

Two Lunar Far-Side BGA Mascons Identified by Chang'E-1*

Jinsong Ping^{1,2,3}, Xiaoli Su^{3,4}, Jianguo Yan⁵, Qian Huang⁶, Qing Liang⁶

¹Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, National Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²State Key Laboratory of Astronautic Dynamics, Xi'an

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

⁴Research Center for Astro-Geodynamics, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

⁵State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan

⁶Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan

Email: jsping@bao.ac.cn, xlsu@shao.ac.cn, jgyan@shao.ac.cn

Received: Jun. 5th, 2013; revised: Jun. 25th, 2013; accepted: Jul. 3rd, 2013

Copyright © 2013 Jinsong Ping et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: By combining the lunar gravity field with the lunar topography model, the interior structure of lunar crust and mantle can be recovered, and the mascon area can be also recovered and investigated in some detail. Using the Chang'E-1 lunar topography model and the updated lunar gravity model by Chang'E-1 data, two middle size mascon basins, Fitzgerald-Jackson basin and Amundsen-Ganswindt basin are newly identified as BGA mascon basin. Also, the large BGA signal eliminates the uncertainty of existence of the Amundsen-Ganswindt basin together with the image data. Chang'E-1 data have some advantages on discovering the middle size lunar hidden basins.

Keywords: Chang'E-1; Moon; Lunar Gravity; Topography; Mascons

“嫦娥”-1 号探测数据新证认两个月球 背面质量瘤区域*

平劲松^{1,2,3}, 苏晓莉^{3,4}, 颜建国⁵, 黄倩⁶, 梁青⁶

¹中国科学院国家天文台月球与深空探测重点实验室, 北京

²宇航动力学国家实验室, 西安

³中国科学大学, 北京

⁴中国科学院上海天文台天文地球动力学研究中心, 上海

⁵武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉

⁶中国地质大学地球科学院, 武汉

Email: jsping@bao.ac.cn, xlsu@shao.ac.cn, jgyan@shao.ac.cn

收稿日期: 2013 年 6 月 5 日; 修回日期: 2013 年 6 月 25 日; 录用日期: 2013 年 7 月 3 日

摘 要: 月球重力场与地形数据组合, 可以揭示月球壳、幔等内部结构, 还可以揭示月亮中的物质分布异常集中的区域 - 质量瘤区域。利用“嫦娥”-1 月球地形模型, 并结合优化的月球重力场, 新证认“嫦娥”-1 发现的月球背面中尺度撞击盆地 Fitzgerald-Jackson、以及南极区域的 Amundsen-Ganswindt 是两个质量瘤异常区。同时也进一步确认了 Amundsen-Ganswindt 盆地的存在, 消除了在这个问题上的不确定性。这类中尺度的月球质量瘤的发现证明了“嫦娥”-1 号月球探测数据在测月学研究中具有独特的优势和特点。

关键词: “嫦娥”一号; 月球; 月球重力场; 地形; 质量瘤

*资助信息: 本研究得到了中国国家自然科学基金和中国科学院月球与深空探测重点实验室相关课题的支持。

1. 引言

在月球的演化过程中,逐渐形成了月球物理和地貌的二分性,主导了从月幔到月表的主要的天文和地质特征。在形貌上体现在其正面多月海,地势平坦;背面多高地和撞击坑,地形起伏较大。在重力上正面存在许多较大的质量异常区,而背面的重力异常主要由高地和南极盆地主导。对月球二分形的高精度探测,有利于清晰地揭示月球演化历程。

目前对月球和类地行星等星体壳幔结构分布、内核成分及大小、岩石圈厚度等科学问题的研究主要是利用重力和地形的资料。和其它类地行星一样,在月球重力数据中包含了关于月球物理性质、内部结构、起源演化等信息资料,是月球物理场中重要的信息组成部分。利用月球重力场并结合其它约束条件,可以为揭示月球内部物理特征、探究月球深部构造及层圈形态、研究早期月球内部物质演化与运动过程提供强有力的证据^[1,2]。月球和行星重力场的异常是其星体表面形状的起伏和内部物质密度空间异常分布共同产生的。通过卫星重力的方法可以得到星球的自由空间重力场异常分布,进一步地从中扣除平均密度条件下地形起伏引起的重力异常部分,就得到了单纯反映地下物质密度分布的重力场异常分布,即布格重力异常。布格重力异常是研究月球和类地行星内部构造的物理场依据。高精度重力场模型可以弥补月震观测的不足对月核研究带来的限制或缺陷,对改进相关研究具有重要的理论意义和应用价值^[3,4]。为此,月球重力探测仍然是当今国际月球探测的重要科学目标之一。

我国研究者梁青等人基于月球质量瘤的基本定义——月壳中物质密度相对周边大、产生的引力效应强,判定了在强密度时可以直接通过自由空间重力异常寻找到质量瘤,这是历史上常用的传统方法;同时,可以利用布格重力异常的方法,寻找到地形凹陷、或平坦,物质体积与周边相当或相对要小而自由空间引力效应与周边相当,这些区域的布格重力异常很大,仍然是密度较高的区域,表现为“隐形”质量瘤区域。他们利用嫦娥-1 月球地形模型^[5],结合 LP 和 SELENE 得到的月球重力异常模型生成了新的布格重力异常分布,发现了月球南极盆地是月面上最大的质量异常区域^[6],为证明 Aitken 盆地的形成来源于一次巨大的天体撞击提供了有力的证据,也为寻找质量瘤

提供了非常有效的方法。

本文根据嫦娥一号卫星得到的月球重力资料和地形模型,采用球坐标地形校正方法,计算出月球全球布格重力异常。在此基础上,认证了“嫦娥”-1 号发现的背面中尺度盆地之一 Fitzgerald-Jackson 盆地是一个质量瘤区域,并且在认证南极区域 Amundsen-Ganswindt 盆地的一个质量瘤异常区的同时,也进一步确认了 Amundsen-Ganswindt 盆地的真实存在,消除了自 1969 年以来提出这个盆地以来,在这个问题上的不确定性。

2. “嫦娥”-1 月球重力场

2.1. “嫦娥”-1 之前的月球重力场探测概况

月球重力场是研究月球物理性质及内部结构、月球的起源和演化等科学问题的主要的手段^[1]。由于绕月卫星受到了从内到外、从正面到背面的月球全部物质质量的引力作用,卫星重力方法可以方便地实现对月球重力场的测量。

在对月球重力进行探测时,历史上比较完备的探测是日本于 2007 年 8 月发射的探月计划“月女神”一号和早期美国发射的 LP 探测器。LP 只实现了全月球重力场和正面高分辨率重力场的观测。“月女神”一号利用四程卫星中继无线电测量技术,首次实现了对月球背面月球重力场短波长成分的直接测量。“月女神”一号得到的月球重力场模型 SGM90^[4,7]和 SGM100h^[8]。相比于 LP 系列模型^[3]在月球背面有显著的改进,并发现了月球背面的环状包围的质量异常区。

上述两个计划的探测主要通过对 100 公里高度的极轨道卫星的测量得到的,而且“月女神”卫星平均 6~9 小时的一次动量轮卸载,使得其对月球重力场探测存在一定的限制,最新的 SGM100 h 模型在多方面仍然需要继续优化。于 2009 年 6 月发射的美国新千年重返月球的第一个探测计划 LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter)^[9],在 50 km 高的圆极轨道在轨运行一年,其主要科学目标就是获取月面高精度高分辨率地形及月球重力场。另外,2011 年美国将发射的月球探测计划 GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory),大大地提高了月球重力场探测的分辨能力和精度,结果将于 2013 年底发布。这一计划将采用地

球重力场探测计划 GRACE 的卫星 - 卫星跟踪测量模式, 用于高精度月球重力场模型探测, 预期精度将比重力场模型 SGM90d 提高三个数量级^[10]。

2.2. “嫦娥”一号测量数据反演月球重力场方法

“嫦娥”一号绕月探测卫星于 2007 年 10 月 24 日发射, 经过调相段、地 - 月转移段、月球捕获段和环月飞行段等多次轨道调整后, 成为绕月飞行的极轨圆轨道卫星, 轨道平均高度为 200 km^[10], 在任务期间积累了大量的测距测速跟踪数据。分析表明, 使用“嫦娥”一号测控数据可以有效反演 50 阶次以内的月球全球重力场, 而对更高阶次的重力成分不太敏感^[11]。利用这些数据独立地解算了月球重力场模型^[12], 验证了数据的有效性, 对现有月球重力模型进行了优化。

“嫦娥”一号月球探测器跟踪测量主要由中国卫星测控网青岛和喀什两测控站的双程测距测速数据, 数据采样率为 1 s。重力反演中还使用了“月女神”一号数据包括中继星、VRAD 星及主卫星的双程测距测速数据, 中继星与主卫星的四程测速数据, 以及由美国 JPL/NASA 深空网跟踪站获得的 1960 年代发射的 Apollo15 与 16 号子卫星、Lunar Orbiter I-V 及 Celestine 等探测器的轨道跟踪数据。此外还包括 LP 正常任务段跟踪数据。

绕月卫星精密定轨和月球重力场模型解算中用到重力场球谐函数表达形式^[13-15]:

$$V(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[\sum_{n=0}^{N_{\max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r} \right)^n \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \right],$$

式中 r , λ , φ 分别是月心球坐标系下月理坐标系中的向径和经纬度, GM 为月球引力常数, R 为参考球半径(文中取为 1738.0 km), $\bar{C}_{nm}$ 和 $\bar{S}_{nm}$ 为待估计的完全正则化斯托克斯参数。重力场的解算通过动力法定轨解析得到。

解算中用到了 10 个月的“嫦娥”一号测量数据, 对 100 阶次的重力场进行解析, 发现重力场位系数得到改进。图 1 给出了包括引入全部 10 个月“嫦娥”一号测距测速数据的解算模型与先验重力场模型的功率谱密度曲线, 即阶方差 δ_n (sig) 与误差阶方差 δ_n (sigvar) 曲线图, 二者的计算公式分别为^[15]:

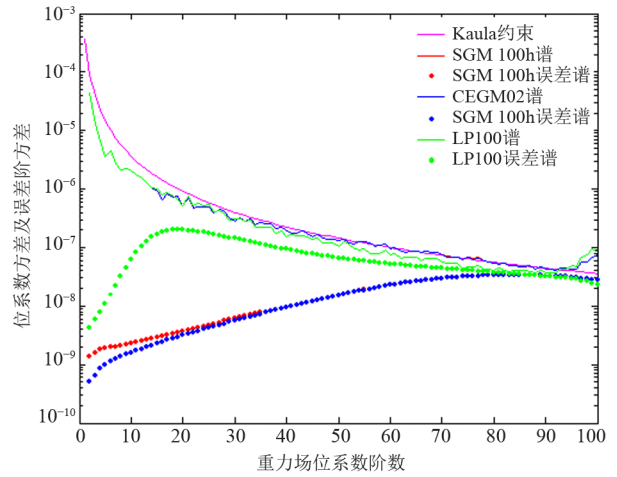


Figure 1. Spectra of lunar gravity field models
图 1. 各模型位系数方差及误差阶方差

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2)}{2n+1}}; \delta_n = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^n (\sigma_{\bar{C}_{nm}}^2 + \sigma_{\bar{S}_{nm}}^2)}{2n+1}},$$

式中 $\bar{C}_{nm}$, $\bar{S}_{nm}$ 是 n 阶 m 次完全正则化的位系数, $\sigma_{\bar{C}_{nm}}$, $\sigma_{\bar{S}_{nm}}$ 分别是相应位系数的方差, 用于表示重力场在频率域中的强度, 误差阶方差则可以反映重力场的误差。

图 1 中还包括了 SGM100h 的阶方差和误差阶方差, 同时给出了 LP100K 模型作为比较。“嫦娥”一号卫星的轨道构型对月球重力场长波长信息的提取有利。得到的 CEGM02 模型对 20 阶次以下的部分有改善, 20 阶次以上部分主要来自 LP 和“月女神”一号卫星的贡献。可以看出, 对重力场长波段误差而言, SGM100h 和 CEGM02 比 LP100K 有显著改进, 融入“嫦娥”一号跟踪数据对重力场长波段的精度改进也较为显著。图 2 给出了本研究得到的月球参考半径 1738 公里表面的自由空气重力场异常, 图中可以清晰地看到月面典型的质量异常区。

3. 新的质量异常区的认证

月球和行星重力场的异常是其星体表面形状的起伏和内部物质密度空间异常分布的共同产生的。利用月球重力场并结合其它约束条件, 可以为揭示月球内部物理特征、探究月球深部构造及层圈形态、研究早期月球内部物质演化与运动过程提供强有力的证据。

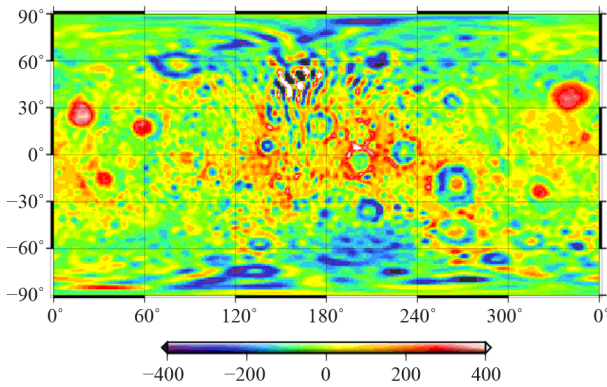


Figure 2. Free air gravity of the moon on the surface of reference radii 1738 km (Unit: mgal)
图 2. 月球参考半径 1738 公里处球面上的自由空气重力场异常(单位: 毫伽)

通过卫星重力的方法可以得到星球的自由空间重力场异常分布。如 2010 年获得的 SGM100h 模型, 以及文献^[16]得到的 CEGM-02 模型。进一步地从自由空间重力场中扣除平均密度条件下地形起伏引起的重力异常部分, 就可以得到布格重力异常。沿用 Wiczorek^[2]建议的方法, 采用变换了的球谐式和球面向下延拓滤波计算地形起伏物质的引力效应, 获得了全月球零高程观测面上的布格重力异常数据。为了保证计算的有效性, 根据重力场模型的全球有效范围, 重力和地形模型都截止到了 65 阶次。

这里作者使用梁青等人^[6]建议的利用布格质量异常的方法判定“隐形”高密度区域的方法, 结合 CLTM-s01 月球地形模型和本研究得到的月球重力场模型, 在经过了地形重力异常改正之后得到了月球布格重力异常的分布。进一步针对黄倩等人^[5]证认的月球背面的撞击盆地和撞击坑进行了研究, 通过布格重力异常的结果, 发现其中一个古老的中尺度撞击盆地菲兹杰拉德-杰克逊盆地与一个明显的质量瘤异常区对应, 根据其地形、地貌和重力特征, 可以将其归入 Namiki 等人^[4]建议的第二类质量瘤类型。

菲兹杰拉德 - 杰克逊/Fitzgerald-Jackson 盆地位于菲兹杰拉德撞击坑与杰克逊撞击坑之间, 该盆地被后续的撞击把盆底彻底侵蚀破坏了, 从照相的图片上看不到明显的环形壁的包围, 而且从照相数据上几乎看不到显著的凹陷。图 3(a)给出了由激光测高数据得到的菲兹杰拉德 - 杰克逊盆地地形图, 它显示出了较为明显的撞击凹陷特征。该盆地的中心点位于(25°N, 191°E), 直径大约为 470 km, 深度约-2~4 km。该撞

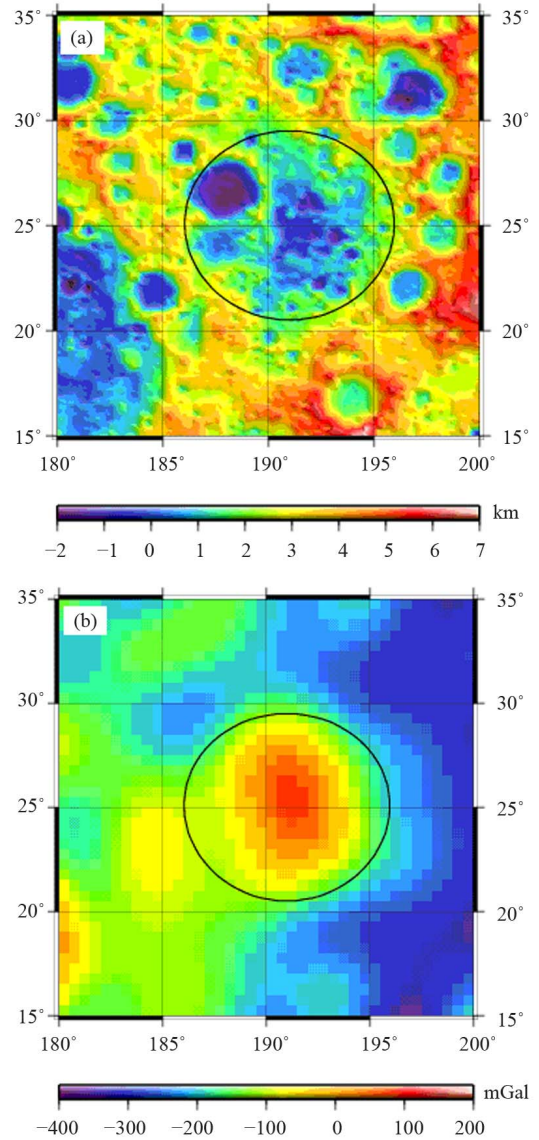


Figure 3. Topography and gravity of Fitzgerald-Jackson basin: (a) topography; (b) Buoguer gravity anomaly
图 3. 菲兹杰拉德 - 杰克逊盆地地形与重力: (a) 新地形模型得到的盆地地形; (b) 布格重力异常

击盆地东北边缘被一系列撞击坑所挤压, 无法确认原始盆地的凹陷结构, 并且该盆地还存在一定的退化现象。图 4(b)给出的是利用新地形与重力模型计算得到的布格重力异常情况。图上表明, 该区域与周围存在着约 300 mgal 的布格重力异常, 配合地形数据, 可以较为清晰地证明这个区域是由一个早期的撞击演化形成的。进一步的类比表明, 这个区域的年龄在前酒海纪或更早一些。

南极区域的阿门德森 - 甘斯温特/Amundsen-Ganswindt 盆地最早是在 1969 年阿波罗时代被提及或

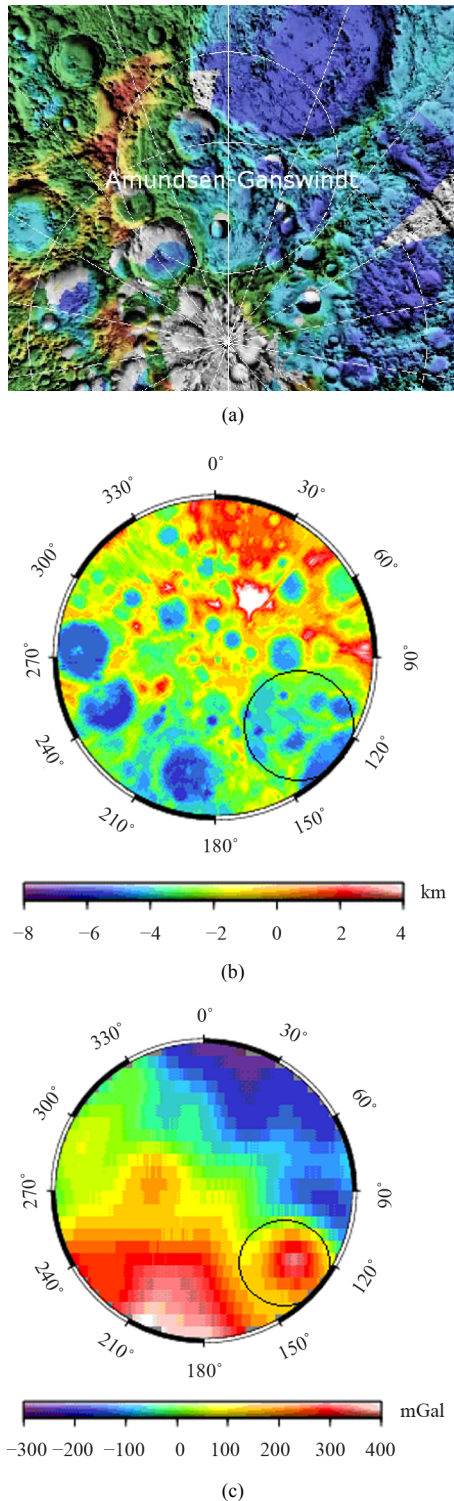


Figure 4. Amundsen-Ganswindt basin: (a) Image; (b) Topography; (c) Buoguer gravity anomaly
图 4. 阿门德森 - 甘斯温特盆地: (a) 影像图; (b) 嫦娥-1 地形图; (c) 嫦娥-1 布格重力异常

发现。在当时获得的影像中，这里隐隐约约是一个 335 公里直径的区域凹陷的，不能完全确认是一个盆地，

因其位于阿门德森和甘斯温特两个撞击坑之间而得名。1994 年发射升空的 Clementine 探测器得到了这个区域的新的影像图，在图 4(a)中给出。这时的影像图由于没有直接的激光高度计数据，仍然无法完全确定该地区为盆地，该盆地的存在与否一直是一个争议问题。直到嫦娥-1 号发射升空后，顺利地获取了该地区的地形图，如图 4(b)所示，可以清晰地看到与周围区域比较，该地区要凹陷 3~5 公里，周围被很陡的峭壁所环绕。利用嫦娥-1 地形数据和重力异常数据，如图 4(c)可以确定该地区的中心位置在东京 122 度、南纬 85 度，直径 335 公里。与历史上早期判定的中心位置相比较要更靠南 4 度左右。与菲兹杰拉德 - 杰克逊盆地类似，该地区的布格重力异常非常强，达到了 300~400 毫伽，是典型的布格重力异常区 - 质量瘤地区。历史观测表明，该地区属于比较古老的前酒海纪。

从嫦娥-1 的地形数据和布格重力异常数据可以清晰地确认上述两个地区是盆地区域，消除了历史上对后者的不确定性。进一步证明了嫦娥-1 测月学数据在揭示中尺度月面地形地貌特征方面的独特优势，并且为发现隐性存在的月面盆地提供了一个新的途径和方法。

4. 讨论

撞击盆地的地形通常表现为中圆形的凹陷，其典型的特征包括 2 重环状结构的存在，即外缘的隆起和内部环的峰。在月球上存在的直径约 200 公里盆地的地形多表现出这种环 - 峰盆地结构。直径更大的撞击盆地地形可以形成为三重或更多重环结构。在月球上，环 - 峰盆地结构盆地大部分的直径超过了 300 公里，但也有少数的盆地直径较小。由于形成盆地的主撞击之后发生的数十亿年间发生的后续撞击和空间环境变化对盆地地貌的破坏和改变，许多直径 300 公里的盆地目前只保留一个单一的地形环。月球盆地记录下了太阳系早期制造撞击的小天体的历史和大小分布特征，以及月球内部壳、上月幔等较浅区域热状态。月球和行星重力场的异常是其星体表面形状的起伏和内部物质密度空间异常分布的共同产生的。利用月球重力场并结合其它约束条件，可以为揭示月球内部物理特征、探究月球深部构造及圈层形态、研究早期月球内部物质演化与运动过程提供强有力的证据。

历史上对月球重力场的分析发现,几乎所有的月球盆地表现出的内部质量显著正异常来源于包括撞击、火山岩或热扰动、岩石圈弹性支撑在内的组合效应。利用“嫦娥”-1 月球地形模型,并结合优化的月球自由空气重力场获得的布格重力异常分布,新证认了曾被“嫦娥”-1 发现的月球背面中尺度撞击盆地 Fitzgerald-Jackson、以及南极区域的 Amundsen-Ganswindt 是两个质量瘤异常区。同时也进一步确认了 Amundsen-Ganswindt 盆地的存在,消除了在这个问题上的不确定性。上述发现证明“嫦娥”-1 号月球探测数据在对月球中尺度结构的探测研究中具有独特的优势,新揭示的两个地形和地貌上隐蔽的质量瘤异常盆地对研究月球的壳幔结构和火成演化过程很有意义。这类研究如果使用未来将公布的 GRAIL 卫星重力场模型,将获得更高精度和空间分辨率的分析结果。

5. 致谢

本文研究得到了中国绕月探测工程一期和二期任务的支持。月球布格重力异常分析工作得到了陈超教授的有益的意见和建议,部分工作使用了 IPGP 研

究所发布的 SHTOOL 工具软件包进行了比较和确认。

参考文献 (References)

- [1] Zuber M T, Smith D E, Lemoine F G, et al. Sci, 1994, 266: 1839.
- [2] Wieczorek M A, Phillips R J. JGRE, 1998, 103: 1715.
- [3] Konopliv A S, Asmar S W and Yuan D N. Icar, 2001, 150: 1.
- [4] Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Sci, 2009, 323: 900.
- [5] 平劲松, 黄倩, 鄢建国, 等. 中国科学 G 辑, 2008, 38: 1601.
- [6] 梁青, 陈超, 黄倩, 等. 中国科学 G 辑, 2009, 39: 1379.
- [7] Goossens S, Matsumoto K, Ishihara Y, et al. EOSTr, 2008, 89: 53.
- [8] Matsumoto K S, Goossens Y, Ishihara Y, et al. JGRE, 2010, 115: E06007.
- [9] Mazarico E, Lemoine F G, Neumann G A, et al. EOSTr, 2008, 89: 53.
- [10] Zuber M T, Smith D E, Alkalai L, et al. Sci, 2013, 339: 668.
- [11] Yan J G, Ping J S, Li F, et al. AdSpR, 2010, 46: 50.
- [12] 鄢建国, 李斐, 平劲松, 等. 地球物理学报, 2010, 53: 28431.
- [13] Rowlands D D, Marshall J A, McCarthy J, et al. GEODYN II System Description. Vols. 1-5. Contractor Report, Hughes STX Corp. Greenbelt, Maryland, 1997.
- [14] Kaula W M. Sci, 1969, 166: 1591.
- [15] Ullman R E. SOLVE program: Mathematical formulation and guide to user input. Hughes/STX Contractor Report, Contract NAS5-31760. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, 1994.
- [16] 鄢建国, 平劲松, KOJI Matsumoto, 等. 中国科学 G 辑, 2011, 41: 870.