



岩石圈内榴辉岩的命运

王振胜¹, 徐义贤^{2*}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 浙江省地学大数据和地球深部资源重点实验室, 浙江大学地球科学学院, 杭州 310058

* 通讯作者, E-mail: xyxian@zju.edu.cn

收稿日期: 2023-10-24; 收修改稿日期: 2024-01-18; 接受日期: 2024-01-29; 网络版发表日期: 2024-02-22

国家自然科学基金项目(批准号: 41830212、42272243)资助

1 榴辉岩及其黏性排出的概念

榴辉岩是由洋壳或陆壳岩石在俯冲、碰撞等构造埋深作用下, 增压到1~1.5GPa以上, 发生超高压变质作用(ultra-high pressure metamorphism)而生成的以石榴子石和绿辉石为主要矿物组成的特殊岩石类型。深源捕虏体研究表明克拉通岩石圈地幔中也存在一定量的榴辉岩, 可能与早期俯冲或地幔柱活动有关(Aulbach和Smart, 2023)。

榴辉岩因其异常高的密度和负浮力, 被称为“上地幔动力引擎”(Anderson, 2007)。传统观点认为, 榴辉岩可通过大规模拆沉(Peng等, 2022)或岩石圈滴落(Göğüş等, 2017)方式进入对流地幔。残留在地壳或岩石圈地幔中的榴辉岩可被岩浆捕获作用或构造折返作用夹带至中上地壳甚至地表, 而作为高压变质榴辉岩相的标志性岩石, 用于研究构造、变质作用过程及重建P-T-t轨迹(Aulbach和Smart, 2023; Brown, 2023)。

除大规模拆沉和滴落作用之外, Lee等(2011)指出, 当岩石圈内的石榴辉石岩或榴辉岩层发生倾斜时, 会因其高密度和低黏度, 而产生穿越岩石圈地幔的“黏性排出(viscous drainage)”现象, 使榴辉岩单独进入对流地幔。排出速率与密度差、榴辉岩层的倾角及榴辉岩平均厚度的平方呈正相关, 与榴辉岩的黏度呈负相关,

排出过程可能持续几千万年到数亿年。显然, 黏性排出提供了一种从大陆岩石圈中去除榴辉岩的机制。该机制可避免强烈改造大陆岩石圈的橄榄岩框架(Lee等, 2011), 因此被视为早期克拉通岩石圈形成的一种重要机制。然而, 该机制自提出以来, 长期处于概念模型阶段, 其可行性缺乏观测和定量约束。

近来, Wang等(2022)通过数值模拟定量验证了地幔长期冷却背景下不同板块汇聚带内榴辉岩层黏性排出的可行性及局限性。研究结果与地幔捕虏体、地震反射体等多种观测数据相互印证, 构建了完整的榴辉岩黏性排出机制证据链。本文主要讨论岩石圈榴辉岩黏性排出的控制因素、后果及其地球物理参数表征, 并展望大陆演化过程中该机制可能发挥的作用。

2 太古宙俯冲带榴辉岩黏性排出与残留

太古宙克拉通中的榴辉岩主要发现于地幔深源岩浆捕虏体中。关于其成因机制主要有两种不同认识: 一种认为其为地幔柱岩浆在高压下的结晶产物, 另一种认为是俯冲洋壳变质产物。两种机制的相关证据, 前人已做了大量分析与评述, 至今仍存在争议(Aulbach和Smart, 2023)。该争议涉及大陆岩石圈的起源与板块构造的启动时间等前沿问题。因此, 克拉通内榴辉岩成

中文引用格式: 王振胜, 徐义贤. 2024. 岩石圈内榴辉岩的命运. 中国科学: 地球科学, 54(3): 897–901, doi: 10.1360/SSTe-2023-0260

英文引用格式: Wang Z, Xu Y. 2024. The fate of eclogites in the lithosphere. Science China Earth Sciences, 67(3): 879–884, <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1261-2>

因是大陆动力学和板块构造领域的共同热点问题。

尽管板块构造启动的时间和范围存在巨大争议,但是学术界普遍认同太古宙至少已经存在区域性的俯冲作用。然而,早期俯冲洋壳相变而成的高密度榴辉岩能否稳定地残存于大陆岩石圈内?残余量是多少?这些问题仍然存在疑问。因此, Wang等(2022)通过数值模拟约束了太古宙俯冲带洋壳相变而成的榴辉岩长期演化过程。该模拟工作考虑了前人对于太古宙地幔温度的争议,测试了不同的太古宙地幔潜温($T_p=1485\sim 1600^{\circ}\text{C}$)和地幔长期冷却速率($135\sim 250^{\circ}\text{C}/2.5\text{Gyr}$),同时考虑了不同地幔温度对洋中脊部分熔融、熔体抽取和洋壳厚度的影响。此外还测试了不同热岩石圈厚度、汇聚速率、俯冲角度、橄榄岩弱化程度、榴辉岩弱化程度等俯冲动力学体系的基本参数对结果的影响。热岩石圈厚度范围为 $50\sim 150\text{km}$,涵盖了不同年龄的大洋岩石圈厚度以及前板块构造体制下形成的加厚大洋岩石圈的可能厚度。汇聚速率设置为 $3\sim 10\text{cm/yr}$,俯冲角度为 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$,涵盖了大多数板块碰撞末期的汇聚速率和俯冲角度范围。榴辉岩的黏度计算是在实验室测得的相对干燥体系基础上,乘以一个弱化系数($f_{\text{eclogite}}=0.01\sim 1.0$),以考虑可能的绿辉石增加、部分熔融、含水量增加或者碳酸盐化等过程对榴辉岩强度的降低。橄榄岩的黏度计算也用了相似的系数($f_{\text{peridotite}}=0.01\sim 1.0$),以考虑熔流体、氧逸度等变化对其强度的降低。

模拟结果显示,除了大幅度降低地幔橄榄岩黏度($f_{\text{peridotite}}=0.01$)可以导致俯冲板片的快速断离和崩塌之外,其余模型的俯冲板片和相变形成的洋壳榴辉岩,均可长时间叠置于大陆岩石圈边缘。模拟结果表明,25亿年之后残余的榴辉岩可达岩石圈地幔体积的 $\sim 12\%$ 。其中上部 $70\sim 120\text{km}$ 可以长期保持俯冲叠置的倾斜结构(图1),并可与地震学数据在全球范围内揭示的太古宙和显生宙的多个大陆深部倾斜结构的形状和深度相对照(Flack等, 1990; Calvert等, 1995; Gao等, 2016);下部 $120\sim 200\text{km}$ 则在软流圈高温作用下发生弱化,使得一部分榴辉岩在负浮力作用下,逐渐变为离散滴状,并发生黏性排出,离开岩石圈地幔。黏性排出过程可以长达20亿年以上,犹如在地幔中下了一场漫长的“榴辉岩雪”。在岩石圈下部残留的榴辉岩(图1),可以被黏性排出改造得支离破碎,因此很容易被深源的岩浆活动所捕获,形成可与捕虏体测试结果(Aulbach和Smart, 2023)一致的榴辉岩分布特征。

3 显生宙板块汇聚边界下地壳榴辉岩黏性排出的可能性

根据高温高压实验结果,以石榴子石为主的干榴辉岩强度略大于亏损地幔橄榄岩,但以绿辉石为主的干榴辉岩强度则接近绿辉石,且远小于亏损地幔橄榄岩强度(Zhang和Green, 2007)。根据已有实验结果,在 3GPa 和 1073K 时以绿辉石为主的榴辉岩比橄榄岩的应变速率大 $1\sim 3$ 个量级(Jin等, 2001; Zhang和Green, 2007)。所以,在流变学意义上,显生宙地壳增厚区可能存在榴辉岩的黏性排出。

结合前文论述,我们认为判别显生宙增生区存在榴辉岩黏性排出现象的地球物理依据包括:

(1) 未达岩石圈-软流圈界面的深大倾斜结构: $70\sim 120\text{km}$ 深度以浅可见清晰的俯冲倾斜结构, $70\sim 120\text{km}$ 之下倾斜结构被黏性排出打乱,可探测性降低。

(2) 中等深度($50\sim 300\text{km}$)地震活动: 榴辉岩黏性排出伴随着应变集中和密度分选导致的石榴石富集,后者有利于岩石主导变形机制再度转为脆性(Rogowitz等, 2023),因此在榴辉岩返回对流地幔的路径上可能会发育中等深度地震。

(3) 下地壳高速、中层: 与倾斜体上方连接的下地壳也发生榴辉岩化,榴辉岩地震波速度(大于 $\sim 45\text{km}$ 深度, V_p 为 $7.0\sim 8.1$ 或 $7.2\sim 8.1\text{km/s}$)高于其他地壳岩石,榴辉岩化变质反应是脱水反应,造成黏性排出起始至峰期阶段的下地壳电阻率中等,但峰期之后随着时间的推移电阻率逐渐升高。

(4) 倾斜体上方中地壳低速、低阻异常: 榴辉岩化变质反应释放的水会向上运移,在脆韧性转换带下方被圈闭或者被壳内剪切带局部封存,形成可被地震和大地电磁观测数据所成像的低速和低阻异常体。

(5) 倾斜体在地幔深度呈低速特征: 根据Anderson(2006)编辑的资料(后来的实验测定结果与此接近),榴辉岩的P波速度一般低于地幔橄榄岩(特别在榴辉岩中绿辉石占比较高的情况下)。因此当岩石圈地幔内部残留榴辉岩层并具有一定厚度时,其上界面是负极性而下界面是正极性,这与帕米尔凸起上观测到的P波接收函数完全一致(Schneider等, 2019)。上述其他地球物理特征在帕米尔凸起都已经观察到(图2),因此有理由相信帕米尔凸起下方已经启动了榴辉岩的黏性排出(详细论证将另文发表)。

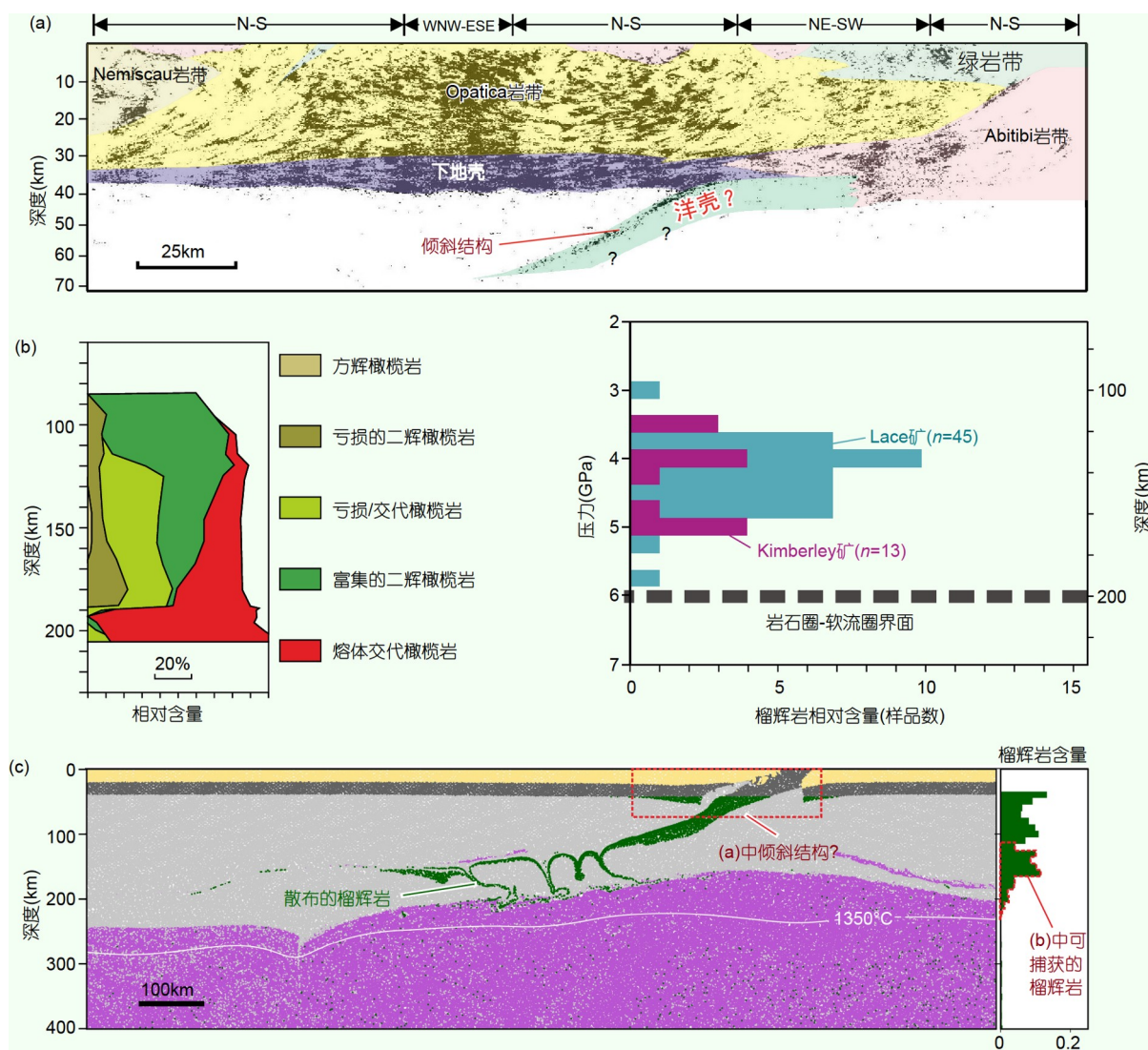


图 1 数值模拟结果与地质、地球物理观测对比

修改自Wang等(2022). (a) Superior 克拉通内俯冲倾斜相关的地震反射体; (b) Kaapvaal克拉通内榴辉岩捕虏体分布; (c) 榴辉岩黏性排出数值模拟结果

根据上述依据, 很多显生宙增生区可能也存在下地壳榴辉岩黏性排出, 例如苏格兰高地加里东构造带(Flack等, 1990)、伊比利亚华力西构造带(Diaz等, 1993)、西准噶尔(Xu等, 2020)和帕米尔凸起(Schneider等, 2019)等。

4 黏性排出的长期作用对大陆演化的贡献

上述概念模型、数值模型和地球物理观测, 从多角度论证了洋壳和/或下地壳榴辉岩黏性排出过程在

太古宙到显生宙不同构造环境中的可行性和存在性。然而, 榴辉岩黏性排出过程, 作为榴辉岩引擎是一种长期被忽略的机制, 对构造演化起到了何种作用, 仍有待深入研究。

首先, 黏性排出发生的构造环境复杂多样。除了已述及的岛弧、低角度叠置板片及克拉通内、造山带或大陆高原之外, 榴辉岩的黏性排出还能否发生在其他构造背景之下, 如早期大洋高原内等, 还有待进一步研究。

其次, 榴辉岩作为地球动力学的重要引擎, 除了能

引发黏性排出之外, 还可以引发拆沉、滴落以及俯冲加速作用(Duisterhoeft等, 2014; Göğüş等, 2017; Peng等, 2022). 这四种作用(表1)的构造环境具有一定相似性或重叠性, 但不同作用的触发条件和时空演化规律存在差异. 例如, 岛弧地壳加厚可导致岩石圈拆沉, 也可导致榴辉岩黏性排出(Lee等, 2011), 两者是同时发生还是相继发生, 发生条件分别是什么, 并不清楚. 因此, 将来一方面要定量约束不同地质条件下, 拆沉、滴落、俯冲加速和黏性排出的难易程度; 另一方面要探明不同时代、不同区域榴辉岩的作用方式, 挖掘拆沉、滴落、加速俯冲和黏性排出的时空分布规律.

此外, 榴辉岩相关的拆沉、滴落和黏性排出所产生的结果有很大不同. 尽管拆沉和滴落也可将高密度

的榴辉岩带入深部, 使得大陆岩石圈变轻, 但是它们还将大量的岩石圈地幔同时带入了深部, 使得大陆岩石圈减薄. 因此, 拆沉和滴落往往被当作大陆岩石圈减薄破坏的重要机制. 而榴辉岩的黏性排出作为榴辉岩引擎的一种新论证的机制, 其与拆沉和滴落作用相比, 其性状如“静水深流”, 可以保留更多的地幔橄榄岩框架甚至榴辉岩. 这对于大陆岩石圈的分异、加厚、稳定和失稳过程非常关键, 不同残余量的榴辉岩可能为大陆岩石圈稳定后的再活化和破坏埋下了伏笔.

岩石圈增厚和密度减小是大陆从形成到稳定的先决条件, 而它们与岩石圈中榴辉岩的命运密切相关, 因此榴辉岩引擎可能驱动着不同时空背景下的大陆岩石

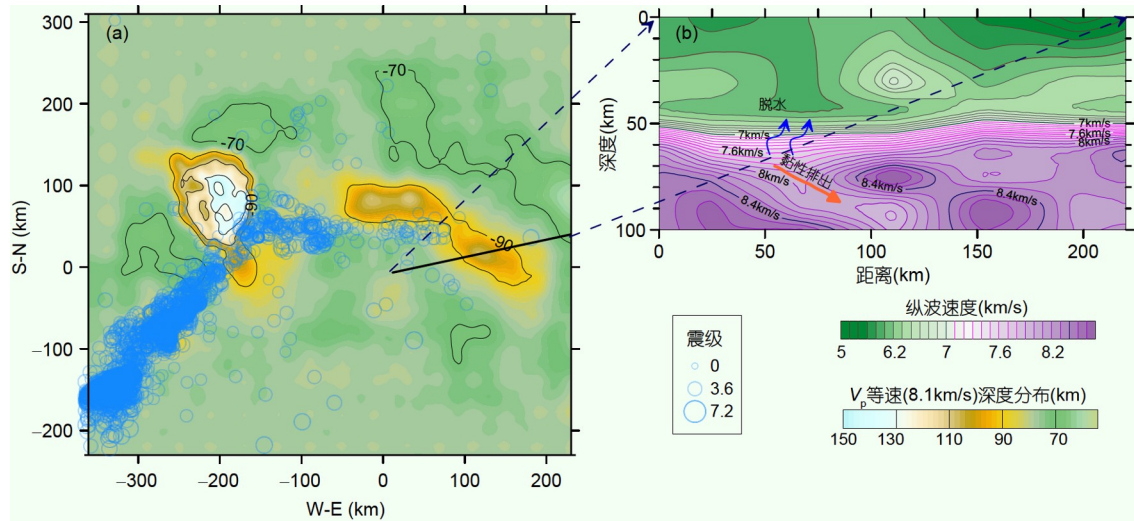


图2 东帕米尔可能存在岩石圈黏性排出的地球物理观测结果

(a) P波8.1km/s等速面的深度(Bloch等, 2021)和中源深度地震($M_L>3$)震中及震源深度分布(Sippl等, 2013), 原点经纬度为74.9°E和7.88°N; (b) 东帕米尔东西向速度剖面及解释

表1 下地壳榴辉岩的命运

机制 (参考文献)	发生位置	榴辉岩命运	动力学后果	代表性地区
俯冲加速 (Duisterhoeft等, 2014)	俯冲带	随俯冲板块进入对流地幔	板块加速; 板块断离; 构造岩浆活动增强; 地震活动性增强	太平洋俯冲带
拆沉 (Peng等, 2022)	造山带、高原	连同岩石圈地幔进入对流地幔	大规模隆升并伴随剧烈岩浆活动; 地体活化	科罗拉多高原
滴落 (Göğüş等, 2017)	造山带、高原	大部分进入对流地幔	岩石圈减薄; 岩浆底侵; 区域隆升	安纳托利亚高原; 安第斯山
黏性排出 (Wang等, 2022)	弧下、俯冲带、造山带、高原、克拉通内部	部分进入对流地幔, 部分保留在浅部地幔呈俯冲倾斜状或滴落拖尾状	长期维持高原; 中源地震活跃; 克拉通化	苏格兰高地; 帕米尔地体

圈向不同的方向演化。当地壳增厚区的某些特定地质条件有利于拆沉和滴落时, 大陆岩石圈就会向着破坏和活化的方向演化; 当地壳增厚区的某些特定地质条件有利于黏性排出时, 大陆岩石圈就会向着稳定和克拉通化的方向演化。早期的大陆岩石圈在漫长的地质演化中可能经历了多次拆沉、滴落相关的减薄和活化, 并在某个时期终于满足了黏性排出的条件, 从而稳定保存下来。显生宙以来, 类似的“自然选择”过程还在进行。从岛弧到造山带, 再到高原, 许多构造单元都在拆沉和滴落相关的岩石圈减薄, 或黏性排出相关的岩石圈克拉通化的进程中。青藏高原、伊朗高原、中亚造山带、阿尔卑斯、加里东造山带等构造单元的岩石圈经历拆沉、滴落还是榴辉岩黏性排出, 是活化还是克拉通化, 均是大陆动力学探讨的热点问题。

致谢 杨顶辉副主编约稿并提出建设性意见, 匿名审稿人提出了建设性的修改意见, 对提高本文的质量有很大帮助, 在此一并致谢。

参考文献

- Anderson D L. 2006. Speculations on the nature and cause of mantle heterogeneity. *Tectonophysics*, 416: 7–22
- Anderson D L. 2007. The eclogite engine: Chemical geodynamics as a Galileo thermometer. In: Foulger G R, Jurdy D M, eds. *Plates, Plumes and Planetary Processes*. Geological Society of America. 47–64
- Aulbach S, Smart K A. 2023. Petrogenesis and geodynamic significance of xenolithic eclogites. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 51: 521–549
- Bloch W, Schurr B, Yuan X, Ratschbacher L, Reuter S, Kufner S K, Xu Q, Zhao J. 2021. Structure and stress field of the lithosphere between Pamir and Tarim. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL095413
- Brown M. 2023. Some thoughts about eclogites and related rocks. *Eur J Mineral*, 35: 523–547
- Calvert A J, Sawyer E W, Davis W J, Ludden J N. 1995. Archean subduction inferred from seismic images of a mantle suture in the Superior Province. *Nature*, 375: 670–674
- Díaz J, Gallart J, Córdoba D, Senos L, Matias L, Suriñach E, Hirn A, Maguire P. 1993. A deep seismic sounding investigation of lithospheric heterogeneity and anisotropy beneath the Iberian Peninsula. *Tectonophysics*, 221: 35–51
- Duesterhoeft E, Quinteros J, Oberhänsli R, Bousquet R, de Capitani C. 2014. Relative impact of mantle densification and eclogitization of slabs on subduction dynamics: A numerical thermodynamic/thermokinematic investigation of metamorphic density evolution. *Tectonophysics*, 637: 20–29
- Flack C A, Klemperer S L, McGeary S E, Snyder D B, Warner M R. 1990. Reflections from mantle fault zones around the British Isles. *Geology*, 18: 528
- Gao R, Chen C, Wang H, Lu Z, Brown L, Dong S, Feng S, Li Q, Li W, Wen Z, Li F. 2016. SINOPROBE deep reflection profile reveals a Neo-Proterozoic subduction zone beneath Sichuan Basin. *Earth Planet Sci Lett*, 454: 86–91
- Göğüş O H, Pysklywec R N, Şengör A M C, Gün E. 2017. Drip tectonics and the enigmatic uplift of the Central Anatolian Plateau. *Nat Commun*, 8: 1538
- Jin Z M, Zhang J, Green II H W, Jin S. 2001. Eclogite rheology: Implications for subducted lithosphere. *Geology*, 29: 667
- Lee C T A, Luffi P, Chin E J. 2011. Building and destroying continental mantle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 39: 59–90
- Peng L, Liu L, Liu L. 2022. The fate of delaminated cratonic lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 594: 117740
- Rogowitz A, Thielmann M, Kraus K, Grasemann B, Renner J. 2023. The effect of the garnet content on deformation mechanisms and weakening of eclogite: Insights from deformation experiments and numerical simulations. *Geochem Geophys Geosyst*, 24: e2022GC010743
- Schneider F M, Yuan X, Schurr B, Mechie J, Sippl C, Kufner S K, Ratschbacher L, Tilmann F, Oimahmadov I, Gadoev M, Minaev V, Abdybachaev U, Orunbaev S, Ischuk A, Murodkulov S. 2019. The crust in the Pamir: Insights from receiver functions. *J Geophys Res-Solid Earth*, 124: 9313–9331
- Sippl C, Schurr B, Yuan X, Mechie J, Schneider F M, Gadoev M, Orunbaev S, Oimahmadov I, Haberland C, Abdybachaev U, Minaev V, Negmatullaev S, Radjabov N. 2013. Geometry of the Pamir-Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 1438–1457
- Wang Z, Kusky T M, Wang L. 2022. Long-lasting viscous drainage of eclogites from the cratonic lithospheric mantle after Archean subduction stacking. *Geology*, 50: 583–587
- Xu Y X, Yang B, Zhang A Q, Wu S C, Zhu L, Yang Y J, Wang Q Y, Xia Q K. 2020. Magnetotelluric imaging of a fossil oceanic plate in northwestern Xinjiang, China. *Geology*, 48: 385–389
- Zhang J, Green H W. 2007. Experimental investigation of eclogite rheology and its fabrics at high temperature and pressure. *J Metamorph Geol*, 25: 97–115

(责任编辑: 姚华建)