

基于嫦娥一号地形数据的月球布格重力异常与撞击盆地演化

梁青^{①*}, 陈超^{①*}, 黄倩^②, 陈波^①, 平劲松^②

① 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074;

② 中国科学院上海天文台, 上海 200030

* 联系人, E-mail: qingliang.cug@gmail.com, chenchao@cug.edu.cn

收稿日期: 2009-06-25; 接受日期: 2009-07-18

国家自然科学基金(批准号: 40774060, 10973031)和中国科学院重要方向性项目(编号: KJCX2-YW-T13-2)资助

摘要 月球布格重力异常是研究月球内部物质分布特征的重要参数. 该文基于嫦娥一号激光测高数据, 采用球坐标系地形校正方法, 获得了最新的月球全球布格重力异常. 讨论了南极 Aitken(SPA)盆地形成时的天体撞击方向, 认为 SPA 盆地是月球最大的质量瘤盆地. 通过分析撞击盆地的布格重力异常, 发现月球质量瘤盆地具有不同的特征. 高地型质量瘤盆地高密度物质主要分布在浅部, 为充填的高密度玄武岩质岩石, 而平原型质量瘤盆地的高密度物质主要分布在深部, 为上隆的高密度月幔物质.

关键词

嫦娥一号
月球布格重力异常
质量瘤
盆地演化

月球重力数据是迄今为止人类获得的分布最广、信息最丰富的研究月球内部问题的资料. 月球重力资料是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运动的重要证据^[1,2]. 从物理角度说, 月球重力场的变化是月球表面起伏和月球内部物质密度变化的共同响应. 因此, 从重力测量数据中将地形起伏引起的引力效应去掉, 即可得到单纯反映地下物质密度分布的重力场变化, 即布格重力异常. 布格重力异常是研究月球内部构造的物理场依据. 由于卫星重力数据是通过月球卫星飞行轨道参数换算而来, 相对地面观测数据而言, 对卫星重力数据的地形校正有着不同的方法和意义. 实际上, 对地球(或月球)卫星重力数据进行地形校正时, 所选择的校正基准面应至少高于地球(或月球)上任何高峰.

目前最好的月球重力场球谐模型包括 2001 年的

LP165P模型^[3]和 2009 年的SGM90d模型^[4], 两者在月球正面符合的很好, 但后者在月球背面和两极地区有更高的分辨率和精度^[4]. 在获得月球全球重力场和地形数据之后, 已有许多学者计算了月球布格重力异常. 例如Wieczorek采用变换了的球谐式和球面向下延拓滤波的方法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^[2]. 同样的, Namiki等人^[4]也展示了类似方法得到的布格重力异常图. 这种计算方法是假设月表起伏物质被“压缩”到月球参考球面(即平均半径球面)内. 然而, 卫星飞行高度总是高于月球自然表面, 零或负高程观测面上的布格重力异常物理意义是不明确的. 因此, 将地形校正的基准面定义到高于月球表面并进行地表物质引力计算, 所获得全球布格重力异常才能进行合理的异常解释.

引用格式: 梁青, 陈超, 黄倩, 等. 基于嫦娥一号地形数据的月球布格重力异常与撞击盆地演化. 中国科学 G 辑, 2009, 39(10): 1379—1386
Liang Q, Chen C, Huang Q, et al. Bouguer gravity anomaly of the moon from CE-1 topography data: Implications for the Impact basin evolution. Sci China Ser G, doi: 10.1007/s11433-009-0278-8

全球地形校正需要高精度高分辨率的地形模型。利用嫦娥一号第一次正飞阶段获取的约 300 多万个有效激光测高数据点,平劲松等人^[5](2008)得到了改进的 360 阶次月球全球地形模型(CLTm-s01)。该模型在空间覆盖、模型精度和空间分辨率上较早期模型均有较大改进,与日本STM359_grid-02地形模型^[6]相当。CLTM-s01 揭示月球上最低处位于南极附近巨大低洼地带——Aitken盆地,高程为-9.23 km;最高处位于 Korolev坑以北地区,高出平均参考球面约 9.84 km。Aitken盆地目前被认为是太阳系中陆地地球上最大、最深的撞击盆地。撞击塑造了月球地貌,改变了月壳乃至月幔物质的分布,例如嫦娥一号第一幅照片所揭示的撞击坑、玄武岩充填盆地和斜长岩质高地等地^[7,8]。

月球地质演化过程被 3 个主要事件(酒海、雨海和东方海的形成)划分为 4 个主要阶段,即前酒海纪、酒海纪、早雨海纪、晚雨海纪至哥白尼纪^[9]。在早雨海纪,撞击盆地在随后的岩浆充填或下部月幔物质上涌后是否达到平衡?另一个与之有关的问题,是在许多较大的撞击盆地(月海)范围上重力异常表现出高值正异常,这种现象被解释为盆地存在高密度的质量瘤^[10],它们的布格重力异常表象与自由空气重力异常有何不同?再者,南极Aitken盆地的形成对月球演化起到怎样的影响?这些问题一直是新近月球研究领域最为关注的问题,例如Wieczorek与Le Feuvre(2009)发表的论文认为月球现今正面曾经是背面,由于受某个可能的天体撞击,月球才改变自转速率,使背面绕轴旋转了180°^[11]。可见,研究这类盆地与布格重力异常之关系,对补充与完善撞击盆地的演化理论十分有益,一系列问题都值得做进一步探讨。

本文根据月球重力资料和嫦娥一号地形模型,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,讨论了布格重力异常与撞击盆地的关系,并就质量瘤和南极 Aitken 盆地的形成以及月球演化提出一些见解。

1 月球布格重力异常

传统地形校正的对象是在局部起伏地形面观测到的重力值。高于观测点的地形物质对观测点的引力效应在铅垂方向的分量是向上的,因而会使观测

值减小;低于观测点的地形物质的缺失也使得观测值减小。因此,测点周围起伏地形的影响总是使观测值减小,即地形效应值总是为负。

全球地形校正的对象是在卫星轨道高度观测到的重力异常,考虑了不同于地面测量的重力观测面以及全球地形影响。卫星布格重力异常的计算是通过选择某个高于月球自然表面球面上的自由空间重力异常,再将地形起伏在此球面上引起的引力效应从中去掉,最后获得此球面上的布格重力异常值。如图 1 所示,在求取月表物质引力效应过程中,基准球面需选取高于地形最高峰的任意球面 S_1 。显然,高于球面 S (月球参考球面)的地形物质(图 1 中高于 S 的阴影部分)在 S_1 上产生的引力效应需要从重力值中减掉;而低于球面 S 的月面区域为空,地形校正时需要用物质将这些区域“填充”至球面 S (图 1 中低于 S 的阴影部分),并将这部分填充物质产生的引力效应加到重力值中。计算地形物质引力效应时,物质密度取月球表面岩石平均密度。如此过程相当于将月球视为半径为 R 的标准球体,而在 S_1 面上的布格重力异常则是反映月球自然表面以下那些偏离月球平均密度的物质分布,包括在高于 S 球面的月球内部密度异常体。因此,全球地形效应值将随地形变化有正负之分。

本文采用球坐标系中Tesseroide单元体方法^[12]计

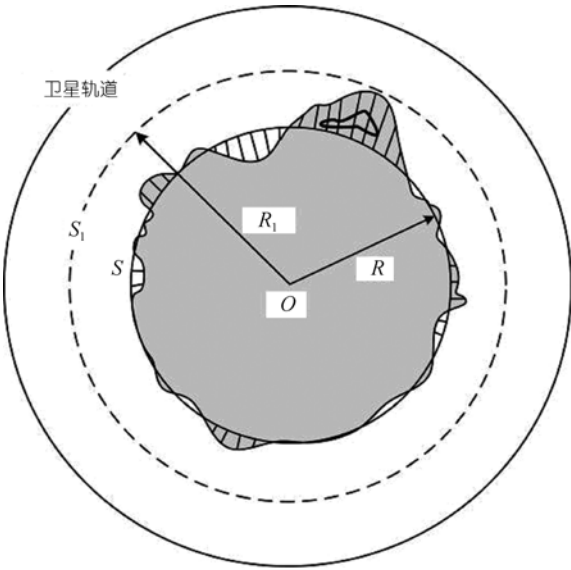


图 1 布格重力异常计算高度示意图
球面 R 为月球平均半径, R_1 为布格异常计算球面半径

算地形起伏物质引起的引力效应. 与传统直角坐标系下的立方单元体类似, Tesseroid表示的是球坐标系下按经纬度网格划分的一个单元体(图 2), 图中Q点为Tesseroid单元的中心点, P点为计算点, r 为点P至球心O的直线距离, r' 为Q至球心距离, l 为P、Q两点间距. 每个单元体物质在某一观测高度引起的引力效应累加即为地形的引力效应值, 详细的公式推导过程见文献[12,13]. 我们采用 2.8 g/cm^3 为月壳平均密度[4], 基于CLTM-s01 计算了 10 km 观测高度的地形物质引力效应值. 计算过程中保持 r_1 恒等于月球平均半径 1738 km , r_2 随地形起伏而变化, 由此得到的地形引力效应值有正负之分(图3). 图中负值区域对应那些被物质“填充”的月海等负高程地区; 而正值区域对应被“切削”的高地. 换言之, 在地形校正过程中未改变月海玄武岩 $3.3\sim 3.4 \text{ g/cm}^3$ 密度值, 仅覆盖了一层平均密度为 2.8 g/cm^3 的月壳物质; 月球斜长岩高地物质被消去后剩余的是高地内部密度异常体.

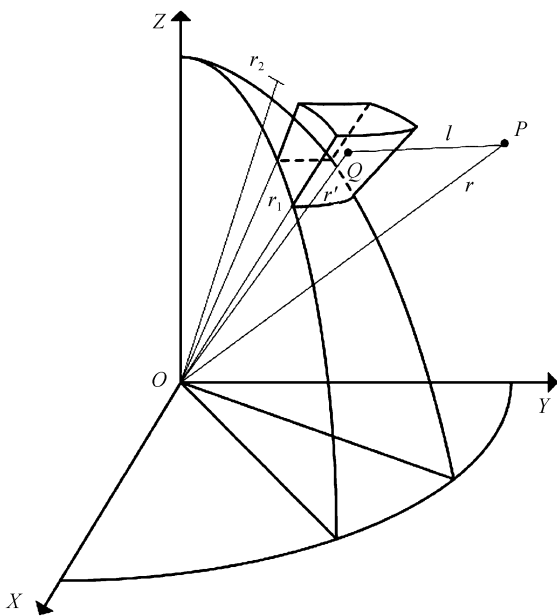


图2 Tesseroid单元体几何示意图, 据文献[12]重绘

图4给出了 10 km 高度上月球全球布格重力异常, 其中自由空间重力异常数据源于 165 阶次的 LP165P 月球重力场模型, 布格重力异常最小值约 -700 mGal , 最大值约 980 mGal , 均值为 246 mGal . 月球布格重力异常揭示了许多因地形起伏所掩盖的重力异常特

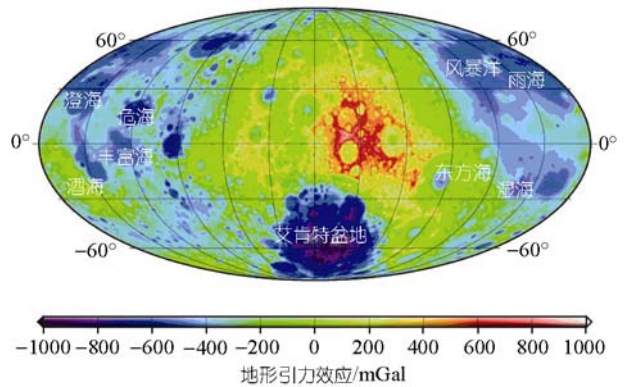


图3 地形起伏引起的引力效应
10 km 高度, 投影中心经线 180°E , 经线间距 30°

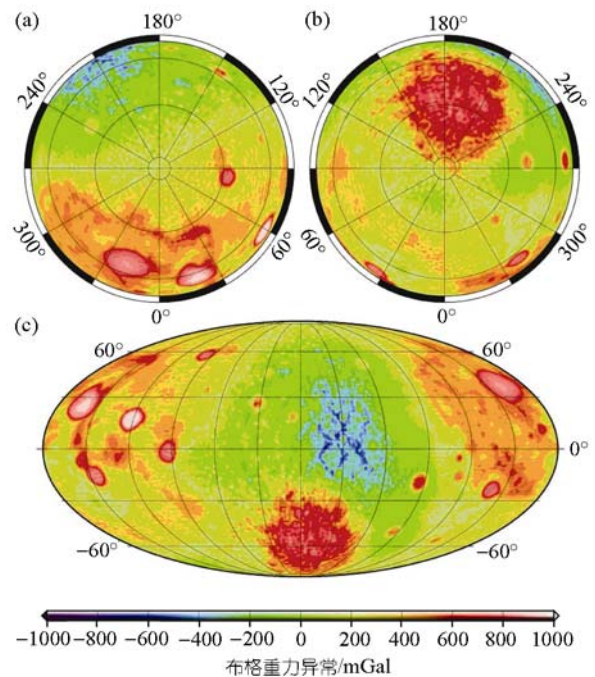


图4 月球布格重力异常
10 km 高度, 经线间距 30° ; (a) 北极; (b) 南极; (c) 中心经线 180°E

征, 如风暴洋一带, 布格重力异常表现为低缓的重力高, 这可能与该地区大面积的玄武岩分布有关. 图中许多位于地势低平、范围大的撞击盆地内的局部重力高受地形影响较小, 如危海, 澄海, 雨海, 酒海, 湿海等, 对应月海内充填的高密度玄武岩以及可能的月球壳幔隆升. 布格重力异常的另一个显著的特征是月球背面的南、北半球差异. 北半球为大片高值负异常, 而南半球则是大片高值正异常, 表明背面南、

北半球物质(至少在月亮以上)成份或密度差异巨大,极不均衡,这与Chambat等人^[4]得到的月亮密度分布是符合的.将月球布格重力异常值与其高程数据进行比较可以发现,异常值与高程呈负相关,宏观上呈现出月亮均衡或趋于均衡的态势.

2 撞击盆地的异常特征

前酒海纪(39.2~45亿年前),月球处于早期形成阶段.月亮逐渐固结,包括风暴洋和Aitken盆地形成过程在内的大型撞击事件,以及稍后时期的平均直径500 km的盆地的形成都在这几亿年时间内发生.酒海纪(38.5~39.2亿年前),一亿年时间段的月球大变动时期,许多大型撞击发生在这一“短暂”时期内.早雨海纪(37.2~38.5亿年前),开掘形成大型月海盆地,形成雨海盆地和东方海盆地;晚雨海纪(32~37.2亿年前),大量小天体撞击月球,火山活动剧烈时期,在月海盆地内大面积月海玄武岩喷发,形成月海充填事件.爱拉托逊纪(12~32亿年前),小天体不断撞击月球,在月陆和月海表面形成大小不等的撞击坑.哥白尼纪(现今~12亿年前),小天体撞击月球,形成有辐射纹的撞击坑,如哥白尼撞击坑.

2.1 质量瘤

质量瘤是指月球上具有高幅值的重力正异常区域,这些区域对应着大小不等的撞击盆地,它们不均匀地分布在月球正面和背面,是月球重力场的最显著的特征之一.以往的探月资料发现质量瘤绝大多数分布在月球正面靠近赤道附近,重力异常基本呈等圆状分布,且异常中部变化平缓,异常边缘形似“陡坎”,如同一个陡然凸起的“高原”,如图4所示的雨海、澄海、危海和东方海几个典型的质量瘤重力异常,这一特征预示着高密度物质的存在^[10].Konopliv等人^[15]根据月球勘探者的重力资料又发现了7个质量瘤重力异常,随着重力异常球谐模型的精细化,更多的质量瘤重力异常被揭示^[3].然而,以上这些质量瘤的辨别均依据自由空间重力异常特征,布格重力异常显示某些质量瘤撞击盆地并不具备前人认为的异常表象.

表1列出了被前人确认的16个质量瘤撞击盆地^[3],其中11个位于月球正面,5个在背面.利用盆地直径与布格重力异常值进行统计,可以发现质量瘤盆地的一些特征.10, 100, 400 km 3个高度上的异常值与盆地直径的关系(图5)均显示质量瘤盆地可以分为两

表1 有质量瘤表象的月球撞击盆地

序号	盆地名称	经度 ^{a)} /(°)	纬度 ^{a)} /(°)	盆地最大直径 ^{b)} /km	年龄 ^{b)}
正面					
1	Crisium (危海)	59	17	1060	N
2	Grimaldi	292	-5	430	pN
3	Humboldtianum (洪保德海)	82	57	700	N
4	Humorum (湿海)	321	-24	820	N
5	Imbrium (雨海)	342	33	1160	LI
6	Mendel-Rydberg	265	-50	630	N
7	Nectaris (酒海)	35	-15	860	N
8	Oriente (东方海)	265	-20	930	LI
9	Schiller-Zucchi	315	-55	325	pN
10	Serenitatis (澄海)	19	27	740	N
11	Smythii (史密斯海)	87	-2	840	pN
背面					
12	Coulomb-Starton	240	51	530	pN
13	Freundlich-Sharonov	175	18	600	pN
14	Hertzprung	230	2	570	N
15	Korolev	202	-4	440	N
16	Moscoviense (莫斯科海)	148	26	445	N
X	South Pole-Aitken ^{c)}	184	-58	2600	pN

a) 经纬度^[3]变化范围 0°~360°, -90°~90°; b) 盆地的最大直径和盆地年龄^[9], LI为早雨海纪, N为酒海纪, pN为前酒海纪; c) 经纬度为本文布格重力异常最大值坐标, 直径和年龄据文献[11]

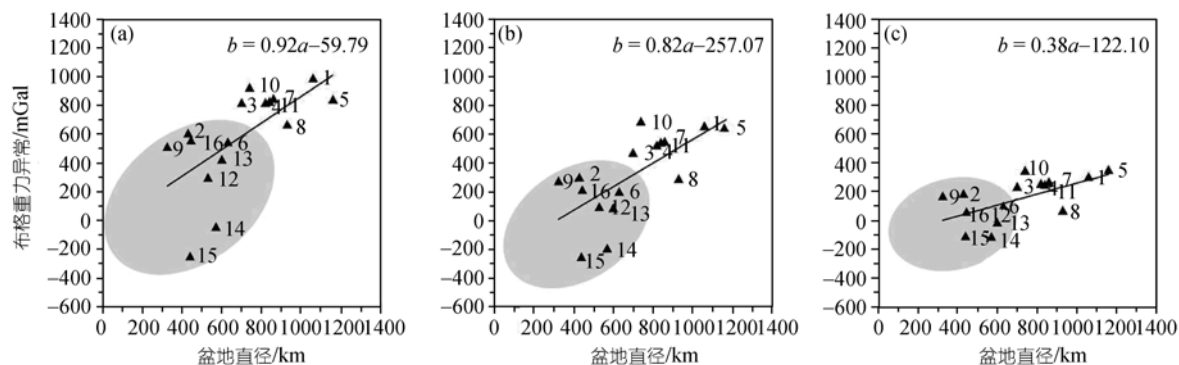


图5 质量瘤中心点对应的布格重力异常值与其盆地直径大小的关系

(a) 10 km; (b) 100 km; (c) 400 km 高度. 实直线表示线性拟合结果, 灰色区域表示高地质量瘤类型, ▲表示质量瘤盆地(编号见表1)

类. 一类直径和异常幅值都较小, 分布在月球高地及高地边缘区域, 形成于前酒海纪至酒海纪, 我们称为高地类质量瘤盆地, 此类型撞击盆地有 Grimaldi, Humboldtianum, Mendel-Rydberg, Schiller-Zucchiuss, Coulomb-Starton, Freundlich-Sharonov, Hertzprung, Korolev, Moscoviense; 另一类直径和异常幅值都较大, 盆地直径大于 700 km, 分布在月球正面地形低缓区域, 形成时间晚于高地类质量瘤盆地, 我们称为平原类质量瘤盆地, 此类型撞击盆地有 Crisium, Humorum, Imbrium, Nectaris, Orientale, Serenitatis, Smythii. 根据月球撞击盆地直径统计及空间分布特征, Strom等(2005)指出月球高地早期的撞击坑与最年轻的火山平原上的撞击坑不同^[16]. 图5的统计结果显示了这两类质量瘤盆地在布格重力异常上的差异特征.

另一方面, 这两类质量瘤盆地的高密度物质的深度分布也有区别. 图6展示了质量瘤盆地中心布格异常与周边异常差值(即相对布格异常)随高度衰减的规律. 根据位场理论, 场源愈浅, 随观测高度增加异常衰减愈快, 反之, 场源愈深则衰减愈慢. 显然, 高地类型质量瘤盆地布格异常随高度衰减比平原型更快. 这一现象意味着面积较小的高地类型质量瘤盆地的高密度岩石物质可能更多地集中在月球岩石圈浅部, 而非源于均衡作用下的上隆的深部月幔物质. 平原类型质量瘤盆地高重力异常的解释也可能追溯到更大的深度, 而非仅为盆地表层“充填”的玄武岩.

需要指出, Hertzprung 和 Korolev 撞击盆地曾被 Konopliv 等人(2001)确定为质量瘤盆地, 而布格重力异常显示盆地内没有高密度物质存在, 说明它们并

不具备质量瘤的特质.

2.2 南极 Aitken 盆地

嫦娥一号激光测高成果的一个主要贡献就是精细地刻画了月球南极地区地形地貌, 为获得该区域布格重力异常的特征细节提供了依据. 南极Aitken盆地布格重力异常为宽阔的高值正异常, 反映了该区域高密度物质的聚集. 盆地以北是月球上面积最大的高地, 高地范围内的布格异常为负, 其中央地带为高值负异常, 与高程呈负相关. 从不同高度异常来看, Aitken盆地与雨海具有类似的特征, 但Aitken盆地中地形并不平坦, 分布有许多规模较小的撞击盆地甚至质量瘤盆地(例如阿波罗盆地^[4]), 表明Aitken盆地在形成之后不仅遭受了后期撞击, 而且在后期发生的月球全球性岩浆充填事件中并没有得到充分的“充填”.

Ghods等人^[17](2007)指出, 由于热的岩石圈无法支撑南极Aitken盆地的月壳物质的负荷, 未能形成质量瘤. 在最新的月球背面重力场中^[4], 这个撞击盆地也不存在符合盆地直径的质量瘤迹象. 然而从本项研究所获得布格重力异常来看, Aitken盆地具有明显的质量瘤盆地特征. Aitken撞击事件被估计发生在前酒海纪^[11], 应属于月球最早时期的巨大撞击事件. 当时月球岩石圈远没有雨海纪时坚硬厚实, 被撞击后很可能造成盆地内岩浆上涌, 在表面形成了高密度的月海玄武岩层, 导致高幅值的布格正异常, 而后期的撞击事件改变了盆地的地貌. Aitken盆地的相对布格重力异常随高度衰减的特征表明其与雨海盆地类似(图6), 应属于平原类型质量瘤盆地. 由于地貌上

呈现的巨大创痕很大程度上是由向北的倾斜或切线撞击遗留下来^[18], 从布格重力异常(图 7(a))来看, Aitken 盆地很可能是受到一次北偏东约 15°方向的巨型撞击后形成. 这一推测的撞击方向与 Garrick-Bethel 和 Zuber 的研究结果不同^[19].

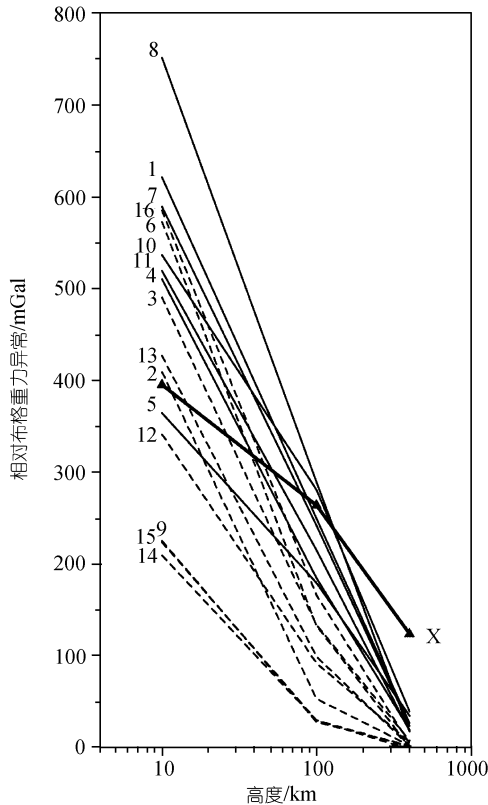


图 6 盆地相对布格重力异常随高度衰减的规律

虚线表示高地类型, 实线表示平原类型. 数字为表 1 中的盆地编号, X 表示南极 Aitken 盆地

3 讨论与结论

本文运用球坐标系地形引力效应计算方法, 根据嫦娥一号地形模型和 LP165P 月球重力场模型获得了月球全球布格重力异常. 布格重力异常总体上与高程呈负相关, 一方面, 按照均衡理论理解, 在月幔物质热运动停滞之前, 轻质的月壳与高密度的月幔物质之间压力已达到或趋向均衡, 以致在月陆地区月壳物质厚度相对较大, 月海地区的厚度相对较小甚至缺失. 但月球演化过程中岩浆充填盆地事件也会导致月海地区高密度物质聚集, 使一些月海成为质量瘤盆地. 另一方面, 若地形校正所采用的表层物

质密度偏大则会造成校正过度, 使地势低的区域“回填”过多, 地势高的区域“切消”过度, 也会使异常与高程负相关. 然而, 不同密度试验表明, 当取表层岩石平均密度为 2.0 g/cm³(接近月壤密度) 进行校正时, 布格异常形态基本保持不变, 说明本文在地形校正中所采用的岩石密度不足以造成布格重力异常与高程负相关. 从全球看, 布格重力异常所反映的月球正面物质密度相对背面较高, 且高密度物质分布较广, 这或许是月球正面始终朝向地球的原因.

在撞击盆地分类上, 文献[4]将 Korolev 盆地归为壳幔过补偿类型, 对应刚性岩石圈支撑的月幔回弹; 将 Hertzprung, Orientale, Mendel-Rydberg, Humboldtianum, Moscoviense, Freundlich-Sharonov 盆地归为局部补偿类型, 对应上隆月幔负载下的脆性变形; 将正面月海归为均衡补偿类型. 然而, 其依据的布格异常基于零高程面, 物理含义不明确, 有可能存在异常假象. 分析我们得到的布格重力异常, 认为 Hertzprung 和 Korolev 撞击盆地并不具备质量瘤的特点, 进一步地, 质量瘤撞击盆地高密度物质有不同的成因. 高地类型质量瘤盆地相对异常随高度衰减比平原型更快, 意味着前者的高密度岩石物质在分布深度上有所不同, 可能更多地集中在月球岩石圈浅部, 而非源于均衡作用下上隆的深部月幔物质. 而平原类型质量瘤盆地高重力异常的解释也可能追溯到更大的深度. 根据对质量瘤盆地地质心深度的估算, 一些大型的质量瘤基本属于玄武岩浆“充填”型的, 少数质量瘤可能与“月幔柱”有关, 如东方海^[20]. 由此可见, 尽管引起撞击盆地重力高存在两种因素, 与前人研究认为的大型撞击盆地的质量瘤重力正异常来自月球壳幔边界的超级均衡隆升^[21,22]不同, 本文统计显示面积较小的高地型质量瘤盆地的高密度物质主要分布在浅部, 为充填的高密度玄武岩质岩石; 平原型质量瘤盆地的高密度物质主要分布在深部, 为上隆的高密度月幔物质. 而未曾被认为有质量瘤表象的南极 Aitken 盆地存在与雨海类似的布格重力异常特征, 因此本文将之列于月球最大的平原型质量瘤盆地.

此外, 布格重力异常特征或许能给出一些南极 Aitken 盆地形成过程的启示. 如前所述, 形成盆地的撞击力可进一步分为东向和北向分量, 其中东向分量有可能是造成撞击后的月球自转速率短暂地不稳

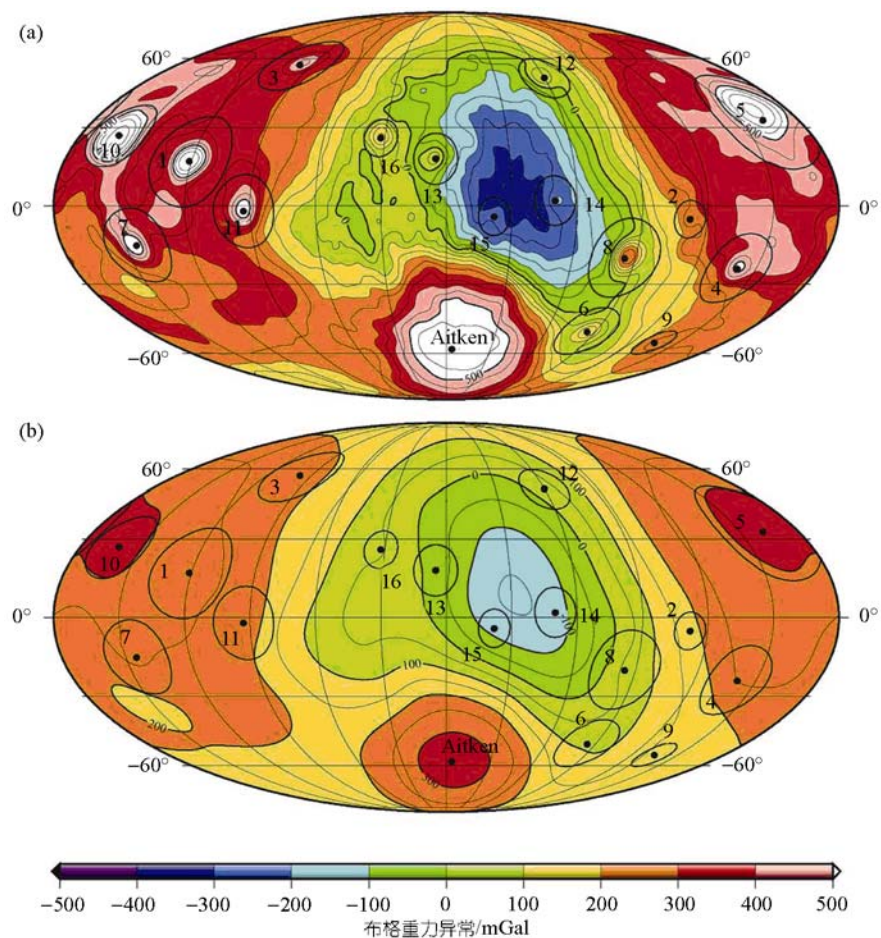


图 7 月球布格重力异常等值线图

投影中心经线为 180°E, (a) 100 km 高度; (b) 400 km 高度. 图中白色区域表示异常值大于 500 mGal 区域, 黑色区域表示异常值小于-500 mGal 区域, 数字为表 1 中的盆地编号

定, 可能 1.5 倍于原速率^[11]的原因; 而北向分量可能使月球极轴漂移. 本文的推断也符合 Wiczorek 等人^[11]的推断, 即: 单个天体撞击事件引发了月球背面 180°转向; 在最古老盆地形成过程中真实极轴漂移超过了 30°. 巨型撞击可能会提供月球内部物质尤其是流

体向外运移的能量^[23], 导致岩浆上涌, 月球壳幔物质的重新分布(形似图 7(b)中 Aitken 盆地布格重力异常与正面月海地区的对称分布?), 并消减了转动速率变化以及极轴漂移. 因此, Aitken 撞击很有可能是这样一次事件.

致谢 本文得到国土资源部探月计划先导性课题(专题)的支持, 所用的重力球谐系数取自美国 NASA PSD Geoscience Node Data 中心, 地形数据源自嫦娥一号激光测高探测成果, 球面投影图采用了 The Generic Mapping Tools (GMT) 软件^[24], 在此一并表示感谢.

参考文献

1 Zuber M T, Smith D E, Lemoine F G, et al. The shape and internal structure of the Moon from the Clementine Mission. Science,

- 1994, 266: 1839—1843[\[DOI\]](#)
- 2 Wiczorek M A, Phillips R J. Potential anomalies on a sphere: Applications to the thickness of the lunar crust. *J Geophys Res-Planet*, 1998, 103(E1): 1715—1724[\[DOI\]](#)
 - 3 Konopliv A S, Asmar S W, Yuan D N. Recent gravity models as a result of the lunar prospector mission. *Icarus*, 2001, 150: 1—18[\[DOI\]](#)
 - 4 Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Farside gravity field of the Moon from Four-Way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya). *Science*, 2009, 323: 900—905[\[DOI\]](#)
 - 5 平劲松, 黄倩, 鄢建国, 等. 基于嫦娥一号卫星激光测高观测的月球地形模型 CLTM-s01. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2008, 38(11): 1601—1612
 - 6 Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry. *Science*, 2009, 323: 897—900[\[DOI\]](#)
 - 7 Zheng Y C, Ouyang Z Y, Li C L, et al. China's Lunar Exploration Program: Present and future. *Planet Space Sci*, 2008, 56(7): 881—886[\[DOI\]](#)
 - 8 Ouyang Z Y, Jiang J S, Li C L, et al. Preliminary scientific results of Chang'E-1 Lunar Orbiter: Based on payloads detection data in the first phase. *Chin J Space Sci*, 2008, 28(5): 361—369
 - 9 Wilhelms D E. *The Geologic History of the Moon*. Washington DC: U.S. Government Printing Office, U.S. Geol Surv Prof Pap, 1987, 1348
 - 10 Muller P M, Sjogren W L. Mascons: Lunar mass concentrations. *Science*, 1968, 161: 680—684[\[DOI\]](#)
 - 11 Wiczorek M A, Le Feuvre M. Did a large impact reorient the Moon? *Icarus*, 2009, 200(2): 358—366, doi: 10.1016/j.icarus.2008.12.017
 - 12 Heck B, Seitz K. A comparison of the tesseroïd, prism and point-mass approaches for mass reductions in gravity field modeling. *J Geodesy*, 2007, 81: 121—136[\[DOI\]](#)
 - 13 Wild-Pfeiffer F. A comparison of different mass elements for use in gravity gradiometry. *J Geodesy*, 2008, 82: 637—653[\[DOI\]](#)
 - 14 Chambat F, Valette B. A stress interpretation scheme applied to lunar gravity and topography data. *J Geophys Res*, 2008, 113: E02009[\[DOI\]](#)
 - 15 Konopliv A S, Binder A B, Hood L L, et al. Improved gravity field of the Moon from Lunar Prospector. *Science*, 1998, 281: 1476—1480[\[DOI\]](#)
 - 16 Strom R G, Malhotra R, Ito T, et al. The origin of planetary impactors in the inner solar system. *Science*, 2005, 309: 1847—1849[\[DOI\]](#)
 - 17 Ghods A, Arkani-Hamed J. Impact-induced convection as the main mechanism for formation of lunar mare basalts. *J Geophys Res*, 2007, 112: E03005[\[DOI\]](#)
 - 18 Shevchenko V V, Chikmachev V I, Pugacheva S G. Structure of the South Pole-Aitken lunar basin. *Solar Syst Res*, 2007, 41(6): 447—462[\[DOI\]](#)
 - 19 Garrick-Bethel I, Zuber M T. Elliptical structure of the lunar South Pole-Aitken basin. *Icarus*, 2009, doi: 10.1016/j.icarus.2009.05.032
 - 20 冯刚顶, 陈超, 张明皓, 等. 对月球重力场特征的理解. *地球物理学进展*, 2007, 22(3): 729—736
 - 21 Neumann G A, Zuber M T. The lunar crust: Global structure and signature of major basins. *J Geophys Res*, 1996, 101(E7): 16841—16864[\[DOI\]](#)
 - 22 Wiczorek M A, Phillips R J. Lunar multiring basins and the cratering process. *Icarus*, 1999, 139: 246—259[\[DOI\]](#)
 - 23 Schultz P H, Crawford D A. Consequences of forming the South-Pole-Aitken basin. *Lunar Planet Sci*, 2008, XXXIX: 2451, <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2008/pdf/2451.pdf>
 - 24 Wessel P, Smith W H F. Free software helps map and display data. *Eos Trans*, 1991, 72(41): 441[\[DOI\]](#)