

月球的构造格架及其演化差异

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

(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 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100014; 3. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061)

摘 要:根据以 GRAIL 重力场数据和 LOLA 地形数据计算的月壳厚度,将月球构造格架初步划分为三个构造单元:主要覆盖月球正面风暴洋区域的月海构造单元、主要覆盖月球背面高地的月陆构造单元以及主要位于南半球背面的南极艾肯盆地构造单元。结合最新的研究成果,对各构造单元上的重大地质事件包括岩浆事件、火山事件和撞击事件分别进行了简单的梳理,结果表明月球不同构造单元的演化事件具有明显的差异。

关键词:月球; 构造格架; 地质演化

中图分类号: P691

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2015)01-0075-05

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2015.01.011

0 引 言

在地球上,通过对地质构造的研究,可以掌握不同尺度构造运动的发生、发展和终止过程,了解这一过程对地球形貌、矿产资源、环境和生物演化等产生的影响。在以月球研究为代表的行星地质学研究中,尽管研究方式和手段有很大的区别,但通过对行星地质—构造现象的研究,同样有助于了解行星的形成、结构和演化以及与地球的关系。特别地,月球的演化在30亿年前已基本终结,因此月球形成之初的历史在月球上被较好地保留下来了,而这一段演化历史在地球上的记录已经被抹杀殆尽。另一方面,正是因为月球保留了早期地质演化的记录,所以月球也同时保留了太阳系撞击事件发生发展的整部历史。因此,月球地质—构造格架及其演化历史的研究可以为太阳系演化的两种动力学过程进行示范,即月球的撞击事件可以反映外动力地质作用的过程,而月球岩浆洋演化与月壳形成以及后期岩浆和火山作用的过程可以反映内动力地质作用的过程。这些重要的地质过程,不仅是形成月球的主要过程,也是太阳系其他类地行星形成的过程,对月球和行星后期演化起到重要的制约作用。通过对月球不同大地构造单元进行划分并对地质—构造演化序列进行梳理,可以科学地探讨初始形成的月球整体格局对月球后期演化的制约效应。

尽管后阿波罗时代已经有了越来越丰富的月球探测数据,覆盖范围已越过月球正面包含全月,但人们对月球构造的认识还是以小尺度构造单元为主,主要包括了线性构造如月谷、月岭、月溪、断裂等^[1-2],环形构造如撞击坑、撞击盆地、月海穹窿等^[1,3-5],以及其它构造如水平平移断层—走向滑移断层^[6]、放射状断裂和格子构造^[7]等。目前我们已经对月表精细的构造要素有了比较全面的认识,但对月球的整体构造格架认识还有待完善。陈建平^等(2012)^[8]在对虹湾地区(LQ-4)进行地质填图时,共识别并表达了3类环形构造和10类线性构造,对月球在全球范围的构造特征依然笼统地概括为月陆、月海的二分性。而 Jolliffe 等人(2000)^[9]利用 LPGRS 的数据,将月球划分为三大化学地体。但以构造格架为对象的月球差异演化研究也主要停留在现象的描述上,只有少数力求揭示本质的尝试^[10]。

随着月球探测的深入开展,月球研究越来越多的成果表明,月球南半球背面的南极艾肯(South Pole-Aitken, SPA)盆地是一个与月陆构造和月海构造都有差别的特殊构造区域。尽管 SPA 盆地直径和挖掘深度都十分巨大,但是却没有与月海盆地类似的广泛的玄武岩充填^[11],此外,该盆地形成时必定发生过规模巨大的撞击事件,可能对月球的整体演化以及月球的轨道及空间位置都有一定的影响^[12]。

因此,研究认为南极艾肯盆地应该作为一个独

立的大地构造单元参与到月球的整体构造格架中,并作为一个重要的研究区域参与到月球的差异性演化研究中。

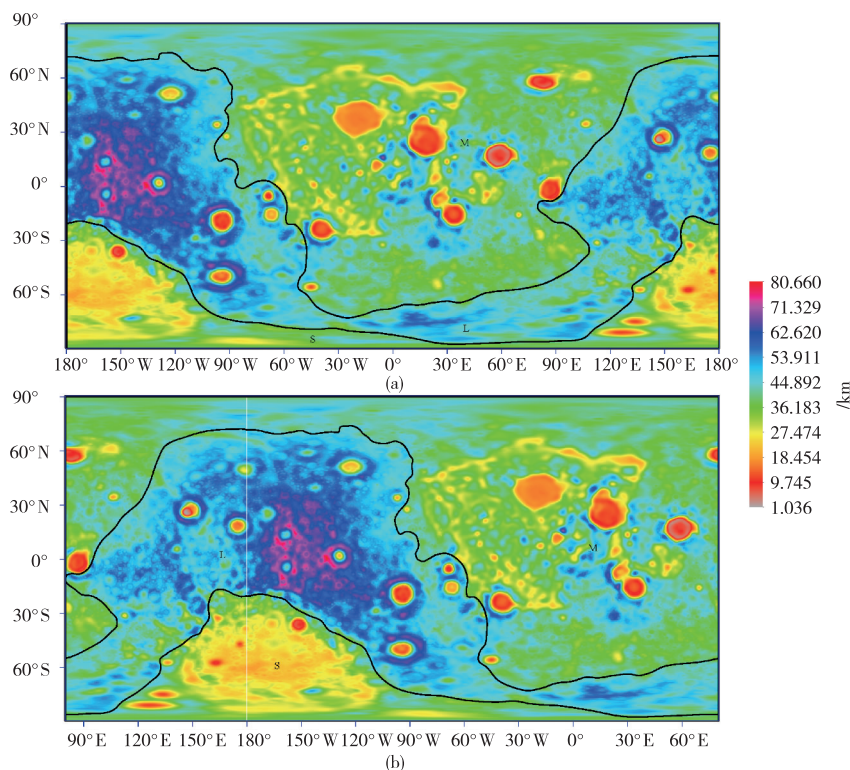
1 月球的构造格架

依据天文望远镜对月观测数据的解译分析,B. B. 科兹洛夫和 E. Д. 苏利季—康德拉季耶夫(2005)将月面划分为高地和月海两个构造单元^[13]。Ю. А. 霍达克(Ходак, Ю. А., 1967)在《月球的全球构造》中,认为“大陆”是月面上隆起的古老基底,“月海”则为下沉的、叠加在基底构造上的洼陷。月球发展经历了四个阶段:最古老的基底、古山系和各地的形成,月壳上部产生由深大断裂分割而成的块状构造;全月环形构造,其中包括“月海”带的形成;玄武岩型月壳上部 and 月球内部物质的强烈分异作用;沿着环形、弧形和直线形断裂活动带形成小的环形单元—环形山^[13]。1969 年 Apollo 11 号把第一个月球测震仪放到了月球上,其后 Apollo 12、14、16 和 17 号又相继把月震仪安置在月球上,组成了一个月球测震网,通过对人工和天然的月震数据进行研究对月球内部构造有了新的认识,确立了月球

的圈层结构,它包含一个主要由斜长岩构成的表面月壳^[14]。由于演化的差异性,月壳的地形地貌、表面物质成分、岩石类型、矿物组成以及构造样式等方面都存在广泛的不均一性。

阿波罗时代的月震研究虽然已揭示了月球的圈层结构,然而目前月震研究资料十分有限,只有 Apollo 时代建立的位于月球正面的观测网数据,还无法反演出全月球的月壳厚度分布,而月球的重力场探测相比月震观测更加可行,利用月球重力场数据和地形数据可以计算出月壳厚度模型^[15]。因此,研究者把目光投向月球重力场探测,并结合地形数据得到整个月球的内部结构。

基于重力场的月球内部结构研究始于 1966 年前苏联发射的环月探测器 Luna 10^[16],2011 年 9 月 NASA 发射了 GRAIL(重力回溯及内部结构实验室)双生探测器专门负责提供高分辨率的月球重力数据^[17]。Wieczorek 等(2013)^[18]利用 GRAIL 重力场数据和 LRO 探测器的 LOLA 地形数据得到了平均月壳厚度为 34~43 km 的月壳厚度模型。从月壳厚度分布上看,月壳的构造包含三个有明显区分的构造单元,如图 1 所示,分别为月海构造、月陆构



注:M:月海构造单元,L:月陆构造单元,S:南极艾肯盆地构造单元。(a)、(b)均为简单圆柱投影,其中(a)的投影中心为(0°,0°),(b)的投影中心为(100° W, 0°)。

图 1 基于月壳厚度的月球构造格架

Fig. 1 Moon's tectonic framework based on lunar crust thickness

造以及南极艾肯盆地构造。月海构造主要覆盖了月球正面风暴洋区域,包含有月球上 22 个月海中除东海和莫斯科海的 19 个月海,岩石类型以月海玄武岩为主;月陆构造主要包括月球的背面高地,岩石类型主要是亚铁斜长岩,但是东海和莫斯科海位于这个构造单元中;南极艾肯盆地构造主要由南极艾肯盆地构成,是典型的盆地地貌组成的月球构造单元。月壳厚度最高的是月陆构造单元,平均值达到 50.36 km;其次是月海构造单元,平均月壳厚度为 38.36 km;南极艾肯盆地构造单元由于主要是南极艾肯盆地所在的区域,撞击挖掘导致它的月壳厚度偏薄,平均值为 31.96 km(见表 1)。然而月壳最薄的位置位于月陆构造单元中的莫斯科海盆地,其次是月海构造单元中的危海盆地^[18],其它月海盆地以及大型的撞击盆地也都相对周围具有更薄的月壳。

表 1 基于月壳厚度划分的月球各构造单元面积和月壳厚度

Table 1 Area and lunar crust thickness of lunar units divided based on lunar crust thickness

构造单元	面积/km ²	最高值 (月壳厚度)/km	最低值 (月壳厚度)/km	平均值 (月壳厚度)/km
月海构造单元	28 790 488	69.94	3.06	38.36
月陆构造单元	22 472 302	80.66	1.04	50.36
南极艾肯盆地构造单元	8 319 843	54.88	6.41	31.96

2 月球各构造单元的演化事件

在月球形成以后,发生在月球上的重大地质事件主要包括岩浆事件、火山喷发和撞击事件,虽然在各构造单元中都有发生,但在不同的区域中有明显的差别,其地质—构造演化序列具有较大的差异。月球岩浆事件包括全球岩浆洋的结晶演化,后期月海玄武岩和非月海玄武岩的形成,主要发生在正面风暴洋区域。火山喷发事件可以根据已发现的火山碎屑岩沉积以及火山口判断,在正面尤其是月海周围分布较多。撞击事件在月表分布范围广,在月球演化历史中持续时间最久,对月表的改造最明显,根据已掌握的资料,可能在月球正面的撞击作用规模更大。

根据对已发表的月表岩浆岩石年龄的统计,月球岩浆事件大致可分为五期。第一期(45.2—42 亿年),各构造单元所在的区域均发生了岩浆洋分异,形成古老的斜长质月壳。第二期(42—38.5 亿年),是岩浆继续分异的时期,形成富镁岩套深成岩、富碱

深成岩、高度演化的高地深成岩以及少量的高铝玄武岩,月海构造单元内有大量的 KREEP 岩形成。第三期(38.5—35 亿年)是岩浆作用活跃的时期,在各构造单元的月海盆地中发生了玄武岩充填,月海构造单元内仍有少量的 KREEP 岩形成,而南极艾肯盆地构造单元中只有少量的玄武岩生成。第四期(35—33 亿年)是岩浆作用的第二活跃期,在月陆构造单元和月海构造单元中均有小规模玄武岩形成,而南极艾肯盆地构造单元中已基本没有岩浆作用。第五期(33—10 亿年)月陆构造单元和南极艾肯盆地构造单元中的岩浆作用已基本停止,月海构造单元中也只有零星的岩浆作用。

USGS 专门成立研究月球火山事件的小组,对月球上火山事件的研究进行整理,在其官网上公布了研究成果(<http://astrogeology.usgs.gov/geology/moon-pyroclastic-volcanism-project>)。目前已经识别的月球火山碎屑沉积有 101 处,主要围绕月海四周出现。火山碎屑沉积有 70 处位于月海构造单元,21 处在月陆构造单元,10 处位于南极艾肯盆地构造单元,表明月球的火山事件主要发生在月海构造单元中。根据光谱数据反演,月球火山碎屑沉积成分主要包括了斜长岩和玄武岩等暗色月幔物质、橄榄石、辉石以及它们的混合物。根据统计,火山碎屑岩的年龄以雨海纪为主,总共有 55 个火山碎屑沉积是这一时期形成的,说明火山事件多发生在雨海纪。

月球上最明显的撞击事件主要是形成了大型撞击盆地的那一部分大型撞击作用。Wilhelms(1987)^[19]以直径 300 km 为界线定义了月球上的 45 个盆地。Wood(2004)对有关月球盆地的报道进行了整理(<http://www.lpod.org/cwm/DataStuff/Lunar%20Basins.htm>),一共有 67 条记录,去除重复报道和不能被验证的剩余 54 个撞击盆地^[20],除涵盖了 Wilhelms 归纳的以外还有一部分直径偏小的盆地。为了研究大规模的撞击事件,将 Wilhelms 定义的盆地在各构造单元进行投影,结果显示月海构造单元含有 19 个,平均 1 515 289 km²/个;月陆构造单元有 18 个,平均 1 248 461 km²/个;南极艾肯盆地构造单元含有 8 个,平均 1 039 980 km²/个。可见南极艾肯盆地构造单元中发生的大型撞击事件频率最高,月海构造单元接受大型撞击的频率偏低,虽然差距不是很大但也显示出不同的演化特征。

3 结 论

根据月球的月亮厚度可以将月球的全球构造格架分为三个构造单元:月海构造、月陆构造以及南极艾肯盆地构造。基于 Clementine 多光谱数据反演的 FeO 含量分布和 Lunar Prospector Grammar 谱数据反演的 Th 含量分布, Jolliff 等(2000)^[9]将全月的地体构造划分为三类:风暴洋克里普地体(PKT)、高地斜长岩地体(FHT)和南极艾肯地体(SPAT),这一划分与我们进行月球大地构造单元的划分具有一致性,表明月球的构造单元不仅具有纵向深度的延伸而且具有横向表面的延伸。

月球上的重大演化事件包括岩浆事件、火山事件和撞击事件在各个构造单元上均有发生但有显著的区别。岩浆事件可以分为五期,更多发生在月海构造单元,形成月海玄武岩,在南极艾肯盆地构造单元中只有很少的岩浆事件;火山事件也主要发生在月海构造单元中;撞击事件主要根据保留的撞击盆地进行推测,月球上的大型盆地在南极艾肯盆地构造单元中具有相对更高的分布。

不同区域的月亮具有不同的演化特点,特别是月陆与月海构造区相比,无论从演化时间上还是演化的事件上都有很大的不同,这一现象其根本的控制因素是什么一直是月球科学研究中的难解之谜。欧阳自远等(2002)^[21]建立了行星地球不均一成因和演化的初步理论框架,在综合最新的地球化学、地球物理和天体化学研究资料的基础上,对地球的不均一成因进行了理论上的推导。结合对于中国最古老的克拉通—华北克拉通的研究结果,刘建忠等(2009)^[10]认为月球地体的化学不均一性也应该是来源于月球形成初期的化学成分初始不均一分布,据此建立了月球起源的星子堆积模式。张福勤等(2010)^[22]从全月球构造的几何框架推测,月球早期的岩浆流可能为单一对流系统,上升流位于月球正面,顶面形态呈蚌状或椭圆形,下降流在月球背面,在对流的驱动下,上浮的以富铁斜长岩组分为主的斜长岩质月亮壳将被驱赶到南北两侧和月背,并通过一定程度的压缩和下降流的联合作用而发生月亮增厚。富镁岩套是典型的低压岩浆房(橄榄石-辉石-长石共结)的堆晶产物。高度分异的剩余岩浆结晶产物如 KREEP 组分、富碱岩套甚至少量发育的“月球花岗岩类即高硅 KREEP 岩、二长闪长岩、花岗岩”都是伸展区即上升流顶部的分异或演化的建造

类型。

关于月球的构造格架及其演化规律的认识还有待更深入的研究,尤其是月球不同构造单元演化差异的起源,目前还没有成熟的理论。本文中尝试对全月球的构造格架进行划分,分别梳理其地质—构造演化序列,科学地探讨初始形成的月球整体格局对后期演化的制约,追溯月球差异性演化起源。本文初步划分了月球的构造格架并概括性的总结了发生在各构造单元上的演化事件,但对差异演化的成因还不能做出有说服力的解释,需做更充分的研究。

致谢

本文的月亮厚度数据由巴黎地球物理学院的 Mark A. Wieczorek 研究员提供,在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] Quaide W. Rilles, ridges, and domes-clues to maria history [J]. *Icarus*, 1965, 4(4): 374-389.
- [2] Smith G I. A comparison of two terrestrial grabens with the lunar rilles Rima Ariadaeus and Rimae Hypatia I and II[R]. NASA Technical Reports Server, 1966.
- [3] Shoemaker E M. Interpretation of lunar craters[M]. *Physics and Astronomy of the Moon*. London: Academic Press, 1962.
- [4] Stuart-Alexander D E, Howard K A. Lunar maria and circular basins-a review[J]. *Icarus*, 1970, 12(3): 470-8.
- [5] Wöhler C, Lena R, Phillips J. Formation of lunar mare domes along crustal fractures, rheologic conditions, dimensions of feeder dikes, and the role of magma evolution [J]. *Icarus*, 2007, 189(2): 279-307.
- [6] Fielder G. Strike-slip faulting in the Vaporum region of the Moon[J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1964, 120(1-4): 275-279.
- [7] Elston W E, Laughlin A W, Brower J A. Lunar near-side tectonic patterns from orbiter-4 photographs[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(23): 5670-5674.
- [8] 陈建平, 王翔, 许延波, 等. 基于多源数据的月球大地构造纲要图编制, 以 LQ-4 地区为例[J]. *地学前缘*, 2012, 19(6): 1-14. [Chen J P, Wang X, Xu Y B, et al. Compilation of lunar geotectonic outline map based on multisource data: A case study of LQ-4 area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 1-14.]
- [9] Jolliff B L, Gillis J J, Haskin L A, et al. Major lunar crustal terranes, Surface expressions and crust-mantle origins[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2000, 105 (E2): 4197-4216.
- [10] 刘建忠, 欧阳自远, 张福勤, 等. 月球的地体构造与起源模式 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(8): 2011-2016. [Liu J Z, Ouyang Z

- Y, Zhang F Q, et al. Terrane tectonics and original model of the moon [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (8): 2011–2016.]
- [11] Pieters C M, Head J W, Gaddis L, et al. Rock types of South Pole-Aitken basin and extent of basaltic volcanism[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 2001, 106 (E11): 28001–28022.
- [12] Wieczorek M A, Le Feuvre M. Did a large impact reorient the Moon? [J]. *Icarus*, 2009, 200(2):358–366.
- [13] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社,2005. [Ouyang Z Y. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House,2005.]
- [14] Lammlein D R. Lunar seismicity and tectonics[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, 14(3):224–273.
- [15] Neumann G A, Zuber M T, Smith D E, et al. The lunar crust, global structure and signature of major basins[J]. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 1996, 101 (E7): 16841–16863.
- [16] Akim E L. Determination of the gravitational field of the Moon by the movement of the artificial Moon Satellite Luna-10[R]. [S. l.]: Foreign Technology Div Wright-Patterson AFB OH, 1967.
- [17] Zuber M T, Smith D E, Lehman D H, et al. Gravity recovery and interior laboratory (GRAIL), mapping the Lunar interior from crust to core[J]. *Space Science Reviews*, 2013, 178(1):3–24.
- [18] Wieczorek M A, Neumann G A, Nimmo F, et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL[J]. *Science*, 2013, 339 (6120):671–675.
- [19] Wilhelms D E, McCauley J F, Trask N J. The geologic history of the Moon[M]. Washington DC: US Government Printing Office,1987.
- [20] Oberst J, Scholten F, Unbekannt H, et al. An inventory of degraded Lunar basins using LROC stereo terrain models[C] // European Planetary Science Congress 2010, [S. l.]: [s. n.], 2010:827.
- [21] 欧阳自远, 刘建忠, 张福勤, 等. 行星地球不均一成因而演化的理论框架初探[J]. *地学前缘*, 2002, 9(3):23–30. [Ouyang Z Y, Liu J Z, Zhang F Q, et al. A preliminary study on the origin and evolution of the planetary earth's heterogeneity [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(3):23–30.]
- [22] 张福勤, 李春来, 邹永廖, 等. 月球的构造演化—嫦娥月图解释的理论基础[J]. *地球化学*, 2010, 39(2):110–122. [Zhang F Q, Li C L, Zou Y L, et al. Lunar tectonic evolution: a conceptual basis for interpreting the lunar photographic images achieved by Chang'e 1 orbiter[J]. *Geochimica*, 2010, 39(2):110–122.]

作者简介:

刘建忠(1968—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:比较行星学与深空探测。

通信地址:贵州省贵阳市观山湖区林城西路 99 号中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心(550081)

E-mail:liujz@nao.cas.cn

Lunar Tectonic Framework and Its Evolution Inhomogeneity

LIU Jianzhong¹, GUO Dijun^{1,2}, JI Jinzhu^{1,2}, LIU Jingwen^{1,2}, WANG Qinglong³

(1. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100014, China;

3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: Based on the lunar crust thickness which is inversed from the GRAIL gravity data and LOLA topography data, the lunar tectonic framework can be preliminarily divided into three units: the mare tectonics locates in the region which mainly covers the nearside procellarum, the land tectonics dominately covering the highland in the farside and the south pole aitken basin tectonics. The major geological events including magma processing, volcanism and meteorite impacting have been studied simply, implying that the three kinds of evolution events vary clearly in different tectonic units.

Key words: Moon; tectonic framework; geological evolution

[责任编辑:宋宏]