

月球典型撞击坑溅射物研究及对月球地质编图的意义*

郭弟均^{1,2} 刘建忠^{1**} 籍进柱^{1,2} 刘敬稳^{1,2} 王庆龙³
GUO DiJun^{1,2}, LIU JianZhong^{1**}, JI JinZhu^{1,2}, LIU JingWen^{1,2} and WANG QingLong³

1. 中国科学院地球化学研究所,月球与行星科学研究中心,贵阳 550081
 2. 中国科学院大学,北京 100049
 3. 吉林大学地球科学学院,长春 130061
1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
- 2015-06-26 收稿, 2015-10-11 改回.

Guo DJ, Liu JZ, Ji JZ, Liu JW and Wang QL. 2016. A study of lunar typical crater ejecta and its implications for lunar geologic mapping. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1):53-63

Abstract Crater is the most typical geologic unit on the lunar surface. As the outer part of a crater, the ejecta often occurs even beyond ten crater diameters, which makes it one of the most important features during lunar geologic mapping. By using of the lunar orbiter laser altimeter (LOLA) data, wide-angle camera (WAC) images and narrow-angle camera (NAC) images in Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) mission and Clementine UVVIS multispectral data, we studied the 31km in diameter crater Kepler which locates in the nearside mare region and 30km in diameter crater Necho which locates in the farside land region, both of them belong to Copernican. Copernican crater ejecta can be divided into three faces, which are continuous ejecta deposits (CE), discontinuous ejecta deposits (DE) and crater ray (CR). CE is distributed in a max distance of about 2.6 radii. DE is distributed in a max distance of almost 11 radii, and CR is distributed in a max distance of about 29 radii. This paper stresses the significance of the combination of multi-source data in recognizing the ejecta deposits. Multi-source data are used in mapping the ejecta of crater Kepler and crater Necho. The asymmetric distributions of these two craters' ejecta indicate that they were formed in an oblique impact respectively.

Key words Moon; Crater Kepler; Crater Necho; Crater ejecta; Crater ray

摘要 撞击坑是月表最典型的地质单元,其溅射物作为撞击坑的坑外组成部分可分布到距离坑中心 10 个直径距离之外的区域,因此撞击溅射物也是月球地质编图中最重要的表达要素之一。本文使用月球勘测轨道器(LRO)的激光高度计(LOLA)数据、广角相机(WAC)影像、窄角相机(NAC)影像以及 Clementine 的 UVVIS 多光谱数据,研究了哥白尼纪正面月海区直径 31km 的 Kepler 撞击坑和背面月陆区直径 30km 的 Necho 撞击坑。哥白尼纪撞击坑溅射沉积物可以分为三个相:连续溅射沉积相(CE)、不连续溅射沉积相(DE)和辐射纹(CR)。连续溅射沉积相分布在最大约 2.6 个半径范围之内,不连续溅射沉积相分布在最大近 11 个半径范围之内,辐射纹分布在最大近 29 个半径范围之内。本文强调了多源数据结合在识别撞击坑溅射沉积物中的作用,对 Kepler 坑和 Necho 坑溅射沉积物进行了填图,不对称分布的特征表明这两个坑可能形成于倾斜撞击。

关键词 月球; Kepler 坑; Necho 坑; 撞击坑溅射物; 辐射纹

中图法分类号 P691

* 本文受国家自然科学基金重大项目(41490634)及面上项目(41373068)、科技基础性工作专项(2015FY210500)和中国科学院知识创新工程重要方向项目联合资助。
第一作者简介:郭弟均,男,1988 年生,博士生,地球化学专业,E-mail: guodijun@mail.gyig.ac.cn
** 通讯作者:刘建忠,男,1968 年生,研究员,博士生导师,从事比较行星学及深空探测研究,E-mail: liujianzhong@mail.gyig.ac.cn

1 引言

撞击构造是月表最典型的地貌单元,不同尺度的撞击坑几乎覆盖了全部月球表面,因此撞击构造是月球地质图中最重要的地质单元,构成了月球地质图的基本要素。美国月球与行星研究所(LPI, 2009^①)已经测量了8713个月球撞击坑的基本信息,其中包含1644个带有年龄数据撞击坑。作为一类特殊的撞击坑,撞击盆地通常被用来表示直径大于300km的撞击坑(Wilhelms *et al.*, 1987),但也有人认为应该将是否存在多环结构及中央峰作为定义盆地的标准(Wood and Head, 1976)。根据Wilhelms *et al.* (1987)的统计,月球的撞击盆地有45个,而根据Wood (2004)统计的数据,所有在文献中描述到的可能为撞击盆地的数目也仅为52个(http://www.lpod.org/cwm/DataStuff/Lunar_Basins.htm),可见撞击盆地只占撞击构造的很少比例。另一方面,撞击盆地作为撞击坑的子类,在整体上保持了与撞击坑相同或相近的结构性质,主要在规模上存在差异,因此对典型撞击坑的研究也可以为撞击盆地的研究提供参考。

撞击坑结构以坑缘为界可分为坑内部分和坑外部分。坑内结构相对简单,主要包括特征明显的坑壁、坑底和中央峰结构,坑外结构中除坑缘是由于撞击应力造成的构造抬升并被溅射沉积物覆盖之外,其余部分主要由溅射沉积及次生产物组成(Collins *et al.*, 2012; Glass and Simonson, 2013; Osinski *et al.*, 2011)。撞击产生的溅射沉积物与所处位置更古老或更年轻的物质具有错综复杂的关系,通常难以确定溅射物沉积的外边界,但它却是撞击构造中分布最广泛的单元,通常在撞击坑外数个直径范围内都会存在(Öhman and Kring, 2012; Wilhelms *et al.*, 1987)。撞击溅射物广阔的沉积范围与在地球上的一致,根据K/E界线粘土层的铱异常确定了一次撞击事件,其溅射沉积物经稀释后通过地质运动几乎分布到了全球范围(Alvarez *et al.*, 1980)。1994年7月人们亲眼目睹了Shoemaker-Levy 9彗星撞击木星的壮观景象,这一事件更是激发了人们对地外物理撞击理论的研究,逐渐形成了一个地学研究领域——撞击地层学(Impact Stratigraphy)(Montanari and Koeberl, 2000)。

在月球地质编图中,溅射沉积物是运用地层叠置律判断撞击坑新老关系最重要的参考对象,通过撞击坑统计法计算撞击坑的年龄也需要准确识别相应溅射沉积物的覆盖范围,在此基础上统计后生撞击坑的直径-频率分布(Crater Analysis Techniques Working Group, 1979; Neukum *et al.*, 2001)。由此可见,撞击溅射沉积物是撞击构造中影响最为广泛、最重要的组成单元。在月球地质编图中,能否准确地识别并表达出特定撞击坑的溅射沉积物分布直接影响所编地质图的准确性。

月球具有典型的不对称性,以背面和正面、月陆和月海的巨大差异为代表,表现为成分、地形和月壳厚度等的不同

分布(Crites and Lucey, 2015; Gillis *et al.*, 2004; Ishihara *et al.*, 2009; Lucey, 2004; Lucey *et al.*, 1994; Smith *et al.*, 2010)。根据理论分析和模型计算,当撞击作用发生在具有孔隙度、密度和弹性参数等差异的不同对象上将产生不同的撞击效应(Martellato *et al.*, 2013; Senft and Stewart, 2009; Stronge, 2000; Wünnemann and Ivanov, 2003),因此将月海和月陆的撞击构造进行对比研究可以揭示在这两个典型的月球大地构造单元中撞击效应的差异。本文选择了直径相当、保存完好的哥白尼纪月海地区 Kepler 撞击坑和月陆地区 Necho 撞击坑作为研究对象(图1),重点研究了它们的溅射沉积分布和不同相的划分,以揭示发生在背面月陆和正面月海同等规模撞击的溅射物分布特征,并为我国正在开展的全月球数字地质图编研提供参考。

2 Kepler 坑和 Necho 坑的地质背景

Kepler 坑中心位置为(8.1°N, 38.0°W),直径31km,具有明显的中央峰隆起。Kepler 坑位于风暴洋和岛海之间,背景物质为风暴洋的玄武岩。Hackman (1962)首次完成了 Kepler 区域1:100万详细的地质图,揭示了 Kepler 坑溅射沉积的范围,但当时可用的数据有限,限制了对 Kepler 坑溅射沉积物的准确表达。据推测,在 Kepler 撞击坑形成前,该位置可能是约400~700m厚的月海盆地溅射物(Hackman, 1962; McGetchin *et al.*, 1973; Öhman and Kring, 2012; Wilhelms and McCauley, 1971),而 Song *et al.* (2013)认为该地区的原始地层为约4km厚的月海玄武岩覆盖在下层更老的斜长石月壳上面。然而,通过影像观察可以发现,在 Kepler 区域许多位置尤其是西南部分有许多古老的雨海盆地溅射沉积物堆积形成的丘状地貌并没有被月海玄武岩覆盖 Öhman and Kring (2012)。关于 Kepler 坑的绝对年龄,目前有不同的结论,包括50~100Ma (Basilevsky *et al.*, 1977)、625~950Ma (König *et al.*, 1977)和780Ma (McEwen *et al.*, 1993)。

Necho 坑中心位置为(5.0°S, 123.1°E),直径30km,但西部坑缘的坍塌造成南北和东西向的直径不一样。它具有不规则的中央峰结构,且中央峰偏离撞击坑中心。Necho 坑位于月球东翼的月陆上,处于更老的月陆撞击坑之间。前人对于 Necho 坑的研究资料较少, Wilhelms and El-Baz (1977)编制的1:500万月球东部地区地质图中仅仅将 Necho 坑全部物质用哥白尼纪坑物质一个要素进行了表示,而没有示意它的溅射沉积物分布。此后, Gifford *et al.* (1979)利用 Apollo 计划期间的影像资料对 Necho 坑的地质特征做了较全面的研究,但受限于当时单一的数据类型和相对较差的数据质量,对溅射物的反映不够充分。相对于月海地区较均一的撞

① LPI. 2009. Lunar Exploration Intern Program. Revised by LPI (2011)

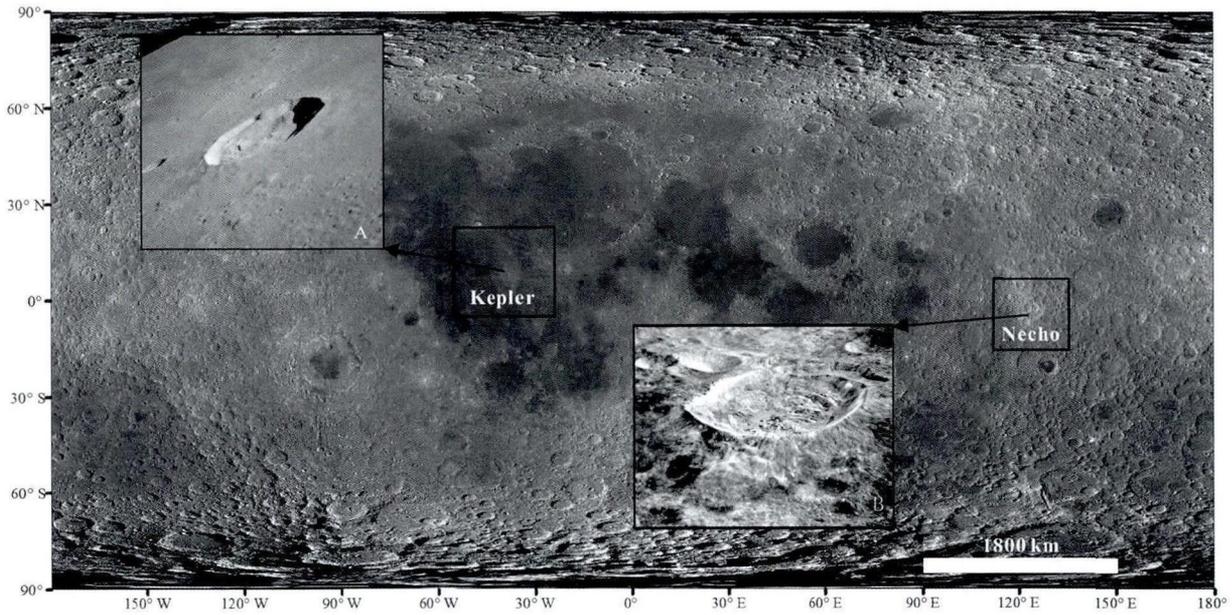


图1 Kepler坑和Necho坑在月球上的位置

底图采用简单圆柱投影,图中黑色方框表示本文的研究范围,A为Apollo 12号任务拍摄的Kepler坑影像,编号AS12-52-7747,B为Apollo 10号拍摄的Necho坑影像,编号AS10-28-4012

Fig. 1 Locations of crater Kepler and crater Necho on the moon

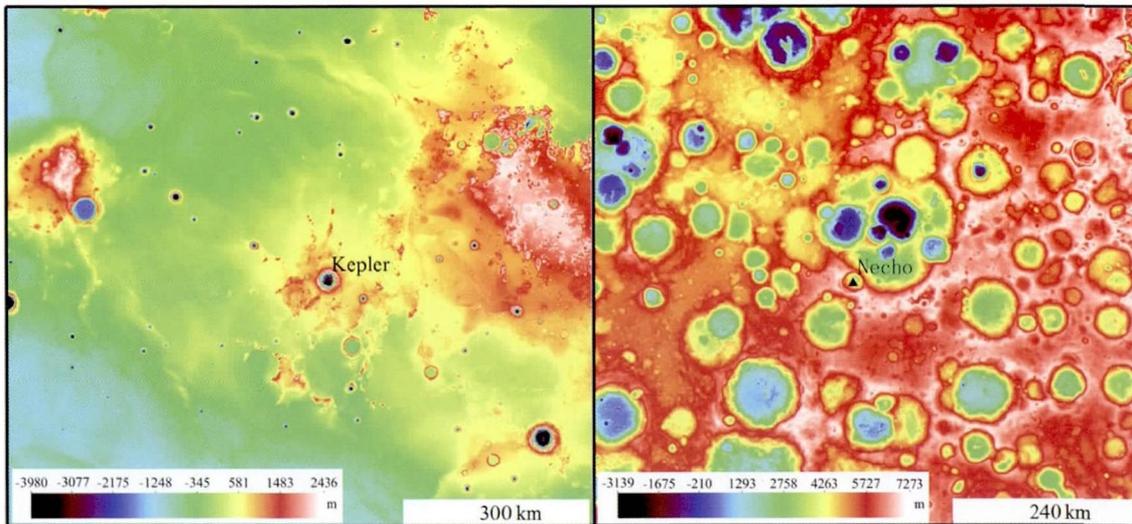


图2 Kepler坑区域(左)和Necho坑区域(右)的DEM

Fig. 2 DEM around crater Kepler (left) and crater Necho (right)

击坑环境,Necho坑所处的月陆地区地质背景更加复杂,撞击坑所处位置的地形和结构控制了撞击坑的形态和后期改造(Gifford *et al.*, 1979)。而对于Necho坑的绝对年龄,目前还没有确切的数据。

Kepler坑和Necho坑均是哥白尼纪年轻的撞击坑,但Kepler坑周围地形较平坦,而Necho坑周围的月陆区域拥有更强烈的地形起伏,从DEM图中可以识别出许多撞击坑分布,而这些地形差异可能影响到溅射物的分布(图2)。30km

左右的直径是月球上简单撞击坑到复杂撞击坑过渡的直径范围,因此Kepler坑和Necho坑可代表较广泛的月球撞击坑特征。

3 数据和方法

3.1 数据

本文使用了美国月球勘测轨道飞行器的广角相机数据

表1 本文所用数据列表

Table 1 Data used in this study

数据区域	数据类型	数据编号
Kepler	LRO WAC	WAC_morphology_globe_June2013_dd0_100m
	LOLA	LDEM_512_00N_45N_270_360、LDEM_512_45S_00S_270_360
	Clementine	ui03n303、ui03n309、ui03n315、ui03n321、ui03n327、ui03n333、ui03n339、ui03s303、ui03s309、ui03s315、ui03s321、ui03s327、ui03s333、ui03s339、ui10n303、ui10n309、ui10n315、ui10n321、ui10n327、ui10n333、ui10n339、ui17n303、ui17n309、ui17n315、ui17n321、ui17n327、ui17n333、ui17n339、ui24n303、ui24n309、ui24n315、ui24n321、ui24n327、ui24n333、ui24n339
	UVVIS	M104762819LC、M104762819RC、M1157991366RC、M1157991366LC、M1154464241LC、M1154464241RC、M1103809714LC、M1114412298RC、M1119100472RC
	LRO NAC	
Necho	LRO WAC	WAC_morphology_globe_June2013_dd0_100m
	LOLA	LDEM_512_00N_45N_090_180、LDEM_512_45S_00S_090_180
	Clementine	ui03n111、ui03n117、ui03n123、ui03n129、ui03n135、ui03n147、ui03n153、ui03s111、ui03s117、ui03s123、ui03s129、ui03s135、ui03s141、ui03s147、ui03s153、ui03s159、ui10n123、ui10n129、ui10n135、ui10n141、ui10n147、ui10n153、ui10n159、ui10s111、ui10s117、ui10s123、ui10s129、ui10s135、ui17n123、ui17n129、ui17n135、ui17n141、ui17n147、ui17n153、ui17s111、ui17s117、ui17s123、ui17s129、ui17s135、ui24n123、ui24n129、ui24n135、ui24n141、ui24n147、ui24n153、ui24n159
	UVVIS	
	LRO NAC	M134374642LC、M149696735LC、M180329705RC

作为影像图底图 (Robinson *et al.*, 2010), 数据来自 ftp://pdsimage2.wr.usgs.gov/pub/pigpen/moon/LROC/wac_mosaic_asu/, 分辨率 100m/pixel, 根据研究区域进行了裁剪。为了准确提取研究范围的地形特征, 本文使用了 LRO 激光高度计得到的月球 DEM 数据 (Smith *et al.*, 2010), 分辨率的 512ppd (约 59m/pixel)。为研究溅射沉积在特定波段下的反射率影像特征并计算光学成熟度 (Lucey *et al.*, 2000; Pieters *et al.*, 1994), 本文使用了 Clementine 的 UVVIS 多光谱数据 (Nozette *et al.*, 1994), 分辨率为 100m/pixel。为了研究溅射沉积的细节特征, 对于特定的区域, 本文使用了 LRO 任务的窄角相机影像 (Robinson *et al.*, 2010), 分辨率为 0.5m/pixel。数据主要来自美国的 PDS 行星数据节点, 具体数据见表 1, 在使用之前进行了配准、拼接等处理。

3.2 方法

遥感影像是月球地质解译的基础数据, 能够反映目标物的形态、纹理及反照率信息。LRO 搭载的窄角相机能够提供高分辨率的月球影像, 用于详细研究撞击坑溅射沉积物的形态、纹理等特征。但在全月尺度上, 窄角相机数据不如宽角相机的使用灵活, 很难进行全月尺度的研究, 因此提取 Kepler 坑和 Necho 坑溅射沉积物在宽角相机影像上的特征具有广泛的应用价值。Clementine 任务得到的多光谱数据在 750nm 处的反射率影像对不同成熟度的月海和高地物质敏感, 在影像上能清晰地显示出不同亮度, 常常被作为月球反照率的代表, 并用以确定月表地质单元的接触关系、识别撞击坑等 (Dominov and Mest, 2009; Mest *et al.*, 2010; Pieters and Tompkins, 1999; Skinner *et al.*, 2006; Van Arsdall and Mest, 2008)。本文对比分析了 Clementine 750nm 反射率影像与 LRO 广角相机的影像, 探讨它们在识别撞击坑溅射物的效果。

构成溅射沉积的物质主要是在撞击的过程中被挖掘出

来的浅表层以下成分, 它们暴露在月表会持续受到来自微陨石轰击、太阳风和宇宙射线的改造, 变得越来越成熟, 成熟度就是反映与时间相关的某一物质在太空环境中被改造程度的定量指标 (Lucey *et al.*, 2000; Morris, 1978)。据计算, 在月球表面, 需要用约 500Myr 时间“翻耕”深约 50cm 的月土, 用约 100Myr 的表部整合时间来产生成熟的月土 (Morris, 1978)。利用成熟度指标可以将不同时代形成的溅射沉积进行区分, 在溅射沉积物就位之前该区域的物质通常更加成熟, 因此它可以被用以识别年轻的撞击事件所产生的物质分布, 同一次撞击事件产生的溅射物具有相同或相近的成熟度, 且越成熟的物质形成时间越古老。

关于成熟度有多种指标, 最常见的 I_s/FeO 值 (Morris, 1976, 1978) 和光学成熟度 (Lucey *et al.*, 2000)。Lucey *et al.* (2000) 开发的根据光谱反照率得到的光学成熟度方法仅使用卫星光谱数据, 能够计算更广阔空间范围的成熟度, 且计算过程简单。OMAT 的计算公式如下:

$$OMAT = \sqrt{(R_{750} - x_0)^2 + \left(\frac{R_{950}}{R_{750}} - y_0\right)^2} \quad (1)$$

R_{750} 表示波长为 750nm 的光在一个象元或区域中的反射率, R_{950} 表示波长为 950nm 的光在一个象元或区域中的反射率, x_0 和 y_0 在 Clementine 多光谱数据中的值分别为 0.08 和 1.19。OMAT 值越大表示该像元或区域越不成熟, 形成时间越晚。为了找到有效识别 Kepler 坑和 Necho 坑溅射沉积物的方法, 本文对比研究了利用 Clementine 多光谱数据计算了光学成熟度的效果。

4 结果

4.1 撞击坑溅射沉积物在不同类型数据中的表现

图 3 表示了 Kepler 坑和 Necho 坑区域在 LRO 广角相机

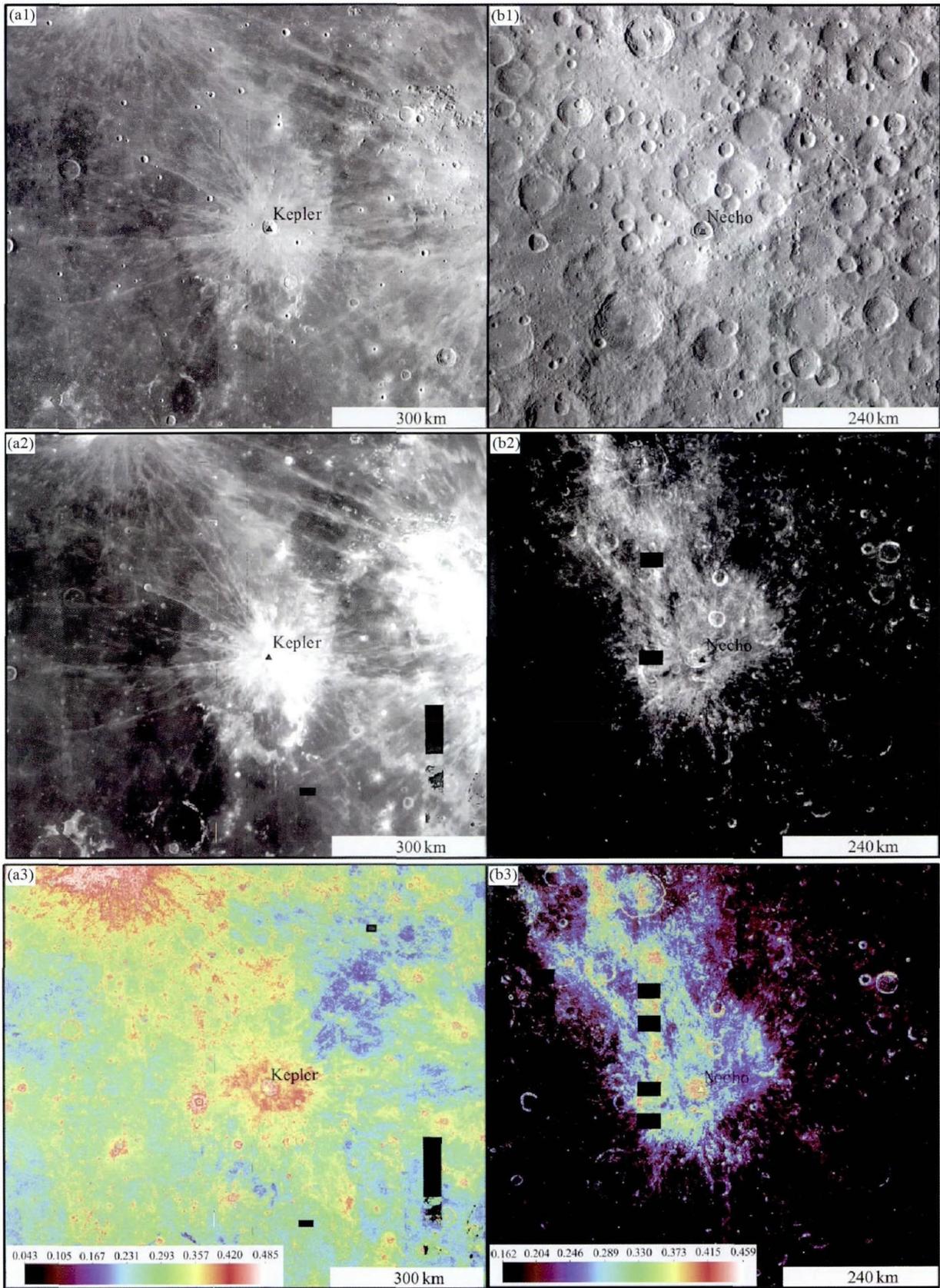


图3 Kepler坑(左)和 Necho坑(右)区域在不同数据下的表现
A1、B1 分别为 Kepler坑和 Necho坑区域在 LRO 广角相机下的影像; A2、B2 分别为 Kepler坑和 Necho坑区域的 Clementine 750nm 反射率影像; A3、B3 分别为 Kepler坑和 Necho坑区域的光学成熟度(OMAT)影像
Fig.3 Images of crater Kepler region (left) and crater Necho region (right) based on different datasets

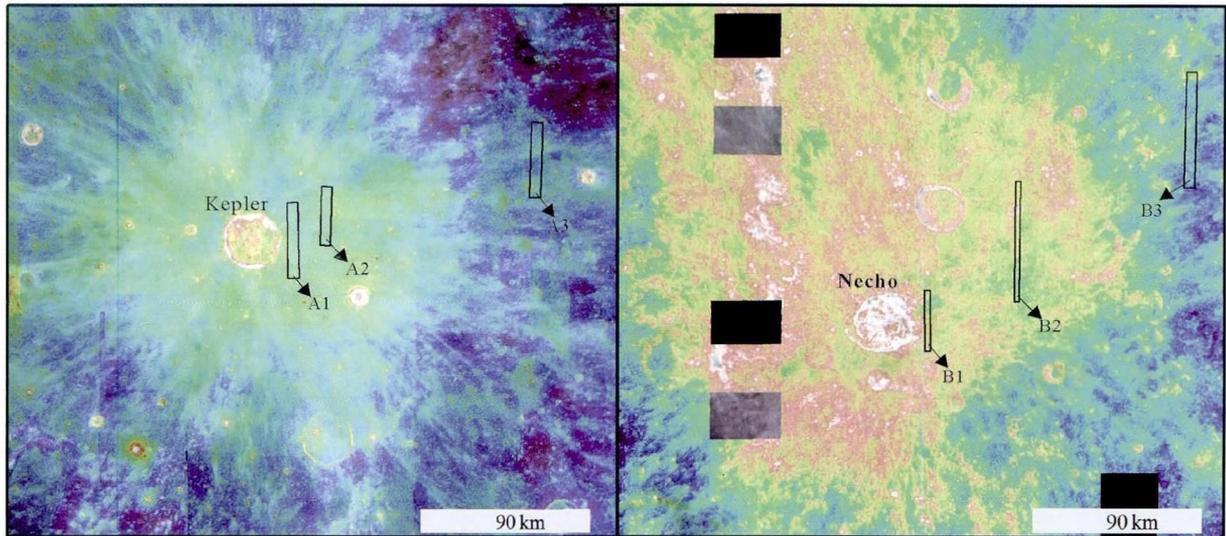


图4 Clementine 750nm 反射率影像与 OMAT 影像的叠加

左边 Kepler 坑中黑色方框 A1、A2、A3 和右边 Necho 坑黑色方框 B1、B2、B3 分别对应图 6 中使用的 LRO 窄角相机影像覆盖范围,数据编号分别为:M1103809714LC、M1114412298RC、M1119100472RC、M134374642LC、M149696735LC、M180329705RC

Fig.4 Clementine 750nm reflectance image is overlaid on OMAT image

影像、Clementine UVVIS 750nm 反射率影像和光学成熟度三种数据源中的表现。Kepler 坑溅射沉积物在 LRO 宽角相机影像上(图 3-a1)能清楚显示,具有相对更高的反照率,比背景物质更明亮,但辐射纹与东边的哥白尼坑等年轻撞击坑的辐射纹相互交叠,难以区分。位于月陆的 Necho 坑溅射沉积在 LRO 宽角相机影像图上(图 3-b1)很难识别,虽然明显偏亮,但无法确定溅射物的分布模式,也不能判断出它的纹理特征,这可能与高地斜长岩本身就比月海玄武岩反照率更高有关,Necho 坑溅射物与月陆斜长岩背景的反照率差异不够显著。因此仅依据影像图确定年轻撞击坑的溅射物分布在月海区域勉强能够使用,但在月陆区域并不可靠。

与 LRO 宽角相机的影像不同,在 Clementine 750nm 反射率影像图上,无论是月海地区的 Kepler 坑(图 3-a2)还是月陆地区的 Necho 坑(图 3-b2)都呈现出清晰的溅射沉积分布,相对于背景更加明亮,具有更高的反射率。对于 Kepler 坑,其溅射沉积比在 LRO 影像图中更加明显,其辐射纹与更早形成的月海玄武岩物质形成强烈的反差,能够被清晰地判断出来,与其它撞击坑坑辐射纹的关系也能准确判断。Necho 坑的溅射沉积呈现更加复杂的状态,这可能与它所处的复杂地质环境有关(Gifford *et al.*, 1979),其辐射纹分布范围很广,类似蝶形分布,在北部与 King 撞击坑的辐射纹存在交叠,但从叠置关系分析,Necho 坑溅射物覆盖在上面,表明 Necho 坑更年轻。

为了突出在光学成熟度图上撞击坑的溅射沉积分布,对 OMAT 图像做了伪彩色增强。从光学成熟度图上可以看出,Kepler 坑(图 3-a3)和 Necho 坑(图 3-b3)的坑内物质和溅射沉积都具有相对于背景物质更高的 OMAT 值,表明它们不如

背景物质成熟,形成时间晚。值得注意的是,两个坑的坑内成分都比坑外成分 OMAT 值高,这与 Lucey *et al.* (2000)的描述一致。两个撞击坑溅射物的 OMAT 分布与 Clementine 750nm 反射率影像相似,但表现出更丰富的层次,便于识别,然而 Kepler 坑的远端辐射纹在 OMAT 图上没有在 Clementine 750nm 反射率影像上明显。

为了充分利用 Clementine 光谱反射率影像和 OMAT 影像的特征,可以将二者叠加起来。图 4 中将 Clementine 750nm 光谱反射率影像叠加在 OMAT 影像之上,并将前者设为适当的透明度,可以得到融合两个数据的影像。可以发现,叠加后的影像不仅清楚显示了坑附近的溅射沉积分布,而且可以识别出辐射纹的分布特征。此外,叠加后的影像清楚地揭示出了撞击坑的坑缘位置,可以轻易将坑内部分和坑外部分区分。

4.2 溅射物的相划分

本文将 Kepler 坑和 Necho 坑的溅射物分为三个相,分别是连续溅射沉积相、不连续溅射沉积相和辐射纹。从图 5 可以看出,连续溅射沉积相和不连续溅射沉积相具有明显的差异:连续溅射沉积相的溅射物堆积较厚,具有围绕坑中心的同心环状结构,这种结构在离坑缘越近的地方越明显;不连续溅射沉积相的溅射物堆积较薄,呈起伏丘状地貌,溅射物的沉积不连续,它具有明显的指向坑中心的辐射状结构。

图 6 反映了 Kepler 坑和 Necho 坑溅射物三个相的细致结构。从图 6-a1 和图 6-b1 可以看出,连续溅射沉积相的表面具有数目众多的石块,且月陆的 Necho 坑比月海的 Kepler 坑含有的岩石数量更多。图 6-a2 和图 6-b2 反映了 Kepler 坑

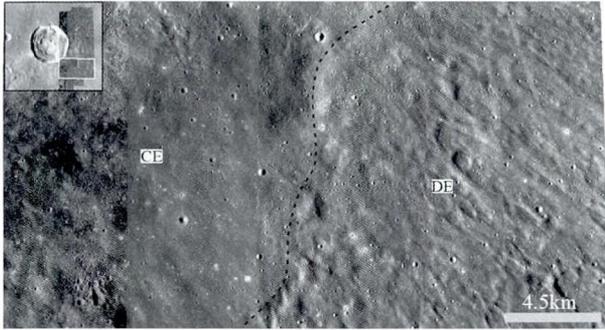


图5 Kepler坑连续溅射沉积相(CE)和不连续溅射沉积相(DE)

图中影像为LRO窄角相机影像,左上角表示影像范围相对于Kepler坑的位置。黑色短线左边是连续溅射沉积相(CE)右边是不连续溅射沉积相(DE)

Fig. 5 The continuous ejecta deposits (CE) and discontinuous ejecta deposits (DE) of crater Kepler

和Necho坑不连续溅射物的详细特征,与连续溅射沉积相不同的是,在不连续溅射沉积相表面有更多次级坑分布,次级坑的撞击作用将溅射物与当地的原始成分进行了混合。图6-a3和图6-b3反映了Kepler坑和Necho坑辐射纹的特征,辐射纹是溅射物覆盖最薄的地方,具有指向撞击坑中心的放射状纹理但通常不是很明显,靠近撞击坑的辐射纹通常比远端辐射纹更宽,更容易识别。

4.3 Kepler坑和Necho坑溅射物填图

根据前面的认识,我们对Kepler坑和Necho坑的溅射物分布进行了填图(图7)。在填图过程中,确定连续溅射物主要依靠LRO的影像数据,而在确定不连续溅射沉积的时候除了使用LRO影像,还需要Clementine的光谱反射率影像和OMAT联合进行约束,因为在有月陆成分出露的位置其反照率与撞击坑的溅射沉积差异不明显。对于辐射纹,在月海区域可使用LRO影像,在月陆区域或在月海区域进行更准确的辐射纹识别需要利用Clementine光谱数据和OMAT影像。

如图7所示,Kepler坑和Necho坑溅射物包括三个相,从靠近撞击坑到远离撞击坑分别为:连续溅射沉积相(CE)、不连续溅射沉积相(DE)和辐射纹(CR)。对于辐射纹,由于受到溅射物的量以及地形等的影响,其显著程度不一样,因此这里将它们分为三种类型:最显著的辐射纹、中等显著的辐射纹以及最不显著的辐射纹,分别用不同粗细的直线段表示。图7表明,在月海区的Kepler坑比月陆区Necho坑的辐射纹更丰富,且相对更显著的辐射纹分布范围更广。

经过计算,得到了Kepler坑和Necho坑溅射物三个相的外边界到撞击坑中心的距离及其与坑半径之比(表2)。Kepler坑连续溅射沉积相分布在坑外2.4个半径范围之内,而Necho坑在2.6个半径范围之内,差异较小。对于不连续溅射沉积相,Necho坑的分布距离比Kepler坑更大,前者为

表2 Kepler坑和Necho坑各相溅射物外边界到坑中心的距离及其与半径之比

Table 2 Distances from crater center to ejecta facies' outer boundary of crater Kepler and crater Necho and their ratio to crater radius

数据区域	Kepler			Necho		
	CE	DE	CR	CE	DE	CR
最大距离(单位:km)	37.5	108.0	422.4	38.9	162.3	430.5
最大距离与半径比	2.4	7.0	27.3	2.6	10.8	28.7
最小距离(单位:km)	17.5	52.5	162.8	20.3	63.9	185.8
最小距离与半径比	1.1	3.4	10.5	1.4	4.3	12.4

1.4到10.8个半径范围之内,而后者为1.1到7.0个半径范围之内,考虑到Kepler坑比Necho坑半径大1km,这个差异可能会更大。Kepler坑的辐射纹最长达到27.3个半径距离,位于撞击坑西部;Necho坑的辐射纹最远可到达28.7个半径距离,位于撞击坑东部。对于各相溅射物,无论是最大分布距离还是最小分布距离,Necho坑的都大于Kepler坑,其分布面积也大于Kepler坑溅射物分布面积。

5 讨论

5.1 多源数据融合识别撞击坑溅射物

撞击坑及更大尺度的撞击盆地是月表最典型的地质单元和地貌单元,是月球地质填图中不可或缺的组成部分,因此对于撞击坑尤其是坑外溅射物成分的准确识别异常重要。对于月海区域的撞击坑溅射物,通常在相机影像上就能够较清晰地识别出来,而对于月陆地区的撞击坑,仅仅依靠相机的影像数据还不足以准确识别撞击坑溅射物,需要借助于其它数据。

月球撞击坑形成之后在月表最顶层将受到太阳风、宇宙射线等高能粒子作用,以及微陨石轰击等的改造而不断成熟,与月土成熟作用相伴而生的主要物理变化是:①粉碎作用,岩石和矿物破碎或分裂成更小的碎屑;②熔结作用,形成熔结碎屑(Lucey *et al.*, 2006)。由于要产生成熟的月土需要约100Myr的表部整合时间(Morris, 1978),因此可以利用成熟度来识别年轻的月表单元,对于年轻撞击坑的溅射物识别具有重要意义。

在众多成熟度指标中,Lucey *et al.* (2000)提出的光学成熟度(OMAT)适用范围广且使用方便,能够轻易区分出不同成熟度的月表,不仅适用于月海地区,而且在月陆区域也适用。对于远端的撞击坑辐射纹,OMAT数据图像与Clementine多光谱数据中750nm的光谱反射率影像结合起来能够互为补充,达到更好的效果。此外,在对溅射沉积的不同相进行细分时,高分辨率的相机影像数据能够清晰显示出它们的纹理特征的细节要素。因此,在月球地质填图中需借助于多源数据融合识别撞击坑的溅射物分布。

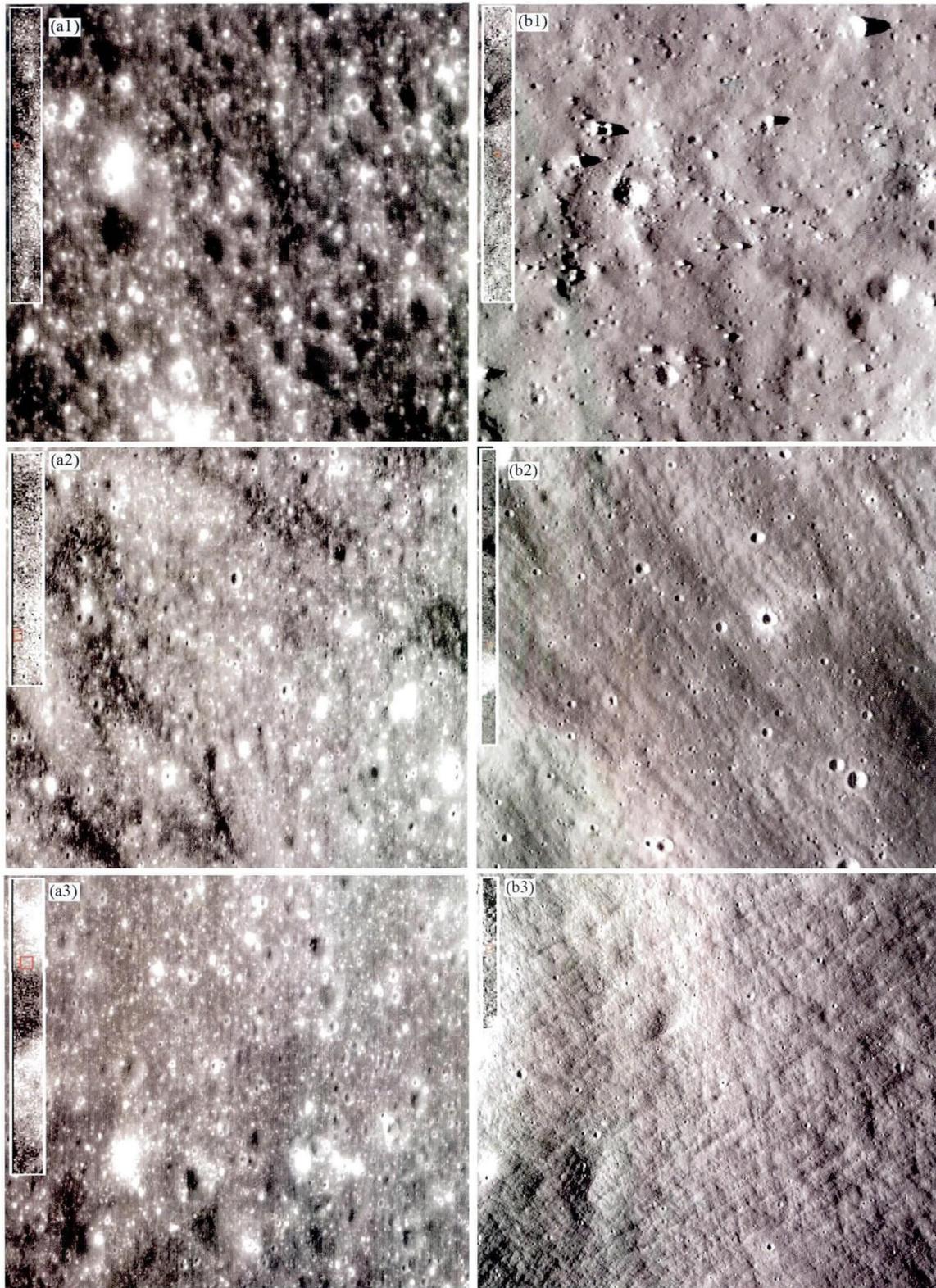


图6 Kepler坑(左)和Necho坑(右)的三个溅射沉积相

所有影像均是LRO窄角相机影像,各轨影像与图4中黑色方框标注的影像对应,左上角红色方框表示本图幅区域在该轨影像中的位置.

A1、B1表示连续溅射沉积相,A2、B2表示不连续溅射沉积相,A3、B3表示辐射纹

Fig. 6 The three ejecta deposits facies of crater Kepler (left) and crater Necho (right)

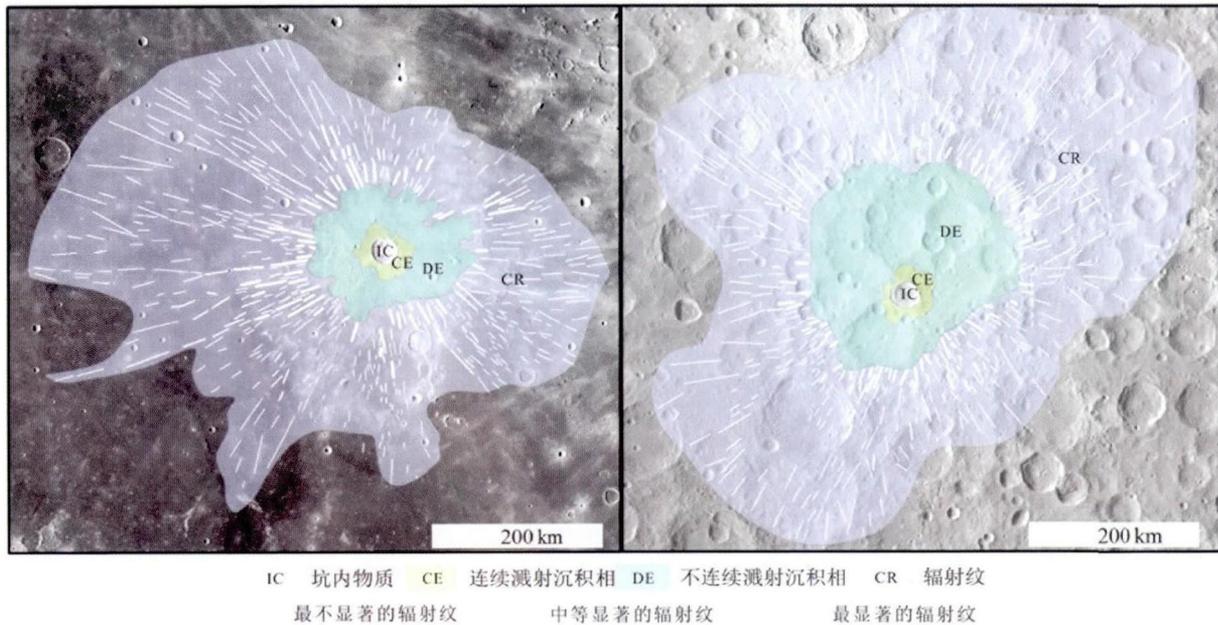


图7 Kepler坑(左)和Necho坑(右)的溅射物分布

坑内物质(IC)不是本文重点研究的内容,在这里只是进行了标注;辐射纹被分为最显著、中等显著和最不显著的三种类别,分别用粗线段、中等粗细线段和细线段表示。底图为LRO宽角相机影像

Fig. 7 Ejecta deposits distribution of crater Kepler (left) and crater Necho (right)

5.2 月球年轻撞击坑的溅射物分布

月球年轻撞击坑的溅射物可以分为三个相:连续溅射沉积相、不连续溅射沉积相和辐射纹。连续溅射沉积相典型的特征是他的同心环状结构,根据撞击成坑的过程机制(Collins *et al.*, 2012),撞击造成坑缘应力抬升并隆起,连续溅射沉积相的同心环状结构可能是抬升之后坑缘物质向外滑移的挤压应力以及重力作用造成的。不连续溅射沉积相离坑中心有一定距离,大部分在3个半径距离之外,这里溅射物的数量相对较少,降落在月表堆积构成山丘状的起伏,具有指向坑中心的辐射状纹理。而辐射纹是最远端的溅射物沉积,大部分在10个半径距离之外,由于溅射物质的量很少,它们通常不能构成一套完整的月表岩石地层单元,只形成了撞击坑中心向外的辐射状线纹,且不能长期保留,一般被作为判断是否为哥白尼纪撞击坑的标志(Shoemaker and Hackman, 1962; Wilhelms *et al.*, 1987)。

Kepler坑的溅射物分布具有不对称性,且这种不对称性从内部连续溅射沉积相到外部的辐射纹相逐渐扩大。针对这种现象,Shoemaker(1960)认为是撞击坑位置的原始物质不均匀导致的,也有可能是受到附近哥白尼纪撞击坑的辐射纹影响(Öhman and Kring, 2012),但可能性最大的是Kepler坑可能形成于一次倾斜撞击。根据撞击坑内外熔融岩石和辐射纹的沉积分布以及坑缘形貌,Öhman and Kring(2012)认为Kepler坑形成于来自东南方向45°的倾斜撞击。由于Kepler坑所处位置较高且周围地形较均一,因此地形对溅射

物分布的影响较小,造成溅射物不对称分布的主要原因是倾斜撞击造成的。

Necho坑的溅射沉积分布具有更显著的不对称性,其辐射纹具有长短轴,长轴为东北-西南方向,Gifford *et al.*(1979)认为Necho坑溅射沉积的不对称分布可能来自于基底物质、地形影响或倾斜撞击。根据辐射纹的分布特征,复杂的月陆地形和倾斜撞击是造成Necho坑溅射沉积不对称分布的主要因素,但还需有针对性地进行更精细的研究才能得出可靠的结果。此外,北部King撞击坑辐射纹的干扰可能会影响对Necho坑辐射纹的识别,给辐射纹范围边界的确定带来一定的误差。

对比月陆的Necho坑和月海的Kepler坑发现,尽管平均半径Kepler坑大1km,但溅射物的分布范围Necho坑更大,这充分说明了撞击作用的复杂性。在撞击过程中,挥发份的含量、靶标上层岩石的性质、撞击体的成分构成等都将对溅射沉积最后的形貌和性质造成影响(Collins *et al.*, 2012; Osinski *et al.*, 2011; Stronge, 2000)。

6 结论

月球年轻撞击坑的溅射沉积物可分为三种类型:连续溅射沉积相(CE)、不连续溅射沉积相(DE)和辐射纹(CR)。连续溅射沉积相的溅射物堆积了一定厚度,具有因坑缘隆起后物质坡移挤压应力和重力作用形成的同心环状构造,表面有大量岩石碎块堆积;不连续溅射沉积相堆积的溅射物较

薄,呈山丘状起伏,在厚的地方堆积较高而薄的地方不连续,形成坑中心向外的放射状纹理,表面分布有众多次级撞击坑;辐射纹属于撞击坑远端的溅射,表现为明亮的辐射状细条纹。溅射沉积物的分布除了与撞击规模、角度等有关以外,还受靶标性质的影响,本文通过对典型的月海区撞击坑 Kepler 和月陆区撞击坑 Necho 的溅射沉积填图,对无挥发份、无大气行星的撞击溅射沉积提供了一定的认识。

撞击溅射沉积物是月球表面分布最广泛的地质单元之一,且在不同的地质背景下其表现出不同的特征。在月球探测的过程中获得的不同数据源对溅射沉积物的有效识别度也不一样,为了准确识别撞击坑溅射沉积物的分布并在月球地质编图中准确表达,需利用多源数据联合识别。影像数据能够较好地反映地质单元的形貌、纹理信息。溅射沉积物是撞击作用物质扰动的结果,对成分信息敏感的光谱数据在识别溅射物中具有重要价值。连续溅射沉积相(CE)和不连续溅射沉积相(DE)的重要差异是其纹理特征,因此影像数据能够进行较好地反映。对于年轻的撞击坑,光学成熟度结合 Clementine 750nm 波段的反射率数据可以准确识别出溅射物尤其是辐射纹的分布范围,而且无论是月海区还是月陆区都可适用。

为理解月球上不同规模撞击形成的溅射物分布差异以及它们的演化过程,对于不同规模的撞击事件以及年龄更古老的撞击事件形成的溅射沉积物的识别将是下一步研究的重点。此外,其它空间环境的行星撞击事件形成的溅射物分布的研究也可为研究地球撞击事件提供参考。

References

- Alvarez LW, Alvarez W, Asaro F and Michel HV. 1980. Extraterrestrial cause for the cretaceous-tertiary extinction. *Science*, 208 (4448): 1095 - 1108
- Basilevsky AT, Grebennik NN and Chernaya IM. 1977. Photogeologic study of lunar crater rays: Nature of rays and age of crater kepler. In: 8th Lunar and Planetary Science Conference. New York: Pergamon Press, 8: 70
- Collins GS, Melosh HJ and Osinski GR. 2012. The impact-cratering process. *Elements*, 8(1): 25 - 30
- Crater Analysis Techniques Working Group. 1979. Standard techniques for presentation and analysis of crater size-frequency data. *Icarus*, 37 (2): 467 - 474
- Crites ST and Lucey PG. 2015. Revised mineral and Mg[#] maps of the moon from integrating results from the Lunar Prospector neutron and gamma-ray spectrometers with Clementine spectroscopy. *American Mineralogist*, 100(4): 973 - 982
- Dominov E and Mest SC. 2009. Geology of antoniadi crater, South Pole Aitken basin, Moon. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas
- Gifford AW, Maxwell TA and El-Baz F. 1979. Geology of the lunar farside crater necho. *The Moon and the Planets*, 21(1): 25 - 42
- Gillis JJ, Jolliff BL and Korotev RL. 2004. Lunar surface geochemistry: Global concentrations of Th, K, and FeO as derived from lunar prospector and Clementine data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(18): 3791 - 3805
- Glass BP and Simonson BM. 2013. Impact crater formation, shock metamorphism, and distribution of impact ejecta. In: Glass BP and Simonson BM (eds.). *Distal Impact Ejecta Layers*. Berlin Heidelberg: Springer, 15 - 75
- Hackman RJ. 1962. *Geologic Map and Sections of the Kepler Region of the Moon*. Washington: US Geological Survey
- Ishihara Y, Goossens S, Matsumoto K, Noda H, Araki H, Namiki N, Hanada H, Iwata T, Tazawa S and Sasaki S. 2009. Crustal thickness of the Moon: Implications for farside basin structures. *Geophysical Research Letters*, 36(19): L19202
- König B, Neukum G and Fechtig H. 1977. Recent lunar cratering: Absolute ages of Kepler, Aristarchus, Tycho'. In: 8th Lunar and Planetary Science Conference. New York: Pergamon Press, 555 - 557
- Lucey PG, Spudis PD, Zuber M, Smith D and Malaret E. 1994. Topographic-compositional units on the Moon and the early evolution of the Lunar crust. *Science*, 266(5192): 1855 - 1858
- Lucey PG, Blewett DT, Taylor GJ and Hawke BR. 2000. Imaging of lunar surface maturity. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8): 20377 - 20386
- Lucey PG. 2004. Mineral maps of the Moon. *Geophysical Research Letters*, 31(8): L08701
- Lucey P, Korotev RL, Gillis JJ, Taylor LA, Lawrence D, Campbell BA, Elphic R, Feldman B, Hood LL, Hunten D, Mendillo M, Noble S, Papike JJ, Reedy RC, Lawson S, Prettyman T, Gasnault O and Maurice S. 2006. Understanding the lunar surface and space-moon interactions. In: Jolliff BL, Wieczorek MA, Shearer CK and Neal CR (eds.). *New Views of the Moon*. Chantilly, Virginia: Mineralogical Society of America, 83 - 220
- Martellato E, Foing BH and Benkhoff J. 2013. Numerical modelling of impact crater formation associated with isolated lunar skylight candidates on lava tubes. *Planetary and Space Science*, 86: 33 - 44
- McEwen AS, Gaddis LR, Neukum G, Hoffman H, Pieters CM and Head JW. 1993. Galileo observations of post-imbrium lunar craters during the first earth-moon flyby. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98(E9): 17207 - 17231
- McGetchin TR, Settle M and Head JW. 1973. Radial thickness variation in impact crater ejecta: Implications for lunar basin deposits. *Earth and Planetary Science Letters*, 20(2): 226 - 236
- Mest SC, Berman DC and Petro NE. 2010. Geologic mapping of impact crater floor deposits near the Lunar South Pole. In: 41st Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute
- Montanari A and Koerber C. 2000. *Impact Stratigraphy: The Italian Record*. Berlin Heidelberg: Springer, 1 - 301
- Morris RV. 1976. Surface exposure indices of lunar soils: A comparative FMR study. In: 7th Lunar Science Conference. New York: Pergamon Press, 1: 315 - 335
- Morris RV. 1978. The surface exposure (maturity) of lunar soils-some concepts and Is/FeO compilation. In: 9th Lunar and Planetary Science Conference. New York: Pergamon Press, 2: 2287 - 2297
- Neukum G, Ivanov BA and Hartmann WK. 2001. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. *Space Science Reviews*, 96(1-4): 55 - 86
- Nozette S, Rustan P, Pleasance LP *et al.* 1994. The clementine mission to the Moon: Scientific overview. *Science*, 266 (5192): 1835 - 1839
- Öhman T and Kring DA. 2012. Photogeologic analysis of impact melt-rich lithologies in Kepler crater that could be sampled by future missions. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117(E12): E00H08
- Osinski GR, Tornabene LL and Grieve RAF. 2011. Impact ejecta emplacement on terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(3-4): 167 - 181
- Pieters CM, Staid MI, Fischer EM, Tompkins S and He G. 1994. A sharper view of impact craters from clementine data. *Science*, 266 (5192): 1844 - 1848
- Pieters CM and Tompkins S. 1999. Tsiolkovsky crater: A window into crustal processes on the lunar farside. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 104(E9): 21935 - 21949
- Robinson MS, Brylow SM, Tschimmel M, Humm D, Lawrence SJ,

- Thomas PC, Denevi BW, Bowman-Cisneros E, Zerr J, Ravine MA, Caplinger MA, Ghaemi FT, Schaffner JA, Malin MC, Mahanti P, Bartels A, Anderson J, Tran TN, Eliason EM, McEwen AS, Turtle E, Jolliff BL and Hiesinger H. 2010. Lunar reconnaissance orbiter camera (LROC) instrument overview. *Space Science Reviews*, 150 (1-4): 81-124
- Senft LE and Stewart ST. 2009. Dynamic fault weakening and the formation of large impact craters. *Earth and Planetary Science Letters*, 287(3-4): 471-482
- Shoemaker EM. 1960. Ballistics of the copernican ray system. In: *Proceedings of Lunar and Planetary Exploration Colloquium*. Reston: US Geological Survey, 7-21
- Shoemaker EM and Hackman RJ. 1962. Stratigraphic basis for a lunar time scale. In: *The Moon, 14th IAU Symposium*. New York: Academic Press, 289-300
- Skinner JA, Gaddis LR Jr and Tanaka KL. 2006. Progress on mapping the copernicus 1 : 2500000-scale quadrangle on the moon: Impact crater facies and mineralogies. In: Gregg TKP, Tanaka KL and Saunders RS (eds.). *Abstracts of the Annual Meeting of Planetary Geologic Mappers*, Nampa, Idaho, 2006. Nampa, Idaho: Annual Meeting of Planetary Geologic Mappers, 39-40
- Smith DE, Zuber MT, Neumann GA, Lemoine FG, Mazarico E, Torrence MH, McGarry JF, Rowlands DD, Head III JW, Duxbury TH, Aharonson O, Lucey PC, Robinson MS, Barnouin OS, Cavanaugh JF, Sun XL, Liiva P, Mao DD, Smith JC and Bartels AE. 2010. Initial observations from the lunar orbiter laser altimeter (LOLA). *Geophysical Research Letters*, 37(18): L18204
- Song E, Bandfield JL, Lucey PC, Greenhagen BT and Paige DA. 2013. Bulk mineralogy of lunar crater central peaks via thermal infrared spectra from the diviner lunar radiometer: A study of the moon's crustal composition at depth. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(4): 689-707
- Stronge WJ. 2000. *Impact Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1-271
- Van Arsdall LE and Mest SC. 2008. Geologic mapping of the schrodinger basin area, lunar south pole. In: *39th Lunar and Planetary Science Conference*. League City, Texas, 2009
- Wilhelms DE and McCauley JF. 1971. *Geologic Map of the near Side of the Moon, Geologic Atlas of the Moon*. Washington: US Geological Survey
- Wilhelms DE and El-Baz F. 1977. *Geologic Map of the East Side of the Moon, Geologic Atlas of the Moon*. Washington: US Geological Survey
- Wilhelms DE, McCauley JF and Trask NJ. 1987. *The Geologic History of the Moon*. Washington DC: US Government Printing Office
- Wood CA and Head JW. 1976. Comparison of impact basins on mercury, mars and the moon. In: *7th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 3629-3651
- Wünnemann K and Ivanov BA. 2003. Numerical modelling of the impact crater depth-diameter dependence in an acoustically fluidized target. *Planetary and Space Science*, 51(13): 831-845