

下地幔毛钙硅石的地震波速

王巍^{1,2,3}, 王文忠⁴, 杜治学⁵

1. 中国科学院 地质与地球物理研究所 行星科学与前沿技术重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 漠河地球物理国家野外科学观测研究站, 北京 100029; 4. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026; 5. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640

摘要: 近期一项基于金刚石压腔结合布里渊散射光谱的高温高压实验研究表明, 含Fe、Al、Mg、Ti的毛钙硅石(钙钛矿结构的CaSiO₃)的剪切波速度比端元毛钙硅石低10%~20%, 是下地幔主要矿物中波速最慢的相。该发现表明, 含有20%~25%此类毛钙硅石的俯冲洋壳(MORB)可能是大型低剪切波速省(Large Low-Shear Velocity Provinces, LLSVPs)的潜在物质来源, 而从基底岩浆洋结晶形成的富毛钙硅石堆积层则可能构成超低速带(Ultra-Low Velocity Zones, ULVZs)。该研究为理解下地幔不均匀性的矿物学成因提供了关键实验约束。

关键词: 高温高压实验; 毛钙硅石; 地震波速; 超低速带; 大型低剪切波速省

中图分类号: P315.3⁺1 doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20250142

Seismic wave velocity of davemaoite in the lower mantle

WANG Wei^{1,2,3}, WANG Wen-zhong⁴, DU Zhi-xue⁵

1. Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;
3. Heilongjiang Mohe Observatory of Geophysics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China;
4. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
5. State Key Laboratory of Deep Earth Processes and Resources, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: A high pressure-temperature experimental study using diamond anvil cell combined with Brillouin scattering spectroscopy shows that davemaoite (CaSiO₃ with perovskite structure) containing Fe, Al, Mg, and Ti exhibits shear wave velocities 10%~20% lower than those of the end-member davemaoite, making it the slowest seismic wave velocity phase among the major lower-mantle minerals. This finding suggests that subducted oceanic crust (MORB) containing about 20%~25% of such davemaoite may serve as a potential material source for Large Low-Shear Velocity Provinces (LLSVPs), meanwhile davemaoite-rich cumulate layers crystallized from the basal magma ocean may constitute Ultra-Low Velocity Zones (ULVZs). This result provides critical experimental constraints on the mineralogical origins of lower-mantle heterogeneity.

Key words: high *p-T* experiment; davemaoite; seismic velocity; ultra-low velocity zone; large low-shear velocity provinces

收稿编号: 2025-0291, 2025-12-06 收到, 2025-12-29 改回

基金项目: 中国科学院地质与地球物理研究所重点部署项目(IGGCAS-202204)

引用此文:

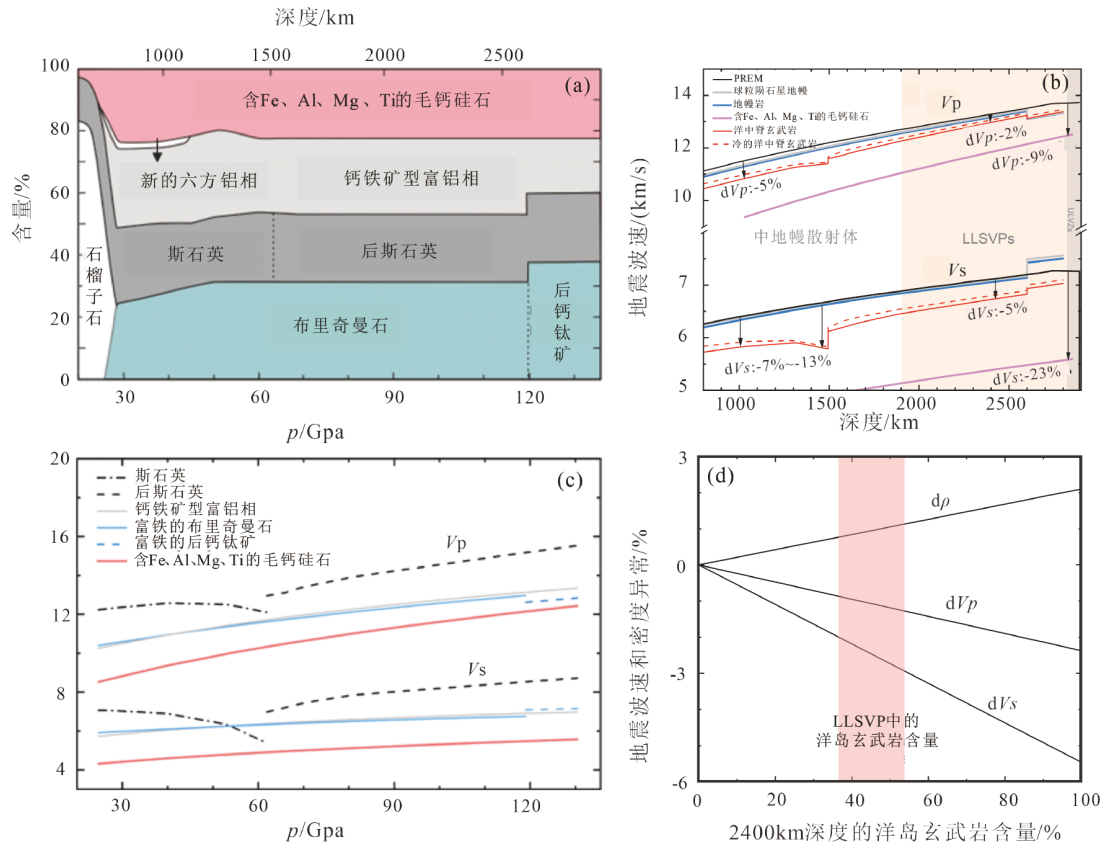
王巍, 王文忠, 杜治学. 2025. 下地幔毛钙硅石的地震波速. 矿物岩石地球化学通报, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20250142

Wang W, Wang W Z, Du Z X. 2025. Seismic wave velocity of davemaoite in the lower mantle. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20250142

地球下地幔作为地球最厚的圈层,其内部存在多尺度的地震波速不均匀性,如大型低剪切波速省(LLSVPs)和核幔边界上的超低速区(ULVZs)(Garnero et al., 2016; Yu and Garnero, 2018),以及中下地幔广泛分布的小尺度散射体(Kaneshima, 2016)。这些异常结构的成因一直是地学领域争论的焦点,主流假说包括富铁熔体或矿物、俯冲洋壳的积累、月球形成撞击事件残留体等,可基本分为原始物质和俯冲物质两类。尽管解释的多样性,但多数模型都认为富铁物质是导致这些波速异常体形成的主要矿物学原因(Stixrude and Lithgow-Bertelloni, 2012; Wang et al., 2020)。然而,对于俯冲洋壳中的关键矿物——含Fe、Al、Mg、Ti的毛钙硅石,在相应温压条件下的弹性性

质,一直缺乏可靠的实验数据,限制了人们对下地幔不均匀性的准确解读。

Zhou等(2025)采用金刚石压腔结合CO₂激光加热技术,原位合成了含Fe、Al、Mg、Ti的毛钙硅石[化学式Ca_{0.906(1)}Fe_{0.027(1)}Fe_{0.042(1)}Mg_{0.033(1)}Al_{0.072(1)}Ti_{0.020(1)}Si_{0.912(1)}O₃],并利用同步辐射X射线衍射与布里渊散射光谱联用,首次精确测定了该矿物在高达113 GPa和2294 K(接近核幔边界)条件下的晶体结构和弹性参数,同时建立了其声波速度与化学组成间的定量关系。研究表明,该类毛钙硅石的剪切波速度(V_s)比端元CaSiO₃相低10%~20%,是下地幔主要矿物(包括布里奇曼石、铁方镁石、斯石英等)中最慢的一种(图1)。其零压体弹模量和剪切模量分别降至129 GPa



NAL表示新识别出的富铝相;CF表示具有钙铁矿结构的富铝相。速度差异(dV_p 和 dV_s)均相对于PREM计算

图1 (a)下地幔条件下MORB的相图(Ishii et al., 2022)。 (b) MORB、立方相含Fe、Al、Mg、Ti的毛钙硅石、橄榄岩型与球粒陨石型地幔在1600 K绝热线性地温梯度下的地震波速,以及MORB在1100 K绝热线性地温梯度下的地震波速,并与一维地震参考模型PREM(Dziewonski & Anderson, 1981)进行对比。 (c)下地幔矿物在1600 K绝热线性地温梯度下的声波速度。 (d) MORB在最下部地幔深度(约2400 km)所引起的地震波速与密度异常

Fig.1 (a) Phase diagram of MORB in the lower mantle (Ishii et al., 2022). (b) Seismic wave velocities of MORB, cubic davemaioite containing Fe, Al, Mg, and Ti, pyrolitic and chondritic mantles along a 1600 K adiabatic geotherm, and seismic wave velocities of MORB along a 1100 K adiabatic geotherm compared with the one-dimensional seismic reference model PREM (Dziewonski & Anderson, 1981). (c) Sound velocities of lower-mantle minerals along a 1600 K adiabatic geotherm. NAL, new aluminum-rich phase; CF, aluminum-rich phase with a calcium ferrite structure. (d) Seismic wave velocity and density anomalies induced by MORB at the very bottom of the mantle (~2400 km deep). Velocity differences (dV_p and dV_s) were calculated with respect to PREM.

和56.1 GPa,比端元组分降低40%~50%,这种软化主要源于 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 取代产生的晶格空位及晶格畸变。

这些关键的弹性数据为定量解释地幔中不同尺度的不均匀体提供了全新的矿物物理学依据。在中下地幔,含有20%~60%此类毛钙硅石的俯冲洋壳可产生-2%~-6%的横波速度异常,合理解释了观测到的中地幔散射体。在核幔边界,含35%~55%俯冲洋壳的区域可同时产生LLSVPs的波速降低和密度增高特征。而对于波速降幅更大的ULVZs,研究提出其可能由基底岩浆洋结晶的极富铁毛钙硅石堆积层构成。此外,毛钙硅石富集不相容和放射性产热元素的特性,提示其可能与深部地幔热化学异常、地幔柱起源及海岛玄武岩的地球化学特征密切相关(Corgne et al., 2005)。

该研究首次获得代表俯冲MORB化学组成的多组分毛钙硅石的完整弹性参数,显著改善了下地幔关键相的实验约束。同时,基于实验结果重新评估了俯冲洋壳在下地幔中的地震可探测性和物质循环作用,提出毛钙硅石可能是地幔异质性的主控矿物。这项工作不仅深化了对LLSVPs和ULVZs形成机制的认识,也为地球深部热化学分异与动力学演化提供了新的物理依据。未来研究仍需进一步探讨高Fe含量毛钙硅石的熔融行为及其在核幔边界处的稳定性,以全面评估其在地幔长期演化中的作用。

地震学对于下地幔物质属性的约束存在较大的不确定性,这使得诸多下地幔异质体成因的假说难以通过波速和密度异常严格区分。除了这些基本地震属性外,下地幔物质的各向异性(Wolf et al., 2024)和衰减(Talavera-Soza et al., 2025)也是重要的特征。未来,若能限定毛钙硅石各向异性和衰减性质,并与下地幔地震学观测对比,将有助于理解下地幔异质体成因。

作者贡献声明:王巍、王文忠、杜治学共同撰写文章。

利益冲突声明:作者保证本文无利益冲突。

致谢:感谢张舟老师邀请撰稿,以及审稿人周文仪提出的宝贵修改意见。

参考文献 (References):

- Corgne A, Liebske C, Wood B J, Rubie D C, Frost D J. 2005. Silicate perovskite-melt partitioning of trace elements and geochemical signature of a deep perovskitic reservoir. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(2): 485–496
- Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4): 297–356
- Garnero E J, McNamara A K, Shim S H. 2016. Continent-sized anomalous zones with low seismic velocity at the base of Earth's mantle. *Nature Geoscience*, 9(7): 481–489
- Ishii T, Miyajima N, Criniti G, Hu Q Y, Glazyrin K, Katsura T. 2022. High pressure-temperature phase relations of basaltic crust up to mid-mantle conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 584: 117472
- Kaneshima S. 2016. Seismic scatterers in the mid-lower mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 257: 105–114
- Stixrude L, Lithgow-Bertelloni C. 2012. Geophysics of chemical heterogeneity in the mantle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40: 569–595
- Talavera-Soza S, Cobden L, Faul U H, Deuss A. 2025. Global 3D model of mantle attenuation using seismic normal modes. *Nature*, 637(8048): 1131–1135
- Wang W Z, Xu Y H, Sun D Y, Ni S D, Wentzcovitch R, Wu Z Q. 2020. Velocity and density characteristics of subducted oceanic crust and the origin of lower-mantle heterogeneities. *Nature Communications*, 11: 64
- Wolf J, Li M M, Long M D, Garnero E. 2024. Advances in mapping lowermost mantle convective flow with seismic anisotropy observations. *Reviews of Geophysics*, 62(2): e2023RG000833
- Yu S L, Garnero E J. 2018. Ultralow velocity zone locations: A global assessment. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(2): 396–414
- Zhou W Y, Hao M, Su W H, Kim T, Chen S B, Shim S H, Zhang D Z, Nguyen P Q H, Armstrong K, Zhang J S. 2025. Elasticity of davemaoite as a primary contributor to lower-mantle heterogeneities. *Science*, 390(6776): 935–939

(本文责任编辑:刘莹;英文审校:肖保华)



本文作者简介:王巍,中国科学院地质与地球物理研究所副研究员。2010年和2013年先后于中国科学技术大学获得学士和硕士学位,2019年获加州大学圣地亚哥分校博士学位。2023年入选国家高层次海外人才项目。主要从事地震学与地球内部物理研究,利用地震散射波探测地球从地壳到地核的小尺度不均匀结构,为地球内核的不均匀生长模式及振荡运动模式提供了重要的地震学证据。以第一作者或通讯作者在*Nature*、*Nature Geoscience*、*Science Advances*、*PNAS*和*EPSL*等学术期刊发表多篇代表性成果。

作者邮箱: weiwang053@gmail.com