

doi:10.3799/dqkx.2015.141

# 月球虹湾—雨海盆地壳幔结构

王旭媛<sup>1</sup>, 梁青<sup>1,2\*</sup>, 陈超<sup>1,2</sup>, 杜劲松<sup>1</sup>, 张双喜<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 为了探讨月球大型撞击盆地形成后的壳幔物质迁移, 采用新近的月球重力场数据研究壳幔界面的起伏情况, 这对撞击盆地的形成演化研究有重要意义。通过对虹湾—雨海盆地地区玄武岩引起的重力异常进行正演模拟, 发现该部分重力异常仅约占布格重力异常幅值的8%, 布格重力异常主要与壳幔界面起伏有关。对该地区不同解算高度的剩余布格重力异常进行场源边界提取, 发现虹湾—雨海西北部的壳幔界面随深度增加向雨海中心倾斜, 在此区域下方, 壳幔界面会有一个向虹湾方向的额外上隆, 可能为月幔物质曾向此方向涌动造成。分析表明这种月幔上涌情况可能在雨海撞击时形成, 或者可能是形成虹湾的撞击对雨海盆地壳幔结构产生了二次影响, 在虹湾地区的壳幔回弹过程中, 拖动雨海下方的物质向虹湾方向运移造成的。

**关键词:** 月球; 虹湾—雨海地区; 壳幔结构; 重力; 边界提取。

中图分类号: P184

文章编号: 1000-2383(2015)09-1566-10

收稿日期: 2015-03-20

## Crust-Mantle Structure beneath the Sinus Iridum-Mare Imbrium Basin of the Moon

Wang Xuyuan<sup>1</sup>, Liang Qing<sup>1,2\*</sup>, Chen Chao<sup>1,2</sup>, Du Jinsong<sup>1</sup>, Zhang Shuangxi<sup>1</sup>

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Hubei Subsurface Multi-scale Imaging Key Laboratory, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** In order to investigate the material migration of crust and mantle after the formation of large impact basins, a study on the undulation of crust-mantle interface, using new lunar gravity data is carried out. This has an important significance for the research of the formation and evolution of impact basin. The forward modeling of the gravity anomaly established by filling mare basalts in Sinus Iridum-Mare Imbrium basin area shows that the gravity anomaly only accounts for about 8% in the amplitude of total Bouguer gravity anomaly, while the rest 92% is mainly related to the perturbation of crust-mantle interface. The edge detection of the Bouguer gravity anomaly at different observing heights in Sinus Iridum-Mare Imbrium area indicates that the crust-mantle interface beneath the area of Sinus Iridum-Mare Imbrium northwest leans to the center of Mare Imbrium with increasing depth. It is concluded that extra mantle uplifts to Sinus Iridum area in the crust-mantle interface may have been caused by the impact forming Mare Imbrium basin. This or the later Sinus Iridum impact may have induced a second effect on the crust-mantle structure beneath Mare Imbrium basin. During the lunar mantle rebounds, there may have been a force dragging the mantle beneath the Mare Imbrium toward the Sinus Iridum area.

**Key words:** Moon; Sinus Iridum-Mare Imbrium area; crust-mantle structure; gravity; edge detection.

月球是人类探测和研究程度最高的地外天体(欧阳自远等, 2002)。月球重力场是探测月球内部的重要手段, 可用于研究月球浅部构造、深部结构和层

圈形态特征, 为早期月球内部演化研究提供证据。人类获得的第一个月球重力场模型来源于前苏联的Luna 10探测器轨道参数。随着一系列探月计划的

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(No. 41104048); 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(Nos. CUG090106, CUG100701, CUG130106)。

**作者简介:** 王旭媛(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事重力数据处理与解释研究。E-mail: geoxu1991@126.com

\* **通讯作者:** 梁青, E-mail: qliang@cug.edu.cn

**引用格式:** 王旭媛, 梁青, 陈超, 等, 2015. 月球虹湾—雨海盆地壳幔结构. 地球科学——中国地质大学学报, 40(9): 1566-1575.

实施,2009年日本月亮女神计划(Selenological and Engineering Explorer,简称SELENE)利用卫星跟踪卫星的方式,首次实现对远月面的直接观测(Namiki *et al.*, 2009);2011年美国宇航局发射“圣杯”(Gravity Recovery and Interior Laboratory,简称GRAIL)双星探测器对月球进行重力测量,得到660阶次(Konopliv *et al.*, 2013; Lemoine *et al.*, 2013)和900阶次(Konopliv *et al.*, 2014)的月球重力场模型,其精度和分辨率都有了很大程度的提高。

目前,我国嫦娥工程已经进入第2阶段,嫦娥三号在月球雨海西北部“虹湾着陆区”实现软着陆,并开展了次表层探测任务。虹湾属于月湾,经历了复杂的地质构造演化历史,与虹湾紧邻的雨海属于月海,是月球质量瘤盆地之一,其西北部与虹湾相接。在月球形成后的几十亿年里,大量星体撞击月球表面,形成直径至数百公里的盆地或撞击坑,它们塑造了月球地貌,改变了月壳乃至月幔物质的分布,对月球地质与内部构造演化产生了重要的影响。研究表明,虹湾形成于雨海撞击事件之后的一次独立撞击,其后又经历了虹湾和雨海盆地多期次的玄武岩充填(Schaber, 1969; 乔乐等, 2013; Qiao *et al.*, 2014)。雨海盆地是由大型撞击作用而形成,其后经历的最大撞击就是雨海西北缘的虹湾撞击,它给雨海地区的西北部带来了较大的影响(许延波等, 2012a)。这两次相邻的撞击作用,除了在地形地貌上的影响外,对虹湾和雨海盆地下方的壳幔结构也可能产生较大的影响。

月球大型撞击盆地的形成演化与壳幔结构的关系一直是月球研究的重要内容。利用重力场可以获得地下物质分布信息,例如在假设月壳物质密度分布不均匀而月幔密度均一的条件下, Wicczorek *et al.* (2013)根据GRAIL提供的420阶次月球重力场模型,反演获得了月球壳幔界面起伏模型。然而对于复杂的月幔物质分布,该模型仅能反映一个平均深度。本文利用美国GRAIL探测器得到的660阶次月球重力场模型GL0660B,结合美国月球轨道激光高度计(lunar orbiter laser altimeter,简称LOLA)获得的720阶次月球地形模型(Smith *et al.*, 2010),对虹湾—雨海盆地的布格重力异常特征进行分析,尝试利用不同解算高度场源边界提取的方法,研究该地区下方的壳幔结构。

## 1 重力异常场源边界信号提取方法

在重力场理论中,一般可以通过向上延拓(即将

重力异常数据换算到更高观测面)的方法减弱浅部场源的重力异常,相对突出深部场源的重力异常特征,达到识别壳幔界面起伏的目的。在对月球卫星重力异常的研究中,通过改变重力异常的解算高度,即可实现向上延拓。对重力异常变化规律进行分析时,可以提取场源形状在观测面投影的边界,即进行场源边界信号提取。

### 1.1 场源边界提取方法

利用现有的边界检测方法,笔者可以从异常图中提取出边界构造线。本文将边界识别效果较好的Canny算法(Canny, 1986)应用于月球重力异常。Canny算法的基本原理为:采用高斯函数的一阶导数作为滤波器,通过卷积运算对图像进行降噪,寻找滤波后图像梯度的局部极大值,作为图像边缘。算法具体步骤可分为以下4步(肖锋, 2009; 肖锋等, 2011)。

(1)利用高斯滤波器平滑图像,去除图像噪声。

二维高斯函数一般可以表示为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

其中, $\sigma$ 的大小决定平滑效果。将高斯函数模板 $G(x, y)$ 和图像 $f(x, y)$ 进行卷积运算即可得到平滑图像。

(2)计算滤波之后图像梯度的幅值和方向。根据求导和卷积的可交换性,利用高斯函数在 $x$ 和 $y$ 方向上的导数分别对图像滤波可以得到图像梯度:

$$E_x = \frac{\partial G}{\partial x} * f(x, y), \quad (2)$$

$$E_y = \frac{\partial G}{\partial y} * f(x, y), \quad (3)$$

进而可得到图像梯度的强度和方向,其中梯度方向可近似在 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 方向上。

(3)抑制梯度幅值的非极大值。如果取一个局部窗口,窗口中心点的梯度强度在梯度方向上与相邻点的梯度强度相比不是最大,则该点就不属于边缘点,其将被置零。然而,通过此过程获得的边缘点也有可能是由噪声造成的局部极大值点。

(4)采用双阈值法判断边缘点。设置高低阈值,梯度强度大于高阈值的点属于边缘点,小于低阈值的点不属于边缘点,处于高低阈值之间的点,如果其周围相邻点有大于高阈值的,则也属于边缘点。相对于常规的只设置一个阈值的方法,双阈值法更能减少边缘检测的间断。

### 1.2 场源形态与场源边界提取结果的关系

为了研究不同解算高度异常的场源边界信号提取结果能否反映深部场源形态变化,笔者在球坐标系下建立了月球内部3个不同形态的场源模型,其

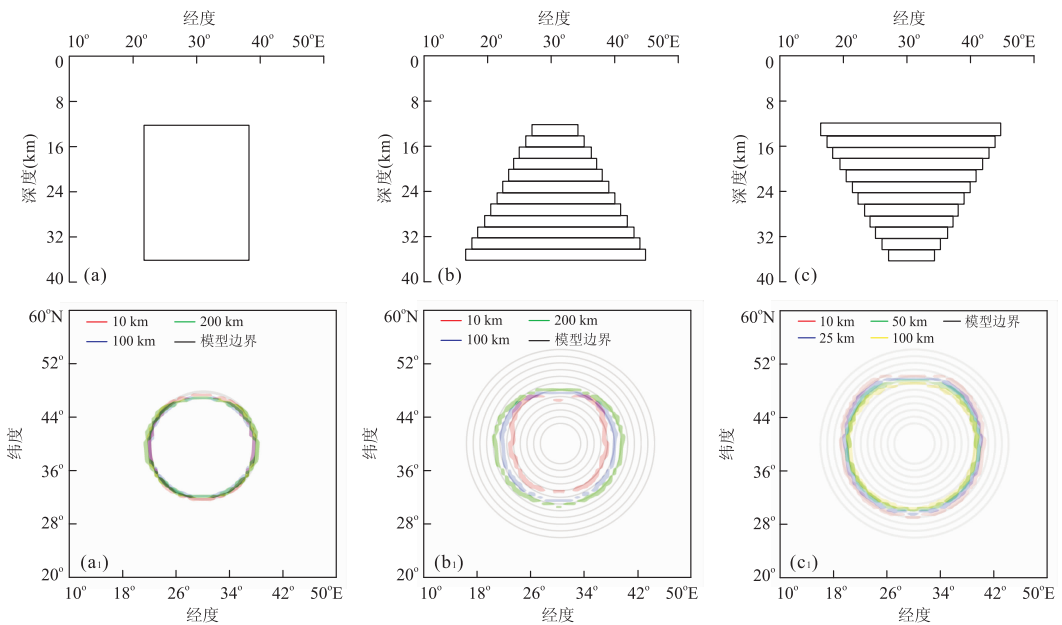


图 1 理论模型垂向剖面(a、b 和 c)及场源边界提取结果(a<sub>1</sub>、b<sub>1</sub> 和 c<sub>1</sub>)

Fig. 1 Three models' vertical profiles (a, b and c) and source boundary extraction results (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub> and c<sub>1</sub>)  
a, a<sub>1</sub>. 模型 1; b, b<sub>1</sub>. 模型 2; c, c<sub>1</sub>. 模型 3

纵向剖面如图 1a~1c 所示. 模型 1 为直立圆柱模型, 随深度增加, 其圆柱面在球面投影的边界保持不变; 模型 2 为正立的圆锥状模型, 上顶面面积小于下底面面积, 圆锥侧面在月面投影的边界随深度增加向外扩展; 模型 3 为倒立的圆锥状模型, 与模型 2 相反, 其球面投影的边界随深度增加向内收缩. 以 Wiczorek *et al.* (2013) 得到的壳幔界面深度模型作为参考, 3 个场源模型上下面的深度分别为 12 和 36 km, 场源物质的剩余密度为  $0.6 \text{ g/cm}^3$ .

分别正演计算多个解算高度的重力异常, 并提取 3 个模型场源边界. 正演计算时, 重力异常数据网格间距为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 异常解算高度为 10、25、50、100 和 200 km, 对其分别进行场源边界信号提取, 结果如图 1a<sub>1</sub>~1c<sub>1</sub> 所示.

图 1a<sub>1</sub>~1c<sub>1</sub> 中的黑色细线为模型各层面在参考球面上的投影. 第 1 个模型为一个垂直圆柱体, 从其场源边界提取结果(图 1a<sub>1</sub>)可以看出, 对不同解算高度重力异常识别的场源边界基本重合, 与模型边界投影的位置几乎一致. 结果表明当场源形状仅在垂向延伸而在横向上不变化时, 随着重力异常高度的变化, 所识别的场源边界信号不变, 且与真实场源边界几乎重合.

第 2 个模型是由 12 个底面直径不同的圆盘构成一个圆锥体, 各层厚度均为 2 km, 从浅到深, 圆柱体底面直径依次增大. 场源边界提取结果(图 1b<sub>1</sub>)显示,

当场源体积随深度增大、边界向四周扩展时, 随异常解算高度增大, 所识别的场源边界也向外扩展.

第 3 个模型是第 2 个模型的倒置, 从浅到深, 圆锥横截面直径逐渐减小. 场源边界提取结果(图 1c<sub>1</sub>)表明随着重力异常解算高度的增大, 提取的边界向内收缩, 与真实模型形状的变化趋势一致.

通过上述 3 组模型试验, 笔者认为利用不同观测高度的重力异常进行场源边界信号提取, 可以反映场源形态随深度变化的趋势.

## 2 虹湾—雨海盆地地形与布格重力异常

虹湾属于月湾之一, 是雨海西北部重要的“海湾”, 其中心经纬度坐标为  $44.1^\circ\text{N}$  与  $31.5^\circ\text{W}$ , 直径为 259 km, 底部面积约  $47\,750.927 \text{ km}^2$ . 从东北部到西南部, 虹湾被侏罗山脉所环绕, 并分别通过西南角的赫拉克莱特海角和东北角的拉普拉斯海角与雨海相邻(乔乐等, 2013; Qiao *et al.*, 2014). 虹湾内部地势较为平坦, 海拔为  $-3\,200 \sim -2\,000 \text{ m}$ , 地势具有从 SE 至 NW 方向的下降趋势. 与环绕虹湾地区的侏罗山脉相比, 虹湾地区呈现了明显的地势下陷, 显示出撞击盆地特征.

雨海是月球上的第二大月海, 其中心经纬度坐标为  $32.8^\circ\text{N}$  与  $15.6^\circ\text{W}$ , 直径约为 1 160 km, 东靠澄

海,西接风暴洋,北邻冷海,为一系列环形山所包围。雨海盆地形成于约 3.85 Ga,之后被后期月海玄武岩充填形成雨海 (Wilbelms, 1987; 许延波等, 2012b)。从整体范围来看,雨海地势较低,地形起伏不大。根据 LRO\_LTM04\_720 月球地形模型,月球平均半径为 1 737.153 km,最大起伏为 10.783 km,笔者选取月球参考半径为 1 738 km,计算得到虹湾—雨海地区地形如图 2 所示。

根据重力场理论,扰动位对径向求负梯度可得到自由空间重力扰动,即:

$$\delta g = -\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} (C_n^m \cos m\lambda + S_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos\theta), \quad (4)$$

式中,  $\delta g$  为自由空间重力扰动,  $T$  为扰动位,  $G$  为万有引力常数,  $M$  为月球质量,  $R$  为月球平均半径,  $\theta$  及  $\lambda$  分别为余纬度和经度,  $r$  为半径,  $C_n^m$  和  $S_n^m$  是规格化球谐系数,  $P_n^m(\cos\theta)$  为正则化连带勒让德函数,  $n$  和  $m$  为球谐函数的阶与次。

相比于自由空间重力异常,使用自由空间重力扰动能够考虑大地水准面与参考椭球之间的物质质量产生的影响 (Kaban *et al.*, 2003)。杜劲松等 (2012) 认为,自由空间重力扰动计算高度所在的球面应该高于月表起伏的最高点,因此,本文利用月球重力场模型 GL0660B,结合前文月球平均半径及地形最大起伏情况,选取月球参考半径 1 738 km,计算距参考球面 10 km 高度上的自由空间重力扰动。

自由空间重力扰动是月表地形物质和内部物质质量分布不均匀所共同引起的,为了研究月球内部结构,需要进行地形校正,消除地形物质的影响。由于月壳物质密度存在不均匀性,例如月球高地地区平均密度为 2.55 g/cm<sup>3</sup>,横向密度变化为 ±0.25 g/cm<sup>3</sup>

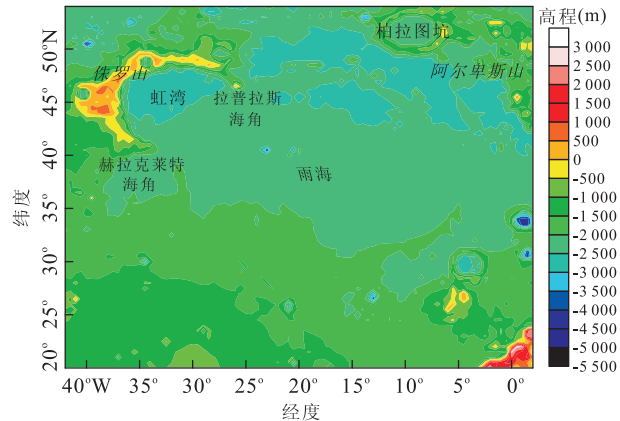


图 2 虹湾—雨海盆地地形

Fig. 2 Topography of Sinus Iridum-Mare Imbrium basin area

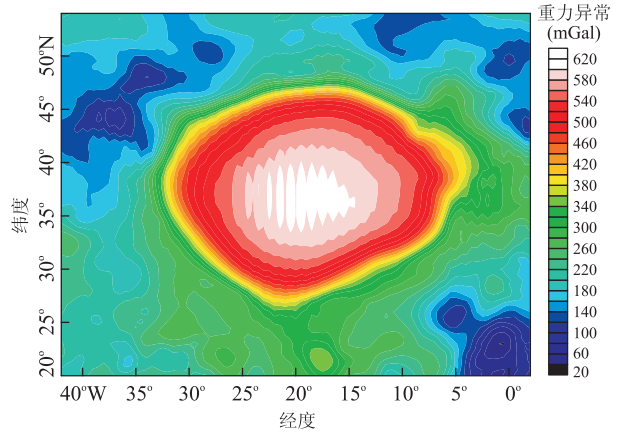


图 3 虹湾—雨海地区距参考球面 10 km 高度处布格重力异常

Fig. 3 Bouguer gravity anomaly of Sinus Iridum-Mare Imbrium basin area in height of 10 km away from reference sphere

(Wieczorek *et al.*, 2013),而月海地区月壳及其上覆玄武岩密度普遍高于高地地区 (Kiefer *et al.*, 2012a; Huang *et al.*, 2014),并且目前仍没有准确的月海地区月壳密度分布模型,因此, Zuber *et al.* (2013) 和 Andrews-Hanna *et al.* (2013) 在进行地形校正时,均选取全月壳平均密度为 2.56 g/cm<sup>3</sup>。本文参考其选取的全月壳平均密度,采用球坐标系中 Tesseroid 单元体方法 (Heck and Seitz, 2007),选取地形起伏参考面半径 1 738 km,计算地形起伏物质在距参考球面 10 km 高度上的引力效应,最终得到地形校正后的重力异常。其反映了内部物质密度的差异,为便于理解和表述,笔者在此称其为布格重力异常 (图 3)。

如图 3 所示,布格重力异常存在 NW 向的条带干扰,条带效应的产生一方面和轨道的分布有关,另一方面是由于位系数的相关性导致。由于 660 阶次的月球重力场模型的精度和分辨率已经有很大程度的提高,全球的条带效应并不十分明显,本文利用高斯滤波技术来去除干扰。加入高斯滤波因子后的重力异常计算表达式为:

$$\delta g' = \frac{GM}{R^2} \sum_{i=2}^{\infty} \sum_{j=0}^i (i+1) W_i \left(\frac{R}{r}\right)^{i+2} (C_i^j \cos j\lambda + S_i^j \sin j\lambda) \bar{P}_i^j(\cos\theta), \quad (5)$$

式中,  $W_i$  为高斯滤波因子,其递推计算公式为 (Swenson and Wahr, 2002; 朱广彬, 2007):

$$\begin{cases} W_0 = \frac{1}{2\pi}, \\ W_1 = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{1 + e^{-2b}}{1 - e^{-2b}} - \frac{1}{b} \right), \\ W_{i+1} = -\frac{2i+1}{b} W_i + W_{i-1}, \end{cases} \quad (6)$$



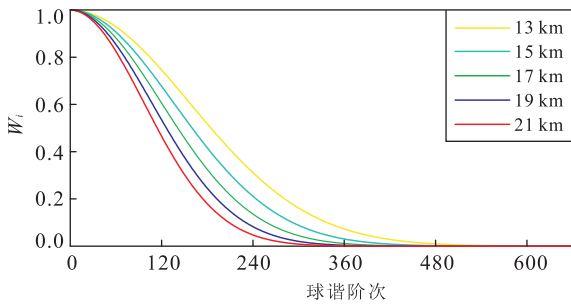


图 4 不同高斯滤波半径下,高斯滤波因子  $W_i$  随球谐阶次变化曲线

Fig. 4 Curves of Gaussian filtering factor  $W_i$  changing with the degree of spherical harmonics under different radiuses of Ganssian filter

其中,  $b = \ln 2 / [1 - \cos(r/R)]$ ,  $r$  为高斯平滑半径,  $R$  为月球平均半径.

笔者分析了不同高斯滤波半径对应的高斯滤波因子  $W_i$  随球谐阶次变化曲线(图 4),在 660 阶以内,随着球谐阶次的增加,  $W_i$  的值逐渐下降趋于零值,表明高阶项所占的权重变小;随滤波半径越大,  $W_i$  值下降得越快.

通过对一系列滤波半径结果进行对比,笔者选取高斯滤波半径为 15 km,这样既能消除条纹干扰,又能尽可能保留重力异常高频信号.从滤波前后重力异常差值图中可以明显地看到所去除的条纹干扰(图 5b).

由滤波后的布格异常图(图 5a)可以看出,在环绕虹湾—雨海的山脉处呈明显的布格重力异常相对低,与地球山脉地区表现出重力异常相对低值的现象类似.在虹湾内部,沿 NW-SE 方向重力异常呈增大趋势;沿 NE-SW 方向,表现为中部的重力异常高,即在虹湾东南部存在相对重力异常高值.雨海质量瘤中部表现为明显的圆形重力异常高,其被相对重力低值所

包围,异常变化明显,为典型质量瘤盆地异常特征.

月海地区布格重力异常中包含月幔上隆、实际月壳密度偏离平均密度以及由玄武岩剩余密度所造成的影响.月海地区由于覆盖有玄武岩层,因而难以准确计算下方的月壳密度.在估算了虹湾—雨海地区月壳密度变化( $\pm 0.2 \text{ g/cm}^3$ )的重力效应后,笔者认为其对虹湾—雨海地区布格重力异常影响不大.因此,在布格重力异常中显示的雨海中部和虹湾东南部存在的相对高密度物质包括了浅部填充的玄武岩以及深部上涌的月幔两部分.本文对虹湾—雨海地区玄武岩引起的重力异常进行正演模拟,分析其对虹湾—雨海地区布格异常的影响,以及去除其影响之后的重力异常分布特征.

### 3 盆地内玄武岩重力异常

#### 3.1 虹湾—雨海地区玄武岩分布

虹湾与雨海地区相邻,经历的玄武岩填充期次情况基本相同.许延波等(2012b)的研究结果表明,雨海地区月海玄武岩充填活动具有多期次性,每期月海玄武岩的充填流动大体上保持由南向北方向,并且活动规模逐步减小.

不同期次岩浆的物质成分存在差异,需要进行玄武岩单元的划分,Clementine 假彩色合成影像可以明显地区分出玄武岩成分之间的差异.Hiesinger *et al.* (2000, 2011)用此方法对虹湾—雨海地区月海玄武岩进行了单元划分,并运用撞击坑尺寸—频率分布法对各单元进行了年龄估算,并给出其分布面积.Oshigami *et al.* (2014)根据日本月亮女神号上搭载的月球雷达探测仪 LRS(Lunar Radar Sounder)提供的数据,估算了 2.7~3.8Ga 填充的月海玄

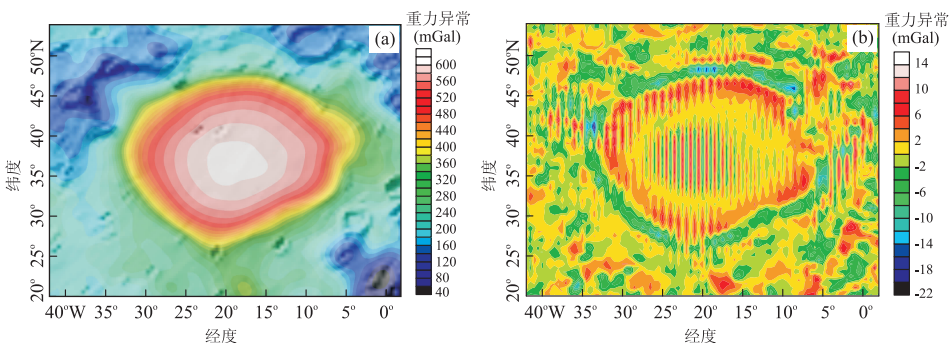


图 5 虹湾—雨海地区布格重力异常(a)及滤波前与滤波后布格重力异常差值(b)

Fig. 5 Filtered-Bouguer gravity anomaly (a), as well as the difference of original- and filtered-Bouguer gravity anomaly (b) of Sinus Iridum-Mare Imbrium basin area

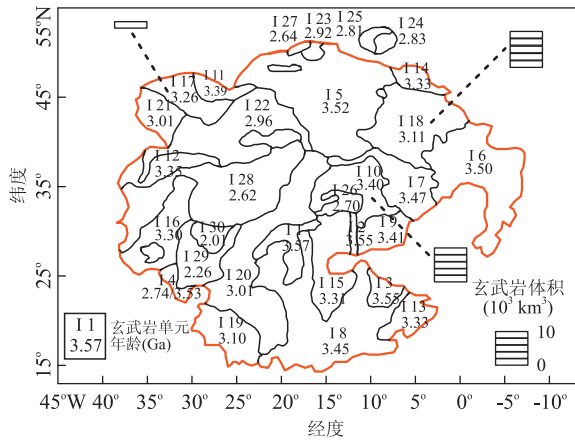


图 6 虹湾—雨海地区玄武岩单元划分及其年龄、体积估算  
Fig. 6 Sketch of mare basalt units in Sinus Iridum-Mare Imbrium showing unit numbers and model ages in billion years, and estimated volumes of three units defined by previous studies

年龄据 Hiesinger *et al.* (2000, 2011); 体积估算据 Oshigami *et al.* (2014)

表 1 虹湾—雨海地区 3 个玄武岩单元厚度信息统计表

Table 1 Thickness information of three magmatic units in Sinus Iridum-Mare Imbrium

地质单元	体积( $\text{km}^3$ )	面积( $\text{km}^2$ )	厚度(km)
I10	$1 \times 10^4$	4 792	2.1
I17	$2 \times 10^3$	1 463	1.4
I18	$1 \times 10^4$	5 604	1.8

玄武岩单元的体积. 根据其得到的结果, 各单元的体积达到  $10^3 \sim 10^4 \text{ km}^3$ . 图 6 为根据上述结果得到的虹湾—雨海地区玄武岩单元分布图.

由图中玄武岩单元面积及体积, 可以近似估算虹湾—雨海地区的玄武岩厚度. 表 1 为图 6 中 3 个玄武岩单元(I10、I17 和 I18)厚度的估算.

根据 Thomson *et al.* (2009)得到的雨海玄武岩填充结果显示: 在雨海盆地中心, 玄武岩厚度至少为 2 km, 其他区域的为 1.5~2.0 km, 与表 1 中的结果较为一致. 因此, 本文选取虹湾—雨海地区玄武岩平均厚度为 2 km. Kiefer *et al.* (2012b)得到月球玄武岩密度范围为  $3.01 \sim 3.27 \text{ g/cm}^3$ , 本文取玄武岩平均密度为  $3.14 \text{ g/cm}^3$ .

### 3.2 玄武岩重力异常正演模拟

结合前人对虹湾—雨海地区玄武岩单元分布的划分, 利用 2.7~3.8 Ga 之间填充的月海玄武岩单元的体积估算, 以及月球玄武岩密度范围的确定, 本文建立了一个单层玄武岩模型: 选取玄武岩平均厚度为 2 km, 平均密度  $3.14 \text{ g/cm}^3$ , 由于地形校正时选取的月壳平均密度为  $2.56 \text{ g/cm}^3$ , 因而采用的剩

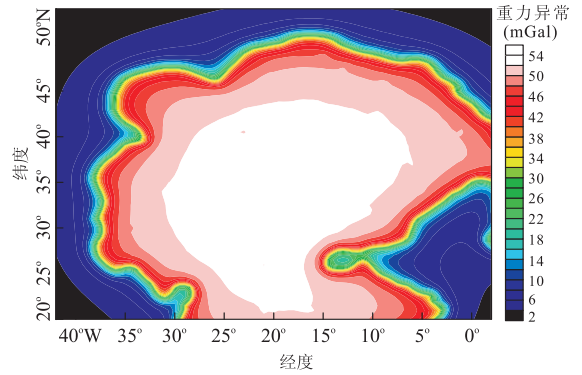


图 7 玄武岩重力异常正演模拟

Fig. 7 Forward modeling of basalt's gravity anomaly

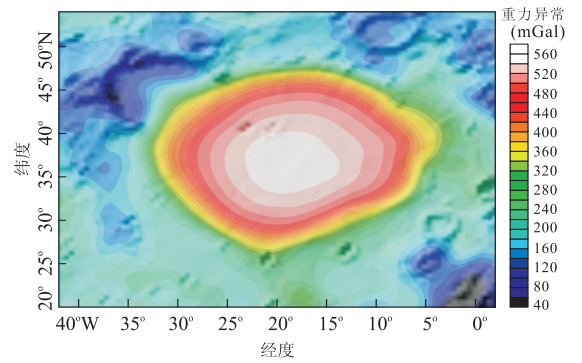


图 8 减去玄武岩重力效应后的剩余布格重力异常

Fig. 8 Residual Bouguer gravity anomaly after removing the gravity anomaly of a single-layer basalt model

余密度为  $0.58 \text{ g/cm}^3$ . 玄武岩模拟区域如图 6 中橙色边界圈定的区域, 本文在球坐标系下对该区域玄武岩在相对参考球面 10 km 高度处引起的重力异常进行了正演模拟(图 7).

玄武岩填充引起的重力异常仅约占该地区布格重力异常幅值的 8%, 说明盆地中填充的高密度玄武岩对盆地布格重力异常影响很小. 将玄武岩产生的重力异常从布格重力异常中减去, 得到剩余布格重力异常(图 8), 异常特征与布格重力异常类似, 在相应区域仍存在明显的相对重力异常高, 因此, 笔者认为该地区深部月幔上隆引起的相对高密度异常应是布格重力异常特征形成的主要原因. 同时, 通过对剩余布格重力异常进行的研究, 则可反映月幔上隆形成的壳幔结构情况.

## 4 虹湾—雨海地区壳幔界面起伏研究

### 4.1 虹湾—雨海地区场源边界提取

通过前文研究, 虹湾—雨海盆地剩余布格重力

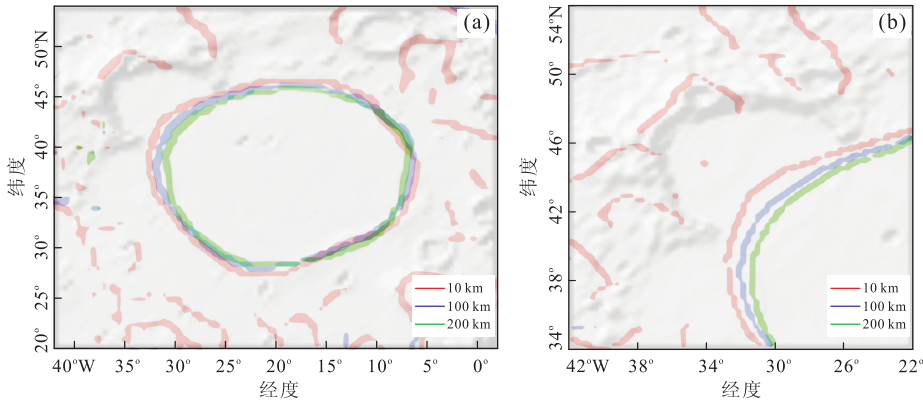


图 9 虹湾—雨海地区(a)及虹湾地区(b)不同解算高度剩余布格重力异常场源边界提取结果

Fig. 9 Source boundaries beneath Sinus Iridum-Mare Imbrium basin (a) and Sinus Iridum area (b) extracted from residual Bouguer gravity anomalies at different height levels

红线、蓝线、绿线分别代表 10、100 和 200 km 观测高度上的剩余布格重力异常边界提取结果

异常主要由月幔物质上涌所引起。雨海盆地属质量瘤盆地,形成时月幔物质大量上涌是其主要特征之一;虹湾形成于雨海撞击后的又一次独立撞击事件,这次撞击可能会对雨海下方的物质分布产生影响。根据 1.1 节场源边界提取方法,将 Canny 算法应用于剩余布格重力异常,通过对不同观测高度的异常进行场源边界信号提取,可以在一定程度上反映虹湾—雨海深部场源几何特征,进而对其下方的壳幔结构进行研究。

本文分别对虹湾—雨海地区相对参考椭球面 10、100 以及 200 km 观测高度上的剩余布格重力异常进行场源边界信号提取,并将提取结果进行对比(图 9)。

从图 9a 可以看出,在虹湾—雨海地区,随着剩余布格重力异常解算高度的增加,提取的场源边界整体具有向东南方向变化的趋势,图 9b 虹湾地区边界提取结果更明显地体现了这一变化。说明在虹湾—雨海西北部,场源边界随深度增加会有向雨海内部收缩的趋势,即壳幔界面有一个由虹湾向雨海方向的下降加深,其与模型 3 场源边界提取结果相似。而在雨海东南部,其与模型 2 的场源变化趋势一致,为向雨海外侧扩展。

通过边界提取结果,笔者可以得到壳幔界面变化趋势,但不能定量各边界所对应的场源深度信息。Wieczorek *et al.* (2013) 根据 GL0420A 模型数据,基于布格重力异常反演了 4 个月壳厚度模型。本文采用其中一个模型,月壳平均厚度为 34 km,最小厚度为 0.6 km,月幔密度为  $3.22 \text{ g/cm}^3$ ,得到虹湾—雨海地区的壳幔界面高程(图 10)。根据得到的结果,壳幔界面深度与布格重力异常有着较好的镜像

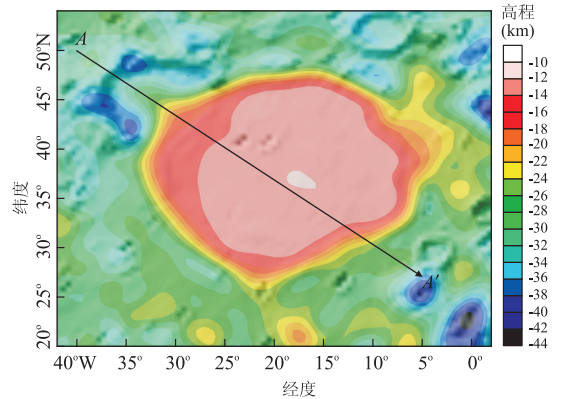


图 10 虹湾—雨海地区壳幔界面高程

Fig. 10 Elevation of crust-mantle boundary beneath Sinus Iridum-Mare Imbrium basin area

关系,沿 NW-SE 方向穿过虹湾—雨海地区截取剖面 AA',壳幔界面深度情况如图 11a 黑色实线所示。其壳幔界面随深度变化特征整体与模型 2 提取结果相对应,壳幔界面范围在深部宽、在浅部较窄;在虹湾—雨海西北部地区,边界向虹湾方向扩展,在雨海东南部向雨海外侧扩展。因此在虹湾—雨海西北部地区,本文得到的壳幔界面变化趋势与 Wieczorek *et al.* (2013) 的结果有所不同。

本文在 Wieczorek *et al.* (2013) 反演结果的基础上,结合得到的场源边界变化趋势,对虹湾—雨海西北部的壳幔结构进行了修改,使其随深度增加有一个由虹湾向雨海中心的倾斜,如图 11a 红色虚线所示。同时,笔者利用修改后的壳幔界面结构进行了重力异常正演,所得结果与 AA' 剖面剩余布格重力异常值有较好的吻合(图 11b),即修改后的壳幔界面也能与剩余布格重力异常特征相对应。笔者根据



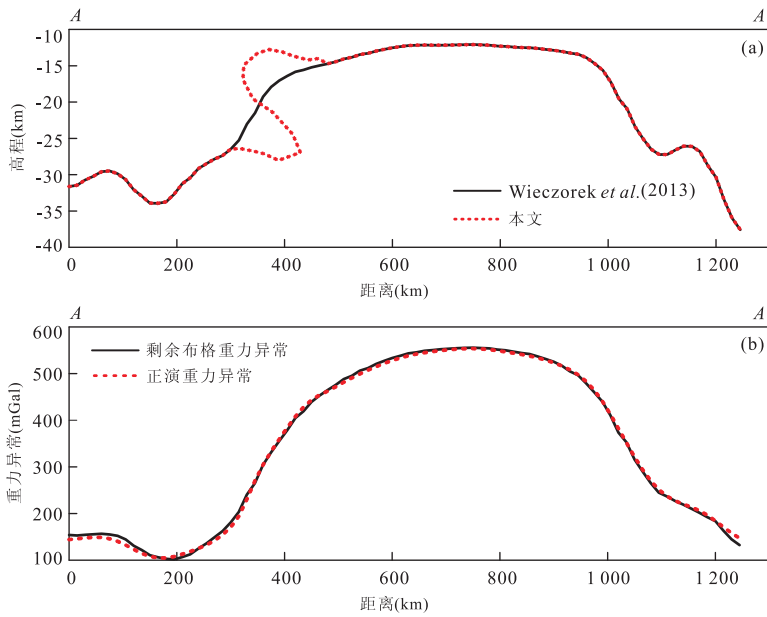


图 11 虹湾-雨海地区 AA'剖面壳幔界面高程示意图(a)及本文壳幔结构正演重力异常与原始剩余布格重力异常结果对比(b)  
 Fig. 11 Elevation of the crust-mantle boundary (a), as well as the gravity anomaly forward of speculated crust-mantle structure and residual Bouguer gravity anomaly under profile AA' (b)

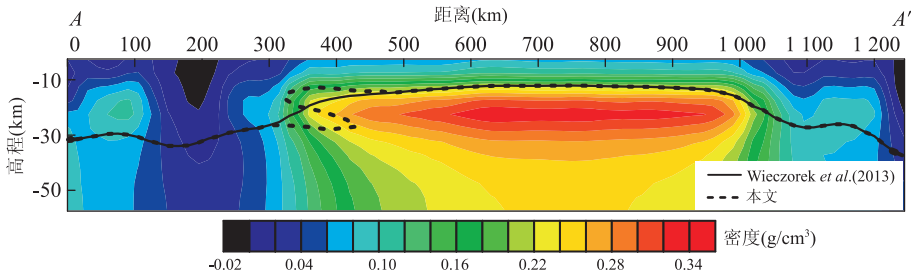


图 12 虹湾-雨海地区 AA'剖面密度结构  
 Fig. 12 Inversion of density structure below profile AA'

上述结果推测,在虹湾-雨海西北部壳幔界面有向西北方向凸起,月幔物质可能曾向此方向涌动。

#### 4.2 三维密度结构成像

从另一角度来看,对剩余布格重力异常(图 8)进行三维密度反演,可以获得虹湾-雨海地区壳幔三维密度结构(Liang et al., 2014),图 12 为 AA'剖面下方密度分布情况。

密度变化能够在一定程度上反映界面信息。从图 12 中可以看出,雨海质量瘤盆地下方的高密度物质分布是中心非对称的,在雨海东南部较厚,西北部较薄。从纵向上看,随深度增大,高密度物质在虹湾-雨海西北部向雨海中心聚集,与本文得到的壳幔界面趋势有一定的相似之处;而在雨海东南部,浅部高密度物质的展布趋势与 4.1 节以及 Wieczorek et al. (2013)得到的结果一致。

### 5 讨论与结论

通过得到的不同解算高度的重力异常场源边界信号提取结果,结合雨海质量瘤形成时可能存在的月幔上涌情况以及前人给出的月壳厚度模型和三维密度结构反演结果,笔者认为在虹湾-雨海相接地区,壳幔界面有一个由虹湾向雨海方向的下降加深,即会有一个向虹湾方向的额外上隆,可能为月幔物质曾向此方向涌动造成。

根据 Montesi(2013)和 Melosh et al. (2013)讨论的质量瘤盆地形成过程,当月球遭受撞击时,撞击溅射物抛射在盆地边缘,使其月壳增厚,而盆地内撞击坑下方的物质(包括月幔物质)均被压缩。撞击物弹出时,由于压力释放,月壳与月幔产生反弹作用;同时,撞击过程中的动能转为摩擦热能,温度升高使得物质熔融,盆地边缘厚的地壳和盆地下方月幔物



质密度降低. 根据重力分异理论, 较轻的低密度物质会上浮, 那么在以上两种低密度物质上浮的拖动下, 盆地有所抬升. 随着月表逐渐冷却, 盆地边缘低密度月壳和内部高密度物质的运动会趋于稳定, 但深部高密度物质由于反弹效应会继续推动月幔上涌, 而使整个盆地继续被抬升, 直至撞击盆地整体被补偿(深部高密度物质平衡了月表的质量亏损). 最终在盆地内部结构稳定时, 盆地下方深部为高密度物质, 边缘外环为低密度物质, 形成质量瘤盆地特点. 雨海质量瘤盆地的形成过程与此类似.

质量瘤盆地的深部结构与星体的撞击速率、撞击时的月壳强度、深部热梯度等多种因素有关(杜劲松等, 2010; Melosh *et al.*, 2013). 对于虹湾—雨海盆地下方壳幔界面结构的形成, 笔者一方面认为在雨海撞击形成时, 不同区域月壳和月幔物质密度、强度分布、受力等情况的不同, 可能使得雨海盆地下方月幔上隆时有向虹湾方向的涌伸; 另一方面, 考虑到虹湾形成于雨海撞击事件之后, 形成虹湾的撞击也可能对雨海质量瘤盆地下方的壳幔结构产生二次影响, 在虹湾地区的壳幔回弹过程中, 对雨海下方的物质有拖动作用, 使其向虹湾方向运移, 进而形成笔者所推测的壳幔结构特征.

本文采用的方法和所得结果为该区域壳幔结构形成与演化提供了另一种解释, 也为同类撞击盆地的相关研究提供了新思路.

致谢: 本文得到项目组成员王林松、王秋革、孙石达、李端等人的指导和帮助, 同时评审专家对本文提出了宝贵的建议, 所用的重力球谐系数和地形数据取自美国 NASA PDS Geosciences Node Data 中心, 在此一并表示感谢!

## References

Andrews-Hanna, J. C., Asmar, S. W., Head, J. W., et al., 2013. Ancient Igneous Intrusions and Early Expansion of the Moon Revealed by GRAIL Gravity Gradiometry. *Science*, 339(6120): 675—678. doi:10.1126/science.1231753

Canny, J., 1986. A Computational Approach to Edge Detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6): 679—698. doi:10.1109/TPAMI.1986.4767851

Du, J. S., Chen, C., Liang, Q., et al., 2012. Lunar Gravity Anomaly and Its Computational Method. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 37(11): 1369—1373, 1385 (in Chinese with English abstract).

Du, J. S., Liang, Q., Chen, C., et al., 2010. Deep Structure and Impact Evolution of Lunar Mascon Basins. *Geolog-*

*ical Science and Technology Information*, 29(5): 134—142 (in Chinese with English abstract).

Heck, B., Seitz, K., 2007. A Comparison of Tesseroid, Prism and Point-Mass Approaches for Mass Reductions in Gravity Field Modeling. *Journal of Geodesy*, 81(3): 121—136.

Hiesinger, H., Head, J. W., Wolf, U., et al., 2011. Ages and Stratigraphy of Lunar Mare Basalts: A Synthesis. *Geological Society of America Special Papers*, 477(1): 1—51. doi:10.1130/2011.2477(01)

Hiesinger, H., Jaumann, R., Neukum, G., et al., 2000. Ages of Mare Basalts on the Lunar Nearside. *Journal of Geophysical Research*, 105(E12): 29239—29275. doi:10.1029/2000JE001244

Huang, Q., Xiao, Z. Y., Xiao, L., 2014. Subsurface Structures of Large Volcanic Complexes on the Nearside of the Moon: A View from GRAIL Gravity. *Icarus*, 243: 48—57. doi:10.1016/j.icarus.2014.09.009

Kaban, M. K., Schwintzer, P., Artemieva, I. M., et al., 2003. Density of the Continental Roots: Compositional and Thermal Contributions. *Earth and Planetary Science Letters*, 209(1): 53—69. doi:10.1016/S0012-821X(03)00072-4

Kiefer, W. S., Macke, R. J., Britt, D. T., et al., 2012a. The Density and Porosity of Lunar Rocks. *Geophysical Research Letters*, 39(7): L07201. doi:10.1029/2012GL051319

Kiefer, W. S., Macke, R. J., Britt, D. T., et al., 2012b. Regional Variability in the Density of Lunar Mare Basalts and Implications for Lunar Gravity Modeling. 43rd Lunar and Planetary Institute Science Conference, Woodlands.

Konopliv, A. S., Park, R. S., Yuan, D. N., et al., 2013. The JPL Lunar Gravity Field to Spherical Harmonic Degree 660 from the GRAIL Primary Mission. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(7): 1415—1434. doi:10.1002/jgre.20097

Konopliv, A. S., Park, R. S., Yuan, D. N., et al., 2014. High-Resolution Lunar Gravity Fields from the GRAIL Primary and Extended Missions. *Geophysical Research Letters*, 41(5): 1452—1458. doi:10.1002/2013GL059066

Lemoine, F. G., Goossens, S., Sabaka, T. J., et al., 2013. High-Degree Gravity Models from GRAIL Primary Mission Data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(8): 1676—1698. doi:10.1002/jgre.20118

Liang, Q., Chen, C., Li, Y. G., 2014. 3D Inversion of Gravity Data in Spherical Coordinates with Application to the GRAIL Data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(6): 1359—1373. doi:10.1002/2014JE004626

Melosh, H. J., Freed, A. M., Johnson, B. C., et al., 2013. The Origin of Lunar Mascon Basins. *Science*, 340

- (6140);1552—1555. doi:10.1126/science.1235768
- Montesi, L. G. J., 2013. Solving the Mascon Mystery. *Science*, 340(6140):1535—1536. doi:10.1126/science.1238099
- Namiki, N., Iwata, T., Matsumoto, K., et al., 2009. Farside Gravity Field of the Moon from Four-Way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya). *Science*, 323(5916):900—905. doi:10.1126/science.1168029
- Oshigami, S., Watanabe, S., Yamaguchi, Y., et al., 2014. Mare Volcanism: Reinterpretation Based on Kaguya Lunar Radar Sounder Data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 119(5):1037—1045. doi:10.1002/2013JE004568
- Ouyang, Z. Y., Zou, Y. L., Li, C. L., et al., 2002. Prospect of Exploration and Utilization of Some Lunar Resources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5):498—503 (in Chinese with English abstract).
- Qiao, L., Xiao, L., Zhao, J. N., et al., 2013. Geological Features and Magmatic Activities History of Sinus Iridum, the Moon. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 43(11):1370—1386 (in Chinese).
- Qiao, L., Xiao, L., Zhao, J. N., et al., 2014. Geological Features and Evolution History of Sinus Iridum, the Moon. *Planetary and Space Science*, 101: 37—52. doi:10.1016/j.pss.2014.06.007
- Schaber, G. G., 1969. Geologic Map of the Sinus Iridum Quadrangle of the Moon, I—602 (LAC-24). US Geological Survey, Washington D. C. .
- Smith, D. E., Zuber, M. T., Neumann, G. A., et al., 2010. Initial Observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA). *Geophysical Research Letters*, 37(18):L18240. doi:10.1029/2010GL043751
- Swenson, S., Wahr, J., 2002. Methods for Inferring Regional Surface-Mass Anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) Measurements of Time-Varying Gravity. *Journal of Geophysical Research*, 107(B9):ETG 3-1-ETG 3-13. doi:10.1029/2001JB000576
- Thomson, B. J., Grosfils, E. B., Bussey, D. B. J., et al., 2009. A New Technique for Estimating the Thickness of Mare Basalts in Imbrium Basin. *Geophysical Research Letters*, 36(12):L12201. doi:10.1029/2009GL037600
- Wieczorek, M. A., Neumann, G. A., Nimmo, F., et al., 2013. The Crust of the Moon as Seen by GRAIL. *Science*, 339(6120):671—675. doi:10.1126/science.1231530
- Wilhelms, D. E., 1987. The Geologic History of the Moon. United States Government Printing Office, Washington D. C. .
- Xiao, F., 2009. Study on Gravity Data Processing Method and Apply It to Sylvite Mine Exploration (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Xiao, F., Wu, Y. G., Meng, L. S., 2011. Edge Enhancement and Detection Technology in Gravity Anomaly Map. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(4):1197—1203 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. B., Yan, D. P., Yu, T. S., et al., 2012a. Distribution Characteristics and Controlling Factors of Lunar Mare Ridges in Mare Imbrium. *Earth Science Frontiers*, 19(6):60—71 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. B., Yan, D. P., Yu, T. S., et al., 2012b. The Filling Process of Mare Basalts from Late Imbrian to Eoarchean in Mare Imbrium. *Acta Geologica Sinica*, 86(8):1306—1319 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. B., 2007. Investigations on Time-Variations of Continental Water Storage with GRACE Gravity Models (Dissertation). Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zuber, M. T., Smith, D. E., Watkins, M. M., et al., 2013. Gravity Field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission. *Science*, 339(6120):668—671. doi:10.1126/science.1231507

#### 附中文参考文献

- 杜劲松, 陈超, 梁青, 等, 2012. 月球重力异常及其计算方法. 武汉大学学报: 信息科学版, 37(11): 1369—1373.
- 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.
- 欧阳自远, 邹永廖, 李春来, 等, 2002. 月球某些资源的开发利用前景. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 498—503.
- 乔乐, 肖龙, 赵健楠, 等, 2013. 月球虹湾地区地质特征解译及岩浆活动历史研究. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 43(11): 1370—1386.
- 肖锋, 2009. 重力数据处理方法的研究及其在钾盐矿勘探中的应用(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 肖锋, 吴燕凤, 孟令顺, 2011. 重力异常图中的边界增强和提取技术. 吉林大学学报(地球科学版), 41(4): 1197—1203.
- 许延波, 颜丹平, 俞天石, 等, 2012a. 雨海地区月岭分布特征及控制因素分析. 地学前缘, 19(6): 60—71.
- 许延波, 颜丹平, 俞天石, 等, 2012b. 雨海地区晚雨海世—爱拉托逊纪月海玄武岩充填过程研究. 地质学报, 86(8): 1306—1319.
- 朱广彬, 2007. 利用 GRACE 位模型研究陆地水储量的时变特征(硕士学位论文). 北京: 中国测绘科学研究院.