

# 地核出溶混染基底岩浆洋与深部地幔不均一性的成因

李俊威, 杜治学\*

中国科学院广州地球化学研究所, 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

\* 联系人, E-mail: [duzhixue@gig.ac.cn](mailto:duzhixue@gig.ac.cn)

## Deep mantle heterogeneities formed through a basal magma ocean contaminated by core exsolution

Junwei Li & Zhixue Du\*

State Key Laboratory of Deep Earth Processes and Resources, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

\* Corresponding author, E-mail: [duzhixue@gig.ac.cn](mailto:duzhixue@gig.ac.cn)

doi: [10.1360/CSB-2025-5599](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5599)

在我们脚下2900 km的地幔最深处, 并非一片沉寂. 那里隐藏着两个巨大的谜团——位于非洲大陆和太平洋板块下方的大型低速省(LLVPs)<sup>[1]</sup>. 如同地震波给地球做CT扫描时发现的模糊阴影, 这些区域的地震波速异常偏低, 同时还散布着一些波速极低的“斑块”(超低速区, ULVZs). 它们是什么? 从何而来? 又如何经历数十亿年而不被地幔对流彻底搅匀? 这些问题一直困扰着地球科学家.

一个经典模型认为, 在地球形成初期, 遭受巨大撞击(如月球形成的大撞击事件)后, 全球曾处于熔融状态, 形成了一个深达地幔底部的岩浆洋. 随着地球的冷却固化, 重物质下沉, 轻物质上浮. 在地幔最底部, 可能残留过一个基底岩浆洋(BMO)<sup>[2]</sup>. 它的结晶分异可以产生富铁的致密物质, 这些物质堆积起来, 就可能形成了今天我们看到的LLVPs<sup>[3]</sup>.

然而, 这个看似完美的故事却有一个致命的破绽. 热力学相平衡计算表明, 由于液相线矿物布里奇曼石优先结晶, BMO在凝固过程中会迅速消耗硅酸盐熔体中的硅, 最终形成一个约1000 km厚的底层, 该层含有约20 wt%的铁方镁石<sup>[4]</sup>. 但地震层析成像却告诉我们, 地幔底部的铁方镁石含量远低于此<sup>[5]</sup>. 如果LLVPs真的来自古老的BMO, 那么就必须存在某种机制, 抑制了大量铁方镁石的形成.

我们的研究为此提供了一个可能的解决方案, 其灵感来自另一个前沿领域: 地核的演化. 地核并非一成不变. 随着地球的冷却, 地核中溶解的轻质元素(如氧、硅、镁等)会达到

饱和, 并以氧化物的形式析出<sup>[6]</sup>. 这一过程就是地核出溶. 由于氧化镁和二氧化硅的密度远远小于液态地核的密度, 这些氧化物出溶体会向核幔边界运移和聚集. 如果此时上覆地幔已经凝固, 出溶体在核幔边界不断堆积, 最终会以底辟的形式向上刺穿地幔数百公里<sup>[7]</sup>. 而如果地幔底部仍然存在一个液态的BMO, 出溶体将进入BMO并迅速溶解. 冷却中的地核就这样源源不断地向BMO供给氧化镁和二氧化硅. 我们将这个模式称为“地核出溶混染岩浆洋”(BECMO), 其包含了BMO的凝固和地核物质的出溶这两个关键过程.

通过热力学模拟, 我们对比了传统BMO和BECMO的固结和分异过程. 对于传统的BMO模型, 岩浆洋固结时, 首先结晶的是布里奇曼石. 它会大量消耗熔体中的硅, 导致残余熔体极度富铁, 最终结晶形成巨厚的富铁方镁石的致密层. 而地核出溶物质的加入彻底改变了BMO的成分和结晶矿物组成. 由于地核中硅的丰度远高于镁, 且二氧化硅析出的热力学驱动力比氧化镁更强, 导致二氧化硅从地核中的出溶速率和总量都远远超过氧化镁. 因此, BMO中因布里奇曼石结晶而消耗的硅得到了来自地核的持续补充. 这强烈抑制了铁方镁石的大量结晶, 使得BECMO结晶的产物转变为以布里奇曼石和赛石英为主的矿物组合<sup>[8]</sup>. 与传统的BMO模型预测的极高铁方镁石含量相比, 该层的铁被有效稀释, 其密度远低于富含铁方镁石的BMO底层, 但又高于上方的正常地幔, 从而形成一个具有中等密度的富硅层, 该成分特征与地震学

引用格式: 李俊威, 杜治学. 地核出溶混染基底岩浆洋与深部地幔不均一性的成因. 科学通报, 2025, 70: 5929–5931

Li J, Du Z. Deep mantle heterogeneities formed through a basal magma ocean contaminated by core exsolution (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 5929–5931, doi: [10.1360/CSB-2025-5599](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5599)

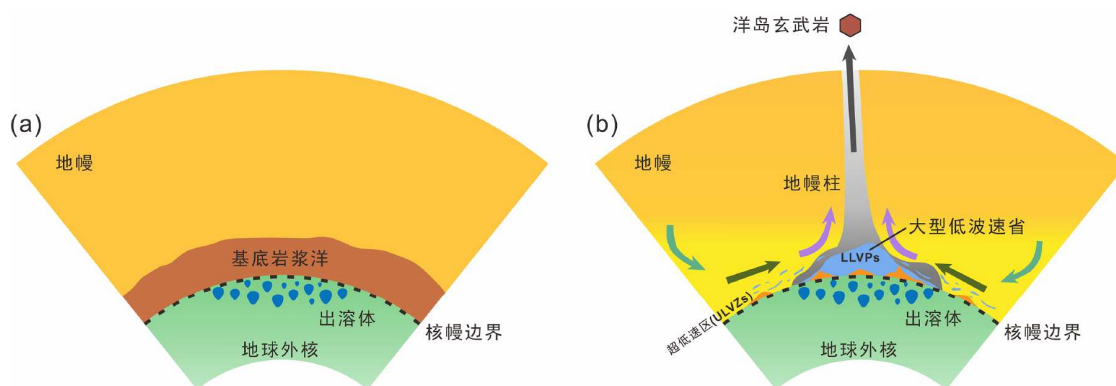


**图 1** (网络版彩色)地核出溶混染岩浆洋(BECMO)的形成和演化示意图。(a) 地球形成初期曾经经历全球性的熔融事件, 随着地幔的冷却、结晶, 在地幔最底部形成了一个基底岩浆洋(BMO)。(b) 从地核中出溶的二氧化硅持续加入BMO, 抑制了铁方镁石的结晶, 并在地幔底部形成一层由布里奇曼石和赛石英为主的中等密度层, 该层在地幔对流的作用下最终演化成大型低波速省(LLSVPs)和超低速区(ULVZs)<sup>[8]</sup>

**Figure 1** (Color online) Schematic illustrating the formation and evolution of a BECMO. (a) A high-energy Moon-forming impact inevitably produces a global deep magma ocean, and its further crystallization may lead to the formation of a BMO. (b) Continuous incorporation of silica exsolved from the core into the BMO suppressed the crystallization of ferropericlase, leading to the formation of a moderately dense layer dominated by bridgmanite and seifertite at the base of Earth's mantle. This layer was subsequently advected by mantle convection, eventually evolving into LLSVPs and ULVZs<sup>[8]</sup>

观测揭示的低铁方镁石含量一致。随后我们通过高分辨率地球动力学模拟追踪了这些BECMO固结物质的命运。模拟显示, 这些中等密度物质被地幔对流扰动、搬运, 最终在核幔边界上方聚集形成巨大的化学堆积体, 这与观测到的LLVPs吻合。同时, 一些最致密的物质滞留在最底部, 形成了波速极低的ULVZs斑块(图1)<sup>[8]</sup>。

BECMO模型不仅解释了LLVPs和ULVZs等地球物理观测现象, 也建立了与同位素地球化学观测的联系。由于地核物质亏损<sup>30</sup>Si<sup>[9]</sup>和<sup>182</sup>W<sup>[10]</sup>, 富集<sup>3</sup>He<sup>[11]</sup>。当继承了地核同位素组成的出溶物质溶解到BMO中, 这些核素特征也随之注入。因此, BECMO物质可能兼具BMO和地核的双重地球化学特征。而这恰好可以解释某些来自地幔深部的洋岛玄武岩中观

察到的轻硅同位素、<sup>182</sup>W负异常以及高<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比值。

BECMO模型描绘了一幅地球早期演化的新图景: 地核出溶与BMO的相互作用共同塑造了地幔最深部的物理和化学结构。这个模型调和了地震学、地球动力学和地球化学之间看似矛盾的证据, 为理解深部地幔不均一性起源提供了新的视角, 弥补了我们对地幔动力学和地球深部演化认识上的关键空白。相关研究成果发表在*Nature Geoscience*<sup>[8]</sup>。未来, 我们需要更精细的三维模拟来验证ULVZs的分布范围, 也需要更多的实验来约束地核出溶的速率和成分。但可以肯定的是, 地球的核幔边界是一个远比我们想象中更为动态和活跃的界面, 地核与地幔之间持续数十亿年的物质和能量交换, 是驱动地球演化的核心引擎之一。

**致谢** 感谢国家自然科学基金(42503025, 42394112)资助。

## 推荐阅读文献

- 1 Garnero E J, McNamara A K, Shim S H. Continent-sized anomalous zones with low seismic velocity at the base of Earth's mantle. *Nat Geosci*, 2016, 9: 481–489
- 2 Boukaré C É, Badro J, Samuel H. Solidification of Earth's mantle led inevitably to a basal magma ocean. *Nature*, 2025, 640: 114–119
- 3 Pachhai S, Li M, Thorne M S, et al. Internal structure of ultralow-velocity zones consistent with origin from a basal magma ocean. *Nat Geosci*, 2021, 15: 79–84
- 4 Boukaré C, Ricard Y, Fiquet G. Thermodynamics of the MgO-FeO-SiO<sub>2</sub> system up to 140 GPa: application to the crystallization of Earth's magma ocean. *J Geophys Res Solid Earth*, 2015, 120: 6085–6101
- 5 Deng X, Xu Y, Hao S, et al. Compositional and thermal state of the lower mantle from joint 3D inversion with seismic tomography and mineral elasticity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2023, 120: e2220178120
- 6 Hirose K, Morard G, Sinmyo R, et al. Crystallization of silicon dioxide and compositional evolution of the Earth's core. *Nature*, 2017, 543: 99–102

- 7 Helffrich G, Ballmer M D, Hirose K. Core-exsolved  $\text{SiO}_2$  dispersal in the Earth's mantle. [J Geophys Res Solid Earth](#), 2018, 123: 176–188
- 8 Deng J, Miyazaki Y, Yuan Q, et al. Deep mantle heterogeneities formed through a basal magma ocean contaminated by core exsolution. [Nat Geosci](#), 2025, 18: 1056–1062
- 9 Shahr A, Hillgren V J, Young E D, et al. High-temperature Si isotope fractionation between iron metal and silicate. [Geochim Cosmochim Acta](#), 2011, 75: 7688–7697
- 10 Kleine T, Touboul M, Bourdon B, et al. Hf–W chronology of the accretion and early evolution of asteroids and terrestrial planets. [Geochim Cosmochim Acta](#), 2009, 73: 5150–5188
- 11 Olson P L, Sharp Z D. Primordial helium-3 exchange between Earth's core and mantle. [Geochem Geophys Geosyst](#), 2022, 23: e2021GC009985