



地球物理数据揭示东帕米尔榴辉岩化下地壳黏性排出与滴落

文刚^{1,2†}, 徐义贤^{1,2*}, 杨波^{1,2†}, 林秀斌^{1,3}, 鲍学伟^{1,2}, 曾润渊^{1,2}, 张壹^{1,2}

1. 浙江大学地球科学学院, 浙江省地学大数据与地球深部资源重点实验室, 杭州 310027

2. 浙江大学地球物理研究所, 杭州 310027

3. 教育部含油气盆地构造研究中心, 杭州 310027

* 通讯作者, E-mail: xyxian@zju.edu.cn

† 同等贡献

2025-05-31收稿, 2025-12-31修回, 2026-01-21接受, 2026-04-20网络版发表

国家自然科学基金项目(42430301、41830212和41774079)资助

摘要 理解大陆地壳中的致密岩石是否以及如何循环回到地幔深度, 对解读地球的演化至关重要。增厚下地壳中榴辉岩层的黏性排出被认为是一种先于板块构造出现的机制, 但尚未得到观测证实。特别地, 尚不清楚这种机制是否在现代板块构造驱动的造山过程中起作用。帕米尔高原位于印度-亚洲碰撞带中喜马拉雅-西藏活动造山带西端。本研究在东帕米尔及其周边地区采用大地电磁数据反演构建了三维电阻率模型。其中, 中地壳低阻体是增厚下地壳榴辉岩化反应向上输运的含水流体被局部圈闭的结果, 电阻率模型支持东帕米尔地壳与塔里木地壳之间近垂直碰撞的机制。此外, 基于岩石物理性质和流变学研究结果, 东帕米尔地区电阻率和速度结构以及中源地震分布特征, 均可通过榴辉岩层的黏性排出及其随后的滴落机制来解释。我们认为, 东帕米尔地区已经启动并正在进行黏性排出和滴落过程, 这可能代表了造山带趋于稳定的早期阶段。

关键词 大地电磁成像, 地震波速度, 中源地震, 榴辉岩化下地壳黏性排出

1 引言

去除基性大陆下地壳是板块构造系统中的一个基本过程, 它不仅提供了地表岩石和地幔物质之间的循环机制, 还通过深部地幔过程促进了大陆岩石圈和海洋岩石圈之间的大规模成分交换(Rudnick和Fountain, 1995)。目前普遍认为, 造山带中榴辉岩化的下地壳会导致拆沉或滴落(即Rayleigh-Taylor型下沉)(Krystopowicz和Currie, 2013)。除了空间尺度上的差异外, 榴辉岩化下地壳的拆沉和滴落在动力学机制上几乎是相同的。这两个过程都会导致类似的结果, 如岩浆活动和地形的变化。因此, 这两种机制在实际观测中几乎无法区分。此外, 有学者提出了一种黏性排出机制, 即岩石圈榴辉岩层由于密度

升高和黏度降低而发生倾斜, 从而有可能“排出”到对流地幔中, 其持续时间跨度可达几千万至数亿年。排出速率与密度差、榴辉岩层的倾角和层厚度的平方呈正相关, 而与榴辉岩本身的黏度呈负相关(Lee等, 2011)。此后, 针对早前寒武纪潜温条件的数值模拟研究评估了该机制在造山带中的可行性(Wang等, 2022)。然而, 无论是在早前寒武纪还是显生宙, 这种机制都尚未被实际观测到。

帕米尔高原的构造格架可分为北部、中部和南部3个区域, 向北突出于西部的塔吉克盆地和东部的塔里木克拉通盆地之间(图1)。它是印度板块-亚洲板块碰撞系统的一部分。在东帕米尔地区的西昆仑地块下方, 印度克拉通的岩石圈地幔与亚洲岩石圈地幔发生了碰撞(Zhao等, 2010)。至约6 Ma, 东帕米尔地块与其周围地块之间

中文引用格式: 文刚, 徐义贤, 杨波, 林秀斌, 鲍学伟, 曾润渊, 张壹. 2026. 地球物理数据揭示东帕米尔榴辉岩化下地壳黏性排出与滴落. 中国科学: 地球科学, 56(5): 1962–1972, doi: 10.1360/N072025-0256

英文引用格式: Wen G, Xu Y, Yang B, Liu X, Bao X, Zeng R, Zhang Y. 2026. Viscous drainage and dripping of eclogitized lower crust in the eastern Pamir imaged by geophysical data. Science China Earth Sciences, 69(5): 1921–1931, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1846-8>

的相对运动受到喀什-叶城转换系统(KYTS)等走滑断裂的控制(图1; Sobel等, 2011)。在东帕米尔地块中, 慕士塔格片麻岩穹隆(MD)周围分布了公格尔山伸展系统(KSES)和库克剪切带(KSZ), 该穹隆由片麻岩在约20–12和约12–8 Ma, 分别从中下地壳和中上地壳快速折返形成(Cai等, 2017)。在慕士塔格片麻岩穹隆以南, 右旋的喀喇昆仑断裂(KKF)调节了数百公里的滑移量。帕米尔片麻岩穹隆的地质研究记录了渐新世-中新世期间30–40 km埋深处的折返, 这一过程紧随地壳增厚和熔融, 因此增厚但富含熔体的下地壳可能经历了挤出或板片断裂, 促进了地壳物质向地幔的循环(Robinson等, 2007; Schmidt等, 2011)。

地震学研究(Sippl等, 2013; Schneider等, 2013, 2019; 李玮等, 2020; Bloch等, 2021; Xu等, 2021)(图1)表明, 帕米尔高原的莫霍面深度超过约65–70 km, 记录了正在进行中的大陆碰撞造山带特征性的双倍地壳厚度。沿印度板块与亚洲板块碰撞前缘分布的20 mGal正均衡重力异常数据表明帕米尔地区存在过剩的致密地壳(Balmino等, 2012)。亚洲岩石圈地幔在西南帕米尔地区向东南倾斜(Schneider等, 2013; Sippl等, 2013), 在中帕米尔地区转向南(Schneider等, 2019; 李玮等, 2020; Bloch等, 2021), 在南帕米尔边缘和西北昆仑地区向东倾斜(Bloch等, 2021; Xu等, 2021)。岩石圈地幔的倾角方向很少像帕米尔地区那样发生如此显著的变化。中源地震(50–300 km)沿岩石圈地幔的下倾方向发育, 地震活动从西南帕米尔向东帕米尔逐渐减少(Schneider等, 2013; Kufner等, 2017)(图1)。基于这些地球物理结果, 学者提出了两种可能的地球动力学演化模型: 陆内俯冲(Sobel等, 2013)和榴辉岩化下地壳拆沉(Li等, 2023)。然而, 陆内俯冲与现今的运动模式相矛盾, 即整个帕米尔高原呈现为一个统一的应变块体(Zubovich等, 2016); 大规模拆沉也无法与约10 Ma以来沉寂的火山活动相吻合(Li等, 2023)。无论哪种假设成立, 构造热事件都应伴随岩浆作用和变质作用。这些过程中流体或熔体的运移和滞留将在岩石圈中留下遗迹, 这些特征可以被大地电磁数据捕捉到(Sheng等, 2023)。

2 数据与方法

通过记录由磁层和电离层电流系统以及全球雷电活动在地球中感应出的两个水平电场分量和三个磁场分量, 可估算不同周期的大地电磁阻抗和垂直磁场传输函数(VTF或倾子)(Egbert和Booker, 1986)。大地电磁阻抗和倾子分别对垂向和横向电阻率的变化敏感, 且两种数据的敏感深度峰值随周期而变化。因此, 反演这两种数据

可以得到地下电阻率的三维结构分布。本研究使用的数据包括38个长周期大地电磁测点(7.3–18725 s)和48个宽频带大地电磁测点(320 Hz–1638.4 s), 测点间距不均匀, 范围为15–50 km, 覆盖了塔里木盆地西南部和东帕米尔地区。长周期大地电磁数据使用GMS07e和LEMI-424仪器记录了一周或更长时间, 而宽频带大地电磁数据使用GMS07e和Phoenix MTU-5仪器记录了一天。我们使用标准的稳健远参考算法(Egbert和Booker, 1986), 从两个电场分量和三个磁场分量中估算阻抗和倾子。大多数台站的数据质量非常好(附图S1), 但在少数台站, 微弱的天然电磁信号导致数据质量相对较低。我们删除了这些台站部分周期的数据以保证数据的可靠性(附图S1)。应用瞬时相位的趋肤深度来估算所选大地电磁数据的探测深度(Borah和Patro, 2019), 结果表明采集到的大地电磁信号可以穿透帕米尔岩石圈地幔和塔里木中地壳(附图S2)。相位张量和感应矢量的分析见补充材料(附图S3)。

对于三维反演, 使用ModEM代码(Egbert和Kelbert, 2012; Kelbert等, 2014)对估算的阻抗和倾子进行反演。将所有阻抗分量的相对误差底界设为5%, 倾子的误差底界设为0.03。先验模型分为三层, 410 km以上为100 Ω m, 410–660 km为10 Ω m, 660 km以下为3 Ω m。模型在垂直方向上划分为54层, 层厚度从0到1500 km深度范围内对数增加(第一层和最后一层的厚度分别为10 m和505 km)。我们在核心区域测试了两种水平网格分辨率(4.4 km $\times$ 4.5 km与3.3 km $\times$ 3.5 km), 最终选择了更精细的3.3 km $\times$ 3.5 km网格, 因为它对间距较大的台站和边缘结构具有更高的分辨率(附图S6)。水平网格在每个边缘填充了9个单元格, 其横向宽度增加了1.3倍。模型在x、y和z方向上一共有93 $\times$ 112 $\times$ 52个单元。为了进一步减小浅地表中电流畸变的影响, 采用Liu等(2024)的策略, 在最上部1 km划分10层垂直网格, 初始层厚为10 m。阻抗张量和倾子分量的初始联合反演产生的初始归一化均方根拟合差(nRMS)为38.15, 经过155次迭代后降至2.2。

我们在评估数据拟合情况时发现, 倾子的数据拟合情况比阻抗差, 同时注意到在主要电性异常结构上方的测站仍存在显著的拟合差, 这表明该反演结果在解析关键地下结构方面存在不确定性(附图S5)。模拟和实测数据证实, 倾子分量对横向电阻率变化具有很强的敏感性, 特别有利于分离相邻的异常体(Siripunvaraporn和Egbert, 2009; Campenyà等, 2016)。为此, 进一步采用两种分量数据分步反演策略。首先, 从均匀半空间开始仅反演阻抗, 在103次迭代中将nRMS拟合差从45.34降至2.28。随后, 以阻抗反演得到的模型作为初始模型再反演倾子, 在24次迭代内将倾子分量的nRMS从2.85降至1.11(详见补

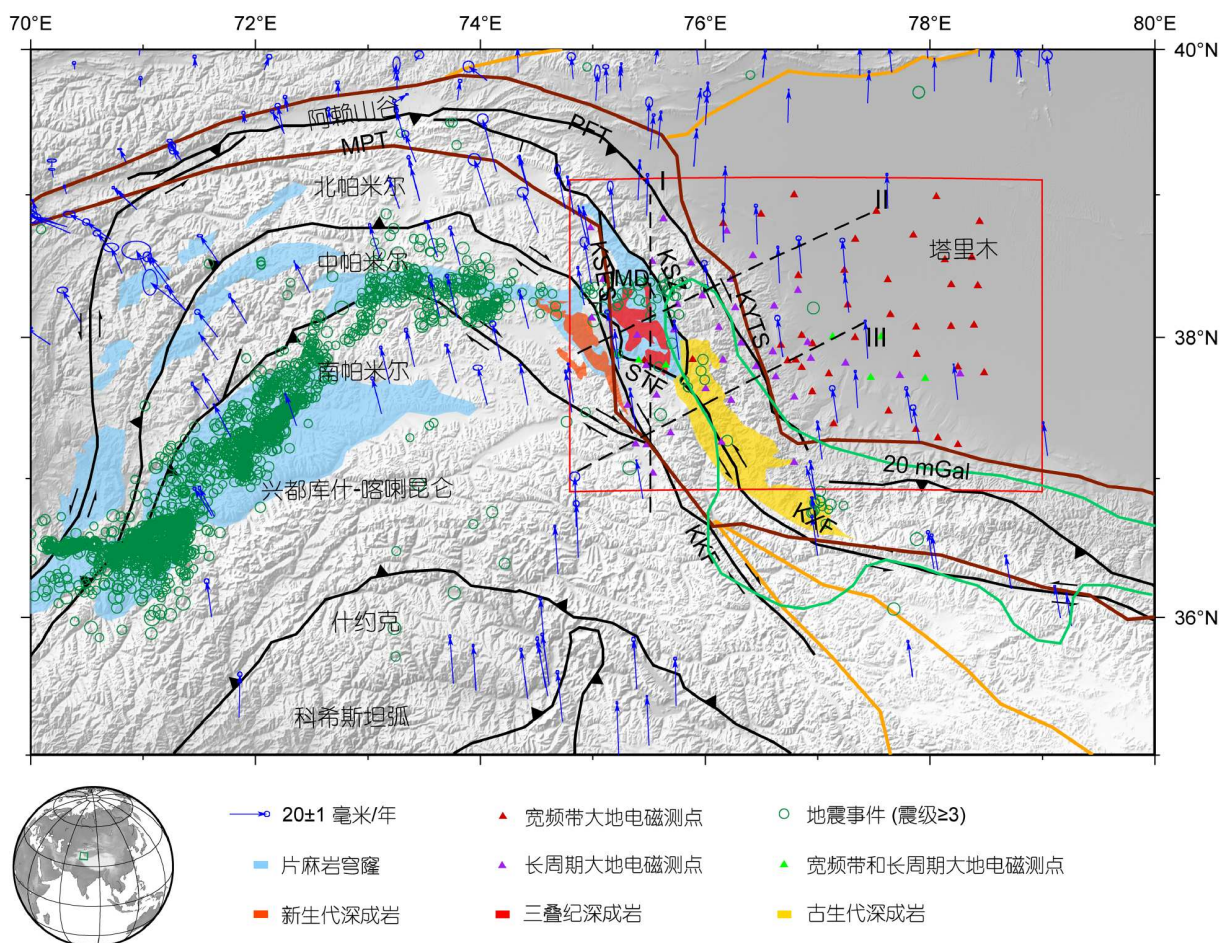


图1 研究区域概况。包含大地电磁测点、全球导航卫星系统(GNSS)速度场(Metzger等, 2020)、片麻岩穹隆(蓝色阴影区域)、花岗岩基底(Robinson等, 2007; Cowgill, 2010)、中源地震(深绿色圆圈; Kufner等, 2017; Bloch等, 2021)以及20 mGal正均衡重力异常(绿色粗实线; Balmino等, 2012)。橙色实线和砖红色实线分别表示活动构造块体和区域边界。红色矩形框出了研究区域。PFT, 帕米尔前缘逆冲断裂; MPT, 主帕米尔逆冲断裂; KYTS, 喀什-叶城转换系统; KKF, 喀喇昆仑断裂; KXF, 喀拉喀什断裂; KSZ, 库克剪切带; KSES, 公格尔山伸展系统; STF, 申提正断层; MD, 慕士塔格片麻岩穹隆

充材料), 从而得到了最终用于地质解释的电阻率模型(图2和3及附图S6)。阻抗和倾子的nRMS已降至2.0(附图S4)。反演结果的测试, 包括灵敏度和深度分辨率, 在补充材料中进行了描述。

3 结果与解释

3.1 岩石圈电性结构与高导异常成因

低阻体(C1–C3)在此定义为电阻率 $\leq 15 \Omega \text{ m}$ (理由见补充材料)的地质体。这些低阻体从上地壳延伸至中下地壳(图2)。位于塔里木西南区域上地壳的低阻体C4归因于沉积地层中的卤水富集(Sun等, 2016; Chen等, 2022; 图3B)。最终模型的深度切片图和剖面图显示, 低阻体C1–C3总体呈东西向分布(图2和图3)。具体而言, C1位于慕士塔格片麻岩穹隆下方, C2位于慕士塔格片麻岩穹

隆以南并向东延伸至昆仑地块。C3从中帕米尔向东延伸至昆仑地块, 向西延伸至南帕米尔(图2和图3)。根据反演的三维电阻率模型截取的剖面(图3)显示, C2和C3位于约17–18 km至48–52 km的深度, 大致对应约0.5–1.5 GPa的压力。

我们认为产生这些低阻异常的原因更可能是含水流体而非部分熔融, 因为东帕米尔的平均大地热流较低(图2A; Jiang等, 2019; Sun等, 2022), 不足以在地壳中引起大规模熔融。而含水流体可以从榴辉岩化反应中排出, 这种反应在增厚的下地壳中被认为是普遍的, 如亚平宁山脉北部的证据所揭示(Agostinetti等, 2011)。榴辉岩化反应是典型的进变质反应, 发生在下地壳增厚的条件下。深部岩浆热液流体可能是另一个来源。然而, 近~10 Ma以来东帕米尔没有岩浆活动的地质记录, 因此我们排除了这种可能性。来自地球内部长期脱气的流体也可能有

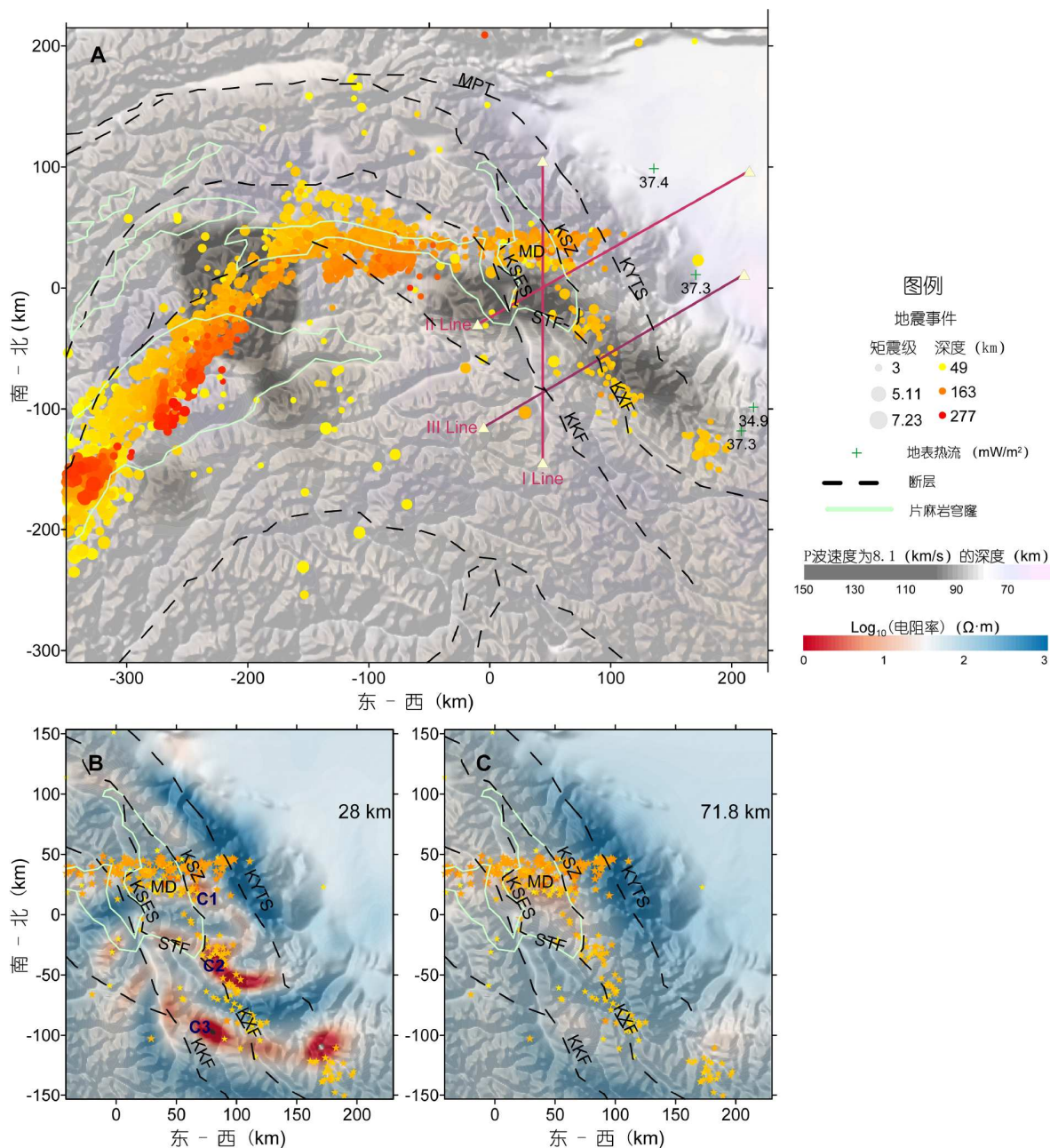


图2 中源地震(50–300 km, $M_w \geq 3$)与电阻率的分布图。(A) 岩石圈地幔低速带(LVZ)及图3中三个剖面的位置。(B) 28 km深度处的电阻率分布。(C) 71.8 km深度处的电阻率分布。岩石圈地幔中LVZ的最大值设为8.1 km/s。低阻体C1和C2对应于片麻岩穹隆(图1), 并显示出与KSES、STF和KSZ的某些相关性。低阻体C3与沿KKF走向分布的地堑对应

所贡献, 但其体积有限, 难以解释现今地壳内高导异常的大面积分布。碰撞造山带中的榴辉岩通常是在中等温度下由含石榴石的角闪岩形成的(Zhao, 2021)。释放的水可以与下地壳中的其他挥发分和溶质混合形成含水流体, 这些流体可以被脆韧性转换带捕获(Bailey, 1990)和/或被剪切带局部封闭(Agostinetti等, 2011; Jamtveit等, 2018)。

地壳中含水流体的电导率随溶质(如NaCl)浓度以及

压力和温度而变化。为了验证地壳内低阻体由不同体积含量的含水流体引起的合理性, 我们模拟了下地壳条件下典型含盐流体系统($H_2O+NaCl$)的电导率。假设NaCl浓度为5.0 wt%(Manning, 2018; 与全球海水平均值3.5 wt%相比, 该值可能为下限), 在对应于0.5和1.5 GPa的深度下, 该系统的电导率分别为28.18和48.98 S/m。前人的研究表明, 在350 °C时, 下地壳的孔隙度范围为0.5%–3%(Hyndman和Shearer, 1989)。假设流体分数为0.005(相当于地壳孔隙

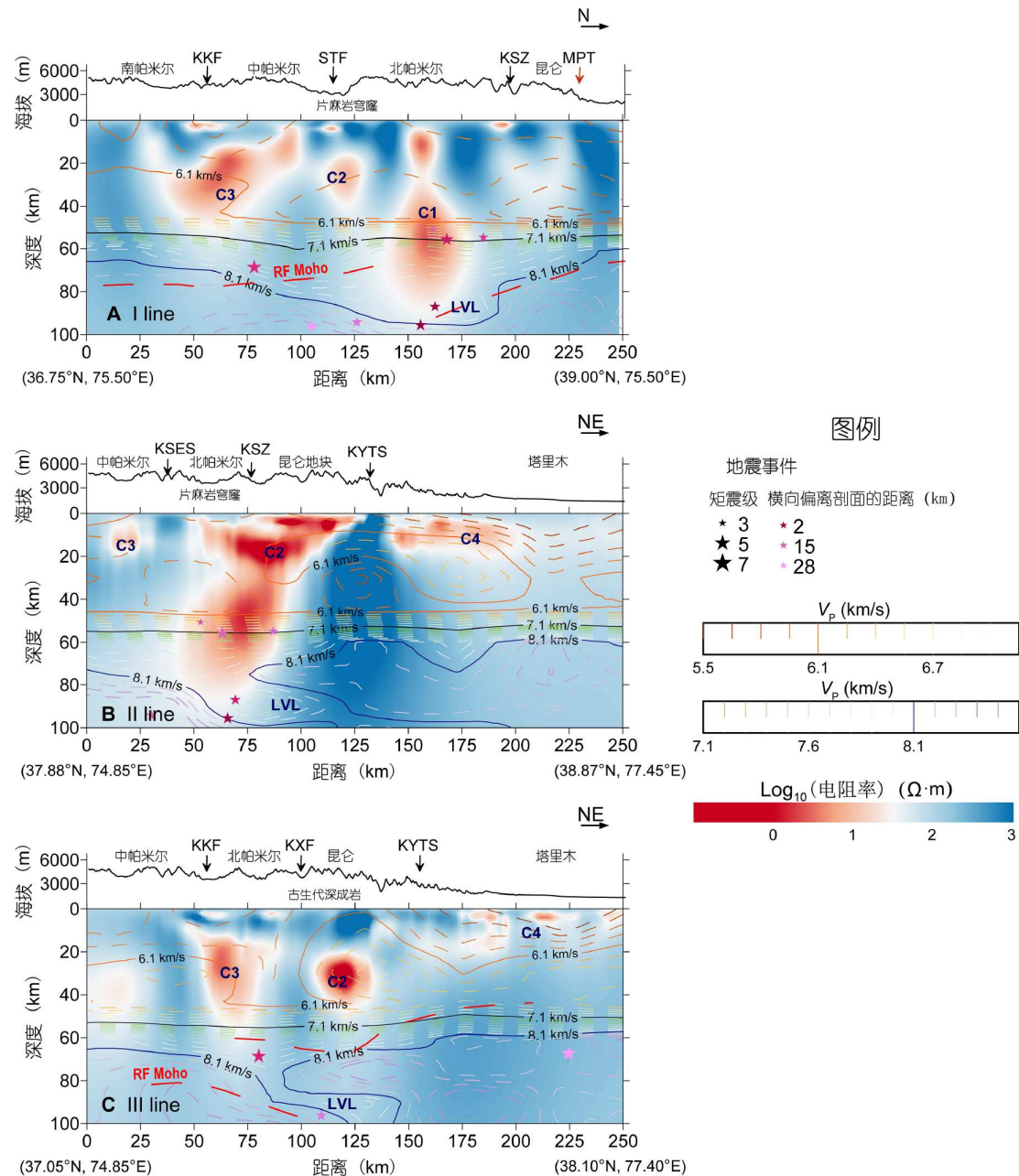


图3 东帕米尔地区综合地球物理剖面图。南北向(A)和东北-西南向(B、C)的电阻率(填色图)和P波速度(虚线和实线; Bloch等, 2021)剖面(图1、2C)。偏移量<30 km的中源地震震中深度投影在剖面上, 五角星大小与震级成正比, 填充的颜色表示震中横向偏移量的大小。红色虚线表示接收函数分析获得的莫霍面位置(Xu等, 2021)

度的下限)且岩石骨架电导率为0.001 S/m(反演模型的电阻率最小值), 我们计算了该流体-岩石系统的Hashin-Shtrikman(HS)电导率上下界(Hashin和Shtrikman, 1963):

$$HS^- = \sigma_s + f \cdot \left(\frac{1}{\sigma_f + \sigma_s} + \frac{1-f}{3\sigma_s} \right)^{-1}$$
$$HS^+ = \sigma_f + (1-f) \cdot \left(\frac{1}{\sigma_s + \sigma_f} + \frac{f}{3\sigma_f} \right)^{-1} \quad (1)$$

假设下地壳岩石含有0.5%(体积比)的5 wt% NaCl水溶液流体, 在0.5–1.5 GPa的压力和约300–700 °C的温度下, 下地壳内低阻体的电阻率分布在HS上下界之内。

我们注意到这些低阻体沿着断裂系统(KKF、KYTS、STF)从帕米尔下地壳上升到上地壳。沿KKF的地热泉中测得的³He/⁴He同位素数据提供了晚中新世至早上新世期间地幔流体通过该断裂运移的证据(Klemperer等, 2013)。然而, 三维电阻率分布与断裂或剪切带之间的空间关系

表明,不同断裂在流体运移中起着不同的作用。大多数断裂为流体运移提供通道,而少数或某些断层段落成为流体运移的屏障。例如,KSES在研究区域可能起着封闭流体的作用,KSES下方缺乏低阻异常证明了这一点(图3B)。

在东帕米尔(西昆仑地块)内部,KYTS与区域构造边界大致平行(图1),代表西昆仑-塔里木碰撞前缘的前锋线。如图2B所示,KYTS下方存在一个与走向连续平行的高阻异常。该特征随深度向西逐渐加宽,从地表延伸至下地壳(图3B)。这一结构与地震反射剖面 and 沉积学分析结果(Blayney等, 2019; Wang等, 2021)相似,支持塔里木地壳向西俯冲至西昆仑地块下方的假设。这种几何形态不支持帕米尔下地壳向东俯冲至塔里木克拉通岩石圈下方的假设(Li等, 2023; Xu等, 2021)。因为如果发生大规模大陆俯冲,很可能在俯冲板块界面上方产生低阻流体或熔体,随后通过断裂通道上升,正如藏南大地电磁数据所呈现的那样(Sheng等, 2023)。因此,如果帕米尔地壳向东俯冲至塔里木岩石圈之下,流体通道应随深度增加且向东倾斜。然而,如图3B和3C所示,C2与塔里木地壳表现出近乎垂直的构造接触(倾角 $>70^\circ$),表现为KYTS下方显著的高阻异常带($>1000 \Omega \cdot \text{m}$)。这种构造为晚新生代造山运动期间帕米尔和塔里木地块之间的垂直碰撞机制提供了令人信服的证据。

3.2 电性结构与地震波速度结构联合解释

如前所述,本研究旨在提供新证据以改进对地震资料的解释。P波速度模型来自Bloch等(2021)的结果。我们利用从实测数据校准的拟合公式,模拟了不同压力-温度条件下的中性麻粒岩(样品号HT1; Kern等, 1999)、基性麻粒岩(样品号HL9; Kern等, 1999)和榴辉岩(样品号D95-26; Kern等, 1999)的P波速度:在14–30 km深度,模拟的中性麻粒岩P波速度与观测值一致,但在30–47 km深度变大。该深度范围内速度的降低可归因于含水流体的存在。P波速度和电阻率的极小值在深度上不一致(根据图4B和4C的比较),这意味着其他因素(如片麻岩层)也可能导致P波速度显著降低,但对电阻率影响不大。在47–65 km深度,P波速度可以用中性麻粒岩、基性麻粒岩和榴辉岩的混合物来模拟,其中榴辉岩逐渐增加,麻粒岩逐渐减少。根据基于下地壳成分的P波速度分析(Hacker等, 2015),7.0–7.2 km/s的P波速度指示基性下地壳。因此,我们选择7.1 km/s的P波速度来定义基性下地壳以及由榴辉岩层产生的高速层(HVL)的下限。在65–85 km深度,尽管该层已完全榴辉岩化,但推测由于研究区在活跃造山背景下经历的强烈剪切变形,榴辉岩仍表现出低于观测值的P波速度。在85–95 km深度,模拟的P波速度降低至完全榴辉化岩层的速度。虽然这些速度(~ 7.9 –8.1 km/s)对于地壳岩石来说很高,但低于周围的地

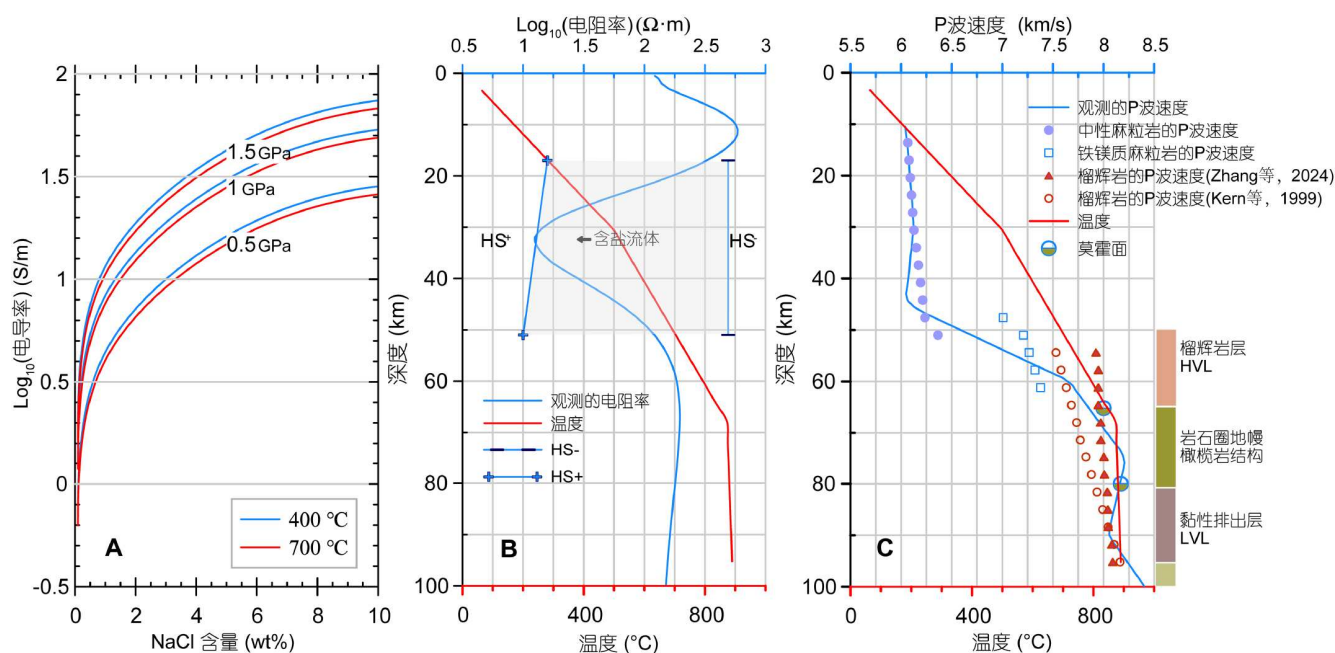


图4 地壳内低阻体成因及下地壳和上地幔HVL/LVL的解释。(A) 不同温压条件下的含水流体电导率。计算基于Sinmyo和Keppeler(2017)的方法。(B) 提取自图3C中100 km距离处的观测电阻率(蓝色实线)和通过计算HS界估算的电阻率范围(阴影区域)。(C) 从(A)中相同的电阻率模型位置提取的观测到的P波速度(蓝色实线)

幔橄榄岩(>8.1–8.2 km/s), 从而形成相对低速层(LVL)。测量的榴辉岩样品P波速度显示出很大的范围。例如, Wang等(2005a)和Zhao等(2011)报道了1 GPa下超高压榴辉岩的P波速度值为7.5–8.4 km/s; Zertani等(2019)将其测量的榴辉岩速度外推至2 GPa和600 °C, 得出范围为7.97–8.2 km/s, 平均值为8.06 km/s。在相同条件下, Perple-X模拟给出的范围为7.71–8.17 km/s, 平均值为8.01 km/s(Zertani等, 2019)。

事实上, 考虑到温度和压力对P波速度的影响呈相反趋势(Kern等, 1999; Wang等, 2005b, 2009), Wang等(2005a)和Zhao等(2011)在2–3 GPa的外推值与Zertani等(2019)报道的P波速度上限相当。重要的是, 榴辉岩的P波速度同时受温度、压力和成分控制。迄今为止, 无论是实验数据还是理论模型都未能证明这三个因素对速度的影响可以解耦。因此, 鉴于以往研究中报道的P波速度对温度、压力或石榴石体积分数的单变量导数存在巨大差异, 目前尚不清楚哪个研究组的结果最合适。然而, 考虑到造山带中的榴辉岩通常具有较高的绿辉石含量, 实验数据的统计结果和理论计算(Anderson, 2006; Zertani等, 2019)均表明榴辉岩的平均P波速度低于上地幔橄榄岩。

最近, Zhang等(2024)利用超声干涉法测量了三种榴辉岩成分(Omp100、Omp80Grt20和Omp50Grt50)在0–8 GPa压力范围内的P波速度。通过将速度数据作为压力 P (GPa)、石榴石体积分数 X (vol.%)和温度 T (K)的函数进行线性拟合, 他们得出: $V_p = 8.17 + 0.091 \times P + 0.0049 \times X - 3.20 \times 10^{-4} \times T$ ($R^2 = 0.999$) ($V_s = 4.76 + 0.029 \times P + 0.0024 \times X - 2.68 \times 10^{-4} \times T$ ($R^2 = 0.999$))。该式表明, 在恒定温度和压力下, 石榴石体积分数的变化($X = 0$ –100 vol.%)将导致高达~490 m/s的P波速度变化。在本研究中, 我们认为在帕米尔下地壳和上地幔中的榴辉岩主要是富绿辉石的, 而不是富石榴石的。东帕米尔的中源地震大多发生在~90 km深度以下(图2A)。基于这些地震是由榴辉岩化触发的假设, 结合Rogowitz等(2023)的数值模拟结果, 90 km深度处约25 vol.%的石榴石体积分数是一个合理的估计。据此, 我们应用Zhang等(2024)的速度校准来计算Omp(50+x)Grt(50-x)的P波速度对压力-温度的依赖性, 其中 x 从50 km深度的50($X = 0$ vol.%)减少到90 km深度的25($X = 25$ vol.%) (见图4)。显然, 这种情况与我们上面的解释保持一致。因此我们认为, 这一层反映了榴辉岩穿过岩石圈地幔的黏性排出机制。

4 讨论

通过比较东帕米尔地区的三维电阻率和P波速度, 我

们揭示了两个主要特征。首先, 如I–III线剖面(图3)所示, 低阻体均位于地壳内且位于LVL之上。LVL分布平行于帕米尔高原的主要构造边界, 形成一个向北突出的弓形, 并随深度向下倾斜突出。这此前被归因于大陆俯冲的遗迹(Sobel等, 2013; Kufner等, 2017)或增厚下地壳的拆沉(Li等, 2023; Xu等, 2021)。其次, 中源地震的震中并不主要与50–70 km深度的地壳HVL重合, 而是通常沿着更深处LVL下行路径分布(Bloch等, 2021)。LVL对应于一个相对低阻带, 该带在空间上与上覆的地壳内低阻体相连(图3), 反映了向深部衰减但持续的榴辉岩化反应释放的含水流体的上升路径。注意, 我们使用低阻体来表征电阻率低于15 Ω m的地质体, 但使用相对低阻带表示同一深度处电阻率相对较低的区域。

东帕米尔地区表现出以岩石圈东西向伸展和地形隆升为特征的变形, 并伴有片麻岩穹隆折返。三维电阻率模型显示低阻体(C1–C3)呈近东西向分布, 支持东西向伸展机制(附图S9)。然而, 我们的电阻率数据并未揭示大规模低阻体, 而是在岩石圈地幔中显示近垂直的相对低阻带, 这与SL2013sv模型(Schaeffer和Lebedev, 2013)揭示的该区域为厚地壳和厚岩石圈(>150 km)相吻合。这一观测结果令人费解, 因为穹隆状岩石圈通常被认为是由伸展驱动并伴随软流圈上涌, 从而使地壳和岩石圈地幔变薄。相反, 上述观测结果符合Lee等(2011)关于榴辉岩从岩石圈黏性排出的预测。

支持榴辉岩层岩石圈黏性排出的几个关键观测结果。

(1)推测的榴辉岩层的电阻率(22.63–226 Ω m; 附图S10)与70 mW/m²热流下含中等水量的绿辉石相匹配(Zhang等, 2019; Sun等, 2022), 与造山带背景一致。榴辉岩层内的大多数电阻率值在57–90 Ω m的范围内, 高于之前定义的低阻体的上限(15 Ω m)(见补充材料)。

(2)低P波速度结构对应于榴辉岩层(图3B)。虽然纯榴辉岩预期具有高速度(Anderson, 2006), 但天然样品通常含有10–35 vol.%的低速矿物, 如蓝晶石、石英/柯石英和多硅白云母, 显著降低了P波速度(Zertani等, 2019)。这也解释了接收函数极性变化, 并证实了Schneider等(2013)的发现。此外, 这些含水相(如多硅白云母)的分解支持榴辉岩脱水脆化作为沿排出路径发生中源地震的触发因素。

(3)东帕米尔的中源地震并不与榴辉岩化的深度相对应, 而是沿榴辉岩排出的路径产生, 表明榴辉岩发生了脱水脆化。虽然水合矿物对此过程至关重要, 但我们认为中源地震源于相对干燥的榴辉岩的流变学性质的转变(见下文的进一步解释)。

(4)黏性排出的速度(Wang等, 2022)与该地区自约

10 Ma以来火山活动的沉寂相匹配(Li等, 2023)。

(5) 高密度榴辉岩层产生向下的拖曳力, 与低密度地幔橄榄岩形成对比。具体而言, 即使在该深度含有中等石榴石含量(~25%), 榴辉岩密度(~3.45 g/cm³)也超过周围地幔的密度(~3.30 g/cm³), 这提供了足够的负浮力(Anderson, 2006)。向东排出的力主要源于两个关键机制: 帕米尔下方榴辉岩化下地壳的高密度产生的负浮力, 驱动下地壳物质向下运动; 与西帕米尔陡峭的俯冲几何形状相比, 推动帕米尔地壳向东运动的主导水平力源于印度板块在亚洲板块下方的平板俯冲。这种俯冲形态在帕米尔下地壳底部施加了一个主要的向东指向的水平分力(Kelly和Beaumont, 2021)。该力在东帕米尔指向东, 导致地壳逆时针旋转, 这与GPS观测一致(Zubovich等, 2016; 图3B)。

综上所述, 电阻率和速度数据的结合, 以及榴辉岩层的分布和中源地震的特征, 支持东帕米尔正在经历来自岩石圈的榴辉岩黏性排出, 而不是简单的岩石圈拆沉的解释。

如前所述, 我们认为榴辉岩的黏性排出机制是解释东帕米尔地球物理结构的更好方案(图5)。然而, 评估岩石圈地幔内榴辉岩是否具有比橄榄岩更低的黏度至关重要。高压/高温实验(Jin等, 2001)表明, 富石榴石榴辉岩

的强度略高于亏损地幔橄榄岩。值得注意的是, 在东帕米尔样品中普遍存在的以绿辉石为主的榴辉岩(Hacker等, 2015; Li等, 2023), 表现出类似于绿辉石的强度, 比橄榄岩有更高的应变速率(Zhang和Green, 2007)。这些流变性质加强了黏性排出假说。

关于中源地震, 最近的研究表明榴辉岩可以在深部产生脆性破裂(Shi等, 2018; Yamato等, 2022), 主要控制因素是榴辉岩中石榴石的相对体积(Rogowitz等, 2023)。通常, 石榴石丰度随深度增加而增加, 而绿辉石减少。Rogowitz等(2023)的实验和模拟强调了基于石榴石-绿辉石比例的流变多样性。在1000 °C和2.5 GPa下, 随着石榴石含量的增加, 榴辉岩从晶体塑性形变转变为脆性形变(Rogowitz等, 2023)。重要的是, 虽然石榴石在体积上可能不占主导地位(例如, 90 km处~25 vol.%), 但岩石的整体流变学变得由石榴石主导, 因为石榴石强度比绿辉石高得多(Zhang和Green, 2007)。此外, 在深度大于100 km时(对应于图5A中的阶段Ⅲ), 压力超过3.0 GPa。热力学模拟和岩石学证据表明, 绿辉石进一步分解或反应形成石榴石和高压硅相(如柯石英或斯石英), 导致石榴石体积分数显著增加(Xu等, 2019; Ye等, 2022)。因此, 榴辉岩流变学变得完全由石榴石主导后, 限制了黏性排出并触发向滴落和脱水脆化的转变。东帕

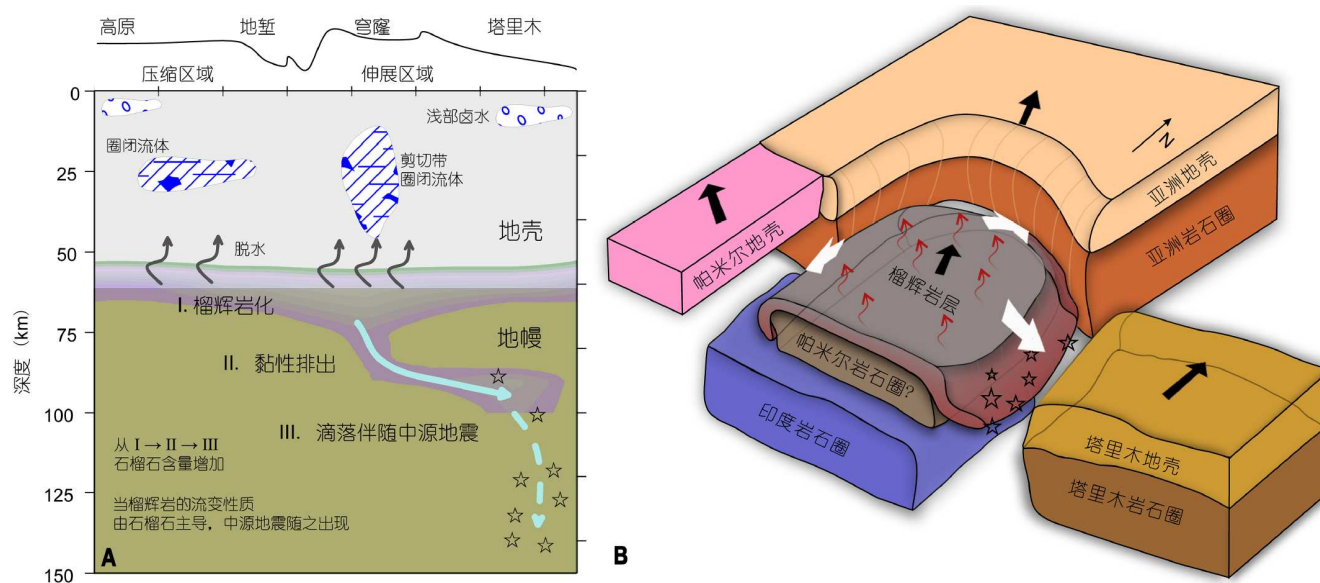


图5 东帕米尔当前深部过程的概念模型。(A) 东西向剖面。大陆碰撞增厚下地壳中的榴辉岩可视为经过脱水过程的中温榴辉岩(Zhao, 2021), 导致榴辉岩化层的强度显著降低(Jin等, 2001; Rogowitz等, 2023)。释放的水可以与下地壳中的其他挥发分和溶质混合形成含水流体, 这些流体可以被脆韧性转换带捕获(Bailey, 1990)和/或被剪切带局部封闭(Agostinetti等, 2011; Jamtveit等, 2018)。浅层卤水代表储存在断层和孔隙中的地下水。实心浅蓝色箭头指示榴辉岩化层从增厚下地壳底部黏性排出的路径。虚线箭头指示未来黏性排出的预期流动路径, 这是由坚硬的塔里木克拉通岩石圈地幔的阻挡引起的。(B) 帕米尔高原复杂三维岩石圈结构的卡通图。构成该结构的各种地质单元在岩石圈层内以不同颜色区分。白色箭头追踪黏性排出的定向流动(见正文), 而黑色箭头代表GPS测量捕捉到的水平速度(Metzger等, 2020), 有助于全面理解动力学过程。图中的星形符号代表中源地震

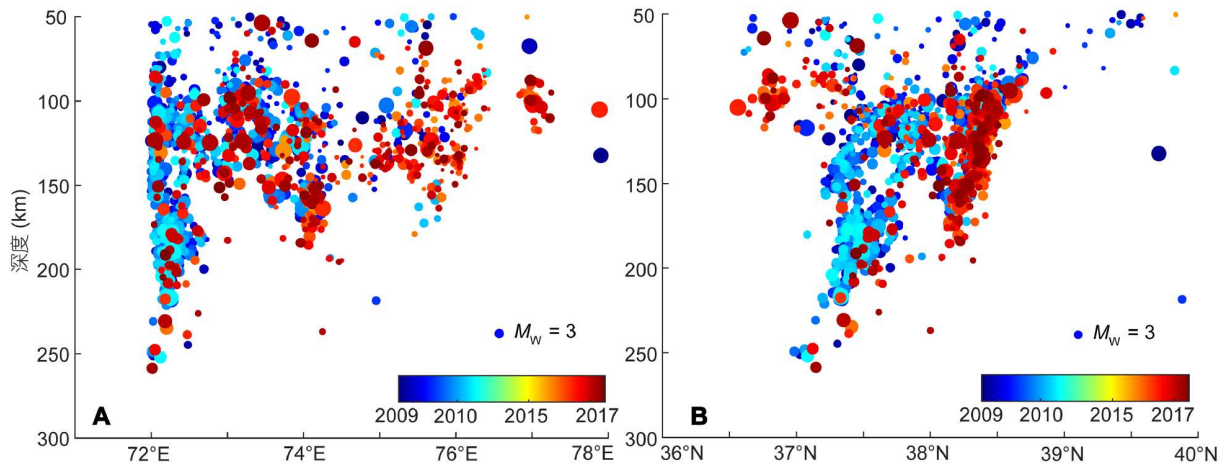


图6 帕米尔高原中源地震中的时空分布。(A) 2009–2017年沿经度方向的中源地震时空分布；(B) 2009–2017年沿纬度方向的中源地震时空分布。数据来自Bloch等(2021)。圆圈大小与地震震级成正比，填充颜色表示时间变化

米尔中源地震震源的分布证实了这一流变学特征(图6)。反常的是,除东帕米尔外,强震级中源地震主要局限在低速带(图1和2A),于是我们提出假设,中源地震的分布反映了东帕米尔的榴辉岩黏性排出处于初始阶段。相反,西南帕米尔等其他地区的榴辉岩已下行到更深处或完成了榴辉岩流变性质的转变(即已发生滴落),导致了更高的中源地震频率和更深的震源(图6)。

榴辉岩层的拆沉和黏性排出具有截然不同的后果。拆沉对于岩石圈减薄和破坏至关重要,涉及榴辉岩层的完全移除,破坏岩石圈地幔的结构完整性。然而,黏性排出是榴辉岩的渐进式部分移除,导致岩浆活动减弱并保留橄榄岩岩石圈地幔(Wang和Xu, 2024)。这种区别强调了在不同构造背景下对这些过程进行细致理解的必要性。

本研究提出了一个大胆的假设,即黏性排出在造山带内的岩石圈稳定或克拉通化中起着关键作用。具体而言,如果下地壳拆沉将榴辉岩层从岩石圈中完全清除,可能会促使造山带(重新)活化。相反,如果榴辉岩层通过黏性排出逐渐被清除,造山带将逐渐演变为更稳定的结构。在很大程度上,中亚造山带提供了这种复杂地质动力学的现代例证(McKenzie和Priestley, 2008)。因此,榴辉岩黏性排出在板块构造更广泛背景下的重要性值得更多的认识和强调,因为它突出了塑造地球不断演化的岩石圈结构的基本过程。

对莫霍面深度和地震活动分布的比较分析揭示,帕米尔-西昆仑地区和藏南喜马拉雅下方的下地壳内均广泛存在榴辉岩化(Song和Klemperer, 2024)。这些地区莫霍面过渡带内的地震活动分布为榴辉岩化物质的拆沉或滴落提供了证据。我们意识到西藏南部和东帕米尔下方榴

辉岩滴落过程之间存在显著相似性。然而,一个关键区别在于西藏南部观测到的地表热流显著更高(Tang等, 2022)。这种升高的热状态可能导致中上地壳内产生部分熔体,而不是像东帕米尔推断的那样产生含水流体。此外,西藏南部下方的电阻率结构与东帕米尔成像的结构表现出惊人的相似性(Sheng等, 2023)。这两个地区都以发育上地壳片麻岩穹隆为特征,穹隆南北两侧下方均有中地壳高导异常。因此,我们提出的东帕米尔地球动力学模型,可能为西藏南部观测到的促进部分熔融的潜在流体来源提供了补充约束。

5 结论

基于东帕米尔86个测点的大地电磁数据的三维反演,我们构建了该区域整体电阻率结构。结合现有的地震P波速度模型和中源地震分布,为东帕米尔榴辉岩化下地壳的黏性排出——一种此前被推测但未被证实的机制提供了首个观测证据。电阻率模型揭示了增厚地壳内的导电特征,中地壳低阻体是下地壳榴辉岩化反应中产生的含水流体向上输运被局部圈闭的结果。这些特征与榴辉岩的流变行为和岩石物理性质一致,有效地约束了正在进行的造山过程背后的地球动力学演化机制。

重要的是,我们的联合解释确定了榴辉岩化下地壳移除过程中存在深度的转变。在浅部深度(70–100 km),榴辉岩主要由绿辉石组成,该过程表现为黏性排出。然而,随着深度增加超过100 km,石榴石含量的增加提高了密度并导致岩石硬化,促进了榴辉岩从塑性变形到脆性变形的转变。由于石榴石含量增加引起的流变学特征转变,主导机制从倾斜的黏性排出转变为垂直滴落。这一深部过程在空间上与大量中源地震相关。高密度榴辉

岩层施加向下的牵引力，特别是在深部岩石圈地幔中。这种力结合不同深度的独特流变行为，驱动帕米尔高原地壳逆时针旋转，这与GPS观测一致。此外，与下地壳快速拆沉相反，榴辉岩的渐进和部分移除导致岩浆活动减少并保留岩石圈地幔的橄榄岩框架。

我们的发现突出了榴辉岩黏度在造山带演化中的关键作用。与快速拆沉相比，渐进的黏性排出可能代表了活动造山带实现岩石圈稳定甚至克拉通化的一种路径。东帕米尔黏性排出的启动代表了大陆碰撞造山带动力学和其长期演化的关键一步。未来的研究应侧重于在其他造山背景下进一步验证这一机制，并探索其对板块构造和全球物质循环的更广泛意义。本文见解强调了地球的岩石圈结构不断演化的基本过程，并为活动造山系统中地壳与地幔之间的复杂相互作用提供了新的视角。

致谢 本研究受益于与王振胜博士(中国地质大学, 武汉)的交流, 三位匿名审稿人和责任编辑提出了宝贵意见和建议, 多位老师和学生参与了野外数据采集。Helmholtz Centre Potsdam – German Research Centre for Geosciences (GFZ)的同行们在该地区进行了广泛而开创性的研究, 并分享了他们的数据和成果, 在此一并致谢。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责, 详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

参考文献

- 李玮, 陈赓, 谭萍, 等. 2020. 大陆深俯冲的深浅动力学响应: 来自帕米尔高原地壳精细结构的约束. *中国科学: 地球科学*, 50: 663–676
- Agostinetti N P, Bianchi I, Amato A, et al. 2011. Fluid migration in continental subduction: The Northern Apennines case study. *Earth Planet Sci Lett*, 302: 267–278
- Anderson D L. 2006. Speculations on the nature and cause of mantle heterogeneity. *Tectonophysics*, 416: 7–22
- Bailey R C. 1990. Trapping of aqueous fluids in the deep crust. *Geophys Res Lett*, 17: 1129–1132
- Balmino G, Vales N, Bonvalot S, et al. 2012. Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies. *J Geod*, 86: 499–520
- Blayney T, Dupont-Nivet G, Najman Y, et al. 2019. Tectonic evolution of the Pamir recorded in the western Tarim Basin (China): Sedimentologic and magnetostratigraphic analyses of the Aertashi section. *Tectonics*, 38: 492–515
- Bloch W, Schurr B, Yuan X, et al. 2021. Structure and stress field of the lithosphere between Pamir and Tarim. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL095413
- Borah U K, Patro P K. 2019. Estimation of the depth of investigation in the magnetotelluric method from the phase. *Geophysics*, 84: E377–E385
- Cai Z, Xu Z, Cao H, et al. 2017. Miocene exhumation of northeast Pamir: Deformation and geo/thermochronological evidence from western Muztaghata shear zone and Kuke ductile shear zone. *J Struct Geol*, 102: 130–146
- Campanyà J, Ogaya X, Jones A G, et al. 2016. The advantages of complementing MT profiles in 3-D environments with geomagnetic transfer function and interstation horizontal magnetic transfer function data: Results from a synthetic case study. *Geophys J Int*, 207: 1818–1836
- Chen Z, Yang Y, Dong C, et al. 2022. Genesis of Cambrian dolomites in the Bachu area, Tarim Basin, NW China: Constraints from petrology, geochemistry, and fluid inclusions. *Minerals*, 12: 1157
- Cowgill E. 2010. Cenozoic right-slip faulting along the eastern margin of the Pamir salient, northwestern China. *Geol Soc Am Bull*, 122: 145–161
- Egbert G D, Booker J R. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. *Geophys J Int*, 87: 173–194
- Egbert G D, Kelbert A. 2012. Computational recipes for electromagnetic inverse problems. *Geophys J Int*, 189: 251–267
- Hacker B R, Kelemen P B, Behn M D. 2015. Continental lower crust. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 43: 167–205
- Hashin Z, Shtrikman S. 1963. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *J Mech Phys Solids*, 11: 127–140
- Hyndman R D, Shearer P M. 1989. Water in the lower continental crust: Modelling magnetotelluric and seismic reflection results. *Geophys J Int*, 98: 343–365
- Jamtveit B, Ben-Zion Y, Renard F, et al. 2018. Earthquake-induced transformation of the lower crust. *Nature*, 556: 487–491
- Jiang W, Korsch R J, Doublier M P, et al. 2019. Mapping deep electrical conductivity structure in the Mount Isa region, Northern Australia: Implications for mineral prospectivity. *J Geophys Res-Solid Earth*, 124: 10655–10671
- Jin Z M, Zhang J, Green II H W, et al. 2001. Eclogite rheology: Implications for subducted lithosphere. *Geology*, 29: 667–670
- Kelbert A, Meqbel N, Egbert G D, et al. 2014. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. *Comput Geosci*, 66: 40–53
- Kelly S, Beaumont C. 2021. Balanced cross-sections and numerical modeling of the lithospheric-scale evolution of the Hindu Kush and Pamir. *J Geophys Res-Solid Earth*, 126: e2020JB020678
- Kern H, Gao S, Jin Z, et al. 1999. Petrophysical studies on rocks from the Dabie ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, Central China: Implications for the composition and delamination of the lower crust. *Tectonophysics*, 301: 191–215
- Klemperer S L, Kennedy B M, Sastry S R, et al. 2013. Mantle fluids in the Karakoram fault: Helium isotope evidence. *Earth Planet Sci Lett*, 366: 59–70
- Krystopowicz N J, Currie C A. 2013. Crustal eclogitization and lithosphere delamination in orogens. *Earth Planet Sci Lett*, 361: 195–207
- Kufner S K, Schurr B, Haberland C, et al. 2017. Zooming into the Hindu Kush slab break-off: A rare glimpse on the terminal stage of subduction. *Earth Planet Sci Lett*, 461: 127–140
- Lee C T A, Luffi P, Chin E J. 2011. Building and destroying continental mantle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 39: 59–90
- Li Y P, Ding L, Robinson A C, et al. 2023. Was cratonic Asia deeply subducted beneath the Pamir? Evidence from P-T conditions and tectonic affinities of Cenozoic Pamir crustal xenoliths. *J Metamorph Geol*, 41: 925–965
- Liu S, Xu Y, Yang B, et al. 2024. Footprints of continental amalgamation from three-dimensional resistivity structure: Insights from the Tianshan and surrounding basins, China. *Tectonophysics*, 874: 230234
- Manning C E. 2018. Fluids of the lower crust: Deep is different. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 46: 67–97
- McKenzie D, Priestley K. 2008. The influence of lithospheric thickness variations on continental evolution. *Lithos*, 102: 1–11
- Metzger S, Ischuk A, Deng Z, et al. 2020. Dense GNSS profiles across the

- northwestern tip of the India-Asia collision zone: Triggered slip and westward flow of the Peter the First Range, Pamir, into the Tajik depression. *Tectonics*, 39: e2019TC005797
- Robinson A C, Yin A, Manning C E, et al. 2007. Cenozoic evolution of the eastern Pamir: Implications for strain-accommodation mechanisms at the western end of the Himalayan-Tibetan orogen. *Geol Soc Am Bull*, 119: 882–896
- Rogowitz A, Thielmann M, Kraus K, et al. 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
- Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. *Rev Geophys*, 33: 267–309
- Schaeffer A J, Lebedev S. 2013. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone. *Geophys J Int*, 194: 417–449
- Schmidt J, Hacker B R, Ratschbacher L, et al. 2011. Cenozoic deep crust in the Pamir. *Earth Planet Sci Lett*, 312: 411–421
- Schneider F M, Yuan X, Schurr B, et al. 2013. Seismic imaging of subducting continental lower crust beneath the Pamir. *Earth Planet Sci Lett*, 375: 101–112
- Schneider F M, Yuan X, Schurr B, et al. 2019. The crust in the Pamir: Insights from receiver functions. *J Geophys Res-Solid Earth*, 124: 9313–9331
- Sheng Y, Jin S, Comeau M J, et al. 2023. Relationship between the migration of crustal material, normal faulting, and gneiss domes in the vicinity of the Dinggye region, central part of the Tethys-Himalaya terrane: Insights from the 3-D electrical structure. *Tectonophysics*, 869: 230100
- Shi F, Wang Y, Yu T, et al. 2018. Lower-crustal earthquakes in southern Tibet are linked to eclogitization of dry metastable granulite. *Nat Commun*, 9: 3483
- Sinmyo R, Keppler H. 2017. Electrical conductivity of NaCl-bearing aqueous fluids to 600 °C and 1 GPa. *Contrib Miner Petrol*, 172: 4
- Sippl C, Schurr B, Yuan X, et al. 2013. Geometry of the Pamir-Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 1438–1457
- Siripunvaraporn W, Egbert G. 2009. WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. *Phys Earth Planet Inter*, 173: 317–329
- Sobel E R, Chen J, Schoenbohm L M, et al. 2013. Oceanic-style subduction controls late Cenozoic deformation of the Northern Pamir orogen. *Earth Planet Sci Lett*, 363: 204–218
- Sobel E R, Schoenbohm L M, Chen J, et al. 2011. Late Miocene-Pliocene deceleration of dextral slip between Pamir and Tarim: Implications for Pamir orogenesis. *Earth Planet Sci Lett*, 304: 369–378
- Song X, Klemperer S L. 2024. Numerous Tibetan lower-crustal and upper-mantle earthquakes, detected by Sn/Lg ratios, suggest crustal delamination or drip tectonics. *Earth Planet Sci Lett*, 626: 118555
- Sun J, Windley B F, Zhang Z, et al. 2016. Diachronous seawater retreat from the southwestern margin of the Tarim Basin in the late Eocene. *J Asian Earth Sci*, 116: 222–231
- Sun Y, Dong S, Wang X, et al. 2022. Three-dimensional thermal structure of East Asian continental lithosphere. *J Geophys Res-Solid Earth*, 127: e2021JB023432
- Tang G, Wyman D A, Wang Q, et al. 2022. Long-distance lateral magma propagation and Pamir Plateau uplift. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL096467
- Wang Q, Burlini L, Mainprice D, et al. 2009. Geochemistry, petrofabrics and seismic properties of eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling boreholes in the Sulu UHP terrane, eastern China. *Tectonophysics*, 475: 251–266
- Wang Q, Ji S, Salisbury M H, et al. 2005a. Pressure dependence and anisotropy of P-wave velocities in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt (China): Implications for seismic properties of subducted slabs and origin of mantle reflections. *Tectonophysics*, 398: 67–99
- Wang Q, Ji S, Salisbury M H, et al. 2005b. Shear wave properties and Poisson's ratios of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogenic belt, China: Implications for crustal composition. *J Geophys Res*, 110: 2004JB003435
- Wang S, Chen Y, Charreau J, et al. 2021. Underthrusting of the Tarim lithosphere beneath the western Kunlun range, insights from seismic profiling evidence. *Tectonics*, 40: e2019TC005932
- 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
- Wang Z, Xu Y. 2024. The fate of eclogites in the lithosphere. *Sci China Earth Sci*, 67: 879–884
- Xu J, Zhang D, Fan D, et al. 2019. Thermoelastic properties of eclogitic garnets and omphacites: Implications for deep subduction of oceanic crust and density anomalies in the upper mantle. *Geophys Res Lett*, 46: 179–188
- Xu Q, Zhao J, Yuan X, et al. 2021. Deep crustal contact between the Pamir and Tarim Basin deduced from receiver functions. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL093271
- Yamato P, Duretz T, Baïssat M, et al. 2022. Reaction-induced volume change triggers brittle failure at eclogite facies conditions. *Earth Planet Sci Lett*, 584: 117520
- Ye Z, Fan D, Li B, et al. 2022. Thermal equation of state of the main minerals of eclogite: Constraining the density evolution of eclogite during the delamination process in Tibet. *Solid Earth*, 13: 745–759
- Zertani S, John T, Tilmann F, et al. 2019. Modification of the seismic properties of subducting continental crust by eclogitization and deformation processes. *J Geophys Res-Solid Earth*, 124: 9731–9754
- Zhang B, Zhao C, Ge J, et al. 2019. Electrical conductivity of omphacite as a function of water content and implications for high conductivity anomalies in the Dabie-Sulu UHPM belts and Tibet. *J Geophys Res-Solid Earth*, 124: 12523–12536
- 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
- Zhang R, Wang D, Cai N, et al. 2024. Sound velocity of eclogite at high pressures and implications for detecting eclogitization in subduction zones. *Geol Soc Am Bull*, 136: 2019–2028
- Zhao G. 2021. Metamorphism of Mafic Rocks. In: Encyclopedia of Geology. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. 457–464
- Zhao J, Yuan X, Liu H, et al. 2010. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet. *Proc Natl Acad Sci USA*, 107: 11229–11233
- Zhao Z, Niu Y, Christensen N I, et al. 2011. Delamination and ultra-deep subduction of continental crust: Constraints from elastic wave velocity and density measurement in ultrahigh-pressure metamorphic rocks. *J Metamorph Geol*, 29: 781–801
- Zubovich A, Schöne T, Metzger S, et al. 2016. Tectonic interaction between the Pamir and Tien Shan observed by GPS. *Tectonics*, 35: 283–292

(责任编辑: 陈凌)