

## 专题27: 早期地球的形成与演化

## 核幔边界超低速区(ULVZs)的起源: 来自大碰撞模拟的新认识

周游<sup>1,3</sup>, 刘锦<sup>2</sup>, 刘耘<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院 地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 北京高压科学研究中心, 北京 100094; 3. 成都理工大学, 成都, 610059

核幔边界(CMB)是地球内部物质和温度变化最剧烈的分界面, 其上为固态硅镁质的地幔, 其下为快速对流的液态铁合金外核。超低速区(ULVZs, Ultra-low velocity zones)是核幔边界三大结构之一, 分布于地核的外表面, 同时也是地幔的最底部区域。超低速区的厚度一般在 5~40km 范围, 占据了地核表面 12% 的表面积。一般认为 ULVZs 主要分布在非洲和太平洋下面, 与大剪切(波)低速异常体(LLSVP)的位置密切相关, 但 ULVZs 在全球其他地区也有分布。地震学观测表明 ULVZs 与周边环境存在巨大的波速差异, 剪切波( $V_s$ )速异常可达 -30%, 压缩波( $V_p$ )异常达 -10%, 同时 ULVZs 密度与周边环境的差异也可达到 +10%。一些新的观测事实表明来自夏威夷、萨摩亚和冰岛的洋岛玄武岩(OIBs)表现出强烈的  $\mu^{182}\text{W}$  负值和高的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值, 由于地幔中的  $\mu^{182}\text{W}$  一般为 0 或者正值, 而地核外核的  $\mu^{182}\text{W}$  可以达到  $-220 \times 10^{-6}$ , 因此  $\mu^{182}\text{W}$  负值意味这些 OIBs 可能携带了来自于地核的“信号”, 而高  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值的物质通常被认为来自于地球深部。Mundl 等认为这些携带了地核信号的 OIBs 的源区最有可能来自 ULVZs 区域。

自 Garnero 于 1996 年发现 ULVZs 开始, 关于 ULVZs 的各种成因一直就是争论的热点。最直观的认识是 ULVZs 是由于地幔物质的部分熔融造成(Hernlund 和 McNamara, 2010; Li 等, 2017), 因为部分熔融可以很好地解释 ULVZs 造成波速下降。但许多地幔对流的研究表明, 在下地幔的底部部分熔融的物质难以稳定、长期存在, 同时部分熔融也难以造成 10% 以上的密度增加。含铁的物质也能很好地解释 ULVZs 的低地震波速度、高密度的特点, 因为铁的密度比较大, 同时可以有效地降低地震速度。近年来对 ULVZs 形成的普遍共识是: 单纯的部分熔融难以解释 ULVZs 的独特性质, ULVZs 是一种特殊含铁的部分熔融或者没有部分熔融的特殊物质。

核幔边界一般被认为是俯冲板块的最后归宿, 因此板块俯冲成为另外一种可能的解释。俯冲至核幔边界的条带状铁建造 BIF(Dobson 等, 2005), 俯冲至核幔边界的洋壳(Andrault 等, 2014), 俯冲至核幔边界的含氢的板片物质等(Hu 等, 2016; Liu 等, 2017), 都被认为可以形成核幔边界的 ULVZs。俯冲板块成因的主要问题在于难以解释 ULVZs 如何携带了地核信号。

如果 ULVZs 当中富含的铁来源于地核, 那么就可以为 ULVZs 提供充分的铁物质来源, 同时也会将地核强烈的  $\mu^{182}\text{W}$  负值和高的  $^3\text{He}/^4\text{He}$  值的信息带到 ULVZs 中。该类可能成因有两个, 地核结晶(出熔)与核幔反应都可以将地核中的铁带到地幔中。地核结晶的观点认为由于地核内核结晶, 导致内地核中的轻元素向核幔边界扩散, 穿越地核的液态外核来到核幔边

第一作者简介: 周游(1980-), 男, 副教授, 研究方向: 大碰撞模拟、行星增生动力学. E-mail: zhouyou@mail.gyig.ac.cn

\*通信作者简介: 刘耘(1968-), 男, 研究员, 研究方向: 行星增生动力学、同位素理论与计算. E-mail: liuyun@vip.gyig.ac.cn

界(Buffett 等, 2000)。地核结晶成因的问题在于这些析出的轻元素最有可能被滞留在核幔边界的内侧, 而无法穿越核幔边界到达核幔边界的外侧, 这与一些地震学的观测事实相吻合, 即地核的顶部存在一层厚度(100~300km)的低密度层。另外地核结晶析出的轻元素物质的量也将远远大于 ULVZs 总的物质的量。核幔反应是另外一种很好的解释(Mao 等, 2006; Otsuka 和 Karato, 2012), 但在静态条件下, 扩散控制的核幔反应的范围理论上仅仅在 10~100m 的距离, 即使考虑核幔边界的不稳定性, 这一范围也只能扩张到几千米到十几千米, 达不到 ULVZs 的规模。同时核幔反应发生应该是全球性的, 这就需要进一步的地幔对流将全球分布的 ULVZs 集中起来。Liu 等(2017)提出含氢的板块物质俯冲至核幔边界, 与地核发生  $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{py-FeO}_2\text{H}_2 + \text{FeH}$  反应, 得到的 FeH 可以稳定地存在于核幔边界, 并解释了 ULVZs 的所有观测事实, 这是目前最好的关于 ULVZs 成因的理论。

我们通过对原始地球增生晚期的大碰撞模拟, 认为 ULVZs 可能存在另外一种形成方式。在原始地球增生晚期, 即原始地球从  $0.1M_{\oplus}$  ( $M_{\oplus}$  是现今地球质量) 增长到  $1M_{\oplus}$  的阶段, 一类 Core-merging 的大碰撞破坏了原始地核, 也可能可以产生 ULVZs。Core-merging 大碰撞指的是碰撞体角度比较小 ( $<30^\circ$ )、碰撞速度较低 ( $<2V_{\text{esc}}$ )、碰撞体大于  $0.07M_{\oplus}$  的碰撞。在 Core-merging 碰撞中, 碰撞体的内核可以被自身的幔包裹, 穿越原始地球地幔, 直接和原始地核融合。当这类碰撞发生时, 碰撞体的核不会与岩浆洋发生接触, 因此也不会岩浆洋中发生核幔分异作用。这一过程中, 碰撞体的一部分地幔也会进入地核, 由于密度差异, 这些地幔会很快回到核幔边界, 进而影响核幔边界的结构。由于 Core-merging 碰撞作用, 被带入地核中的地幔物质会和液态地核发生化学反应, 反应产物可能形成了 ULVZs。2018 年 Hirose 开展了 Fe-Si-O-Mg 合金在核幔边界的温度和地核压力条件下的高温高压实验, 实验结果产物中得到一种  $\text{SiO}_2\text{-MgO-FeO}$  熔体, 这种熔体同样也可能形成 ULVZs, 这一实验结果与我们的预测相吻合。通过模拟地球增生过程, 被带入地核中的地幔物质在物质的量上与 ULVZs 总的物质的量也是吻合的。