中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学 2009 年 第 39 卷 第 10 期: 1371 ~ 1378
www.scichina.com phys.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

月球亚平宁山脉重力异常解释

陈超[①*], 陈波[①], 平劲松[②], 梁青[①], 黄倩[②], 赵文津[③], 张昌达[①]

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;
③ 中国地质科学院, 北京 100037
* E-mail: chenchao@cug.edu.cn

收稿日期: 2009-05-25; 接受日期: 2009-07-13
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 月球亚平宁山脉位于雨海东南侧, 是月球上最大的山脉, 其高差可达 3000 m 以上. 月球重力资料显示, 跨越该山脉的重力异常剖面呈现明显的"深大断裂"特征. 本文利用嫦娥一号获得的月表地形数据和 Lunar Prospector 获得的月球重力数据, 通过模拟亚平宁山脉地区壳幔结构, 分析了其重力异常成因, 指出该地区有可能存在"岩石圈"断裂. 结合月球热演化和反演的壳幔模型推断, 距今 38.5 亿年前后, 月球岩石圈可能存在横向运动和挤压, 造成了该断裂的形成, 山脉邻近区域特别是雨海盆地的岩石圈变形和岩浆填充对断裂演化起到主要作用.

关键词
月球
月壳
亚平宁山脉
重力异常

月球内部问题的研究一直是人类探究月球乃至太阳系起源与演化的中继站. 近十年来, 世界多个国家相继发射了 Clementine, Lunar Prospector(LP), SMART-1, SELENE, 嫦娥一号等月球卫星探测器, 这些探测器不断地提供着新的探月数据, 这为人类了解月球内部构造增添了新的信息和证据.

嫦娥一号经过约 2 个月的激光测高, 取得了前所未有的高空间分辨率、高精度月球地形数据, 所确定的月球全球地形模型CLTM-s01, 比以往模型在数据覆盖率、空间分辨率和高程精度上有较大提高, 而且有效地分辨出月球的各类地形特征, 尤其是撞击坑的中央峰地带地形特征[1]. 高分辨率的月球全球地形模型不仅为研究月球地貌及其演化提供了平台, 同时也有助于月球内部物质分布的研究.

20 世纪地球科学的发展, 已揭示了当今地球上高海拔山脉及高地的形成与板块运动的关系, 而在这些地区通常具有鲜明的地球物理场特征. 例如, 卫星重力异常显示, 沿喜马拉雅山脉存在一个幅值巨大的正、负异常条带, 反映了喜马拉雅山地区岩石圈结构的物质分布. 返观月球, LP 的月球卫星重力资料显示, 在月球亚平宁山脉区域也存在沿着山脉走向的正、负异常条带, 且异常幅值与喜马拉雅地区相当. 这一异常特点究竟反映了什么问题? 这是否表明月球亚平宁地区岩石圈曾经经历了类似地球的板块碰撞?

与地球不同, 现今月球内部的演化已基本结束. 而月球内部是否存在类似地球的层圈结构, 目前尚没有确凿的证据. 近年来, 许多学者认为月球内部表层具有分层结构, 并且物质密度随深度增加[2~8]. 若这种假设成立, 其内部圈层的界面起伏所形成的质

引用格式: 陈超, 陈波, 平劲松, 等. 月球亚平宁山脉重力异常解释. 中国科学 G 辑, 2009, 39(10): 1371—1378
Chen C, Chen B, Ping J S, et al.The interpretation of gravity anomaly on lunar Apennines. Sci China Ser G, doi: 10.1007/s11433-009-0281-0

量横向不均匀会产生月球外部重力场的变化, 通过分析月球外部的重力异常可以推测物质密度分布, 继而对月球内部结构构造进行解释. 例如, 不少学者结合月球重力异常和月震资料研究了月海地区壳幔结构[4,5,9], Wieczorek和Phillips (1998)利用月球重力异常反演出了假想的双层月壳模型, 并给出了全月球内部结构的概貌[7].

本文根据新近月球重力资料和嫦娥一号激光测高数据, 通过建立亚平宁地区(12°~30°N, 10°W~12°E)月球壳幔模型进行重力异常反演拟合, 推测该地区重力异常的成因, 并就月球岩石圈运动、变形、月球的热演化史进行了讨论.

1 月球亚平宁山脉区域地形与重力异常

亚平宁山脉是月球上最大的山脉, 长达 1000 km, 高出其周边月海 3000 m左右, 处在雨海盆地的东南边缘, 大部分区域分布着雨海盆地喷射沉积物, 在局部地区保留有前雨海(Pre-Imbrium)物质[10,11]. 亚平宁山脉是雨海外围半径为 1200 km环形山的一部分[11]. 图 1 展示了月球亚平宁山脉及周边地区地形特征. 沿着北东走向、呈弧状的亚平宁山脉处在雨海、澄海和汽海 3 个月海之间. 山脉两侧地形坡度明显不对称, 西北侧山坡地形陡峻, 为雨海的东南边界; 而山脉东南侧坡度平缓. 亚平宁山脉有大量山峰, 山脉地区地形复杂, 起伏不断. 图 1 中月球高程数据取自嫦娥一号激光测高结果, 其径向测量精度约为 31 m, 沿赤道区域空间分辨率为 0.25°[1].

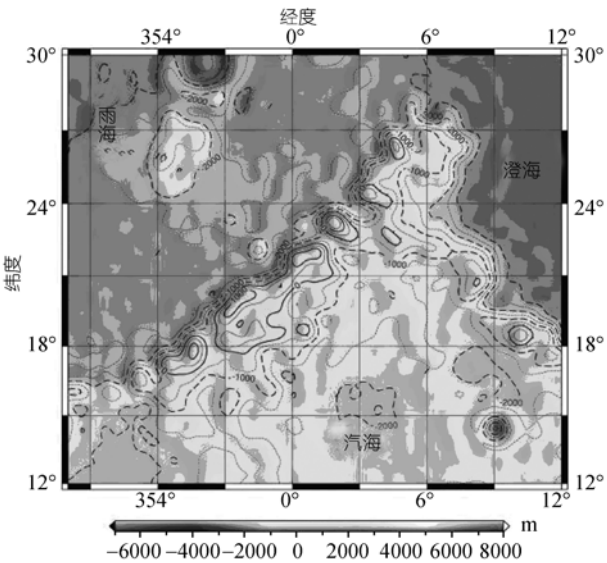

图 1 月球亚平宁地区地形等高线图

图中地形数据由 CLTM-s01 球谐系数解算得到, 参考月球平均半径为 1738 km, 等高线间距为 500 m

根据位场球谐分析理论, 对于场源外部任意一点 $p(\theta, \lambda, r)$处的引力位计算公式为

$$W(p)=\frac{GM}{R}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{R}{r}\right)^{n+1}\times\left(C_n^m\cos m\lambda+S_n^m\sin m\lambda\right)P_n^m(\cos\theta), \quad (1)$$

式中 C_n^m 和 S_n^m 是规格化球谐系数, G为万有引力常数, M为质量, R为月球平均半径, θ及λ分别为余纬度和经度, r为半径, $P_n^m(\cos\theta)$ 为正则化连带勒让德函数. 由此可知月球引力扰动位 T 的表达式:

$$T=\frac{GM}{R}\sum_{n=2}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}\left(\frac{R}{r}\right)^{n+1}\times\left(C_n^m\cos m\lambda+S_n^m\sin m\lambda\right)P_n^m(\cos\theta). \quad (2)$$

由于月球扁率较小, 可近似看作球体, 故月球的重力异常可以通过扰动位对径向求导得到, 即

$$\Delta g=-\frac{\partial T}{\partial r}=\frac{GM}{R^2}\sum_{n=2}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}(n+1)\left(\frac{R}{r}\right)^{n+2}\times\left(C_n^m\cos m\lambda+S_n^m\sin m\lambda\right)P_n^m(\cos\theta). \quad (3)$$

目前最好的月球重力场模型包括LP165p (2001)[12]和日本SELENE的SGM90d (2009)[13]. 由LP全部跟踪数据和Clementine的跟踪数据解算得到的月球重力场模型LP165P, 定轨误差量级为米级, 是目前为止阶次最高且正面精度也较高的月球重力场模型[12,14,15]. 最近由SELENE探月卫星求得了最新的月球重力场模型SGM90d[13], 其月球正面精度和LP165p相当, 而背面的重力场精度有显著提高[13]. 亚平宁地区位于月球正面, 因此本文采用LP 165 阶次球谐系数, 利用公式(3)可计算出该地区的重力异常. 由于月球亚平宁山脉区域内地形相对月球参考面(半径为1738 km的球面)起伏约在-3500~2000 m范围内变化, 故本研究选取 3000 m高度上的重力异常进行分析. 图 2 给出了这个高度上的重力异常(即自由空间重力异常)分布.

月球重力异常在亚平宁山脉雨海一侧区域以广

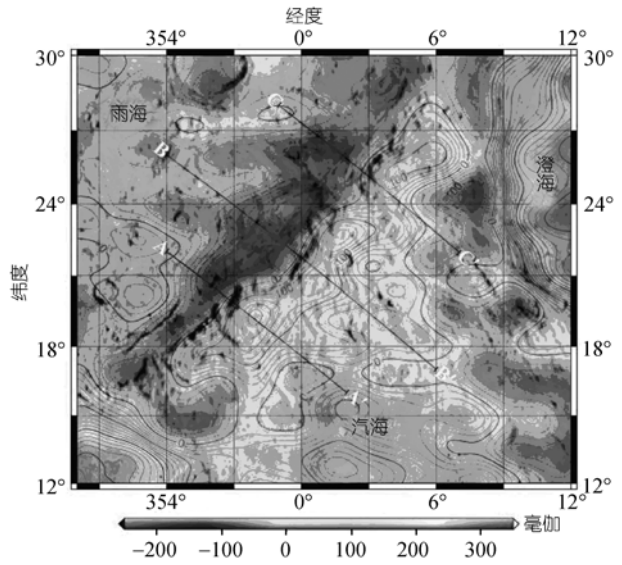

图 2 月球亚平宁地区 3000 m 高度(基于参考月球平均半径 1738 km)重力异常图

图中重力异常数据源于 PSD Geoscience Node Data 提供的 LP165P 球谐系数计算所得, 异常等值线间距为 20mGal, AA′, BB′及 CC′表示选取的重力剖面的位置, 遥感影像背景引自 http://www.usgs.gov

阔的负异常为特征, 而沿着山脉走向分布着正、负相伴的异常条带, 其主要的负异常条带位于山脉北西侧, 异常最低值超过−200 mGal, 正异常条带沿山脉东南侧展布, 最高值可达+180 mGal, 山脉两侧有近400 mGal的异常差. 此外, 该地区东北角正异常与澄海的“质量瘤”(mascon)有关. Ferrari等人[16](1978)曾对月球亚平宁地区产生广阔负异常的主要机制原因进行了推测, 提出该地区可能在较厚的月壳, 并且月壳处在不均衡的状态. Bussey等(1998)根据Clementine伽马能谱探测结果得到的FeO含量分布, 认为亚平宁山脉地区的主要的月岩为玄武岩、苏长岩等[11], 并推断亚平宁山脉地区的前月海单元亚平宁台阶(Apennine Bench Fm, 24°~25°N, 356°~358°E)是由火山KREEP岩组成, 其形成年代早于雨海盆地[11,17]. 这些认识对了解该地区月壳物质组成以及结构特征提供了帮助. 研究区域内的主要负异常条带与正异常带呈现沿亚平宁山脉展布的趋势, 与该地区的地形起伏形成大致对应的特征。理论计算表明, 该地区重力异常不完全是由月表起伏引起的, 其中也包含了月表下构造因素引起的重力变化.

2 月球亚平宁山脉重力异常反演

2.1 重力异常剖面

根据亚平宁地区重力异常及地形特点, 沿垂直亚平宁山脉走向截取三条剖面, 分别提取高程和重力异常数据, 选取直角投影, 获得地形和重力异常剖面 AA′, BB′及 CC′由图 3 可见, 3 条剖面上的重力异常形态相似, 具有典型“断层”异常特征. 重力异常的最大值均与地形高点对应, 异常低值出现在山脉左侧的雨海盆地边缘.

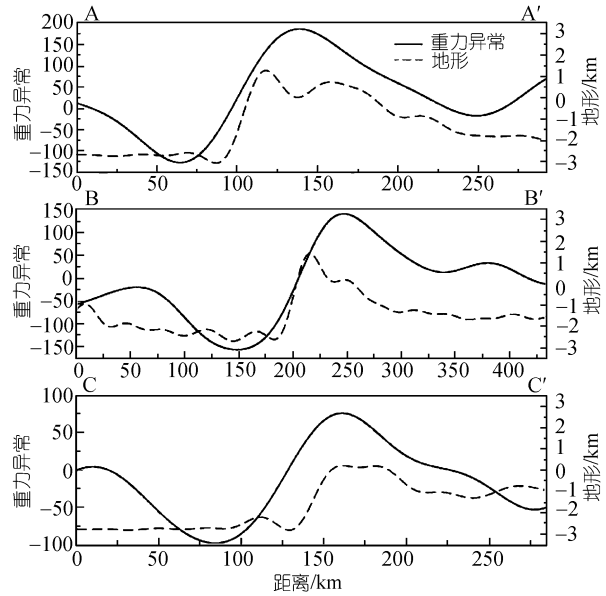

图 3 亚平宁山脉地形及重力异常剖面

2.2 壳幔模型

借鉴双层月壳模型和Wieczorek等[7,18]给出的月壳厚度模型参数, 以及Apollo 12-14 的地震资料[5]的约束, 我们建立了亚平宁地区初始的壳幔结构模式. 由于月幔可能厚达 1000 km[8,19], 因此设计的模型只考虑上下月壳构成, 月幔底面起伏引起的重力变化在研究区内可近似为常数. 双月壳模型给出的上月壳厚度变化在 0~80 km之间[8]; 而下月壳平均厚度约 31 km, 最大厚度可达 70 km[8], 具体模型参数见表 1.

2.3 拟合反演

在考虑地形物质引力效应的情况下, 对剖面重

表 1　亚平宁剖面内部构造模型参数

圈层结构	平均深度/km	密度/g·cm^{-1}	剩余密度/g·cm^{-1}
上月壳	27	2.8	−0.3
下月壳	60	3.1	−0.24
月幔及以下	>60	3.34	–

力异常进行反演拟合. 异常拟合过程中忽略了月壳局部的密度异常体和近月表局部地质因素引起的重力异常. 由于位场等效源性, 拟合反演往往具有多解. 为此, 我们构造了正断层和逆断层两种模式, 对剖面BB′进行拟合反演. 结果表明两种假设都能较好地拟合异常, 见图4. 根据拟合结果, 亚平宁山脉下断裂的性质存在两种解释.

在月球演化过程中, 天体撞击月壳形成雨海和澄海盆地, 导致盆地下方月幔上隆[20~22], 随后玄武岩填充撞击盆地, 月壳均衡调整[4,23~25], 一系列地质过程使得雨海和澄海盆地表现为负高程地形和高幅值正重力异常为主的特征, 月海盆地表面广泛分布环形和线性褶皱山脉以及狭长陡峭的月沟(被解释为地堑)等构造地形, 表明月海盆地曾受水平挤压和拉张.

根据安德森断层模式[26], 水平挤压最容易形成逆断层. 从拟合结果看, 亚平宁山脉地区月球岩石圈岩层的起伏, 可能为长期受到的水平挤压而形成的岩石圈“褶皱”态势. 故可推断现今亚平宁山脉处断层应该为逆断层, 即图 4(b)显示的壳幔状态. 采用这种模式进行解释, 可以得到剖面AA′和CC′反演结果, 如图 5 所示.

结合图4(b)和图5(a), 5(b)所给出的3条剖面壳幔形态, 可以推测在亚平宁山脉下方岩石圈具有逆冲断裂的壳幔结构特征. 如果月球岩石圈存在断差达30 km左右的逆冲断裂, 是否暗示着山脉的西北面靠近雨海的岩石圈曾经发生向东南方向向下俯冲的过程?

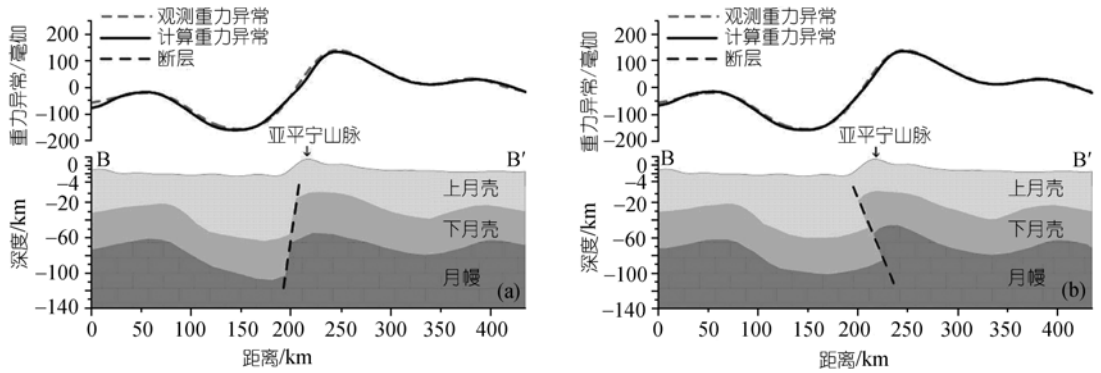

图 4　亚平宁山脉剖面 BB′反演结果

(a) 正断层壳幔结构模式; (b) 逆断层结构模式

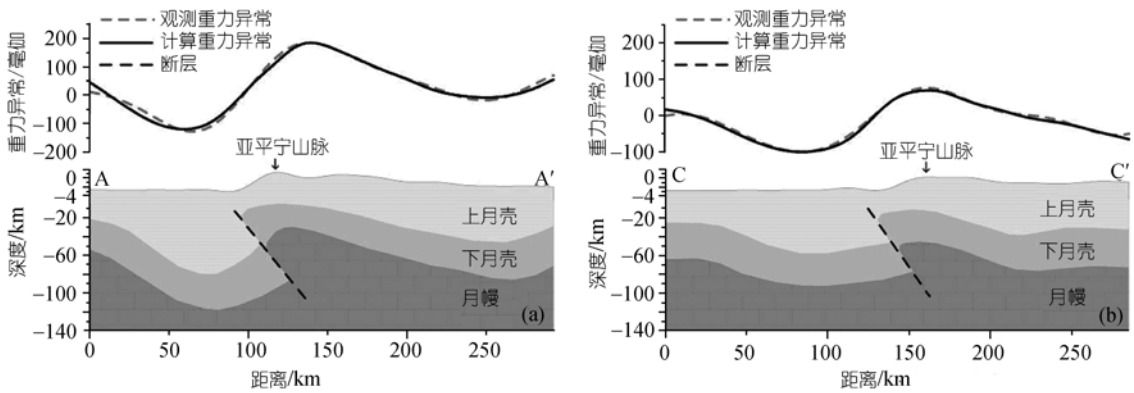

图 5　亚平宁山脉剖面 AA′、CC′反演结果

(a) 剖面 AA′; (b) 剖面 CC′

3 月球亚平宁地区岩石圈构造演化的地学类比

对比地球卫星重力异常[27]不难发现, 月球亚平宁地区具有与喜马拉雅地区相似的重力异常特征. 山脉两侧的重力异常差基本相同, 而前者的地形高差约只有后者的一半. 在喜马拉雅山地区, 中、法、美等多国学者的大量研究[28~34]表明: 喜马拉雅山脉地区是最年轻的陆-陆碰撞带型造山带. 喜马拉雅碰撞带是晚白垩世末——始新世新特提斯洋盆闭合后, 叠置在欧亚板块南缘和印度板块北缘稳定的新生代陆内强烈变形带[29]. INDEPTH 剖面与现有的地质和地震学约束结合也提出了一个印度大陆地壳分层俯冲到特提斯喜马拉雅之下[30], 印度陆壳不断消减, 西藏陆壳不断增厚, 并不均衡隆升的构造演化模式[29]. 那么月球的亚平宁山脉地区是否也存在这样的构造动力演化过程?

现今的月球是太阳系中一个接近终结的星体, 其岩石圈已经相对冷却、坚硬, 月表地形主要是由雨海纪以来小星体撞击和岩浆活动形成的面貌. 一方面, 月球岩浆和火山活动直接反映月球内部热演化的历史, 而月球热演化又影响着月球构造运动. 月球的岩浆活动主要分为 3 个时期: 月球形成早期的大范围熔融, 使得岩浆分异形成了斜长岩月壳; 随后是前月海岩浆活动期(45~38.5 亿年前), 即斜长岩月壳形成之后, 月海玄武岩喷发之前, 月壳局部重熔, 形成非月海玄武岩; 第三个阶段是大规模的月海岩浆活动(38.5~10 亿年), 月海玄武岩喷发, 大量月海被玄武岩充填[19,35], 其中 35~38 亿年之间月海岩浆活动最为剧烈[35].

另一方面, 大量天体撞击对月球热演化也有重要的影响. 小星体的强烈撞击不仅破坏了月表地形, 向四周抛射大量物质, 削薄撞击中心的月球岩石圈厚度造成质量亏损, 开凿出早期的月海盆地, 而且加热了月壳及上月幔, 造成月幔的部分原位熔融[22,36], 最终在撞击盆地边缘诱发断层[37].

在早雨海纪(37.2~38.5 亿年前)[38], 当天体撞击月表开凿出雨海盆地时, 强烈的撞击力造成雨海盆地月壳变薄并弯曲凹陷, 月幔物质的固相线下移[22]. 由于大量的撞击动能转化为大量热能, 撞击盆地内部近月表物质部分熔融, 而雨海盆地边缘的刚性岩石圈由于水平张力而发生断裂, 形成张裂断层, 其形态如图 6(a).

由于撞击产生的热量和撞击后月幔减压熔融[39], 撞击产生的热能扰动导致上月幔温度横向差异. 随后在撞击盆地下方月幔迅速均衡上隆[38,40,41], 上月幔深部物质向上迁移, 形成局部月幔热对流[22]. 局部的热对流结合撞击引起的上月幔热扰动发展成为整个撞击盆地下方的月幔热对流[22]. 以撞击盆地中心部位的上升热流、盆地边缘的下降热流为特征的月幔热对流循环[42]和月幔物质上隆, 推动了岩石圈以撞击盆地为中心向旁侧运移. 由于东南侧的澄海及汽海盆地的形成早于雨海盆地[43~46], 雨海盆地相对较热且较“软”的岩石圈挤压周边地区相对较冷而坚硬的岩石圈, 使得撞击形成的张性断裂逐渐演化为压性断裂最终形成逆冲断裂, 雨海岩石圈沿断裂面向深部滑动, 如图 6(b)所示.

晚雨海纪(32~37.2 亿年前)[38]的玄武岩爆发进一步影响该地区的构造演化. 根据月球热演化历史, 玄武岩充填了雨海和澄海, 使得月海荷载加强, 壳幔均衡作用使得两个月海盆地月壳物质受到月幔物质挤压而向旁侧运移[41]. 简言之, 充填事件促进了盆地岩石圈向旁侧的横向移动. 由于两侧持续的挤压作用, 雨海边缘的岩石圈沿断裂面进一步向澄海岩石圈下俯冲. 雨海盆地的撞击形成结合后期的演化表现为两个盆地的外侧环形山在亚平宁地区交汇, 前雨海月壳抬升, 亚平宁山脉逐渐形成并隆升[10,24,47], 同时发育现今山脉下的逆断层, 如图 6(c)所示.

4 结论与讨论

本文尝试性地结合月表地形与月球重力资料, 研究月球亚平宁山脉地区壳幔构造, 并推断和分析了其构造演化过程. 反演的模型给出了亚平宁地区月球壳幔结构. 结合月球热演化, 本文推断在雨海纪(距今约 38.5 亿年)前后, 亚平宁山脉地区岩石圈曾发生断裂, 月球岩石圈存在着一定范围的横向运动. 大量月球撞击事件、大型撞击盆地的撞击后均衡调整、月海玄武岩填充事件以及月球内部热对流运动都可能为岩石圈的横向运动提供动力.

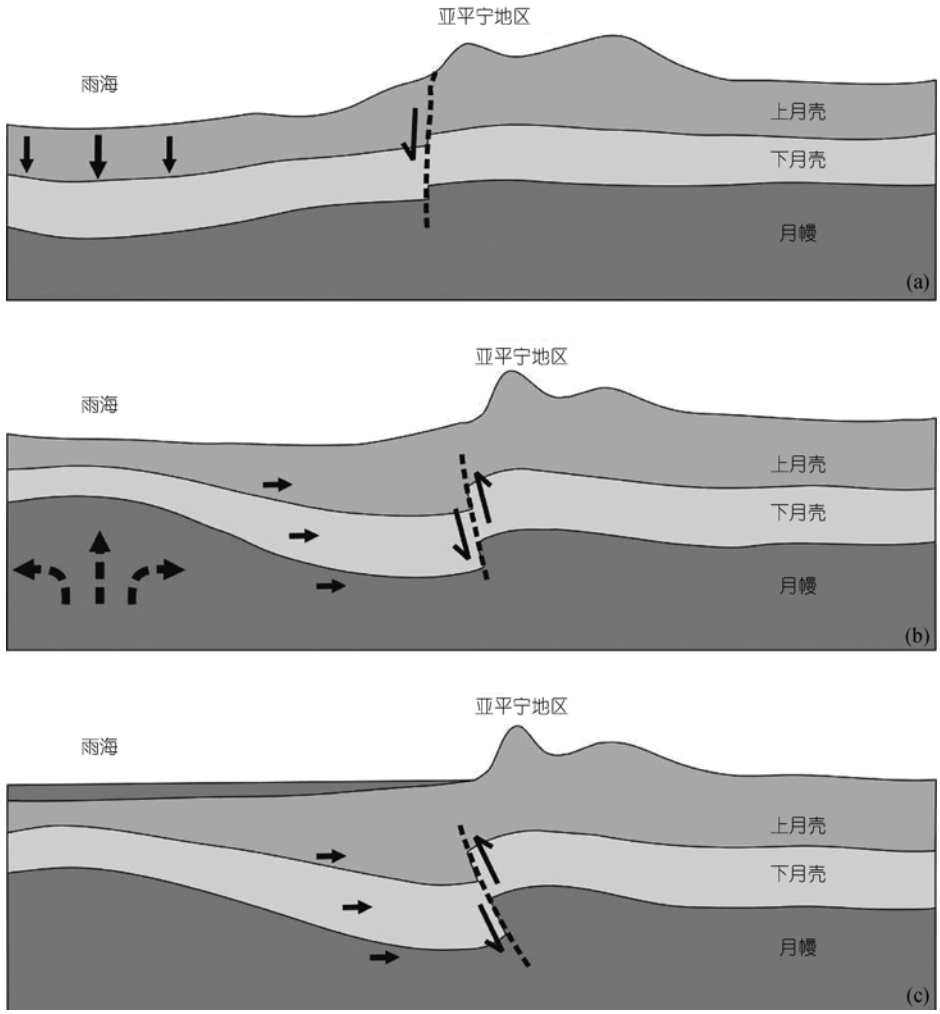

图 6　推断的月球亚平宁地区构造演化过程示意图

(a) 雨海盆地撞击时; (b) 撞击后; (c) 现今. 虚线表示断层面, 粗箭头表示力以及力的方向, 虚线箭头表示热流方向

月球亚平宁山脉的断裂可能是在距今 38.5 亿年前后大量陨星撞击月球开凿雨海盆地时期形成的. 撞击后月幔物质均衡上隆和热对流推动了岩石圈以撞击盆地为中心向旁侧运移. 在强烈的水平应力作用下, 雨海岩石圈挤压周边地区岩石圈, 造成亚平宁山脉区域岩石圈断裂演变为逆冲. 后期玄武岩填充雨海及月幔均衡作用促使雨海月壳物质向旁侧运移, 推进了岩石圈的进一步横向运动, 使雨海岩石圈向深部俯冲.

如果这种现象存在, 将引出一个启示, 即在距今 38.5 亿年前后, 月球曾经存在类似现今地球内部的层圈结构, 当时月球岩石圈也存在类似现今地球上板块运动. 对这个问题的研究与探索, 将有助于揭示月球乃至太阳系星球的演化过程.

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. 感谢美国科罗拉多矿业学院李耀国教授对本文提出的建议. 所用的重力球谐系数源自美国NASA PSD Geoscience Node Data 中心, 地形数据来自嫦娥一号激光测高数据, 平面制图采用了Generic Mapping Tools (GMT)软件[48], 在此一并表示 感谢.

参考文献

1 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

2 Morgan J P, Phillips R J. Inversion of combined gravity and bathymetry data for crustal structure - A prescription for downward continuation. Earth Planet Sci Lett, 1993, 119: 167—179[DOI]

3 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]

4 Neumann G A, Zuber M T, Smith D E, et al. The lunar crust: Global signature and structure of major basins. J Geophys Res, 1996, 101: 16841—16863[DOI]

5 Neumann G A, Lemoine F G, Zuber M T, et al. What does gravity tell us about lunar crustal structure? Lunar Planet Sci, 1997, XXIX: 1713. www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc97/pdf/1731.pdf

6 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]

7 Wieczorek 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]

8 Potts L V, von Frese R R B. Comprehensive mass modeling of the Moon from spectrally correlated free-air and terrain gravity data. J Geophys Res, 2003a, 108(E4): 5024, doi:10.1029/2000JE001440

9 Potts L V, von Frese R R B. Crustal attributes of lunar basins from terrain-correlated free-air gravity anomalies. J Geophys Res, 2003b, 108(E5): 5037, doi:10.1029/2000JE001446

10 Spudis P, Head J W. Geology of the Imbrium basin Apennine mountains and relation to the Apollo 15 landing site. In: Proceedings of Lunar Science Conference 8th. New York: Pergamon Press, 1977. 2785—2797

11 Bussey B, Spudis P D, Hawke B R, et al. Geology and composition of the Apennine mountains, lunar Imbrium basin. Lunar Planet Sci, 1998, XXIX: 1352. www.lpi.usra.edu/meetings/LPSC98/pdf/1352.pdf

12 Konopliv A S, Asmar S W, Carranza E, et al. Recent gravity models as a result of the Lunar Prospector mission. Icarus, 2001, 150: 1—18[DOI]

13 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]

14 李斐, 鄢建国, 平劲松. 月球探测及月球重力场的确定. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 31—37

15 鄢建国, 平劲松, 李斐, 等. 应用 LP165P 模型分析月球重力场特征及其对绕月卫星轨道的影响. 地球物理学报, 2006, 49(2): 408—414

16 Ferrari A J, Nelson D L, Sjogren W L, et al. The isostatic state of the lunar Apennines and regional surroundings. J Geophys Res, 1978, 83: 2863—2871[DOI]

17 Spudis P D. Composition and origin of the Apennine Bench Formation. In: Lunar and Proceedings Science Conference 9th. New York: Pergamon Press, 1978. 3379—3394

18 Wieczorek M A, Jolliff B L, Khan A, et al. The Constitution and Structure of the Lunar Interior. In: Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, et al, Eds. New Views of the Moon, Reviews in Mineralogy & Geochemistry. Washington: Mineralogical Society of America, 2006. 60(1): 221—364

19 欧阳自远. 月球地质学. 地球科学进展, 1994, 9(2): 80—81

20 Wise D U, Yates M T. Macons as structural relief on a lunar "Moho". J Geophys Res, 1970, 75: 261—268[DOI]

21 Solomon S C, Head J W. Vertical movement in mare basins: relation to mare emplacement, basin tectonics, and lunar thermal history. J Geophys Res, 1979, 84: 1667—1682[DOI]

22 Ghods A, Arkani-Hamed J. Impact-induced convection as the main mechanism for formation of lunar mare basalts. J Geophys Res, 2007, 112(E3): E03005, doi:10.1029/2006JE002709[DOI]

23 Solomon S C, Head J W. Lunar Mascon basins: Lava filling, tectonics, and evolution of the lithosphere. Rev Geophys Space Phys, 1980, 18(1): 107—140[DOI]

24 Watters T R, Konopliv A S. The topography and gravity of Mare Serenitatis: Implications for subsidence of the mare surface. Planet

Space Sci, 2001, 49: 743—748[DOI]
25 Mohit P S, Phillips R J. Viscoelastic evolution of lunar multiring basins. J Geophys Res, 2006, 111(E12): E12001, doi:10.1029/2005JE-002654
26 Anderson E M. The Dynamics of Faulting and Dyke Formation With Application to Britain. London: Oliver and Boyd, 1951. 1—50
27 王谦身, 滕吉文, 王光杰, 等. 喜马拉雅"东构造结"地区特异重力场的探讨. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 35—42
28 陈胜早. 喜马拉雅及其邻区的重力异常、岩石圈构造与板块动力模型. 大地构造与成矿学, 1993, 17(4): 315—334
29 崔军文. 喜马拉雅碰撞带的构造演化. 地质学报, 1997, 71(2): 105—112
30 赵文津, Nelson K D, 车敬凯, 等. 喜马拉雅地区深反射地震——揭示印度大陆北缘岩石圈的复杂结构. 地球学报, 1996, 17(2): 138—152
31 赵文津, 赵逊, 史大年, 等. 喜马拉雅和青藏高原深剖面(INDEPTH)研究进展. 地质通报, 2002, 21(11): 691—700
32 苏伟, 彭艳菊, 郑月军, 等. 青藏高原及其邻区地壳上地幔S波速度结构. 地球学报, 2002, 23(3): 193—200
33 彭聪. 中国西部布格重力异常特征和地壳密度结构. 地球学报, 2005, 26(5): 417—422
34 Hetenyi G, Cattin R, Vergne J, et al. The effective elastic thickness of the India Plate from receiver function imaging, gravity anomalies and thermomechanical modeling. Geophys J Int, 2006, 167(3): 1106—1118[DOI]
35 Shearer C K, Hess P C, Wieczorek M A, et al. Thermal and magmatic evolution of the Moon. In: Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, et al, eds. New Views of the Moon, Reviews in Mineralogy & Geochemistry. Washington: Mincralogical Society of America, 2006. 60: 365—518
36 Elkins-Tanton L T, Hager B H, Grove T L. Magmatic effects of the lunar late heavy bombardment. Earth Planet Sci Lett, 2004, 222: 17—27[DOI]
37 Hiesinger H, Head J W. New view of lunar geoscience: An introduction and overview. In: Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, et al, eds. New Views of the Moon, Reviews in Mineralogy & Geochemistry. Washington: Mincralogical Society of America, 2006, 60: 1—81
38 Wilhelms D E. The Geologic History of the Moon. US: Geological Survey Professional Paper, 1987. 1348: 1—302
39 Jones A P, Price G D, Price N J, et al. Impact induced melting and the development of large igneous provinces. Earth Planet Sci Lett, 2002, 202: 551—561[DOI]
40 Melosh J H. Impact Cratering: A Geologic Process. New York: Oxford Univ Press, 1989
41 Wieczorek M A, Phillips R J. Lunar multiring basins and the cratering process. Icarus, 1999, 139: 246—259[DOI]
42 Watters W A, Zuber M T, Hager B H. Thermal perturbations caused by large impacts and consequences for mantle convection. J Geophys Res, 2009, 114: E02001, doi:10.1029/2007JE002964[DOI]
43 Head J W. Serenitatis multi-ringed basin: Regional geology and basin ring interpretation. Moon Planets, 1979, 21: 439—462[DOI]
44 Hartmann W K, Strom R G, Weidenschilling S J, et al. Chronology of planetary volcanism by comparative studies of planetary craters. In: Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets. New York: Pergamon Press, 1981. 1050—1127
45 Neukum G, Ivanov B A. Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data. In: Gehrels T, ed. Hazard Due to Comets and Asteroids. Tucson: Univ of Arizona Press, 1994. 359—416
46 Stöffler D, Ryder G. Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units: Chronological standard for the inner solar system. In: Kallenbach R, Geiss J, Hartmann W K, eds. Chronology and Evolution of Mars. Dordrech/Boston/London: Kluwer Academic Press, 2001. 9—54
47 Spudis P D. The Geology of Multi-ring Impact Basins. Cambridge: Cambridge University Press, 1993
48 Wessel P, Smith W H F. Free software helps map and display data. Eos Trans, AGU, 1991, 72(41): 441