

doi: 10.13745/j.esf.2015.02.023

# 月球第谷撞击坑区域数字地质填图及地质地貌特征

王 梁<sup>1,2</sup>, 丁孝忠<sup>1,\*</sup>, 韩同林<sup>1</sup>, 韩坤英<sup>1</sup>, 庞健峰<sup>1</sup>, 许可娟<sup>1</sup>, 刘建忠<sup>3</sup>

1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037
2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083
3. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002

WANG Liang<sup>1,2</sup>, DING Xiaozhong<sup>1,\*</sup>, HAN Tonglin<sup>1</sup>, HAN Kunying<sup>1</sup>, PANG Jianfeng<sup>1</sup>, XU Kejuan<sup>1</sup>, LIU Jianzhong<sup>3</sup>

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

WANG Liang, DING Xiaozhong, HAN Tonglin, et al. The digital geological mapping and geological and geomorphic features of Tycho Crater of the Moon. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(2): 251-262

**Abstract:** The Tycho Crater is located in the nearside of southern hemisphere of the Moon, the latitude is  $S43^{\circ}23'40.78''$  and longitude is  $W11^{\circ}10'01.02''$ , which has the most beautiful and spectacular radial rays of the Moon. In this study, we proposed the division of the Copernican Period into the Early Copernican Epoch ( $C_1$ ), the Middle Copernican Epoch ( $C_2$ ) and the Late Copernican Epoch ( $C_3$ ) by the detailed explanation and comparative research of the characteristics and the statistical analysis of 12 Copernican craters by multi-source data, and compiled the geological map and the rock type map of the Tycho Crater and the adjacent area by comprehensive digital geological mapping. The Tycho Crater have formed a variety of geological and geomorphic features due to the large energy releasing when the Tycho Crater have been impacted, or when the post-volcanic magmatic activity occurred, these features may be divided into large-scale and small-scale landforms. Large-scale landforms include the landforms formed by the radial ray accumulation, the crater edge accumulation, the arcuate fault block accumulation, the center plain accumulation and the central peak accumulation. Small-scale landforms include geological and geomorphic forms formed by accumulation, erosion and magmatic action.

**Key words:** the Moon; Copernican Period; Tycho Crater; digital geological mapping; geological and geomorphic features

**摘 要:** 第谷撞击坑, 位于月球南半球的正面, 中心位置经纬度为  $S43^{\circ}23'40.78''$ ,  $W11^{\circ}10'01.02''$ , 具有醒目壮观的辐射纹地貌特征。文中应用多源数据对 12 个哥白尼纪典型月坑进行统计分析、影像特征的详细解释和对比研究, 提出将哥白尼纪划分为早哥白尼世( $C_1$ )、中哥白尼世( $C_2$ )及晚哥白尼世( $C_3$ ), 并对第谷月坑进行综合数字地质填图, 编制了第谷月坑区域地质图和岩石类型分布图。第谷月坑在撞击时由于大量能量的释放或后期火山岩浆活动形成了各种地质地貌, 可分为大型地质地貌与小型地质地貌。大型地貌包括辐射纹堆积、坑缘堆积、弧形断块堆积、坑底中心平原堆积与陨石残体中央峰堆积等所形成的地质地貌类型; 小型地貌包括堆积、侵蚀和岩浆作用形成的各种地质地貌类型。

**关键词:** 月球; 哥白尼纪; 第谷月坑; 数字地质填图; 地质地貌特征

中图分类号: P184 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2015)02-0251-12

收稿日期: 2014-11-19; 修回日期: 2014-12-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”项目(2009AA122201); 中国科学院地球化学研究所领域前沿项目“月球典型建造与编图标识与规范研究”(YZZZ031000-02); 国家自然科学基金项目(41373068); 国家自然科学基金重大项目(41490634)

作者简介: 王 梁(1989—), 男, 硕士研究生, 地质工程专业, 从事地质编图及 GIS 应用研究。E-mail: wangliang\_fighting@163.com

\* 通讯作者简介: 丁孝忠(1963—), 男, 研究员, 长期从事区域地质与地质编图研究。E-mail: xiaozhongding@sina.com

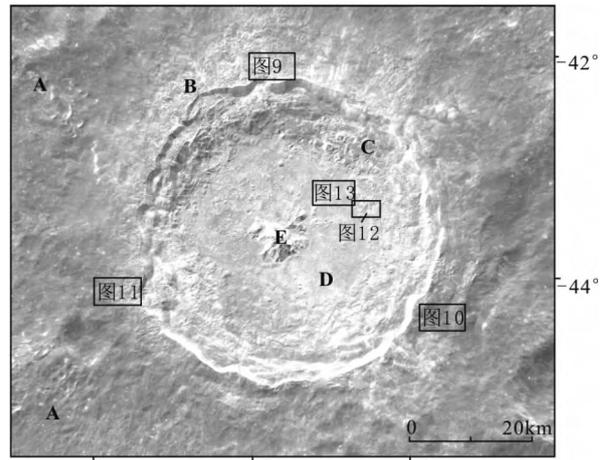
<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘, 2015, 22(2)

### 0 引言

月球第谷撞击坑,即第谷月坑,是位于月球南半球正面高地上最为突出醒目的一个哥白尼纪撞击坑,被以丹麦天文学家第谷—布拉赫的名字命名,中心点经纬度为  $S43^{\circ}23'40.78''$ ,  $W11^{\circ}10'01.02''$ ,其在月面位置如图 1(据“嫦娥二号”数据编制,分辨率为 50 m,图 2、4 同)所示。第谷月坑是一个相对较为年轻的陨石坑,据阿波罗 17 号任务中对第谷月坑辐射纹样本的分析结果,年龄为  $(109 \pm 4)$  Ma<sup>[1]</sup>,为哥白尼纪晚期,很可能是巴普提斯蒂娜族(Baptistina family)的小行星撞击造成的,撞击物成分根据模拟研究认为有 70%可能性是由小行星 298 的碎片之一撞击形成的,来自同一个家族的一个更大的碎片则可能在 65 Ma 前撞击地球形成希克苏鲁伯陨石坑,并造成恐龙灭绝事件的发生(K-T 界线的形成)<sup>[2]</sup>。

第谷月坑呈圆形或近圆形(图 2),直径约 82.965 km。图 3 是使用 LRO 探测器 LOLA 数据编制的第谷月坑 DEM 图,分辨率为 60 m,第谷月坑总体呈北高南低、西高东低,相对深度约 4 460 m(图 3)。第谷月坑是月球上具有最美丽、壮观辐射纹的月坑之一,辐射纹长短不一,至少有 12 条,位于月坑之北偏东一条辐射纹长达 1 800 km,为撞击后月表物质的溅射运行的轨迹,主要成分为松散的细粒岩石碎屑、角砾粉末、玻璃质碎块及少量陨石物质等,所波及范围约 560 000 km<sup>2</sup>,在美国地质调查局(USGS)新一轮 1:250 万月球地质图编制中主要涉及 LQ-19、LQ-20、LQ-26 和 LQ-27 等 4 个图幅(图 1),因此,第

谷月坑地质填图对月球观测与研究十分重要。



A—辐射纹堆积;B—坑缘堆积;C—弧形断块堆积;D—坑底中心平原堆积;E—陨石残体中央峰堆积。使用兰伯特正形圆锥投影,图 2~7 同;图中黑框为图 9~13 位置。

图 2 第谷月坑区域地貌图

Fig. 2 Geomorphic map of the region of Tycho crater

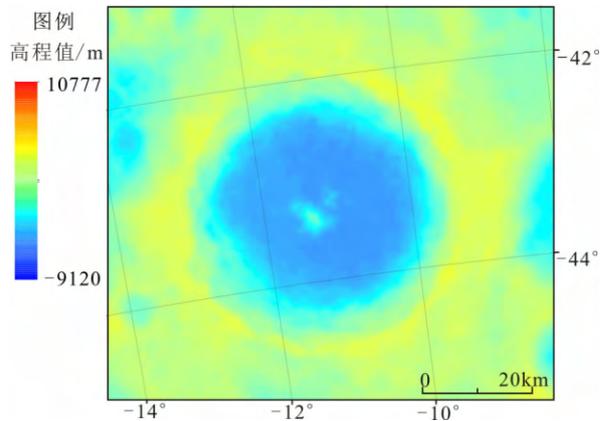


图 3 第谷月坑区域地形图

Fig. 3 Topographic map of the region of Tycho crater

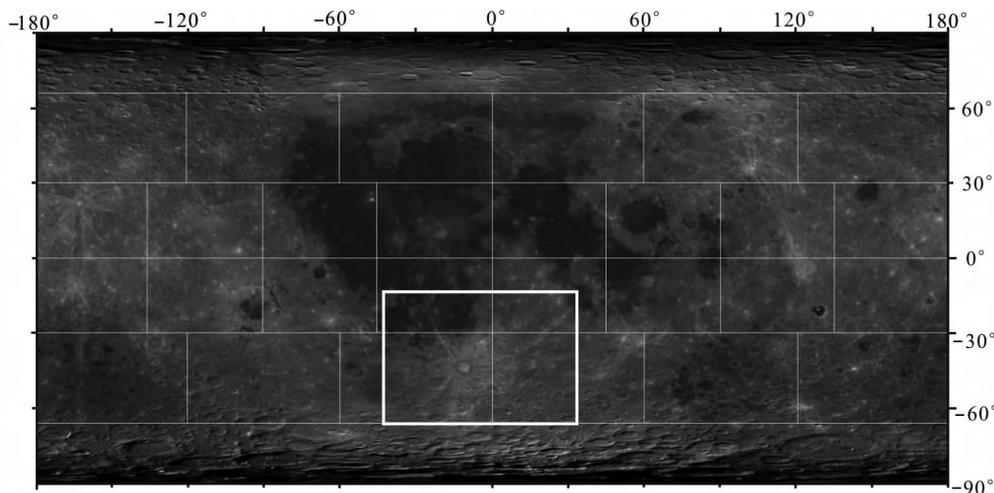


图 1 第谷月坑位置示意图

Fig. 1 Diagram of Tycho crater

目前对第谷月坑的研究较少, 仅见有 Pohn H A 编制的 1:100 万地质图“Geologic map of the Tycho quadrangle of the Moon”<sup>[3]</sup>、“Google Earth”的影像资料、距月坑边缘之北约 20 km 的“勘探者 7”取得的资料和 Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)拍摄的部分照片等。Pohn H A 根据堆积物的形态特征、位置及分布状况将第谷月坑及周边的溅落物, 由中心向外, 依次划分出坑峰物质(Ccp)、坑底物质(Ccfs、Ccfh)、坑壁物质(Ccw)、坡积物质(Cs)、块状边缘物质(Ccrb)、丘状边缘物质(Ccrh)、辐射状边缘物质(Ccrr)、卫星坑及次级撞击坑(Csc)等 8 部分。

Grier J A 等依据阿波罗 11 号采集月壤中的一些微小斜长石碎片的化学成分, 认为与“勘探者 7 号”勘探员 Wood 在第谷月坑采集到的碎片特点相似, 是月球高地由斜长石组成的最早的化学成分数据, 由此推断这些碎片是由第谷月坑溅射物形成的, 进而提出“月球岩浆洋”假说, 认为月表曾完全熔融至大约 200 km 的深度, 从而形成“月球岩浆洋”<sup>[4-5]</sup>, 并认为第谷月坑的研究, 不仅对月球科学, 而且对地球形成的认识都将作出贡献。

Shoemaker 等<sup>[6]</sup>认为, 第谷月坑分布的物质成因, 可能有 3 种: (1)是由于陨击作用引起火山喷发形成的; (2)是较冷的碎屑熔岩流, 因含液体水或气体而流动形成的; (3)是由于陨击作用形成热碎屑熔岩流产生的。本文依据这 3 种解释对第谷撞击坑的大型地貌和小型地貌的成因进行了探讨。

## 1 第谷月坑时代的厘定及特征

### 1.1 哥白尼纪月坑时代的初步划分

第谷月坑形成的年龄为 $(109 \pm 4)$  Ma<sup>[1]</sup>, 属新月宙哥白尼纪。哥白尼纪年龄上界为 800 Ma<sup>[5]</sup>, 然而对哥白尼纪的进一步划分却无人尝试。本文通过 1:250 万虹湾幅地质编图工作, 在收集分析有关哥白尼纪月坑形成时代的有关资料的基础上, 使用“嫦娥二号”影像和“Google Earth”的月球影像, 以及美国 1:100 万月球地质图资料等, 结合对朗格林诺斯(Langrenus)、欧多克苏斯(Eudoxus)和第谷(Tycho)等 12 个有代表性哥白尼纪月坑的卫星影像特征的详细解释和对比研究, 依据月坑、辐射纹

的保存或退化程度, 月坑中小型月坑分布的密度和大小, 以及月坑与周围地质地貌之间的相互叠置和切割关系及“球粒化”发育程度等, 通过统计小型月坑数计算月坑年龄, 统计结果得到第谷月坑年龄为 113 Ma, 与阿波罗 17 号取得辐射纹样品测年结果 $(109 \pm 4)$  Ma 基本吻合。而对 12 个哥白尼纪月坑统计分析结果表明: 朗格林诺斯月坑(Langrenus)、马尼利厄斯月坑(Manilius)、哈帕鲁斯月坑(Harpalus)和比格月坑(Burg)的年龄集中在 800~625 Ma, 欧多克苏斯月坑(Eudoxus)、阿里斯蒂卢斯月坑(Aristillus)、斯蒂文月坑(Stevinus)和哥白尼月坑(Copernicus)集中在 555~190 Ma, 第谷月坑(Tycho)、普罗克勒斯月坑(Proclus)和两个未知小月坑 A(N21°08'27.61", E14°43'42.74")、B(N21°15'11.16", E13°50'00.62")年龄为 113~0 Ma (其中 A、B 月坑中小月坑分布极少, 计算年龄可视为 0), 据此初步提出将哥白尼纪进一步划分为 3 个世, 即早哥白尼世(C<sub>1</sub>)、中哥白尼世(C<sub>2</sub>)和晚哥白尼世(C<sub>3</sub>)。现将哥白尼纪各世月坑的主要特征列表对比(表 1)。

月球地质图中地质单元的划分和月表地质体年代的确定非常重要<sup>[7]</sup>, 能够更好帮助读图人员了解区域与整体地质演化, 结合月球地质历史上的撞击事件及前人对月球地层年代的划分研究和样品测试分析结果, 将月球地质历史和演化阶段自新到老划分为哥白尼纪(C)(包括早哥白尼世(C<sub>1</sub>)、中哥白尼世(C<sub>2</sub>)和晚哥白尼世(C<sub>3</sub>))、爱拉托逊纪(E)(包括早爱拉托逊世(E<sub>1</sub>)、晚爱拉托逊世(E<sub>2</sub>))、雨海纪(包括早雨海世(I<sub>1</sub>)和晚雨海世(I<sub>2</sub>))、酒海纪(N)、艾肯纪(A)及前艾肯纪(pA), 具体年代划分如表 2。

### 1.2 哥白尼纪月坑的特征

(1)早哥白尼世月坑, 包括有朗格林诺斯月坑(Langrenus)、马尼利厄斯月坑(Manilius)、哈帕鲁斯月坑(Harpalus)和比格月坑(Burg)等, 是哥白尼纪形成最早的月坑。月坑受到风化侵蚀作用较强, 环形边界断裂带及弧形断块堆积带显示较模糊。在环形边界断裂内侧、弧形断块堆积带中及辐射纹的局部地段, 见有一定数量玄武岩覆盖和切割。“球粒化”普遍发育较多, 除了中心堆积区外, 在弧形断块堆积带也常发育较多。月坑及辐射纹色调多较暗, 呈灰色—深灰色为主。

表 1 哥白尼纪各世月坑的主要特征对比表

Table 1 The main characteristic comparison of each Period of Copernican crater

特征项	早哥白尼世月坑(C <sub>1</sub> )	中哥白尼世月坑(C <sub>2</sub> )	晚哥白尼世月坑(C <sub>3</sub> )
风化程度	较强烈	微弱	极弱
“球粒化”程度	较强	中等	弱
月坑及辐射纹色调	较深	较浅	浅
辐射纹与玄武岩切割关系	局部可见较明显	局部可见较弱	未见
月坑内玄武岩覆盖程度	局部可见较多	局部可见较少	未见
10 000 km <sup>2</sup> 范围内平均小月坑个数	376.25	193.25	24.25
据小月坑数计算的形成年龄/Ma	800~625	625~190	190~0
代表月坑	Langrenus, Manilius, Harpalus 和 Burg	Eudoxus, Aristillus, Stevinus 和 Copernicus	Proclus, Tycho 和 未知小月坑 A、B

表 2 月球地质年代划分新方案(据文献[5]修编)

Table 2 The new division of Lunar geological time

地质单元年代(代号)	年龄界限/Ga	主要事件	
新月宙	晚哥白尼世(C <sub>3</sub> )	0~0.19	风化程度较强烈,“球粒化”程度较强,坑内新小月坑数量较多,辐射纹色调较深
	中哥白尼世(C <sub>2</sub> )	0.19~0.625	风化程度微弱,“球粒化”程度中等,坑内新小月坑数量较少,辐射纹色调较浅
	早哥白尼世(C <sub>1</sub> )	0.625~0.8	风化程度极弱,“球粒化”程度弱,坑内新小月坑数量极少,辐射纹色调浅
爱拉托逊纪(E)	晚爱拉托逊世(E <sub>2</sub> )	0.8~2.8	形成无辐射纹的撞击坑
	早爱拉托逊世(E <sub>1</sub> )	2.8~3.16	高钛月海玄武岩喷发
古月宙	晚雨海世(I <sub>2</sub> )	3.16~3.8	大规模月海玄武岩泛滥(中低钛月海玄武岩)
	早雨海世(I <sub>1</sub> )	3.8~3.85	(1)雨海事件:雨海盆地 (2)东海事件:东海盆地
	酒海纪(N)	3.85~3.92	形成酒海盆地等 10~12 个大型撞击盆地
	艾肯纪(A)	3.92~4.2	形成包括南极艾肯(SPA)盆地在内的可识别的 30 个撞击盆地
冥月宙	前艾肯纪(pA)	4.2~4.56	斜长岩月壳形成

(2) 中哥白尼世月坑,包括欧多克苏斯月坑(Eudoxus)、阿里斯蒂卢斯月坑(Aristillus)、斯蒂文月坑(Stevinus)和哥白尼月坑(Copernicus)等。月坑普遍保存较完好,受到风化侵蚀作用较弱,环形边界断裂及弧形断块堆积带显示较清晰。在环形边界断裂内侧未见玄武岩覆盖。但在辐射纹的局部地段,可见少量玄武岩切割。“球粒化”多发育于中心堆积区,在弧形断块堆积带仅靠近中心堆积区有较多分布。月坑及辐射纹色调多较浅,呈灰色—浅灰色为主。

(3) 晚哥白尼世月坑,包括有第谷月坑(Tycho)、普罗克勒斯月坑(Proclus)和两个未知小月坑 A、B 等。月坑多保存较完好,有明显辐射纹,受到风化侵蚀作用极弱,环形边界断裂及弧形断

块堆积带显示清晰和明显。在环形边界断裂内侧和辐射纹未见玄武岩覆盖或切割,反映晚哥白尼世时期月球表面玄武岩火山活动逐渐减弱。“球粒化”不发育或仅发育于中心堆积区内。月坑及辐射纹色调多较浅,呈浅灰—灰白色为主。

## 2 第谷月坑综合数字地质填图

### 2.1 填图使用数据与年代划分

在填图过程中使用到的主要数据资料有 CE-1 CCD 影像数据、IIM 数据,CE-2 CCD 影像数据,美国 Clementine 探测获得的月壤成熟度数据(OMAT),LRO 探测器 LOLA 激光高度计数据和美国 1:100 万月球地质图(第谷幅等)等。

确定撞击坑的年龄对于厘定研究区域的地质时代、构造演化、岩浆活动具有重要意义<sup>[8]</sup>。第谷月坑年龄约为 $(109 \pm 4)$  Ma<sup>[1]</sup>,为哥白尼纪晚期,即晚哥白尼世,地质年代划分如表 2。第谷月坑综合地质填图主要内容包括撞击坑区域物质划分与地质填图及岩石类型分布。

## 2.2 撞击坑物质划分与地质填图

通过对第谷月坑影像资料的详细解读与深入分析,将月坑及周边物质由里向外划分为:陨石残体中央峰堆积区(*Cccp*)、中心堆积平原区(*Ccf*)、弧形断块堆积带(*Ccw*)、环形边界断裂带(*Ccs*)、坑缘堆积带(*Ccrh*)、辐射堆积及回落坠落坑带(*Ccrr*)等;构造要素包括环形撞击坑、垮塌构造和坑底断裂等。

(1)陨石残体中央峰堆积区(*Cccp*),相当于美国 1:100 万月球地质图中的“*Ccp*”,是撞击坑底中央的隆起物质,推测为陨石撞击残留形成,与中心堆积平原界限清晰,可根据遥感影像和 DEM 数据进行判别。

(2)中心堆积平原区(*Ccf*),相当于美国 1:100 万月球地质图中的“*Ccfs*、*Ccfh*”,主要是在月坑形成时由溅射岩块碎屑物和周边滑落物堆积产生的,整体比较平坦,局部有较小隆起。

(3)弧形断块堆积带(*Ccw*),相当于美国 1:100 万月球地质图中的“*Ccw*”,主要由撞击过程所产生的一系列向着月坑中心方向呈阶梯状分布的弧形断

块基岩组成,是环形山最高峰到坑底之间的过渡地带,多为阶地和陡坡等,较为陡峭。

(4)环形边界断裂带(*Ccs*),相当于美国 1:100 万月球地质图中的“*Cs*”,主要是由于撞击、断裂和大量物质坡移形成的基岩或块状岩石,比辐射纹更为年轻。分布于坑壁斜坡上,比辐射纹更明亮,反照率为 0.150~0.220。

(5)坑缘堆积带(*Ccrh*),相当于美国 1:100 万月球地质图中的“*Ccrb*、*Ccrh*”,是陨石撞击过程中挖掘出的物质以逆层序堆积形成,由里向外又可分为堤状堆积和细角砾堆积。

(6)辐射堆积及回落坠落坑带(*Ccrr*),相当于美国 1:100 万月球地质图中的“*Ccrr*、*Csc*”,是陨石撞击月球表面喷溅的辐射状物质,分布于月坑堆积岩最外侧,为哥白尼纪月坑所特有<sup>[9]</sup>,与周围其他物质存在较为明显反照率差异。辐射纹在 CCD 影像(图 4)上呈亮色、放射状,反射率高,在月壤成熟度分布图(图 5,使用美国 Clementine 数据制作,分辨率为 1 km)上可清晰的识别<sup>[10]</sup>。

月球表面构造特征分析对于理解和重建月球地质演化具有重要意义<sup>[11-13]</sup>。第谷月坑地区构造要素主要有环形撞击坑、垮塌构造和坑底断裂等。撞击是太阳系内固体行星上主要的地形塑造作用<sup>[14-15]</sup>,因此环形撞击坑是月球表面最常见的构造要素<sup>[16]</sup>。垮塌构造位于月坑内壁部位,由重力垮塌作用形成,

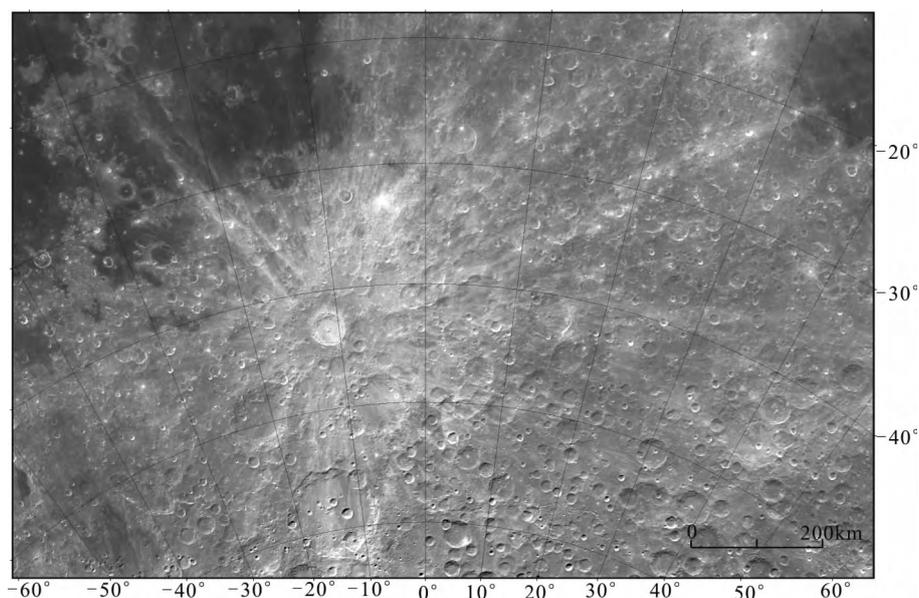


图 4 第谷月坑辐射纹特征

Fig. 4 The characteristics of radial ray of Tycho Crater

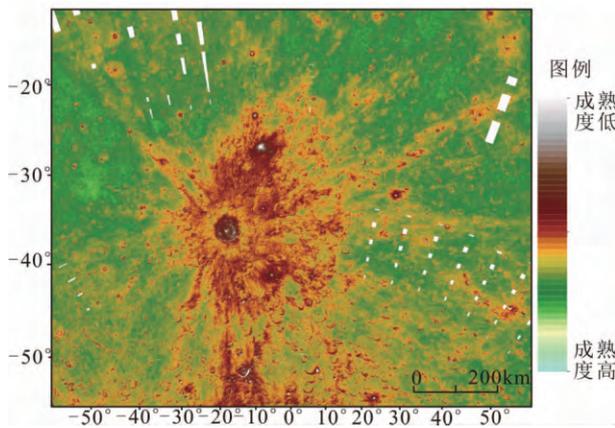


图5 第谷月坑月壤成熟度分布图

Fig.5 The distribution of regolith maturity of Tycho Crater

呈阶梯状,具有明显陡立的滑坡面和块状的滑坡体<sup>[17]</sup>。断裂位于撞击坑底部,推测其是陨石撞击后底部物质反弹隆升或撞击产生熔融物质经过膨胀作用或撞击引发坑底月面以下岩浆活动冷结晶形成的,呈负地形,形状不规则,错综相交。

根据上述综合分析,对第谷月坑区域进行地质填图,编制了第谷月坑区域地质图(图6)。

### 2.3 岩石类型分布图

月球表面的地形根据其平滑程度和辐射亮度的不同可以分为高地和月海,相应的主要岩石类型为高地岩石和月海玄武岩<sup>[18]</sup>。第谷区域的岩石类型受溅射物堆积影响,以高地岩石建造为主,月海玄武岩较少,主要分布在第谷西北部,西南部有少量发育。

(1)高地岩石:是月球表面高出月海的地区,为月球上年龄最老的物质,可分为 KREEP 岩、富镁结晶岩套和亚铁斜长岩<sup>[19-20]</sup>。①KREEP 岩是富含 Th、K 和 P 等元素的特殊岩石,在早期月亮演化过程中起到重要作用,是月球岩浆洋分异最终残余物质结晶形成的。主要采用 Lunar Prospector 伽马谱仪数据(空间分辨率为 0.5°,可以为 KREEP 岩的划分提供较为清晰的边界)U、Th、K 等元素的分布情况,以 Th 质量分数  $> 7 \times 10^{-6}$  为标准划分出 KREEP 岩区域,研究区北部边缘有少量发育<sup>[19]</sup>。②富镁结晶岩套是根据岩石中 Mg 元素含量划分,在 75~85 左右,月壤中 Mg 指数应该比岩石中的 Mg 指数略低,在填图中一般使用 Mg 指数大于 70 为标准<sup>[20]</sup>,对富镁结晶岩套进行划分。③亚铁斜长岩以岩石中 FeO 质量分数为标准进行划分。

据我国“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据反演得到的 FeO 数据<sup>[21]</sup>,相对美国 Clementine 数据偏高,本文以 FeO 质量分数 11% 为基准,将小于 11% 区域划分为高地地区,其岩石类型定义为亚铁斜长岩。研究区以亚铁斜长岩为主,富镁结晶岩套零星发育。

(2)月海玄武岩:主要依据岩石中 TiO<sub>2</sub> 的质量分数进行划分,在前人研究的基础上,根据嫦娥工程探测数据特征及我国虹湾幅地质图编制的经验,将月海玄武岩划分为 5 类<sup>[19-20,22-29]</sup>:极低钛玄武岩( $< 4\%$ )、低钛玄武岩(4%~6%)、中钛玄武岩(6%~9%)、高钛玄武岩(9%~11%)和极高钛玄武岩( $> 11\%$ )。早爱拉托逊世有高钛月海玄武岩喷发,晚雨海世有大规模中低钛月海玄武岩泛滥。第谷月坑区域西部以低钛玄武岩为主,局部发育有少量中、高钛玄武岩。使用“嫦娥一号”IIM 数据反演得到第谷月坑区域岩石类型分布如图 7 所示。

## 3 第谷月坑地质地貌特征及成因

月坑的地质地貌类型,是指撞击过程中的动力侵蚀即机械刻蚀和冲刷作用<sup>[30]</sup>或陨击过程中能量的大量释放产生的熔融物质的堆积、侵蚀作用或火山岩浆活动所形成的多种地质地貌。第谷月坑地质地貌类型可分为大型地质地貌与小型地质地貌。

### 3.1 第谷月坑大型地质地貌特征及成因

第谷月坑大型地质地貌包括辐射纹堆积、坑缘堆积、弧形断块堆积、坑底中心平原堆积与陨石残体中央峰堆积等。

#### 3.1.1 辐射纹堆积的特征与成因

第谷月坑辐射纹堆积是月表最引人注目的特征之一,在可见光波段的反射率比周围其他物质高得多。辐射纹堆积以第谷月坑为中心呈射线状向四周辐射,由大量细小月坑溅射物、次生坑、坑群及其溅出物等组成,长度可达数千 km,位于坑北东方向一条辐射纹长达 1 800 km,而其他方向辐射纹长度较短,可能由于陨石撞击时角度倾斜造成。第谷月坑辐射纹大约覆盖 560 000 km<sup>2</sup>,包括大量稠密的次级撞击坑,月坑形成时至少产生了约 100 万个直径不小于 63 m 的次生坑<sup>[31]</sup>。研究发现月球高地地区撞击坑辐射纹相对月海地区辐射纹发育更好,推测与高地地区基底硬度较高,反射作用大有关。辐射纹在边缘地带不一定是连续的,常穿过多种月球地貌,呈跳跃状<sup>[32]</sup>(图 6)。

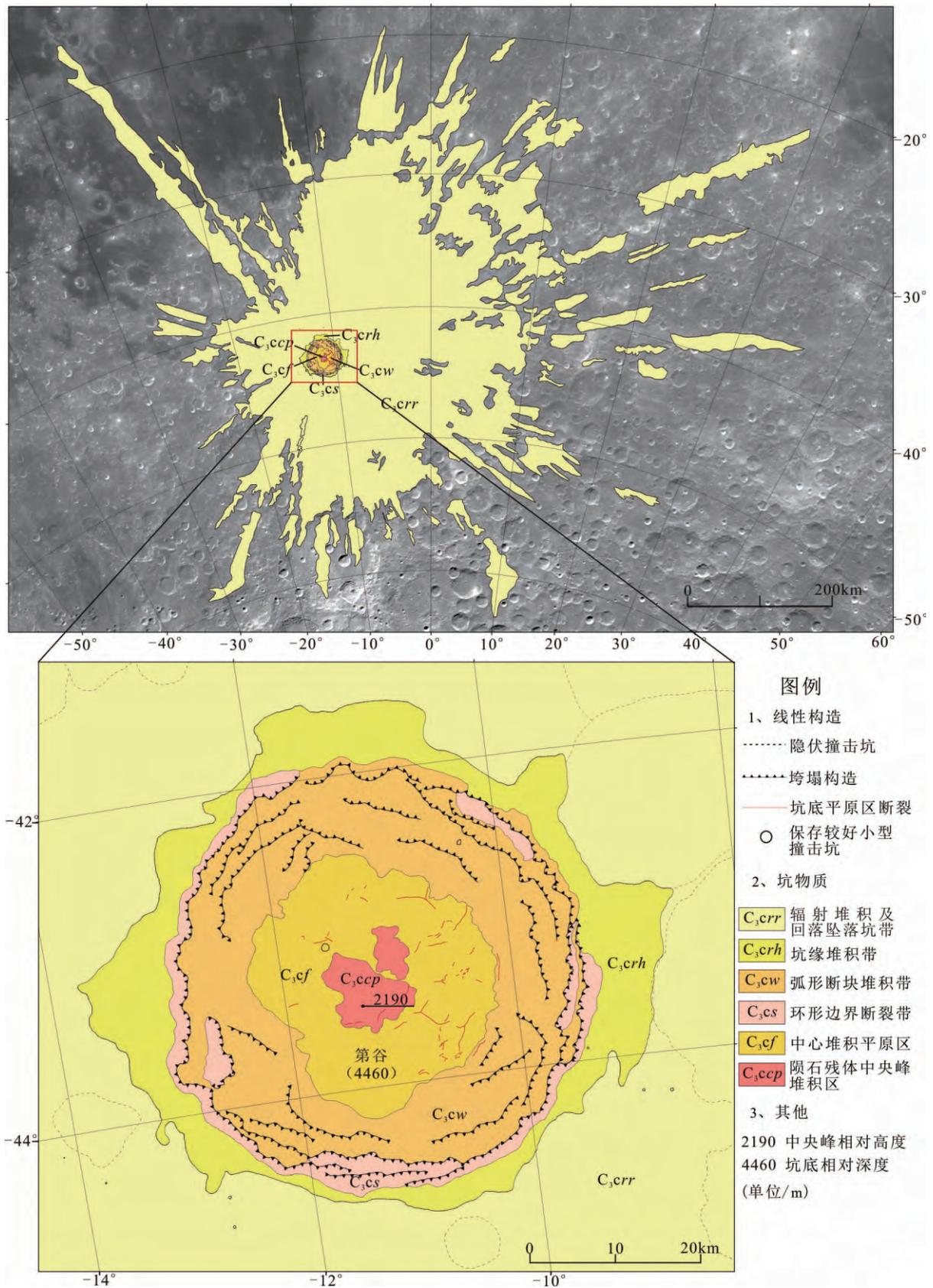


图 6 第谷月坑区域物质分布特征及地质填图

Fig. 6 The distribution of material and the geologic mapping of the region of Tycho Crater

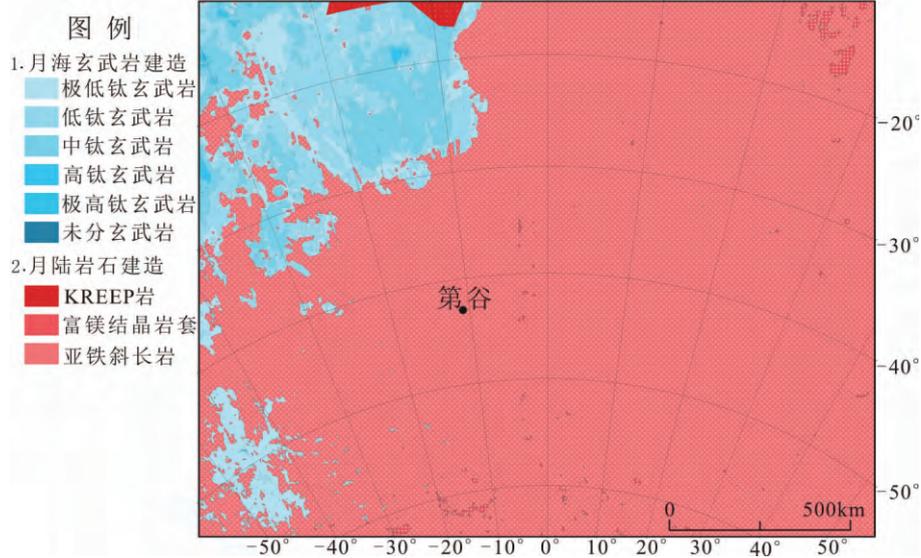


图7 第谷月坑区域岩石类型分布图

Fig. 7 The distribution of rock types of Tycho crater region

辐射纹的成因与性质一直是研究与争议的对象,20世纪50年代前主要有以下几种理论<sup>[33-34]</sup>:

(1)盐碱风化说,认为是含有盐碱的水溶液向上迁移,出露在月表水分蒸发,盐碱沉积下来,即辐射纹;(2)熔岩充填说,月壳在撞击坑周围被粉碎,熔岩充填裂隙形成月坑的辐射纹;(3)火山喷发说,火山喷发带出的火山灰或从放射状裂隙中喷出的灰尘形成辐射纹。20世纪50年代后美苏相继发射了月球探测器后,才意识到月球上月坑四周的辐射纹是撞击过程溅射出物质形成的,辐射纹上细长而低洼的地形是次级撞击坑,由主撞击坑撞击溅射出来的单个大型岩块或者碎片群再次撞击形成<sup>[34]</sup>。

随着1994年美国Clementine月球探测卫星的发射,获得的月壤成熟度分布图为进一步研究辐射纹的成因与性质提供了有力的数据,通过月壤成熟度可以清晰的识别辐射纹,因为成分上与周围环境的差异。其中不成熟物质即新鲜的物质碎片是由于以下其中一个或几个过程形成<sup>[34]</sup>:(1)次级撞击坑中内部非成熟物质的存在;(2)非成熟初始喷射物质置换;(3)从次级撞击坑来的非成熟物质的沉积;(4)次级撞击坑群中的残片。月壤成熟度是反应月壤与其暴露时间相一致的特征的量化指标<sup>[35]</sup>,仅使用反照率可能导致撞击坑相对年代判别错误,而利用溅射物及辐射纹中不成熟(不仅仅是反照率高)的月壤可以更准确识别月球表面最年轻的月坑<sup>[4,36]</sup>。因而月球表面的辐射纹显得较亮,成分和

成熟状态均起到重要的作用(图5)。

### 3.1.2 坑缘堆积与弧形断块堆积的特征与成因

陨石撞击月球表面后,撞击位置四周发生抬升,溅射物在坑四周产生堆积,形成的一种凸起边缘包围着撞击坑,即坑唇<sup>[37]</sup>。坑唇外侧斜坡较缓,主要是撞击坑溅射出的大块岩石堆积形成,或二次甚至多次撞击形成,随着远离坑唇其厚度减薄,称之为坑缘堆积。而坑唇内侧斜坡较陡,主要是由于撞击形成的坑内阶地和覆盖在阶地上的崩塌物、撞击碎块以及撞击熔融物质等构成的混合物,也有可能由于重力的作用形成垮塌构造,称之为弧形断块堆积(图2)。在第谷撞击坑东南缘存在大量的凹陷地段,内部被平坦的物质充填,被认为是火山活动形成<sup>[38]</sup>。

坑缘堆积又可分为堤状堆积和细角砾堆积。堤状堆积主要是撞击中溅射出来的巨大岩石块,由于块体巨大,堆积在撞击坑外侧,糙度较高,第谷月坑的堤状堆积与边界断裂之间,有宽窄不同的磨蚀面与基岩侵蚀面出现;堤状堆积分布高度大,后期的岩浆的熔蚀或侵蚀作用最强烈,是月坑各部分组成中保存最完整、最多的<sup>[9,39]</sup>。细角砾堆积分布于堤状堆积与辐射纹之间,是两者的过渡带;细角砾堆积较堤状堆积岩块明显变细,厚度自坑中心向外减薄明显,同时还可见到一些短小沟谷呈辐射状分布。

### 3.1.3 坑底中心平原堆积的特征与成因

第谷月坑的坑底中心平原堆积,由沿坑壁及断块堆积滑塌堆积于坑底形成的。从LO拍摄的照片

上来看,第谷撞击坑坑底凹凸不平,也许曾发生过大面积强烈的岩浆活动,坑底东部较西部更平坦(图2),坑底还存在大量类似沟槽和裂隙的地质单元,这些沟槽宽约100 m,长度500~3 000 m不等,沿走向延伸较直<sup>[38]</sup>。坑底裂隙可能是由于陨石撞击巨大的力量产生的,或者是撞击过程形成熔岩或火山填充随后冷却,张力减小形成的。

### 3.1.4 陨石残体中央峰堆积的特征与成因

中央峰按其形成方式可分为陨石残留和撞击回落堆积两种:(1)陨石残留形成的中央峰保存较完整并呈块状体,十分坚硬,由一个或数个锥状体大岩块组成,锥顶尖锐,似“金字塔”状。陨石撞击过程中强大的向下冲击力,使陨石中央峰顶部形成似冰川地貌的“角峰”和“刃脊”特征<sup>[9,39]</sup>; (2)回落堆积物形成的中央峰较为少见,主要是由陨击作用溅射回落到坑底的岩块碎屑物质堆积形成,多为单一个体中央峰出现,呈小山丘状而不具锥状,质地松软,色调较暗,糙度较大,峰顶多呈浑圆状<sup>[9]</sup>。两者形态和特征明显不同,比较容易鉴别。第谷月坑中央峰是典型的陨石残留型(图8a),中央峰较大而陡,其相对高度约2 190 m,相对坑深约为4 460 m,中央峰由东南到西北约宽15 km(图8a 从左到右)。中央峰斜坡上分布有许多数十米到数百米大小的碎屑,峰顶地势平坦,有一块约120 m宽的巨石(图8b),推测为撞击回落物。

### 3.2 第谷月坑小型地质地貌特征及成因探讨

第谷月坑小型地质地貌依据其成因可以分为3种类型:(1)堆积地貌类型,似沉积岩层、泥湖及泥湖堆积物、崩塌堆积等;(2)侵蚀地貌类型,崩塌沟谷、基岩侵蚀面及侵蚀洼地等;(3)岩浆穹窿地貌类型,岩浆穹窿、谷状岩浆穹窿和裂隙等。

#### 3.2.1 堆积地貌特征

(1)“似沉积岩层”:月坑周边均有分布,北侧出露最好,可能为早期形成的沉积岩层故称为“似沉积岩层”,常呈全裸露的基岩侵蚀面出现,层理明显、清晰,且延伸较远,色调较浅,呈灰和浅灰为主,反照率较高,表面因岩层性质不同显示粗糙度有别,岩石越细显示越细腻、光亮,反之越粗糙(图9)。

(2)泥湖及泥湖堆积物:月坑外北及东南侧周边的基岩侵蚀面上分布最多,分布面积最大,其次在弧形断块带上及月坑中心平原区也有少量分布。表面光滑,色调深,呈灰黑—黑色,细腻,且十分稳定。偶见含有砾石或其他碎屑物质,反照率高,有极少、极小陨击坑发育,泥湖大小差别极大,一般为数平方千

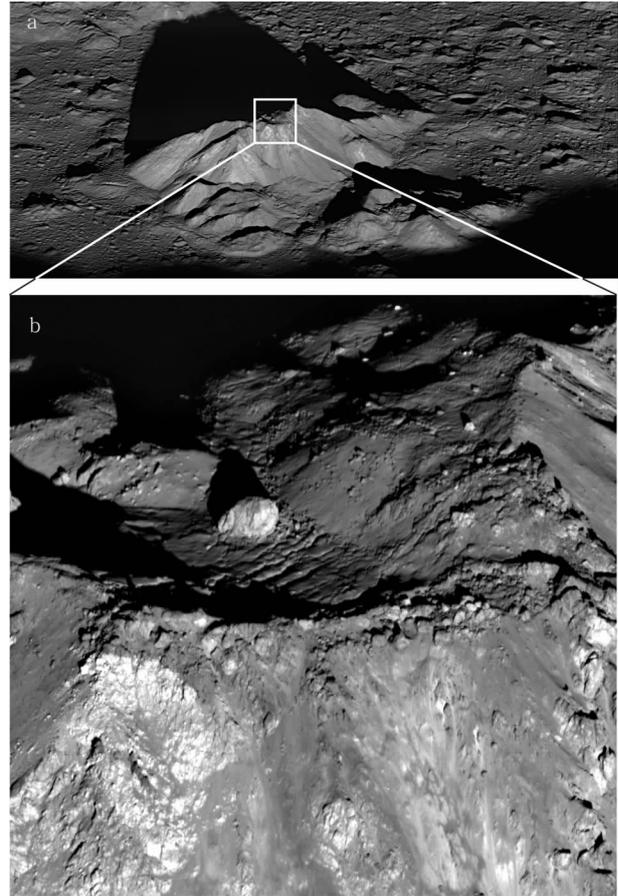
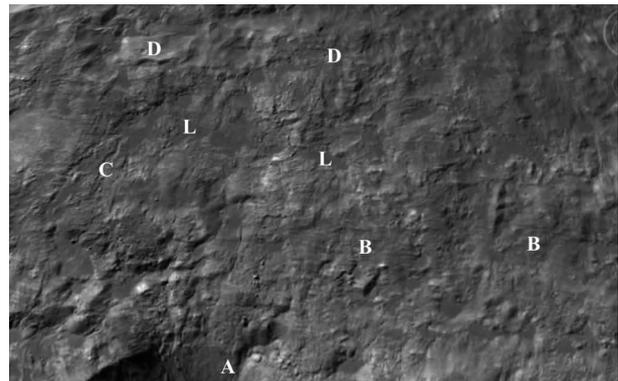


图8 第谷月坑中央峰特征

Fig. 8 The characteristics of central peak of Tycho crater

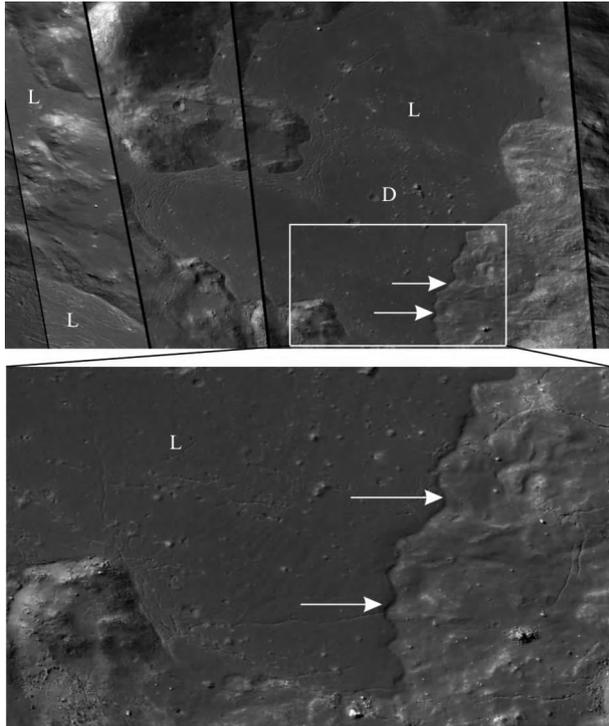


B—似沉积岩层的基岩侵蚀面;C—沟谷;D—小月坑(直径110~120 m);L—泥湖。图9~13为“Google Earth”截图,无法准确确定图像经纬度和比例尺,只作为第谷月坑地貌特征示意图。

图9 第谷月坑边界断裂(A)以北分布的似沉积岩层层理特征示意图

Fig. 9 The characteristics of sedimentary bedding in the north of boundary fault (A) of Tycho crater

米,最大约15 km<sup>2</sup>,最小不及1 km<sup>2</sup>(图10)。从其表面上陨击坑发育情况推测其形成较晚,推测为撞击熔融物质流动到低洼地区填充形成或溅射物受太阳风等作用形成。



D—小月坑;L—泥湖分布区;箭头指向示物质流动方向。  
 图 10 第谷月坑东南边界断裂外侧泥湖(L)特征  
 Fig. 10 The characteristics of mud lake(L) outside of the southeast of boundary fault of Tycho crater

(3)崩塌堆积:主要分布于月坑的阶梯状断块带上和与中心平原接壤地带,具有较强的下切作用,形成沟谷地貌,其次在月坑周边崩塌沟谷中也见有较多发育,并以粗碎屑物堆积为主,岩屑大小不一,表面粗糙,反照率低(图 11)。

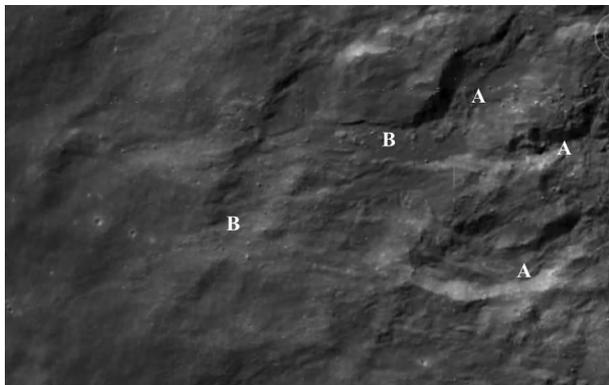


图 11 第谷月坑西部边界断裂外侧崩塌沟谷(A)及堆积物(B)分布特征

Fig. 11 The characteristics of sliding groove(A), accumulative material (B) outside of the west of boundary fault of Tycho crater

3. 2. 2 侵蚀地貌特征

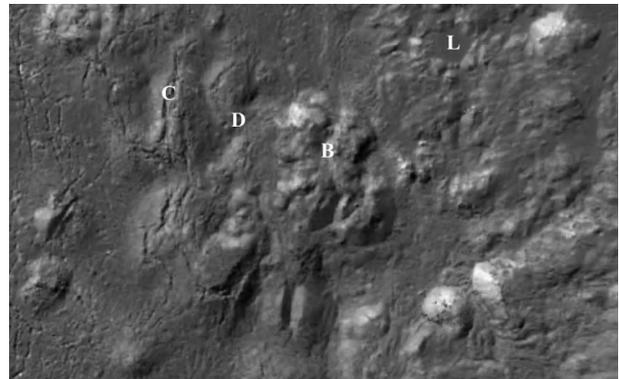
(1)崩塌沟谷:在月坑内、外有大量发育。沟谷规模大小不等,沟切割较深较宽,并向下游逐渐变

窄、变浅(图 11)。(2)基岩侵蚀面:在月坑边界断裂外侧有广泛分布,表面多不平坦,有大量不同大小的侵蚀丘陵、山地和洼地发育,泥湖广泛分布(图 9)。(3)侵蚀洼地:分布于月坑外侧地带的基岩侵蚀面上,呈大小不同和形态各异的低地、洼地,并大多为泥湖沉积物所充填形成泥湖分布区(图 10)。

3. 2. 3 岩浆穹窿地貌特征及成因探讨

第谷月坑主要岩浆穹窿地貌类型分布于月坑中心平原区及边缘地带,主要为岩浆穹窿及周边的裂隙,穹窿呈丘状或脊状。

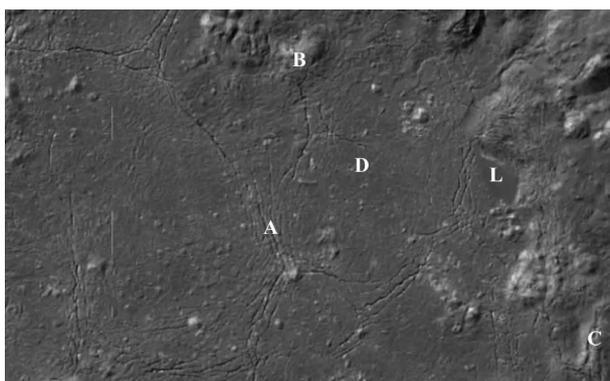
(1)丘状岩浆穹窿:形态上呈大小不同的圆形或近圆形凸起的地貌特征,直径多在 1~2 km,最大可达 4 km,小的仅数十和数百米。丘顶多有裂隙发育,裂隙宽窄相差较大,一般由数十米至百米以上。色调较浅,呈灰色或灰白色为主,表面较粗糙(图 12、13)。关于其成因,也有另外一种解释,为月球表面温差变化较大引起,称为冻胀丘。



B—丘状岩浆穹窿;C—脊状岩浆穹窿;D—小月坑;L—泥湖。  
 图 12 第谷月坑中心分布的穹窿构造(B、C)特征  
 Fig. 12 The characteristics of domal structure(B、C) in the center of Tycho crater

(2)脊状岩浆穹窿:多分布于中心平原区的边缘地带,呈长短不同的脊状凸起,长一般为 2~6 km,宽一般 0.5~1.0 km。脊顶有一条或数条裂隙分布,延伸与脊方向一致。裂隙宽一般数十至 200 余米。色调稍深,呈灰至暗灰色为主,表面粗糙(图 12、13)。也有学者将其解释为冻胀脊。

(3)岩浆穹窿裂隙:多分布于两个穹窿之间,由 2~6 条以上长短不一裂隙组成裂隙带,并常构成一定几何图形的多边形分布。裂隙长数千米,最长可达 6 km 以上,宽由数十米至百米左右。色调较深,呈深灰至暗灰色为主(图 12、13)。也有学者将其解释为冻胀裂隙。



L—泥湖;D—小月坑。

图 13 第谷月坑中心分布的网格状裂隙(A)及穹窿构造(B、C)特征

Fig. 13 The characteristics of grid-like fracture(A) and domal structure(B,C) in the center of Tycho crater

## 4 结论与讨论

(1)结合对哥白尼纪月坑的卫星影像特征的详细解释和对比研究,依据月坑、辐射纹的保存程度,月坑中小月坑分布的大小和数量,以及月坑与周围地质地貌之间的相互叠置和切割关系及“球粒化”发育程度等,将哥白尼纪由老到新初步划分为早哥白尼世( $C_1$ )、中哥白尼世( $C_2$ )和晚哥白尼世( $C_3$ )。哥白尼纪月坑时代的进一步划分,对深入研究月球的形成演化提供重要依据。

(2)第谷月坑及周边物质由里到外可划分为陨石残体中央峰堆积区、中心堆积平原区、弧形断块堆积带、环形边界断裂带、坑缘堆积带和辐射堆积及回落坠落坑带等;构造要素可划分为环形撞击坑、垮塌构造和坑底断裂等。通过对第谷月坑物质和构造要素的综合分析与填图,编制了第谷月坑区域地质图。

(3)第谷月坑岩石类型可分为高地岩石与月海岩石。其中高地岩石包括 KREEP 岩、富镁结晶岩套和亚铁斜长岩;月海岩石包括极低钛玄武岩、低钛玄武岩、中钛玄武岩、高钛玄武岩和极高钛玄武岩。通过对第谷月坑区域岩石的填图编制了第谷月坑区域岩石类型分布图。

(4)月球的地质地貌是月球内部动力和外部撞击事件共同作用的结果,月坑的地质地貌主要是撞击释放巨大能量或火山岩浆活动形成的结果。第谷撞击坑及周边地质地貌可分为大型地质地貌与小型地质地貌,大型地貌包括辐射纹堆积、坑缘堆积、弧

形断块堆积、坑底中心平原堆积与陨石残体中央峰堆积等;小型地貌包括堆积、侵蚀和岩浆作用形成的多种地质地貌类型。研究第谷月坑的地质地貌特征,有助于了解月球与月坑的发展演变规律。

(5)关于第谷月坑区域小型地貌的成因是否与水有关,这一问题涉及到月球表面是否存在水,是一个长期争论的问题,一些学者认为“月球是一个无风、无水、无生命、无声响、冷热剧变和非常干旱的寂静世界”,但一些研究者,如 Watson 等<sup>[40]</sup>、Arnold<sup>[41]</sup>、Butler 等<sup>[42]</sup>和 Vasavada 等<sup>[43]</sup>通过仪器的探测研究,都曾提出过月球极地一些陨击坑可能存在水冰的设想,由于所取得的资料并不能令人完全信服,未得到广泛接受<sup>[44-46]</sup>,因此我们需要更多的证据加以证明。

## 参考文献

- [1] Drozd R J, Hohenberg C M, Morgan C J, et al. Cosmic-ray exposure history at Taurus-Littrow[C]//Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1977, 8: 3027-3043.
- [2] Bottke W F, Vokrouhlicky D, Nesvorny D. An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor[J]. Nature, 2007, 449: 48-53.
- [3] Pohn H A. Geologic Map of the Tycho Quadrangle of the Moon[M]. Washington DC: US Geological Survey, 1972.
- [4] Grier J A, McEwen A S, Lucey P G, et al. Optical maturity of ejecta from large rayed lunar craters[J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991-2012), 2001, 106(E12): 32847-32862.
- [5] 欧阳自远, 刘建忠. 月球形成演化与月球地质图编研[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 1-6.
- [6] Shoemaker E M, Batson R M, Holt H E, et al. Television observations from Surveyor VII[R]//Surveyor VII: A Preliminary Report. NASA Special Paper, 1968, 173: 13-81.
- [7] 李艳秋, 陈圣波, 郭鹏举, 等. 月陆地区次级撞击坑特征及年龄统计方法[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 38-44.
- [8] 王翔, 陈建平, 范海明, 等. 基于 3D WebGIS 月球地质空间数据管理系统[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 31-37.
- [9] 丁孝忠, 韩坤英, 韩同林, 等. 月球虹湾幅(LQ-4)地质图的编制[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 15-27.
- [10] 李勃, 凌宗成, 张江, 等. “嫦娥三号”着陆区月壤下伏玄武岩单元划分和充填过程研究[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 155-164.
- [11] 李珂, 陈建平, Tarolli P, 等. 基于多尺度数字地形定量分析的月球线性构造自动提取研究[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 212-222.
- [12] 李婧, 陈建平, 王楠, 等. 月表线性构造自动提取新方法研

- 究: 以澄海地区月岭为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 223-228.
- [13] 何姝珺, 陈建平, 李珂, 等. 月表典型区撞击坑形态分类及分布特征[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 83-89.
- [14] 格拉斯 B P. 行星地质学导论[M]. 陈书田, 译. 北京: 地质出版社, 1986: 6.
- [15] 李珂, 陈建平, 奚晓旭, 等. 基于撞击坑自动识别的月球雨海北部地区(LQ-4)月海玄武岩定年研究[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 47-59.
- [16] 岳宗玉, 邱凯昌, 刘召芹, 等. 撞击坑数值模拟中状态方程替代原则及误差分析[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 204-211.
- [17] 陈建平, 王翔, 许延波, 等. 基于多源数据的月球大地构造纲要图编制: 以 LQ-4 地区为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 1-14.
- [18] 王楠, 陈建平, 王翔, 等. 月表线性构造定量提取与演化分析: 以静海月岭、月溪为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 229-242.
- [19] 丁孝忠, 王梁, 韩坤英, 等. 基于 ArcGIS 的月球数字地质填图: 以月球北极地区为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 19-30.
- [20] 凌宗成, 刘建忠, 张江, 等. 基于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据的月球岩石类型填图: 以月球雨海—冷海地区(LQ-4)为例[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 107-120.
- [21] 凌宗成, 张江, 刘建忠, 等. “嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据  $\text{TiO}_2$  反演初步结果[J]. 科学通报, 2011, 56(16): 1257-1263.
- [22] 陈建平, 王翔, 王楠, 等. 基于嫦娥数据澄海—静海幅地区地质图编研[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 7-18.
- [23] 凌宗成, 张江, 刘建忠, 等. “嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据  $\text{FeO}$  反演初步结果[J]. 科学通报, 2010, 55(35): 3373-3377.
- [24] 王翔, 陈建平, 许延波, 等. 基于嫦娥数据的月球虹湾区  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  含量反演[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 25-36.
- [25] 刘建忠, 凌宗成. 月面岩石类型的划分: 以虹湾地区为例[C] // 第十届全国月球科学与比较行星学、陨石学与天体化学学术研讨会论文集. 桂林: 中国空间科学学会月球科学与比较行星学专业委员会 & 中国矿物岩石地球化学学会陨石学与天体化学专业委员会, 2012: 39.
- [26] Giguere T A, Taylor G J, Hawke B, et al. The titanium contents of lunar mare basalts[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2000, 35(1): 193-200.
- [27] Taylor G J, Warren P, Ryder G, et al. Lunar rocks[J]. Lunar Sourcebook, 1991: 183-284.
- [28] Papike J J, Vaniman D T. Luna 24 ferrobasalts and the mare basalt suite: Comparative chemistry, mineralogy, and petrology[C] // Mare Crisium: The view from Luna 24. 1978, 1: 371-401.
- [29] Neal C R, Taylor L A. Petrogenesis of mare basalts: A record of lunar volcanism[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(6): 2177-2211.
- [30] 张福勤, 李春来, 邹永廖, 等. 月球的构造演化: 嫦娥月图解释的理论基础[J]. 地球化学, 2010, 39(2): 110-122.
- [31] Dundas C M, McEwen A S. Rays and secondary craters of Tycho[J]. Icarus, 2007, 186(1): 31-40.
- [32] Oberbeck V R. A mechanism for the production of lunar crater rays[J]. The Moon, 1971, 2(3): 263-278.
- [33] Hawke B, Blewett D T, Lucey P G, et al. The origin of lunar crater rays[J]. Icarus, 2004, 170(1): 1-16.
- [34] 岳宗玉. 月球构造特征与遥感影像解译初步研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- [35] Lucey P G, Blewett D T, Taylor G J, et al. Imaging of lunar surface maturity[J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991—2012), 2000, 105(E8): 20377-20386.
- [36] 郭弟均, 刘建忠, 张莉, 等. 月球地质年代学研究方法及月面历史划分[J]. 地学前缘, 2014, 21(6): 45-61.
- [37] 贺力. 基于“DEM”的月球撞击坑判别方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012.
- [38] 肖智勇, 曾佐勋, 肖龙, 等. 月球哥白尼纪撞击坑底部链状坑的成因[J]. 中国科学: 物理学·力学·天文学, 2010, 11: 003.
- [39] Ding X Z, Han K Y, Pang J F, et al. Digital geological mapping of Sinus Iridum area of the Moon based on the Chang'E-I data[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2013, 87(6): 1643-1657.
- [40] Watson K, Murray B C, Brown H. The behavior of volatiles on the lunar surface[J]. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(9): 3033-3045.
- [41] Arnold J R. Ice in the lunar polar regions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978—2012), 1979, 84(B10): 5659-5668.
- [42] Butler B J. The migration of volatiles on the surfaces of Mercury and the Moon[J]. Journal of Geophysical Research: Planets (1991—2012), 1997, 102(E8): 19283-19291.
- [43] Vasavada A R, Paige D A, Wood S E. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits[J]. Icarus, 1999, 141(2): 179-193.
- [44] Stacy N J S, Campbell D B, Ford P G. Arecibo radar mapping of the lunar poles: A search for ice deposits[J]. Science, 1997, 276: 1527-1530.
- [45] 郑永春, 王世杰, 刘春茹, 等. 月球水冰探测进展[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 573-578.
- [46] 郑永春, 张锋, 付晓辉, 等. 月球上的水: 探测历程与新的证据[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1069-1078.