

# 行星地球不均一成因而演化的理论框架初探

欧阳自远<sup>1</sup>, 刘建忠<sup>1,2</sup>, 张福勤<sup>3</sup>, 王世杰<sup>1</sup>, 徐琳<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2 中国科学院 国家天文台, 北京 100012;  
3 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100101)

**摘要:** 地球是太阳系的一部分, 研究地球的成因和演化必须要与太阳系的形成结合起来。文章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而进行了理论上的推导。对星子学说、地球的多阶段堆积模型和地球化学不均一性以及它们的相互关系进行了论述, 从行星演化的角度阐述地球不均一成因而的理论框架。根据行星起源的星子学说, 以及天体化学、地球化学和深部地质地球化学和地球物理资料的多重限制, 行星地球的增生经历了两个主要阶段, 即原地球的形成阶段和晚期星子堆积形成上地幔镶嵌层阶段。早前寒武纪岩石的铅、钕、氧同位素的研究表明, 在地球形成的初期就存在化学不均一性, 而这种不均一性很可能代表初始堆积星子化学组成的差异。

**关键词:** 行星地球; 不均一性; 成因; 演化

**中图分类号:** P59; P148 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2002)03-0023-08

地球是太阳系的一部分, 虽然它是人们研究得最多的行星, 但是人们不可能孤立地彻底了解地球。陨石和太阳的化学成分为地球的基本成分提出了约束, 其他行星的性质为行星形成和演化的理论提供了思路和理论检验。因此在研究地球起源和结构的努力中, 人们可采用从头开始的方法, 即试图通过崩塌、冷却、凝结和吸积来追踪太阳星云的演化, 从而最终得到与地球和其他行星类似的某些新认识, 进一步揭示地球形成和演化的过程。

## 1 星子学说的演变

星云假说是太阳系形成的最为基本的理论模型, 在对星云假说的不断完善过程中, 逐渐形成了目前已广为人接受的行星形成和演化的星子学说。

早在200多年前, I. Kant(1755)和 Laplace(1796)就提出了星云假说, Laplace的热星云假说认为地球是初始全熔而后冷却的。其后 T. C. Chamberlain

(1900)、F. R. Moulton(1900)提出了星子学说, 认为行星是由固体质点聚集成成的固体块体即“星子”(planetesimal)堆积而成的。20世纪40年代, O. Y. Schmidt(1944)仍从星云说的角度, 认为星子是由旋转的太阳星云中产生的固体质点和中间小天体, 通过渐次吸积过程完成行星的增生过程, 星子是星云过程中自然发生的中间态, 而不是早期星子假说的灾变论点。Schmidt的思想经 H. C. Urey<sup>[1]</sup> 和 V. S. Safranov<sup>[2]</sup> 发展逐渐为地球科学家和天文学家所接受, 尤其是介于木星和火星之间3700颗已编录的小行星的发现以及球粒陨石结构和物相特征, 更证明星子假说的正确性。V. S. Safranov<sup>[2]</sup> 提出的级序(hierarchical)增生思想, 即行星是由一系列大小不同的中间天体堆积而成的, 标志着这一假说步入了较成熟的天文学理论阶段, G. W. Wetherill<sup>[3]</sup> 进一步认为, 在类地行星增生之前, 在内星云区出现巨大的中间体, 并通过模拟计算预计在0.4~1.5 AU<sup>①</sup> 范围内, 存在约100颗月球大小的天体( $7.35 \times 10^{25}$  g), 10个质量略大于水星的天体( $3.39 \times 10^{26}$  g)和几个质量超过火星的天体( $6.42 \times 10^{26}$  g), 金星和地球占据了其大部分, 约50%~75%的地球是由这些巨星子(massive planetesimal)

收稿日期: 2002-02-18; 修订日期: 2002-05-27

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-115); 中国科学院院长基金特别资助项目; 中国科学院地球化学研究所所长择优选择基金资助项目

作者简介: 欧阳自远(1935—), 男, 研究员, 中国科学院院士, 地球化学与天体化学专业。

① AU——天文单位, 地球与太阳之间的平均距离为一个天文单位, 1个天文单位为近1.5亿km。

积聚而成的。

在中国, 天文学家戴文赛等<sup>[4]</sup> 不仅将这一假说及时介绍到国内, 而且亦认为小行星带中的小行星是行星形成过程中的“半成品”。70年代中期, 侯德封等<sup>[5]</sup>、欧阳自远<sup>[6,7]</sup> 在天体化学研究的基础上, 总结了地球是由星子的不均一聚集而成的。柳志青<sup>[8,9]</sup> 则从天体化学角度提出区域矿产不均匀性和地球化学不均一性源于星子成分的差异。王道德等<sup>[7]</sup> 则从陨石学的角度提出了类地行星陨石堆积模型。近年来欧阳自远等开展了比较系统的星子堆积与地球化学不均一性成因的探讨, 提出了行星地球形成、演化的综合框架, 并将星子理论、地球化学不均一性、早前寒武纪地质、地球化学联系在一起<sup>[10~16]</sup>, 这一方面的研究正标志着地质学、天体化学与地球化学走向结合, 为地球层圈的演化拓展开新的理论研究领域。

## 2 内星云区星子的类型

Wanke 等认为<sup>[17]</sup>, 行星的母体有两种组分, 一种是高度还原的, 另一种是高度氧化的, 这就使人们自然将这两类组分归结为顽火辉石球粒陨石(还原组分)和 I 型碳质球粒陨石(氧化组分)。但问题很多, 如果行星是由这两种组分形成的, 根据球粒陨石的特征, 人们可以在诸如氧同位素方面看到更多的一致性。根据两组分模式的要求, 地球中 CI 球粒陨石母体的存在也会在 Sr 同位素和惰性气体特征上有清楚的反映, 但实际上并非如此<sup>[18]</sup>。根据陨石学的研究, E, H-L-LL, CV, CO, CM 和 CI 球粒陨石的性质和日心距离的大小不具有简单的关系, 即不存在一个在热梯度场的背景下同时增生的任何模型。根据天体化学和陨石学研究的大量成果和星云温度场计算的模拟资料, 张福勤和欧阳自远提出<sup>[19]</sup>, 在内星云区存在具系统成分差异的三大组分的星子系列或星子群, 即 L 群星子、M 群星子和 C 群星子。C 群星子可进一步划分为两个亚群即 RC 亚群和 OC 亚群。其中: (1) L 群星子的端员组成类似于球粒陨石中白色难熔包体(CAI)、月球, 富难熔组分及放射性元素 U、Th, 可能是金星、水星和地球的主要构成物之一; (2) M 群星子类似铁陨石, 由金属铁、镍等组成, 是类地行星的成核组分; (3) C 群星子中 RC 亚群星子为强还原的硅酸盐星子, OC 亚群星子富水及挥发性组分, 例如碳质球粒陨石型星子。

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<sup>[18]</sup>, 内太阳星云的化学分馏可以分析出 3 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 400~1 200 km/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 1 表示。

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, 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<sup>[20,21]</sup>。

对于火星和木星之间小行星带(2.3~3.3AU)中已确定的大约 3 700 多颗小行星的观测研究表明, 小行星带具有明显的径向成分分带, 靠近火星的一侧主要是分异小行星, 而近木星一侧则是未分异的小行星区。

Taylor 认为小行星带的环带构造可能是一个古老原始的特征, 这一事实说明, 由于小行星带早期加热, 并自此没有受到剧烈的扰动, 太阳系大规模侧向混合的可能性很小, 也即太阳星云盘径向分布了不同成分和性质的星子。Wetherill 认为<sup>[3]</sup>, 水星收集了 0.6AU 内的星子, 地球的 2/3 是由 0.9~1.1AU 处的星子构成, 而金星可能代表了 0.6~1.2AU 区间星子的平均成分。虽然我们已得不到构筑内行星的

星子样品, 但小行星带带状构造以及向太阳方向的内带分异星子的强烈富集, 说明组成内行星的星子曾受到强烈的加热也即分异。

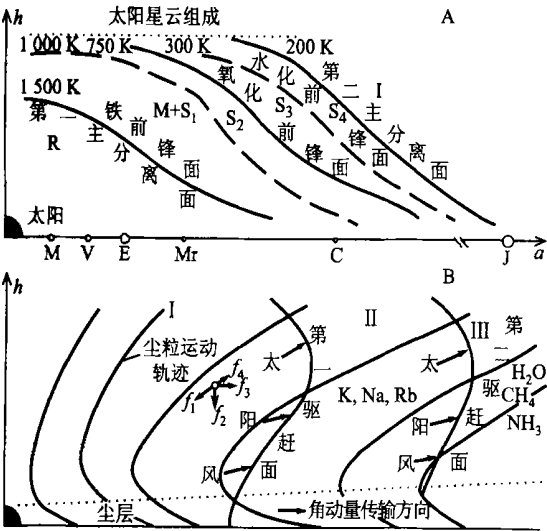


图 1 A—太阳星云的热分选机制;  
B—太阳星云中质量运移的动力格局

Fig. 1 A—Thermal separating mechanism of the Solar nebula;

B—Dynamic pattern of mass carry in the Solar nebula

图 A 中, R 代表难熔高温相, 如  $Al_2O_3$ , REE, PGE,  $CaAl_2O_6$ ,  $CaTiO_3$ ,  $Ca_2Al_2SiO_7$ ,  $MgAl_2O_4$ ,  $Al_2SiO_5$ , U, Th 等;

M 代表金属 Fe, Ni;  $S_1, S_2, S_3, S_4$  分别指 Mg 硅酸盐, 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  $H_2O, CH_4, NH_3$  等。

图 B 中,  $f_1, f_2, f_3$  和  $f_4$  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

(1) 由尘粒堆积为公里级 (1 ~ 10 km) 单峰质量分布频率的小星子群<sup>[1]</sup>;

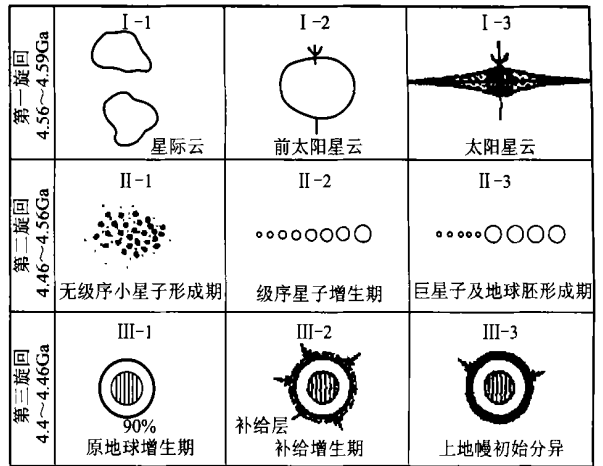


图 2 星子的形成和地球的堆积示意图

Fig. 2 The sketch map of planetesimal formation and accumulation of the Earth

(2) 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<sup>[2]</sup>;

(3) 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<sup>[3]</sup>, 从小行星带小行星质量分布特征来看<sup>[17]</sup>, 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 (2.77AU), 直径约 960 km, 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。

上述过程符合物体碰撞过程中质量分布规律, 即

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

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, 主要质量集中于较小的星子, 这是星子堆积第一个阶段的特征。

式(1)的另一种表达是

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

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 3)。

### 3 地球的多阶段星子堆积模型

#### 3.1 星子与行星的形成过程

行星形成的 4 个主要阶段(图 2)<sup>[11]</sup>:

(1) 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)的具有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;

(2) 尘粒下沉, 向太阳星云中面聚集;

(3) 尘粒在下沉过程中碰撞吸积, 形成星子, 并集中在星云中面;

(4) 以较大的胚星子为中心, 吸积不同序级星子形成行星。

星子的形成过程可以划分为 3 个主要阶段:

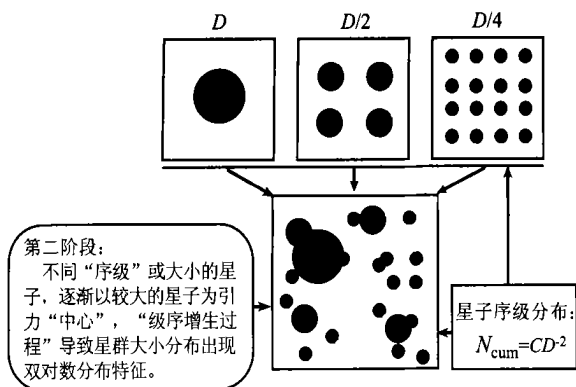


图3 星子序级分布示意图

Fig. 3 The sketch map of distribution of serial planetesimal

### 3.2 地球的多阶段星子堆积模型

通过星子阶段的质量收集, 最后由星子堆积为地球, 星子堆积为地球仍有两个主要阶段, 第一阶段是在胚星子上堆积成原地球, 然后由较小星子在原地球上堆积形成晚期镶饰层。早在 1944 年, Eucken 就提出了非均一吸积模型。均一的吸积模型虽然在阐述行星后期演化上有许多长处, 但对诸如行星间成分的差异, 地球、月球成分差异以及许多地球内部特征如地球化学不均一性仍有许多难以克服的缺陷, 非均一吸积模型基本上是地球多阶段增生模型。根据星云凝聚理论, 首批凝结的固体在温度为 1 750 ~ 1 600 K 范围内形成, 它们是 Ca 和 Al 的氧化物, 硅酸盐和铁酸盐以及像铂族那样的难熔元素, 在某些陨石中的难熔白色包体 (CAI) 中, 例如最著名的 IV 型碳质球粒陨石中, 发现了这些物相 (如刚玉、钙钛矿和黄长石) 和元素, 在镁橄榄石和顽火辉石类硅酸盐大量凝结后不久, 金属铁在很高的温度下凝结, FeS 及含水矿物在小于 700 K 下出现, 富含挥发性元素的物相如碳质球粒陨石的形成温度在 300 ~ 400 K, 因而至少一部分地球必须由此低温下冷凝的物质吸积而成的。由于地球中存在 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>, 使一些人认为地球完全由冷的碳质球粒陨石物质所形成。Turekian 和 Clark<sup>[20]</sup> 假设, 丰富的挥发性物质在晚期进入, 形成一个盖层, 这就是非均一堆积假说。

亲铁元素可以划分为两组,  $D^{M/S} < 10^4$  的中等亲铁元素和  $D^{M/S} > 10^4$  的强亲铁元素, 后者包括 Os, Re, Ir, Ru, Pt, Rh, Au, Pd, 在地幔中的丰度是假设的 CI 球粒陨石初始物质的 1/300 ~ 1/400, 而大多数中等亲铁元素是 CI 球粒陨石的 1/5 ~ 1/20。亲铁元素的双模式分布特征支持地球是非均一增生的<sup>[22, 23]</sup> 另外, 上地幔中明显存在亲铁元素丰度过

剩现象 (相对 CI 球粒陨石初始母物质的计算值), 也证明上地幔没有与地核构成化学上的平衡。假设地球是由被还原的组分 (包括金属铁和硫化物) 增生而成的, 原地球增生时, 地核就形成了, 使原地球地幔亏损亲铁元素, 绝大部分地球增生后, 增生物质变得更氧化, 金属铁的分选基本停止, 中等亲铁元素可在地幔中增加到一个相近量。在这一阶段即第二阶段少量金属铁或富硫金属液体继续分离, 导致强亲铁元素及 Mo 亏损。Chou 等<sup>[24, 25]</sup>、Sun<sup>[26]</sup> 认为, 地幔中大多数强亲铁元素观测丰度主要是由晚期即第三阶段镶补层控制的, 也即导致了所谓的亲铁元素丰度过剩现象。Newsom 认为<sup>[27]</sup>, 第一阶段堆积了地球的 93%, 第二阶段到目前地球的 99%, 第三阶段即为晚期镶补 (late veneer)。从第一阶段到第三阶段, 金属铁和硫化物逐渐降低, 硅酸盐的量逐渐增加, 并且还还原相转变为更氧化的物相, 第一阶段是金属和硅酸盐的分离阶段, 是地核的主要形成阶段, 第二阶段存在少量金属和硫化物与硅酸盐的分离, 第三阶段金属分离完全停止, 导致上地幔亲铁元素丰度过剩。

上述过程解释了地核的形成机制、地幔亲铁元素丰度模式, 同时提出了非球粒陨石的初始组成问题, 以及地球层圈结构的另一解释, 即非均一吸积模型中地球层圈结构与地球本身是同时诞生的, 它与地球形成机制是密切相关的。

根据地球物理探测, 下地幔不均一性程度较之上地幔要低得多, 这至少暗示了上地幔和下地幔没有经历一种平衡的演化过程, 下地幔 (670 ~ 2 900 km) 是相对层状均一的圈层。上地幔的演化, 在许多方面都表明其具有独立演化的特征, 而且似乎上地幔从没有发生过全熔, 和地核从没有建立起平衡关系。其主要表现在: (a) 上地幔以强烈的不均一性为特征, 而下地幔则相对均一; (b) 上地幔富 Re, Au, Ni, Co 及铂族元素 (PGE: Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) 等亲铁元素, 没有有效地在平衡条件下进入金属相; (c) 用传统的相变模式解释上、下地幔间的过渡带 400 ~ 670 km, 暗示了上、下地幔在成分上的相似性, 这与观测事实不符; (d) 板内形成的所谓热点火山岩及来自地幔内部的金伯利岩和碱性岩极富强不相容元素, 如南非的金伯利岩区, 东非裂谷的乞力马扎罗碳酸岩质火山及大洋板内富集型火山的出现, 不能用壳-幔物质交换的板块俯冲模式来解释, 它们更可能来自 400 ~ 670 km 的源区或由这一源区转移出的富集流体形成的再生源区。上述说明, 不能将上地幔

看成是参与地球全熔事件的分异的独特层位。在整个类地行星区, 地球体积最大, 但其壳极薄, 不可能是全球分异的产物, 而似乎只是上地幔分异的产物。

下地幔和地核是原地球广泛或全熔形成的, 过渡带 400~670 km 可能相当于原地球的分异壳。根据最新的地球物理研究资料, 介于 400~670 km 之间的上下地幔过渡带, 以 400 km 和 670 km 之间的一组不连续面及分隔的层圈组成, 在全球范围内比较稳定。

依据非均一吸积模型并考虑了地球化学、天体化学和地球物理资料的多重限定, 欧阳自远等认为<sup>[1]</sup>, 地球的增生主要经历了两个主要阶段(图 4):

## 4 地球的早期化学不均一性及其起因

根据上述地球的多阶段堆积模型, 地球的形成过程可分为两个主要阶段: 原地球增生阶段和补给增生阶段。在内星云区, 由于主要形成热分异型星子, 故而, 原地球的增生可出现全熔或广泛熔融, 形成在重力上稳定的分层原地球, 地核主要是原地球分异的产物。上地幔作为后续镶补堆积的薄层, 主要由经历了前地球星子阶段冷却过程的小行星增生而成的, 由于早期补给星子和原地球的汇聚速度较小, 一直没有使上地幔区域发生广泛的熔融或全熔过程, 上地幔补给层主要因同位素衰变能加热缓慢演化至今。而地壳的形成是上地幔演化的产物, 上地幔补给层以分熔方式形成了早期的地壳。

### 4.1 早前寒武纪地球化学不均一性

#### 4.1.1 全球的铅同位素证据

根据全球克拉通地盾区矿物、岩石 Pb 同位素组成的统计研究<sup>[3]</sup>, 可以得出如下几点结论: (1)南、北大陆间存在巨大规模的横向不均一性; (2)不同克拉通间存在横向不均一性; (3)克拉通内部不同变质地体间存在横向不均一性; (4)同一地体内部(100~1 000 km)存在横向不均一性。

依据上述, 地球在 3.8~1.8 Ga 期间形成的早期不均一性只可能有两类成因: (a)反映地球增生时, 增生体的初始不均一性; (b)早期地球分异演化过程中形成的不均一性。由于大量有关早期岩石的 Nd 同位素资料业已揭示地壳起源于 4.2 Ga 前的亏损地幔源(DM), 至少上地幔部分没有经历过全熔事件(0~400 km), 大陆地壳起源于上地幔的部分熔融, 故而, 上地幔补给星子的原始不均一性可以在地球形成早期得以保存, 尽管在太古宙时期, 各种证据表明上地幔熔融程度扩大, 但不至于出现大规模的均一化, 不一致区域熔融可能是早前寒武纪时期上地幔分熔的主要特点。

#### 4.1.2 华北克拉通的钕同位素证据

根据近年来所获得的华北克拉通太古宙变质镁铁质火山岩系较为准确的 Sm-Nd 同位素年龄及初始 Nd 同位素组成和演化的时空关系的对比研究表明<sup>[5]</sup>, 不同地区岩石的  $\epsilon(\text{Nd})$  值和  $I(\text{Nd})$  值具有明显不同的数值(具体数值参见参考文献[15]), 说明在华北克拉通内部的不同地体之间存在钕同位素地球化学的不均一性; 而  $\epsilon(\text{Nd})$  值和  $I(\text{Nd})$  值在整个

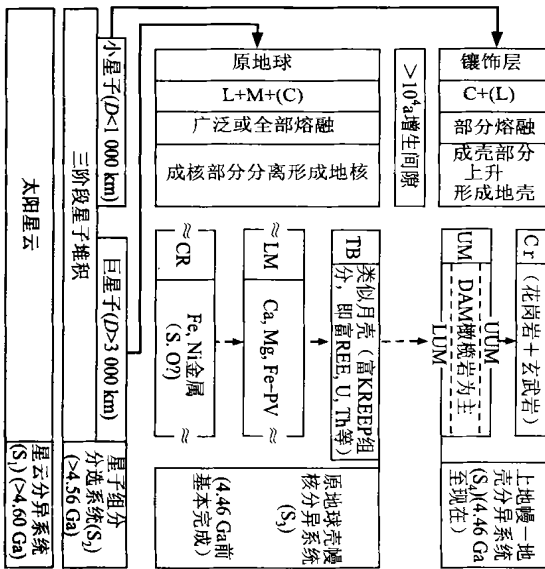


图 4 地球的星子堆积模型

Fig. 4 The model of planetesimal accumulation of the earth  
L—L 群星子; M—M 群星子; C—C 群星子; CR—地核;  
LM—下地幔; TB—过渡带; UM—上地幔; Cr—地壳;  
KREER—一月中富 K、REE 和 P 的组分; PV—钙钛矿

第一阶段, 由序级分化的巨星子堆积成原地球, 形成现今地球质量的 70%~90%, 即约堆积到地幔过渡带位置的大小, 巨星子是由金属铁组成的 M 群星子和类似月球组成的 L 群星子构成, 原地球形成时的年龄约 4.46 Ga。

第二阶段, 由较小的晚期星子(直径 < 1 000 km, 平均约 400 km $\pm$ )堆积到地球外层形成上地幔镶饰层, 晚期镶嵌堆积的星子主要是 C 群星子, 可能也有一定数量的 L 群星子, 地球最后形成的年龄约在 4.40~4.45 Ga 之间。

上、下地幔过渡带(400~670 km)很可能是原地球分异的富集 REE, U, Th 等难熔亲石元素的原地球壳转化而来的。

太古宙的变化却是没有明显规律的, 且比较平稳, 也就是说, 时间在整个太古宙期间的钨同位素演化过程中没有起到关键的作用, 由此可以推断, 太古宙之前和太古宙之后在同一地区应具有相似的钨同位素组成。目前对于后太古宙, Jacobsen 等<sup>[28]</sup>已报道了亏损地幔的  $\epsilon(\text{Nd})$  值基本保持不变至少可以延续到 1 500 Ma, 以此类推, 对于缺少物质记录的地球形成的最初的几亿年里, 上地幔的  $\epsilon(\text{Nd})$  值也很可能没有发生大的变化。换言之, 不同地区  $\epsilon(\text{Nd})$  值和  $I(\text{Nd})$  值的不同是由于继承了地球初始不均一性, 说明地球特别是上地幔应是起源于不均一堆积的过程。

#### 4.2 早前寒武纪地球化学不均一性的起因: 来自氧同位素的证据

基于氧同位素的研究, Clayton 等<sup>[29]</sup>发现, 所有的地球和月球的样品均落在斜率近于 0.5 的直线上 (0.52), 起源于太阳系的陨石, 其氧同位素演化线平行于地月线 (即斜率相同而截距不同), 陨石中若含有太阳系外物质 (如  $\text{C}_2$ 、 $\text{C}_3$  型碳质球粒陨石中的白色包体), 则构成与地月线斜交的直线, 这样可以利用氧同位素组成演化特征的差异将陨石划分为 6 大类<sup>[30]</sup>。具有不同氧同位素组成的陨石来源于不同的母体<sup>[31]</sup>, 因为没有任何一个氧同位素存在已知的天然放射性母体, 同时也未曾观测到由高能粒子照射所引起的其它核效应, 因此, 如  $\text{C}_2$ 、 $\text{C}_3$  型碳质球粒陨石中的白色包体类物质出现的氧同位素组成演化异常可以认为是原始化学不均一性引起的, 这已成为判别太阳系物质来源的重要依据。

图 5 为华北克拉通不同陆核氧同位素组成数据的投影图, 从图中可见不同陆核所采样品所构成的趋势线均近于平行地月线, 也就是说其斜率基本相同, 但截距却有一定的差异, 截距的不同代表陆核氧同位素组成和演化趋势的不同。

特别需要指出的是冀东地区的样品, 曹庄杂岩与青龙—王厂剖面所在的遵化—青龙绿岩带形成年龄相差近 0.8 Ga, 但两个地区的 4 个数据点构成一条平行于地月演化线的直线 (斜率为 0.56), 验证了氧同位素组成的演化特征 (即演化的线性关系) 并没有随时间而发生变化。华北克拉通其它陆核氧同位素组成演化特征的差异应反映对区域古地幔源区同位素组成不均一性的继承导致的, 而不是由于壳幔演化过程引起的。不同陆核的 3 条演化线的截距不同反映出其氧同位素组成演化的差异, 这种差异说

明它们可能来源于初始化学组成有异的原始母体, 即晚期堆积的成分有异的小星子。

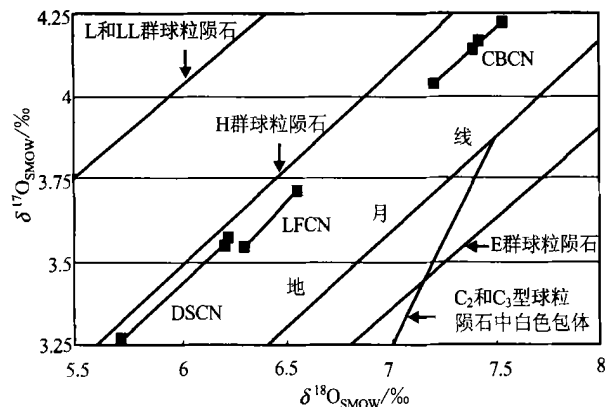


图 5 华北克拉通不同陆核的氧同位素组成

Fig. 5 The component of oxygen isotope in North China Craton  
图中 L+LL 群球粒陨石、H 群球粒陨石与  $\text{C}_2$ 、 $\text{C}_3$  的白色包体和钙长辉长无球粒陨石演化线引自文献 [27~29]。DSCN (东胜陆核) 的斜率为 0.588 6, 截距为 0.091 8; CBCN (环渤海陆核) 的斜率为 0.561 7, 截距为 0.010 3; 而 LFCN (临汾陆核) 的斜率为 0.643 1, 截距为 0.498 8

如图所示所有样品的点都平行于地月演化线, 与其它来源于太阳系物质的其它陨石均构成一组较好的平行线, 这进一步证实了 Clayton 关于太阳系物质具有平行的氧同位素演化线的思想, 同时也说明华北太古宙陆核是起源于太阳系本身物质。图中一个有趣的现象是所有样品的氧同位素演化线靠近 H 群球粒陨石, 表明华北克拉通的原始成分接近于 H 群球粒陨石。

## 5 小结

根据行星起源的星子学说, 以及天体化学、地球化学和深部地质地球化学和地球物理资料的多重限制, 行星地球的增生经历了两个主要阶段, 即原地球的形成阶段和晚期星子堆积形成上地幔镶饰层阶段。早前寒武纪岩石的铅、钨、氧同位素的研究表明, 在地球形成的初期就存在化学不均一性, 而这种不均一性很可能代表初始堆积星子化学组成的差异。

## References [参考文献]:

- [1] UREY H C. *The Planets* [M]. New Haven: Yale University Press, 1952. 283.

- [ 2 ] SAFRONOV V S. *Evolution of the Protoplanetary Cloud and Formation of the Earth and Planets*[ M ]. Moscow: Nauka (Translated by the Israel program for scientific translation), 1972.
- [ 3 ] WETHERILL G W. Accumulation of the terrestrial planets and implications concerning Lunar origin[ A ]. *Origin of the Moon*[ M ]. Houston, Texas: Lunar and Planets Institute, 1986. 519-550.
- [ 4 ] DAI Wensai. *The Evolution of Solar System*[ M ]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1979 (in Chinese). [ 戴文赛. 太阳系演化学[ M ]. 上海: 上海科学技术出版社, 1979. ]
- [ 5 ] HOU Defenq, OUYANG Ziyuan, YU Jincheng. *Nucleus Transit Energy and the Evolution of the Earth's Matter*[ M ]. Beijing: Science Press, 1974. 1-91 (in Chinese). [ 侯德封, 欧阳自远, 于津生. 核转变能与地球物质演化[ M ]. 北京: 科学出版社, 1974. 1-91 ]
- [ 6 ] OUYANG Ziyuan. Some problems of study on meteorite and the Earth's evolution[ J ]. *Geology Geochemistry*, 1974(4): 1-7(in Chinese). [ 欧阳自远. 陨石研究与地球演化的几个问题[ J ]. 地质地球化学, 1974(4): 1-7. ]
- [ 7 ] OUYANG Ziyuan. The brief introduction of original of the Earth[ J ]. *Geology Geochemistry*, 1978(7): 4-12(in Chinese). [ 欧阳自远. 地球起源简介[ J ]. 地质地球化学, 1978(7): 4-12 ]
- [ 8 ] LIU Zhiqing. *The Evolution of Solar System*[ M ]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987(in Chinese). [ 柳志青. 太阳系演化学[ M ]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987. ]
- [ 9 ] LIU Zhiqing. Genetic and forecast of giant ore deposits[ J ]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Chemistry*, 1989(4): 225-229(in Chinese). [ 柳志青. 超大型矿床密集区的成因及预测[ J ]. 矿物岩石地球化学通讯, 1989(4): 225-229. ]
- [ 10 ] OUYANG Ziyuan, ZHANG Fuqin, WANG Shijie. Accumulated the Earth and its primordial heterogeneity[ J ]. *The Advance of the Earth Science*, 1994(3): 1-6(in Chinese). [ 欧阳自远, 张福勤, 王世杰. 堆积的地球及其原始不均一性[ J ]. 地球科学进展, 1994(3): 1-6. ]
- [ 11 ] OUYANG Ziyuan. Origin and evolution of the planet Earth[ J ]. *Geology Geochemistry*, 1995(5): 1-105(in Chinese). [ 欧阳自远. 行星地球的形成和演化[ J ]. 地质地球化学, 1995(5): 1-105 ]
- [ 12 ] OUYANG Ziyuan, ZHANG Fuqin, LIN Wenzhu, et al. Tectonic frame and its origin of the cratonic basement, North China[ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(8): 734-736(in Chinese). [ 欧阳自远, 张福勤, 林文祝, 等. 华北克拉通基底构造格架及其形成模式[ J ]. 科学通报, 1995, 40(8): 734-736. ]
- [ 13 ] OUYANG Ziyuan, ZHANG Fuqin, LIN Wenzhu, et al. Early geochemical heterogeneity (EGCH) of lead isotopic composition and its origin[ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(16): 1480-1482(in Chinese). [ 欧阳自远, 张福勤, 林文祝, 等. 地球铅同位素早期不均一性及其起源[ J ]. 科学通报, 1995, 40(16): 1480-1482. ]
- [ 14 ] OUYANG Ziyuan, ZHANG Fuqin. Chemical heterogeneity of the Earth and its origin and evolution[ J ]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Chemistry*, 1995(2): 1-4(in Chinese). [ 欧阳自远, 张福勤. 地球的化学不均一性及其起源和演化[ J ]. 矿物岩石地球化学通讯, 1995(2): 1-4 ]
- [ 15 ] LIU Jianzhong, OUYANG Ziyuan, ZHANG Fuqin, et al. Evidence of isotope for unhomogeneity and origin of upper mantle of North China Platform[ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(6): 556-560.
- [ 16 ] LIU Jianzhong, ZHANG Fuqin, LI Chunlai, et al. A preliminary discussion about oxygen isotopic ( $^{17}\text{O}$ - $^{18}\text{O}$ ) heterogeneity in Archaean nucleus, North China Craton[ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(24): 2267-2269.
- [ 17 ] WANKE H D. Mantle chemistry and accretion history of the Earth [ A ]. KRONER. *Archaean Geochemistry*[ M ]. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 1-24.
- [ 18 ] ZHANG Fuqin, OUYANG Ziyuan. Types of planetesimal inner the nebula[ J ]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Chemistry*, 1989(4): 225-229.
- [ 19 ] OUYANG Ziyuan. *Cosmochemistry* [ M ]. Beijing: Science Press, 1988. 36-58(in Chinese). [ 欧阳自远. 天体化学[ M ]. 北京: 科学出版社, 1988. 36-58. ]
- [ 20 ] TAYLOR S R. Accretion in the nebula: the relationship between terrestrial planetary compositions and meteorites[ J ]. *Meteorites*, 1991, 26: 267-277.
- [ 21 ] OUYANG Ziyuan. *Advance of Lunar Geology*[ M ]. Beijing: Science Press, 1977. 248-302(in Chinese). [ 欧阳自远. 月质学研究进展[ M ]. 北京: 科学出版社, 1977. 248-302. ]
- [ 22 ] TUREKIAN K K, CLARK S P. Inhomogeneous accretion of the Earth from the primitive Solar nebula[ J ]. *Earth Planet Sci Lett*, 1969, 6: 346-348.
- [ 23 ] RINGWOOD A E. Chemical evolution of the terrestrial planets[ J ]. *Geochem Cosmochem Acta*, 1966, 30: 41-104.
- [ 24 ] CHOU C L. Fractionation of siderophile elements in the Earth's upper mantle[ A ]. *Proc 9th Lunar Planet Sci Conf*[ C ], 1978. 219-230
- [ 25 ] CHOU C L, SHAW D M. Siderophile trace elements in the Earth's oceanic crust and upper mantle[ J ]. *Proc 13th Lunar Planet Sci Conf, J, Gephy Res*, 1983, 88: A507-518
- [ 26 ] SUN S S. Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle[ J ]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1982, 46: 179-192.
- [ 27 ] NEWSOM H E. Accretion and core formation in the Earth: evidence from siderophile elements[ A ]. NEWSOM H E, JONES J H. *Origin of the Earth*[ M ]. London: Oxford University Press, 1990. 101-134
- [ 28 ] JACOBSEN S B, WASSERBURG G J. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites (II)[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 67(2): 137-150
- [ 29 ] CLAYTON R N, GROSSMAN L, MAYEDA T K. A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites[ J ]. *Science*, 1973, 182: 485-488.
- [ 30 ] CLAYTON R N, ONUMA N, MAYEDA T K. A classification of meteorites based on oxygen isotopes[ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976(30): 10-18.
- [ 31 ] CLAYTON R N, MAYEDA T K. Oxygen isotopes in eucrites, shergottites, nakhlites, and chassignites[ J ]. *Earth and Planetary Science*

# A PRELIMINARY STUDY ON THE ORIGIN AND EVOLUTION OF THE PLANETARY EARTH'S HETEROGENEITY

OUYANG Zi-yuan<sup>1</sup>, LIU Jian-zhong<sup>1,2</sup>, ZHANG Fu-qin<sup>3</sup>, WANG Shi-jie<sup>1</sup>, XU Lin<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;*

2. *National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China;*

3. *Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100101, China*)

**Abstract:** The Earth is a part of the solar system, the study on the origin and the evolution of the Earth should connect with the formation of the solar system. Based on recent data of geochemistry, geophysics and cosmochemistry, the authors introduce the hypotheses about the origin and the evolution of the Earth's heterogeneity, including the planetesimal theory and the accumulation model of the Earth, geochemical heterogeneity and their relationships. According to the planetesimal theory of the origin of planet and the data of cosmochemistry, geochemistry and geology-geochemistry, and geophysics of the Earth's interior; the process of accumulation of planetary Earth can be divided into two stages: in the early stage, the primordial Earth was formed; and in the late stage, the planetesimal accumulated on the primordial Earth and the decorated layer of upper mantle was formed. The study of lead, neodymium and oxygen isotopic compositions of Precambrian rocks indicated that the heterogeneity has already existed in the early stage of the earth formation, and that the differences of isotopic composition in different crust terranes demand the difference of chemical composition resulted from planetesimals accumulation.

**Key words:** the planetary Earth; heterogeneity; origin; evolution