

https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.056

Short Survey



板块运动“加速剂”:岩石圈之下的两个软流圈熔体汇聚层

刘勇胜^{1,2}, 张军波^{1,2}, 徐荣³, 赵亮⁴

1. 长江大学, 湖北荆州 434023
2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州贵阳 550081
4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

地球在长期的分异演化过程中,形成了其独特的圈层结构.不同圈层之间的相互作用和构造板块的运动不仅塑造了地球的地表形态,还促进了地球宜居性的演变.其中,软流圈的存在和结构特征对地球的板块运动起着关键性作用(Höink *et al.*, 2012; Rychert and Shearer, 2009).Barrell (1914)最早从力学强度(流变性)角度定义了岩石圈和软流圈.岩石圈是高强度(高粘滞度、低流变性)的地球外部热边界层,具有传导性地温梯度.软流圈是位于岩石圈地幔之下、地幔过渡带之上的地球内部圈层,以在数万年时间尺度上普遍发生塑性变形(固态蠕变)为特征,深度在~80~410 km之间,基本上呈全球性分布.位于岩石圈和软流圈之间的岩石圈-软流圈边界层(LAB;厚度小于10~15 km)以地震波尖锐不连续性(变化幅度约5%~10%)和高电导率为特征,在大洋区域一般位于~70 km深度,在克拉通上地幔区域可达~200~250 km深度(Karato, 2012; Yuan and Romanowicz, 2018).板块构造理论正是基于刚性岩石圈板块在力学强度较弱的软流圈上滑动的概念,岩石圈板块之下的熔体层其流变性可增加几个数量级,因此可以理解为板块运动的“润滑剂”和“加速剂”.理解岩石圈板块之下熔体层的成因与分布为我们认识板块构造的形成提供了重要窗口.

LAB是将化学上亏损玄武质组分(但局部也可能受到熔体交代再富集)的刚性岩石圈地幔与放射性同位素亏损的对流软流圈地幔分开的界面,由于难以可靠地探测,往往用各种替代的地球物理和地球化学指标进行限定,如地震波速变化、热传导地温梯度与对流绝热地温梯度相交、电导率异常等.尽管前人提出的各种亚固相模型(sub-solidus model)认为固态橄榄岩性质的变化有可能解释LAB的低地震波速、高电导率异常等特征(Faul and Jackson, 2005; Beghein *et al.*, 2014; Karato *et al.*, 2015; Cline II *et al.*, 2018),但纯粹的亚固相热模型不易解释LAB所具有的地震波尖锐不连续性特征(Rychert *et al.*, 2020).O'Reilly and Griffin (2010)认为克拉通地区LAB可能代表了软流圈熔体堆积并使岩石圈再富集的深度,而不是标志着传导岩石圈向对流软流圈的过渡(亚固相热模型).越来越多研究表明解释全球所有LAB的特殊地球物理特征(如地震波尖锐不连续性、低波速和高电导率异常)的最直接方法就是在LAB位置存在少量熔体(Rychert *et al.*, 2020).也就是说LAB是不等量熔体在软流圈顶部的汇聚层(Schmerr, 2012),这些熔体可能是原地熔融产生,也可能是由深源熔体向上迁移汇聚而成(Sakamaki *et al.*, 2013).

软流圈低速带(LVZ)以低地震波速度和高电

基金项目:地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助(No.MSFGPMR01).

作者简介:刘勇胜(1971—),教授,博士生导师,主要从事微区地球化学分析技术和壳-幔物质相互作用研究. E-mail:yshliu@hotmail.com

引用格式:刘勇胜,张军波,徐荣,赵亮,2024.板块运动“加速剂”:岩石圈之下的两个软流圈熔体汇聚层.地球科学,49(6):2296—2300.

Citation: Liu Yongsheng, Zhang Junbo, Xu Rong, Zhao Liang, 2024. Plate Motion “Accelerator”: Two Layers of Melt Accumulation beneath the Lithosphere. *Earth Science*, 49(6): 2296—2300.

导率为特征,被广泛认为是地幔中的部分熔融区 (Thybo, 2006; Debayle *et al.*, 2020). 但是, 由于熔体相对于固体地幔往往具有的低粘度、低密度特征, 通常认为软流圈熔体会通过颗粒边界向上迁移至岩石圈底部(即汇聚在 LAB) (Schmerr, 2012), 作为各种板内玄武岩在喷发之前的源区. 软流圈地幔成分上的高度不均一性(包括岩性不均一和化学不均一)反映在玄武岩上就是其化学成分和同位素的高度变化 (Hofmann, 1997; 刘传周等, 2022). 但压力对玄武岩熔体中稀土元素组成的影响甚至比地幔源区成分对熔体的影响更大 (Haase, 1996). Ellam (1992) 在大洋和大陆玄武岩中都发现了岩石圈厚度与玄武岩稀土元素成分 (Sm/Yb 和 Ce/Y 比值) 系统变化之间存在联系. Davies *et al.* (2015) 利用玄武岩 Gd/Lu 比值作为熔融深度的替代指标, 对澳大利亚东部地区的研究表明岩石圈厚度对热点玄武岩的成分具有决定性作用. 他们发现在岩石圈厚度 > 150 km 地区没有玄武岩, 并将之归因于岩石圈太厚致使地幔柱无法上升到足够浅的深度而发生减压熔融. 类似地, Niu *et al.* (2011) 和 Niu (2021) 提出岩石圈厚度对地球上包括板内玄武岩在内的所有构造背景产生的玄武岩成分都起到了一阶控制作用. 所有这些研究似乎都指示软流圈熔体在经过岩石圈喷发之前均会聚集在 LAB, 也就是说岩石圈之下似乎只有一个软流圈熔体汇聚层.

在软流圈内部是否可能存在其他深度的熔体汇聚层, 并作为玄武质熔体的源区而存在? 有意思的是在一些地区(大陆边缘或快速扩张的大洋板块)的上地幔中确实出现了两个剪切波低速带 (Wang *et al.*, 2009; Schmerr, 2012), 地幔中的这种剪切波低速带通常被认为与熔体的出现有关. 例如, Schmerr (2012) 对太平洋板块地震波数据的研究发现, 除了 $40\sim 75$ km 深度的显著低速异常带, 在 $120\sim 180$ km (主要集中在 ~ 150 km) 还存在一个微弱的低速异常带. Hua *et al.* (2023) 为了确定软流圈地震波低速带的下部边界, 分析了全球地震接收函数数据, 发现在 ~ 150 km 深度广泛存在一个地震波速度正梯度带, 并推测该带是软流圈中一个部分熔融层的底界面. 这些地球物理观察结果是否确实反映软流圈内部存在其他的熔体聚集层? 对全球玄武岩来源深度的准确研究是回答这些问题和揭示软流圈地幔中熔体分布和结构的关键.

研究玄武岩来源深度的传统方法主要是利用

基于橄榄石-斜方辉石缓冲的熔体 SiO_2 活度压力计或者基于与橄榄石+石榴石平衡的熔体 Al 含量压力计或者单斜辉石(巨晶)主量元素含量建立的地质压力计 (Nimis, 1995; Nimis and Taylor, 2000; Putirka, 2008; Lee *et al.*, 2009; Plank and Forsyth, 2016; Sun and Dasgupta, 2020). 这些方法的不足之处就是全岩或者单斜辉石中主量元素组成容易受到岩浆喷发过程中橄榄石、辉石等分离结晶作用的影响, 并且很多情况下岩浆和地幔矿物可能并不平衡. 最近, 我们基于地幔部分熔融时熔体中重稀土元素分异受矿物组成(与压力有关)的影响, 建立了利用玄武岩中 Y/Yb 比值计算幔源熔体来源深度的新方法, 且该方法不受橄榄石、辉石分离结晶作用的影响 (Zhang *et al.*, 2024).

自然界中, 重稀土元素中的钇(Y)与镱(Yb)均呈+3价存在(除非在极还原条件), 且具有非常相近的离子半径 (Y^{3+} 和 Yb^{3+} 离子半径分别为 1.040 \AA 与 1.008 \AA). 而且, 这些重稀土元素在橄榄石、斜方辉石和尖晶石中高度不相容 ($D_Y, D_{Yb} \ll 1$), 在单斜辉石中为中等不相容, 在石榴石中则表现为高度相容性 ($D_Y, D_{Yb} \gg 1$) 特征. 而在地幔部分熔融过程中, Y 和 Yb 之间的分馏行为在尖晶石相橄榄岩中主要受单斜辉石控制, 在石榴石相橄榄岩中则主要受石榴石控制. 而且, Y 和 Yb 在单斜辉石、石榴石与玄武岩熔体之间的分配系数与压力负相关, 但 D_Y 和 D_{Yb} 随压力变化的趋势不同 (Zhang *et al.*, 2017). 因此, 玄武岩 Y/Yb 比值可以用来指示地幔熔体来源深度. 而且, 大多数情况下玄武岩喷发过程中的浅部地质作用几乎不会对 Y 和 Yb 分异发生影响, 可以保留原始岩浆的 Y/Yb 比值特征. 同时, Y 和 Yb 在低温水流体活动中属于不活动性元素, 轻微的风化作用也不会对玄武岩 Y/Yb 比值产生重要影响.

通过收集整理全球年轻火山岩地区有限的地球物理-地球化学资料, 发现大陆/大洋玄武岩 Y/Yb 比值和相关地区的 LAB 或 LVZ 深度数据之间具有明显的正相关性, 由此建立了基于玄武岩 Y/Yb 比值估算地幔熔体来源深度 (D) 的经验公式 [D (km) = $7.933 \times Y/Yb - 15.987$] (Zhang *et al.*, 2024). 对玄武岩地球化学数据的统计发现, 全球至少 25 个地区玄武岩的 Y/Yb 平均比值呈两组分布特征(分别为 $11.7\sim 15.9$ 和 $18.9\sim 22.7$), 对应了两个不同的软流圈熔体来源深度, 指示在全球范围内岩石圈之下可能存在两个熔体汇聚层(图 1). 其中,

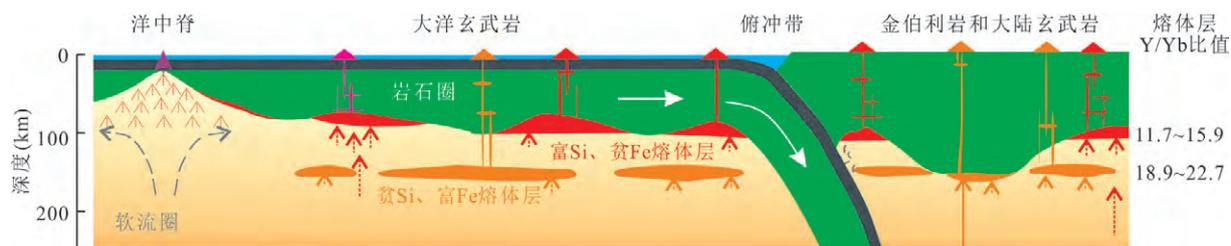


图1 岩石圈之下的两个熔体汇聚层

Fig.1 Two-layered melt accumulation in the asthenosphere

80~110 km 深度的玄武质熔体为富 Si、贫 Fe 的相对低密度熔体, 140~165 km 深度来源熔体为贫 Si、富 Fe 的相对高密度熔体. 这种双层的软流圈熔体结构表明, 软流圈地幔成分除了存在横向上的高度不均匀性(包括岩性不均一和化学不均一), 还存在纵向上与熔体密度和粘度有关的化学不均一性分层结构.

在没有刚性介质阻挡的情况下, 低密度富 Si 熔体产生的浮力驱动软流圈熔体通过颗粒边界向上迁移. 刚性岩石圈对深部来源熔体的阻挡作用可以解释上部富 Si、贫 Fe 玄武质熔体层的形成, 而且这种物理阻挡作用也会使该层熔体可能更富水. 而贫 Si、富 Fe 熔体在 140~165 km 深度的停滞和汇聚则可能主要与富 Fe 熔体的高密度有关. 也就是说贫 Si、富 Fe 熔体的密度与该深度的固相地幔密度相当. 已有研究表明尽管硅酸盐熔体密度在 4~6 GPa 深度随压力增大而快速增加, 但正常拉斑玄武质熔体的密度在 ~6 GPa 不超过 $3.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (低于该深度的固相地幔密度) (Sakamaki *et al.*, 2013), 而 Fe 含量增加则会显著提高熔体的密度 (Vander Kaaden *et al.*, 2015). 富 Fe 熔体可能形成于拆沉榴辉岩的熔融作用 (Zhang *et al.*, 2017), 也可能与软流圈地幔中的氧逸度和挥发分有关. He *et al.* (2020) 的研究表明幔源岩石在高氧逸度条件下也会产生富 Fe 玄武质熔体. 地幔熔融过程中 H_2O 和 CO_2 等挥发分会显著影响幔源熔体的成分, 增加 H_2O 含量会导致熔体更富硅, 而增加 CO_2 含量则会形成贫 SiO_2 熔体 (Foley and Pinter, 2018). 沉积碳酸盐深部再循环作用不仅会增加软流圈地幔 CO_2 含量, 同时会引起地幔氧逸度增高 (He *et al.*, 2020; Hong *et al.*, 2020). 因此, 拆沉进入软流圈地幔的榴辉岩或者受到再循环沉积碳酸盐改造的软流圈地幔部分熔融可能是形成 140~165 km 深度出现贫 Si、富 Fe 高密度熔体层的机制. 在地球的长期演化历史中, 这些熔体除了以幔源岩浆活动的形式形成陆壳或者洋壳物质外, 随

着软流圈地幔自上而下的冷却固化, 熔体与岩石圈地幔反应形成富集角闪石、金云母等含水矿物的岩石圈地幔可能是这些熔体的主要命运. 在一些岩石圈地幔中观察到的 LVZ 可能就是曾经的 LAB.

这种岩石圈之下的软流圈熔体双层结构为我们准确认识地球内部运行机制及其深部动力学过程提供了新的视角. Debayle *et al.* (2020) 的研究表明软流圈不同深度的熔体量与板块运动速度有关, 其中 ~150 km 深度的熔体量与板块运动速度变化 (从 $3 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 到 $6 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$) 关系最密切, 而 ~100 km 和 250 km 以下深度的熔体量与板块运动速度则关系不大. 贫 Si、富 Fe 熔体具有高密度、低粘度特征 (Kim *et al.*, 2021). 这种 ~150 km 深度低粘度富 Fe 熔体层与板块运动速度之间的耦合关系意味着 140~165 km 深度的熔体层对于促进板块运动可能扮演了比 LAB 更为关键的作用.

地球物理和地球化学等多学科综合研究是准确揭示地球深部过程与结构的有效手段. 未来应通过实验岩石学和地球化学等多学科交叉综合研究, 在准确获得 Y、Yb 等重稀土元素在地幔岩石熔融过程中分配系数与压力变化关系的基础上, 开发更多元的微量元素压力计等地球化学工具; 通过全面了解各类幔源熔体 (包括玄武岩、金伯利岩、碳酸岩等) 喷发前的熔体层深度和控制因素, 与地球物理精细探测结果相结合, 可以有效约束地球深部过程与精细结构, 服务深地探测前沿科学研究.

参考文献

- Barrell, J., 1914. The Strength of the Earth's Crust. *The Journal of Geology*, 22(6): 537–555. <https://doi.org/10.1086/622170>
- Beghein, C., Yuan, K., Schmerr, N., et al., 2014. Changes in Seismic Anisotropy Shed Light on the Nature of the Gutenberg Discontinuity. *Science*, 343(6176): 1237–1240. <https://doi.org/10.1126/science.1246724>
- Cline II, C.J., Faul, U.H., David, E.C., et al., 2018. Redox-

- Influenced Seismic Properties of Upper-Mantle Olivine. *Nature*, 555: 355–358. <https://doi.org/10.1038/nature25764>
- Davies, D.R., Rawlinson, N., Iaffaldano, G., et al., 2015. Lithospheric Controls on Magma Composition along Earth's Longest Continental Hotspot Track. *Nature*, 525: 511–514. <https://doi.org/10.1038/nature14903>
- Debayle, E., Bodin, T., Durand, S., et al., 2020. Seismic Evidence for Partial Melt below Tectonic Plates. *Nature*, 586: 555–559. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2809-4>
- Ellam, R.M., 1992. Lithospheric Thickness as a Control on Basalt Geochemistry. *Geology*, 20(2): 153–156. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0153:Ltaaco>2.3.Co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0153:Ltaaco>2.3.Co;2)
- Faul, U.H., Jackson, I., 2005. The Seismological Signature of Temperature and Grain Size Variations in the Upper Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 234(1–2): 119–134
- Foley, S.F., Pintér, Z., 2018. Primary Melt Compositions in the Earth's Mantle. In: Kono, Y., Sanloup, C., eds. *Magmas under Pressure*, Elsevier Amsterdam, Netherlands, 3–42.
- Haase, K.M., 1996. The Relationship between the Age of the Lithosphere and the Composition of Oceanic Magmas: Constraints on Partial Melting, Mantle Sources and the Thermal Structure of the Plates. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(1–2): 75–92. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(96\)00145-8](https://doi.org/10.1016/0012-821x(96)00145-8)
- He, D.T., Liu, Y.S., Chen, C.F., et al., 2020. Oxidization of the Mantle Caused by Sediment Recycling may Contribute to the Formation of Iron-Rich Mantle Melts. *Science Bulletin*, 65(7): 519–521. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.01.003>
- Hofmann, A.W., 1997. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism. *Nature*, 385: 219–229. <https://doi.org/10.1038/385219a0>
- Höink, T., Lenardic, A., Richards, M., 2012. Depth-Dependent Viscosity and Mantle Stress Amplification: Implications for the Role of the Asthenosphere in Maintaining Plate Tectonics. *Geophysical Journal International*, 191(1): 30–41. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05621.x>
- Hong, L.B., Xu, Y.G., Zhang, L., et al., 2020. Recycled Carbonate-Induced Oxidization of the Convective Mantle beneath Jiaodong, Eastern China. *Lithos*, 366/367: 105544. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105544>
- Hua, J.L., Fischer, K.M., Becker, T.W., et al., 2023. Asthenospheric Low-Velocity Zone Consistent with Globally Prevalent Partial Melting. *Nature Geoscience*, 16: 175–181. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01116-9>
- Karato, S.I., 2012. On the Origin of the Asthenosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 321–322: 95–103. <https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2012.01.001>
- Karato, S. I., Olugboji, T., Park, J., 2015. Mechanisms and Geologic Significance of the Mid-Lithosphere Discontinuity in the Continents. *Nature Geoscience*, 8(7): 509–514. <https://doi.org/10.1038/ngeo2462>
- Kim, W.Y., Hudon, P., Jung, I.H., 2021. Modeling the Viscosity of Silicate Melts Containing Fe Oxide: Fe Saturation Condition. *Calphad*, 72: 102242. <https://doi.org/10.1016/j.calphad.2020.102242>
- Lee, C.T.A., Luffi, P., Plank, T., et al., 2009. Constraints on the Depths and Temperatures of Basaltic Magma Generation on Earth and Other Terrestrial Planets Using New Thermobarometers for Mafic Magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 279(1–2): 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.020>
- Liu, C.Z., Yang, Y., Liu, B.D., et al., 2022. Compositional Heterogeneity of the Asthenosphere: Advancement and Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 38(12): 3712–3734 (in Chinese with English abstract).
- Nimis, P., 1995. A Clinopyroxene Geobarometer for Basaltic Systems Based on Crystal-Structure Modeling. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 121(2): 115–125. <https://doi.org/10.1007/s004100050093>
- Nimis, P., Taylor, W.R., 2000. Single Clinopyroxene Thermobarometry for Garnet Peridotites. Part I. Calibration and Testing of a Cr-in-Cpx Barometer and an Enstatite-in-Cpx Thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(5): 541–554. <https://doi.org/10.1007/s004100000156>
- Niu, Y.L., 2021. Lithosphere Thickness Controls the Extent of Mantle Melting, Depth of Melt Extraction and Basalt Compositions in all Tectonic Settings on Earth: A Review and New Perspectives. *Earth-Science Reviews*, 217: 103614. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2021.103614>
- Niu, Y.L., Wilson, M., Humphreys, E.R., et al., 2011. The Origin of Intra-Plate Ocean Island Basalts (OIB): The Lid Effect and Its Geodynamic Implications. *Journal of Petrology*, 52(7/8): 1443–1468. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr030>
- O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L., 2010. The Continental Lithosphere-Asthenosphere Boundary: Can We Sample It? *Lithos*, 120(1–2): 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.lith>

- os.2010.03.016
- Plank, T., Forsyth, D. W., 2016. Thermal Structure and Melting Conditions in the Mantle beneath the Basin and Range Province from Seismology and Petrology. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(4):1312–1338
- Putirka, K.D., 2008. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69: 61–120. <https://doi.org/10.2138/RMG.2008.69.3>
- Rychert, C., Harmon, N., Constable, S., et al., 2020. The Nature of the Lithosphere–Asthenosphere Boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(10): e2018JB016463. <https://doi.org/10.1029/2018jb016463>
- Rychert, C. A., Shearer, P. M., 2009. A Global View of the Lithosphere–Asthenosphere Boundary. *Science*, 324: 495–498. <https://doi.org/10.1126/science.1169754>
- Sakamaki, T., Suzuki, A., Ohtani, E., et al., 2013. Ponded Melt at the Boundary between the Lithosphere and Asthenosphere. *Nature Geoscience*, 6: 1041–1044. <https://doi.org/10.1038/ngeo1982>
- Schmerr, N., 2012. The Gutenberg Discontinuity: Melt at the Lithosphere – Asthenosphere Boundary. *Science*, 335 (6075): 1480–1483. <https://doi.org/doi:10.1126/science.1215433>
- Sun, C. G., Dasgupta, R., 2020. Thermobarometry of CO₂-Rich, Silica - Undersaturated Melts Constrains Cratonic Lithosphere Thinning through Time in Areas of Kimberlitic Magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 550:116549. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116549>
- Thybo, H., 2006. The Heterogeneous Upper Mantle Low Velocity Zone. *Tectonophysics*, 416(1–4): 53–79. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.11.021>
- Vander Kaaden, K. E., Agee, C. B., McCubbin, F. M., 2015. Density and Compressibility of the Molten Lunar Picritic Glasses: Implications for the Roles of Ti and Fe in the Structures of Silicate Melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 149: 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.10.029>
- Wang, Y., Forsyth, D. W., Savage, B., 2009. Convective Upwelling in the Mantle beneath the Gulf of California. *Nature*, 462:499–501. <https://doi.org/10.1038/nature08555>
- Yuan, H., Romanowicz, B., 2018. Introduction—Lithospheric Discontinuities. In: Yuan, H., Romanowicz, B., eds., Lithospheric Discontinuities. American Geophysical Union, San Francisco. <https://doi.org/10.1002/9781119249740.ch0>
- Zhang, J. B., Liu, Y. S., Foley, S. F., et al., 2024. Widespread Two-Layered Melt Structure in the Asthenosphere. *Nature Geoscience*, 17:472–477. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01433-1>
- Zhang, J. B., Liu, Y. S., Ling, W. L., et al., 2017. Pressure-Dependent Compatibility of Iron in Garnet: Insights into the Origin of Ferropicritic Melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 197: 356–377. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.10.047>
- 刘传周, 杨阳, 刘博达, 等. 2022. 软流圈地幔成分不均一性的研究进展与意义. *岩石学报*, 38(12):3712–3734.