第 53 卷 第 9 期
2010 年 9 月

地 球 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS

Vol. 53, No. 9
Sep., 2010

杜劲松,陈 超,梁 青等. 月球表层及月壳物质密度分布特征. 地球物理学报,2010,**53**(9):2059～2067,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.006

Du J S, Chen C, Liang Q, et al. The characteristics of rock-density distributions on the surface and in the crust of the Moon. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(9):2059～2067,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.006

月球表层及月壳物质密度分布特征

杜劲松,陈 超*,梁 青,周 聪

中国地质大学地球物理与空间信息学院,武汉 430074

摘 要 月球表层与月壳岩石密度的横向与径向的变化,反映了月表及内部成分以及月球演化等特征. 本文利用月球勘探者号伽马射线谱仪探测的月表 Fe, Th 与 Mg 元素分布数据,依据前人给出的元素含量与岩石类型的关系,对月球表层进行了岩性填图,并结合岩石样品与陨石的密度测试数据建立初始密度模型,采用铁元素与岩石密度的关系对其进行修正,从而建立了月表物质密度分布模型. 基于嫦娥一号激光测高数据和日本 SELENE 计划发布的月球重力模型,计算出月球布格重力异常,进而反演得到月壳 0～40 km 深度范围内岩石平均密度分布模型. 分析表明,大部分区域上,月壳至少月壳上部岩石成分主要以轻质的富含铝、钙、镁质的硅酸盐类岩石为主. 由此推测,原始月壳极有可能是由轻质的、富含钙、镁质硅酸盐类岩石构成的全球性月壳. 现今的玄武岩与克里普岩只是覆盖于原始的月壳之上的岩层,且厚度不大.

关键词 嫦娥一号,月球岩石,岩石密度,月球重力场,月壳

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.006 **中图分类号** P184 **收稿日期** 2009-11-04,2010-07-25 收修定稿

The characteristics of rock-density distributions on the surface and in the crust of the Moon

DU Jin-Song, CHEN Chao*, LIANG Qing, ZHOU Cong

Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, *China*

Abstract The variations of rock-density on the lunar surface and inside the crust indicate the component of lunar crust and even helpful in comprehending lunar tectonics and evolution. Based on the distributions of metal elements Fe, Th and Mg on the lunar surface derived from the measurement of Lunar Prospector mission, the global petrologic distributions of plagioclase, Mg-rich rock, basalt and KREEP rock can be interpreted mineralogically and geochemically. In this study, the rock-density distribution on the lunar surface was calculated according to petrologic distributions and densities of the rock samples, meteorites and estimations from recent achievements as well. Values of density in the near surface were adjusted with the relationship between the contents of Fe and rock-density. The density model of lunar crust was determined using separated lunar Bouguer gravity anomaly data, which were calculated from topography model CLTM-s01 and gravity model SGM100h. This model represents the lateral variations of density within the depth of 40 km. The distributions of density in the lunar crust indicate that the

基金项目 国家自然科学基金项目(40774060)资助.

作者简介 杜劲松,男,1985 年生,主要从事卫星重、磁数据处理、反演与解释方面的研究. E-mail:djsfly@sina.com

* **通讯作者** 陈 超,男,教授,1982 年毕业于原武汉地质学院,主要从事重力勘探、重力学及位场资料处理与反演理论方面的教学和研究. E-mail:chenchao@cug.edu.cn

lunar crust, at least the upper crust, in most area, is dominated by light silicate rock with rich aluminium, calcium and magnesium elements. It is speculated that the primary lunar crust is composed globally of light and calcium magnesium silicate rocks. The basalt and KREEP rock, as a thin layer, covers the original lunar crust.

Keywords Chang′E-1 (CE-1), Lunar rock, Rock density, Lunar gravity field, Lunar crust

1 引 言

Apollo与月球勘探者号(Lunar Prospector, LP)伽马谱数据[1~3]与嫦娥一号γ射线谱仪、X射线谱仪和干涉成像光谱仪[4]获得的月表多种元素分布表明:月球表面的化学元素分布极不均一. Berezhnoy等[5]利用月表元素丰度资料对月球表面岩性进行分类"填图",他们认为月球高地普遍存在含铁质斜长石的岩石,在月球背面高地的岩石具有富钙贫铝的特征,在月海地区普遍存在富含铁的玄武岩,而在许多大型的月海东缘存在相对富集的辉长石. 李永泉等[6]利用Apollo与LP伽马射线谱仪获取的月表Fe、Th与Mg三种元素分布数据,通过分析元素含量与各种岩石类型的相关性,获取了全月球月表岩石类型分布图,认为月球表面岩石具有多种类型而且分布不均. Konopliv等[7]利用LP165P月球重力场数据,分析认为月壳岩石密度至少存在300～400 kg/m^{3}的变化. Chambat[8]与Reindler[9]研究均认为月壳内部存在较大的密度扰动. 王文睿等[10]对"质量瘤"重力异常进行小波多尺度分解,初步证实主要月海盆地的浅层月壳岩石密度分布不均匀,盆地下的质量异常体主要分布于下月壳的深度范围内. 这些观点预示着月壳岩石密度存在横向变化. 可见,建立月球表层与月壳岩石密度分布模型,可以为进一步研究月球深部构造、月壳均衡、月幔物质的不均匀性与月球内部动力学与演化等问题提供基础与约束.

Ohtake等[11]通过分析SELENE多波段成像仪获取的月球表层斜长石含量数据,认为上月壳极大部分(～98 vol.%)由斜长石组成;Solomon[12]与Haines[13]研究认为在非月海区月表某些元素(如Fe)含量与高程具有相关性,利用元素与矿物的关系以及矿物密度建立月壳岩石密度与高程的线性关系,进而探讨了月球高地月壳的均衡机制. 这两种方法仅反映了月球表层或者上月壳物质成分及分布. Hikida等[14]利用Apollo月球岩石样品的横波与纵波速度随压力的变化,建立月壳径向密度模型. 采用月球重力场可以研究月壳全球尺度的物质密度分布,但以往的研究大部分侧重于"质量瘤"形态与壳-幔界面起伏的反演,而假设充填玄武岩、月壳与月幔物质密度是常值[15,16].

本文依据LP伽马射线谱仪探测的月表元素分布数据,在分析月球表层岩性及其分布的基础上,根据岩石样品与陨石密度测试数据,建立了月表物质密度模型;基于最新的月表地形资料(CLTM-s01)和月球重力场模型(SGM100h),分析了月壳0～40 km深度范围内岩石平均密度的横向变化特征,并提出了一些新的认识.

2 月球表层岩石类型及分布特征

2.1 月球表层岩石类型、元素含量及密度特征

以往的研究表明,月球表面主要有四类岩石:月海玄武岩、高地岩石(主要包括斜长岩与富镁的结晶岩套)、克里普岩(KREEP岩)和角砾岩[17~19].

月海是分布在月表的大型且较平坦的盆地,在月海泛滥期间,月球内部大量的玄武岩流溢出来而充填月海,冷却后形成月海玄武岩. 月海玄武岩主要由辉石、长石、橄榄石和不透明矿物组成,它主要来自月表下150～450 km处物质的部分熔融,不透明矿物主要是钛铁矿[19]. 玄武岩类型较多,其TiO_2含量(质量分数)为0.5%～13%,根据TiO_2的含量将月海玄武岩分为三大类:高钛玄武岩、低钛玄武岩、高铝低钛玄武岩[20]. 月海玄武岩和月陆斜长岩最主要的区别是:玄武岩富含Fe与Ti元素,而斜长岩富含Al与Ca等元素,由于低钛玄武岩中钛含量与斜长岩差异不大,因此,一般用Fe含量来区分玄武岩和斜长岩,当Fe>6%的区域可以认为是玄武岩分布区,而Fe<6%的区域可以作为斜长岩的分布区[6].

在月球形成初期,由于流星体的通量很高,大量撞击月球表面,在月表形成了许多撞击坑,而高地的表面仍保持古老的状态,其地形高,长石含量高,以40°N,180°E为中心,几乎占全月球表面的60%. 高地斜长岩主要由95%的斜长石及少量的低钙辉石、

极少量的橄榄石和单斜辉石组成，是构成原始月壳最主要的岩石类型[20].

富镁的结晶岩套与高地斜长岩是组成月球高地的主要岩石类型，前者富含 Mg 与 Fe，而后者相比富含 Ca 与 Al. Apollo 以及月球陨石样品的研究表明，富镁月岩主要包括橄长岩、苏长岩以及橄榄岩. 矿物学上，富镁月岩主要富含橄榄石以及紫苏辉石，其含量可以作为判别富镁岩石矿物的标志；而从地球化学的角度来看，Mg′([Mg/(Mg+Fe)])可以作为判别富镁岩石的一个重要标志，一般将 Mg′值在 75～85 的岩石作为富镁岩，而 Mg′值在 85～95 的岩石作为极富镁岩[20,21]. 因此，以 Mg′>75 的区域，作为富镁岩石的分布区域[6]. Shearer 与 Papike 认为此类岩石来源于月幔[18]，根据其元素及矿物含量，所以推测其密度为 3038±69 kg/m^3[22,23].

从月球探测者号获得的伽玛射线谱数据显示在月球表面上的风暴洋和雨海区域发现了很多不相容元素的聚集[24]. 克里普岩(KREEP)富含 K，REE 和 P 以及 Th，U，Zr，Ba 等元素[25]，最早在阿波罗-12 样品(12013 #)中发现. 根据钾的含量，克里普岩分为高钾克里普岩($w(K_2O)>0.7\%$)、中钾克里普岩($w(K_2O)=0.35\%\sim0.7\%$)和低钾克里普岩($w(K_2O)<0.35\%$)[20]. 仅在风暴洋和雨海区域形成的盆地下部月壳的温度比较高，由于放射性元素的衰变释放热量，而且 KREEP 盆地火山玄武岩与月海玄武岩在成分上和密度上都不相同，密度和下月壳相似，为 3000～3100 kg/m^3，而月海玄武岩的密度为 3300～3400 kg/m^3[26].

由于 U、Th、K 元素的含量之间都是正相关，而克里普岩区 Th 元素的含量相对很高，在 LP 伽马谱仪探测中，Th 元素探测的精度最高，因此可以利用遥感技术分析 Th 元素在月球的分布情况，然后根据 Th 的含量，划分出克里普岩区，即 $w(Th)>5.0\times10^{-6}$ 的探测区域，为 KREEP 月岩的分布区[27].

角砾岩是一种由于撞击作用而形成的特殊岩石. 撞击角砾岩由各种类型的岩石经冲击破碎并且部分熔融而胶结形成，根据角砾岩中角砾的构造特征，可以将角砾岩划分为单组分、双组分与多组分角砾岩；按其成因、物质组成特征，又可以划分为：岩屑碎块角砾岩、玻璃质角砾岩、结晶熔岩角砾岩、花岗质角砾岩、双组分角砾岩与月壤角砾岩[20]. 角砾岩中的角砾、玻璃和胶结物可以来自不同区域、不同岩床物质或撞击体本身按不同的比例混合而成，它们的矿物与化学成分不均匀.

月壤的基本组成颗粒包括：矿物碎屑(这里定义为含某种矿物 80%以上的颗粒，主要为橄榄石、斜长石、辉石、钛铁矿、尖晶石等)、原始结晶岩碎屑(玄武岩、斜长岩、橄榄岩、苏长岩等)、角砾岩碎屑、各种玻璃(熔融岩、微角砾岩、撞击玻璃、黄色或黑色火成碎屑玻璃)、独特的月壤组分——粘合集块岩、陨石碎片等[20]. 因此，月壤的化学成分、岩石类型和矿物组成非常复杂，几乎每个月壤样品都包括多种岩石和矿物. 它是在月球地质历史时期由无数陨石撞击所形成，厚度可达几米到数十米. 月海地区的平均月壤厚度为 4～5 m，月陆地区的平均月壤厚度为 10～15 m[28]. 一般情况下，月壤厚度与月球表面物质的年龄有关，年龄越大，陨石撞击年代越久，月壤厚度越大，且密度随深度的增加而增加，在 20 cm 处为 1400 kg/m^3，在 1 m 处为 1600 kg/m^3[29].

表 1　月球表层岩石的密度

Table 1　The rock-density of the lunar sub-surface

岩石类型	密度(kg/m^3)	数据来源	参考文献
玄武岩	3300～3400	估计	Wieczorek et al, 1999[26]
	3360	估计	Ringwood, 1970[30]
	2880(细粒晶质)	Apollo 14	Todd et al, 1972[31]
	3300(多孔)	Apollo 12	Stephens, 1971[32]; Wang et al, 1971[33]
	3200(多孔)	Apollo 12	Stephens, et al, 1971[32]
	3270(类晶质)	Apollo 12	Kanamori et al, 1970[34]
	3260(类晶质)	Apollo 12	Kanamori et al, 1970[34]
	3320	Apollo 12	Wang et al, 1971[33]
	2880(有孔隙)	Apollo 11	Kanamori et al, 1970[34]
	3180(细粒)	Apollo 11	Kanamori et al, 1970[34]
	3100	Apollo 11	Anderson, 1972[35]
	3100～3450	估计[a]	Hikida et al, 2007[36]
	3400	估计	Gerhard, 1974[37]
斜长岩	2850～2950	估计[b]	Betteridge et al, 1972[38]
	2900～3000	Apollo 17	Talwani et al, 1973[39]
	2990	Apollo 15	Reid et al, 1972[40]
	2760	估计	Solomon, 1974[41]
	2900	估计	Gerhard[37]
富镁月岩	2900～3000	估计[c]	Wieczorek & Zuber, 2001[23]
	3000	估计	Papike, 1998[42]
克里普岩	3000～3100	估计	Wieczorek & Phillips, 1999, 2000[26,43]
角砾岩	2000～3000	估计	Talwani et al, 1973[39]
	2340(细粒)	Apollo 11	Kanamori et al, 1970[34]
	2210(微粒)	Apollo 11	Anderson, 1972[35]
	2800	Apollo 15	Todd et al, 1972[31]
	2330(破碎)	Apollo 15	Todd et al, 1972[31]
月壤	2990	Apollo 11	Anderson, 1972[35]
	1300	Apollo 12	Wang et al, 1971[33]

注：a 根据样品矿物组分分析；b 根据地震波速度信息估计；c 根据撞击坑中心峰矿物组分分析.

2.2 月球表层岩石类型分布特征

根据LP伽马射线谱仪探测的Fe，Mg与Th三种元素分布(其中Fe与Th元素分布数据的空间分辨率为0.5°×0.5°，而Mg元素为5°×5°)来判别月球表层(伽马射线谱仪的有效探测深度为月表30～50 cm[5])不同的岩石类型.从图1中可以看出，斜长岩占据了月球表面主要的区域，而富镁月岩一般零星地分布在斜长岩的分布区中但分布面积较大，这可能暗示斜长岩组成的月壳由于在月球早期形成时遭受天体的撞击作用，使富镁月岩出露在月表，而富镁月岩一般认为是在月球原始岩浆洋中比斜长岩结晶晚的岩石[17]；克里普岩分布在月海玄武岩区域内，在月球地理位置上，主要位于风暴洋(Oceanus Procellarum)和雨海(Mare Imbrium)区，而玄武岩约占月表表面的17%，主要分布在月球地理位置为30°S～60°N，80°W～90°E的月球正面的中低纬度地区，在东方海与南极艾特肯盆地北部，也有一定量的分布.本文结果与文献[6]中结果的差异主要表现在富镁月岩的分布上，这可能与Fe元素数据的空间分辨率不同有关.

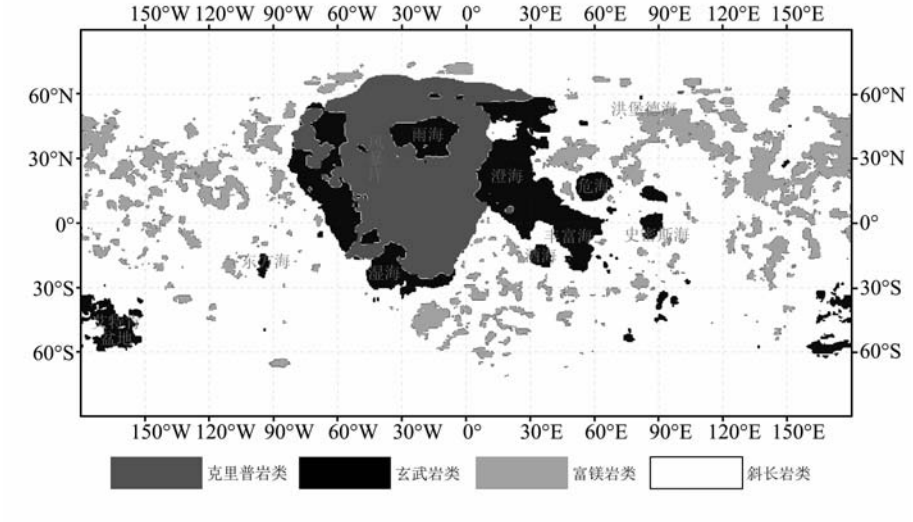

图1 月球表层岩石类型分布图

Fig. 1 Petrologic distributions of the lunar near surface layer

3 基于月球表层物质分类的密度模型

由Apollo系列探测器所带回的月球岩石分析，60%以上是各类角砾岩，即月球岩石经冲击破碎、部分熔融而胶结形成，组分变化大，而且在月球表层岩石密度受孔隙度的影响较大[41]，因而在表1中，各类岩石的密度在一定的范围内变化.综合分析，本文选取的岩石密度参数分别为：玄武岩(3360 kg/m^3)，斜长岩(2800 kg/m^3)，克里普岩(3100 kg/m^3)与富镁月岩(3000 kg/m^3).了解了月球表层各种岩石的密度特征，再利用其分布位置及范围，可构建全月球表层物质初步密度模型.

由于月表长期遭受陨星等外来物的撞击，使得月表物质成分混杂，加上各种元素探测资料空间分辨率不一致，所得到初步密度模型相对粗糙. Wieczorek等利用Fe元素对岩石成分的敏感性建立了Fe元素含量与岩石密度的关系[44]：

$$\rho = (2784 \pm 12) + (28.1 \pm 2.2) \times \mathrm{Fe}(\mathrm{wt}\%). \quad (1)$$

根据式(1)可以得到月球表面物质密度分布.将式(1)计算结果与初步密度模型进行加权平均，可以给出分辨率更高的密度模型.从表1可见，月表岩石密度的上限为3400 kg/m^3，以此为依据试算，认为初始模型权重为0.8较为适宜，由此得到月球表层岩石密度分布，如图2所示.

从图2可以看出，月球正面月海区域由于深部物质如玄武岩等充填而密度较高，月球高地因含有大面积斜长岩而呈现低值，较高密度值的富镁月岩在月球高地散乱分布，但大部分分布于月球背面中、低纬度地区，在正面围绕风暴洋区域也有少量分布，而南极艾特肯盆地北部地区也因分布玄武岩而呈高密度值.这表明月表岩石密度分布不均匀，呈现不对称性和与地形分布的相关性，这与Jolliff等[45]将月壳划分为风暴洋克里普岩地体、斜长质高地地体与南极艾特肯地体三个构造单元相符.

在以往的研究中，许多学者采用了不同的月壳

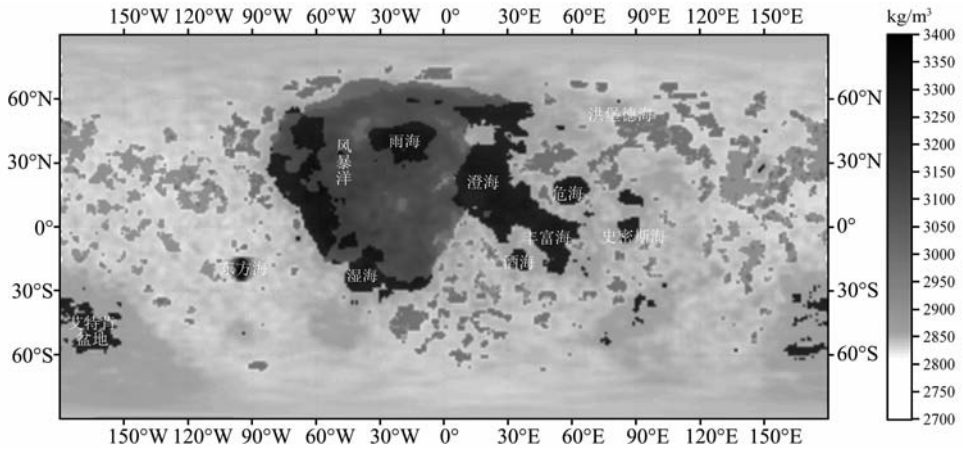

图 2　月球表层物质密度模型

Fig. 2　The density-distribution of the lunar near surface layer

平均密度，如 2800 kg/m^3[36,46~50]、2850 kg/m^3[8]、2900 kg/m^3[51] 及 3000 kg/m^3[41] 等. 基于本文给出的月球表层密度模型，按面积加权平均的方法，可以得到月球表层物质平均密度为 2920 kg/m^3. 尽管这与 Philippe 等根据地震波估计的月壳平均密度值基本一致[52]，但由于月球经历了多个演化过程，尤其是火山活动与岩浆充填过程，表层覆盖下的岩石成分不详，表层密度并不能代表月壳岩石的平均密度. Kuskov[53] 依据月震估计的月壳岩石密度变化范围为2900～3050 kg/m^3，但考虑月壳表层高密度玄武质岩石以及月球表层物质中丰富孔隙的存在，可以认为月壳表层物质的密度变化范围为 2700～3400 kg/m^3.

4　利用月球布格重力异常估算月壳岩石密度

重力异常尤其布格重力异常是与地下物质密度分布密切相关的，因此，可以利用月球布格重力异常对月壳密度进行推测. 假定布格重力异常是由月壳密度横向变化引起的，可以利用该异常对月壳密度横向分布进行反演.

4.1　反演方法

假设月球内部存在一个平均半径为 r'，厚度为 d 的异常质量层，其密度沿径向不变，则该球壳密度横向变化可以表示为

$$\Delta\rho(\lambda,\theta) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}(\bar{C}_{nm}^{\Delta\rho}\cos m\lambda + \bar{S}_{nm}^{\Delta\rho}\cos m\lambda)\bar{P}_n^m(\cos\theta), \tag{2}$$

其中 λ 与 θ 分别为经度与余纬度，$\bar{C}_{nm}^{\Delta\rho}$ 与 $\bar{S}_{nm}^{\Delta\rho}$ 为球面密度球谐函数的规格化系数，$\bar{P}_n^m(\cos\theta)$ 为 n 阶 m 次缔合勒让德多项式. 由该异常质量球壳在月球外部引起的重力异常为

$$\Delta g(r,\lambda,\theta) = \frac{GM}{R^2}\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=0}^{n}(n+1)\left(\frac{R}{r}\right)^{n+2} \times(\bar{C}_{nm}^{\Delta g}\cos m\lambda + \bar{S}_{nm}^{\Delta g}\cos m\lambda)\bar{P}_n^m(\cos\theta), \tag{3}$$

式中 G 为万有引力常数，M 为月球总质量，R 为月球平均半径，r 为计算重力异常的球面半径. 根据 Strang 与 Hees 的方法[54] 可以得到

$$\begin{Bmatrix}\bar{C}_{nm}^{\Delta\rho}\\ \bar{S}_{nm}^{\Delta\rho}\end{Bmatrix} = \frac{M(2n+1)}{4\pi dR^2}\left(\frac{R^2}{rr'}\right)^{n+2}\begin{Bmatrix}\bar{C}_{nm}^{\Delta g}\\ \bar{S}_{nm}^{\Delta g}\end{Bmatrix}, \tag{4}$$

其中 $\bar{C}_{nm}^{\Delta g}$ 与 $\bar{S}_{nm}^{\Delta g}$ 为重力异常球谐函数的规格化系数.

4.2　重力异常的分离

月球布格重力异常是月球壳、幔物质不均匀分布以及壳幔界面起伏的综合反映. 显然，需要通过异常分离来获取月壳横向密度变化所引起的异常.

本文基于 SGM100h 月球重力场模型[55]，根据嫦娥一号激光测高获得的 360 阶次月球高程模型 (CLTM-s01)[56] 进行地形引力值的计算，以获得月球布格重力异常. 地形引力值的计算是采用 Wieczorek 等[57] 提出的方法，其中拟合高程的级数展开至 5 阶，校正密度为 2920 kg/m^3，得到的月球布格重力异常如图 3 所示.

图 3 展示的月球布格异常有三个典型的全球性特征：(1)具有高幅值的“质量瘤”盆地异常；(2)分布于月球正面“质量瘤”盆地群、风暴洋周边区域和位于月球背面南极附近的艾特肯盆地正异常区，以及与月球背面高地相关的负异常区；(3)异常分布在月球正面与背面、南半球与北半球的不对称性. 全球性的区域重力异常高和重力异常低特征可以理解为月

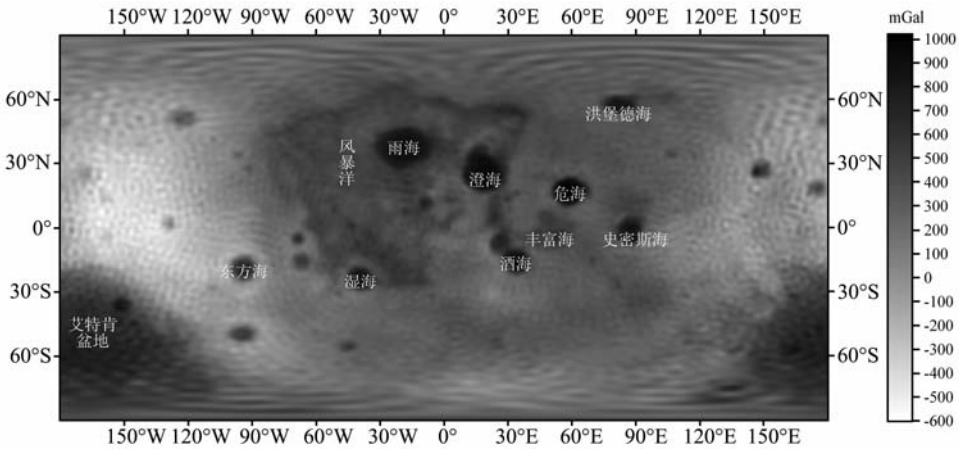

图3 月球全球布格重力异常(高度10 km)

Fig. 3 The lunar global Bouguer gravity anomaly at height of 10 km

壳区域性地减薄或增厚以及月幔物质密度的横向变化."质量瘤"的局部重力高的成因目前仍有不同的解释,但其成因源于表层玄武岩岩浆充填和深部月幔上隆的观点已成为共识.若将全球性"重力高、低"区域背景上的局部重力异常视为月壳岩石密度横向变化的响应,则通过适当的方法可以将区域背景场从布格异常中剔除,然后用于月壳岩石密度的反演.

滑动平均是获取区域重力异常最常用的方法之一.本文采用球冠面窗口滑动平均的方法,通过选择球冠面的张角或极角来控制滑动平均窗口的尺度,计算不同点时采用文献[58]中的坐标转换方法,以此获取区域异常和剩余异常.对月球布格重力异常球谐谱分析可知,全球性"重力高、低"区域背景异常的能量主要集中在0~4阶范围内,而"质量瘤"重力异常能量主要集中在4~15阶范围内.以张角40°,50°,60°的球冠面窗口作滑动平均,可得到不同窗口的区域背景异常谱,如图4所示.50°张角的区域异常基本可以代表月球布格异常的全球性区域背景,同时它也部分地包含了"质量瘤"异常的"低频"成分,即深部幔隆所致的异常.若将窗口张角为50°的滑动平均异常从布格异常中剔除,所获得的剩余异常可视为月壳岩石密度横向变化引起的异常.

4.3 月壳平均密度模型

采用本文4.1节所介绍的反演方法,取月壳的平均深度为40 km(据Chenet等,2006)[49],对所获得的剩余重力异常作适当的圆滑(本文选用了8°张角的球冠滑动平均)后进行反演,得到的月壳岩石横向密度变化如图5所示.

图5展示的月壳岩石平均密度模型是相对平均密度2920 kg/m^{3}的横向变化,且给出的月壳岩石密

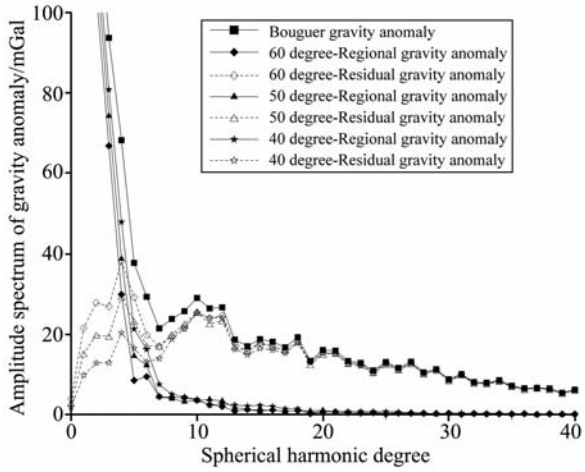

图4 月球重力异常(n=0~40阶)球谐谱(高度10 km)

Fig. 4 The spherical harmonic spectrum (n=0~40) of lunar gravity anomaly at height of 10 km

度为壳内径向平均值,其密度变化范围约为-170~440 kg/m^3.该密度模型显示,月壳平均密度分布的许多特征与布格重力异常相对应,例如,在"质量瘤"盆地、风暴洋及艾特肯盆地呈高值,在高地区域呈低值,但与月表岩石密度分布(图2)存在明显差异.

5 讨论与结论

本文所建立的月表岩石密度和月壳平均密度模型具有不同的含义.前者是基于LP伽马射线谱仪探测资料及样品密度测试结果,刻画了月表物质成分及其变化;假设月表物质平均厚度为500 m,理论计算表明,表层物质分布不均匀所能引起的重力异常(在10 km高度处)仅为-5~11 mGal,可见其对后者的影响有限.月壳平均密度模型所表述的月壳

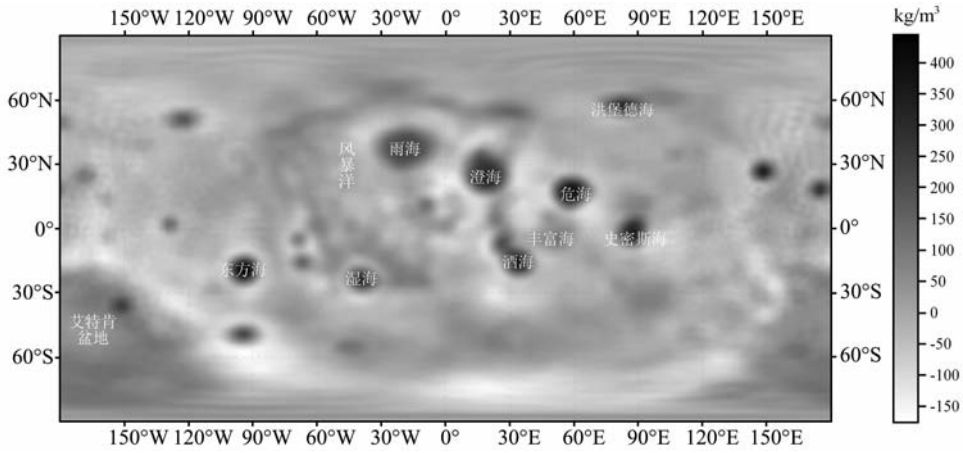

图 5　区域月壳平均密度模型(相对密度 2920 kg/m³ 的变化)

Fig. 5　Lateral variations of density in the lunar crust (relative to the density of 2920 kg/m³)

密度横向变化，则反映月壳结构及壳幔界面起伏特征.

从月球布格重力异常成因来分析，大、中型“质量瘤”盆地，如雨海、澄海、危海、东方海、洪堡德海、湿海、史密斯海、酒海等，表层普遍存在充填玄武岩，且普遍认为盆地具有月幔上隆特征，故月表及月壳岩石平均密度均显高值，这与以往的认识是一致的. 从壳幔均衡观点看，分布有高值负重力异常的月球高地，可解释为月壳增厚，月壳岩石平均密度较两侧低是显然的，而以斜长岩为主的月球高地表层密度则也低于表层平均密度. 此外，在壳幔均衡过程中，形成较早的艾特肯盆地的低洼地势可能导致月壳减薄，使得区域性月壳岩石呈现高密度特征，而且盆地内表层分布着的高密度的玄武岩也将构成重力正异常的成因.

由图 5 可知，除“质量瘤”盆地(包括艾特肯盆地)之外，大部分区域月壳岩石密度在 2850～3050 kg/m³ 之间变化，表明月壳至少月壳上部岩石成分主要以轻质的富含铝、钙、镁质的硅酸盐类岩石为主，且几乎遍布全球. Ohtake 等通过分析 SELENE 的多光谱数据，认为构成月壳表层(或上部)的钙质斜长岩具有全球分布的迹象. 据此推断，月球上极有可能曾经存在一个轻质的、富含钙、镁质硅酸盐类岩石的全球性月壳.

在一些区域，月壳岩石平均密度模型并不支持表层岩石类型对月壳岩石成分的解释. 比照图 1 与图 5 可以发现，月壳岩石密度在克里普岩覆盖的区域并非呈现高值，尤其在风暴洋东部以及“质量瘤”盆地之间地带上. 这些区域月壳岩石密度基本在 2900 kg/m³ 以下，与月表密度差异明显. 由此可以推测，分布于这些区域的克里普岩(局部包括玄武岩)只是覆盖于原始月壳之上. 正演模拟结果表明，克里普岩层厚度小于 1 km.

从月壳岩石平均密度模型上可以看到，分布于风暴洋西部和“质量瘤”盆地群北面高密度条带区域对应的表层玄武岩(局部为克里普岩)，可能与月壳深部岩石或玄武岩浆通道有关；类似高密度条带也出现在“质量瘤”盆地群南面，表层多为钙质斜长岩，其成因尚不清楚.

本文对月表与区域月壳岩石密度的认识仅是初步的，但可以为进一步研究月球深部构造与月球内部动力学及演化等方面的问题提供参考和借鉴.

致　谢　本文所用的月球地形数据源自嫦娥一号激光测高探测成果，月球重力场模型 SGM100h 数据取自日本 JAXA SELENE Data Archive 中心，在此一并表示感谢.

参考文献(References)

[1] Feldman W C, Gasnault O, Maurice S, et al. Global distribution of lunar composition: new results from Lunar Prospector. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(E3): 5016～5019

[2] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, et al. Global elemental maps of the Moon: the Lunar Prospector Gamma-Ray Spectrometer. *Science*, 1998, **2814**: 1484～1489

[3] Lawrence D J, Elphic R C, Feldman W C, et al. The Lunar Prospector gamma ray and neutron spectrometers: overview of lunar global composition measurements. In: Abstracts for 68th Annual Meeting of the Meteoritical Society. *Meteoritics & Planetary Science*, 2005, **40**(8S): A90

[4] 欧阳自远，李春来，邹永廖等. 绕月探测工程的初步科学成果. 中国科学 D 辑：地球科学，2010，**40**(3)：261～280
Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, et al. The primary science result from the Chang'E-1 probe. *Science in China Series D*:

Earth Science (in Chinese), 2010, **40**(3): 261～280

[5] Berezhnoy A A, Hasebe N, Kobayashi M, et al. Petrologic mapping of the Moon using Fe, Mg, and Al abundances. *Advances in Space Research*, 2006, **37**: 45～49

[6] 李永泉，刘建忠，欧阳自远等. 月球表面岩石类型的分布特征:基于 Lunar Prospector(LP)伽马射线谱仪探测数据的反演. 岩石学报，2007，**23**(5)：1169～1174
Li Y Q, Liu J Z, Ouyang Z Y, et al. Petrologic distributions on the Moon: based on the Lunar Prospector (LP) gamma-ray spectrometer data transformation. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2007, **23**(5): 1169～1174

[7] 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

[8] Chambat F, Valette B. A stress interpretation scheme applied to lunar gravity and topography data. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: E02009

[9] Reindler L, Jafar A H. The strength of the lunar lithosphere. *Icarus*, 2003, **162**: 233～241

[10] 王文睿，李 斐，鄢建国等. 月球重力异常的小波多尺度分析. 地球物理学报，2009，**52**(7)：1693～1699
Wang W R, Li F, Yan J G, et al. Wavelet multi-scale analysis on gravity and inner structure of the Moon. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2009, **52**(7): 1693～1699

[11] Ohtake M, Matsunaga T, Haruyama J, et al. The global distribution of pure anorthosite on the Moon. *Nature*, 2009, **461**: 236～240

[12] Solomon S C. The nature of isostasy on the Moon: how big of a Pratt-fall for Airy models. 9th Lunar Planet. Sci. Conf., Houston, Tex. Proceedings, 1978, **3**: 3499～3511

[13] Haines E L, Metzger A M. Lunar highland crustal models based on iron concentrations: isostasy and center-of-mass displacement. 11th Lunar Planet. Sci. Conf., Houston, Tex. Proceedings, 1980, **1**: 689～718

[14] Hikida H, Mizutani H. Mass and moment of inertia constraints on the lunar crustal thickness: relations between crustal density, mantle density, and the reference radius of the crust-mantle boundary. *Earth Planets Space*, 2005, **57**: 1121～1126

[15] Arkani-Hamed J. The lunar mascons revisited. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(E2): 3709～3739

[16] Ishihara Y, Goossens S, Matsumoto K, et al. Crustal thickness of the Moon: implications for farside basin structures. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**: L19202

[17] Taylor G J, Warren P, Ryder G, et al. Lunar rocks. In: Heiken G, Vaniman D, French B M eds. Lunar Source Book. New York: Cambridge University Press, 1991. 183～284

[18] Shearer C K, Papike J J. Early crustal building processes on the Moon: models for the petrogenesis of the magnesian suite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(13): 3445～3461

[19] 欧阳自远，邹永廖，李春来等. 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，2002，**27**(5)：498～502
Ouyang Z Y, Zou Y L, Li C L, et al. Prospect of exploration and utilization of some lunar resources. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2002, **27**(5): 498～502

[20] 欧阳自远. 月球科学概论. 北京：中国宇航出版社，2005. 119～137
Ouyang Z Y. Introduction to Lunar Science (in Chinese). Beijing: China Astronautics Publishing House, 2005. 119～137

[21] Taylor G J. Ancient lunar crust: origin, composition, and implications. *Elements*, 2009, **5**: 17～22

[22] Jolliff B, Wieczorek M A, Shearer C, et al. New views of the Moon. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2006, **60**: 235～239

[23] Wieczorek M A, Zuber M T. The composition and origin of the lunar crust: constraints from central peaks and crustal thickness modeling. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(21): 4023～4026

[24] Lawrence D J, Feldman W C, Barraclough B L, et al. High resolution measurements of absolute thorium abundances on the lunar surface. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(17): 2681～2684

[25] Biggar G M, Hara O, Peckett A, et al. Lunar lavas and the achondrites: petrogenesis of protohypersthene basalts in the maria lava lakes. 2th Lunar Planet. Sci. Conf., Houston, Tex. Proceedings, 1971, **1**: 617～643

[26] Wieczorek M A, Phillips R J. Lunar multiring basins and the cratering process. *Icarus*, 1999, **139**: 246～259

[27] Haskin L A. The Imbrium impact event and the thorium distribution at the lunar highlands surface. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(E1): 1679～1689

[28] 欧阳自远. 天体化学. 北京：科学出版社，1988. 93～145
Ouyang Z Y. Space Chemistry (in Chinese). Beijing: Science Press, 1988. 93～145

[29] Leonard D J. Shear strength of lunar soil from Oceanus Procellarum. *Earth, Moon, and the Planets*, 1973, **18**(1): 58～72

[30] Ringwood A E, Essene E. Petrogenesis of Apollo 11 basalts, internal constitution and origin of the Moon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1970, **1**(Suppl.): 769～799

[31] Todd T, Wang H. Elastic properties of Apollo 14 and 15 rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, **36**(Suppl. 3): 2577～2586

[32] Stephens D R, Lilley E M. Pressure-volume properties of two Apollo 12 basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1971, **35**(Suppl. 2): 2165～2172

[33] Wang C P. Interaction of solar wind with the Moon and possibly other planetary bodies. *AIAA Journal*, 1971, **9**: 1148～1153

[34] Kanamori H, Nur A, Chung D H, et al. Elastic wave velocities of lunar samples at high pressure and their geophysical implications. *Science*, 1970, **167**: 726～728

[35] Anderson D L. The origin of the Moon. *Nature*, 1972, **239**: 263～265

[36] Hikida H, Wieczorek M A. Crustal thickness of the Moon: new constraints from gravity inversions using polyhedral shape models. *Icarus*, 2007, **192**: 150～166

[37] Gerhard K A W. Lunar mascons: another model and its implications. *The Moon*, 1974, **11**: 9～17

[38] Betteridge K L, Mitchell D. Retention of ova by the fallopian tube in mares. *Journal of Reproduction and Fertility*, 1972, **31**: 515

[39] Talwani M, Thompson G, Dent B, et al. Traverse gravimeter experiment. Apollo 17 Preliminary Science Report, 1973, NASA SP-330, 13-1

[40] Reid A M, Ridley W I, Warner J H, et al. Chemistry of highland and mare basalts as inferred from glasses in the lunar soils. 3th Lunar Planet. Sci. Conf., Houston, Tex. Abstract, 1972, **3**: 640～642

[41] Solomon S C. Density within the Moon and implications for lunar composition. *The Moon*, 1974, **9**: 147～166

[42] Papike J J. Planetary Materials. *Reviews in Mineralogy*, 1998, **36**: 1014

[43] Wieczorek M A, Phillips J P. The "Procellarum KREEP Terrane": implication for mare volcanism and lunar evolution. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(E8): 20417～20430

[44] Wieczorek M A, Phillips R J. The structure and compensation of the lunar highland crust. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(E5): 10933～10943

[45] Jolliff B L, Gillis J, Haskin A, et al. Major lunar crustal terranes: surface expressions and crust-mantle origins. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(E2): 4197～4216

[46] 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：物理学，力学，天文学，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. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy* (in Chinese), 2009, **39**(10): 1379～1386

[47] Reindler L, Arkani-Hamed L. The compensation state of intermediate size lunar craters. *Icarus*, 2001, **153**: 71～88

[48] Potts L V, Ralph R B, Frese V. Crustal attributes of lunar basins from terrain-correlated free-air gravity anomalies. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(E5): 5037

[49] Chenet H, Lognonné P, Wieczorek M A, et al. Lateral variations of lunar crustal thickness from the Apollo seismic data set. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, **243**: 1～14

[50] Neumann G A, Zuber M T. The lunar crust: global structure and signature of major basins. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**(E7): 16841～16863

[51] Crosby A, McKenzie D. Measurements of the elastic thickness under ancient lunar terrain. *Icarus*, 2005, **173**: 100～107

[52] Philippe L, Gagnepain-Beyneix J, Hugues C. A new seismic model of the Moon: implications for structure, thermal evolution and formation of the Moon. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, **211**: 27～44

[53] Kuskov O L. Constitution of the Moon: 4. Composition of the mantle from seismic data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1997, **102**: 239～257

[54] Strang G L, Hees V. Some elementary relations between mass distributions inside the Earth and the geoid and gravity field. *Journal of Geodynamics*, 2000, **29**: 111～123

[55] Matsumoto K, Goossens S, Ishihara Y. An improved lunar gravity field model from SELENE and historical tracking data: revealing the farside gravity features. *Journal of Geophysical Research*, 2010, in press

[56] 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
Ping J S, Huang Q, Yan J G, et al. Lunar topography model CLTM-s01 derived from CE-1 satellite laser altimetry measurements. *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy* (in Chinese), 2008, **38**(11): 1601～1612

[57] Wieczorek M A, Phillips R J. Potential anomalies on a sphere: applications to the thickness of the lunar crust. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(E1): 1715～1724

[58] 周　聪，杜劲松，梁　青等. 基于球冠域的月球重力地形校正方法. 地球物理学进展，2010，**25**(2)：486～493
Zhou C, Du J S, Liang Q, et al. A terrain correction method for lunar gravity in the domain of the spherical cap. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2010, **25**(2): 486～493

（本文编辑　何　燕）