1。

月球表面铁镁质矿物吸收峰主要位于 1 000 nm 和 2 000 nm 附近,我们计算出这两个峰位附近的 IBD(公式见表 1),利用 IBD1 000(红)、IBD2 000(绿)和 1 508 nm 反射率(蓝)组合得到东海地区的矿物分布假彩色图(图 4)。因为 IBD 指示矿物的吸收峰位置,我们可以在假彩色图上查看一些主要矿

物的分布,如黄色代表辉石的分布,主要在几个月海玄武岩沉积地区;蓝紫色代表结晶斜长石的分布,主要位于内卢克山脉及 Maunder 建造。东海地区的 FeO 及  $TiO_2$  含量由“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据得到,分别见图 5a、b。

通常矿物类型可以通过其特征吸收峰判断。但是月表矿物光谱不但与矿物的成分相关,还受到空间风化效应的影响,如某些矿物晶格中的  $Fe^{2+}$  被还原成单质铁,导致吸收峰变浅,并且在光谱上会产生从红外到可见光波段的整体红移。这些效应会影响对矿物类型的判断,因此,为了避免空间风化效应的影响,我们主要采集月表新鲜区域的矿物光谱,如溅射物较亮的小撞击坑壁及溅射物上,或者在大型撞击坑的中央峰等。同时为了更清楚地看到矿物的吸收峰位置和去除光谱红移的影响,我们以过 750 nm、1 578 nm 和 2 000 nm 三点定义的折线为连续

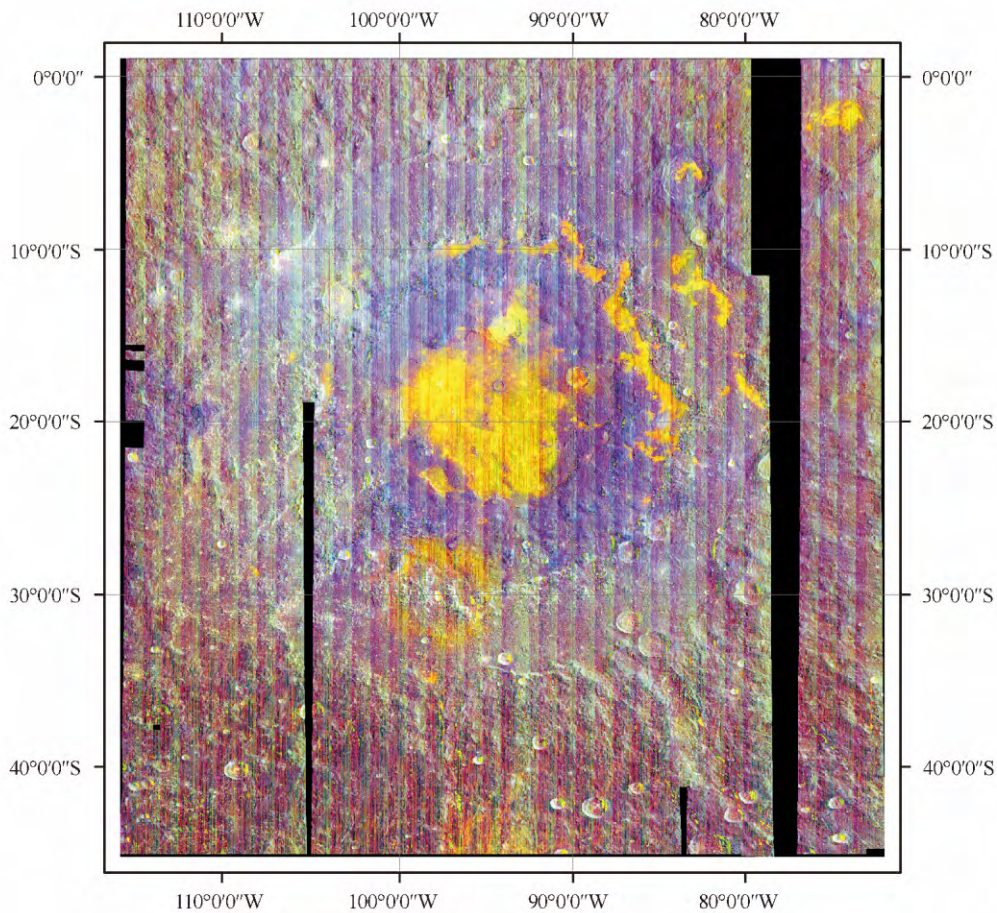


图4 东海地区 IBD 假彩色图

Fig. 4 IBD false color map of Orientale Basin

R: IBD 1 000 nm; G: IBD 2 000 nm; B: IBD 1 508 nm反射率。

统,在光谱上去除。在图6上可以看出去除连续统以后,矿物的主要吸收峰变得更加明显。我们在东海地区发现了辉石、尖晶石、橄榄石、结晶斜长石等矿物的分布。由于经历了长时间的陨石轰击作用,月表矿物已经部分混合,我们找到的光谱大多来源于两种甚至更多的矿物混合。以下分小节详细介绍发现的矿物类型及分布特点。

### 3.2 结晶斜长石

纯结晶斜长石(pure crystalline plagioclase)的主要特征是高反射率和在1 250 nm的特征吸收,而且在其他位置没有吸收特征<sup>[4]</sup>。我们在内卢克山脉上找到了纯结晶斜长石的光谱(图6)。图7为1 250 nm处的IBD灰度图,越亮的区域代表吸收峰越深。在内卢克山脉以及Maunder建造区域的IBD明显高于周围区域,说明这里有较强的1 250 nm的吸收;相应于图4中,这块区域呈蓝紫色,说明具有1 508 nm较高的反射率。FeO在这一区域的分布均值小于6%,

TiO<sub>2</sub> 均值小于2%,属于低铁低钛的长石质高地。综上所述,我们推断在Maunder建造和内卢克山脉区域分布有大量的结晶斜长岩,特别是在内卢克山脉的东部偏南、西南和西北偏北的几处山丘处分布的结晶斜长岩纯度较高(图7)。

月球岩浆洋假说认为高地月球壳是由浮在岩浆洋表面的斜长石结晶而成的,月壳中的元素含量对于理解月球岩浆洋假说有重要的意义。因为纯结晶斜长石中的FeO和TiO<sub>2</sub>含量接近于0,可以为岩浆洋演化模型提供新的约束条件<sup>[4]</sup>。

### 3.3 辉石

#### 3.3.1 几种辉石的分布

辉石类矿物有两个特征吸收峰,分别位于1 μm和2 μm处,主要由Fe<sup>2+</sup>的电子跃迁导致(图7)。在辉石矿物中,吸收峰的位置主要由Fe<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>和Ca<sup>2+</sup>离子主导,因为这3种阳离子最容易填充辉石晶格结构中的M1和M2(八面体结构中间阳离子的

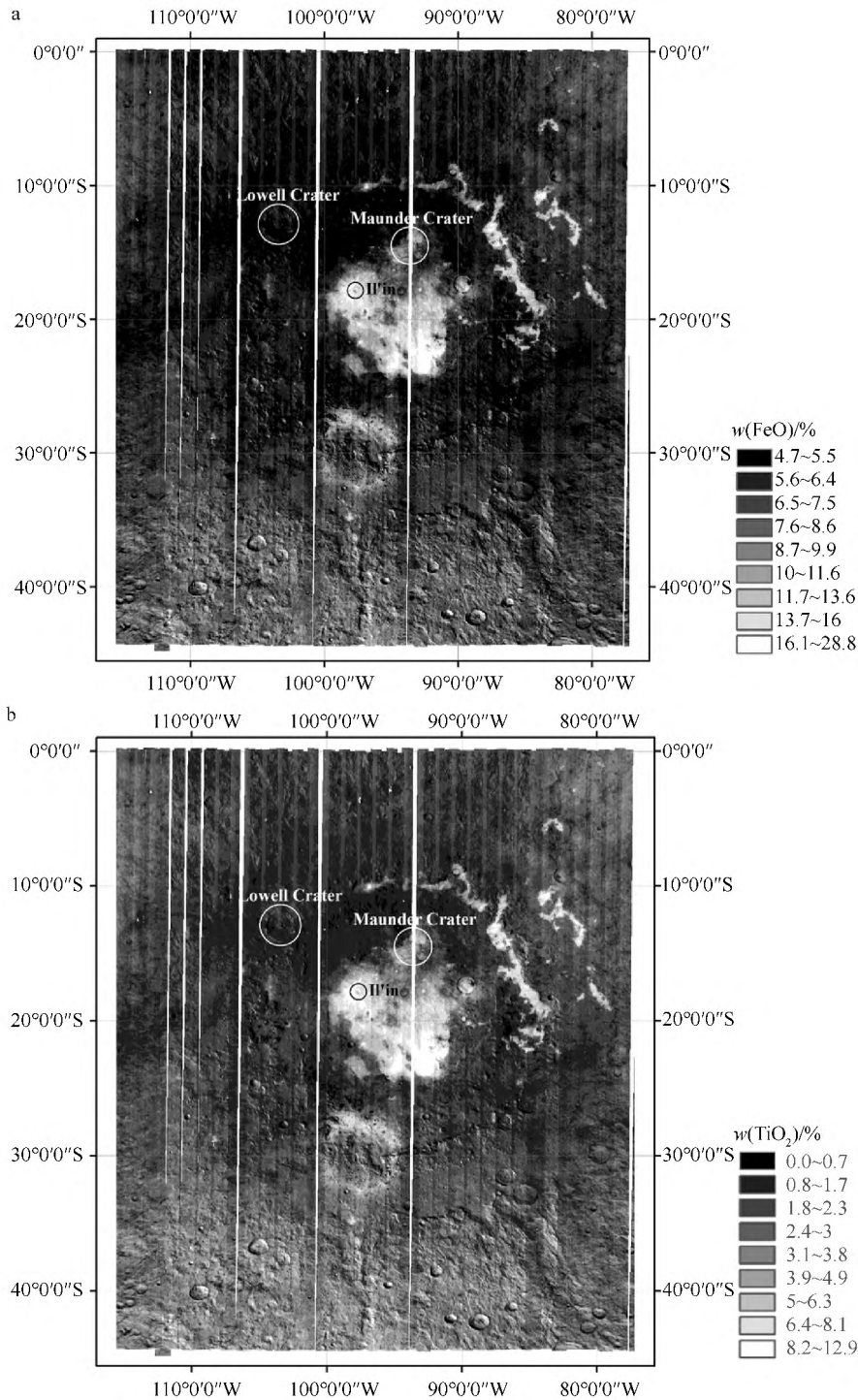


图5 利用“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据得到的 FeO 分布图(a)和 TiO<sub>2</sub> 分布图(b)  
 Fig.5 FeO map (a) and TiO<sub>2</sub> map (b), these two maps are derived from Chang'e-1 IIM data

位置)。如果有更多的 Fe<sup>2+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 离子替代 Mg<sup>2+</sup> 离子,或者 Ca 含量增加的话,1 000和2 000 nm处的吸收峰位置都会向长波长方向移动<sup>[1]</sup>。单斜辉石中 Ca<sup>2+</sup> 离子占据 M2 位置,而在斜方辉石中则更多是 Fe<sup>2+</sup> 占据 M2 位置<sup>[18]</sup>。斜方辉石的吸收峰位于 910

~940 nm 和 1 880~2 060 nm;低钙辉石的吸收峰位于 940~980 nm 和 2 000~2 200 nm;高钙辉石(单斜辉石)的吸收峰分别位于 1 030 nm 和 2 300 nm<sup>[19-20]</sup>。

图 4 中黄色和黄绿色的区域代表辉石类矿物的

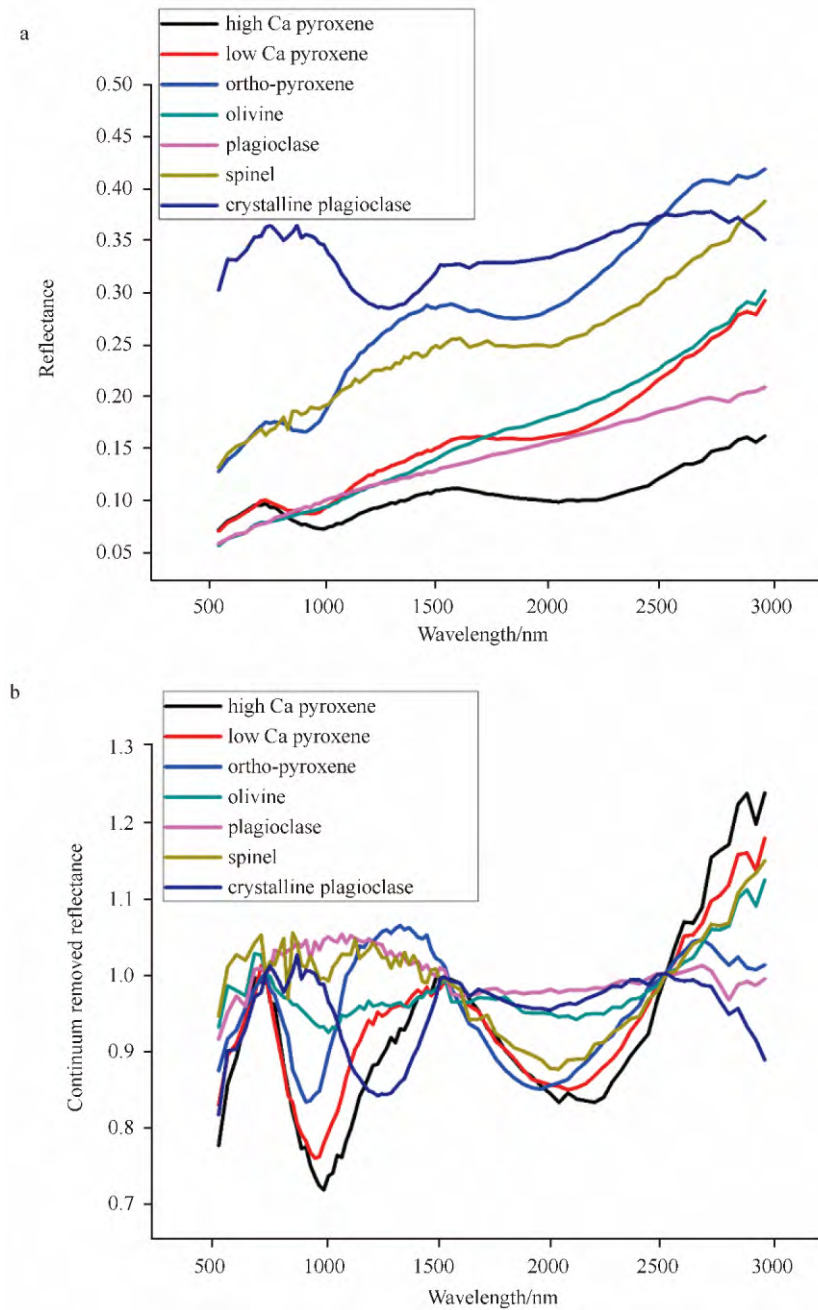


图 6 M<sup>3</sup> 原始数据反射率光谱(a)去除连续统后的矿物光谱(b)

Fig. 6 Original reflectance spectra of M<sup>3</sup> (a), and continuum removed spectra (b)

连续统为一条折线,由 750 nm、1 578 nm 和 2 547 nm 3 点定义。其中斜长石(plagioclase)无任何吸收峰,作为其他矿物吸收的对比。

分布,主要分布在东海的几个主要月海玄武岩沉积——东海、春湖、秋湖以及 Maunder 建造西南部的一个矩形月海沉积,在东海盆地内的一些小型火山口也有一些辉石分布。位于东海西南部的暗环由于主要由火山碎屑岩和火山玻璃组成,也发现了辉石的分布<sup>[1]</sup>。

根据辉石矿物的主要光谱特征,我们在东海地

区的新鲜撞击坑附近找到了斜方辉石、低钙辉石和高钙辉石等 3 种辉石的分布(图 8)。高钙辉石在 Il'in 坑壁及附近的小撞击坑发现。Il'in 撞击坑位于东海中央月海沉积的西北部(17. 8°S, 97. 7°W),直径为 13 km 左右,根据 Pike 定义的撞击坑深度/直径关系,Il'in 坑的开挖深度在 0. 8~1. 3 km<sup>[21-23]</sup>。低钙辉石分布在东海西南部一个小撞击坑的坑壁



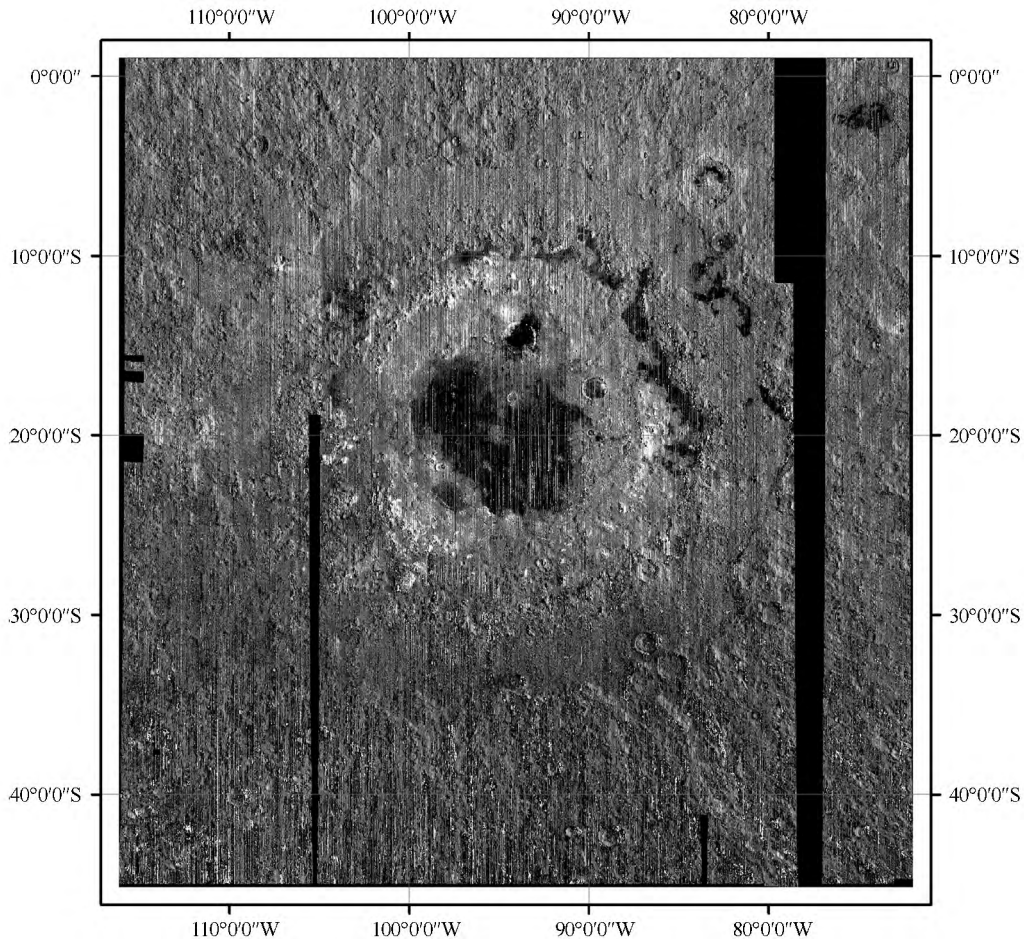


图7 1250 nm的IBD灰度图

Fig.7 Gray scale map of IBD 1250 nm

越亮表示IBD值越大。可以看到内卢克山脉环上以及Maander建造区域都比较亮,说明这些地方有较多的结晶斜长石分布。

上。斜方辉石在Maander撞击坑(开挖深度约4 km<sup>[1]</sup>)的中央峰找到。

### 3.3.2 辉石混合矿物光谱的MGM分析

一般来说,东海中央月海沉积属于富镁铁质岩石,存在结晶斜长石的可能较小。我们在位于东海西北部地区的一个小撞击坑Il'in(图2)坑壁上发现的混合矿物光谱(图9),除去1 μm和2 μm附近的两个比较明显的吸收峰之外,在1250~1300 nm附近还有一个小峰。Il'in坑壁上的FeO含量为10.6%,TiO<sub>2</sub>含量为5.6%,铁钛的含量居中。辉石在1 μm和2 μm附近有特征吸收;橄榄石矿物在1 μm附近有一个较宽的吸收峰,是由800 nm、1100 nm和1300 nm 3个峰叠加而成的,吸收中心为1050 nm。所以这条混合光谱有可能是辉石与结晶斜长石或者辉石与橄榄石的混合矿物光谱。

以图9中辉石混合矿物光谱为例做MGM分

析,我们的输入参数如表2所示,共有5个吸收中心,分别为500、800、1000、1300和2018 nm。MGM运算结果如图10和表3所示,图10为MGM对光谱的去卷积和拟合结果,表3为MGM分析后给出的特征吸收峰参数,包括吸收中心的波长、吸收峰的半高宽、吸收强度等,对M<sup>3</sup>光谱拟合的残差(RMS)为0.88%。实际运算得到的吸收中心包括498.5、852.9、997.7、1244.1和2194.1 nm,由此可以判断辉石类型为低钙辉石。这里使用的光谱为M<sup>3</sup>反射率数据,没有去除连续统,所以特征峰的强度有所下降。MGM运算结果显示在1250 nm附近存在吸收,所以混合光谱可能是低钙辉石与结晶斜长石的混合,但是并不排除有橄榄石矿物存在。

在东海的月海沉积中,高地结晶斜长石可以通过侧向和垂直两种方式与月海玄武岩混合。对于侧向混合,主要是高地的溅射物被抛射到临近月海沉

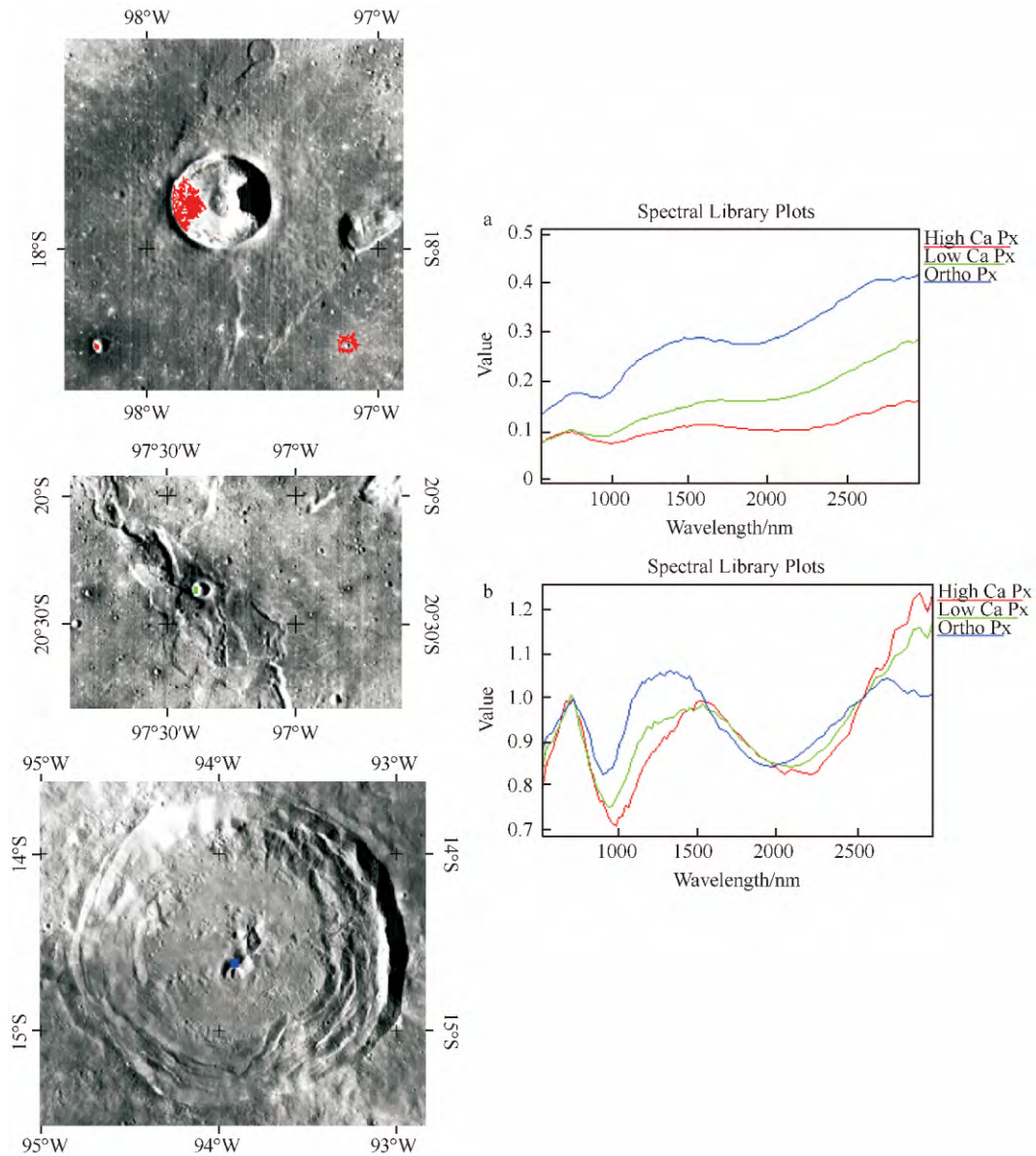


图 8 几种辉石的分布及光谱

Fig. 8 Pyroxene distribution and their spectra characteristics

红色为高钙辉石, 绿色为低钙辉石, 蓝色为斜方辉石; 右侧 a: 原始 M<sup>3</sup> 光谱; b: 去连续统后的光谱, 其中光谱的颜色与所在位置的颜色相同。

积中; 垂直混合主要是在月海沉积较薄的区域, 撞击坑撞击并挖掘出下层的结晶斜长石质物质, 并与上层玄武岩沉积混合<sup>[1]</sup>。由图 4 可以看出该撞击坑位于东海的月海玄武岩沉积中, 开挖深度不到 2 km; 且主要挖掘出来的物质为辉石质, 坑内的 FeO 含量高于 13%, TiO<sub>2</sub> 含量高于 6%, 所以不是由于盆地底部的斜长岩被挖掘出来而造成的混合。因此我们可以确定结晶斜长石并不是来源于垂直混合, 而更有可能是侧向混合。来源于外卢克山脉或者 Maunder 建造的结晶斜长石质撞击溅射物, 被抛射

表 2 辉石混合矿物的 MGM 拟合参数初始值

Table 2 Initial parameters of MGM for mineral mixture of pyroxene

Band	Center/nm	FWHM/nm	Strength
Continuum(Polynomial in wavenumber space)			
Offset: 0.05±10		Slope: -0.1E-05±0.1E-03	
1	500±10 000	200±10 000	-2.0±100
2	800±200	200±400	-1.0±10
3	1 000±200	200±400	-1.0±10
4	1 300±300	500±400	-1.0±10
5	2 018±200	300±400	-1.0±10

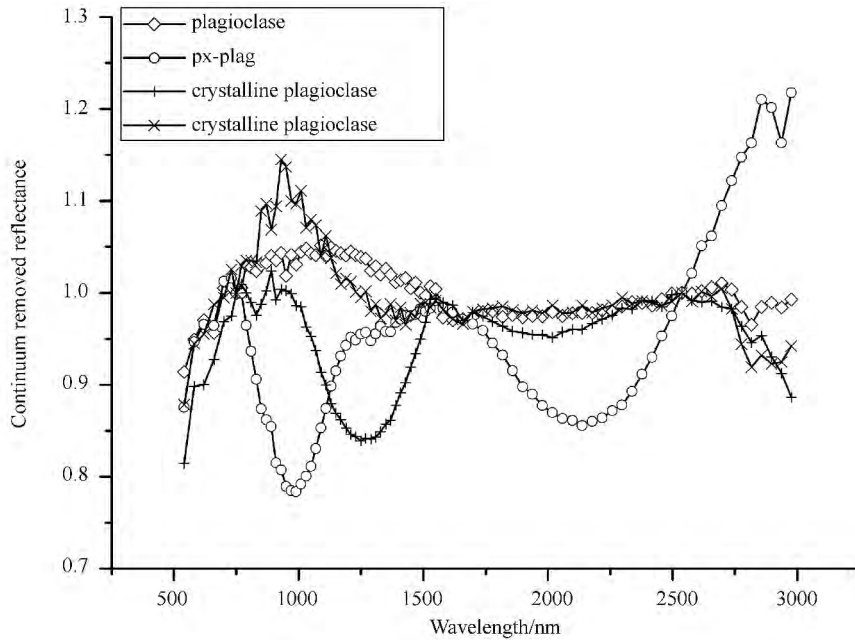


图 9 辉石-结晶斜长石光谱(Px-Plag)及作为对比的结晶斜长石(crystalline plagioclase)及斜长石(plagioclase)光谱

Fig. 9 Two pyroxene-crystalline plagioclase (Px-Plag) spectra, and crystalline plagioclase, plagioclase are added for contrast

可以看到 Px-Plag 的光谱共有 3 个峰, 分别在 1 000 nm, 1 250~1 300 nm, 2 000 nm。有可能是辉石与结晶斜长石的混合物。

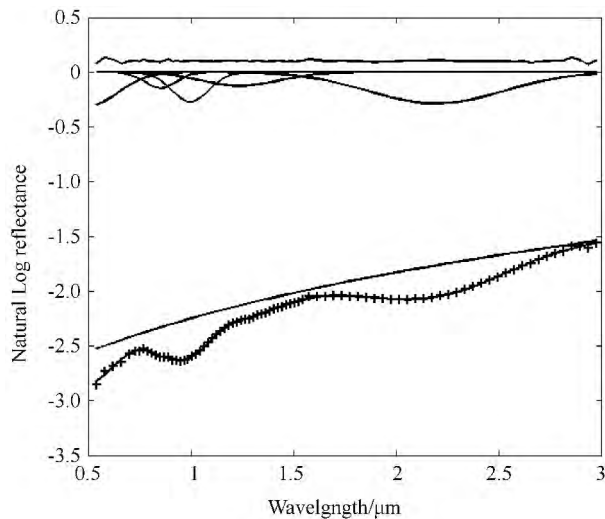


图 10 辉石混合矿物 MGM 分析结果

Fig. 10 MGM results of pyroxene mixture

图中从下到上依次为: 实测光谱数据(十字叉)以及光谱拟合结果; 光谱的连续统; 5 个独立的高斯拟合峰位; 拟合光谱与实际光谱间的残差。查看更多参数见表 2.3。

到东海盆地的月海沉积时有可能对月海矿物造成污染, 在光谱上产生斜长石质矿物的特征。

### 3.4 橄榄石

橄榄石在东海盆地的分布并不广泛, 我们在东海的Maunder坑的溅射物里面发现了橄榄石的分

表 3 辉石混合矿物的 MGM 拟合参数最终结果

Table 3 Final parameters of MGM for mineral mixture of pyroxene

Band	Center/nm	FWHM/nm	Strength	Log Area
Continuum(Polynomial in wavenumber space)				
Offset: 0.05 Slope: 5.46E-05				
1	498.5	346.3	-0.32	-1.49
2	852.9	186.9	-0.15	-1.45
3	997.7	220.0	-0.27	-3.21
4	1 244.1	460.5	-0.13	-3.07
5	2 194.1	778.3	-0.29	-6.13
Current RMS Error=0.88%				

布(图 11)。由于橄榄石的吸收峰为 800、1 100 和 1 300 nm 3 个峰的叠加, 吸收峰较宽, 吸收中心位于 1 050 nm 左右(图 11d)。结晶斜长石和橄榄石都有在 1 300 nm 附近的吸收, 在混合光谱认证时, 有可能会不容易判断。

Maunder 撞击坑位于东海盆地的西北部, 直径约 55 km, 是盆地内最大的撞击坑之一。Maunder 坑为埃拉托逊纪有中央峰和比较明显的溅射物。我们利用找到的代表矿物光谱(图 6), 对 Maunder 撞击坑做光谱角分类, 结果如图 10 所示。根据光谱角分类结果, Maunder 撞击坑的东北西南方向溅射物主要为低钙辉石和橄榄石, 低钙辉石分布在靠近撞

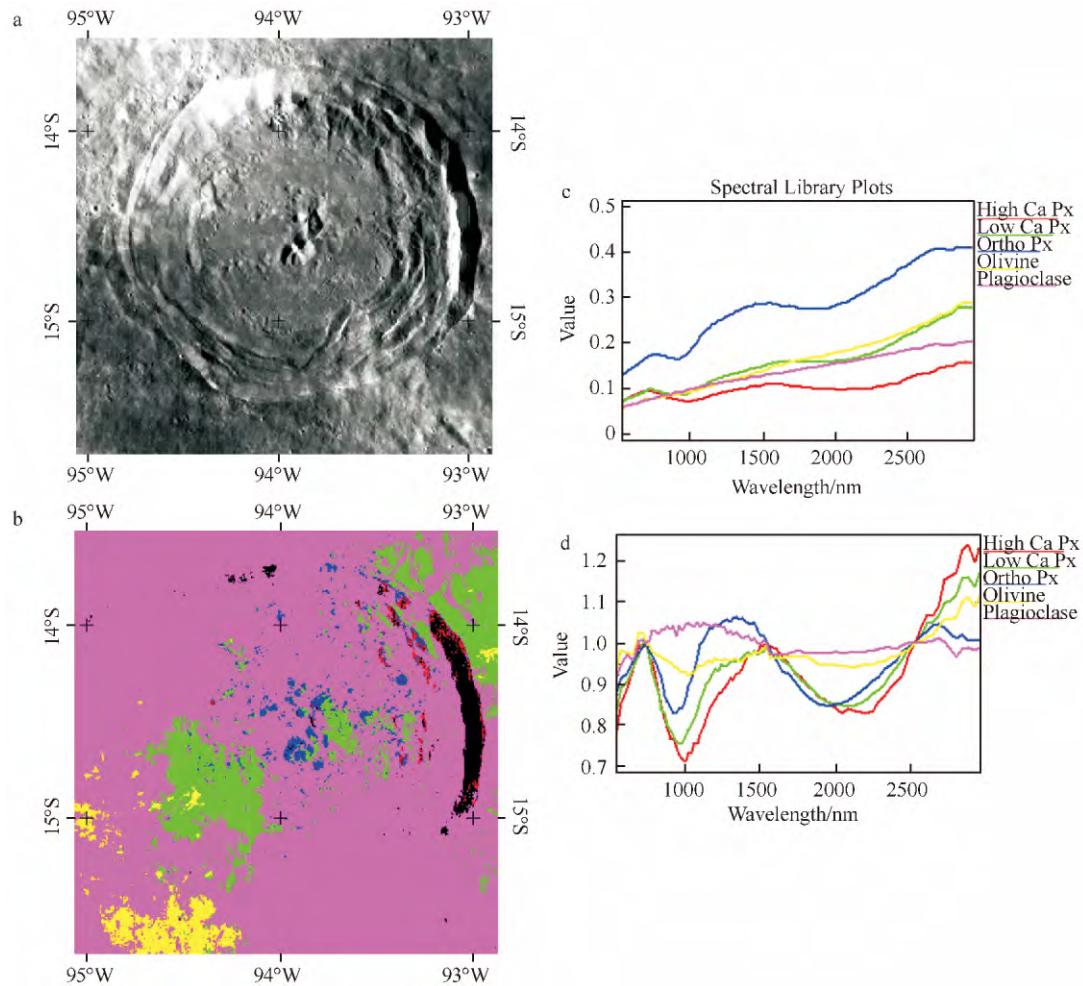


图 11 Maunder 撞击坑的主要矿物及分布

Fig. 11 The mineral distribution of Maunder crater

a—1 508 nm 反射率; b—光谱角分类结果, 其中红色为高钙辉石, 绿色为低钙辉石, 蓝色为斜方辉石, 黄色为橄榄石, 玫红色为斜长石; c—未去除连续统的矿物光谱; d—去除连续统的矿物光谱, 其中矿物的光谱与光谱角分类图上的颜色是相同的。

击坑中心的溅射物里面, 橄榄石分布在盆地较为外缘的溅射物里, 而西北东南方向的溅射物主要为斜长石。

SELENE 数据获取的全月橄榄石分布结果显示, 橄榄石主要集中于撞击盆地, 因此橄榄石有可能来源于月幔层<sup>[24]</sup>。Mustard 等<sup>[25]</sup> 通过对 Aristarchus 撞击坑的研究, 认为橄榄石发掘可能有 3 种来源: (1) 浅层岩体; (2) 富橄榄石的雨海溅射物; (3) 熔融的或者挖掘出的富橄榄石风暴洋玄武岩。由于 Maunder 撞击坑位于东海盆地的 Maunder 建造上, 靠近东海中央玄武岩沉积, 因此其海拔较低; Maunder 坑作为东海最大的撞击坑之一, 其直径约为 55 km, 挖掘深度约为 4 km, 因此我们认为这里的橄榄石有可能来源于月球浅层的富橄榄石

岩体<sup>[1]</sup>。

### 3.5 尖晶石

#### 3.5.1 尖晶石

Pieters 等<sup>[26]</sup> 利用 M<sup>3</sup> 数据, 在月球背面的莫斯科海发现了镁尖晶石 (Mg-Spinel), 镁尖晶石的吸收峰位于 2 000 nm 左右, 且在 1 000 nm 附近无任何吸收特征, 这就对铁镁质矿物的含量有所限制。Pieters 等通过实验室样品的非线性混合, 认为这样的铁镁质矿物含量需要小于 5%。然而在月球样品中发现的镁尖晶石多与富铁镁质矿物一起出现, 通过对美国阿波罗 16 任务中返回的月球岩石样品分析发现<sup>[27]</sup>, 尖晶石-橄长岩 62 295, 含有约 6% 的尖晶石, 但是含有 25%~28% 的橄榄石<sup>[28]</sup>。

我们在东海的 Lowell 撞击坑内特别是在撞击

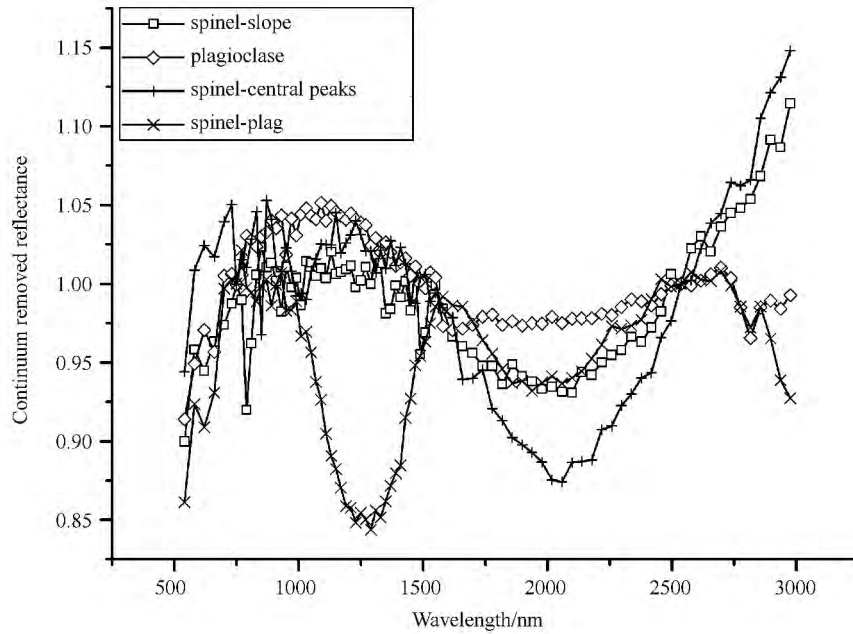


图 12 去连续统后的尖晶石光谱

Fig. 12 Continuum removed spinel spectrum

包括位于坑壁上的尖晶石 (spinel-slope) 和中央峰的尖晶石 (spinel-central peaks), 及尖晶石与结晶斜长石的混合光谱 (spinel-plag)。其中一条斜长石光谱 (plagioclase) 用于对比吸收峰深度。

坑的中央峰附近发现了大量的类似于图 12 中的尖晶石光谱, 即在 2 000 nm 附近有较强吸收, 而在 1 000 nm 附近看不到吸收特征。初步判断这些光谱有可能属于尖晶石的光谱。由于  $M^3$  数据在可见光波段的信噪比较低, 我们找到了 Lowell 撞击坑中央峰位置对应的 MI 数据 (数据名称: MI\_MAP\_Q2\_S12E256S13E257SC), 对该结果进行验证。

MI 数据的可见光波段与“克莱门汀”相同, 分别为 415、750、900、950 和 1 000 nm, 其空间分辨率高达 2 048 pixel/degree (约为 15 m/pixel), 而  $M^3$  的空间分辨率只有 140 m/pixel, 因此可以使用 MI 数据来检查该区域在 1 000 nm 附近的吸收情况。我们提取了 MI 可见光谱段的数据, 对  $M^3$  数据存在尖晶石吸收特征的两个同名点区域进行查证 (图 13)。一个位于 Lowell 撞击坑的中央峰附近 (spinel-1), 另一个位于中央峰上 (spinel-2) (图 13a、b)。  $M^3$  数据显示这两个位置都有尖晶石的光谱特征 (图 13c), 但是在 MI 光谱上 (图 13d), 可以看到 spinel-2 在 1 000 nm 附近有明显的吸收特征, spinel-1 则没有吸收特征, 说明 spinel-1 所在的位置存在尖晶石分布, 而 spinel-2 则更有可能是辉石矿物。但是从元素分布来看, 这两个位置的 FeO 和  $TiO_2$  含量基本相同, FeO 含量都在 4.7% 左右,  $TiO_2$  含量均在

0.7% 左右, 因此我们推断在 Lowell 撞击坑的中央峰附近可能分布有辉石与尖晶石的混合矿物。

尖晶石位于月壳的下层, 有可能会通过强烈的撞击作用被带到月球表面。Pieters 等<sup>[28]</sup> 在月球背面的莫斯科海发现了含有镁尖晶石的新岩石类型“OOS”, 主要分布在盆地内环上 (innermost basin ring)。Lowell 撞击坑位于月球背面, 其直径约为 64 km (基于  $M^3$  图像), 本身挖掘深度较浅, 但是 Lowell 撞击坑位于东海的第二个环上 (外卢克山脉), 东海撞击作用有可能挖出了尖晶石矿物<sup>[29]</sup>。Pieters 等<sup>[28]</sup> 认为盆地内环代表撞击作用挖出的最深的物质, 与东海相比, 莫斯科海的直径较小 (约为 276 km), 而且盆地内部已经被岩浆填充, 因此东海盆地的第二个环挖掘深度足以与莫斯科海的盆地内环相当。因此我们推断在 Lowell 撞击坑中央峰发现尖晶石有可能产生于东海盆地撞击作用, 而且除去 Lowell 撞击坑, 外卢克山脉位于月球背面的其他位置可能也存在尖晶石的分布。尖晶石的发现可以从新的角度提供早期月亮形成的信息。

### 3.5.2 结晶斜长石与尖晶石混合矿物的 MGM 分析

我们还在东海盆地北部位位于 Maunder 建造上的一个小撞击坑内 (13°S, 94°W, 位于 Maunder 撞击

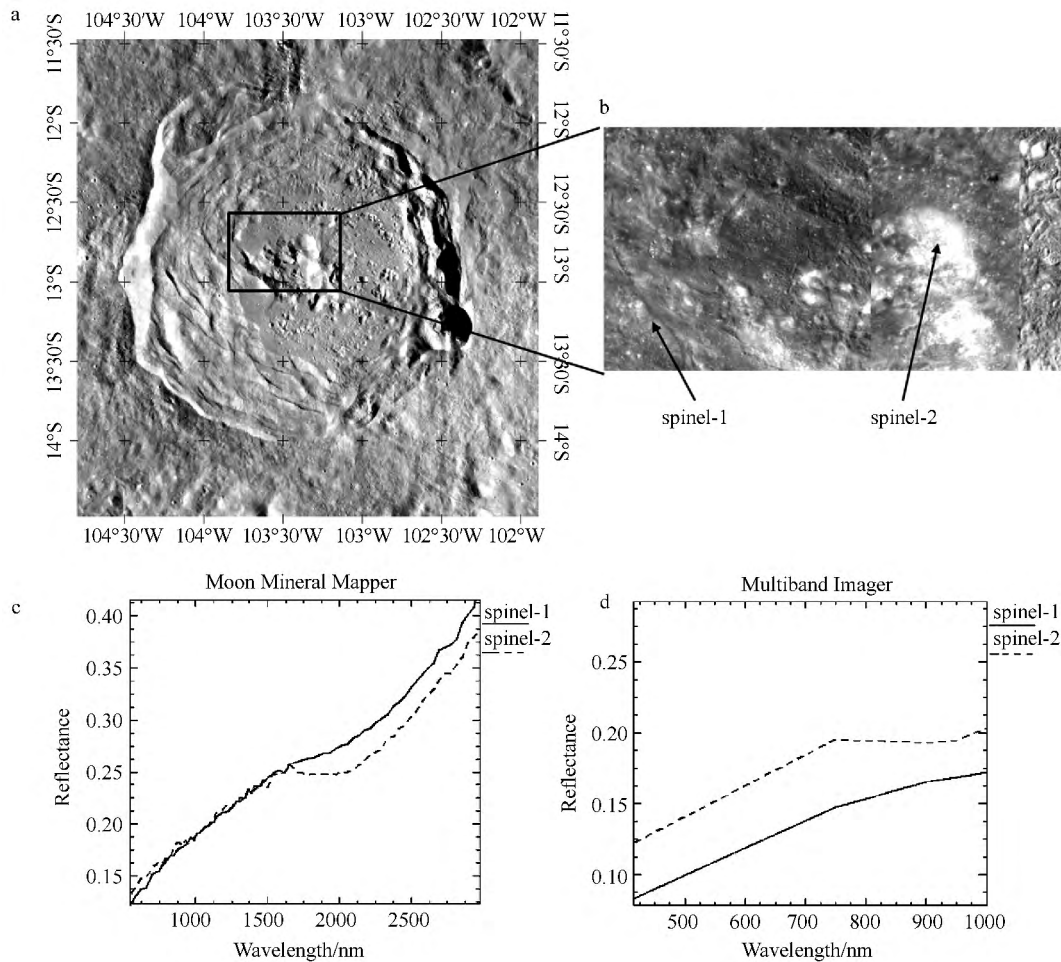


图 13 Lowell 撞击坑中的尖晶石光谱加入了同名点 MI 的可见光波段数据作为 M<sup>3</sup> 数据的补充验证

Fig. 13 The spectra of spinel in Lowell crater

a—Lowell 撞击坑全貌(1 508 nm 反射率); b—撞击坑中央峰区域, 来源于 MI 750 nm 反射率数据; c—验证点的 M<sup>3</sup> 反射率光谱; d—验证点的 MI 反射率光谱。

坑的西北角, 图 2, 以下简称 C) 发现混合物光谱(图 12 spinel-plag) 在 1 250 nm 附近存在一个较深的吸收、在 2 000 nm 附近有一个较浅的吸收, 推测可能是结晶斜长石与尖晶石混合物。

为了验证这两种矿物的吸收特征, 我们用 MGM 对结晶斜长石-尖晶石混合矿物光谱进行了分析。输入参数如表 4 所示, 使用了 5 个吸收中心: 450、1 300、1 500、2 000 和 3 000 nm。MGM 运算结果如表 5 所示, 其中两个强度最大的吸收峰位是 1 273 和 1 949 nm。图 13 为 MGM 对光谱的拟合结果, 拟合的 RMS 为 0.92%。从 MGM 结果来看, 该矿物在 1 273、1 949 nm 各有一个较强的吸收峰, 符合尖晶石与结晶斜长石的特征吸收位置。在图 2 可以看到这个位置比较亮, 说明其反射率较高。且嫦娥数据显示坑内的 FeO 和 TiO<sub>2</sub> 含量分别约为

5.0% 和 0.45%, 属于低铁低钛的长石质岩石。所以我们推断这里的矿物是尖晶石与结晶斜长石的混合物。

表 4 结晶斜长石-辉石混合矿物的 MGM 拟合参数初始值

Table 4 Initial parameters of MGM for mineral mixture of crystalline plagioclase and spinel

Band	Center/nm	FWHM/nm	Strength
Continuum(Polynomial in wavenumber space)			
Offset: 0.65±10 Slope: -0.1E-05±0.1E-03			
1	450±10 000	400±10 000	-20.0±100
2	1 300±200	200±400	-1.0±10
3	1 500±200	200±400	-1.0±10
4	2 000±300	200±400	-1.0±10
5	3 000±300	200±400	-1.0±10

撞击坑 C 位于 Maunder 建造上, 根据我们前

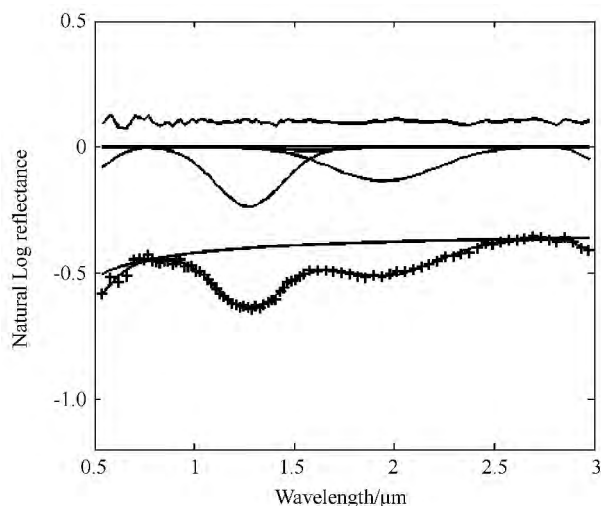


图 14 MGM 对结晶斜长石-尖晶石的分析结果

Fig. 14 MGM results of crystalline plagioclase-spinel

图中从下到上依次为: 实测光谱数据(十字叉)以及光谱拟合结果; 光谱的连续统; 独立的高斯拟合峰位; 拟合光谱与实际光谱间的残差。具体参数见表 4, 5。

面的讨论认为 Maunder 是撞击融熔体, 主要矿物为结晶斜长石。在撞击坑内发现的尖晶石矿物, 可能来源于附近的外卢克山脉的撞击溅射物, 同时说明外卢克山脉的尖晶石分布有可能要更加广泛。

表 5 结晶斜长石-辉石混合矿物的  
MGM 拟合参数最终结果

Table 5 Final parameters of MGM for mineral mixture of crystalline plagioclase and spinel

Band	Center/nm	FWHM/nm	Strength	Log Area
Continuum(Polynomial in wavenumber space)				
Offset: 0.72 Slope: $-5.91E-06$				
1	450.0	267.7	-0.11	-0.21
2	1273.0	399.2	-0.24	-4.91
3	1588.3	356.9	-0.02	-0.20
4	1949.5	612.9	-0.14	-2.35
5	3024.5	185.2	-0.06	-0.11
Current RMS Error=0.92%				

## 4 结论

本文以  $M^3$  反射率数据为主, 结合“嫦娥一号”获取的 FeO 和  $TiO_2$  数据, 对东海地区的主要矿物分布进行了讨论。对于东海的月海玄武岩沉积区域, 我们找到了包括高钙辉石、低钙辉石和斜方辉石在内的 3 种辉石矿物, 月海中以高钙辉石为主, 某些撞击坑 (Maunder 撞击坑) 挖掘出深部的低钙辉石甚至斜方辉石矿物。橄榄石在东海的分布并不广

泛, 主要分布在 Maunder 撞击坑的溅射物中, 有可能来源于较浅的富橄榄石岩层。我们根据 1250 nm 的 IBD 吸收和高反射率的光谱特征, 在东海盆地的内卢克山脉以及 Maunder 建造上发现了结晶斜长石的分布, 在内卢克山脉上发现纯结晶斜长石。利用 MGM 方法对东海地区的一些混合矿物光谱进行分析, 成功得到了相应的矿物端员, 包括辉石与结晶斜长石、结晶斜长石与尖晶石的混合矿物。

另外我们利用  $M^3$  数据 Lowell 撞击坑的中央峰附近发现了尖晶石的分布, 并用同名点的 MI 数据进行了验证。在东海的 Maunder 建造上发现了尖晶石与结晶斜长石的混合矿物, 尖晶石非常有可能来源于邻近的外卢克山脉。综上, 我们认为东海的尖晶石矿物在外卢克山脉(月球背面部分)可能有更广泛的分布。

## 参考文献

- [1] Whitten J, Head J W, Staid M, et al. Lunar mare deposits associated with the Orientale impact basin: New insights into mineralogy, history, mode of emplacement, and relation to Orientale Basin evolution from Moon Mineralogy Mapper ( $M^3$ ) data from Chandrayaan-1[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116: E00G09. doi:10.1029/2010JE003736.
- [2] Wilhelms D E. The Geologic History of the Moon [M]. Washington DC: United States Government Printing Office, 1987:55-83.
- [3] Spudis P K, Hawke B R, Lucey P. Composition of orientale basin deposits and implications for the lunar basin-forming process[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: C197-C210.
- [4] Ohtake M, Matsunaga T, Haruyama J, et al. The global distribution of pure anorthosite on the Moon[J]. Nature, 2009, 461: 236-240.
- [5] Cheek L C, Hanna K L D, Pieters C M, et al. The distribution and purity of anorthosite across the Orientale Basin: New perspectives from Moon Mineralogy Mapper data[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2013, 118: 1805-1820.
- [6] Spudis P D, Martin D J P, Kramer G. Geology and composition of the Orientale Basin impact melt sheet[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2014, 119: 1-11.
- [7] Pieters C M, Boardman J, Buratti B, et al. The Moon Mineralogy Mapper ( $M^3$ ) on Chandrayaan-1[J]. Current Science, 2009, 96: 500-505.
- [8] Ling Z C, Zhang J, Liu J Z. Lunar iron and titanium distributions for LQ-4 region[C]//Proceedings of the 44th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Plan-

- etary Institute, 2013; 2992.
- [9] Sunshine J M, Pieters C M, Pratt S F, et al. Absorption band modeling in reflectance spectra; Availability of the Modified Gaussian Model[C] // Proceedings of the 30th Lunar and Planetary Science Conference. Houston; Lunar and Planetary Institute, 1999; 1306.
- [10] Sunshine J M, Pieters C M, Pratt S F. Deconvolution of mineral absorption bands; An improved approach[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B5): 6955-6966.
- [11] Sunshine J M, Pieters C M. Estimating modal abundances from the spectra of natural and laboratory pyroxene mixtures using the Modified Gaussian Model[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(E5): 9075-9087.
- [12] Sunshine J M, Pieters C M. Determining the composition of olivine from reflectance spectroscopy[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(E6): 13675-13688.
- [13] Bratt S R, Solomon S C, Head J W. The evolution of impact basins: cooling, subsidence, and thermal stress[J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90: 12415-12433.
- [14] Cho Y, Morota T, Yasui M, et al. Young mare volcanism in the Orientale region contemporary with the Procellarum KREEP Terrane (PKT) volcanism peak period ~ 2 billion years ago [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39: L11203. doi:10.1029/2012GL051838.
- [15] Yingst R A, Head J W. Volumes of lunar lava ponds in South Pole-Aitken and Orientale Basins; Implications for eruption conditions, transport mechanisms, and magma source regions [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (E5): 10909-10931.
- [16] Head J W, Murchie S, Mustard J F, et al. Lunar impact basins; New data for the western limb and farside (Orientale and South Pole-Aitken basins) from the first Galileo flyby [J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(E9): 17149-17181.
- [17] 乔乐, 肖龙, 赵健楠. 月球虹湾地区地质特征解译及岩浆活动历史研究[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2013, 43 (11): 1370-1386.
- [18] Pieters C M, Englert P A J. Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993; 1-6.
- [19] Kramer G Y, Kring D A, Nahmb A L, et al. Spectral and photogeologic mapping of Schrödinger basin and implications for post-South Pole-Aitken impact deep subsurface stratigraphy[J]. Icarus, 2013, 233: 131-148.
- [20] Klima R L, Pieters C M, Dyar M D, et al. Spectroscopy of synthetic Mg-Fe pyroxenes I; Spin-allowed and spin-forbidden crystal field bands in the visible and near-infrared[J]. Meteoritics and Planetary Science, 2007, 42(2): 235-253.
- [21] Pike R J. Apparent depth/apparent diameter relation for lunar craters[C] // Proceedings of the 8th Lunar and Planetary Science Conference. Houston; Lunar and Planetary Institute, 1997; 3427-3436.
- [22] Stöffler D, Gault D E, Wedekind J, et al. Experimental hypervelocity impact into quartz sand; Distribution and shock metamorphism of ejecta [J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80: 4062-4077.
- [23] Melosh H J. Impact Cratering: A Geologic Process[M]. New York: Oxford University Press, 1989: 60-87.
- [24] Yamamoto S, Nakamura R, Matsunaga T, et al. Possible mantle origin of olivine around lunar impact basins detected by SELENE[J]. Nature Geoscience, 2010, 3: 533-536.
- [25] 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]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116: E00G12. doi:10.1029/2010JE003726.
- [26] Pieters C M, Boardman J, Buratti B, et al. Mineralogy of the lunar crust in spatial context: first results from the Moon Mineralogy Mapper (M<sup>3</sup>)[C] // Proceedings of the 40th Lunar and Planetary Science Conference. Houston; Lunar and Planetary Institute, 2009; 2052.
- [27] 孙灵芝, 凌宗成, 刘建忠. 美国阿波罗月球样品的处理与保存 [J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 128-136.
- [28] Pieters C M, Besse S, Boardman J, et al. Mg-spinel lithology: A new rock type on the lunar farside[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116: E00G08. doi: 10.1029/2010JE003727.
- [29] Srivastava N and Gupta R P. Compositional diversity inside Lowell crater, Orientale Basin; Evidences for extensive Spinel rich deposits[C] // Proceedings of the Second Conference on the Lunar Highlands Crust. Houston; Lunar and Planetary Institute, 2012; 9016.