

# 月球的地体构造与起源模式\*

刘建忠<sup>1</sup> 欧阳自远<sup>1,2</sup> 张福勤<sup>3</sup> 李春来<sup>1</sup> 邹永廖<sup>1</sup>

LIU JianZhong<sup>1</sup>, OUYANG ZiYuan<sup>1,2</sup>, ZHANG FuQin<sup>3</sup>, LI ChunLai<sup>1</sup> and ZOU YongLiao<sup>1</sup>

1. 中国科学院国家天文台,北京 100012

2. 中国科学院地球化学研究所,贵阳 550002

3. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

1. National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China

2. Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China

3. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China

2009-02-20 收稿,2009-05-06 改回.

Liu JZ, Ouyang ZY, Zhang FQ, Li CL and Zou YL. 2009. Terrane tectonics and original model of the Moon. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8):2011–2016

**Abstract** According to the composition distribution on the lunar surface, lunar crust can be divided into three main chemical terranes: 1) Procellarum KREEP Terrane (PKT); 2) Feldspathic Highland Terrane (FHT); 3) South Pole Aitken Terrane (SPAT). Through research the frontier and focus of cosmochemistry and solid earth science, we found lunar terranes structure and planetesimal accumulation model of lunar origin, giving an simply and reasonable explanation of inhomogeneity chemical distribution on the Moon.

**Key words** The Moon; Terrane tectonics; Original model

**摘要** 按照月球表面物质成分分布的特点,月亮可以划分为三个主要的化学地体:1) 风暴洋克里普地体(PKT);2) 斜长质高地地体(FHT);3) 南极爱特肯地体(SPAT),综合对比天体化学和固体地球科学研究的前缘和热点,本文建立了月球地体构造及其起源的星子堆积模式,对月球化学分布的不均匀性的起因给出了较为简单和合理的解释。

**关键词** 月球;地体构造;起源模式

**中图分类号** P691

随着月球探测水平的日益提高,对于月球基础科学的研究也日渐深入,特别是进入二十世纪九十年代以来,各个航天国家和组织纷纷出台了新的月球探测计划,随着美国“克莱门汀”和“月球勘探者”号、欧空局“智慧一号”、日本“月亮女神号”、中国“嫦娥一号”以及印度“月船一号”环绕探测器的相继成功发射,对月球表面地形地貌以及物质成分等方面进行了全球性和整体性的深入探测,使得人类对于全月球整体构造的研究上升了一个台阶,为月球起源和演化的深入研究提供了契机。本文在综合总结月球探测成果的基础上,通过与行星地球的化学不均一性起源和演化研究的对比,探讨了月球的地体构造与演化模式。

## 1 月球物质分布的特征

基于望远镜的观测和“月球(Luna)号”、“月球轨道(Lunar Orbiter)号”以及“阿波罗(Apollo)”登月计划等的探测,一般认为月球是一个经历过地质演化的类地星体,并具有与地球一样的壳-幔-核的内部层圈结构。对于我们最为关注的月亮,一般认为是一个简单的分层堆积的结构,由一个上面覆盖着基性岩石(月海玄武岩)和熔融残留体(克里普岩(KREEP岩)-富含钾、磷和稀土元素的特殊岩石)的斜长

\* 国家自然科学基金项目(40573047)、国家863计划项目(2008AA12A212)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ9X2-YW-T13)联合资助。

第一作者简介:刘建忠,男,1968年生,博士,研究员,岩石学专业,E-mail: liujz@bao.ac.cn

岩质上月壳和近水平的下月壳基底所组成的一个三文治结构(Taylor and Jakes, 1974)。这种结构的形成主要是来源于月球早期“岩浆洋”中岩浆的分异结晶作用。因为该模式能够合理解释高地岩石和月海玄武岩的地球化学特征而被人们广泛认可。

来源于 Apollo 样品的分析数据以及遥感探测和地基观测的事实表明,月球的正面和背面在物质分布存在明显的差异,说明其地质演化过程可能不同。Apollo15 和 16 的伽玛射线谱仪证实,风暴洋和雨海(西部海)与月球背面高地和东部海相比明显富集 KREEP 成分(Metzger *et al.*, 1973, 1977; Metzger, 1993; Warren and Rasmussen, 1987)。在月球轨道上获取的地形数据也显示,沿着地月轴,月球的质量中心和几何中心大约有 2 千米的位移,这一现象说明,月球背面的地壳要比正面的厚(Taylor, 1999)。

对于月球正面和背面的这种差异性的真正了解是在上世纪 90 年代极轨飞行器成功探测的基础上取得的。1994 年发射的 Clementine 所获得的近全月球地形和重力数据证实,月球的形状在月球的正面和背面之间的确存在差异(Smith *et al.*, 1994; Zuber *et al.*, 1994)。同时,巨大的南极爱特肯撞击盆地的地形全貌也被确定,地球物理模型推断该盆地底部下面的月壳在撞击过程中会明显地减薄,假如地壳的厚度是控制月海玄武岩喷发的唯一原因,那么在该盆地中应该包含比现在观测到的更多的火山岩流。但在该盆地中几乎没有玄武岩的出现,因此月海玄武岩的不均匀分布不单单是由月壳厚度所控制的,应该还有其他的因素所控制比如后期热流和岩浆产出率的变化等等(Neumann *et al.*, 1996; Wieczork and Phillips, 1998)。

月球勘探者(The Lunar Prospector)号月球轨道探测器于 1998 年获得了全月球的伽玛谱数据,从这些数据中获取了全月球表面 Fe、Ti、Th、U、K 等五种元素的分布图(Lawrence *et al.*, 1999, 2000),结果表明不相容元素仅在月球的风暴洋地区高度富集。这样的结论也得到了其他学者的证实,如 Haskin 认为在风暴洋和雨海地区的月壳下面一定是 KREEP 高度富集的地点,在风暴洋区月海玄武岩的下面覆盖着一层比月海玄武岩厚得多的克里普岩(Haskin, 1998)。Wieczork and Phillips (2000)认为仅仅月球雨海和风暴洋地区具有庞大的 KREEP 玄武岩火山作用。

尽管对成因的解释有很多种模式,但不同的研究结果都表明月球表面化学元素的分布极度不均匀,特别是放射性生热元素 Th、U 等的分布。这种化学元素分布的不均匀性在地球上也同样存在(欧阳自远, 1995; 欧阳自远和张福勤, 1995; 欧阳自远等, 1995, 2002; Liu *et al.*, 1999a, b; 刘建忠和欧阳自远, 2003)。月球 KREEP 玄武岩中 U 和 Th 的含量超过球粒陨石 300 倍(欧阳自远, 2005),这就暗示着,月球上很大一部分的生热元素是集中于这一独立的地球化学省中,具初步估算,在该区占月亮 10% 体积的区域中,集中了月亮大约 40% 的 Th 的含量,根据传统的均一论思想,很难寻找到一种

机制能解释月亮甚至月幔的纵向与横向的不均一性及其随时间演化的明显差异。

## 2 地体构造的概念

“地体(terrain/terrane)”,按英文意思是“一个相互关联的岩石或建造系列、群或系统”,“岩石建造或建造群”、“表层具某一特殊岩石或岩石组合占优势的地区”,也即“terrane”一词具有岩石地层学涵义,用于表示某个特定地区。在变质岩石学研究中,广泛使用“terrain”一词,用以表示某种变质岩石占优势的地区,如麻粒岩地体、石英岩地体、绿岩地体等,地体的涵义与中文中地体的含义相近。这是地体的本来涵义。

Irving and Yole (1972)在北美 Klamath 山研究中,正式使用地体(terrane)概念研究显生宙造山带内部构造地层单元(Irving and Yole, 1972),同时 Coney *et al.* (1980)以及 Mizutani (1983)注意到环太平洋陆缘造山带中存在许多空间上紧密相邻的地区具有在古生物群落、地层序列、岩相特征上的巨大差异,根本不能够用沉积环境的变化来解释,因而逐渐将地体概念在原有的地层学涵义上赋予了大地构造学涵义,并将这些一般以区域断裂为边界并具有区域延伸的迥然相异的地质实体称之为“构造地层地体(Tectonostratigraphic terrane)”。运用古生物学、地层学与区域构造学和古地磁资料,认识到板块汇聚边缘的这些构造地层地体可能原来是驮载于大洋板块上海山、洋底高原、大陆裂解碎块等,它们在汇聚板块边界增生到大陆边缘,形成地体增生构造或拼贴构造(Collage Tectonics),形成了地体构造学说。

由于地月系统存在许多相似的地质和地球化学特征,因此将地球科学中地体的概念引入月球科学的研究中是自然可行的,一般地,月球地体和他们的物质可以基于表面平滑和反照率划分为“高地”“月海”。Jolliff *et al.* (2000)根据 Clementine 多波段光谱数据和月球勘探者号的伽玛谱数据将月亮划分为三个独立演化的地体:高地斜长岩地体(FHT),风暴洋克里普岩地体(PKT)和南极爱肯特地体(SPAT)(Jolliff *et al.*, 2000)。上述三个地体的划分方案,仅仅是对月球勘探者和克莱门汀所获取的全月球表面地球化学数据的粗略的处理结果,随着探测水平的提高,相信会有更为详细的月球地体被划分出来。但就目前的研究和探测水平而言,我们认为,这样的划分方案是比较中肯的。

在本文所使用“地体”一词,其含义是一套具有相同地球化学特征和地质演化历史,区别于相邻岩石单位的岩石组合,包含空间上连续延伸和向深部尺度延伸两个方面的含义。因此这样的地体所代表的构造单元可以向下延伸到月壳的底部甚至达到下伏的上月幔。同样地,在时间维的演化上,这些地体可以同时反映月球早期的分异事件和后期的改造事件,诸如月海的岩浆作用。因此,本文使用的地体主要

是指月球形成早期形成的、具有相同地球化学特征和演化进程的,与相邻古老构造单元存在明显差异的构造单元。

### 3 月球地体的基本特征

根据全月球的遥感数据,特别是来自于 Clementine 多波段光谱数据和月球勘探者号的伽玛谱数据的地球化学信息表明,至少三类地球化学和岩石学演化历史都非常独特的化学省可以被分辨出来:1) 风暴洋克里普地体(PKT);2) 斜长质高地地体(FHT);3) 南极爱特肯地体(SPAT)(Jolliff *et al.*, 2000)。

#### 3.1 暴洋克里普地体(PKT)

风暴洋克里普地体(PKT)以玄武岩质岩石为主,范围与在风暴洋-雨海地区重新大面积出露的涉及月球早期分异的岩石组合出露的面积相一致。PKT 划分的主要依据是在该区具有非常高的 Th 丰度,多数地区的 Th 含量超过  $3.5 \times 10^{-6}$ ,最大的区域可达  $9 \times 10^{-6}$ (平均为  $5 \times 10^{-6}$ ),计算表明仅占月亮 10% 体积的区域中,集中了月亮大约 40% 的 Th 的重量。PKT 内部由两种反照率相差比较大的物质组成,即非玄武岩质的高地岩石(亮)和火山熔岩(暗),更为精细的观测数据表明,亮的和 Th 最富集的地区与没有覆盖非玄武岩物质的大的撞击坑有关,而暗的部分与后期覆盖的玄武岩相关(Lawrence *et al.*, 1999, 2000)。但无论是以玄武岩为主的区域,还是以非玄武岩为主的区域其 Th 含量都非常相近,即在 PKT 内部,不仅非玄武岩物质中富集 Th,而且在后期的玄武岩中也富集 Th 元素,说明这种元素的富集现象具有时间演化上的继承性。而该地体的 FeO 的分布特征,与上述 Th 元素的富集具有相似的特点。表明玄武岩的成分继承了下覆岩石的特征,及月海玄武岩的特征可能反映了富集的月亮残集物与地幔源区的特征,说明月亮的后期演化过程与月球起源时的状态有相当大的关系。这样的地球化学演化的继承性在地球上也同样存在(刘建忠和欧阳自远, 2003)。

#### 3.2 斜长质高地地体(FHT)

分布区域和体积最广泛的月球地体是 FHT,其超过月球表面的 60%。该地体最为显著的表面特征是具有高的反照率,分布广泛的撞击坑,较高的地形,以及较高的长石含量。FHT 以具有一个在月球早期分异过程中形成的斜长质克拉通残留物为中心的斜长质区域为主要特征的,该区域中的撞击盆地中并没有挖掘出大量的基性物质,这一现象支持月球存在数十千米厚的斜长质月亮。而所获得的斜长质月球陨石可能代表来自 FHT 斜长质中心区的样品。该地体的主要地球化学特征为:在中心区域地体的平均 FeO 含量为 4.2%,而 Th 为  $0.8 \times 10^{-6}$ ,外围为 5.5%,Th 为  $1.5 \times 10^{-6}$ 。与 PKT 相比该地体的 FeO 和 Th 含量明显较低,而且岩石类型也具

有明显的区别,在中心地区以苏长质的斜长岩为主,而在外围地区由于盆地中溅射物的增加而导致 FeO 和 Th 含量有增加的趋势。

#### 3.3 南极爱特肯(Aitken)地体(SPAT)

南极爱特肯地体(SPAT),一个高纬度的基性异常区,之所以把 SPAT 单独列出,主要基于以下原因:1) 相对于典型的非月海玄武岩月亮,它具有较高的平均 FeO 丰度(可达 7%~14%);2) 其直径为 2600 千米,是太阳系中最大的撞击盆地;3) 其形成于月球历史的早期;4) 占据了很宽广的极端负地形区,其深度比周围的高地低了近 12 千米;5) 尽管它具有深的地形和薄的地壳,但并没有被月海玄武岩所覆盖夷平。

特别地,在 SPAT 中没有出现在其他月海中广泛分布的溢流玄武岩(月海玄武岩)是非常独特现象,对于太阳系最大和最深的撞击盆地,不论是按照月海玄武岩起源的被动模式和主动模式都应该出现大量的月海玄武岩。因为假如岩浆的上升是仅仅依靠浮力(被动)的驱动,那么其将优先侵入到月球正面最深的盆地当中。Smith *et al.* (1994) 对同一条经度的撞击坑底部的海拔高度进行了标定和统计,14 个盆地具有玄武岩,7 个没有玄武岩。其中仅仅有 2 个没有玄武岩的盆地是位于大地水准面之上。而有 3 个是位于多数溢流盆地之下。特别地,SPA 的底板比所有的其他盆地低 1 千米,但他并没有溢流玄武岩。另一方面,莫斯科海,是月球背面一个非常小的盆地,他的内部却有玄武岩。而主动模式在解释 SPA 缺乏溢流玄武岩的问题上也遭遇了滑铁卢。作为一个直径为 2000~2600 千米、平均深度为 5 千米、周围被宽度为 1000 千米、平均高度为 3 千米的高地所环绕的盆地,SPA 是已经被识别出来的太阳系中最大的盆地。大量的直径等于 300 千米的撞击坑叠加在 SPA 盆地并围绕高地的事实表明,盆地明显比莫斯科海要老。SPA 撞击事件的发生在月球内部仍然很热的时候。这样巨大的撞击必然会产生大量的叠加岩片和断裂。主动模式指出,在周围高地之下将发生强烈的部分熔融并溢流进入盆地。SPA 几乎没有任何玄武岩并且在 90% 的中心地区没有正异常的补偿而周边没有负异常的补偿。可见,在月球上,SPAT 是一个非常特殊的构造单元,它的特点区别于其他任何盆地与高原。不仅如此,该区域的地球化学特征也有别于上述两个地体,根据 Apollo 计划的 GRS 数据和 Clementine 的 UVVIS 数据(Metzger *et al.*, 1977; Lucey *et al.*, 1998, 2000),该地体的主要地球化学特征为:在中心区域地体的平均 FeO 含量为 10.1%,而 Th 为  $1.9 \times 10^{-6}$ ,外围为 5.7%,Th 为  $1.0 \times 10^{-6}$ 。与 PKT 相比,该地体的 Th 含量明显较低,而 FeO 含量相近,但与 FHT 相比其 FeO 的含量明显较低而 Th 含量相近。因此,将 SPAT 划分出来作为一个单独的地体是必要和科学的,其有比较独特的地质地球化学和演化特征,对它的单独研究可以为月球的起源和演化提供新的证据。

在上述地体划分原则的讨论中,我们认为将月亮地体定义在古老的构造单元中,因此赞同将月亮进行三分的划分方案。但更多的地体或其他分类方案也可能随着研究的深入而被制定。我们认为之所以这样划分,是因为我们可以解释地体是在月球历史的早期形成的,可以代表月球形成初期的基本特征。在其他一些方案中,可能会有更多地体被识别出来,比如可以将月海玄武岩可能被考虑作为一个单独的地体类型,但在 PKT 和 SPAT,甚至 FHT 之内,火山岩流被结合进岩石组合中可能是决定地体性质和起源的一个重要途径。更重要的是,月海玄武岩形成于月亮演化的晚期,在所有的地质事件中,它只是形成了先存月亮的表面装饰层;因此,我们认为他们是初始地壳地体的装饰物,是生成时间相对较晚的岩石单元,因而不应该与上述三个地体并列,而应该作为各自后期演化的产物。

#### 4 月球地体起源的模式

综上所述,月球表面的元素分布极不均匀,根据其地球化学和地质演化的差异,可以将月球划分为具有截然不同特征的三类地体,即:1) 风暴洋克里普地体(PKT), 2) 斜长质高地地体(FHT), 3) 南极爱特肯地体(SPAT)。在前述的地体特征中已经明确,各个地体具有明显的横向地球化学不均一性,即每个地体的特征元素的含量具有较大的差别,而在纵向上,每个地体物质的成分演化具有明显的继承性,结合我们对于中国最古老的克拉通——华北克拉通的研究结果,我们认为月球地体的地球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,因为月球后期演化的不成熟性,所以月球能够保留更丰富的形成初期的信息,可以为地-月系的起源提供更多客观和直接的证据。

太阳星云凝聚成因演化理论告诉我们,太阳星云在不同吸积域的凝聚可以形成成分不同的星子,星子的形成过程可以划分为三个主要阶段(欧阳自远,1995):

(1) 小星子群形成阶段:均一的球状原始太阳星云因引力失稳塌缩成星云盘,中心形成原太阳,并形成半径约 40 个天文单位(AU)的具一定温度梯度的太阳星云盘。盘内化学元素通过分馏形成成分分带的不同吸积域,并按凝聚顺序形成不同成分的尘粒;由尘粒堆积为千米级(1~10km)单峰质量分布频率的小星子群;

(2) 级序星子群形成阶段:由小星子群通过渐次增生形成具双对数质量分布频率的级序星子群;

(3) 序级分化的星子形成阶段:由较大的星子形成引力中心,逐渐收集轨道附近的较小星子形成具双峰分布的星子群,即大部分质量进入巨星子群中,小部分质量留在较小星子中,由小行星带小行星质量分布特征来看,第三个阶段显然开始了,但没有完成,质量最大的小行星谷神星(2.77a. u.),直径约 960km,质量约  $(11.7 \pm 0.6) \times 10^{23}g$ ,这也许是小行星带最终未能聚积成主行星的主要原因之一。

一方面上述过程符合物体碰撞过程中质量分布规律,即:

$$n(m, t) = c(t)m^{-q}e^{-bm} \quad (1)$$

其中  $n$ , 分布;  $m$ , 质量;  $c, b$  为常数;  $t$ , 为时间;  $q$  为动力学参数;在最大的质量区间,  $m \sim b^{-1}$ , 分布函数以指数关系锐减,即最终的星子数目少,集聚的质量大。在纯聚合即没有碰撞分裂的情况下,  $q \approx 1.8$ , 这种分布特征符合内星云早期“热”星子的聚合特点。小行星带的  $q \approx 1.6, q > 2$  时,主要质量是集中在较小的星子,即这是星子堆积的第一个阶段的特征。

式 1 的另一个表达式是:

$$N_{cum} = CD^{-q} \quad (2)$$

其中  $N_{cum}$  是星子数目,  $D$  为最大星子的直径,当  $q \approx 2$  时,它反映了星子堆积过程中第二阶段的质量分布特点,即从第一阶段到第三阶段,  $q$  发生由  $>2 \rightarrow \approx 2 \rightarrow <2$  的变化(图 1)。

另一方面,对于星云盘物质的演化,太阳星云是一个具温度和化学梯度的梯度场,从比较行星学和陨石组成研究上易于理解(欧阳自远,1988),内太阳星云的化学分馏可以分析出三种主要机制:1) 多元体系中双扩散对流(double diffusive convection); 2) 组分热分选(thermal component-selection); 3) 组分动力分选(dynamic component-selection)。星云中的温度梯度必然导致不同组成的化学分带和尘层,双扩散对流机制总体上必然引起成分差异的层带,这主要是由于星云中心和中面温度相对较高,而外部温度相对较低。根据热星云凝聚理论,星云组分的热分选可导致优选组分的星子形成,不同吸积域和不同阶段形成的星子在化学组成和组分浓度上会出现系统的变化。在星云演化的早期和近中面的内区,难熔组分和金属、金属和硅酸盐以及硅酸盐和“冰”相物质将逐级分离,使不同吸积域以及不同演化阶段出现不

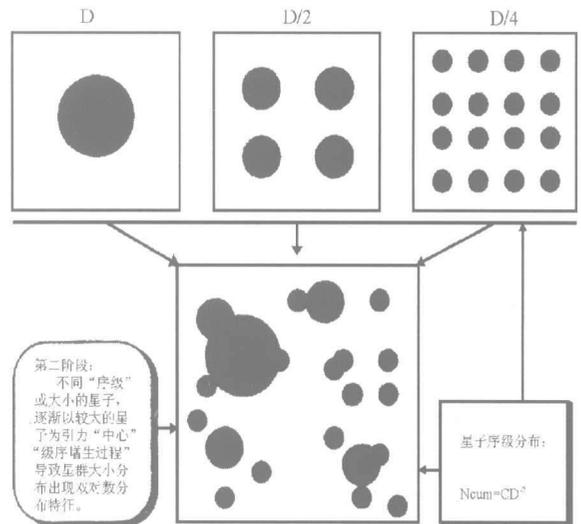


图 1 星子序级分布示意图

Fig. 1 The sketch map of distribution of serial planetesimal

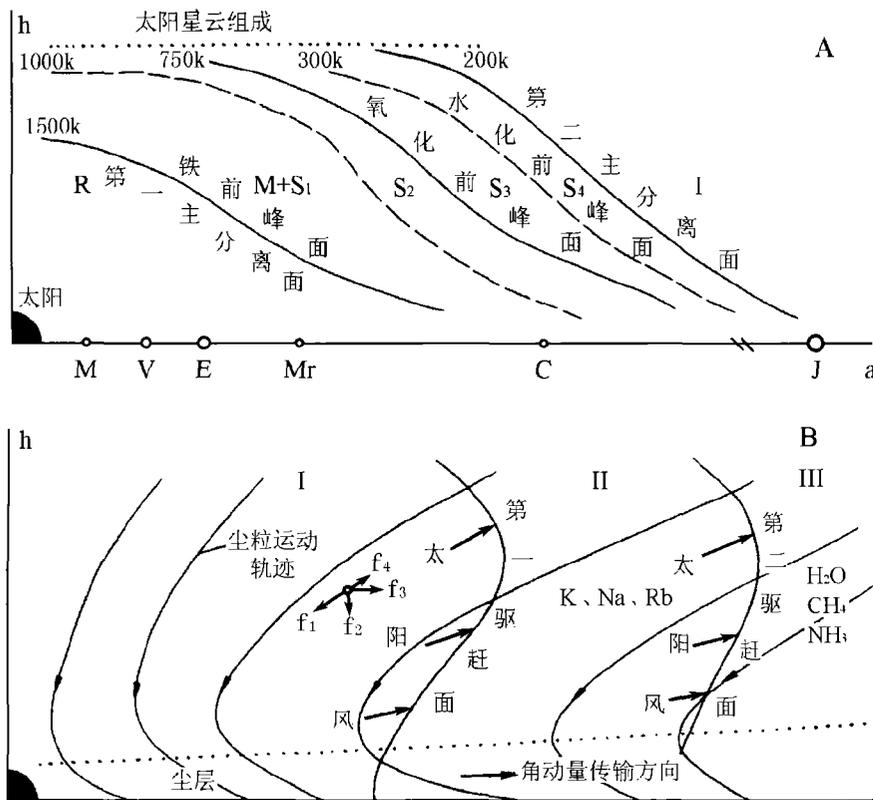


图2 太阳星云的热分选机制(A)和太阳星云中的质量运移的动力格局(B)

图A中,R代表难熔高温相,如Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、REE、PGE、CaAl<sub>12</sub>O<sub>8</sub>、CaTiO<sub>3</sub>、Ca<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>、MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>、U、Th等;M代表金属Fe、Ni;S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、S<sub>4</sub>分别指Mg、Ca硅酸盐、硅酸盐反应生成物(Fe相对富集)、富FeS、FeO及“水化”硅酸盐质凝结核;I指冰相物质如H<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、NH<sub>3</sub>等。图B中,f<sub>1</sub>、f<sub>2</sub>、f<sub>3</sub>和f<sub>4</sub>分别代表来自太阳、中面的引力、离心力以及太阳风的排斥力;I、II、III区分别指内星云区、过渡区和外星云区;h指星云高度;a为长半径距离

Fig. 2 Thermal separating mechanism of the solar nebula (A) and dynamic pattern of mass carry in the solar nebula (B)

同组成的星子群,这一机制同样可以解释行星成分间的差异。动力分选过程中,太阳风对轻组分、强挥发性元素和气相元素将具有有效的驱赶作用,早期太阳风的风速达到400~1200km/s。中等挥发性元素将被驱赶到过渡带,如K、Mn、Li、Rb、Cs、Pb等,强挥发性元素如H、N、O、C以及H<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>、NH<sub>3</sub>被有效地驱赶到“雪线”以外的外星云区,上述机制可用图2表示(欧阳自远,1995)。

根据上述模型,L群和M群星子与C群星子的质量分配以及空间分布应具有消长关系,即金星和水星区,主要由L群和M群星子构成的,地球域则分布了一定量的C群星子,火星区及小行星带则主要由C群星子组成的。根据月球样品的实际样品测试和成分与质量模型,与地球相比,月球明显匮乏挥发性元素如Na、K和Fe等,而明显富集高温凝聚元素Ca、Al、Ti和微量难熔元素Ba、Sr、Th和稀土元素。因此月球可能是地球吸积域残留的一个L群巨星子,并在地球形成后俘获为地球的一颗卫星。

月球堆积模型的建立,较为合理和简单地解释了月球地球化学不均一的现象,即不均一性起源于星子化学成分的不同,而星子化学成分的不同是在太阳星云的分异过程中形成

的。

致谢 在本文的研究和成文过程中国科学院国家天文台的徐琳副研究员,刘建军副研究员,郑永春副研究员以及中科院地球化学所王世杰研究员等给予了诸多的帮助,在此表示衷心的感谢!

### References

Coney PJ, Jones DL and Monger JW. 1980. Cordilleran suspect terranes. *Nature*, 288:329-333

Haskin LA. 1998. The Librium impact event and the thorium distribution at the lunar highlands surface. *Journal of Geophysical Research*, 103:1679-1689

Irving E and Yole RW. 1972. Paleomagnetism and kinematic history of mafic and ultramafic rocks in fold mountain belts. In: Irving E (ed.). *The Ancient Oceanic Lithosphere*; Canada Department of Energy, Mines and Resources. The Earth Physics Branch, 42:87-95

Jolliff BL, Gillis JJ, Haskin LA et al. 2000. Major lunar crustal terranes; Surface expressions and crust-mantle origins. *Journal of Geophysical Research*, 105(E2):4197-4216

- Lawrence DJ, Feldman WC, Barraclough BL, Binder AB, Elphic RC, Maurice S, Miller MC and Prettyman TH. 1999. High resolution measurements of absolute thorium abundances on the lunar surface. *Geophysical Research Letters*, 26: 2681 - 2684
- Lawrence DJ, Feldman WC, Barraclough BL, Binder AB, Elphic RC, Maurice S, Miller MC and Prettyman TH. 2000. Thorium abundances on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research*, 105(E8): 20307 - 20331
- Liu JZ, Ouyang ZY, Zhang FQ and Wang SJ. 1999a. Evidence of isotope for unhomogeneity and origin of upper mantle of North China Platform. *Chinese Science Bulletin*, 44(6): 556 - 560
- Liu JZ, Zhang FQ, Li CL and Wang SJ. 1999b. A preliminary discussion about oxygen isotopic ( $^{17}\text{O}$ - $^{18}\text{O}$ ) heterogeneity in Archaean nucleus, North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 44(24): 2267 - 2269
- Liu JZ and Ouyang ZY. 2003. A preliminary discussion about origin of geochemical heterogeneity: An example from Luliang-Zhongtiao Paleoproterozoic rift. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 22(1): 1 - 7 (in Chinese with English abstract)
- Lucey PG, Blewett DT and Hawke BR. 1998. Mapping the FeO and  $\text{TiO}_2$  content of the lunar surface with multispectral imagery. *Journal of Geophysical Research*, 103(E2): 3679 - 3699
- Lucey PG, Blewett DT and Jolliff BL. 2000. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine UVVIS data. *Journal of Geophysical Research*, 105(E8): 20297 - 20306
- Metzger A E, Tromba JI Peterson LE *et al.* 1973. Lunar surface radioactivity: Preliminary results of Apollo 15 and Apollo 16 gamma-ray spectrometer experiments. *Science*, 179: 800 - 803
- Metzger AE, Haines EL, Parker RE *et al.* 1977. Thorium concentration in the lunar surface. I. Regional values and crustal content. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 8<sup>th</sup>, 949 - 999
- Metzger AE. 1993. Composition of the Moon as determined from orbit by gamma ray spectroscopy. In: Pieters CM and Englert PAJ (eds.). *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition*. New York: Cambridge Univ. Press, 341 - 365
- Mizutani S. 1983. Hida and Mino; Tectonostratigraphic terranes in central Japan. In: Hashimoto (ed.). *Accretion Tectonics in the Circum-Pacific Regions*. Tokyo: Terra Sci. Pub., 169 - 178
- Neumann MD, Zuber MT, Smith DE *et al.* 1996. The lunar crust: Global structure and signature of major basins. *Journal of Geophysical Research*, 101: 16841 - 16843
- Ouyang ZY. 1988. *Cosmochemistry*. Beijing: Science Press, 28 - 67 (in Chinese)
- Ouyang ZY. 1995. Origin and evolution of the planet Earth. *Geology Geochemistry*, 5: 1 - 105 (in Chinese with English abstract)
- Ouyang ZY and Zhang FQ. 1995. Chemical heterogeneity of the Earth and its origin and evolution. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2: 88 - 90 (in Chinese with English abstract)
- Ouyang ZY, Zhang FQ and Lin WZ. 1995. Early geochemical heterogeneity (EGCH) of lead isotopic composition and its origin. *Chinese Science Bulletin*, 40(16): 1480 - 1482 (in Chinese with English abstract)
- Ouyang ZY, Liu JZ, Zhang FQ *et al.* 2002. A Preliminary study on the origin and evolution on the planetary Earth's heterogeneity. *Earth Sciences Frontiers*, 9(3): 23 - 30 (in Chinese with English abstract)
- Ouyang ZY. 2005. *Introduction to Lunar Sciences*. Beijing: Chinese Astronautics Press, 68 - 94 (in Chinese)
- Smith DE, Zuber GA, Neumann GA *et al.* 1994. Topography of the Moon from Clementine Lidar. *Journal of Geophysical Research*, 102: 1591 - 1611
- Taylor SR and Jakes P. 1974. Geochemical evolution of the Moon. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 5<sup>th</sup>, 1287 - 1305
- Taylor SR. 1999. The Moon. In: Weissman PR and Mcfadden LA (ed.). *Encyclopedia of the Solar System*. California: Academic Press, 247 - 254
- Warren PH and Rasmussen KL. 1987. Megaregolith insulation, internal temperatures and bulk uranium content of the Moon. *Journal of Geophysical Research*, 92: 3453 - 3465
- Wieczork DE and Phillips RJ. 1998. Potential anomalies on a sphere: Applications to the thickness of the lunar crust. *Journal of Geophysical Research*, 103: 1715 - 1724
- Wieczork MA and Phillips RJ. 2000. The "Procellarum KREEP Terrane": Implication for mare volcanism and lunar evolution. *Journal of Geophysical Research*, 105(E8): 20417 - 20430
- Zuber MT, Smith DE, Lemoine FG *et al.* 1994. The shape and internal structure of the Moon from the Clementine mission. *Science*, 266: 1839 - 1843

#### 附中文参考文献

- 刘建忠和欧阳自远. 2003. 区域地球化学不均一性起因初探——以吕梁-中条古元古代裂谷带为例. *矿物岩石地球化学通报*, 22(1): 1 - 7
- 欧阳自远. 1995. 行星地球的形成和演化. *地质地球化学*, (5): 1 - 105
- 欧阳自远, 张福勤. 1995. 地球的化学不均一性及其起源与演化. *矿物岩石地球化学通报*, 2: 88 - 90
- 欧阳自远, 张福勤, 林文祝等. 1995. 地球铅同位素早期不均一性及其起源. *科学通报*, 40(16): 1480 - 1482
- 欧阳自远. 1988. *天体化学*. 北京: 科学出版社, 28 - 67
- 欧阳自远, 刘建忠, 张福勤等. 2002. 行星地球不均一成因而演化的理论框架初探. *地学前缘*, 9(3): 23 - 30
- 欧阳自远. 2005. *月球科学概论*. 北京: 中国宇航出版社, 68 - 94