

嫦娥4号着陆区冯·卡门撞击坑溅射物的识别及年代分析*

李圣卉^{1,2} 刘建忠^{1,3**} 刘敬稳¹ 王俊涛¹ 张敬宜^{1,2} 傅泽华⁴ 张珂^{1,2}

LI ShengHui^{1,2}, LIU JianZhong^{1,3**}, LIU JingWen¹, WANG JunTao¹, ZHANG JingYi^{1,2}, FU ZeHua⁴ and ZHANG Ke^{1,2}

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. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

4. 澳门科技大学, 澳门 999078

1. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China

4. Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China

2020-03-27 收稿, 2022-05-31 改回.

Li SH, Liu JZ, Liu JW, Wang JT, Zhang JY, Fu ZH and Zhang K. 2022. Identification and chronological analysis of ejecta in Von Kármán crater: Chang'e-4 landing site region. *Acta Petrologica Sinica*, 38(9): 2889–2899, doi: 10.18654/1000-0569/2022.09.21

Abstract Impact craters are a type of important geological landforms on the surfaces of solid planets such as the Moon, Mars and Mercury. The impact ejecta provides valuable geological information for understanding the impacting process and regional geological evolution of the planet. In this study, the ejecta of Von Kármán crater was investigated by combining Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) image data, Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) topographic data and Clementine multi-spectral data. Our results indicate that most of the ejecta within Von Kármán crater have been seriously alternated. The continuous ejecta that minor affected by other impact craters were selected and analyzed by using the Crater-Tools, based on Wide Angle Camera (WAC) and Terrain Camera (TC) image data. Then, the dating analysis was carried out, yielded an age of 4.15 Ga (i. e., pre-Nectarian) for Von Kármán crater. Our studies demonstrate that multi-source data is useful in the identification of ejecta and the necessity of excluding the influence of surrounding ejecta in the dating analysis.

Key words Von Kármán crater; Multi-source data; Ejecta; Chronological analysis

摘要 撞击坑是月球、火星和水星等固态行星表面重要的地貌和构造,其形成时产生的溅射物包含了大量地质信息,是认识撞击坑形成过程和区域地质演化的重要研究对象。本文以冯·卡门撞击坑为研究对象,结合月球勘测轨道飞行器(LRO)影像数据、激光高度计(LOLA)地形数据、Clementine多光谱数据等对冯·卡门撞击坑的溅射物进行综合解析。冯·卡门撞击坑的溅射物后期改造比较严重,只有南部区域保存相对完整。选取连续溅射物中受其他撞击坑溅射物影响较小的区域,并以宽角相机(WAC)数据和高分辨率地形相机(TC)数据为基础,利用撞击坑提取工具CraterTools对均一的区域进行撞击坑统计分析,进而利用月球产率和年代学函数推导出绝对模型年龄,获得了冯·卡门撞击坑的年龄为4.15Ga。本文主要强调了多源数据在识别溅射物时的重要性,以及年代分析时排除周围溅射物影响的必要性。

* 本文受国家自然科学基金重点项目(41941003)、中国地质调查局地质调查项目(DD20221645)、中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDY-SSW-DQC028)、民用航天预先研究重点项目(D020201)和广西科技基地与人才建设专项(AD1850007)联合资助。

第一作者简介: 李圣卉,女,1994年生,硕士生,地质工程专业, E-mail: 1070452714@qq.com

** 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

关键词 冯·卡门撞击坑; 多源数据; 溅射物; 年代分析
中图法分类号 P691

撞击坑是研究月球必不可少的一类地质单元,其几乎覆盖了整个月球(Osinski *et al.*, 2011)。撞击成坑作为一个重要而独特的地质过程,对月球表面的地质特征产生了很大的影响,其产生的溅射物的影响范围更为广泛(Alvarez *et al.*, 1980; Collins *et al.*, 2012; Öhman and Kring, 2012)。根据其形态特征,撞击坑的内部从外向内依次为坑壁、坑底、中央峰(撞击坑类型不同而有所差别),而撞击坑外部则普遍分布着大量的撞击溅射物,包括连续溅射物和不连续溅射物。其中,连续溅射物是撞击坑形成过程中被挖掘的物质向四周抛射形成,又被称为坑缘,通常分布于撞击坑的最高点至撞击坑外围平坦区域之间的地带;不连续溅射物则是指溅射沉积及次生产物(Osinski *et al.*, 2011; Collins *et al.*, 2012; Glass and Simonson, 2013; 丁孝忠等, 2014; 郭弟均等, 2016)。溅射物不仅能为认识撞击坑内部物质成分提供信息,还是研究地层序列、撞击坑形成过程和区域地质演化的重要对象。

冯·卡门撞击坑位于月球背面南极-艾肯(South Pole-Aitken, SPA)盆地的西北部(图1),其中心坐标为:44.45°S、176.25°E(Qiao *et al.*, 2019),直径约为186km(Huang *et al.*, 2018; Ling *et al.*, 2019),内部被玄武岩填充(Stuart-Alexander, 1978; Pasckert *et al.*, 2018),是嫦娥4号的着陆区域(吴伟仁等, 2017),也是目前月球背面唯一具有就位探测数据的区域。在冯·卡门撞击坑及其周边区域,地形复杂,撞击坑数量多且相互叠加、相切,没有明确的界线,各个撞击坑的溅射物相互混合,交错分布,难以区分(Qiao *et al.*, 2019)。

在以往的地质图编研中,对冯·卡门撞击坑的溅射物进行了提取,如1:500万的月球背面中心地质图中,以Apollo数据为基础,提取的冯·卡门撞击坑的溅射物主要集中于西南部(Stuart-Alexander, 1978);在1:250万的Planck区域地质图中,利用影像数据和高程数据识别出的冯·卡门撞击坑的溅射物在四周都有分布(Yingst *et al.*, 2017)。但是识别溅射物时利用的数据较为单一,且提取的溅射物以坑缘为主,还包括一部分坑壁物质,并未将溅射物进行连续与不连续的划分。

撞击坑年龄的判定方法,从早期的撞击坑叠置法,到后期的撞击坑大小-频率统计以及如今的绝对模型年龄,经历了不断的演化和提升。但对冯·卡门撞击坑的年龄一直存在争议,主要存在两种观点:一是冯·卡门撞击坑的年龄为酒海纪。在早期的地质图绘制中,人们利用撞击坑相互之间的叠置关系,初步判定其为雨海纪和酒海纪年龄之间(Stuart-Alexander, 1978),之后的学者根据判定的月海的年龄支持冯·卡门撞击坑是酒海纪撞击坑(Pasckert *et al.*, 2018; Ling *et al.*, 2019)。另一种则认为冯·卡门撞击坑是前酒海纪撞击坑,在《月球的地质历史》一书中基于早期数据,利用大小-频率统计将年龄定为前酒海纪(Wilhelms *et al.*, 1987);在之后的Planck区域地质图中,利用高清影像数据并结合撞击坑大小-频率分布统计定年法对冯·卡门撞击坑进行定年,获得年龄为3.97Ga,即前酒海纪(Yingst *et al.*, 2017);目前,此观点被大多数人所支持(Huang *et al.*, 2018)。虽然前人对冯·卡门撞击坑已开展了一定的分析研究,但由于对该区域

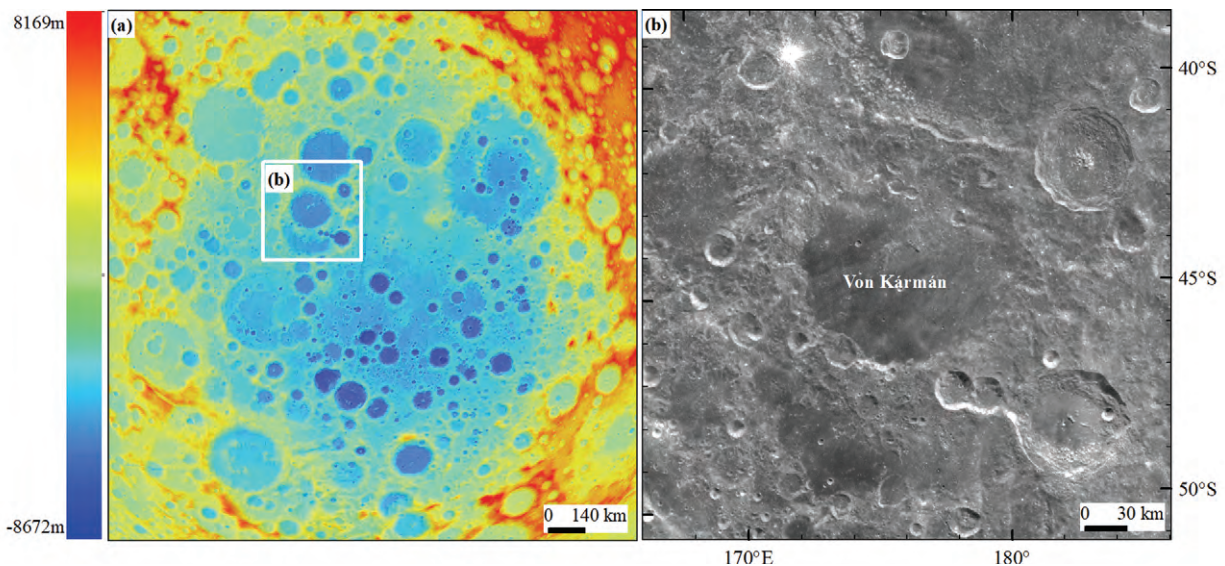


图1 南极-艾肯盆地的数字高程模型(a)及嫦娥4号着陆区冯·卡门撞击坑(b)

Fig. 1 Digital elevation model of the South Pole-Aitken Basin (a) and the Von Kármán crater (b) where the Chinese Chang'e-4 landed

进行撞击坑统计定年所使用的数据分辨率有限,并且选择的撞击坑的大小及分布区域也存在一定的影响,因此对该区域进行定年的精确度有待进一步提高。

本文将冯·卡门撞击坑为研究对象,结合影像数据、地形数据、光谱数据对冯·卡门撞击坑的溅射物进行识别,充分发挥各类数据的优势,进行综合解析,提取连续溅射物以及不连续溅射物;然后根据其周边撞击坑的溅射物的影响程度对冯·卡门撞击坑连续溅射物进行单元划分,以WAC和TC数据为基础提取撞击坑进行定年分析,获得更加准确的冯·卡门撞击坑的年龄。可为溅射物的模拟提供参考数据,为深入认识月球撞击过程和地层划分等提供约束条件,为此区域的地质演化过程乃至整个SPA盆地的地质演化过程提供参考。

1 数据和方法

1.1 数据

本文使用的数据包括:(1)日本月亮女神地形相机(TC)数据(Kato *et al.*, 2010),分辨率为10m/pixel,数据来源于SELENE Data Archive;(2)美国月球勘测轨道飞行器(LRO)的宽角相机数据(WAC),分辨率为100m/pixel(Robinson *et al.*, 2010);(3)LRO的激光高度计获得的月球DEM(Digital Elevation Model)数据,分辨率约为59m/pixel(Smith *et al.*, 2010);(4)Clementine的UVVIS多光谱数据的多个波段,分辨率为100m/pixel(Nozette *et al.*, 1994)。其中(2)、(3)、(4)数据均来源于美国PDS行星数据节点。

1.2 方法

1.2.1 溅射物的识别方法

遥感探测数据是进行月球地质解译的基础数据,不同的地质结构在遥感探测数据上呈现出不同的形态、纹理和反照率等信息特征,借助这些特征信息对地质结构进行解译(郭弟均等, 2016)。溅射物是撞击坑形成过程中挖掘出的物质,相对于背景物质,其出露时间较短,年龄较新,呈现出明显不同于背景的遥感信息,但是由于后期的破坏较为严重,影响了它的识别。利用不同的遥感数据对其进行识别,包括LRO影像数据、LOLA地形数据、Clementine多光谱数据和计算获得的光学成熟度(optical maturity parameter, OMAT)(Pieters *et al.*, 1994; Lucey *et al.*, 2000)数据,同时进行多数据融合识别,最后选择最优的结果。

光学成熟度的计算方法为(Lucey *et al.*, 2000):

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

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值越大表示该象元或区域越不成熟,形成时间越晚。

1.2.2 定年方法

常用的定年方法包括相对定年和绝对定年两种方法。其中相对定年主要有地层叠置法、撞击坑形态法、撞击坑大小-频率法、月壤成熟度法(郭弟均等, 2014);绝对定年则分为样品同位素测年法和绝对模型年龄法。本文主要使用地层叠置法、撞击坑大小-频率法和绝对模型年龄法,具体介绍如下:

地层叠置法:应用Nicolaus Steno(1669)提出的地层三定律,即叠加定律(Harris, 1975)、原始水平律和原始连续律(Harris, 1979)进行相对定年分析,获得撞击坑的相对年龄。

撞击坑大小-频率分布统计法(crater size-frequency distributions, CSFDs):此方法基于两个假设,一是在地理位置上,撞击坑的形成是随机分布的,具有随机性;二是在时间尺度上,撞击坑被破坏的速度要远远小于其形成的速度。在此基础上,同一个天体表面,原始撞击坑密度越大的区域,年龄越老。此种方法具有累积分布和相对分布两种表达形式(Crater Analysis Techniques Working Group, 1979; Neukum *et al.*, 2001)。

绝对模型年龄法(absolute model ages, AMAs):结合样品年龄和采样区撞击坑分布获得产率函数,再利用年代学函数,获得绝对模型年龄。利用CSFDs确定绝对模型年龄包括两个基本步骤:(1)识别均一地质单元,并测量其面积;(2)精确识别并量测该区域内主撞击坑的数目与直径(Hartmann, 1970; Neukum *et al.*, 1975, 2001; Neukum, 1983; Hiesinger *et al.*, 2012)。

利用撞击坑提取工具CraterTools(Kneissl *et al.*, 2011)对均一地质区域进行CSFDs测量。将获得的撞击坑的数量和直径输出到Craterstats II(Michael and Neukum, 2010; Michael *et al.*, 2012, 2016; Michael, 2013),再利用(Neukum *et al.*, 2001)月球产率和年代学函数推导出AMAs,结果以累积分布图的形式呈现。

2 结果

2.1 冯·卡门撞击坑的溅射物

图2分别呈现了冯·卡门撞击坑的溅射物在WAC影像、DEM影像、Clementine UVVIS 750nm反射率影像和光学成熟度影像的界线特征。从WAC影像(图2a)可以清楚地观察到撞击溅射物的纹理,尤其是冯·卡门撞击坑的东部区域,但由于冯·卡门撞击坑周围地形复杂,撞击坑之间相互叠加,严重影响了撞击溅射物界线的判别。在DEM数据中(图2b),冯·卡门撞击坑的溅射物的界线在南部可以辨认,其他区域无明显边界,无法详细区分。在Clementine UVVIS 750nm反射率影像(图2c)中,溅射物具有较高的反射率,比背景更加明亮,形成了一定的差别,但是溅射物的界线仍旧

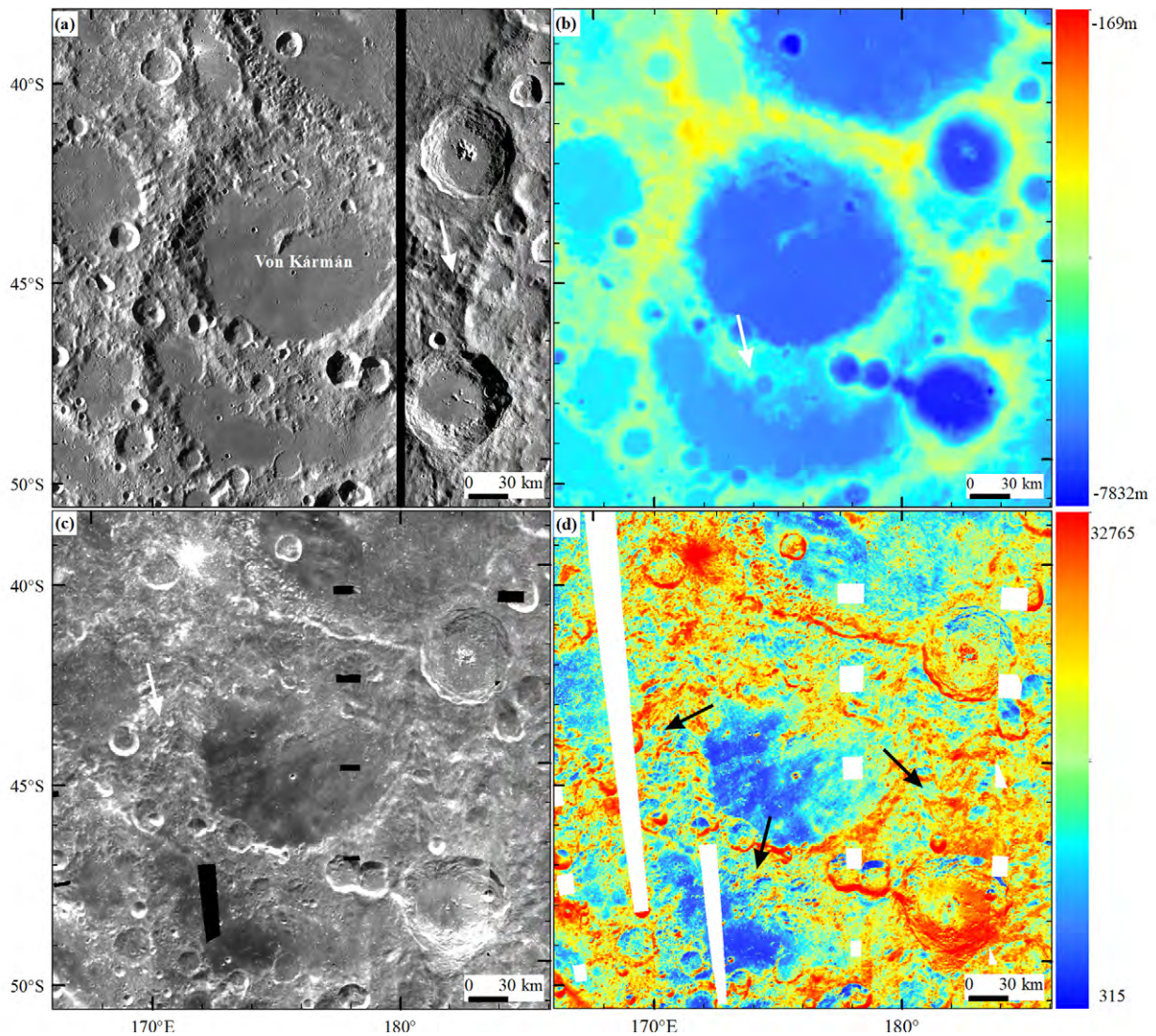


图2 冯·卡门撞击坑的溅射物在不同数据中的展现

(a) WAC 影像中,白色箭头处显示清晰的溅射物纹理; (b) DEM 影像中,白色箭头处显示溅射物的界线; (c) UVVIS 750 nm 反射率影像中,溅射物具有较高的反射率; (d) OMAT 影像中,黑色箭头标出撞击坑周边具有向外延展的趋势

Fig. 2 The occurrences of different types of data in the ejecta from the Von Kármán crater

(a) LROC WAC image mosaic of the Von Kármán area: the white arrow shows the ejecta texture; (b) DEM of the same area: the white arrow shows the boundary of the ejecta; (c) UVVIS 750nm reflectance image of the same area: the ejecta has a higher reflectivity; (d) The OMAT image: the black arrows show the surrounding of the impact crater has a tendency to extend outward

较为模糊。在 OMAT 影像(图 2d)中溅射物与背景形成强烈对比,在撞击坑周边的光学成熟度具有向外延展的趋势,可根据这种趋势识别溅射物。

为了更加准确地识别出冯·卡门撞击坑的连续溅射物和不连续溅射物,本文将结合不同类型的数据来识别其溅射物。针对连续溅射物,本文利用由 DEM 影像提取的坡度图(图 3a)和 OMAT 影像图(图 2d)初步识别冯·卡门撞击坑的连续溅射物,并与周边撞击坑溅射物进行区分,进而通过 WAC 影像的纹理、结构特征提取边界部分(图 3b),最终结合两种影像的优势更好地识别连续溅射物。而针对不连续溅射物,首先将 750nm 反射率影像和光学成熟度影像进行叠

加(图 3c),使不连续溅射物的分布特征更加明显,从而识别不连续溅射物的整体轮廓;再分类显示 OMAT 影像(图 3d),使不连续溅射物的边界信息更加清晰易分辨,进而识别不连续溅射物的细节部分。

利用上述方法对冯·卡门撞击坑的解译结果如图 4a 所示,从外向内依次为不连续溅射物、连续溅射物和坑内物质(坑壁、坑底、中央峰),其中坑内物质主要用来判定连续溅射物的内部界线,为将冯·卡门撞击坑的溅射物进行完整表达,提取的溅射物存在部分推测。冯·卡门撞击坑的连续溅射物以东北-西南方向线为界,其西北侧连续溅射物保留的较窄,而东南侧则较宽;不连续溅射物集中在南部区域,即冯

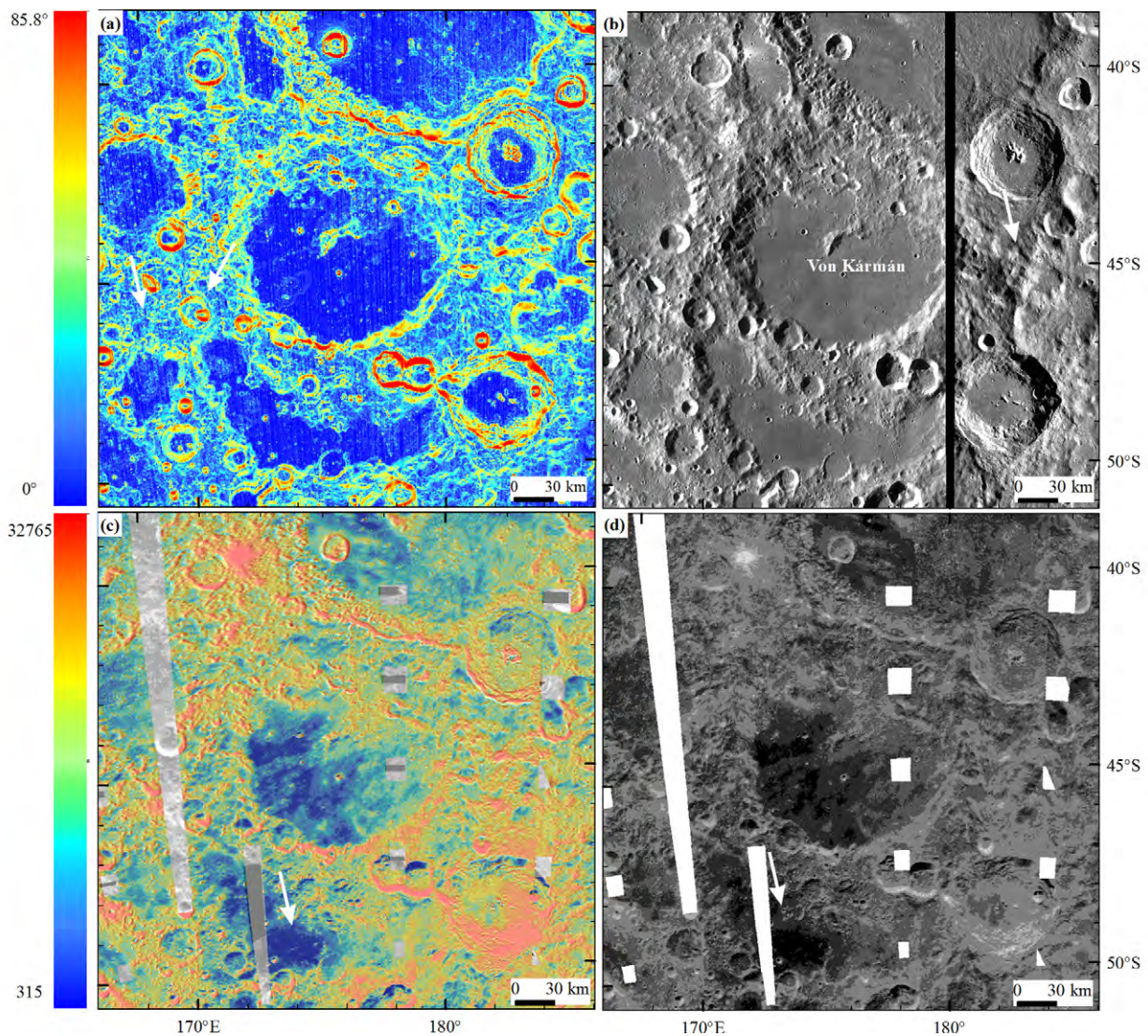


图3 溅射物在处理后的数据中的展现

(a) 坡度图中,不同撞击坑的溅射物呈现不同的坡度走向(白色箭头);(b) WAC 影像图呈现纹理特征;(c) 750nm 反射率影像与 OMAT 影像叠加图,白色箭头指出不连续溅射物边界;(d) OMAT 影像分类图,白色箭头指出溅射物边界结构化

Fig. 3 The processed data of the ejecta from the Von Kármán crater

(a) slope image of the Von Kármán area, the ejecta from different craters shows different slope trends (white arrow); (b) LROC WAC image mosaic shows the texture of ejecta; (c) superposition image of 750nm reflectivity image and OMAT image, the white arrow shows the boundary of discontinuous ejecta; (d) classification of OMAT image, the white arrow shows the ejecta boundary structuring

• 卡门 M 撞击坑内的玄武岩上。

为了能够更加准确地分析冯·卡门撞击坑溅射物的分布并获得其连续溅射物的均一地质单元,本文将冯·卡门撞击坑周边的撞击坑的溅射物也进行了识别(图4b),其中 Leibnitz、Alder 和 Finsen 撞击坑的不连续溅射物可识别,其它撞击坑的均未保留。从东南到西部的一系列小型撞击坑规模虽小,但是由于其分布在冯·卡门撞击坑的连续溅射物上,也对冯·卡门撞击坑溅射物产生了一定的影响,这些撞击坑内部结构简单,连续溅射物保存也都相对完整,只有东南方向的两个撞击坑冯·卡门 L 和冯·卡门 L' (Huang *et al.*, 2018) 存在部分叠加,溅射物混合严重,难以区分;位于

西部的 Cajori 和 Oresme 撞击坑破坏严重,溅射物保留非常有限,其中 Oresme 撞击坑距离冯·卡门撞击坑比较近,其连续溅射物部分覆盖在冯·卡门撞击坑溅射物上,Cajori 撞击坑距离冯·卡门撞击坑较远,其连续溅射物对冯·卡门撞击坑的影响不显著;位于北部的 Leibnitz 撞击坑明显覆盖了部分冯·卡门撞击坑区域,其溅射物甚至覆盖了部分冯·卡门撞击坑的内部,对冯·卡门撞击坑影响较大;东北部的 Finsen 撞击坑保留完整,其溅射物具有明显的地形隆起和放射性纹理,次级坑长链分布广泛,这些溅射物不同程度的覆盖了周围的撞击坑;位于东南部的 Alder 撞击坑保留较为完整,其溅射物在四周都有分布,较易识别,其西北部受小型撞击坑影

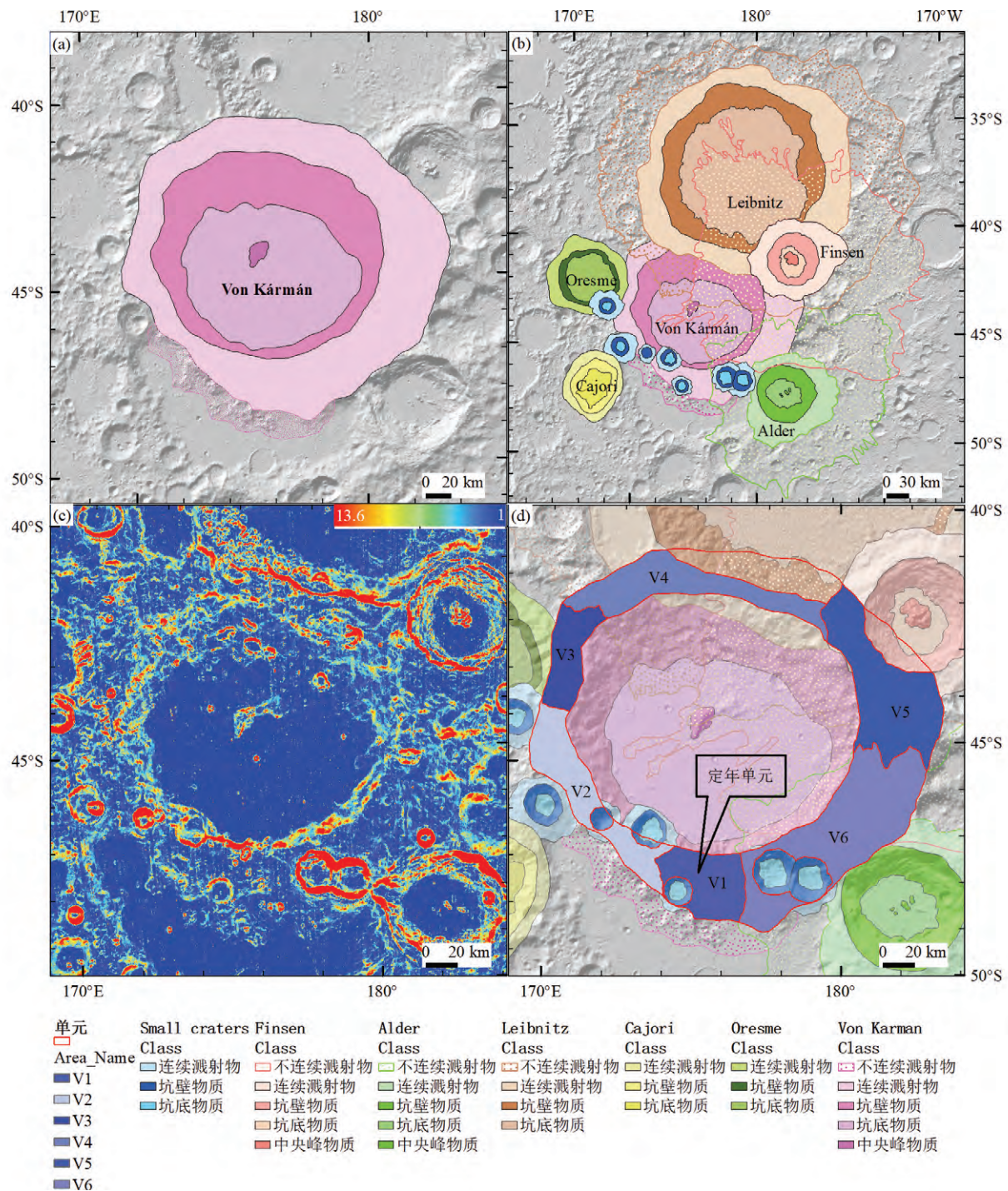


图4 冯·卡门撞击坑溅射物分布图(a)、撞击坑周围溅射物分布图(b)、地形粗糙度图(c)及定年的单元图(d)
 Fig. 4 Ejecta from the Von Kármán crater (a) and its surroundings (b), roughness image of landforms (c) and dating units (d)

响较大。

基于对周围撞击坑溅射物的提取结果,发现冯·卡门撞击坑的连续溅射物以南部保存最为完整,几乎没有受到后期大型撞击的影响;东部保存虽相对完整,但是受到 Finsen 和 Alder 撞击坑的影响,尤其是 Finsen 撞击坑溅射物的影响,混合较为严重;而在东北部和北部区域,连续溅射物基本没有

保留,都被后期形成的 Leibnitz 和 Finsen 撞击坑所覆盖;在西部连续溅射物有部分残留,但它不仅受到大型撞击坑 Cajori 和 Oresme 撞击坑的影响,还被后期许多小型撞击坑覆盖,溅射物较为复杂。

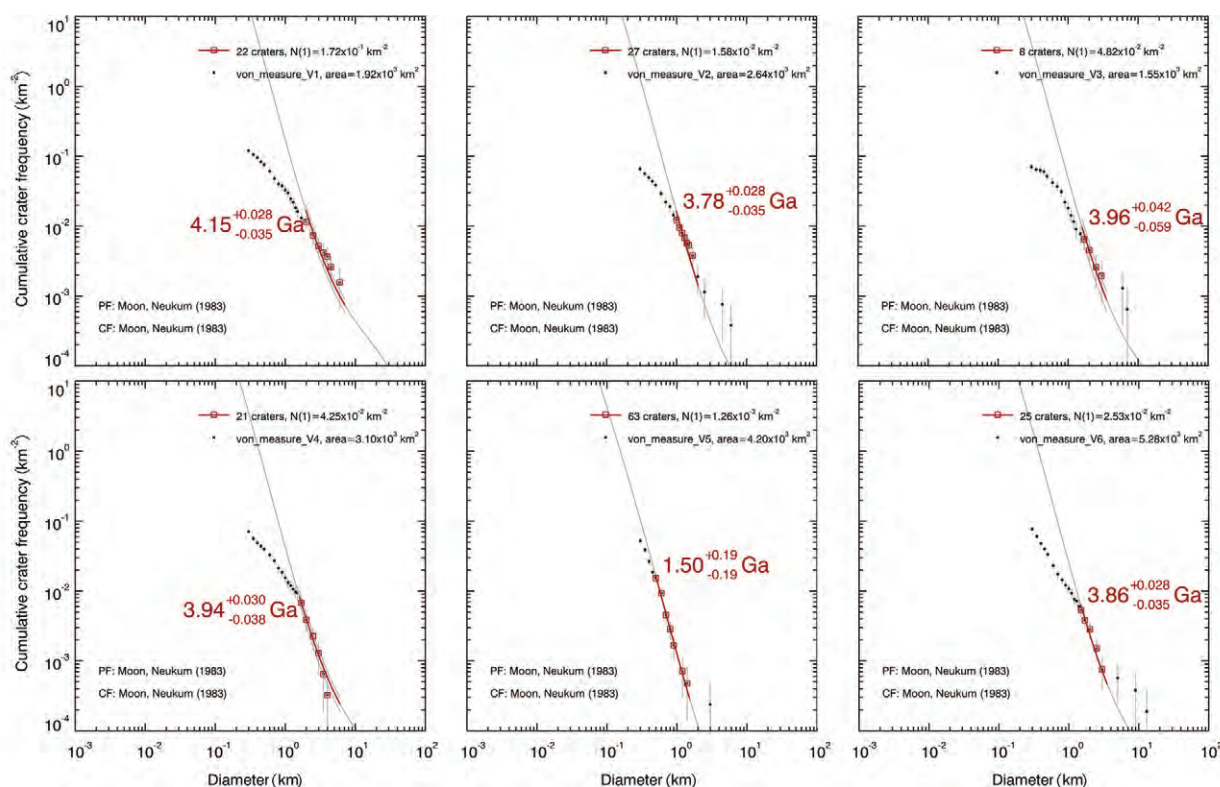


图 5 冯·卡门撞击坑单元 1-单元 6 年龄图

单元 V1 的年龄为 4.15Ga, 年龄最大, 是本区域最古老的单元; 单元 V5 的年龄为 1.50Ga, 年龄最小; 单元 V2、V3、V4、V6 的年龄分别为 3.78Ga、3.96Ga、3.94Ga、3.86Ga, 最大年龄差仅有 0.18Gyr

Fig. 5 The ages of the 6 units in the Von Kármán crater

Unit V1 has an age of 4.15Ga, the biggest and the oldest unit in the region; Unit V5 has an age of 1.50 Ga and is the youngest; The ages of units 2, 3, 4, and 6 are 3.78Ga, 3.96Ga, 3.94Ga, and 3.86Ga, respectively, and the maximum age difference is only 0.18Gyr

2.2 冯·卡门撞击坑区域的年龄

根据冯·卡门撞击坑及周边撞击坑的连续溅射物和不连续溅射物的分布和影响特征并结合地形粗糙度图(图 4c), 可将冯·卡门撞击坑的溅射物分成 6 个单元(图 4d)。V1: 冯·卡门撞击坑南部几乎没有受到周围大型撞击坑溅射物影响的粗糙度较低的平坦区域; V2: 西南部主要被后期小型撞击坑影响的粗糙度较高的区域; V3: Oresme 撞击坑溅射物影响的区域; V4: Leibnitz 撞击坑溅射物影响的区域; V5: 以 Finsen 撞击坑溅射物影响为主的区域; V6: 以 Alder 撞击坑溅射物影响为主的区域。

利用 CraterTools 工具提取撞击坑时, 将 WAC 影像和 TC 影像相结合, 以保证提取的撞击坑的准确性。将 6 个单元的撞击坑均进行统计并排除次级坑, 基于大小-频率分布统计定年法进行相对定年分析, 最后利用 Craterstats II 获得各个地质单元的绝对模型年龄(图 5)。

通过定年获得了单元 V1 到 V6 的年龄, 最大年龄差为 2.65Gyr。整体上, 在单元 V5 Finsen 撞击坑处出现强烈变化, 年龄非常小, 只有 1.50Ga; 而单元 V1 年龄最大 4.15Ga, 是本区域最古老的单元。其它单元年龄位于 3.78Ga 和

3.96Ga 之间, 年龄差仅有 0.18Gyr。虽然单元 V1 到 V6 都位于冯·卡门撞击坑连续溅射物区域, 但它们的年龄却不尽相同, 这可能是受到了周边撞击坑溅射物的影响, 导致年龄存在差异, 尤其是单元 V5。

单元 V1 是所有单元中受到其他撞击坑的影响最小的, 保留最完整的区域, 几乎没有被周围的大型撞击坑溅射物覆盖, 只有内部存在一个较小的后期撞击坑, 但其溅射物并没有明显改变冯·卡门撞击坑溅射物的形态, 因此选择 V1 的定年结果作为冯·卡门撞击坑的形成年龄(图 4d)。

3 讨论

3.1 对利用多源数据识别撞击坑溅射物的启示

对于大型撞击盆地和撞击坑, 撞击形成的溅射物分布广泛, 加速其周围撞击坑物质的改造, 影响其周围溅射物的识别, 使撞击坑溅射物识别相对困难(Kring and Durda, 2012)。在以往的溅射物识别过程中, 大都采用影像数据, 通过纹理来识别其溅射物分布范围(Yingst et al., 2017)。本文利用多源数据融合进行了溅射物的识别, 不仅利用影像数据的纹理特征, 也结合了光谱数据的光谱特征, 使溅射物分布更加

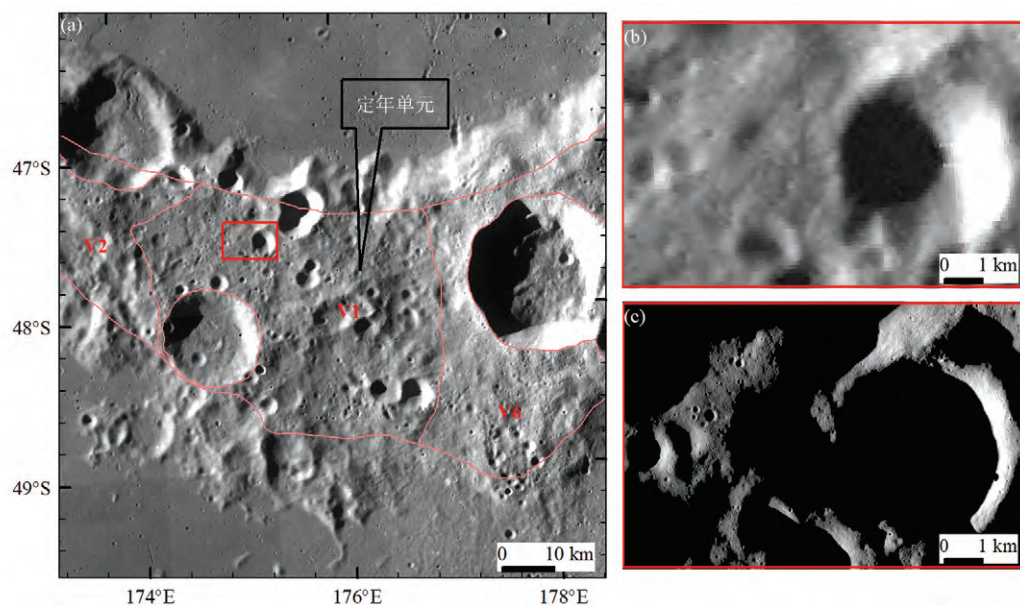


图6 WAC 和 TC 影像的比较

(a) 选择的区域的位置; (b) WAC 影像图; (c) TC 影像图

Fig. 6 The comparison between the WAC and TC images

(a) the position of the area; (b) the WAC image; (c) the TC image

清晰、明显,有利于溅射物的识别与判断。同时,将溅射物划分为连续溅射物和不连续溅射物(郭邦均等,2016),使识别的溅射物更加准确。

坡度图显示出明显的坡度对比,突出了溅射物与背景的差异性,相邻撞击坑间则可通过坡度的趋势进行初步的划分,这简化了溅射物的提取工作,再结合 WAC 影像图进行细节提取,提高了工作效率。OMAT 图像充分利用了月壤成熟度,增强了影像中元素的对比度,以彩色显示,使不同物质间差别增大,与 750nm 反射率影像融合使不连续溅射物纹理清晰,形态可见,两个数据间相互补充,表达效果明显提高。OMAT 影像分类图利用月壤成熟度值将影像进行了分类,使数据简单化,溅射物的边界结构化,有明确的分界线,识别起来更加简单可操作。

冯·卡门撞击坑虽然受后期撞击坑溅射物影响较大,但仍有部分保留,且其明显叠加在冯·卡门 M 撞击坑上,它可能挖掘出了相对较老的前酒海纪冯·卡门 M 的物质(Pasckert *et al.*, 2018),它与周边撞击坑影响都小的区域可能是 SPA 盆地物质,对于 SPA 盆地的研究具有重要的意义。根据叠覆关系和定年结果发现,撞击坑年龄越老,其溅射物保留的越少,尤其是不连续溅射物,撞击坑年龄越小,其溅射物保留的越完好,尤其是爱拉托逊纪的撞击坑,其溅射物纹理清晰易识别。

3.2 冯·卡门撞击坑的形成年龄

尽管前人已对冯·卡门撞击坑年龄分析开展了多项工作,但目前关于其形成年代尚未获得统一的认识,有酒海纪

(Stuart-Alexander, 1978; Pasckert *et al.*, 2018; Ling *et al.*, 2019) 与前酒海纪之争(Wilhelms *et al.*, 1987; Losiak *et al.*, 2009; Yingst *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018)。之所以产生这样不一致的结果,主要是受到后期周围撞击坑溅射物的影响,未能准确提取定年撞击坑。

以往都是利用 WAC 影像进行撞击坑的提取(Yingst *et al.*, 2017; Pasckert *et al.*, 2018),它覆盖的范围广,各个区域都能够显示。但 WAC 影像分辨率有限,其部分撞击坑边界显示不清晰,会影响撞击坑的精确识别(图 6b)。而 TC 影像具有一定的倾角,导致撞击坑内部及坡度较大的区域出现盲区,给撞击坑的识别带来了困难;但是正因为其存在倾角,其显示的撞击坑边界更加明显,易于识别,且其分辨率较高,提取的边界更加准确(图 6c)。因此本文结合 WAC 和 TC 影像对撞击坑进行提取,既保证了撞击坑数量的全面,又提高了其识别的精度,为精确定年奠定了基础。

获得的年龄结果中,从单元 V1 到 V6 年龄起伏较大,其累积频率与年代曲线部分重合,存在较大偏移,撞击坑直径越小,其曲线坡度越缓;而相对频率分布都较分散,没有明显的聚集(图 7)。利用年代曲线将撞击坑大小-频率分布划分为几部分,使获得的年龄结果更加可信。可以发现,在撞击坑直径为 300-500m 时(绿色),获得的绝对模型年龄都较小,其与年代曲线的重合度太低,出现了“翻转”(Kneissl *et al.*, 2016);当撞击坑直径较大时(红色,每个单元依据匹配度而选择不同的直径),获得的绝对模型年龄都较大,但是许多单元都只有几个撞击坑,虽然获得了年龄,但其可信度太低,偶然性太强;位于曲线中间的部分(黄色和蓝色),获得的绝对

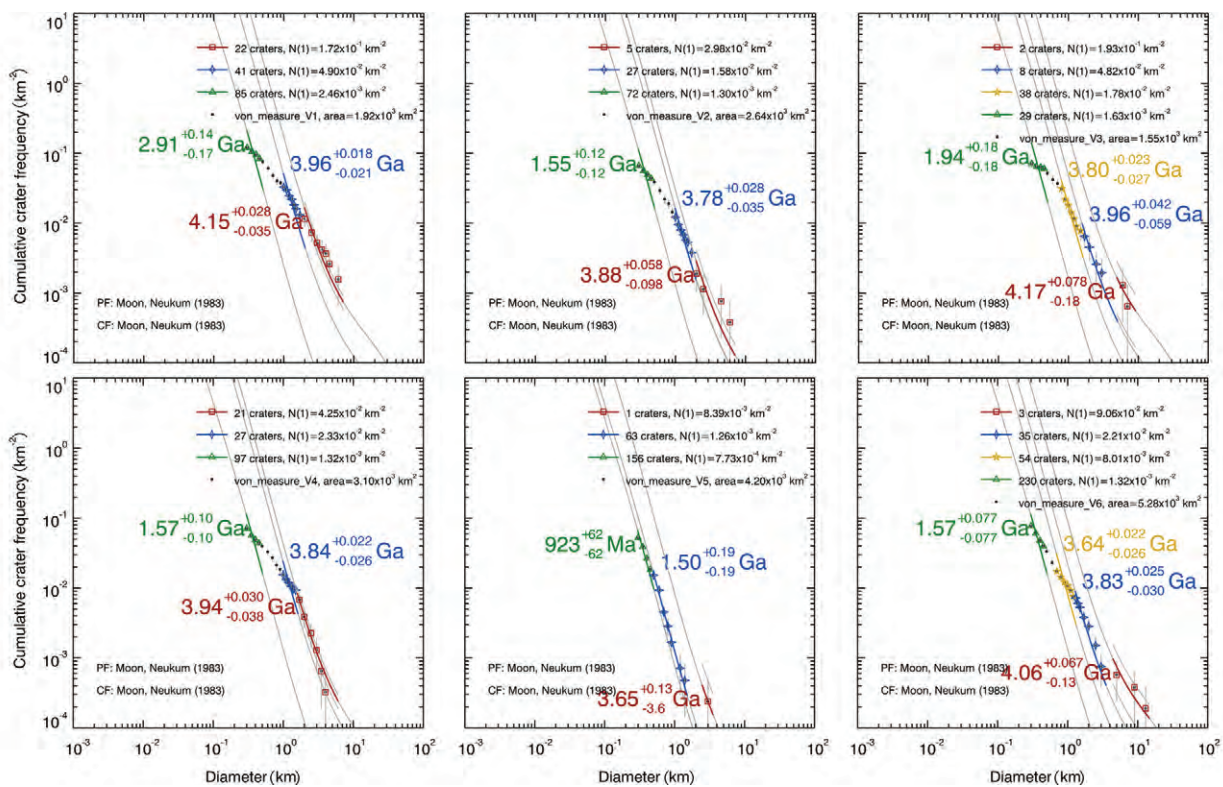


图 7 各单元 CSFDs 和模型年龄的累积图

Fig. 7 The CSFDs and derived model ages of the units in cumulative

模型年龄多数在 3.64-4.0Ga 之间,只有单元 V5 较小,且此区域的撞击坑大小-频率分布要优于前两者。

选择的 300500m 撞击坑曲线明显偏离,这是因为此研究区域的小型撞击坑受到微陨石轰击、太阳风、宇宙射线和风化作用的影响并被后期溅射物覆盖,仅有部分仍然保留。单元 V5 中比较匹配没有明显偏离,是因为这里地层较新,小型撞击坑保留的相对较多。每个单元曲线划分的几个不同区域,年龄有差别,这是由于每一次溅射物的重新覆盖都会对表面年龄产生影响,故代表了此区域经历了几次地质演化。受到后期撞击坑溅射物影响越大,年龄则越偏小,大型撞击坑溅射物对撞击坑年龄判定的影响大于小型撞击坑,因此选择 V1 作为冯·卡门撞击坑的年龄,可信度较高。

单元 V1 选择了直径大于 2km 的撞击坑(匹配度高),共 22 个,获得的绝对模型年龄为 4.15Ga,在前酒海纪范围内,即冯·卡门撞击坑的年龄为前酒海纪,在其后期可能受到来自其正北面的 Leibnitz 撞击坑和西南方向的 Cajori 等撞击坑溅射物的影响,曲线坡度变缓,获得另一绝对模型年龄 3.96Ga。

为了进一步对比,本文对整个研究区域进行定年,获得冯·卡门撞击坑的年龄曲线(图 8),其位于中间的部分(蓝)匹配度要优于大型撞击坑区域(红),倾向于其年龄为 3.89Ga,即酒海纪。其大型撞击坑区域与单元 V1 相比,其年龄较小,撞击坑数量少,匹配度低,因此可信度较低,但是它

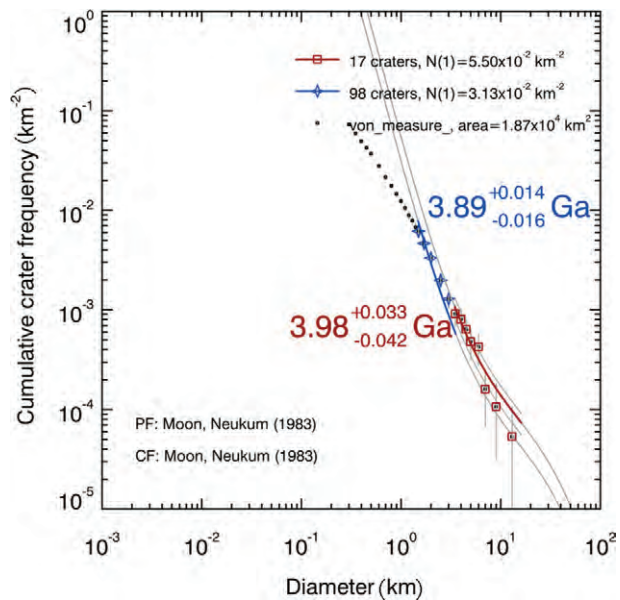


图 8 整个研究区域的年龄

Fig. 8 The ages of the whole study area

的存在证明了冯·卡门撞击坑应有更古老的年龄。

经过对比发现单元 V1 的年龄更加真实可信,且通过溅射物进行单元划分可以有效排除后期撞击坑溅射物的影响,使获得的撞击坑年龄更接近其真实年龄值,其可信度明显提

高 这将为后期进一步的工作提供坚实的基础。

4 结论

本文利用多源数据对撞击坑溅射物进行了识别和定年分析,主要获得以下结论:

(1) 利用影像数据的纹理特征,并结合光谱数据的成分差异性,可以提高撞击坑溅射物识别的准确性;

(2) 冯·卡门撞击坑的连续溅射物和不连续溅射物都受到后期撞击影响,破坏较为严重,基于对周边撞击坑溅射物的提取结果,发现冯·卡门撞击坑的连续溅射物以南部保存最为完整;

(3) 本文在精确识别撞击坑边界的基础上,选择溅射物保留相对完整的区域作为定年对象,获得了冯·卡门撞击坑的年龄为 4.15 Ga,即前酒海纪。

致谢 本文所使用的 TC 数据来源于 SELENE Data Archive; LRO 的 WAC 数据、DEM 数据和 Clementine 的 UVVIS 多光谱数据均来源于美国 PDS 行星数据节点,在此致以真诚的感谢。感谢中国科学院地质与地球物理研究所岳宗玉老师及另外一位审稿人的宝贵意见。另外,还要感谢中国科学院地球化学研究所各位老师和同学们的帮助。

References

Alvarez LW, Alvarez W, Asaro F and Michel HV. 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208(4448): 1095–1108

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

Ding XZ, Wang L, Han KY, Pang JF, Liu JZ, Guo DJ, Ding WC and Ju YJ. 2014. The lunar digital geological mapping based on ArcGIS: Taking the Arctic region as an example. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 19–30 (in Chinese with English abstract)

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: A Record of Large Impacts in Sedimentary Deposits*. Berlin: Springer, 15–75

Guo DJ, Liu JZ, Zhang L, Ji JZ, Liu JW and Wang L. 2014. The methods of lunar geochronology study and the subdivisions of lunar geologic history. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 45–61 (in Chinese with English abstract)

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 (in Chinese with English abstract)

Harris EC. 1975. The stratigraphic sequence: A question of time. *World Archaeology*, 7(1): 109–121

Harris EC. 1979. The laws of archaeological stratigraphy. *World Archaeology*, 11(1): 111–117

Hartmann WK. 1970. Lunar cratering chronology. *Icarus*, 13(2): 299–301

Hiesinger H, Van Der Bogert CH, Pasckert JH, Schmedemann N,

Robinson MS, Jolliff B and Petro N. 2012. New crater size-frequency distribution measurements of the South Pole-Aitken Basin. In: 43rd Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute

Huang J, Xiao ZY, Flahaut J, Martinot M, Head J, Xiao X, Xie MG and Xiao L. 2018. Geological characteristics of Von Kármán crater, northwestern South Pole-Aitken Basin: Chang' E-4 landing site region. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(7): 1684–1700

Kato M, Sasaki S, Takizawa Y and The Kaguya Project Team. 2010. The Kaguya mission overview. *Space Science Reviews*, 154(1–4): 3–19

Kneissl T, Van Gasselt S and Neukum G. 2011. Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments: New software tool for ArcGIS. *Planetary and Space Science*, 59(11–12): 1243–1254

Kneissl T, Michael GG and Schmedemann N. 2016. Treatment of non-sparse cratering in planetary surface dating. *Icarus*, 277: 187–195

Kring DA and Durda D. 2012. A Global Lunar Landing Site Study to Provide the Scientific Context for Exploration of the Moon. Houston: Lunar and Planetary Institute

Ling ZC, Qiao L, Liu CQ, Cao HJ, Bi XY, Lu XJ, Zhang J, Fu XH, Li B and Liu JZ. 2019. Composition, mineralogy and chronology of mare basalts and non-mare materials in Von Kármán crater: Landing site of the Chang' E-4 mission. *Planetary and Space Science*, 179: 104741

Losiak A, Wilhelms DE, Byrne CJ, Thaisen KG, Weider SZ, Kohout T, O'Sullivan K and Kring DA. 2009. A new lunar impact crater database. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute

Lucey PG, Blewett DT, Taylor GJ and Hawke BR. 2000. Imaging of lunar surface maturity. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8): 20377–20386

Michael GG and Neukum G. 2010. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Partial resurfacing events and statistical age uncertainty. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3–4): 223–229

Michael GG, Platz T, Kneissl T and Schmedemann N. 2012. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Spatial randomness and clustering. *Icarus*, 218(1): 169–177

Michael GG. 2013. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Multiple resurfacing episodes and differential isochron fitting. *Icarus*, 226(1): 885–890

Michael GG, Kneissl T and Neeseemann A. 2016. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements: Poisson timing analysis. *Icarus*, 277: 279–285

Neukum G, König B, Fechtig H and Storzer D. 1975. Cratering in the Earth-Moon system: Consequences for age determination by crater counting. In: 6th Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. New York: Pergamon Press, 2597–2620

Neukum G. 1983. Meteorite bombardment and dating of planetary surfaces. Translation of Meteoriten bombardement und Datierung planetarer Oberflächen. Dissertation on Attaining Venia Legendi (Tenure) in the Geophysics Department in the Faculty of Geological Sciences. Munich: Ludwig-Maximilians University, 1–186

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, Kordas JF, Lewis IT, Park HS, Priest RE, Horan DM, Regeon P, Lichtenberg CL, Shoemaker EM, Eliason EM, McEwen AS, Robinson MS, Spudis PD, Acton CH, Buratti BJ, Duxbury TC, Baker DN, Jakosky BM, Blamont JE, Corson MP, Resnick JH, Rollins CJ, Davies ME, Lucey PG, Malaret E, Massie MA, Pieters CM, Reisse RA, Smith DE, Sorenson TC, Breugge RWV and Zuber MT. 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
- Pasckert JH, Hiesinger H and Van Der Bogert CH. 2018. Lunar far side volcanism in and around the South Pole-Aitken Basin. *Icarus*, 299: 538-562
- 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
- Qiao L, Ling ZC, Fu XH and Li B. 2019. Geological characterization of the Chang'e-4 landing area on the lunar farside. *Icarus*, 333: 37-51
- 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
- Smith DE, Zuber MT, Neumann GA, Lemoine FG, Mazarico E, Torrence MH, McGarry JF, Rowlands DD, Head III JW, Duxbury TH, Aharonson O, Lucey PG, 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
- Stuart-Alexander DE. 1978. *Geologic Map of the Central Far Side of the Moon*. Washington: US Geological Survey, Report nr 1047
- Wilhelms DE, Meccauley JF and Trask NJ. 1987. *The geologic history of the moon*. No. 1348
- Wu WR, Wang Q, Tang YH, Yu GB, Liu JZ, Zhang W, Ning YM and Lu LL. 2017. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission. *Journal of Deep Space Exploration*, 4(2): 111-117 (in Chinese with English abstract)
- Yingst RA, Chuang FC, Berman DC and Mest SC. 2017. Geologic mapping of the Planck quadrangle of the Moon (LQ-29). In: 48th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 1680

附中文参考文献

- 丁孝忠, 王梁, 韩坤英, 庞健峰, 刘建忠, 郭弟均, 丁伟翠, 剧远景. 2014. 基于 ArcGIS 的月球数字地质填图: 以月球北极地区为例. *地学前缘*, 21(6): 19-30
- 郭弟均, 刘建忠, 张莉, 籍进柱, 刘敬稳, 王梁. 2014. 月球地质年代学研究方法及月面历史划分. *地学前缘*, 21(6): 45-61
- 郭弟均, 刘建忠, 籍进柱, 刘敬稳, 王庆龙. 2016. 月球典型撞击坑溅射物研究及对月球地质编图的意义. *岩石学报*, 32(1): 53-63
- 吴伟仁, 王琼, 唐玉华, 于国斌, 刘继忠, 张玮, 宁远明, 卢亮亮. 2017. “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计. *深空探测学报*, 4(2): 111-117