

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.804>



最古老陆壳是如何形成的？

万渝生

中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

大陆是人类赖以生存之地. 最古老陆壳是如何形成的? 又如何从小变大? 出于天生的好奇心、科学研究和实际生产的需要, 人类对地球早期历史开展了长期的探索.

1 核心思想

地球起源及早期演化是地球科学最基本问题之一. 最古老陆壳的形成及性质, 是阐释地球壳幔物质分异和构造演化的逻辑起点; 研究早期大陆地壳生长规律和阶段性及与最古老地壳的继承关系, 是古老大陆形成演化研究首要和长期的科学主题. 它们是了解地球从“非宜居”向“宜居”转化过程的关键一步, 具有不可替代的科学价值. 关键科学问题包括: 最古老陆壳物质的发现和鉴别, 最古老陆壳的组成特征、形成机制、演化规律和构造背景等.

2 研究现状

几乎所有最古老陆壳物质(≥ 39 亿年锆石和 ≥ 38 亿年岩石) 都是通过锆石定年发现的. 由于本身形成少和后期改造, 现存最古老陆壳物质十分稀少. 全球范围内迄今也仅在 8 个地区发现最古老岩石. 年龄最大的是北美 40.3 亿年阿卡什塔(Acasta) 片麻岩(Bowring and Williams, 1999), ≥ 38 亿年岩石分布规模最大的是西南格陵兰, 总面积大于 $1\ 000\ \text{km}^2$. 在中国大陆, ≥ 38 亿年岩石在华北的鞍山、冀东、信阳地区被发现. 已有近 20 个地区发现最

古老锆石, 遍布各个大陆, 西澳杰克山(Jack Hills) 是 ≥ 39 亿年锆石发现最多的地区, 全球最古老的 4.4 Ga 碎屑锆石也来自这里(Wilde *et al.*, 2001). 在中国大陆, 至少有 4 个地区发现最古老锆石(Wan *et al.*, 2009).

最古老岩石以 TTG(英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩) 为主, 还有闪长岩—辉长岩、地幔橄榄岩和镁铁质—超镁铁质杂岩及以沉积方式形成的表壳岩存在, 后者主要由变质玄武岩—超基性岩组成, 存在变质碎屑沉积岩、变质化学沉积岩和变质中酸性火山岩. 一些地区存在不同时代和不同类型的最古老岩石. 最古老陆壳的物质组成显示出地区独特性, 例如, 在西南格陵兰主要为英云闪长质岩石, 在华北鞍山主要为奥长花岗质岩石, 而花岗闪长质岩石主要存在于北美阿卡什塔和华北冀东地区. 最古老 TTG 岩石的地球化学组成存在较大变化, 普遍具有低的 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 表明它们大多形成于相对低压的条件下, 这在很大程度上可能反映了早期地球的高热状态. 最古老陆壳的物质组成和形成条件显示出多样性, 表明陆壳在那时就已达到较高的演化程度.

最古老锆石研究主要来自西澳杰克山, 提供了地球最早期陆壳形成演化的重要信息. 碎屑锆石普遍具有振荡环带和低的 Ti 温度, 结构和组成上与花岗质岩石中的岩浆锆石类似, U-Pb 谐和年龄从 44 亿年到 39 亿年几乎连续分布, 表明物源区存在长期花岗质岩浆作用, 陆壳岩石在地球形成之后不久就

作者简介: 万渝生(1958—), 博士, 研究员, 长期从事早前寒武纪地质和锆石年代学研究. E-mail: wanyusheng@bjshrimp.cn

引用格式: 万渝生, 2022. 最古老陆壳是如何形成的? 地球科学, 47(10): 3776—3778.

Citation: Wan Yusheng, 2022. How did the Oldest Continental Crust Form? *Earth Science*, 47(10): 3776—3778.

已出现,在 40 亿年左右已有了相当的规模. 锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化于 4.6‰~7.3‰ 之间,与地幔平衡锆石的数值相近或稍高,44 亿年碎屑锆石具有稍高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,暗示地球在那时可能就有大洋存在(Wilde *et al.*, 2001). 锆石 Hf 同位素组成存在大的变化, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 从正值到负值都有,但大多为负值,表明主要来自于富集地幔或类似于球粒陨石储库的物源区.

普遍认为,地球形成演化最早期经历过岩浆海阶段,形成镁铁质—超镁铁质地壳. 它们的 Hf 同位素组成接近球粒陨石或更为富集,而不是亏损地幔值. 这样的最原始地壳发生部分熔融,形成具有球粒陨石或更为富集初始 Hf 同位素组成的 TTG 岩石. Hf 同位素组成富集的最古老 TTG 岩石和锆石在全球多个地区存在,支持了岩浆海事件形成全球性镁铁质—超镁铁质地壳的认识. 硅酸盐地球最初 1 亿年的分异作用产生了亏损的上地幔,为许多太古宙 TTG 陆壳提供了物源. 在地球最早期阶段,更多的是镁铁质地壳. 随着时间演化,TTG 岩石和陆壳规模逐渐增大,初始镁铁质—超镁铁质地壳逐渐消耗,直至消亡.

根据西澳杰克山碎屑锆石 Lu-Hf 同位素研究, Kemp *et al.* (2010) 认为,岩浆海结晶及与水圈相互作用,富集稀土的铁镁质原始薄地壳在 45~44 亿年形成,它们发生熔融形成了杰克山冥古宙(>40 亿年)锆石的物源区岩石. 通过碎屑锆石地球化学研究,结合大数据分析,Turner *et al.* (2020) 认为杰克山碎屑锆石来自安山物质源区,由此推测那时板块构造体制就已起作用. 从类地行星比较看,地球在早期一定遭受过强烈陨石撞击. 根据杰克山碎屑锆石 Ti 温度与加拿大古元古代萨德伯里(Sudbury)陨石撞击成因熔融体的锆石结晶温度(578~815 °C)类似,Kenny *et al.* (2016) 认为前者也可能来自陨石撞击形成的熔融体.

陨石撞击也被用于全球最古老阿卡什塔片麻岩的成因解释. 然而,Reimink *et al.* (2014) 提出阿卡什塔片麻岩形成的冰岛模式:地幔上涌形成厚的洋底高原,玄武质岩浆结晶分异形成阿卡什塔花岗质岩石. 阿卡什塔片麻岩具有中等的 SiO_2 (57.9%~66.9%)、高的 TFeO (8.6%~15.3%) 和低的 $\text{Mg}^\#$ 值 (13~18), 稀土总量较高,轻重稀土分异很弱,存在较明显负铕异常,组成特征与冰岛岩十分类似. 岩

石无疑形成于低压条件下.

构造体制根本上受控于地球内部的热状态,地球逐渐冷却决定了构造体制的基本变化规律. 在板块体制起作用之前,早期地球的壳幔相互作用可能存在热管(heat-pipe)和深成软盖(plutonic squishy lid)两种构造体制. 考虑到最早期地球存在岩浆海阶段,基性岩浆发生结晶分异形成闪长质岩石及与闪长质类似的 TTG 岩石,可能是初始陆壳形成的重要方式. 板底垫托引起镁铁质—超镁铁质地壳下部部分熔融也可形成 TTG 岩石. 许多 ≥ 38 亿年变质玄武岩—超基性岩(和变质辉长岩)都具有大离子亲石元素富集、Nb-Ta 亏损的地球化学组成特征,被作为板块构造起作用的重要证据(Nutman *et al.*, 2021).

3 发展前景

最古老陆壳物质十分稀少,其组成和性质了解不多,形成方式和构造背景知之更少,几乎在所有方面都存在争论. 例如,最古老锆石 Hf 同位素组成存在很大变化, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 并非都为负值,反映了物源区的多样性,比富集玄武岩部分熔融形成最早期陆壳的假说(Kemp *et al.*, 2010)更为复杂. 开展最古老陆壳物质研究,寻找到它们是基本前提. 进一步研究将注重最早期大陆地壳的形成环境和具体过程、最早期地幔的组成和演化及与陆壳形成演化的相互关系、与月球和类地行星最早期地质历史对比及多学科综合研究和大数据应用. 对分析技术也提出了更高的要求,包括更高空间和质量分辨率的微区原位分析方法的应用.

参考文献

- Bowring, S. A., Williams, I. S., 1999. Priscoan (4.00–4.03 Ga) Orthogneisses from Northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 3–16. <https://doi.org/10.1007/s004100050465>
- Kemp, A. I. S., Wilde, S. A., Hawkesworth, C. J., et al., 2010. Hadean Crustal Evolution Revisited: New Constraints from Pb-Hf Isotope Systematics of the Jack Hills Zircons. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(1–2): 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.04.043>
- Kenny, G. G., Whitehouse, M. J., Kamber, B. S., 2016. Differ-

- entiated Impact Melt Sheets may be a Potential Source of Hadean Detrital Zircon. *Geology*, 44(6): 435–438. <https://doi.org/10.1130/g37898.1>
- Nutman, A. P., Bennett, V. C., Friend, C. R. L., et al., 2021. Fifty Years of the Eoarchean and the Case for Evolving Uniformitarianism. *Precambrian Research*, 367: 106442. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106442>
- Reimink, J. R., Chacko, T., Stern, R. A., et al., 2014. Earth's Earliest Evolved Crust Generated in an Iceland-Like Setting. *Nature Geoscience*, 7(7): 529–533. <https://doi.org/10.1038/ngeo2170>
- Turner, S., Wilde, S., Wörner, G., et al., 2020. An Andesitic Source for Jack Hills Zircon Supports Onset of Plate Tectonics in the Hadean. *Nature Communications*, 11: 1241. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14857-1>
- Wan, Y. S., Xie, H. Q., Dong, C. Y., et al., 2019. Hadean to Paleoarchean rocks and zircons in China. In: Van Kranendonk, M. J., Smithies, R. H., Bennett, V., eds., *Earth's Oldest Rocks (Second Edition)*. Elsevier, 294–327.
- Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H., et al., 2001. Evidence from Detrital Zircons for the Existence of Continental Crust and Oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 409 (6817): 175–178. <https://doi.org/10.1038/35051550>