

地幔底层及其在全球物质演化中的意义

侯 渭, 谢鸿森, 周文戈

中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳, 550002

HOU Wei, XIE Hong-sen, ZHOU Wen-ge

Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

HOU Wei, XIE Hong-sen, ZHOU Wen-ge. Lowermost mantle layer and its significance in the Earth's material evolution. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1):037-041

Abstract: The lowermost mantle layer is above the core mantle boundary (CMB) and composed of D' region and ultra-low velocity zone (ULVZ). The seismic velocities in the CMB are very heterogeneous and its thickness varies from 50 km to 300 km. The CMB is not only the medium transferring thermal energy from core to mantle, but also the region in which the temperature and temperature gradient is the highest in the whole mantle. The CMB is the impinged by subducted slabs and is the source of mantle plumes and super plumes. Therefore, the CMB is the beginning and the end of whole mantle convection. Within this lowermost mantle layer, the partial melting of material of lower mantle and chemical reaction of core mantle material can occur. Therefore, the CMB is significant in the Earth's material evolution.

Key words: lowermost mantle; D' region; ultra-low velocity zone (ULVZ); mantle plume; subducted slabs

摘 要: 在核幔界面之上的下地幔一侧,地震波速分布极不均匀,厚度在 50~300 km 范围内变化的一层物质称为地幔底层。地幔底层由具有高地震波速和高密度的 D' 区和超低速带(ULVZ)组成。地幔底层是地核热能向地幔传播的必经之路,也是地幔中温度和温度梯度最高的地区。地幔底层既是俯冲板块的最终归宿,又是热柱和超级热柱的源区。因此,地幔底层既是全地幔对流的起点,又是全地幔对流的终点。在地幔底层可能发生地幔物质(包括俯冲板块物质在内)的部分熔融作用,也可能存在外核液态铁与地幔硅酸盐的化学反应。所以地幔底层在全球物质演化中占有重要的地位。

关键词: 地幔底层; D' 区; 超低速带; 热柱; 俯冲板块

中图分类号: P542.5; P584 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2321(2005)01-0037-05

1 地幔底层的含义和结构

20 世纪 40 年代,布伦根据地震观测资料,将下地幔底层下部的 200 km 范围(即深度在 2 700~2 900 km)的层圈定义为 D' 层,并指出 D' 层的密度高且横向上变化大,其变化强度是正常下地幔的 3 倍^[1]。此后的几十年里, D' 层作为整个地幔和地核

的交界处,它在地形上大的起伏及其物理性质(特别是地震波速)在横向上的强烈不均匀性,备受地球科学家的关注。到了 20 世纪 90 年代,在美国地球深部合作研究计划(CSEDI)中,科学家们对于核幔界面(CMB)和 D' 层作了以下的描述:核幔界面本身看来是十分清晰的,它对于高频率地震波有明显的反射作用,并有极小的地形起伏(平均小于几 km),而地幔底部的 D' 层是非常复杂的。在 D'

收稿日期:2004-08-29;修回日期:2004-12-21

基金项目:国家自然科学基金重大项目(10299040);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-SW-No. 3)

作者简介:侯 渭(1942—),女,研究员,从事地球深部物质科学研究。

层观察到强烈的地震不均一性,与岩石圈中发现的情况类似^[2]。

近年来,地球深部地震层析研究发现,在核幔界面之上还存在着一个不连续的,厚度变化很大的超低速带(ULVZ)。这个带上P波(纵波)和S波(横波)波速下降10%或更多。据统计,ULVZ约占地幔底部总面积的12%(图1),也不能否定在地幔底部某处,由于ULVZ太薄目前还不能分辨出来。因此,ULVZ在地幔底部可能占比例比12%还大些^[3]。为此,许多学者在他们所绘制的地球内部结构图中,都将过去所谓的D'层作为地幔底部的一种区域单独划分出来,此类区域中物质呈固态,具有高密度,高地震波速的特点。也有的学者认为地幔底部与地球表层很相似,D'区相当于岩石圈;而ULVZ相当于软流层^[3,4]。

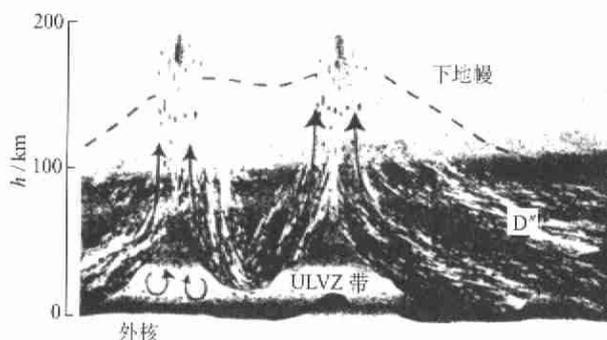


图1 地幔底层结构示意图
(引自^[3])

Fig. 1 Schematic cartoon of the possible structure of lowermost mantle

鉴于上述特点,笔者建议将核幔界面之上,下地幔一侧,地震波速分布极不均匀,厚度在50~300 km范围内变化的一层物质称为地幔底层。根据目前的观测结果,可以认为地幔底层在横向上表现为由D'区和ULVZ相间组成。地幔底层中,沿地球半径方向D'区和ULVZ是否形成分层,目前还不清楚。根据一些学者推断的结构图形^[3,4],有以下几种可能的结构类型:(1)D'区下部直接与外核接触。由于D'区在地幔底部的分布是不连续的,CMB可能在部分区域是外核与D'区的接触的分界面,另一部分是外核与ULVZ接触的分界面。(2)在D'区的下方也有低速物质分布,但下伏的低速物质较薄,目前无法鉴别出来。这样CMB可能就是外核与低速物质接触的界面。(3)D'区的上、下都有低速物质存在,上覆和下伏的低速物质较薄,目前无法鉴别出来,CMB可能是外核与低速物质接触的界面。由于

顶部覆盖着薄层的低速物质,使D'区与ULVZ以及上覆下地幔物质的界面不清晰,成为模糊状或囊状。

2 地幔底层是俯冲板块的最终归宿地

10多年前,根据地震资料 and 与俯冲板块有关的各种火山物质中的¹⁰Be的测定,科学家们就推断大洋板块俯冲的深度至少在600 km以下,并预言地幔底部可能是洋壳最终的“贮藏所”^[3]。近些年来,随着各类观测方法的进步,获得了许多新的证据,进一步确认地幔底层中具有高地震波速的D'区可能是俯冲板块的最终归宿地。其主要研究内容可分为以下两个方面:(1)根据地幔底层D'区和俯冲板块的空间关系,以及它们在物理性质方面的相似性方面,说明D'区可能是俯冲板块的最终归宿地。比如,地震层析发现,环太平洋的板块俯冲带(消减带)之下,正好与地幔底层中的D'区相对应;而中心太平洋热点群之下正好与下地幔超级热柱及地幔底层的ULVZ相对应^[3]。D'区地震波速比上覆下地幔的地震波速高得多,P波速度增加2.5%~3.0%,S波速度增加2.8%。而D'区内部,沿地球半径方向,波速梯度近于零。因此普遍认为,D'区与上覆下地幔之间的界面不是热的分界,而是化学成分上的分界面^[3,6]。此外,D'区还具有不连续性和各向异性^[3],表明D'区可能是一些高密度的固体物质(矿物晶体)堆积而成,这些特点恰好与高温高压下俯冲板块的性质相近,因此,推断D'区中可能包含俯冲板块的组分。(2)通过对俯冲带压力、温度的估算以及相应的高温高压实验,证明在400~700 km深度,俯冲板块物质发生一系列相变,成为了比周围下地幔物质温度低而密度高的矿物集合体。在重力作用下,这些物质逐渐下沉至地幔底部,成为D'区的可能组分。俯冲板块的岩石学研究表明,它们主要由洋壳物质组成,洋壳物质基本成分与大洋中脊玄武岩(MORB)相同^[7]。表1列出了MORB经过地幔过渡带的高压相转变后的高压矿物组合,同时还列出了相同深度的下地幔岩石的矿物组成。下地幔岩石的矿物组成是使用林伍德提出的地幔岩(pyrolite)的化学成分作为实验样品,通过高温高压相变实验获得的^[8,9]。图2给出了MORB和pyrolite的压力(深度)-零压密度曲线。可以看出,约在660 km和720 km深度范围内,MORB密度低于pyro-

lite, 其他深度范围, MORB 密度均比 pyrolite 高^[7,9]。因此,在重力和俯冲压力的作用下,俯冲板块在下地幔一直是下沉的。当它遇到更高密度的阻

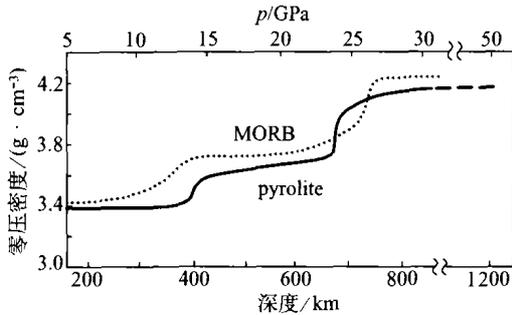


图2 MORB 和 pyrolite 随压力(深度)变化的零压密度曲线 (引自[7])

Fig. 2 Zero-pressure density of MORB and pyrolite in various pressures (depth)

零压密度是由高温高压实验产物的 X 射线衍射线和电子探针分析估算得出的

挡层——地球外核时,俯冲板块停止下沉,最终在地幔底部聚集起来。

表 1 下地幔中 MORB 和 Pyrolite 矿物组成的比较*

Table 1 Mineral proportion in MORB and pyrolite in lower mantle

岩石名称	在下地幔中(压力在 30 GPa 以上)的矿物组合	各类矿物约占比例/%
MORB (俯冲板块)	MgSiO ₃ 钙钛矿结构相	42
	CaSiO ₃ 钙钛矿结构相	20
	斯石英	20
	含 Al 高压相(钙的正铁酸盐结构)	18
pyrolite (下地幔岩石)	MgSiO ₃ 钙钛矿结构相	77
	镁方铁矿	18
	CaSiO ₃ 钙钛矿结构相	5

* 根据[7,9,10]资料编制。

3 地幔底层的温度及其发生的熔融作用和化学反应

已知地幔过渡带下界(约 660 km)是橄榄石(Mg₂SiO₄) γ 相和 Majorite 转变为 MgSiO₃ 钙钛矿结构相和方镁铁矿之处。根据相关的高温高压相变实验,给出其相变压力和温度分别为 23.9 GPa 和 (1900 \pm 100) K。下地幔是具有高的 Rayleigh 值的对流体系,设粘度为常数,没有内加热,其温度沿绝热线分布。这样计算出下地幔中温度上升的幅度为 450~650 K,到地幔底层上界时温度大约 2500 K

左右。通过 Fe-FeO-FeS 体系的高压熔融实验获得地球外核的最低温度,也就是核幔界面的温度为 4000 K^[11]。因此,地幔底层上、下界的温度差约为 1500 K。

图 3 是根据高压熔融实验(激光加热金刚石压腔和多砧高压装置)获得的 MORB 全岩(俯冲板块主要组分)的高压熔融曲线和 MgSiO₃ 钙钛矿结构相(下地幔主要组分)的高压熔融曲线,同时标明了下地幔和外核的绝热线。可以看出, MORB 熔融曲线与外核绝热线在核幔界面处相交,而 MgSiO₃ 钙钛矿结构相的高压熔融曲线远离外核绝热线。这说明,作为俯冲板块的主要组分 MORB,当它到达核幔界面附近时可能会发生熔融或部分熔融作用。而作为下地幔主要组分的 MgSiO₃ 钙钛矿结构相,在核幔界面处仍保持固态。由此可推断地幔底层中的 ULVZ 可能是俯冲板块物质到达核幔界面时发生部分熔融形成的,而未熔的残余物则留在了地幔底层的 D'区。为此,我们认为第一节给出的地幔底层结构模式中的后两类比较合理。

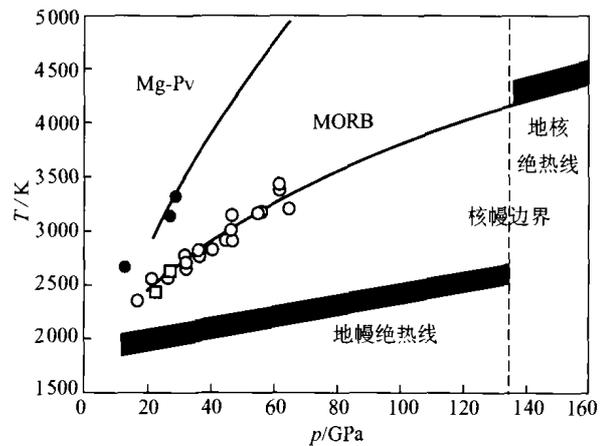


图 3 MORB 全岩和 Mg-Pv(MgSiO₃ 钙钛矿结构相)的高压熔融曲线 (引自[9])

Fig. 3 Melting curve of MORB and Mg-Pv(MgSiO₃-perovskite) under high pressure

俯冲板块岩石学研究表明,除 MORB 物质外,俯冲板块中还含有少量大洋沉积物,这些大洋沉积物以陆源物质为主^[7]。因此,俯冲板块进入地幔底层,可能将陆壳中富 Al、Ca、K、Na 的物质带入。此外,高温高压含水体系的实验研究发现了多种高密度含水镁硅酸盐矿物相,它们在 660 km 深度的压力下仍能稳定存在^[5]。虽然目前还缺乏更高压力下的实验资料,但不能否认俯冲板块有可能将这些高密度含水矿物相带入地幔底层。因此,可以认为,地

幔底层发生的部分熔融作用很可能是在含水条件下进行的。所以由 ULVZ 上涌的熔体或流体可能是富水和富 Al、Ca、K、Na 的。

地幔底层是下地幔硅酸盐物质(包括上述俯冲板块物质在内)与外核液态铁发生化学反应的场所。早在 1990 年, Jeanloz 就提出在核幔之间可能存在一个厚度为 10~100 km 的化学反应带。地幔中的少量硅、镁可以被溶解进入外核, 并在流动的铁熔体中快速分散。而外核中的铁进入硅酸盐后使硅酸盐密度增加, 从而在 D' 区中沉淀下来^[5]。Boehler 报道了压力为 135 GPa(相当于地幔底层的压力), 3 000 K 以上, 地核物质(液态铁)和下地幔物质(MgSiO₃ 钙钛矿结构相及方镁石)相互作用的实验研究。结果发现, 没有去除样品中吸附水的实验中, 观察到两类下地幔物质与液态铁之间发生了明显的反应。而在无水条件下, 铁和 MgSiO₃ 之间没有发生反应; 铁和方镁石之间出现一些反应信号。Boehler 指出, 如果核幔间的化学反应有铝的加入, 情况会更为复杂^[11]。可见, 俯冲板块将富水和 Al、Ca、K、Na 的物质带入地幔底层, 对核幔物质间的化学反应也会产生较大的影响。

4 地幔底层 ULVZ 是热柱和超级热柱的源区

地震层析研究发现, 在非洲和中太平洋之下, 过渡带以下的下地幔中存在着两个巨大的热上升流, 被称为超级热柱(megaplume 或 superplume)。因此认为, 这两个超级热柱是非洲大陆和中太平洋的热柱群的源区, 此类热柱被 Courtillot 称为过渡带型热柱^[12]。这两个超级热柱的顶部大致在地幔过渡带的深度范围, 而它们的根部恰与地幔底层中的 ULVZ 相当^[3, 12, 13]。

在 Courtillot 等对热柱的分类中, 除过渡带型热柱外, 还有深成热柱和上地幔热柱, 并推断深成热柱(如, 夏威夷热柱、冰岛热柱)直接来源于地幔底部; 而上地幔热柱可能来源于岩石圈下覆的软流层^[12]。根据第一节对地幔底层结构的分析, 可以认为, 无论深成热柱的地理位置如何, 它们的根都与地幔底层的 ULVZ 或 D' 区之上的薄层的低速物质有关。

据 Williams 等统计, 地幔底层的 ULVZ, 主要与地球表面以下 6 个地区对应: 北大西洋之下, 中大

西洋之下, 非洲之下, 澳大利亚之下, 南太平洋之下和北太平洋之下, 这些地区也是地表热点分布相对比较多的地区, 而地表热点相对较少的美洲之下和南亚及中亚洲之下, 没有发现 ULVZ。Williams 等根据 ULVZ 与地表热点分布的这种相关性, 认为地表大部分热点之下的热柱都与地幔底层 ULVZ 有成因关系^[14]。

Romanowicz 等通过对地震波振幅的研究, 获得了上地幔非弹性结构的三维模式图。发现与两个超级热柱有关的热上升流一直可持续至上地幔过渡带, 并且在岩石圈之下发生水平偏斜。因此, Romanowicz 等认为, 两个超级热柱不仅是提供各类热点-热柱能量的源区, 也是供给软流层热能, 从而起到降低软流层粘度和促进岩石圈板块在软流层之上的滑动的作用的源区。所以, 地幔底部通过两个超级热柱提供的热能远远大于由热点热流所估算出的地幔热流的量^[15]。

综上所述, 热柱和超级热柱与地幔底层有着密切的空间关系, 即使是软流层和板块运动也受到了地幔底层 ULVZ 的活动间接的影响。可以认为, 地幔底层中发生的部分熔融作用形成的 ULVZ 可能是热柱、超级热柱的源区。

5 地幔底层在全球物质演化中的意义

据最新的估算, 核幔界面温度约为 4 000 K, 内核和外核界面温度在 5 000 K 以下。而地幔底层上界的温度约为 2 500 K。因此, 在地幔底层 200 km 厚的小范围内温度差达到 1 500 K^[11]。可见, 地幔底层是地球内部具有最大温度梯度的地区, 也是地幔中温度最高的地区。这是由于硅酸盐地幔和金属铁(含 10% 的轻元素)的外核的热传导性能相差甚远, 在地幔底层发生大量热能聚集造成的。鉴于地幔底层的这种特点, 以及上述地幔底层与热柱、超级热柱和俯冲板块的成因关系, 我们认为地幔底层在全球物质演化中具有以下意义:

(1) 地幔底层是地核热能向地幔传播的中间物质, 也是全球动力学最活跃的一个地区。在地幔底层不断有热的熔融态的物质由 ULVZ 上涌, 也不断有相对较冷的致密物质通过板块俯冲补充进入。

(2) 地幔底层是热柱、超级热柱的根和源, 同时也是俯冲板块的最终归宿。地幔底层的这个特点表明在地幔中确实存在着全地幔对流的形式。在一次

全地幔对流中,地幔底层既是起点,又是终点,还是对流过程中的重要环节。

(3)地幔底层的最下部可能发生部分熔融作用,其形成的熔体受到俯冲板块成分的影响,可能是富水和富 Al、Ca、K、Na 的。因此,由地幔底层的 UL-VZ 上涌的熔体和流体既是地幔底层发生化学分异的产物,也是来自地球上部地壳和上地幔物质与下地幔物质相互混合的产物。

(4)地幔底层还是下地幔硅酸盐物质(包括上述俯冲板块物质在内)与外核液态铁发生化学反应的场所。因此,地幔底层的成分和结构还可能受到核幔间化学反应的影响,有关详情还有待进一步研究。

References:

- [1] BULLEN K E. *An Introduction to the Theory of Seismology* [M]. Beijing: Science Press, 1965: 222-223 (in Chinese).
- [2] HOU Wei, XIE Hongsen (Translator). Cooperative studies of the Earth's deep interior (CSEDI)[J]. *Advance in Earth Sciences (Material Science in the Earth)*, 1994, 9(Suppl): 42-102 (in Chinese).
- [3] GAMERO E J. Heterogeneity of the lowermost mantle[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 509-537.
- [4] PANNING M, ROMANOWICZ B. Inference on flow at the base of Earth's mantle based on seismic anisotropy[J]. *Science*, 2004, 303: 351-353.
- [5] XIE Hongsen. *An Introduction to Material Science in the Earth's Interior* [M]. Beijing: Science Press, 1997: 173, 227-229, 278-284 (in Chinese).
- [6] TENG Jiwen. *An Introduction to Geophysics* [M]. Beijing: Seismological Press, 2003: 174-215 (in Chinese).
- [7] POLI S, SCHMIDT M W. Petrology of subducted slabs[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2002, 30: 207-235.
- [8] RINGWOOD A E. *Composition and Petrology of Earth's Mantle* [M]. Beijing: Seismological Press, 1981: 103-109 (in

Chinese).

- [9] HIROSE K, FEI Y W, MA Y Z, et al. The fate of subducted basaltic crust in the Earth's lower mantle[J]. *Nature*, 1999, 397: 53-56.
- [10] ZHANG Y X, YIN A. *Structure Evolution and Dynamics of the Earth* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 50-90 (in Chinese).
- [11] BOEHLER R. Melting temperature of the Earth's mantle and core; Earth's thermal structure[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1996, 24: 15-40.
- [12] COURTILLOT V, DAVAILLE A, BESSE J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205(3-4): 295-308.
- [13] TACKLEY P. Mantle convection and plate tectonics: Toward an integrated physical and chemical theory[J]. *Science*, 2000, 288: 2002-2007.
- [14] WILLIAMS Q, REVENAUGH J, GARMERO E. A correlation between ultra-low basal velocities in the mantle and hot spots[J]. *Science*, 1998, 281: 546-549.
- [15] ROMANOWICZ B, GUNG Y. Superplumes from the core-mantle boundary to the lithosphere; Implications for heat flux [J]. *Science*, 2002, 296: 513-516.

参考文献:

- [1] 布伦 K E. 地震学引论[M]. 北京: 科学出版社, 1965: 222-223.
- [2] 侯渭, 谢鸿森(译). 美国地球深部合作研究计划(CSEDI)[J]. 地球科学进展, 1994, 9(增刊): 42-102.
- [5] 谢鸿森. 地球深部物质科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 173, 227-229, 278-284.
- [6] 滕吉文. 固体地球物理概论[M]. 北京: 地震出版社, 2003: 174-215.
- [8] 林伍德. 地幔的成分和岩石学[M]. 北京: 地震出版社, 1981: 103-109.
- [10] 张有学, 尹安. 地球的结构演化和动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 50-90.