

云海撞击盆地的恢复及其地质演化研究*

籍进柱^{1,2} 刘建忠^{1**} 郭弟均^{1,2} 刘敬稳^{1,2} 王庆龙³ 张莉²

Ji JinZhu^{1,2}, LIU JianZhong^{1**}, GUO DiJun^{1,2}, LIU JingWen^{1,2}, WANG QingLong³ and ZHANG Li²

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

2015-06-28 收稿, 2015-10-18 改回.

Ji JZ, Liu JZ, Guo DJ, Liu JW, Wang QL and Zhang L. 2016. Impact basin of Mare Nubium: Reconstruction and geological evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1):127–134

Abstract Investigation of Mare impact basin, especially ancient Mare impact basin, can contribute to deeply understand two kinds of geological processes on the moon and even on the solar system, which are endogenous and exogenous geological processes, respectively. And, study of ancient Mare impact basin is an important tie between early evolution and current state. Mare Nubium impact basin is one of the most ancient impact basins, forming at Pre-Nectarian Period, and has been modified extensively by later endogenous and exogenous geological processes. In order to reconstruct the original Mare Nubium impact basin and understand the geological evolution processes, we attempt to investigate its geological evolution through multi-source remote sensing data, such as LRO WAC image data, LOLA topographic data and GRAIL gravity data. The results show that the Mare Nubium basin is a triple-concentric rings impact basin with central uplift, and the diameters of triple-concentric rings are 740km, 500km, 340km, whose center location is at 16°W, 21°S, approximately. The event of Mare Nubium impact basin destroyed the primeval structure of crust in this region and subsequently flooded by mare basalt, forming the current terrain features and gravity anomaly features that we observed.

Key words Mare Nubium; Impact basin; Multi-source data; Basin reconstruction; Geological evolution

摘要 研究月海撞击盆地,尤其是古老的月海撞击盆地,有助于深入认识月球乃至太阳系中两种动力学即内动力和外动力地质作用的演化过程,也是研究月球早期演化和现今状态的重要纽带。云海撞击盆地为古老的撞击盆地之一,形成于前酒海纪,在后期的内外动力地质作用下,盆地有很大程度的改造。为了恢复云海撞击盆地原貌,深入认识该地区的地质演化过程,本文利用了LRO宽角相机影像数据、LOLA地形数据和GRAIL重力数据等多种类型的遥感数据,开展了云海撞击盆地演化的研究。结果显示,云海盆地是由一次撞击事件形成,具中央隆起的三环结构的撞击盆地,三环直径分别约为740km、500km、340km,盆地中心约为16°W,21°S。云海撞击盆地事件破坏了该地区原始月亮结构,随后岩浆喷出或溢流充填在撞击盆地中形成云海,塑造了现今观察到的云海地形特征和重力异常特征。

关键词 云海;撞击盆地;多源数据;盆地恢复;地质演化

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:籍进柱,男,1989年生,博士生,地球化学专业,E-mail: jijinzhu@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: liujz@nao.cas.cn

1 引言

20 世纪 60 年代初, Hartmann 和 Kuiper 利用地基望远镜观察发现, 月海周围存在多环同心状结构和不同尺度的辐射状结构, 并将其命名为大型的多环盆地 (Hartmann and Kuiper, 1962), 随后“盆地 (basin)”这一名词被广泛应用到月球及其它行星科学研究中。在此之前, 很多人认为撞击盆地 (直径大于 300km) 和月海属于同一概念, 但是随着数据的丰富和研究的深入, 认识到大型盆地和月海是在不同的地质动力作用下形成的, 即大型盆地是在外动力地质作用下撞击形成, 主要撞击体来自于小行星带和彗星, 而月海是在撞击盆地形成后, 被后期的岩浆活动产生的玄武质岩浆喷出或溢流充填形成, 是在内动力地质作用下形成的, 同时受早期盆地特征的制约 (Wilhelms *et al.*, 1987; Heiken *et al.*, 1991; Jolliff *et al.*, 2006)。因此, 研究月海撞击盆地, 尤其是古老的月海盆地, 有助于深入认识月球乃至太阳系中两种动力学演化过程, 即内动力地质作用和外动力地质作用, 也是研究月球早期演化和现今状态的重要纽带。

随着探月数据的累积和质量提高, 月球上识别出的撞击盆地的数量也有所变化, 根据地形特征, 已识别出了 40 多个多环撞击盆地 (Stuart-Alexander and Howard, 1970; Pike and Spudis, 1987; Wilhelms *et al.*, 1987; Wood, 2004), 另外, 结合月海的厚度特征, 识别出了至少 98 个直径大于 300km 的撞击盆地 (Frey, 2011), 但是这些多环盆地并不都像东海盆地 (Oriental Basin) 那样结构清晰, 大多数盆地的环状结构都被后期的地质作用破坏, 有的甚至被完全抹杀掉了。因此, 在古老撞击盆地识别与恢复方面, 存在很多的争议, 诸如是否是撞击盆地、盆地大小、盆地有几个同心环状结构等 (Spudis, 1993; Spudis *et al.*, 1994)。

本文研究区域为月球正面的云海地区 (图 1)。根据撞击盆地结构的退化程度, 很多学者认为云海盆地是月球上最古老的撞击盆地之一, 由一次撞击事件造成的, 形成于前酒海纪 (约 39 ~ 45 亿年) (Hartmann and Wood, 1971; Stuart-Alexander and Howard, 1970; Wilhelms *et al.*, 1987; Neumann *et al.*, 1996), 随后被喷出或溢流的玄武岩充填形成目前状态的云海。但是, 有的学者认为云海盆地是多次撞击事件形成的叠置的复杂撞击盆地, 随后被玄武岩充填形成云海 (De Hon, 1977; Hartmann and Wood, 1971; Hawke and Head, 1977)。另外, 由于早期数据质量和数量的局限, 古老的云海撞击盆地还没有进行系统的恢复。

为了恢复古老的云海撞击盆地, 深入认识该地区的地质演化过程, 本文利用了多种类型的遥感数据, 寻找云海撞击盆地留下的直接证据及与其相关的间接证据。其中, 利用月球勘测轨道器 (Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO) 的激光高度计 (Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA) 数据对云海地形进行三维显示, 为云海撞击盆地的识别提供了直接证据; 分

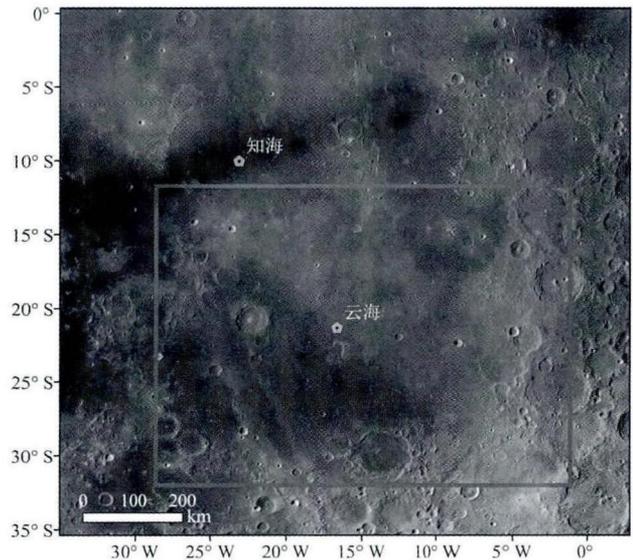


图 1 云海地理位置

Fig. 1 Geographical location of Mare Nubium

析该区域的最新的月亮厚度研究成果和 NASA 发布的重力回溯及内部结构实验室 (Gravity Recovery and Interior Laboratory, GRAIL) 600 架布格重力异常数据, 研究其深部特征, 作为间接证据; 利用克莱门汀 (Clementine) 的 UVVIS 的数据、LRO 的宽角相机影像和 LOLA 数据, 估算了云海地区的玄武岩厚度, 也作为间接证据。在此基础上, 将多方面的分析结果进行关联, 初步探讨了云海撞击盆地早期的地质演化。

2 撞击盆地形成机制及识别标志

2.1 撞击坑形成机制

撞击作用是月球上最主要的地质作用之一, 其撞击源主要来自于小行星带和彗星, 形成了月球上密密麻麻的撞击坑。撞击坑的发育可分为三个阶段 (Melosh, 1989): (1) 接触-压缩阶段, 撞击体与表面物质接触产生冲击波并传播, 冲击波的作用力与撞击点的距离成指数系数下降, 当冲击波能量降至 1 ~ 2Gpa 时, 冲击波变为地震波 (弹性波), 其产生的压力使物质发生破坏甚至熔融, 对接触表面进行压缩 (图 2); (2) 瞬时坑的挖掘与形成, 当冲击波产生的张力超过岩石的机械力时, 使目标物破碎, 而动能将加速碎片物质向外抛出, 向上加速并被抛出撞击坑外的物质, 形成溅射堆积物, 使撞击坑边缘抬高, 形成瞬时坑 (图 2); (3) 撞击坑的后期改造, 从瞬态坑形成结束时开始, 到撞击坑受地质作用完全破坏为止。

通过对不同规模的撞击坑形态的特征的观察和研究, 将撞击坑分成三类 (Head, 1977; Pike, 1976; Heiken *et al.*, 1991; Jolliff *et al.*, 2006): (1) 简单撞击坑 (图 3a); (2) 复杂撞击坑 (图 3b); (3) 撞击盆地或大型多环盆地 (图 3c)。当

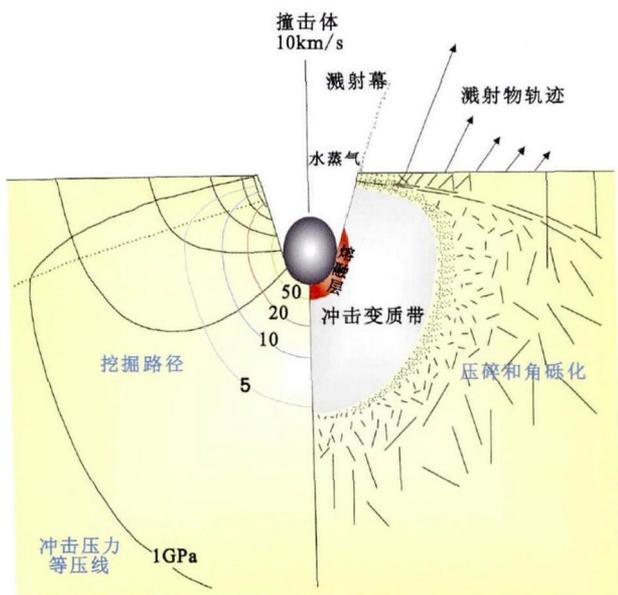


图2 撞击坑形成机制简图(据 Melosh, 1989)
Fig. 2 Simplified formation mechanism of impact crater (after Melosh, 1989)

然,在这一分类系统,也会产生一些过渡型的特殊撞击坑或撞击盆地。

对于撞击盆地,其直径大小并无确切定义,国际上一般将大于 200 ~ 300km 的撞击坑称为撞击盆地 (Spudis, 1993)。撞击盆地主要分为两个部分:(1)峰环撞击盆地,一般表现为中央隆起多数不完整,坍塌作用明显,也有同心环状结构,阶梯状坑壁发育,是复杂撞击坑到多环撞击盆地的过渡类型,直径在 300 ~ 400km;(2)多环撞击盆地,一般表现为多重同心环状结构,最内环较浅,但也有一定的隆起,阶梯状坑壁发育,直径通常大于 400km。

2.2 撞击盆地的识别标志

通过对不同规模的撞击坑形态特征观察、理论模拟以及

月亮厚度和重力异常的研究,目前在月球上已识别出了至少 98 个直径大于 300km 的撞击盆地 (Frey, 2011)。其识别标志可以总结为以下几个方面:

(1)具有清晰的环状结构或残留的环状结构,多环盆地之间的相邻环的直径比约为 $\sqrt{2}$,有些盆地为 2 (Hartmann and Kuiper, 1962; Stuart-Alexander and Howard, 1970; Pike and Spudis, 1987);

(2)具有辐射状的溅射纹或溅射毯 (Hartmann and Wood, 1971; Hartmann, 1981);

(3)通常情况下,最里面的环由独立的中央隆起组成,其它环具有断层崖的地形,内表面比较陡 (Wilhelms *et al.*, 1987; Spudis, 1993);

(4)月海物质(主要是月海玄武岩)的充填更倾向于发生在盆地的中部,有时候沿着陡坡基底(例如中央隆起周围)的边缘;

(5)月海盆地的中央部位通常呈同心的褶脊和月溪系统,在该区域呈轴向对称 (De Hon and Waskom, 1976);

(6)根据月亮厚度特征,环状的薄月壳可能是隐伏的撞击盆地 (Neumann *et al.*, 1996; Wieczorek and Phillips, 1999; Potts *et al.*, 2002; Frey, 2011);

(7)根据布格重力异常特征,环状的高重力异常值(通常指质量瘤)多数情况下是撞击盆地 (Andrews-Hanna, 2013; Melosh *et al.*, 2013)。

但是,由于后期地质演化的影响,并不是每个撞击盆地都具有这七个方面的特征,因此只能根据其中部分识别标志来恢复撞击盆地。

3 云海撞击盆地的恢复

3.1 地形分析及盆地中心的确定

月球地形是月球内、外动力地质作用对月亮综合作用的结果。根据撞击盆地形成机制的研究成果,初始形成的撞击

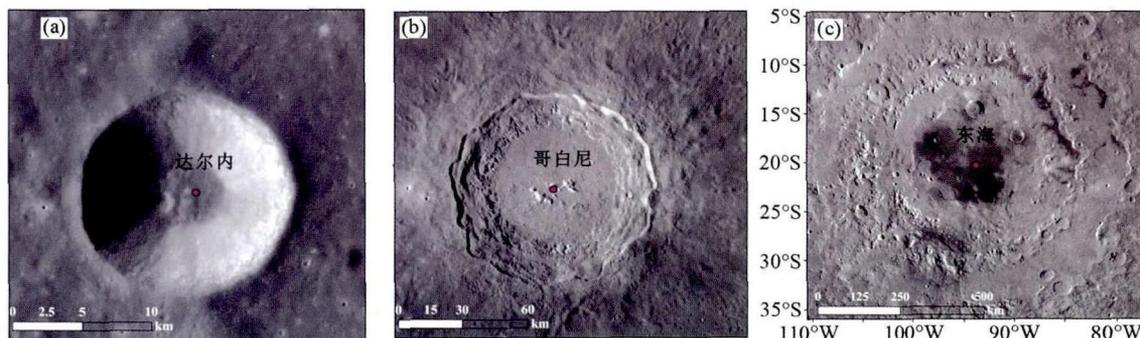


图3 撞击坑分类
(a)简单撞击坑;(b)复杂撞击坑;(c)多环撞击盆地

Fig. 3 Classification of crater
(a) simple crater; (b) complex crater; (c) multi-rings basin

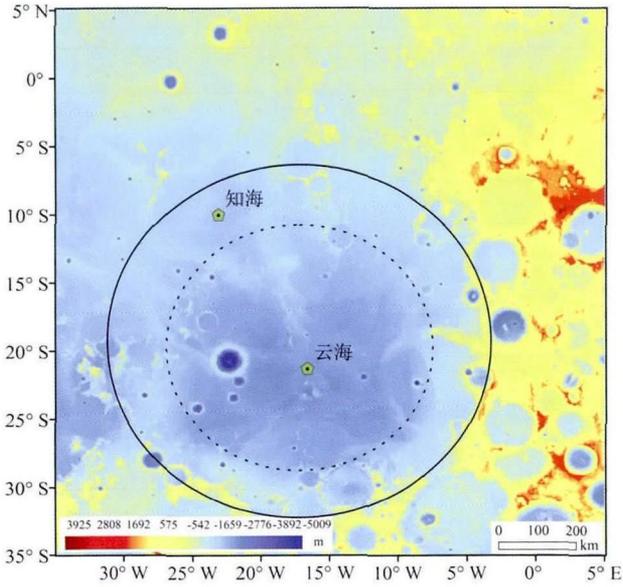


图4 云海地区 LOLA 高程图,可识别出两个环状结构
 Fig.4 LOLA elevation map of Mare Nubium with double rings structure

盆地具有清晰的多环状结构和低洼的中央区,有些撞击盆地具有中央峰或中央隆起(Heiken *et al.*, 1991)。因此,识别古老的撞击盆地首先要寻找其残留的地形特征(De Hon and Waskom, 1976; Hartmann and Wood, 1971; Wilhelms *et al.*,

1987; Spudis, 1993)。2010 年美国发射的月球轨道探测器(LRO)上携带的激光高度仪获得了目前应用最广泛也是质量最好的月球地形数据(Smith *et al.*, 2010),其分辨率为 0.02 度,本文使用该数据进行了地形分析。

根据撞击盆地的退化程度,云海撞击盆地是在前酒海纪形成,其后期经历了玄武岩充填过程、后期撞击作用以及坍塌作用的破坏,其地形的二维显示只能看到云海盆地残留的外环结构及隐约的次环结构(图4)(Wilhelms *et al.*, 1987; Frey, 2011)。但是,类比年轻的东海撞击盆地(图3c),规模相当的撞击盆地初始时其环状结构不止两个,因此本文利用地形数据基于 ArcScene 进行三维显示,其高程范围为 -2600 ~ -200m,呈四个似环带状分布,在环带过渡处高程值发生变化,从地形剖面图上可以识别出云海具有三环结构特征(图5)。

另外值得注意的是,云海的中央位置有部分凸起,从其地层接触关系上来看,这一位置被玄武岩部分充填,从其形态上来看,这一位置呈不规则形状的撞击坑,但是该撞击坑的东部和北部也残留着的一些高反照率的物质(图1),可能是残留的高地物质,是在早期形成的,因此推断该位置是云海撞击盆地的中央隆起,并且遭受了严重的撞击破坏。以该隆起位置为中心的三个环状结构的直径从外到内分别为 740km、500km、340km,其比值约为 2.17 : 1.47 : 1,基本符合多环盆地之间的相邻环的直径比约为 $\sqrt{2}$ 的关系,与撞击盆地的形成机制的理论是一致的。

综上,本文初步判断云海撞击盆地是一个具中央隆起的

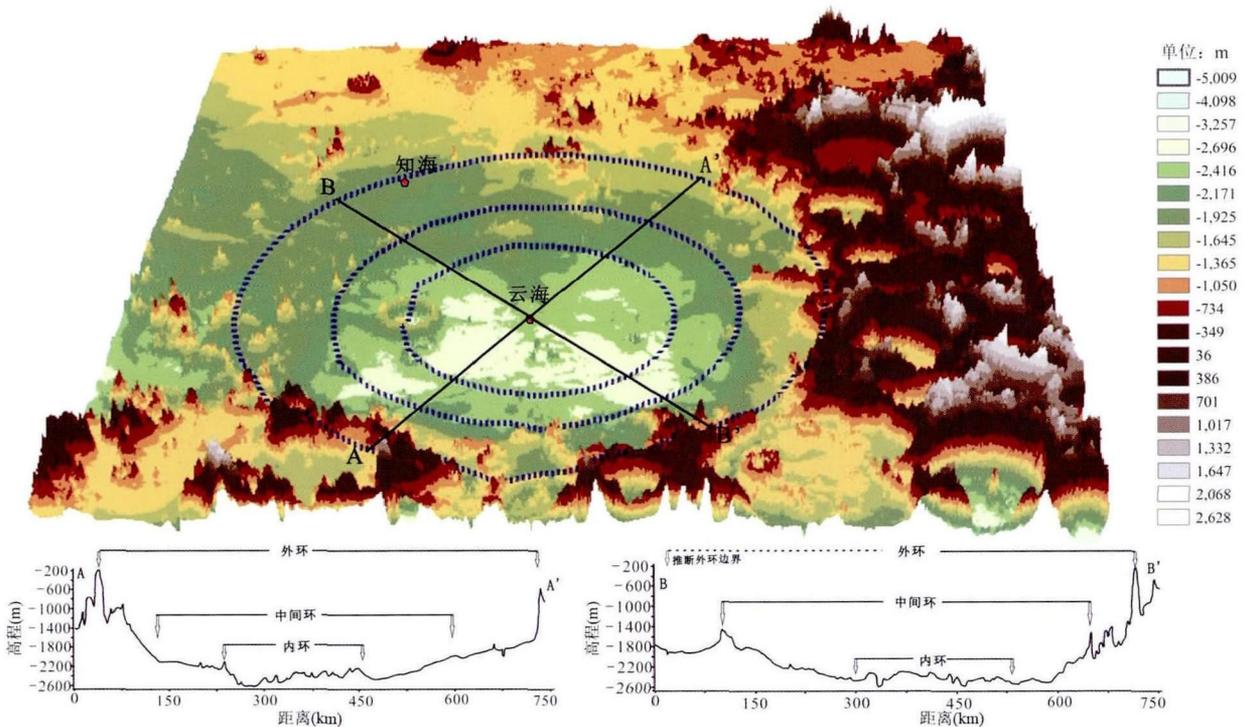


图5 云海地区三维地形图及可能三环结构(上)和 AA' 及 BB' 地形剖面图(下)
 Fig.5 3D figure of Mare Nubium's LOLA elevation map with possible triple-concentric rings (up) and topographic profiles of AA' and BB' (down)

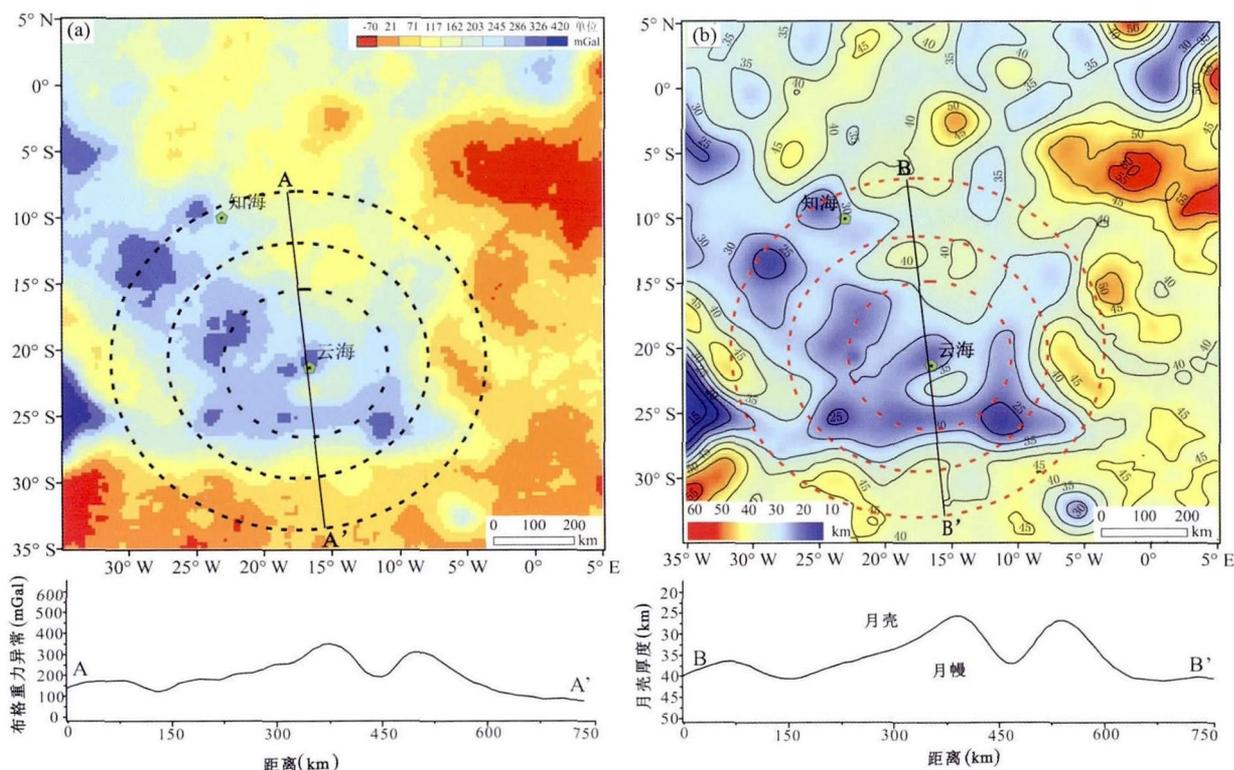


图6 云海地区布格重力异常图及 AA' 剖面图 (a) 和云海地区月壳厚度分布图及 BB' 剖面图 (b)
虚线为地形推断的三环结构, 实线月壳等厚线

Fig. 6 The bouguer gravity anomaly map of Mare Nubium with AA' profile (a) and the crust thickness map of Mare Nubium with BB' profile (b)

Dotted line is the inferred triple-concentric rings by topography, solid line is isopach line of crust thickness

三环撞击盆地, 三环直径分别为 740km, 500km, 340km, 盆地中心约为 16°W, 21°S。

3.2 盆地深部特征

从物理角度来说, 重力异常是表面起伏和内部物质密度变化的综合效应。因此, 从重力测量数据中消除地形起伏的引力效应, 就可以得到反映地下物质密度分布引起的重力异常, 即布格重力异常。由于月震数据的不足, 月球的布格重力异常数据是研究月球内部物理特征、深部构造及圈层形态、早期内部物质运动的重要资料 (Wieczorek and Phillips, 1998; Zuber *et al.*, 1994)。关于重力模型的研究, 随着数据的不断更新, 许多学者做了大量的工作 (Konopliv *et al.*, 1993; Lemoine *et al.*, 1997; 鄢建国等, 2010; Goossens *et al.*, 2011; Zuber *et al.*, 2013; Konopliv *et al.*, 2014)。另外, 基于重力场数据和地形数据, 许多学者反演出了整个月壳厚度的分布模型 (Wieczorek and Phillips, 1998; Ishihara *et al.*, 2009; 丰海等, 2012; Wieczorek *et al.*, 2013)。为了反映云海撞击盆地深部的特征, 本文使用了 PDS 上公布的 GRGM900C 模型的布格重力异常数据, 分辨率为 8pix/deg, 介于数据范围的限制, 该数据是被截断为 600 阶发布。另外, 还参考了 Wieczorek *et al.* (2013) 等利用最新的 GRAIL 重

力场数据和 LOLA 地形数据得到的平均月壳厚度为 43km 的月壳厚度模型。

在云海撞击盆地的布格重力异常分布上可以看出, 云海盆地不像湿海 (Mare Humorum)、酒海 (Mare Nectaris)、东海 (Mare Orientale) 等月海盆地那样具有明显的质量瘤。关于质量瘤成因的研究, 目前还存在很大的争论, 杜劲松等 (2010) 总结前人的研究, 可以归纳为三个方面: (1) 高密度陨石物质的聚集; (2) 高密度的岩浆充填; (3) 高密度的 Moho 面的隆起。但是, 云海盆地内的布格重力异常也有较明显的分布特点, 其中, 盆地中部的布格重力异常值偏低, 而中心周围的异常相对较高 (图 6a), 这与地形确定的盆地中心基本是吻合的, 可以间接说明云海盆地是在一次巨大撞击事件中形成的。

另外, 在月球上所有已识别的盆地中, 其下部的月壳厚度要比其周围的厚度薄。但是从撞击盆地的形成机制上来分析, 对于具有中央隆起的多环盆地来说, 其中央隆起区域的下部月壳厚度可能略微大于盆地底部其它区域的厚度 (Heiken *et al.*, 1991; Potts *et al.*, 2002)。在云海撞击盆地中, 月亮最大厚度为约为 48km, 位于其外围残留的环形山, 最小厚度约为 22km, 位于内环和二环之间, 而其盆地中心的厚度约为 37km (图 6b), 推断为中央隆起, 可能经过

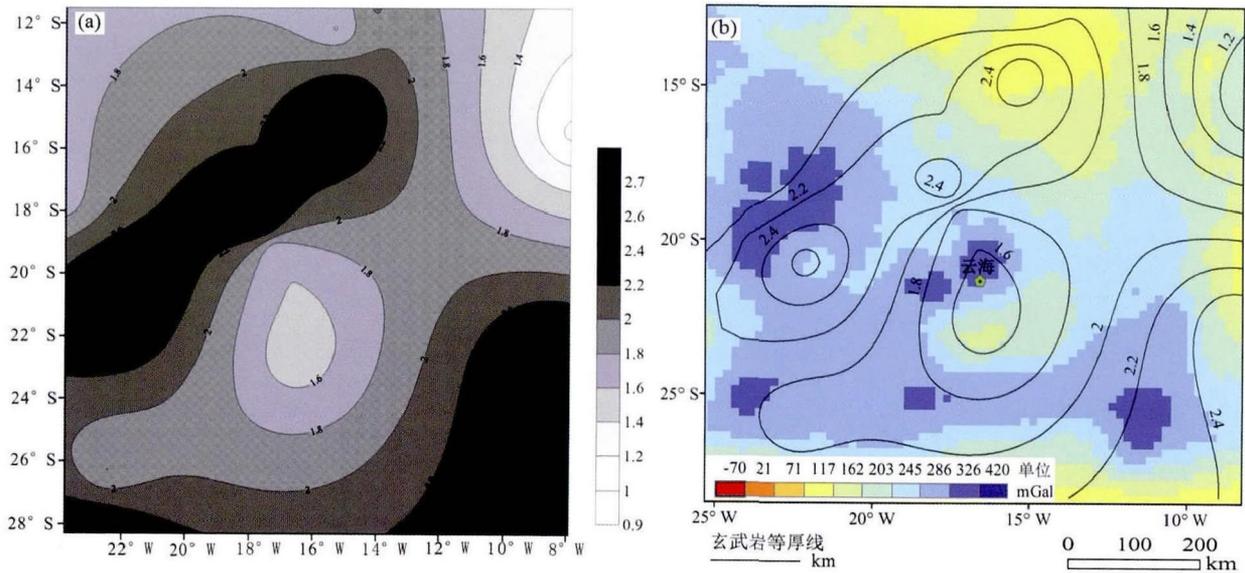


图7 云海玄武岩厚度分布图(a)和布格重力异常叠加玄武岩等厚线(b)

Fig. 7 The basalt isopach of Mare Nubium (a) and bouguer gravity anomaly map added with basalt isopach line (b)

后期的月亮均衡调整,使该位置的月亮厚度加深。因此,进一步证实了地形的分析结果,即云海撞击盆地是一个具有中央隆起的多环撞击盆地。

3.3 月海玄武岩填充厚度的制约

月海玄武岩是月球上四大岩类之一,主要充填于大型撞击盆地之中,形成月海,其占全月表面积的17%左右(Head, 1976)。因此,月海玄武岩的充填与撞击盆地的形态和结构具有很大关系,更倾向于充填在撞击盆地的中部,有时候沿着陡坡基底(例如中央隆起周围)的边缘。通过对月海玄武岩厚度的估算,可以为撞击盆地的恢复提供间接的证据。

月球上广泛分布着不同尺度的撞击坑,其挖掘深度的范围从几米到几千米。因此,撞击坑可以作为天然的钻孔,对玄武岩的厚度进行约束。月海玄武岩厚度范围在几十米到几千米(De Hon, 1977, 1979; Budney and Lucey, 1996, 1998; Thomson *et al.*, 2009),但是对于大型撞击盆地,其厚度不会超过4km(Jolliff *et al.*, 2006)。

本文利用LRO宽角影像数据、LOLA地形数据和Clementine的UVVIS数据,选取了该区域中35个直径大于10km的撞击坑,包括穿透月海玄武岩地层的撞击坑、未穿透月海玄武岩地层的撞击坑和玄武岩部分充填的撞击坑。其中,穿透和未穿透的撞击坑年龄较小,是在岩浆充填之后形成的,而玄武岩部分充填的撞击坑年龄较老,是在岩浆充填之前或充填的过程形成的,主要判断依据包括:(1)地层叠置关系;(2)是否挖掘出低铁物质。在玄武岩厚度约束上,将穿透月海玄武岩地层的撞击坑的视深度作为该位置厚度的最大值,作为厚度控制点;对于玄武岩部分充填的撞击坑,利用LOLA的地形数据,求出坑缘到坑底的高差,依据Melosh(1989)的撞击过程研究成果,用理论的挖掘深度减去该高差

值,求出玄武岩厚度,增加玄武岩厚度的控制点;而将未穿透玄武岩地层的撞击坑的视深度作为该位置厚度最小值,作为厚度的参考点,不作为厚度控制点。

最终得到该地区16个厚度控制点,玄武岩厚度范围为0.9~2.7km,根据厚度控制点绘制玄武岩等厚图(图7a),显示云海盆地中央区域的玄武岩厚度比其周围的厚度薄,而岩浆在充填盆地的过程中趋向于低洼处,这说明云海盆地中央具有一定的隆起,这与地形、月亮厚度的分析结果相一致,进一步确定云海撞击盆地存在中央隆起。

4 讨论

4.1 多源数据融合恢复撞击盆地

古老的月海盆地,其地质演化时间跨度大,形成的初始结构被后期的内外动力地质作用所破坏,因此在恢复撞击盆地及研究其地质演化,采用单一类型的数据是远远不够的。为了恢复云海撞击盆地和研究其地质演化,在本次研究中,利用多源数据融合,包括地形数据、重力数据、光谱数据等,从表面到深部寻找其残留的直接和间接证据,相互补充和验证。

对于云海撞击盆地的恢复,首先对LOLA地形数据的三维显示及地形剖面分析,可以初步判断云海撞击盆地是中央隆起的具三个同心环状结构的撞击盆地(图5),这是识别盆地最直接的证据。其次,分析云海地区的布格重力异常和月亮厚度分布,从盆地深部特征约束,其中央区域低重力异常和厚月亮说明云海盆地确实存在中央隆起,并且其周围特征从盆底向盆外也呈似环带的变化趋势(图6)。最后,通过对云海盆地内直径大于10km的撞击坑进行分类统计,估算出玄武岩厚度范围为0.9~2.7km,显示云海盆地中央区域的

玄武岩厚度比其周围的厚度薄,而岩浆在充填盆地的过程中趋向于低洼处,这说明云海盆地中央具有一定的隆起,这与地形、月亮厚度的分析结果相一致,进一步确定云海撞击盆地存在中央隆起(图7)。因此,在撞击盆地识别与恢复的过程中需要借助于多源数据融合来获得更多的证据。

4.2 云海盆地地质演化探讨

月球表面布满了大小不一的撞击坑,记录了月球形成以来所遭受的小行星撞击事件。通过对月球样品的分析,月球撞击熔融岩石样品的年龄聚集在38~41亿年之间(Norman, 2009)。另外,月球表面撞击坑的统计发现,约在39亿年左右,月球表面的小行星撞击频率有异常的增高,反映这一时间月球遭受了灾难性的小行星撞击事件,该撞击时期称为晚重轰击(Late Heavy Bombardment, LHB),也称为39亿年大撞击事件(Cohen *et al.*, 2000; Ryder, 2002),在此时期形成了一些较老的撞击盆地。根据撞击盆地的退化程度,云海撞击盆地为最古老的撞击盆地之一,形成于前酒海纪(Stuart-Alexander and Howard, 1970; Hartmann and Wood, 1971; Neumann *et al.*, 1996),因此云海撞击盆地可能是在此次大撞击事件中形成的。

云海撞击盆地时,其巨大的冲击波足以破坏该地区原始月亮结构,形成了大量的断裂或断层,为后期岩浆喷出或溢流提供了运移管道,岩浆到达月表低洼处后冷却形成月海玄武岩,其演化模式简图如图8。在恢复云海撞击盆地的过程,发现盆地内存在有很多玄武岩部分充填的撞击坑,说明这些撞击坑是在玄武岩充填之前就已形成,因此在云海撞击盆地形成以后,盆地内部也遭受到撞击事件的破坏,且可能对后期的玄武岩充填有一定的影响。另外,云海撞击盆地中心的月亮厚度高于周围(图6b),这可能是撞击过程形成中央隆起且在后期月亮均衡调整使其月亮厚度增大,但是并没有形成质量瘤,而在云海西部、南部和东部的玄武岩厚度和布格重力异常存在正相关性(图7b),这可以说明云海盆地的布格重力异常主要是由玄武岩的充填引起的,此外云海东北部玄武岩厚度与布格重力异常弱相关性,但是该位置的月亮厚度较厚,因此布格重力异常与低密度的月亮厚度也有一定关系。

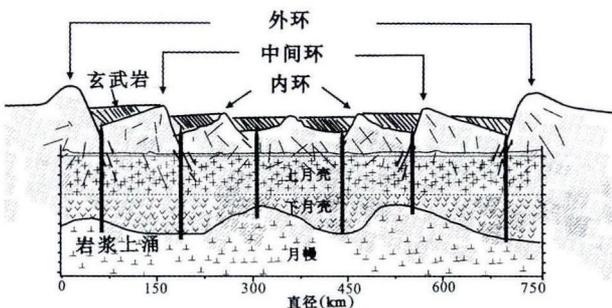


图8 云海撞击盆地初始结构及后期演化模型简图

Fig. 8 Simplified model figure of initial structure and later evolution of Mare Nubium

5 结论

月海盆地是月表重要的地质单元之一,其地质演化特征是内动力和外动力地质作用的综合结果,因此研究月海盆地,尤其古老的月海盆地具有重要意义。月海盆地的识别和恢复是研究其地质演化的重要内容,为了更准确的恢复月海撞击盆地,除了要充分利用影像数据和地形数据外,还要借助于重力数据、光谱数据,通过多源数据的融合利用,寻找更多的证据,进而相互补充和验证。

本文通过分析云海盆地地形、盆地深部特征(布格重力异常和月亮厚度)及玄武岩充填厚度,获得了恢复古老的云海撞击盆地的直接和间接的证据,表明云海撞击盆地是由一次撞击事件形成的,为一个中央隆起的具三个环状结构的撞击盆地,三环直径分别约为740km,500km,340km,盆地中心约为16°W,21°S。云海撞击盆地事件破坏了该地区原始月亮壳结构,随后岩浆喷出或溢流充填在撞击盆地中,形成云海,且在云海撞击盆地形成之后,一直遭受了不同程度的撞击破坏,塑造了现今观察到的云海地形特征和重力异常特征。

撞击盆地形成时会伴随不同的构造行迹,且后期玄武岩充填和撞击作用也是区域地质演化的重要方面,因此,接下来将深入研究月表的构造特征(褶皱、月溪、直墙等)、玄武岩充填的期次和后期撞击作用挖掘的物质成分,从而更深入的认识该地区的地质演化过程,为月球其它地区甚至全月的地质演化提供参考。

致谢 本文的地形数据、影像数据和重力数据来自华盛顿大学的PDS数据节点,月亮厚度数据使用了巴黎地球物理学院Mark A. Wieczorek研究员的成果,在此表示感谢!同时感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见!

References

- Andrews-Hanna JC. 2013. The origin of the non-mare Mascon gravity anomalies in lunar basins. *Icarus*, 222(1): 159–168
- Budney CJ and Lucey PG. 1996. Basalt thickness in Mare Humorum: New method and results. In: *The 27th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, Texas; LPSC, 27: 179–180
- Budney CJ and Lucey PG. 1998. Basalt thickness in Mare Humorum: The crater excavation method. *Journal of Geophysical Research*, 103 (E7): 16855–16870
- Cohen BA, Swindle TD and Kring DA. 2000. Support for the lunar cataclysm hypothesis from lunar meteorite impact melt ages. *Science*, 290(5497): 1754–1756
- De Hon RA and Waskom JD. 1976. Geologic structure of the eastern Mare basins. In: *Proceedings of the 7th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, Texas; LPSC, 2729–2746
- De Hon RA. 1977. Mare Humorum and Mare Nubium: Basalt thickness and basin-forming history. In: *Proceedings of the 8th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, Texas; LPSC, 230–232
- De Hon RA. 1979. Thickness of the western Mare basalts. In: *Proceedings of the 10th Lunar and Planetary Science Conference*.

- Houston, Texas: LPSC, 274 – 276
- Du JS, Liang Q, Chen C *et al.* 2010. Deep structure and impact evolution of Lunar Mascon basins. *Geological Science and Technology Information*, 29(5): 134 – 142 (in Chinese with English abstract)
- Feng H, Li JC, Li DW *et al.* 2012. Airy isostasy on the Moon: Implications for crustal thickness. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 41(4): 543 – 548 (in Chinese with English abstract)
- Frey H. 2011. Previously unknown large impact basins on the Moon: Implications for lunar stratigraphy. *Geological Society of America Special Papers*, 477: 53 – 75
- Goossens S, Matsumoto K, Liu Q, Kikuchi F, Sato K, Hanada H, Ishihara Y, Noda H, Kawano N, Namiki N, Iwata T, Lemoine FG, Rowlands DD, Harada Y and Chen M. 2011. Lunar gravity field determination using SELENE same-beam differential VLBI tracking data. *Journal of Geodesy*, 85(4): 205 – 228
- Hartmann WK and Kuiper GP. 1962. Concentric structures surrounding lunar basins. *Communications of the Lunar and Planetary Laboratory*, 1(1): 51 – 66
- Hartmann WK and Wood CA. 1971. Moon: Origin and evolution of multi-ring basins. *The Moon*, 3(1): 3 – 78
- Hartmann WK. 1981. Discovery of multi-ring basins science: Gestalt perception in planetary. In: *Proceedings of the 12th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, Texas: LPSC, 79 – 90
- Hawke BR and Head JW. 1977. Pre-Imbrian history of the Fra Mauro region and Apollo 14 sample provenance. In: *Proceedings of the 8th Lunar Science Conference*. Houston, Texas: LPSC, 2741 – 2761
- Head JW. 1976. Lunar volcanism in space and time. *Reviews of Geophysics*, 14(2): 265 – 300
- Head JW. 1977. Origin of outer rings in lunar multi-ringed basins: Evidence from morphology and ring spacing. In: *Proceedings of the Symposium on Planetary Cratering Mechanics*, Flagstaff, Ariz. New York: Pergamon Press, Inc., 563 – 573
- Heiken G, Vaniman D and French BM. 1991. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*. Cambridge England, New York: Cambridge University Press, 61 – 120
- 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
- Jolliff BL, Wieczorek MA, Shearer CK and Neal CR. 2006. *New Views of the Moon*. Chantilly, USA: Mineralogical Society of America, 519 – 596
- Konopliv AS, Sjogren WL, Wimberly RN, Cook RA and Vijayaraghavan A. 1993. A high resolution lunar gravity field and predicted orbit behavior. In: Misra AK, Modi VJ, Holdaway R and Bainum PM (eds.). *Advances in the Astronautical Sciences*. AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Victoria, Canada, 1993. San Diego, CA: Univelt Inc., 1275 – 1294
- Konopliv AS, Park RS, Yuan DN, Asmar SW, Watkins MM, Williams JG, Fahnestock E, Kruizinga G, Paik M, Strelakov D, Harvey N, Smith DE and Zuber MT. 2014. High-resolution lunar gravity fields from the GRAIL Primary and Extended Missions. *Geophysical Research Letters*, 41(5): 1452 – 1458
- Lemoine FGR, Smith DE, Zuber MT, Neumann GA and Rowlands DD. 1997. A 70th degree lunar gravity model (GLGM-2) from Clementine and other tracking data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 102(E7): 16339 – 16359
- Melosh HJ. 1989. *Impact Cratering: A Geologic Process*. New York, Oxford: Oxford University Press, 1 – 253
- Melosh HJ, Freed AM, Johnson BC, Blair DM, Andrews-Hanna JC, Neumann GA, Phillips RJ, Smith DE, Solomon SC, Wieczorek MA and Zuber MT. 2013. The origin of lunar Mascon basins. *Science*, 340(6140): 1552 – 1555
- Neumann GA, Zuber MT, Smith DE and Lemoine FG. 1996. The lunar crust: Global structure and signature of major basins. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 101(E7): 16841 – 16863
- Norman MD. 2009. Scientific exploration of the Moon: The lunar cataclysm: Reality or 'mythconception'? *Elements*, 5(1): 23 – 28
- Pike RJ. 1976. Simple to complex impact craters: The transition on the moon. In: *The 7th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston, Texas: LPSC, 700
- Pike RJ and Spuis PD. 1987. Basin-ring space on the Moon, Mercury, and Mars. *Earth, Moon, and Planets*, 39(2): 129 – 194
- Potts LV, von Frese RRB and Shum CK. 2002. Crustal properties of Mercury by morphometric analysis of multi-ring basins on the Moon and Mars. *Meteoritics & Planetary Science*, 37(9): 1197 – 1207
- Ryder G. 2002. Mass flux in the ancient Earth-Moon system and benign implications for the origin of life on Earth. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E4): 6 – 1 – 6 – 13
- Smith DE, Zuber MT, Neumann GA, Lemoine FG, Mazarico E, Torrence MH, McGarry JF, Rowlands DD, Head 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), doi: 10.1029/2010GL043751
- Spudis PD. 1993. *The Geology of Multi-Ring Impact Basins: The Moon and Other Planets*. New York: Cambridge University Press, 263
- Spudis PD, Gillis JJ and Reisse RA. 1994. Ancient multiring basins on the Moon revealed by clementine laser altimetry. *Science*, 266(5192): 1848 – 1851
- Stuart-Alexander DE and Howard KA. 1970. Lunar Maria and circular basins: A review. *Icarus*, 12(3): 440 – 456
- Thomson BJ, Grosfils EB, Bussey DBJ and Spudis PD. 2009. A new technique for estimating the thickness of mare basalts in Imbrium Basin. *Geophysical Research Letters*, 36(12), doi: 10.1029/2009GL037600
- Wieczorek MA and Phillips RJ. 1998. Potential anomalies on a sphere: Applications to the thickness of the lunar crust. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E1): 1715 – 1724
- Wieczorek MA and Phillips RJ. 1999. Lunar multiring basins and the cratering process. *Icarus*, 139(2): 246 – 259
- Wieczorek MA, Neumann GA, Nimmo F, Kiefer WS, Taylor GJ, Melosh HJ, Phillips RJ, Solomon SC, Andrews-Hanna JC, Asmar SW, Konopliv AS, Lemoine FG, Smith DE, Watkins MM, Williams JG and Zuber MT. 2013. The crust of the Moon as seen by GRAIL. *Science*, 339(6120): 671 – 675
- Wilhelms DE, McCauley JF and Trask NJ. 1987. *The Geologic History of the Moon*. Washington DC: US Government Printing Office
- Wood CA. 2004. *Lunar Basin Database*, originally compiled August 2004. <http://www.lpod.org/cwm/DataStuff/LunarBasins.htm> (accessed July 2009)
- Yan JG, Li F, Ping JS *et al.* 2010. Lunar gravity field model CEGM-01 based on tracking data of Chang' E-1. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(12): 2843 – 2851 (in Chinese with English abstract)
- Zuber MT, Smith DE, Lemoine FG and Neumann GA. 1994. The shape and internal structure of the moon from the clementine mission. *Science*, 266(5192): 1839 – 1843
- Zuber MT, Smith DE, Watkins MM, Asmar SW, Konopliv AS, Lemoine FG, Melosh HJ, Neumann GA, Phillips RJ, Solomon SC, Wieczorek MA, Williams JG, Goossens SJ, Kruizinga G, Mazarico E, Park RS and Yuan DN. 2013. Gravity field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) mission. *Science*, 339(6120): 668 – 671

附中文参考文献

- 杜劲松, 梁青, 陈超等. 2010. 月球“质量瘤”盆地的深部结构与撞击演化. *地质科技情报*, 29(5): 134 – 142
- 丰海, 李建成, 李大炜等. 2012. 月球 Airy 均衡状态与月亮厚度估计. *测绘学报*, 41(4): 543 – 548
- 鄯建国, 李斐, 平劲松等. 2010. 基于“嫦娥一号”跟踪数据的月球重力场模型 CEGM-01. *地球物理学报*, 53(12): 2843 – 2851