

月球哥白尼纪地层特征与地质演化研究*

丁孝忠¹ 王梁^{2,3} 郭弟均⁴ 王翔⁵ 韩坤英¹ 庞健峰¹ 王丹¹ 陶亮⁶

DING XiaoZhong¹, WANG Liang^{2,3}, GUO DiJun⁴, WANG Xiang⁵, HAN KunYing¹, PANG JianFeng¹, WANG Dan¹ and TAO Liang⁶

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 西安航天天绘数据技术有限公司, 西安 710100

3. 航天恒星科技有限公司, 北京 100038

4. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002

5. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

6. 民政部卫星减灾应用中心, 北京 100124

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Xi'an Aerors Data Technology Co., Ltd, Xi'an 710100, China

3. Space Star Technology Co., Ltd, Beijing 100038, China

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

5. Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

6. Satellite Disaster Reduction Application Center, Ministry of Civil Affairs, Beijing 100124, China

2015-06-08 收稿, 2015-10-01 改回.

Ding XZ, Wang L, Guo DJ, Wang X, Han KY, Pang JF, Wang D and Tao L. 2016. Study on geological evolution and stratigraphic features of the Copernican Period of the Moon. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1):10-18

Abstract The Copernican strata is the youngest stratigraphic units of the evolutionary history of the Moon. A few impact craters formed in Copernican Period, but the Copernican strata formed by them are indeed global and very significant. Most scholars generally believed that there are no magmatism and tectonic activity basically in the Copernican Period. The radiation pattern of the craters in highlands is relatively better development than which on the mare area through the study of geological mapping of Copernican strata of the Moon, the reason may be the rocks on highlands or on the mare are different in nature, and the size, energy, material characteristics of small objects and the different angles of the impact, and so on. The strata of Copernican Period can be divided into Early Copernican Series (C_1), Middle Copernican Series (C_2) and Late Copernican Series (C_3). This paper explained the stratigraphic characteristics of each epoch of Copernican Period through the analyzing and studying on the typical impact craters, which provided the information for the features and effects of the younger impact action of the Moon. Finally, this paper discussed the stratigraphic boundary of Copernican Period-Eratosthenian Period briefly, and proposed a new program by integration discrimination based on lunar chronology multi-source data to re-determine the lower limit of Copernican Period.

Key words Stratigraphic features of the Copernican Period of the Moon; Division of the Copernican Period; Tectonic evolution; Stratigraphic boundary of Copernican Period-Eratosthenian Period

摘要 月球哥白尼纪地层是月球演化历史中最年轻的地层单元,哥白尼纪撞击坑数量较少,但其形成的哥白尼纪地层却是全球性的、非常显著的,大多学者普遍认为哥白尼纪基本没有岩浆活动与构造活动。通过对月球哥白尼纪地层进行地质填图,认为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,推测其原因可能为高地与月海岩石性质不同,或撞击的

* 本文受科技部科技基础性工作专项(2015FY210500)、国家高技术研究发展计划“863”项目(2009AA122201)、国家自然科学基金重大项目(41490634)、中国科学院地球化学研究所领域前沿项目(Y2ZZ031000-02)、国家重大科技专项“高分辨率对地观测系统”和民用航天十二预研项目联合资助。

第一作者简介: 丁孝忠,男,1963年生,博士,研究员,从事区域地质与地质编图研究,E-mail: xiaozhongding@sina.com

小天体体积、能量、物质特征以及撞击的角度、速度不同等原因导致的；哥白尼纪地层可划分为早哥白尼世地层(C₁)、中哥白尼世地层(C₂)和晚哥白尼世地层(C₃)，通过对各世典型撞击坑的分析与研究，阐述了哥白尼纪各世地层的特征，为开展月球晚期撞击作用特征与效应的研究提供了资料。对哥白尼纪-爱拉托逊纪地层界限进行了初步探讨，提出月球年代学多源数据综合判别法方案，以重新厘定哥白尼纪年代下限。

关键词 月球哥白尼纪地层特征；哥白尼纪地层划分；地质演化；哥白尼纪-爱拉托逊纪界限

中图法分类号 P691

1 引言

哥白尼纪(Copernican Period)是月球最年轻的地质年代单元,是后月海时期的最后阶段(Wilhelms *et al.*, 1987; 欧阳自远, 2005)。哥白尼纪撞击坑以其明显的辐射纹区别于其他时期的撞击坑,它们叠置在所有其他岩区之上,所以被认为是最年轻的月球地质单元。根据美国 Lunar Impact Crater Database 2011 数据库,在哥白尼纪时期形成的 68 个撞击坑中有 41 个直径大于 30km,如第谷撞击坑(Tycho Crater)、哥白尼撞击坑(Copernicus Crater)、斯蒂文撞击坑(Stevinus Crater)、欧多克斯斯撞击坑(Eudoxus Crater)和哈帕鲁斯撞击坑(Harpalus Crater)等,直径最大的为哥白尼撞击坑,约为 97km,虽然面积上它们只占月球表面积很小一部分,但其景观效应是区域性的、甚至全球性的(图 1),如哥白尼纪的第谷撞击坑及溅射物几乎覆盖月球正面南半球部分(Dundas and McEwen, 2007)。

哥白尼纪时期月球较好地保存了月球上年轻地质事件

的痕迹,如后期重轰炸之后的陨石撞击规模及后期撞击事件对早期月球地质构造的影响是非常明显的(Claeys and Morbidelli, 2011; Gomes *et al.*, 2005)。相对而言,哥白尼纪是月球地质活动最弱、规模最小的时期,但它很好地保留了地球上无法保留的地月系演化证据,可以为研究地球演化进行示范。对月球哥白尼纪地层与地质演化进行研究,能够更好地认识月壤形成与分布差异及月表形态改造,综合研究哥白尼纪地质构造演化及其在月球演化中的作用对于认识月球和类地行星的后期演化具有重要意义。

2 哥白尼纪地层划分与特征

2.1 哥白尼纪地层的识别

一般来说,改变月球表面地形地貌与地层分布的地质作用主要有三种,按照对月面改变作用大小依次为撞击作用、岩浆活动与构造活动(肖智勇, 2013)。哥白尼纪的月球仍发生规模大小不一的撞击事件,如哥白尼撞击事件、第谷撞击事件等,而大多数人普遍认为月球表面自约 31 亿年以来

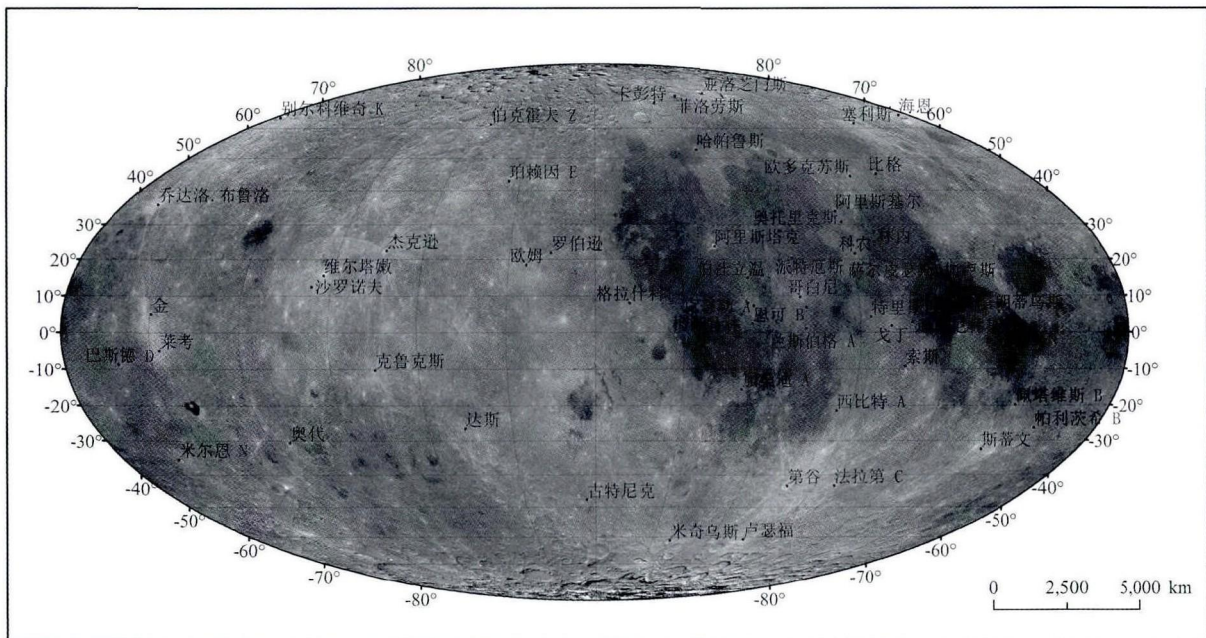


图 1 月球哥白尼纪撞击坑分布图
应用“嫦娥一号”CCD 影像数据,投影为摩尔维德投影,中央经线为 270°W

Fig. 1 The distribution of Copernican crater of the Moon
Using Chang'e-I CCD image data, projection for Moore Vader and 270°W for the central meridian

再无明显的构造活动,即哥白尼纪基本无明显的岩浆与构造活动(Head and Wilson, 1992; Nakamura *et al.*, 1973)。月球上地层的划分原理与地球地层划分原理类似,月球地层一般是以各时间-地层单元中岩石地层特征、切割关系及地质演化规律为依据进行划分,Shoemaker and Hackman(1962)以地层叠覆律、纹理关系及光学性质为依据,使用天文望远镜观测研究月球哥白尼撞击坑及邻区,提出了最早的月球地层年代划分方案,其确定新老关系的基本原则为:若甲乙两个地层单元,甲侵入、覆盖、切割乙,或甲的起伏较乙剧烈,或甲单元撞击坑密度且月壤厚度较乙小,则甲单元比乙单元相对年轻(欧阳自远, 2005; Shoemaker and Hackman, 1962)。他们首次定义了月球哥白尼纪及相应的地层哥白尼系,认为哥白尼纪撞击坑具有明亮而新鲜的辐射纹,一般将哥白尼纪的开始时间定义为具有明亮辐射纹的撞击坑的形成时间,它承接爱拉托逊纪。

哥白尼纪地层主要为年轻撞击坑形成的角砾岩与辐射纹物质,即哥白尼纪撞击事件形成的物质,是月球最年轻的地质单元,其最典型的特征是具有完整而明亮的呈发散状的辐射纹系统。辐射纹是以撞击坑为中心呈射线状向四周辐射,由大量细小撞击坑溅射物、次生坑、坑群及其溅出物等组成,其中包括撞击坑的二次或三次连续撞击作用形成的辐射状的坑链。辐射纹在撞击坑边缘地带不一定是连续分布,常穿过多种地形地貌,与撞击坑中心垂直并呈跳跃状(王梁等, 2015)。辐射纹物质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。辐射纹物质在可见光波段的反射率比周围其他物质高得多。

哥白尼纪撞击坑稀疏的分布在整个月球上,虽然总数很少,但是显著的辐射纹使其非常明显。但是也有一些哥白尼纪撞击坑的辐射纹非常暗淡,因而和爱拉托逊纪的撞击坑较难区分,区分这些撞击坑的方法之一是利用物质的光谱特征,1 μm 和2 μm 波段哥白尼纪的撞击坑反射率较高,因为它们的新鲜结晶物质与玻璃物质比例比其他时期形成的撞击坑的要高,古老的撞击坑周围不存在这样的特征。

月球哥白尼纪地层还可根据月壤成熟度进行识别,月表光学成熟度(Optical maturity parameter, OMAT)是月壤物理成分暴露于宇宙环境,随时间变迁月壤颗粒受空间环境作用逐渐趋于成熟,因此能够反映月表一定的时间信息。在月壤成熟度影像上,月壤成熟度低,则该处色泽较亮;月壤成熟度高,则该处色泽较暗(Lucey *et al.*, 2000)。月壤成熟度数据在填图过程中可用于准确提取新鲜撞击坑物质及辐射纹,即哥白尼纪地层。王梁等(2015)利用“嫦娥一号”CCD影像数据和美国Clementine探测数据制作的月壤成熟度图对哥白尼纪第谷撞击坑进行了综合数字地质填图,识别出了大量的哥白尼纪地层,第谷撞击坑及溅射出的辐射纹覆盖面积达560000 km^2 。

2.2 月球哥白尼纪地层分布

哥白尼纪地层即哥白尼纪撞击作用所形成的撞击坑及

周围溅射堆积物质,根据撞击坑堆积物位置、形成原因与形态做详细划分,撞击坑及堆积物可分为:中央峰堆积区(中央峰物质)、中心堆积平原区(坑底物质)、弧形坑壁断块堆积带(坑壁物质)、坑缘堆积带(坑缘物质)、辐射堆积及回落坠落坑带(辐射纹物质)等,依次使用Ccp、Cf、Cw、Crh和Crr表示。根据哥白尼纪地层特征与撞击坑形态、切割关系,参考美国已有1:100万与1:500万月球地质图及Lunar Impact Crater Database 2011数据库,使用“嫦娥一号”CCD影像数据、DEM数据及“嫦娥二号”CCD影像数据等编制了月球哥白尼纪地层分布图,共识别出约611个直径大于5km的哥白尼纪撞击坑(图2)。由于一些撞击坑直径较小或影像分辨率较低,无法详细区分出堆积岩类,则以弧形坑壁断块堆积带表示整个撞击坑。

根据月球哥白尼纪地层分布图可以看出,月球正面地区分布哥白尼纪地层(撞击坑)密度较大,撞击坑直径相对也较大,且辐射纹更为清晰、分布面积更大,如哥白尼撞击坑、第谷撞击坑、斯蒂文撞击坑等,最为明显的为第谷撞击坑,几乎覆盖了月球正面南半球部分,其至少发育有12条辐射纹,位于撞击坑北偏东的一条长达约1800km,第谷撞击坑及其辐射纹物质覆盖总面积达560000 km^2 (Dundas and McEwen, 2007);而月球背面地区哥白尼纪地层(撞击坑)分布密度较小,多为直径较小的撞击坑。根据哥白尼纪地层填图与月壤成熟度图可以发现,月球高地地区撞击坑辐射纹相对月海地区辐射纹更发育,推测由于高地与月海岩石性质不同,高地地区富含亚铁斜长岩与富镁结晶岩套,基底硬度较大,反射作用大,且高地地区岩石年代古老、海拔较高,受撞击作用密度大、宇宙射线风化作用时间久远,形成的月壤厚度大(Zhang *et al.*, 2015),因此,在高地地区撞击作用形成的辐射纹物质分布面积较大;而月海地区富含钛铁玄武岩、撞击作用密度小、月壤厚度小等原因,撞击形成辐射纹物质分布面积较小。此外,可能由于撞击的小天体体积、能量、物质特征及撞击的角度与速度不同等原因,导致哥白尼纪撞击坑辐射纹物质分布明显不同。

2.3 哥白尼纪地层划分及特征

王梁等(2015)使用统计学方法对典型哥白尼纪撞击坑进行了定年,尝试性地提出将月球哥白尼纪地层划分为3个统,即早哥白尼世(C₁)地层、中哥白尼世(C₂)地层和晚哥白尼世(C₃)地层,并对各世撞击坑及地层特征进行了分析研究,提出了新的月球地质年代划分方案(表1)。早哥白尼世代表性撞击坑有朗格林诺斯撞击坑(Langrenus Crater)、马尼利厄斯撞击坑(Manilius Crater)、哈帕鲁斯撞击坑(Harpalus Crater)和比格撞击坑(Burg Crater)等,中哥白尼世代表性撞击坑有欧多克苏斯撞击坑(Eudoxus Crater)、阿里斯蒂卢斯撞击坑(Aristillus Crater)、斯蒂文撞击坑(Stevinus Crater)和哥白尼撞击坑(Copernicus Crater)等;晚哥白尼世代表性撞击坑有第谷撞击坑(Tycho Crater)、普罗克勒斯撞击坑(Proclus

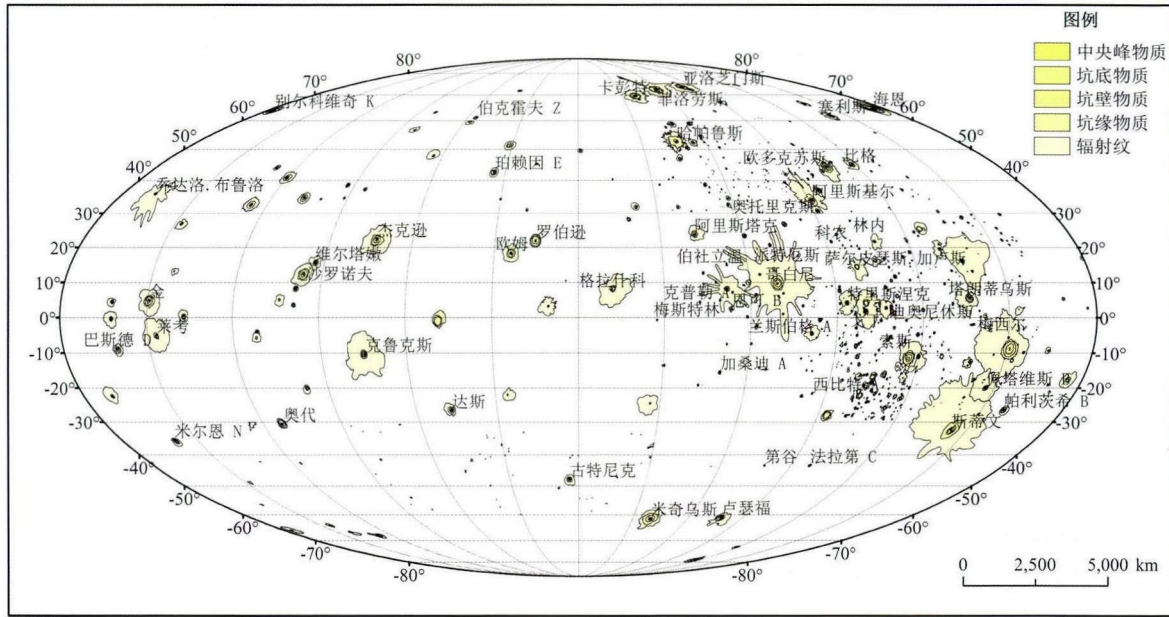


图2 月球哥白尼纪地层分布图

黄色区域为哥白尼纪地层,白色为哥白尼纪之前的地层;投影同图1

Fig.2 The stratigraphic distribution of Copernican Period of the Moon

The yellow area is Copernican strata, white area is the strata older than Copernican; the projection same as Fig.1

表1 月球地质年代划分新方案

Table 1 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 ₃)	0 ~ 0.19	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
	哥白尼纪(C)		
	中哥白尼世(C ₂)	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
爱拉托逊纪(E)	早哥白尼世(C ₁)	0.625 ~ 0.8	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
	晚爱拉托逊世(E ₂)	0.8 ~ 2.8	形成无辐射纹的撞击坑
古月宙	早爱拉托逊世(E ₁)	2.8 ~ 3.16	高钛月海玄武岩喷发
	雨海纪(I)		
	晚雨海世(I ₂)	3.16 ~ 3.8	大规模月海玄武岩泛滥(中低钛月海玄武岩)
冥月宙	早雨海世(I ₁)	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
	前艾肯纪(pA)	4.2 ~ 4.56	岩浆洋演化及斜长岩月壳形成

Crater)等(王梁等, 2015)。“嫦娥三号”着陆点西侧约50m发育有一个直径约450m撞击坑,通过地形地貌与解译分析,计算得到该撞击坑年龄约为27~80Ma,形成于哥白尼纪晚期(Xiao *et al.*, 2015),即晚哥白尼世。

本文分别以哈帕鲁斯撞击坑、哥白尼撞击坑与第谷撞击坑为例,根据研究撞击坑辐射纹特征、撞击坑与周围地质地貌间的覆盖与切割关系,以及“球粒化”发育程度等,简述了早哥白尼世地层、中哥白尼世地层和晚哥白尼世地层特征:

(1)早哥白尼世哈帕鲁斯撞击坑(图3):分布于雨海撞击坑之北西,处于雨海盆地第二环带之上,中心经纬度为52°45'45.44"N,43°25'20.34"W,直径39km,中心高度-4706m。撞击坑发育于冷海玄武岩平原上,保存较好,撞击坑及放射线色调较浅,较暗,呈灰-暗灰色调。中央峰、中心堆积、弧状断块堆积和环形断裂均保存较清晰、明显。中心堆积物“球粒化”明显,但分布较少。在哈帕鲁斯撞击坑中,有少量小型撞击坑,且较清晰明显,共58个,并且多集中分布于中心堆

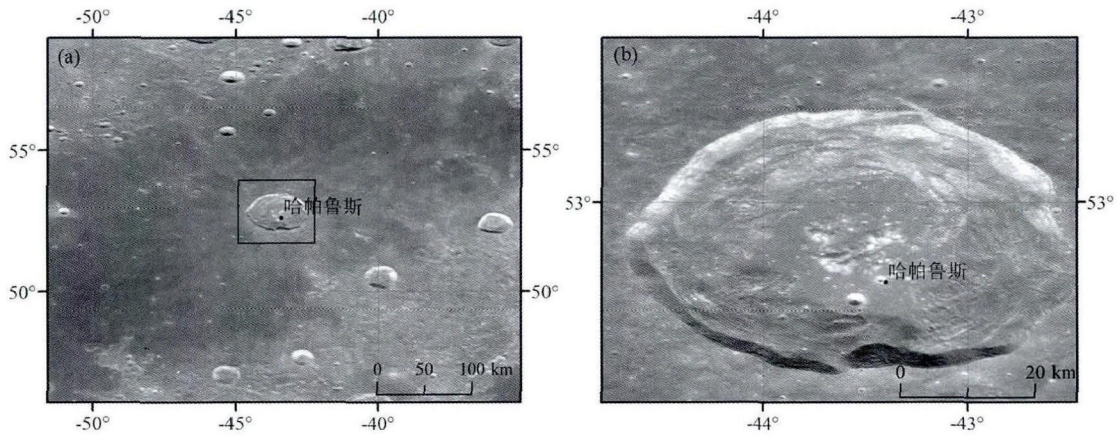


图3 早哥白尼世哈帕鲁斯撞击坑特征

应用“嫦娥二号”CCD影像数据;(a)哈帕鲁斯撞击坑辐射纹特征;(b)哈帕鲁斯撞击坑中央峰、坑底及边界断裂等特征

Fig.3 The characteristics of Harpalus crater in Early Copernican Epoch

By using Chang' E-II CCD image data; (a) the characteristics of Harpalus crater rays; (b) the characteristics of the central peak, the bottom and boundary faults of Harpalus crater

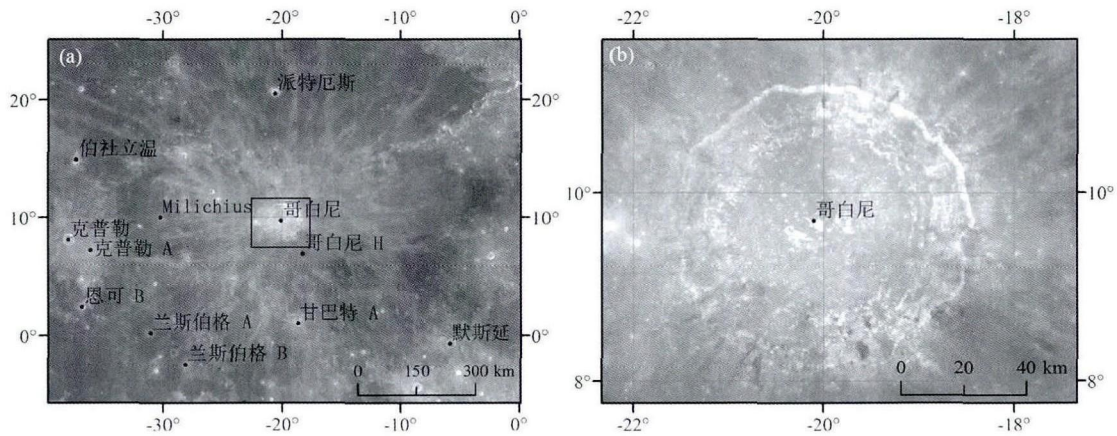


图4 中哥白尼世哥白尼撞击坑特征

应用“嫦娥二号”CCD影像数据;(a)哥白尼撞击坑辐射纹特征;(b)哥白尼撞击坑中央峰、坑底及边界断裂等特征

Fig.4 The characteristics of Copernicus crater in Middle Copernican Epoch

By using Chang' E-II CCD image data; (a) the characteristics of Copernicus crater rays; (b) the characteristics of the central peak, the bottom and boundary faults of Copernicus crater

积区范围,小型撞击坑最大直径约2km。

(2)中哥白尼世哥白尼撞击坑(图4):分布于雨海盆地之南偏西,处于雨海第一环的撞击坑堆积带范畴内,中心位置为 $9^{\circ}37'18.05''N, 20^{\circ}6'14.87''W$ 。撞击坑发育于少量残余火山堆积区上。中心海拔高度约为 $-3514m$,直径约 $97.45km$ 。保存较好,撞击坑及辐射纹色调较暗淡,呈浅灰-暗灰色调。中央峰、中心堆积、弧状断块堆积和环形断裂均保存较清晰、明显。中心堆积、弧形断块堆积物“球粒化”较普遍和明显,但粒度较小。环形边界断裂和弧形断块堆积带局部可见少量玄武岩出现。哥白尼撞击坑中,小型撞击坑分布不多,且均较模糊不清,共73个,并且多集中分布于中心堆积区范围,小型撞击坑最大直径约2.3km。

(3)晚哥白尼世第谷撞击坑(图5a, b):分布于月球正

面、月海区域之南的火山喷发岩发育区(图1)。撞击坑中心位置为 $43^{\circ}20'46.10''S, 11^{\circ}27'23.36''W$,中心海拔高度约为 $-2217m$,直径约 $86.13km$,保存完好,撞击坑及辐射纹色调较浅,呈灰白-浅灰色调。第谷撞击坑辐射纹至少有12条,长短不一,位于撞击坑之北偏东的一条辐射线长达约 $1800km$,中央峰、坑底堆积、弧状断块堆积和环形断裂均保存清晰、完整而明显。中心堆积物粒状化普遍和明显,弧形断块堆积物“球粒化”仅发育于近中心堆积区附近。在第谷撞击坑中的中央峰与坑缘堆积物表发育大量的泥湖构造、沟谷构造、穹窿构造和裂隙等小型地质构造(图6)。在撞击坑中,小型撞击坑分布极少,且十分清晰,大小撞击坑总数量仅有34个,小撞击坑最大直径约1.3km(仅1个)。使用LOLA DEM数据,沿第谷撞击坑NE-SW向做一条AB切线(图5c)

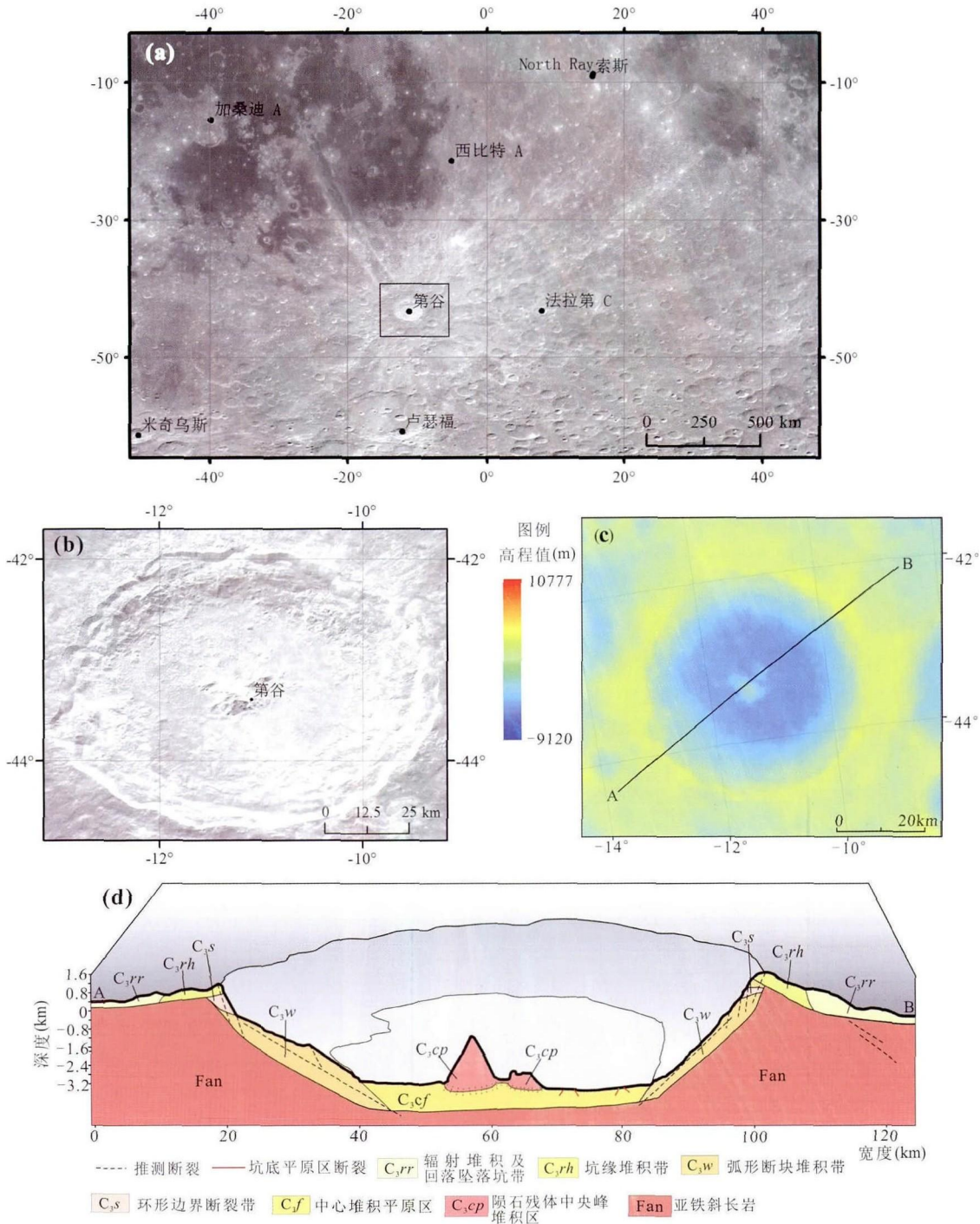


图5 晚哥白尼世第谷撞击坑特征及地质剖面图

(a, b)应用“嫦娥二号” CCD 影像数据;(a)第谷撞击坑辐射纹特征;(b)第谷撞击坑中央峰、坑底、边界断裂等特征;(c)第谷撞击坑 DEM 图,应用 LOLA 数据,AB 为剖面图切线;(d)第谷撞击坑及邻区剖面图

Fig.5 The characteristics and geological profile of Tycho crater in late Copernican Epoch

(a, b) using Chang' E-II CCD image data; (a) the characteristics of Tycho crater rays; (b) the characteristics of the central peak, the bottom and boundary faults of Tycho crater; (c) DEM map of Tycho Crater by using LOLA data, AB is a tangent of sectional view; (d) the geological section of Tycho crater and adjacent areas

建立了一条剖面并进行填图,得到第谷撞击坑地质剖面图,见图 5d。

此外,月球哥白尼纪地层表面还发生着块体运动,块体运动包括坠落、滑动、垮塌、流动和蠕移等,它们常发生在具

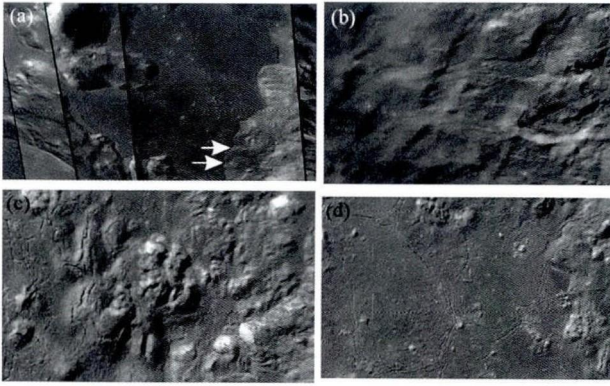


图6 第谷撞击坑小型构造

(a) 泥湖构造,位于第谷撞击坑坑缘东南侧;(b) 沟谷构造,位于第谷月坑西部边界断裂外侧;(c) 穹窿构造,位于第谷撞击坑坑底平原;(d) 坑底裂隙,位于第谷撞击坑坑底平原

Fig. 6 The small structure of Tycho crater

(a) mud lake, outside of the southeast of boundary fault of Tycho crater; (b) sliding groove, outside of the west of boundary fault of Tycho crater; (c) domal structure, in the center of Tycho crater; (d) grid-like fracture, in the center of Tycho crater

有坡度的各种地貌单元上,如撞击坑、火山穹窿、构造地貌、月溪等,块体运动主要驱动力可能是重力、坡度、陨石撞击和月震等,块体运动速率与月表侵蚀速率成正比,快速的块体运动能在较短的时间内快速抹去表面的地形单元,如小撞击坑(肖智勇等, 2013)。发生在哥白尼纪的块体运动在改造月表形态过程中的作用尚未明确,因此研究月球哥白尼纪地质作用能够更好地认识月壤形成与分布差异、地层分布特征及月表形态改造过程。

3 哥白尼纪-爱拉托逊纪界限的讨论

尽管哥白尼纪是最早被定义的月球地质年代单元之一(Shoemaker and Hackman, 1962),然而并没有确定的哥白尼纪绝对年龄下限及与其早期的爱拉托逊纪(Eratosthenian Period)之间的地层界限(Hawke *et al.*, 2004; Wilhelms, 1970; Wilhelms *et al.*, 1987),目前关于哥白尼纪下限已有多多个年龄数据,包括21亿年(Ryder *et al.*, 1991; Stöffler and Ryder, 2001)、15亿年(Neukum and Ivanov, 1994)、12.9亿年(Bernatowicz *et al.*, 1978)、11亿年(Turcotte and Schubert, 1982)以及8亿年(Jolliff *et al.*, 2006)等方案。

对哥白尼纪年龄最早的认识来源于 Apollo 12 的样品,由于哥白尼撞击坑的辐射纹覆盖了 Apollo 12 采样点,所以认为该登陆点采集到的 KREEP 岩玻璃样品是由于哥白尼撞击事件溅射过来的(Meyer *et al.*, 1971)。通过对 Apollo 12 样品中最不成熟且 KREEP 成分最丰富的样品 12032 和 12033 进行分析,U-Th-Pb 数据表明该区域在 $850 \pm 100\text{Ma}$ 发生了风化层扰动(Silver, 1971),而 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法定年发现在 800Ma 发生了一次明显的去气作用(Alexander *et al.*, 1976;

Eberhardt *et al.*, 1973), Bogard *et al.* (1994) 对 KREEP 玻璃包裹的花岗岩碎块研究发现其在 $800 \pm 15\text{Ma}$ 基本完全去气。尽管有人支持8亿年的哥白尼撞击坑年龄(Deutsch and Stöffler, 1987; Jessberger *et al.*, 1977; Ryder and Spudis, 1987; Stadermann *et al.*, 1991; Stöffler *et al.*, 1985; Stöffler *et al.*, 2001; Wilhelms *et al.*, 1987; 丁孝忠等, 2014; 王梁等, 2015),有人支持8.5亿年的哥白尼撞击坑年龄(Hartmann *et al.*, 1981; Neukum and Ivanov, 1994),但目前最主流的认识是哥白尼撞击坑形成于8亿年前(Stöffler and Ryder, 2001)。因此,如果以哥白尼撞击坑的形成时间作为哥白尼纪的起始年龄,则爱拉托逊纪-哥白尼纪的年龄分界为8亿年(Stöffler *et al.*, 2006)。

Bernatowicz *et al.* (1978) 利用 ^{39}Ar - ^{40}Ar 法研究了 Apollo 15 样品 15405,发现该样品记录了在12.9亿年前发生的一次撞击事件,由于该区域被可能来自奥托吕科斯撞击坑(Autolycus Crater)或阿里斯基尔撞击坑(Aristillus Crater)的辐射纹物覆盖,据此认为这两个辐射纹坑其中之一年龄可能为12.9亿年,这是根据是否有辐射纹定义的哥白尼纪的一个新年龄。利用 Apollo 15 采样点区域覆盖的奥托吕科斯撞击坑的 KREEP 玄武岩辐射纹样品,Ryder *et al.* (1991) 根据 ^{39}Ar - ^{40}Ar 分析得到了一个21亿年的撞击事件记录,如果根据是否有辐射纹定义哥白尼纪,则哥白尼纪的年龄界限将可能比之前认识的年龄值扩大一倍(Stöffler and Ryder, 2001)。

Neukum *et al.* (1994) 根据月球及小行星 Gaspra 和 Ida 的撞击记录研究了内太阳系的撞击坑大小分布,认为形成这些撞击坑的撞击体主要来自于小行星带,并根据其中原生撞击体的产率修正了直径 $\leq 1\text{km}$ 撞击坑分布曲线(Neukum and Ivanov, 1994)。根据 Neukum and Ivanov (1994) 基于撞击坑大小-频率分布的计算方式,哥白尼纪的起始年龄为15亿年前。

基于对晚雨海世时期月球撞击速率恒定的认识(Guinness and Arvidson, 1977; Hartmann, 1972; Neukum and König, 1976; Soderblom *et al.*, 1977; Young, 1977), Wilhelms *et al.* (1987) 统计了所有辐射纹撞击坑,计算得到哥白尼纪的持续时间为11亿年,因此认为爱拉托逊纪-哥白尼纪的时间分界为11亿年。将11亿年作为哥白尼纪的时间起始,可以在撞击坑生成速率上与爱拉托逊纪的年龄吻合,且与哥白尼坑的形成时间为8亿年不矛盾,而哥白尼纪的下界面位于哥白尼坑之上也与地层叠置关系的估算相一致(Wilhelms *et al.*, 1987)。

由于拥有了全月球光谱数据,一些学者发现了光谱成熟度与月表地质单元年龄具有一定的关系(Grier *et al.*, 2001; Hawke *et al.*, 1999)。Hawke *et al.* (2004) 认为,仅仅根据是否存在辐射纹判定撞击坑年轻与否是不可靠的。Hawke 等使用地基光谱和雷达数据以及基于 Clementine UV/VIS 的 FeO 、 TiO_2 和光谱成熟度图研究了月球辐射纹区域的起源和

成分,发现建立在月球样品化学分析之上的光学成熟度参数(Lucey *et al.*, 2000)可以被用来定义爱拉托逊纪-哥白尼纪的界限,而哥白尼纪的时间跨度应该是一个不成熟的月表达到全部光学成熟度的时间(Hawke *et al.*, 2004),但根据光学成熟度得到的哥白尼纪下限的具体时间还没有最新的研究结论。

要想准确地厘定哥白尼纪-爱拉托逊纪界限,首先需要明确哥白尼纪的地质意义,前人根据撞击坑是否具有辐射纹或哥白尼撞击坑形成时间或月壤成熟度等单一标准划分哥白尼纪与爱拉托逊纪,这里提出利用多源高分辨率遥感数据进行月壤成熟度、矿物组分、构造类型及地质体的覆盖与切割关系在不同时代的不均一性研究,综合判别各要素间相互关系,圈定月表最年轻的演化区域,即哥白尼纪地层分布区域,并与 Apollo 和 Luna 月球样品同位素数据进行分析对比,利用撞击坑密度法计算圈定区域各地质单元年龄,建立哥白尼纪地层标准剖面,应用月球年代学多源数据综合判别方法,来厘定哥白尼纪地层分布区域与年代下限。

4 结论

月球哥白尼纪是月球演化历史最晚阶段,哥白尼纪撞击坑数量虽然较少,但其形成的哥白尼纪地层却是全球性的、非常显著的。大多数学者普遍认为哥白尼纪基本没有岩浆活动与构造活动,本文对月球哥白尼纪地层进行了地质填图研究,通过对哥白尼纪-爱拉托逊纪地层界限进行探讨,得到了以下主要结论与认识:

(1)在美国 Lunar Impact Crater Database 2011 撞击坑数据库中,共有 68 个哥白尼纪大型撞击坑,本文参考美国 1:100 万、1:500 万月球地质图、撞击坑数据库及其他已有资料,利用“嫦娥一号” CCD 影像数据、DEM 数据、“嫦娥二号” CCD 影像数据,根据哥白尼纪撞击坑特征,共识别出约 611 个哥白尼纪撞击坑,并认为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,推测其原因可能为高地与月海岩石性质不同,撞击的小天体体积、能量、物质特征以及撞击的角度、速度不同等所致。

(2)本文以哈帕鲁斯撞击坑、哥白尼撞击坑与第谷撞击坑为例,对早哥白尼世、中哥白尼世、晚哥白尼世各世发育的撞击坑及地层特征进行了对比研究:早哥白尼世地层受风化程度较强烈,“球粒化”程度较强,坑内新小月坑数量较多,辐射纹色调较深;中哥白尼世地层受风化程度微弱,“球粒化”程度中等,坑内新小月坑数量较少,辐射纹色调较浅;晚哥白尼世地层风化程度极弱,“球粒化”程度弱,坑内新小月坑数量极少,辐射纹色调浅。

(3)哥白尼纪是最早被定义的月球地质年代单元之一,但其与爱拉托逊纪的地层界限尚未有准确的定义,因此哥白尼纪绝对年龄下限也未准确获得,目前大家普遍认可的哥白尼纪下限为 800Ma。本文通过前人对哥白尼纪-爱拉托逊纪

地层界限的研究进行了综合分析,提出利用多源遥感影像数据进行月壤成熟度分析、构造要素提取、矿物组分分析及切割关系分析,圈定月球地质演化最年轻的地质区域即哥白尼纪地层分布区域,并将这个区域与已有月球样品同位素数据进行对比分析,利用撞击坑密度定年法推算获得该区域各地质单元年龄,建立哥白尼纪的典型地质剖面,提出月球年代学多源数据综合判别法,来确定月球哥白尼纪时代下限的设想。

致谢 中国地质大学(北京)王楠、姚美娟,吉林大学李艳秋、郭甜甜和山东大学陈剑在哥白尼纪地层填图中提供了部分数据资料,在此表示感谢。同时,特别感谢审稿人对本文提出的修改建议。

References

- Alexander Jr EC, Bates A, Coscio Jr MR *et al.* 1976. K/Ar dating of lunar soils. II. In: Proceedings of the 7th Lunar Science Conference. New York: Pergamon Press, 1: 625-648
- Bernatowicz TJ, Hohenberg CM, Hudson B *et al.* 1978. Argon ages for lunar breccias 14064 and 15405. In: Proceedings of the 9th Lunar Science Conference. New York: Pergamon Press, 1: 905-919
- Bogard DD, Garrison DH, Shih CY *et al.* 1994. ³⁹Ar-⁴⁰Ar dating of two lunar granites: The age of copernicus. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(14): 3093-3100
- Claeys P and Morbidelli A. 2011. Late Heavy Bombardment. Berlin Heidelberg: Springer, 909-912
- Deutsch A and Stöfler D. 1987. Rb-Sr-analyses of Apollo 16 melt rocks and a new age estimate for the imbrium basin: Lunar basin chronology and the early heavy bombardment of the moon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(7): 1951-1964
- Ding XZ, Wang L, Han KY *et al.* 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)
- Dundas CM and McEwen AS. 2007. Rays and secondary craters of Tycho. *Icarus*, 186(1): 31-40
- Eberhardt P, Geiss J, Grögler N *et al.* 1973. How old is the crater copernicus? *The Moon*, 8(1-2): 104-114
- Gomes R, Levison HF, Tsiganis K *et al.* 2005. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435(7041): 466-469
- Grier JA, Mcewen AS, Lucey PG *et al.* 2001. Optical maturity of ejecta from large rayed lunar craters. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E12): 32847-32862
- Guinness EA and Arvidson RE. 1977. On the constancy of the lunar cratering flux over the past 3.3 billion yr. In: Proceedings of the 8th Lunar Science Conference. New York: Pergamon Press, 3: 3475-3494
- Hartmann WK. 1972. Paleocratering of the moon: Review of post-Apollo data. *Astrophysics and Space Science*, 17(1): 48-64
- Hartmann WK, Strom RG, Weidenschilling SJ *et al.* 1981. Chronology of Planetary Volcanism by Comparative Studies of Planetary Cratering. New York: Pergamon Press, 1049-1127
- Hawke BR, Blewett DT, Lucey PG *et al.* 1999. The composition and origin of selected lunar crater rays. In: *New Views of the Moon 2: Understanding the Moon through the Integration of Diverse Datasets. Lunar and Planetary Exploration*, 22
- Hawke BR, Blewett DT, Lucey PG *et al.* 2004. The origin of lunar crater rays. *Icarus*, 170(1): 1-16

- Head JW and Wilson L. 1992. Lunar mare volcanism: Stratigraphy, eruption conditions, and the evolution of secondary crusts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(6): 2155–2175
- Jessberger E, Kirsten T and Staudacher T. 1977. One rock and many ages: Further K-Ar dat on consortium breccia 73215. In: *Proceedings of the 8th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 2567–2580
- Jolliff BL, Wiczorek MA, Shearer CK *et al.* 2006. New Views of the Moon. Chantilly, Virginia: Mineralogical Society of America
- Lucey PG, Blewett DT, Taylor GJ *et al.* 2000. Imaging of lunar surface maturity. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E8): 20377–20386
- Meyer Jr C, Brett R, Hubbard NJ *et al.* 1971. Mineralogy, chemistry, and origin of the creep component in soil samples from the ocean of storms. In: *Proceedings of the 2nd Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 393–411
- Nakamura Y, Lammlein D, Latham G *et al.* 1973. New seismic data on the state of the deep lunar interior. *Science*, 181(4094): 49–51
- Neukum G and König B. 1976. Dating of individual lunar craters. In: *Proceedings of the 7th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 2867–2881
- Neukum G and Ivanov BA. 1994. Crater size distributions and impact probabilities on earth from lunar, terrestrial-planet and asteroid cratering data. In: *Hazard due to Comets and Asteroids*. Tucson, Arizona: University of Arizona Press, 359–416
- Ouyang ZY. 2005. Introduction to Lunar Science. Beijing: China Aerospace Press, 1–362 (in Chinese)
- Ryder G and Spudis P. 1987. Chemical composition and origin of apollo 15 impact melts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B4): E432–E446
- Ryder G, Bogard D and Garrison D. 1991. Probable age of autolycus and calibration of lunar stratigraphy. *Geology*, 19: 143–146
- Shoemaker EM and Hackman RJ. 1962. Stratigraphic basis for a lunar time scale. In: *In the Moon: Proceedings of Symposium No. 14 of the International Astronomical Union, Leningrad, 1960*. New York: Academic Press, 289–300
- Silver LT. 1971. U-Th-Pb isotope in Apollo 11 and Apollo 12 regolithic materials and a possible Copernicus impact event. *Transactions American Geophysical Union*, 52: 534
- Soderblom LA, Boyce JM, Arnold JR *et al.* 1977. Regional variations in the lunar maria-age, remanent magnetism, and chemistry. In: *Proceedings of the 8th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 1: 1191–1199
- Stadermann FJ, Heusser E, Jessberger EK *et al.* 1991. The case for a younger imbrium basin: ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of Apollo 14 rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(8): 2339–2349
- Stöffler D, Bischoff A, Borchardt R *et al.* 1985. Composition and evolution of the lunar crust in the descartes highlands, Apollo 16. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(S02): C449–C506
- Stöffler D and Ryder G. 2001. Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units: Chronological standard for the inner solar system. *Space Science Reviews*, 96(1–4): 9–54
- Stöffler D, Ryder G, Ivanov BA *et al.* 2006. Cratering history and lunar chronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60(1): 519–596
- Turcotte DL and Schubert G. 1982. *Geodynamics: Application of Continuum Physics to Geological Problems*. New York: Cambridge University Press
- Wang L, Ding XZ, Han TL *et al.* 2015. The digital geological mapping and geological and geomorphic features of Tycho crater of the Moon. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 251–262 (in Chinese with English abstract)
- Wilhelms DE. 1970. *Summary of Lunar Stratigraphy: Telescopic Observations*. Washington DC: US Government Printing Office
- Wilhelms DE, McCauley JF and Trask NJ. 1987. *The Geologic History of the Moon*. Washington DC: US Government Printing Office
- Xiao L, Zhu P, Fang G *et al.* 2015. A young multilayered terrane of the northern Mare Imbrium revealed by Chang' E-3 mission. *Science*, 347(6227): 1226–1229
- Xiao ZY. 2013. Comparison between Copernican-aged geological activity on the moon and Kuiperian-aged geological activity on mercury. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 62–88 (in Chinese)
- Xiao ZY, Zeng ZX, Xiao L *et al.* 2013. The small stretch and compressional tectonics on continuous sputtering blanket of the Copernicus crater of the Moon: A global contraction and the local stress counter. *Geological Journal of China Universities*, 19(Suppl.): 626 (in Chinese)
- Young RA. 1977. The lunar impact flux, radiometric age correlation, and dating of specific lunar features. In: *Proceedings of the 8th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 3457–3473
- Zhang J, Yang W, Hu S *et al.* 2015. Volcanic history of the Imbrium basin: A close-up view from the lunar rover Yutu. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(17): 5342–5347

附中文参考文献

- 丁孝忠, 王梁, 韩坤英等. 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
- 欧阳自远. 2005. *月球科学概论*. 北京: 中国宇航出版社, 1–362
- 王梁, 丁孝忠, 韩同林等. 2015. 月球第谷撞击坑区域数字地质填图及地质地貌特征. *地学前缘*, 22(2): 251–262
- 肖智勇. 2013. 月球表面哥白尼纪与水星表面柯伊伯纪的地质活动对比研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 62–88
- 肖智勇, 曾佐勋, 肖龙等. 2013. 月球哥白尼撞击坑连续溅射毯上的小型拉伸与挤压构造: 全球收缩与局部应力的抗衡. *高校地质学报*, 19(增刊): 626