



大陆转换断层的结构与变形特征

冯吉坤^{1,2,3*}, 姚华建^{1,2,3*}, 董云鹏⁴, 李阳¹

1. 精密大地测量与定位全国重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

2. 中国科学技术大学蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 蒙城 233500

3. 安徽省地下结构探测与震灾风险防范重点实验室, 合肥 230031

4. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

* 通讯作者, E-mail: hjyao@ustc.edu.cn (姚华建), jkfeng@mail.ustc.edu.cn (冯吉坤)

收稿日期: 2025-01-28; 收修改稿日期: 2025-10-09; 接受日期: 2025-11-04; 网络版发表日期: 2025-11-12

国家重点研发计划项目(2022YFC3003701)和国家自然科学基金面上基金项目(42274061)资助

摘要 转换断层是板块构造理论三种主要板块边界形式之一, 是板块构造理论的重要组成部分. 根据分割板块性质不同可以分为大洋转换断层和大陆转换断层, 由于大陆岩石圈与大洋岩石圈的性质存在巨大的差异, 相对于大洋转换断层, 大陆转换断层结构更加复杂. 大陆转换断层是应力和应变高度集中的大陆板块走滑边界, 一般延展几百到上千千米, 经历了几十到几百千米的走滑运动. 大陆转换断层表现为一条主断层或者有多条分支断层构造的复杂断裂系统, 深部结构和不同深度变形模式是认识大陆岩石圈结构和流变特征的重要窗口. 采用地球物理方法获取大陆转换断层精细结构是研究其性质和演化的重要基础, 地震各向异性结果是约束大陆转换断层深部构造变形特征的重要手段. 本文将重点回顾典型大陆转换断层区域开展的地球物理研究结果, 并结合地质和大地测量等多学科观测探讨大陆转换断层深部结构和变形机制. 虽然大陆转换断层结构复杂多样, 依然能够得出一些规律: (1) 几乎所有大陆转换断层都切穿整个地壳并延伸到上地幔, 在断裂带范围内能够观测到显著的地震各向异性; (2) 无论大陆转换断层表现为狭窄单一主断层或多条分支断层组成的断裂系统, 单一断层在上地壳都表现为一条狭窄的应变集中带, 以脆性摩擦吸收走滑位移, 是主要的地震发生区域, 随深度增加剪切带变宽, 在岩石圈地幔深度能够达到几十千米; (3) 大陆转换断层的宽度与其切穿大陆岩石圈的性质有关, 切穿坚硬而古老的大陆岩石圈时转换断层往往是一条窄的剪切应变带, 反之, 表现为一条较宽的分布式剪切变形带; (4) 大陆走滑断层的非走滑分量(挤压或拉张分量)对断裂带结构复杂性起到重要控制作用. 随着近年来大洋勘探计划的实施, 科学界对大洋转换断层的结构和构造演化过程有了很多新认识. 但是目前对大陆转换断层的结构和演化认识仍然非常不足. 随着新的地震学观测和成像技术发展, 将为获得大陆转换断层更高空间分辨率和时间分辨率结构特征提供新机遇, 为研究转换断层的发展行为和地震迁移特征提供新约束.

关键词 大陆转换断层, 走滑断层, 断层结构, 地震各向异性, 构造变形

中文引用格式: 冯吉坤, 姚华建, 董云鹏, 李阳. 2025. 大陆转换断层的结构与变形特征. 中国科学: 地球科学, 55(12): 3991–4013, doi: [10.1360/SSTe-2025-0020](https://doi.org/10.1360/SSTe-2025-0020)
英文引用格式: Feng J, Yao H, Dong Y, Li Y. 2025. Structure and deformation of continental transform faults. Science China Earth Sciences, 68(12): 3846–3866, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1753-0>

1 引言

大陆转换断层是三种板块边界形式之一, 是板块构造理论的重要基础(Wilson, 1965). 板块构造理论起源于大陆漂移学说和海底扩张学说, 刻画了刚性的岩石圈外壳在软流圈之上发生相对运动(Le Pichon等, 1973; Cox和Hart, 1991; Hawkesworth和Brown, 2018). 地球表面刚性岩石圈相对运动过程中产生了三种板块边界形式: 离散边界(洋中脊)、汇聚边界(俯冲带)和转换边界(也称为守恒型板块边界)(图1). 板块构造理论强调新的岩石圈在扩张洋中脊产生, 在俯冲带消亡, 因此板块离散-汇聚耦合体系一直是地球科学研究的焦点(郑永飞, 2023). 但是转换边界的研究程度相对较低, 一个可能的原因是传统观点认为在转换边界并不会产生新的岩石圈或老的岩石圈消亡, 只是协调不

同刚性块体间的水平走滑运动, 因此也被称为守恒边界, 结构相对简单. 新的海底地形观测和动力学模拟结果认为大洋转换断层处可能存在地壳增生(Greve-meyer等, 2021), 对传统的转换边界是守恒型边界的概念提出了新挑战. 相对于大洋转换断层, 大陆转换断层结构更加复杂, 存在复杂的横向和深度上的变化特征(Norris和Toy, 2014; Şengör等, 2021). 大陆转换断层有时会发展成数百公里宽的变形带, 包含一系列复杂的断层、挤压隆起和拉张盆地, 展现了大陆变形的弥散性特征, 是完善大陆板块构造理论的重要切入点. 此外, 大陆转换断层作为大陆板块之间的连接和调节构造单元, 是认识宏观构造格局形成和演化的重要方面. 大陆转换断层上经常发生灾难性大地震, 比如1906年的旧金山大地震和1999年土耳其伊兹密特地震等, 给社会造成了巨大的经济损失和人员伤亡, 研究大陆转

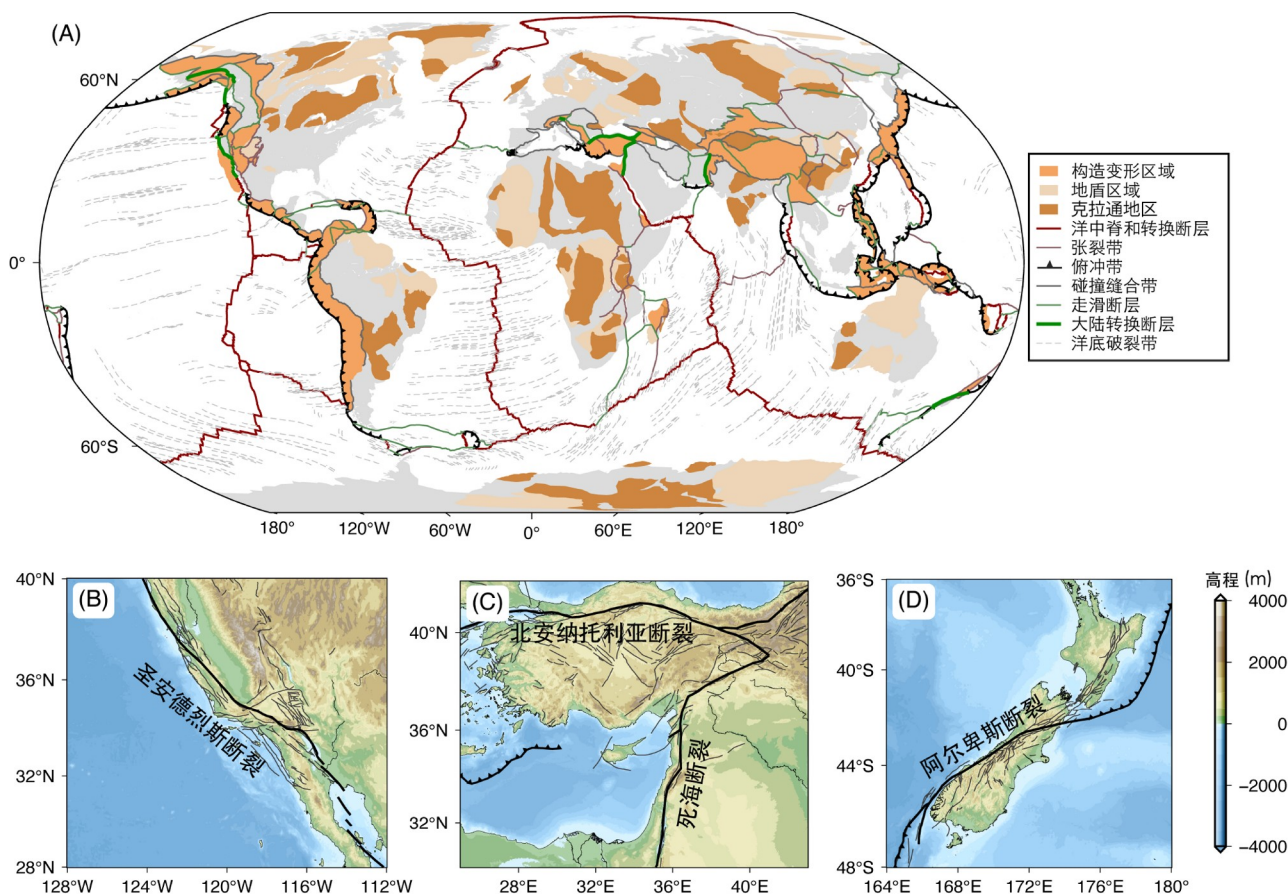


图1 全球板块属性特征和板块边界分布图(A)及典型转换断层特征(B~D)

(A)中的板块边界和构造属性数据来自Hasterok等(2022), 图中绿色粗线为全球主要大陆转换断层位置. (B~D)图中黑色粗线具体展示了圣安德烈斯断裂、死海断裂、北安纳托利亚断裂、阿尔卑斯断裂等典型大陆转换断层的空间展布特征, 黑色细线为区域内其他断层

换断层的深部结构和运动过程也是揭示陆内强震发生规律的重要基础。因此, 深入研究大陆转换断层的深部结构、变形模式和演化过程既具有重要的科学意义, 也有实际的防震减灾需求。

大陆转换断层是大陆板块之间的一种走滑边界, 断层两端连接着其他形式的板块边界, 吸收大部分板块间的水平走滑位移(Wilson, 1965), 但是局部也会出现挤压或拉张现象。大陆转换断层可以是单条主断裂, 也可能是多条相互连接断裂组成的断裂带(Norris和Toy, 2014; Şengör等, 2021)。大陆转换断层和大陆走滑断层虽然都以水平走滑运动为主, 相较于一般的大陆走滑断层, 大陆转换断层通常具有破裂尺度大、走滑距离长和切穿深度深的特点。一般大陆走滑断层可以出现在板块内部或板块边界, 断裂带的两端不直接连接其他形式的板块边界, 主要起到协调板块内部构造变形的作用。世界上典型的活动大陆转换断层包括新西兰的阿尔卑斯断裂、北美的圣安德烈斯断裂、土耳其的北安纳托利亚断裂、中东地区的死海断裂等(图1B~1D)。由于新西兰的阿尔卑斯断裂和北美的圣安德烈斯断裂分别代表了太平洋板块与澳大利亚板块和北美板块的走滑边界, 并且两条断裂两端连接着海沟或洋中脊, 所以这两条断裂带在一些研究中也归为大洋转换断层(董云鹏等, 2025)。同时阿尔卑斯断裂和圣安德烈斯断裂都切穿了大陆岩石圈, 有些研究也将它们归类为大陆转换断层(Şengör等, 2019; Şengör等, 2021)。虽然目前学术界对阿尔卑斯断裂和圣安德烈斯断裂性质的定义仍然存在一些争议, 但是本文主要聚焦于转换断层区域岩石圈结构和变形特征, 而这两条转换断层都切穿了大陆岩石圈, 也是重要对比研究对象, 因此本文也将阿尔卑斯断裂和圣安德烈斯断裂归为大陆转换断层。中国境内的阿尔金断裂和昆仑断裂主要是由于印度和欧亚大陆碰撞形成的大规模陆内走滑断层, 由于其形成原因主要是大陆碰撞与陆内构造变形, 而非板块边界的相对滑动, 更符合大陆内部走滑断层的定义(董云鹏等, 2025)。这些大规模陆内走滑断层在走滑距离和延伸长度上都与典型的大陆转换断层类似, 也有些学者直接将阿尔金断裂称为大陆转换断层(Jiang等, 2004), 研究这些大规模陆内走滑断层的结构和变形特征也有助于加深对大陆转换断层的认识。郯庐断裂曾经作为扬子板块与华北板块之间的走滑边界, 目前是中国东部规模最大的陆内走滑断裂

(Zhao等, 2016; 朱光等, 2018), 也是研究古大陆转换断层对岩石圈结构影响的重要案例。

大陆转换断层浅部形成窄的脆性破碎带, 摩擦失稳导致地震发生, 发震层主要集中在地壳浅部。密集台阵观测(Ben-Zion等, 2015; Zhang等, 2022; Luo等, 2023)、断裂带导波(Ben-Zion等, 2003; Ben-Zion和Sammis, 2003; Eccles等, 2015)和地质出露都能对断层浅部破碎带结构提供很好的约束, 但是深部结构往往存在非常大的不确定性。关于大陆转换断层的结构和演化仍然存在一些关键科学问题。大陆转换断层在地壳浅部的形态是否具有相似性或存在显著的区域差异? 转换断层在下地壳或者上地幔的形态是怎样的? 大陆转换断层形成的剪切应变在下地壳和岩石圈地幔是怎样分布的? 是集中在一条剪切带内还是分散在更广阔的区域? 当大陆转换断层的运动具有挤压(或拉张)分量时, 这些挤压(或拉张)分量如何被吸收? 其中一些问题已经具有了较好的观测和研究基础, 很多问题仍然需要进一步开展研究。

解答上述问题的一个关键前提在于获得大陆转换断层深部精细结构和断裂带下方岩石圈变形特征, 但是现有研究结果很多是分散、孤立甚至是相互冲突的。大量区域地震层析成像结果在大陆转换断层下方观测到了显著的低速异常(例如, Fichtner等, 2013; Liu等, 2024; Dou等, 2024), 与断裂带的破碎带和应变弱化区域的特征是一致的, 这些大尺度速度模型虽然能够为我们认识断裂带的深部结构和岩石圈性质提供参考, 但其横向分辨率往往难以刻画断层深部精细结构。横波分裂是研究大陆转换断层深部变形特征的重要手段, 有些转换断层区域观测到了与断裂带走向一致的各向异性快波方向(例如, Zietlow等, 2014; 常利军和王椿镛, 2023), 而其他一些大陆转换断层区域并没有观测到这一特征(例如, Paul等, 2014; Vinnik等, 2016)(表1)。使用横波分裂方法研究大陆转换断层深部变形模式缺乏深度分辨率, 难以区分不同深度(地壳、地幔岩石圈和软流圈)各向异性的贡献量。此外, 莫霍面和岩石圈底界面的形态也是认识大陆转换断层在岩石圈深部展布特征的重要途径, 但是过去受制于地震台站稀疏分布的限制, 大陆转换断层是否错断莫霍面和岩石圈底界面仍然存在不同的认识(Zhao等, 2006; Wu等, 2024)。这些不同的结论, 部分是源于方法或数据分辨能力的差异。因此, 随着地球物理观测数据日益密

表 1 大陆岩石圈尺度走滑断裂和远震横波分裂测量得到的各向异性快波方向^{a)}

典型大陆转换断层或走滑断层	年龄	总滑移距离(km)	各向异性快波方向(ϕ)
阿尔卑斯断裂 ^②	25Ma(Lamb等, 2016)	700~775(Lamb等, 2016)	断裂带平行(Duclos等, 2005), 在断裂带南端与断裂带斜交(Little等, 2002b)
圣安德烈斯断裂,加利福尼亚中部 ^②	20~23Ma(Revenaugh和Reasoner, 1997)	315(Revenaugh和Reasoner, 1997)	断裂带平行(Özalaybey和Savage, 1995; Bonnin等, 2010)
圣安德烈斯断裂,加利福尼亚南部 ^②	10Ma(Darin和Dorsey, 2013)	200±14(Darin和Dorsey, 2013)	断裂带平行或断裂带斜交(Polet和Kanamori, 2002)
死海断裂 ^①	20Ma(Quennell, 1958)	105(Quennell, 1958)	断裂带平行(Rümpker等, 2003; Ryberg等, 2005)
北安纳托利亚断裂 ^①	11~13Ma(Şengör等, 2005)	85±5(Şengör等, 2005)	断裂带斜交(Merry等, 2021)
东安纳托利亚断裂 ^①	10Ma(Şengör等, 1985; Westaway和Arger, 2001)	30(Yilmaz等, 2006)	断裂带斜交到断裂带平行(Sandvol等, 2003; Merry等, 2021)
阿尔金断裂 ^③	20~28Ma(Yue等, 2001)	375±25(Yue等, 2001)	西部与断裂带平行(Herquel等, 1999; 常利军和王椿镛, 2023), 东部与断裂带斜交(Li等, 2011)
昆仑断裂 ^③	20Ma(Jolivet等, 2003)	100±20(Fu和Awata, 2007)	断裂带平行(Li等, 2011)

a) 最右列的“断裂带平行”指的是快波方向 ϕ 与断裂带的夹角在5°~20°。断层类型: ①代表大陆转换断层; ②代表有争议的大陆转换断层; ③代表陆内走滑断层。修改自Merry等(2021)

集和反演方法的改进, 有必要对大陆转换断层区域的地球物理观测重新回顾分析。

尽管已经存在一些关于大陆转换断层的综述文章(Norris和Toy, 2014; Şengör等, 2019; Şengör等, 2021; Frisch等, 2022), 但是大多是从地质学或者构造学的视角总结的。地球物理观测能够提供对大陆转换断层深部结构的直接约束, 本文将聚焦地球物理学(尤其是地震学)观测对大陆转换断层下方结构和变形特征的约束, 并以此为基础讨论大陆转换断层的深部结构特征、变形模式、地震分布以及大陆转换断层演化过程和周围构造的关系。

2 主要大陆转换断层地质特征和地表观测

大陆转换断层在全球的分布非常广泛(图1), 本文主要回顾一些世界上典型大陆转换断层的研究进展(表1), 同时阿尔金断裂作为世界上最长、最活跃的陆内走滑断裂带之一也是本文的重要对比和讨论对象。

新西兰阿尔卑斯断裂是世界上最典型的大陆转换断层之一, 代表了澳大利亚板块和太平洋板块在新西兰南岛地区的边界, 也是最早被识别的大陆转换断层之一(Wellman和Willett, 1942)。阿尔卑斯断裂南端和北端分别连接了向东和向西的大洋俯冲带。阿尔卑斯断裂中段除右旋走滑外, 还具有明显的汇聚分量。阿

尔卑斯断裂吸收了~70%的板块相对运动(例如, Norris和Cooper, 2001), 其余板块间相对运动表现为分布式剪切和地壳增厚。这些分布式变形和地壳增厚主要发生在阿尔卑斯断裂以东的区域(Scherwath等, 2003; Ghisetti和Sibson, 2006; Salmon等, 2013; Hua等, 2018), 在阿尔卑斯断裂东部形成了一条宽度~100km的狭长断裂带(Stirling等, 2012; Cox等, 2012; Haines和Wallace, 2020)。由于汇聚挤压, 位于上盘的地壳深处的岩石被抬升, 暴露出一条大约50m厚的断裂角砾岩和碎裂岩薄层。向东和向上逐渐过渡为超糜棱岩、糜棱岩和原始糜棱岩, 形成约1km宽的塑性剪切带, 这些岩石是下地壳的原始物质被抬升到了地表(Toy等, 2008; Toy等, 2010)。阿尔卑斯断裂在新西兰南岛北部分裂为了四条分支断裂, 其中最靠东南沿海的Hope断裂是目前滑移速率最高的分支(Cowan, 1990), 而最靠近西北的Wairau断裂是阿尔卑斯主断裂的延续, 历史上吸收了大部分的右旋走滑位移。

圣安德烈斯断裂是太平洋板块和北美板块间的走滑边界, 也是世界上最活跃的断层之一, 累计走滑位移量达315km(Revenaugh和Reasoner, 1997)。沿着圣安德烈斯断裂, 太平洋板块向北西方向移动, 而北美板块相对向东南方向移动。圣安德烈斯断裂表现为一系列相互交织的断层系统, 产生了广泛分布的地震活动性和复杂的速度结构(例如, Fang等, 2022)。圣安德烈斯断

裂吸收了太平洋板块和北美板块间 40mm a^{-1} 相对运动(Argus和Gordon, 2001; Xu等, 2021), 占了太平洋板块和北美板块间总相对位移量 50mm a^{-1} 的80%(DeMets等, 2010; Molnar和Dayem, 2010), 在其平直部分主断裂吸收了断裂系统内部大部分的走滑位移量($20\sim 35\text{mm a}^{-1}$), 位移和应变都表现出了高度的局部化. 弯折部位(“the Big Bend”或“the Transverse Ranges”)存在显著的汇聚挤压分量(Xu等, 2021), 结构更加复杂(Argus和Gordon, 2001; Meade和Hager, 2005; Lundgren等, 2009).

死海断裂是非洲板块和阿拉伯板块间的狭窄走滑边界, 中新世(17Ma)以来, 死海断裂的左旋位移累计达到约105km(Quennell, 1958; Freund等, 1970; DESERT Group等, 2004), 近期的大地测量观测结果显示死海断裂的滑移速率约为 4mm a^{-1} , 拉张分量非常微弱(Sadeh等, 2012; Hamiel和Piatibratova, 2021; Li等, 2024). 死海断裂从亚喀巴湾(Gulf of Aqaba)向北沿着约旦河谷进入黎巴嫩, 在黎巴嫩形成了弯折区, 然后继续向北进入叙利亚并最终与东安纳托利亚断裂连接. 地质观测显示除了黎巴嫩弯折区具有明显的分布式变形特征, 整条转换断层都是以左旋走滑为主(DESERT Group等, 2004; Janssen等, 2007). 尽管狭窄的死海断裂在很多位置表现为单一的主断层, 但是也存在局部拉张形成的拉分盆地, 死海就是其中最大的拉分盆地.

北安纳托利亚断裂是土耳其北部一条长度达到1500km的大型右旋大陆转换断层. 随着阿拉伯板块和欧亚大陆汇聚, 安纳托利亚板块被向西挤出, 北安纳托利亚断裂形成了安纳托利亚板块向西挤出的北部走滑边界(McKenzie, 1972; Provost等, 2003; Şengör等, 2005; Hussain等, 2018). 北安纳托利亚断裂从中新世启动以来经历了75~85km的相对位移(Hubert-Ferrari等, 2002; Şengör等, 2005). 在北安纳托利亚断裂的中部和东部大地测量观测到的滑移速率达到了 24mm a^{-1} (McClusky等, 2000; Ozener等, 2013; Hussain等, 2018). 地质学观测确定的全新世的滑动速率为 $(18\pm 5)\text{mm a}^{-1}$ (Hubert-Ferrari等, 2002), 比大地测量的结果略低, 但也基本在误差范围内. 基于GPS速度观测的模拟结果显示安纳托利亚板块的岩石圈结构强度高, 北安纳托利亚断裂形成岩石圈的弱化带, 大部分的板块内部变形都集中在这一条结构弱化带上(Jackson和McKenzie, 1988; Jiménez-Munt和Sabadini, 2002; England等, 2016;

Hussain等, 2018), 符合坚硬板块沿着弱化断裂带运动的模型. 与中部和东部表现为单一的主断层不同, 北安纳托利亚断裂西部在靠近马尔马拉海(Sea of Marmara)附近分为多条分支断层, 这一点在地震活动性上也有体现, 东部地震主要分布在主断裂上, 但是在西部地震活动展现出更强的广泛分布特征(Barka, 1996; Bektas等, 2007; Fraser等, 2010). 可能是由于北安纳托利亚断裂西部具有明显的拉张分量, 发育了下地壳的滑脱层, 导致了断裂带变宽(Bécel等, 2009).

阿尔金断裂主要是由于印度和欧亚大陆碰撞形成的走滑断裂带, 是世界上最长的陆内走滑断层之一(Molnar和Tapponnier, 1978; Molnar等, 1987; Yin和Harrison, 2000). 阿尔金断裂位于青藏高原北缘, 是挤压增厚的青藏高原与坚硬的塔里木盆地之间的边界, 断裂带由西向东延伸了2000km, 左旋滑移位移达到了400~500km(Molnar等, 1987; Yin等, 2002; Gold等, 2011). 虽然早期地质和古地磁估计的阿尔金断裂滑移速率经常超过 20mm a^{-1} (Peltzer等, 1989; Chen等, 2002), 现今的GPS和InSAR观测数据显示沿阿尔金断裂的滑移速率约为 10mm a^{-1} (Flesch等, 2005; Ge等, 2022). 近期的研究发现第四纪以来阿尔金断裂中段的滑移速率仅有8~14 mm a^{-1} (Cowgill等, 2009; 郑文俊等, 2009; Gold等, 2011; Yuan等, 2024), 基本跟大地测量结果一致. 沿阿尔金断裂由西向东呈现滑移速率逐渐下降的特征(徐锡伟等, 2003; 郑文俊等, 2009; Seong等, 2011; Yuan等, 2024), 在阿尔金断裂东段俯冲吸收了更多的南北汇聚分量, 而横向物质逃逸的贡献则逐渐下降.

总体而言, 大陆转换断层结构和运动滑移模式比较复杂. 圣安德烈斯断裂和阿尔卑斯断裂表现为一条宽度超过100km的断裂带, 但是阿尔卑斯断裂主要由一条主断层和东侧很多相对小的断层组成, 圣安德烈斯断裂除了包含一条主断层带外, 还包含多条非常重要的分支走滑断层. 圣安德烈斯断裂在其弯折区也存在汇聚分量, 但是并没有像阿尔卑斯断裂上盘那样广泛出露糜棱岩. 死海断裂和北安纳托利亚断裂整体表现为一条狭窄的剪切应变集中带, 在北安纳托利亚断裂西段存在显著的拉张分量. 阿尔金断裂具有显著的汇聚分量, 存在一条宽度超过200千米分布式变形带(Li等, 2021; Ge等, 2022), 并且沿断裂带走向其结构变化显著(Xiao等, 2017; Dong等, 2024; Shen等, 2024).

3 大陆转换断层与大洋转换断层构造变形特征对比

板块大规模水平相对运动必然会在边界产生转换断层, 这种转换断层不仅存在于大洋板块, 也存在于大陆板块(图1). 由于大陆岩石圈的性质与大洋岩石圈存在显著的差异, 大陆转换断层结构和特征明显不同于大洋转换断层. 大部分大洋转换断层形成于两个近平行的扩张洋中脊之间, 协调由于洋中脊扩张速度不同而导致的构造板块水平运动差异, 从而形成庞大的洋中脊-大洋转换断层系统(图2A). 过去十年间, 随着大洋转换断层地球物理观测数据的增加和相关研究深入, 国际上对大洋转换断层的结构和动力学特征取得了许多新的认识(Maia等, 2016; Kuna等, 2019; Greve-meyer等, 2021; Tian等, 2024). 大陆转换断层是指板块间的相对走滑运动在大陆板块边界上形成的单一断裂或者由一系列相互连接断裂组成的断裂带, 其中主断裂往往能够承担一半以上的板块间相对位移量(Molnar和Dayem, 2010; Norris和Toy, 2014). 由于大陆岩石圈经历了复杂的构造演化, 大陆岩石圈结构具有显著的横向非均匀性, 所以大陆转换断层结构通常比大洋转换断层更为复杂, 比如可能沿断裂带形成大量挤压

褶皱或拉分盆地(图2B).

由于大洋板块在洋中脊不断产生, 在俯冲带不断消亡, 大洋转换断层的滑动速率往往很高. 大陆岩石圈无法像大洋岩石圈一样持续地在扩张边界产生, 并在俯冲边界消亡, 所以大陆转换断层的滑动速率往往要比大洋转换断层低得多. 由于大陆岩石圈结构性质与大洋岩石圈存在显著差异, 大陆转换断层的结构和性质也与大洋转换断层差异明显. 大洋转换断层往往较窄, 仅包含一条主断裂, 大部分地震活动都发生在这条主断裂上(图3A). 大陆转换断层有时表现为一条宽广的转换断层系统, 包含多条近平行的分支断层, 大陆转换断层对应的地震分布也相对更加离散和宽泛(图3B, 3C)(Molnar和Dayem, 2010; Haines和Wallace, 2020; Xu等, 2021). 根据定义, 大洋和大陆转换断层都切穿了整个岩石圈, 但是受限于地球物理成像方法分辨率不足, 大陆转换断层切穿深度以及不同深度变形特征的探测结果依然存在诸多争议.

4 大陆转换断层深部结构

高滑移速率和大滑移量意味着大陆转换断层是位移和应变的主要集中区. 大陆的地壳浅部是弹性摩擦区, 大陆转换断层位移主要通过间歇性脆性破裂来实现, 也是主要的地震发生位置(例如, Sibson, 1983). 无论是大陆还是大洋转换断层区域, 地震都主要分布在20km以浅的区域(图4), 甚至大洋转换断层的地震主要分布在10km以浅的深度(Schlaphorst等, 2023; Gong等, 2023). 利用地震精定位(例如Ross等, 2019, 2020)、主动源反射/折射波勘探(例如, DESERT Group等, 2004; Zhao等, 2006; Hole等, 2006; Stern等, 2007; Lay等, 2021)、基于密集台阵被动源成像技术(例如, Ben-Zion等, 2015; Zhang等, 2022)或者沿断层破碎带传播的导波(Li等, 1994; Ben-Zion等, 2003; Ben-Zion和Sammis, 2003; Eccles等, 2015)都能够很好地约束断裂带在地壳浅部的结构. 然而, 断裂带深部结构则存在显著不确定性. 下地壳的物质黏滞度和变形模式与浅部以脆性破裂和摩擦为主的发展层有很大的区别, 下地壳缺乏地震活动表明深部以无震的蠕变为主, 伴随着弹性应变的黏滞扩散(例如, Sibson, 1983; Hanmer, 1988; Handy等, 2007).

大陆转换断层的单一断裂在上地壳通常表现为一

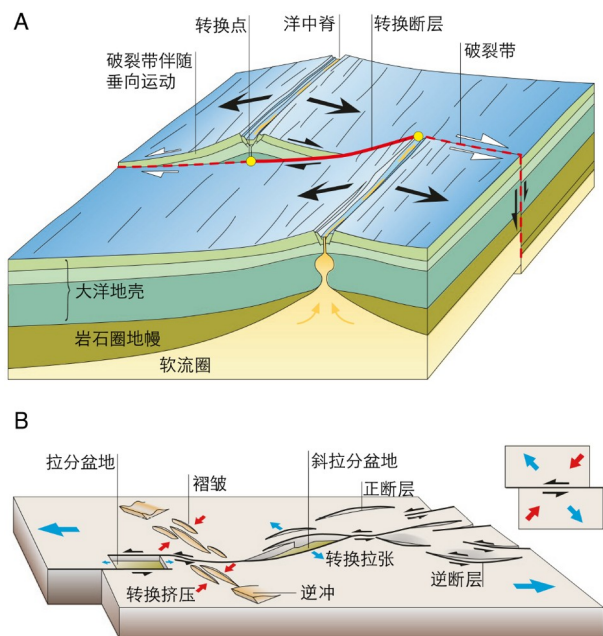


图2 大洋转换断层(A)和大陆转换断层(B)结构特征对比
修改自Frisch等(2022)

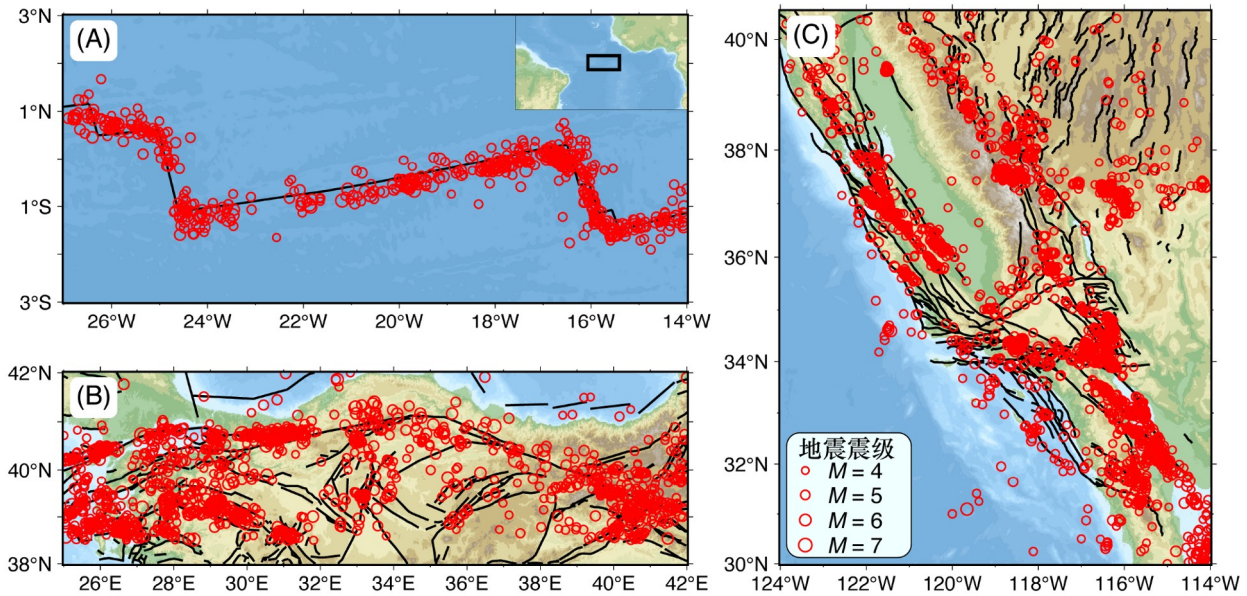


图3 大洋转换断层(A)、北安纳托利亚断裂(B)和圣安德烈斯断裂(C)的主断裂和地震分布

黑色粗线为转换断层主断裂位置, 黑色细线为区域内其他断层, 红色圆圈代表不同震级的地震

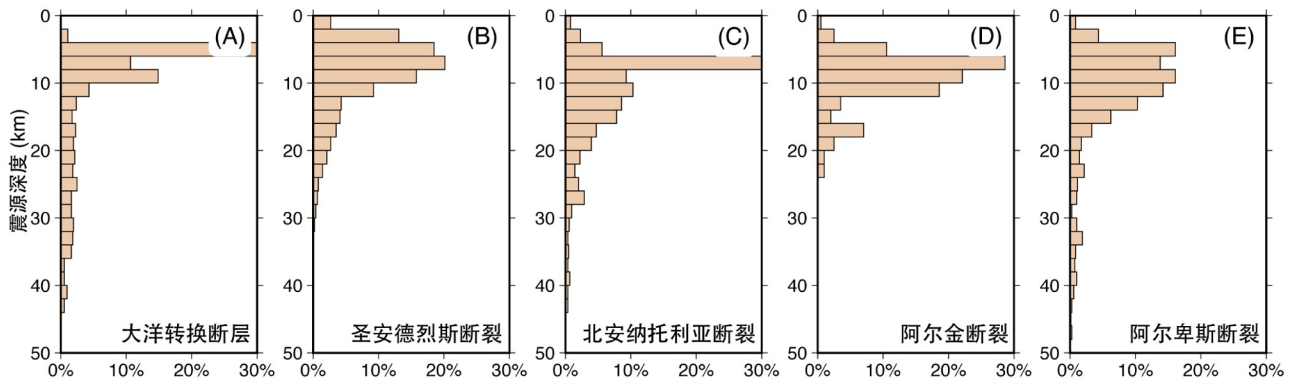


图4 沿大洋转换断层(A)和多条典型大陆转换或走滑断层(B-E)地震震中沿深度的分布特征

大洋转换断层的地震目录是OBS数据地震精定位结果(Schlaphorst等, 2023), 圣安德烈斯断裂地震目录来自Cheng等(2025), 北安纳托利亚断裂地震目录收集自土耳其灾害与应急管理局(AFAD, <https://www.afad.gov.tr>), 阿尔金断裂地震目录收集自中国地震台网中心(CENC, <http://www.cenc.ac.cn>), 阿尔卑斯断裂地震目录收集自新西兰地震监测网络(GeoNet, <https://www.geonet.org.nz>), 这里只统计了主断裂左右30km以内的地震事件, 大陆转换断层区域只统计了震级3.5级以上的地震

条狭窄的破碎带和断裂带核部(Li等, 1994; Ben-Zion等, 2003; Weber等, 2009; Eccles等, 2015; Lay等, 2021), 宽度通常在几十到百米量级。而断裂带在下地壳的结构特征不确定性则更高, 不同的研究者根据不同区域的研究成果提出了多种模型, 包括窄高应变塑性剪切带、逐渐增宽的塑性剪切带和宽广的近水平的塑性滑脱层(图5; 例如, Sibson, 1983; Hanmer, 1988;

Scholz, 1998; Bürgmann和Dresen, 2008; Norris和Toy, 2014), 这些模型都显示单一断裂在上地壳为一条狭窄的脆性破裂带, 主要区别在于断层在下地壳以及地幔岩石圈中的展布形态。

地震层析成像方法通常难以对这种狭窄的陡倾断层进行成像, 横跨新西兰南岛中部的两条地震勘探剖面揭示了在阿尔卑斯断裂下方10~35km深度范围存在

明显的反射信号(Davey等, 1995; Okaya等, 2013), Davey等(1995)认为这个反射信号是阿尔卑斯断裂在深度上的延续, 并在下地壳逐渐转为水平. Norris等(1990)提出断层向东变平, 在地壳底部附近形成了一条塑性滑脱层(Little等, 2002a, 2002b). 这个向东南倾斜反射体波信号的位置对应地震层析成像结果中一个低速区(Stern等, 2001, 2007)和高电导率异常(Wannamaker等, 2002; Jiracek等, 2007), 这些证据都显示变形带内可能存在相互连通的高压流体. Chapman等(2022)进一步利用相平衡预测沿活动断裂带的变质作用会产生流体, 而变质作用产生的流体导致了裂缝产生. 在阿尔卑斯断裂深度延伸方向上观测到了构造震颤信号(Wech等, 2012), 构造震颤分布显示阿尔卑斯断裂在深度上延展到了地幔岩石圈. 接收函数成像显示阿尔卑斯断裂下方岩石圈底界面性质存在局部的剧烈横向变化(Hua等, 2018), 指示阿尔卑斯断裂切穿了岩石圈, 在地幔岩石圈内形成一条窄的应变集中带. 沿阿尔卑斯断裂的地幔捕虏体显示, 至少在阿尔卑斯断裂启动前期, 地幔岩石圈中的剪切集中在一条宽度不超过32km的高应变带内(Kidder等, 2021). 地球物理成像结果显示在断层东侧下地壳存在一个滑脱层, 构造震颤的分布和岩石圈底界面的性质局部剧烈变化指示断层在地幔岩石圈产生了局部的高剪切应变带, 这些结果支持了Koons等(2003)提出的阿尔卑斯断裂深部位移

会在一个近水平的塑性滑脱层和一条陡峭的走滑剪切带之间分配的模式(图5F).

在北安纳托利亚断裂东段, 基于InSAR地表变形数据的模拟结果认为在地壳内部断裂带变形局限在一条窄带内(Wright等, 2001; Hussain等, 2018). 震后GPS速度场的研究显示大震后深部无震滑移的范围能延伸到超过30km深度, 在地幔深度范围主要是发生黏性松弛(Bürgmann等, 2002; Ergintav等, 2007). Hearn等(2009)认为在下部地壳中, 可能沿着狭窄的剪切带发生蠕变, 而在上地幔中则可能出现分散的松弛或剪切带扩展. 大地电磁法得到的电阻率结构显示北安纳托利亚断裂在地壳内为高电导率, 高导异常一直延伸到上地幔顶部(Kaya等, 2013; Türkoğlu等, 2015), 可见北安纳托利亚断裂切穿了整个地壳并延伸到了上地幔顶部. 地震层析成像结果似乎也支持了这样的结论, 在安纳托利亚板块下方观测到了明显的高速岩石圈结构, 但是在北安纳托利亚断裂下方则为明显的低速异常, 这个低速异常切穿了整个岩石圈, 断裂带从地壳到岩石圈底部逐渐变宽(Fichtner等, 2013; Papaleo等, 2017), 北安纳托利亚断裂似乎是坚硬岩石圈内的一条深切弱断层带(England等, 2016). 综上所述, 北安纳托利亚断裂是一条应变非常局部的结构弱化剪切带, 它切穿整个地壳, 甚至是整个岩石圈. 而在断裂带西段, 存在着比较明显的分布式变形特征.

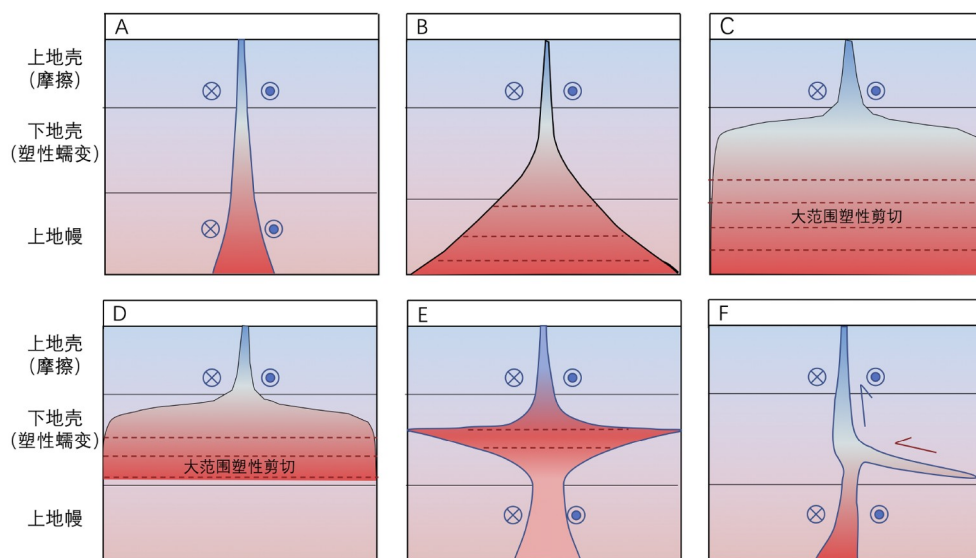


图5 不同的断裂深部结构模型

黑色圆点和叉号分别对应垂直于所在平面向外和向内的板块运动方向. 图修改自Norris和Toy(2014)

地表观测到死海断裂在Arava山谷的破碎带宽度约为10m(Janssen等, 2007), 与利用地震导波研究获得的断层破裂带宽度一致(Haberland等, 2003). DESERT Group等(2004)首次报道了死海断裂南端一条地震探测剖面的研究成果, 他们发现死海断裂切穿了地壳, 并且在下地壳会变宽. 在死海断裂下方有一个狭窄的区域缺少壳内反射体, 死海断裂在莫霍面处的宽度可能小于15km. 大地电磁的结果也揭示了地表断层下方存在一条近垂直的狭窄高导条带, 两侧为高电阻率的稳定岩石圈块体, 高导异常条带从下地壳延伸到岩石圈地幔深度(Weber等, 2009; Meqbel等, 2016). 所有的证据都支持死海断裂在岩石圈内形成了一条狭窄的薄弱带, 这条薄弱带吸收了板块之间的大部分走滑位移, 与图5A展示的断裂模型相似.

大地测量结果显示阿尔金断裂同时具有较大的走滑分量和显著的挤压缩短分量(Li等, 2021; Ge等, 2022), 左旋剪切和挤压缩短发生在青藏高原北部宽度为~200km的范围内(图6A), 同时沿断层走向断层变形宽度存在显著的横向变化(Shen等, 2024). Zhao等(2006)利用反射地震并没有观测到莫霍面的错断, 也没有观测到塔里木盆地岩石圈向青藏高原下方的俯冲, 但是在阿尔金断裂下方观测到了延伸到上地幔顶部的低速异常, 认为可能是由于壳幔物质混合造成的. 所以阿尔金断裂看上去似乎只是地壳内部的构造边界, 并没有延伸到岩石圈地幔. 但是地震层析成像结果显示阿尔金断裂下方岩石圈存在显著的低速异常, 低速异常向下延伸到上地幔深度范围(Wittlinger等, 2004; Dou等, 2024; Liu等, 2024), 也有研究在阿尔金断裂下方观测到了莫霍面的显著错断(Wittlinger等, 2004; Wu等, 2024; Wang等, 2024). 大地电磁的结果显示阿尔金断裂下方存在一个窄的高导区域, 贯穿整个上地壳, 并延伸到了上地幔顶部, 阿尔金断裂在深部依然表现为一条近垂直电性边界(图6C)(Bedrosian等, 2001; Zhang等, 2015; Xiao等, 2017). 大地电磁结果显示阿尔金断裂由西部的单一主断裂转变为东部的多条分支断裂(Xiao等, 2011; Zhang等, 2015). 结合不同尺度的地震层析成像、大地电磁成像和大地测量的结果可以看出, 阿尔金断裂是坚硬的塔里木盆地和软弱的青藏高原之间的边界, 其南部发生了显著的地壳缩短增厚(Li等, 2021; Ge等, 2022; Wu等, 2024), 阿尔金断裂似乎切穿了整个地壳并延伸到了上地幔.

Nadeau和Dolenc(2005)报道了圣安德烈斯断裂中段的构造震颤事件, 后续研究发现这些震颤主要分布在断层下方20~40km深度范围(图7; 例如, Shelly, 2010), Shelly和Johnson(2011)发现震颤活动的变化与大震后下地壳应力调整存在很好的对应关系. 大地电磁成像结果也显示断裂带表现为一条低电阻率窄带, 从地表延伸到地壳底部(Becken等, 2008), 这些震群位置与低电阻率异常区域一致, 所以也被解释为由于深部流体迁移产生的蠕滑事件(例如, Becken等, 2011). 这些结果意味着沿圣安德烈斯断裂形成的破碎带可能为地幔流体向上迁移提供了通道. 接收函数成像显示圣安德烈斯断裂下方存在岩石圈底界面的剧烈横向变化, 结合接收函数成像分辨能力, 认为圣安德烈斯断裂切穿了整个岩石圈, 在岩石圈地幔形成的剪切带宽度不会超过50km(Ford等, 2014). 上述观测表明圣安德烈斯断裂贯穿了整个岩石圈, 形成了一条应变集中带, 这条应变集中带随着深度的增加逐渐变宽.

圣安德烈斯断裂的弯折区具有明显的汇聚分量(Xu等, 2021), 地震和重力数据也揭示弯折区下方存在一个上地幔高速和高密度异常体(Humphreys等, 1984; Sheffels和McNutt, 1986), 与南阿尔卑斯山下方观测到的高速异常体类似. Stern等(2000)观察到远震地震波穿过南阿尔卑斯山下方地幔后到达时间存在系统性的异常, 并将这些异常解释为在地壳根部下方地幔中存在一个高速体. Fuis等(2012)基于地震观测认为圣安德烈斯断裂弯折区下方存在缩短增厚的地壳根部, 沿圣安德烈斯断裂下方高速异常的一侧延伸到上地幔. 这些高速异常体可能代表了非对称的地幔岩石圈俯冲、对称的地幔岩石圈俯冲或者地幔岩石圈的缩短增厚(Sheffels和McNutt, 1986; Humphreys和Hager, 1990; Fuis等, 2012). 如果这些上地幔的高速异常代表了缩短增厚的地幔岩石圈, 也进一步证明了断层深部的变形模式是局部集中的, 而不是广泛分布的.

不同大陆转换断层的深浅部结构存在显著的差异, 但是都切穿了整个地壳并延伸到了上地幔, 表现为显著的低波速和高电导率异常. 死海断裂、北安纳托利亚断裂总体表现为狭窄的应变集中带, 阿尔卑斯断裂、圣安德烈斯断裂和阿尔金断裂表现为更宽的剪切变形带, 但是主断层都吸收了整条断裂带的大部分走滑位移. 单条断层在浅部表现为一条剪切应变集中的窄带, 断层浅部的宽度只有几十到几百米, 随着深度

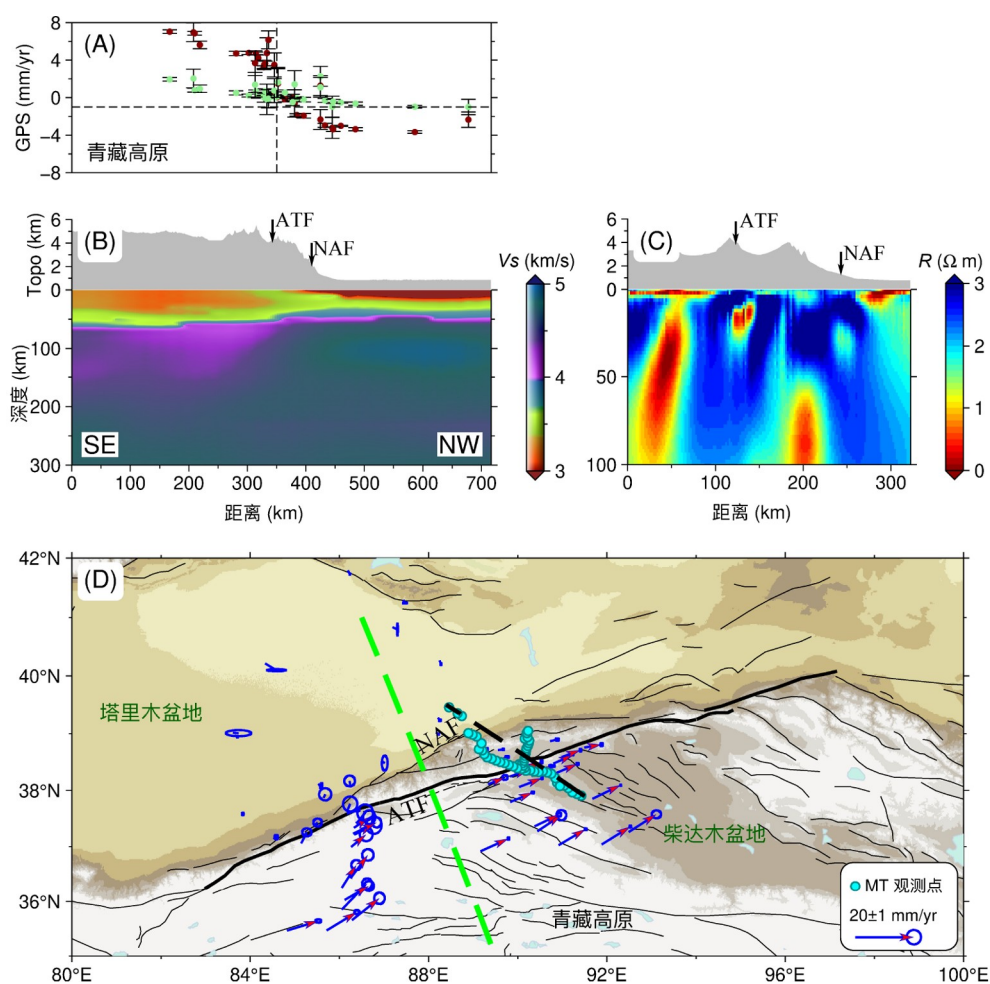


图6 沿垂直于阿尔金断裂的GPS速度(A)、地震波速度(B)和大地电磁(C)剖面

(A)中红点和绿点分别表示平行于和垂直于阿尔金断裂的GPS速度分量, (B)中速度模型来自Liu等(2024); (C)图改自Zhang等(2015); (D)展示了阿尔金断裂和剖面的位置, 图中绿色虚线为(A、B)剖面的位置, 黑色虚线为(C)剖面的位置, GPS速度是相对于塔里木盆地的运动速度(Ge等, 2022). ATF: 阿尔金断裂; NAF: 北阿尔金断裂

增加断层的宽度也逐渐增加. 大陆转换断层在岩石圈地幔仍表现为高应变集中区, 剪切带的宽度可达到几十千米(例如, Vauchez和Tommasi, 2003; Bonnin等, 2010; Ford等, 2014), 这与图5B~5D所展示的断层模型不一致. 虽然图5A、5E和5F展示模型都认为断层应变在地幔岩石圈集中分布, 却揭示了断层在中下地壳不同的形态, 可能主要取决于大陆转换断层两侧的岩石圈性质以及大陆转换断层的运动学特征. 大陆转换断层在上地壳主要以脆性破裂和摩擦吸收板块间的相对运动, 在下地壳和上地幔则表现为蠕滑和更大范围的塑性变形. 沿阿尔卑斯断裂和圣安德烈斯断裂观测到的构造震颤从中下地壳延伸到岩石圈地幔顶部,

可能代表了现今大陆转换断层的剪切应变集中区域.

5 大陆转换断层深部变形模式

大陆岩石圈的流变学结构控制了大陆岩石圈的变形模式, 通过研究大陆转换断层的各向异性特征和变形模式, 可为认识大陆岩石圈的流变学结构提供约束. 地壳浅部的各向异性一般被认为是由于地壳脆性破裂产生定向排列的裂缝以及裂缝填充物产生的(Crampin和Booth, 1985; Gao等, 2011; Shi等, 2020), 地壳深部各向异性被认为主要来源于壳内各向异性矿物(例如云母、角闪石等)的晶格定向排列(Weiss等, 1999), 地幔

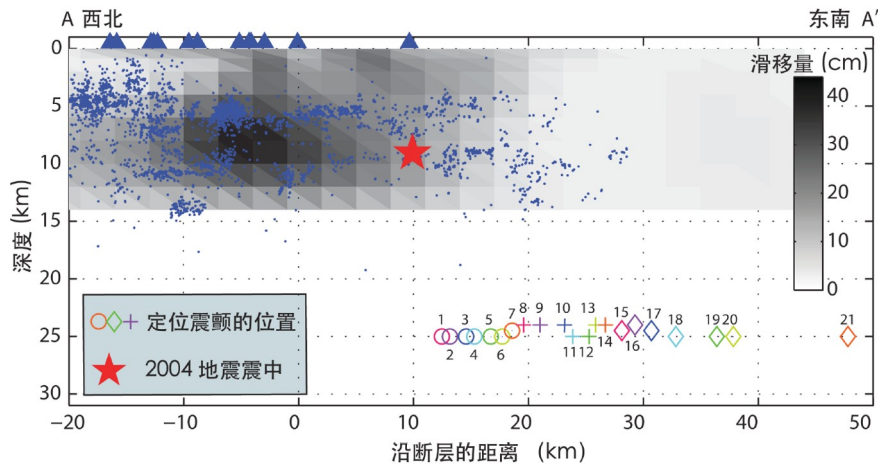


图7 2004年圣安德烈斯断裂Parkfield地震破裂滑移量分布和震颤位置分布(修改自Shelly, 2010)

蓝色点为重定位地震位置(Thurber等, 2006), 灰度表示的滑移量为同震滑移和震后230天滑移量的总和(Murray和Langbein, 2006)

里面的地震各向异性被认为主要来源于橄榄石矿物在塑性变形过程中产生的晶格定向排列(例如, Karato等, 2008).

Rümpker等(2003)通过反演横波分裂波形发现死海断裂走滑运动在岩石圈内部形成了宽度为20km的各向异性带, 剪切带内由于剪切作用导致矿物定向排列形成的各向异性快波方向平行于死海断裂走向, 指示死海断裂切穿了整个岩石圈, 断层宽度比较窄, 与主动源地震勘探和大地电磁观测结果一致(Weber等, 2009; Meqbel等, 2016). 横波分裂和Pn波成像结果都显示新西兰南岛下方存在近200km宽的地震各向异性带(图8B), 快波的方向与阿尔卑斯断裂走向近平行(Baldock和Stern, 2005; Duclos等, 2005; Savage等, 2007a; Zietlow等, 2014). 由于强各向异性主要集中在现今板块边界附近200km的范围内, 在新西兰南岛北部快波方向与板块边界近平行, 一些研究认为宽的强各向异性带表明板块边界下方地幔范围的剪切应变分布在约200km宽的范围内(Molnar等, 1999; Baldock和Stern, 2005; Duclos等, 2005). 接收函数观测到分层各向异性结果, 也揭示了与阿尔卑斯断裂平行的各向异性特征, 并认为在岩石圈地幔中的剪切带宽度不少于100km(Mark, 2024). 利用应变场模拟地震各向异性的研究结果也支持在地幔岩石圈存在分布式变形产生的各向异性特征(Savage等, 2007b). 跨过阿尔金断裂的SKS横波分裂结果展现出明显的转向特征(图8C)(Herquel等, 1999; Herquel和Tapponnier, 2005; 常利军和王椿镛,

2023), 在阿尔金断裂附近横波分裂的快波方向与断裂带走向近平行. 沿阿尔金断裂不同位置剪切带宽度可能达到了几十到上百千米(Herquel等, 1999; Li等, 2021; Ge等, 2022; 常利军和王椿镛, 2023; 孙圣思等, 2024).

死海断裂及其周边都观测到了与死海断裂近似平行的横波分裂快波方向(图8A), 似乎是由于阿拉伯板块和非洲板块沿死海断裂的走滑运动产生. 但是整个阿拉伯板块都观测到了近南北的横波分裂快波方向(例如, Hansen等, 2006; Merry等, 2021), 而死海断裂是一条非常窄的剪切应变带, 而坚硬的阿拉伯块体内部变形非常微弱, 似乎无法用死海断裂的剪切应变解释大区域一致的横波分裂快波方向. 在北安纳托利亚断裂(图8D)(例如, Vinnik等, 2016; Merry等, 2021)和圣安德烈斯断裂(例如, Bonnin等, 2010; Becker等, 2012)都观测到了与断裂带走向非常不一致的远震横波分裂快波方向. 沿陆内大型走滑断裂带郯庐断裂的密集台阵测量得到的远震横波分裂结果显示了一致的近北西方向(Miao等, 2023), 与郯庐断裂走向近垂直, 主要反映了上地幔的各向异性特征. 因此, 大陆转换断层剪切应变导致的地震各向异性难以完全地解释所有远震横波分裂观测结果, 这可能是由于上地幔的各向异性与地壳或岩石圈各向异性存在显著差异, 而远震横波分裂方法缺少深度分辨率.

尽管远震横波分裂是研究上地幔各向异性特征的重要手段, 但是远震横波分裂代表的是整个地幔和地

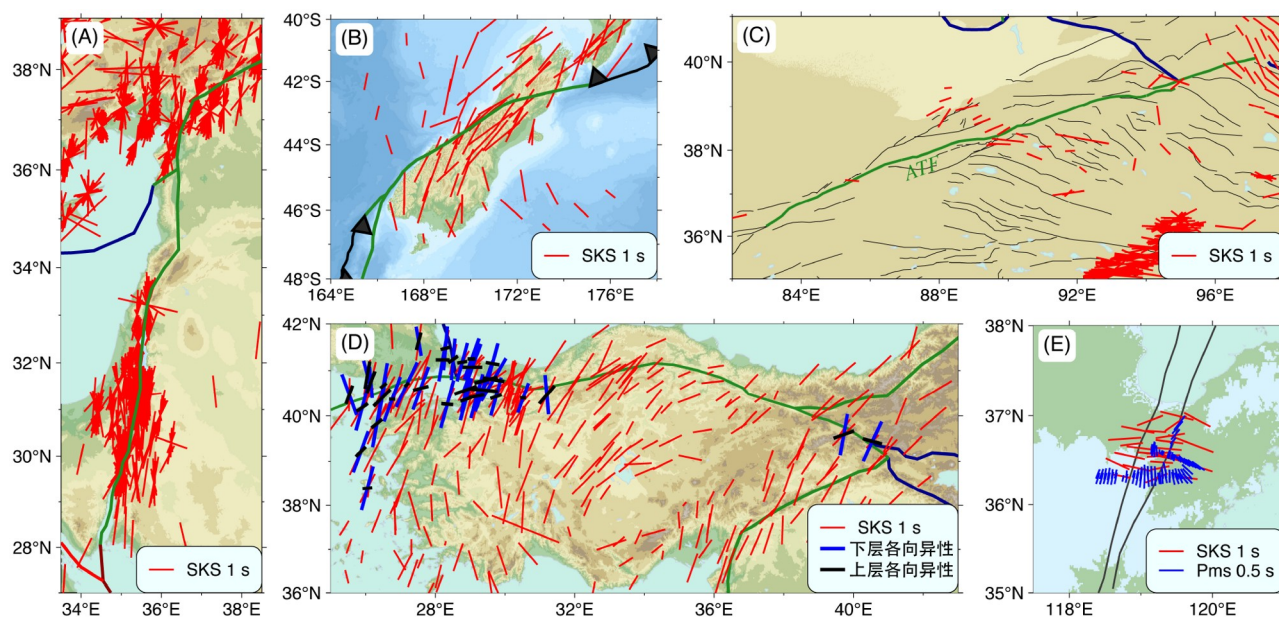


图 8 沿不同断裂的方位异性观测结果

(A) 死海断裂; (B) 阿尔卑斯断裂; (C) 阿尔金断裂; (D) 北安纳托利亚断裂; (E) 郯庐断裂. (A~C)展示的远震横波分裂结果来自Splitting Data Base(<http://split-ting.gm.univ-montp2.fr/DB/>), (D)展示的横波分裂结果引自Merry等(2021), (E)展示的横波分裂和接收函数结果引自Miao等(2023)

壳地震各向异性的积分效应, 该方法对各向异性随深度变化的分辨能力很弱. Polet和Kanamori(2002)提出现今观测到的地震各向异性分布可能并不是完全由浅部的岩石圈剪切变形控制, 并推测美国西海岸东西向快波方向主要跟Farallon板块俯冲后的软流圈流动模式有关. Bonnin等(2010)分析SKS横波分裂随方位角的变化, 发现在圣安德烈斯断裂下方存在两个各向异性层. 上层各向异性快波方向与主要断裂带方向近平行, 被解释为板块边界简单剪切在岩石圈内部形成的矿物定向排列. 下层被解释为厚度为150km的软流圈, 下层软流圈的快波方向主要为东西向. Bonnin等(2010)认为单条主断裂在岩石圈底部的宽度不超过40km, 但是整条断裂带对应的宽度约为150km, 与地表变形有较好的对应关系. Lin等(2011)利用面波数据反演了三维各向异性横波速度结构, 他们也发现软流圈的各向异性快波方向主要为近东西向, 似乎主要与北美板块的绝对板块运动方向和曾经Farallon板块的俯冲有关. 面波成像结果在地壳和上地幔顶部观测到平行于圣安德烈斯断裂的各向异性特征, 认为是沿圣安德烈斯断裂的简单剪切在岩石圈内部形成的各向异性特征. 在圣安德烈斯断裂Parkfield段密集台阵接收函

数约束的地壳各向异性特征也揭示了与断裂走向一致的各向异性快波方向(Audet, 2015).

Kaviani等(2013)利用跨死海断裂的密集台阵也揭示了两层各向异性, 上层贡献的横波分裂延时达到了0.6~0.8s, 各向异性快波方向平行于死海断裂的走向. 考虑到死海断裂附近的岩石圈厚度约为70km(Mohsen等, 2005; Laske和Weber, 2008; Weber等, 2009), Kaviani等(2013)提出上层各向异性层代表了岩石圈剪切变形形成的各向异性特征, 下层代表了软流圈的贡献. 动力学模拟结果显示死海断裂和北安纳托利亚断裂周边的横波分裂结果与软流圈流动方向有很好的对应关系(Faccenna等, 2013). Merry等(2021)同样利用远震横波分裂数据约束了北安纳托利亚断裂和死海断裂区域部分台站下方的分层各向异性特征, 发现上层的各向异性快波方向主要与断裂带走向平行. 接收函数方法在北安纳托利亚断裂中段也观测到了由于断裂带引起的地壳各向异性层(Licciardi等, 2018). 跨郯庐断裂密集台阵接收函数方法揭示的地壳各向异性也显示与断裂带走向一致的各向异性快波方向(图8E), 与远震横波分裂结果近垂直, 跨过郯庐断裂往东, 地壳各向异性快波方向由北北东向转为了近北西向(Miao等, 2023).

利用近震体波走时获得的郯庐断裂中段各向异性速度模型也揭示了断裂带两侧下地壳不同的方位各向异性特征, 尽管两侧的方位各向异性特征沿郯庐断裂走向存在显著的横向变化(Li等, 2024), 这些结果都指示郯庐断裂东支是重要的构造边界. 因此远震横波分裂结果不一定能直接反映大陆转换断层走滑造成的岩石圈变形特征, 可能主要反映软流圈物质的流动方向(例如, Bonnin等, 2010; Faccenna等, 2013), 但是更精细研究往往能够在断层附近观测到断层简单剪切产生的各向异性特征(Rümpker等, 2003; Kaviani等, 2013; Luo和Yao, 2021; Luo等, 2022; Miao等, 2023).

地震各向异性的形成时间难以约束是阻碍我们认识大陆转换断层深部变形模式的另一个重要因素, 地幔橄榄岩在发生剪切应变时会形成矿物晶格优选方向定向排列, 目前观测到的地震各向异性特征受整个地质历史时期应变的综合影响, 既包含了现今应变的效应, 可能也包含了岩石中残留的化石各向异性特征(Molnar等, 1999; Little等, 2002b; Shao等, 2021). 来自岩石圈地幔的捕虏体显示, 现在观测到的地震各向异性可能是晶格固化形成的化石各向异性和一些高应变剪切窄带的综合效果(Kidder等, 2021; Shao等, 2022). 岩石中固化的化石各向异性也可能在后续构造变形过程中被重置, 形成新的各向异性特征, 这取决于怎样的应变强度和温压条件能够使矿物晶格重新定向排列. 例如阿尔金断裂两侧往往表现为非常不同的各向异性特征, 塔里木盆地的各向异性特征往往被认为是固化在岩石圈中的化石各向异性, 而青藏高原内部的各向异性特征被认为与新生代以来的构造变形模式有关(Herquel等, 1999; Flesch等, 2005; 常利军和王椿镛, 2023). 这可能指示阿尔金断裂是条切穿整个岩石圈的断裂带, 断裂带附近的矿物晶格在剪切作用下发生了定向排列. 但是很多时候难以区分观测的各向异性结果中哪些代表现今的构造变形效应, 哪些是古构造运动的痕迹. 在新西兰南岛中部和北部, 横波分裂和Pn波观测到了宽度超过200km的各向异性带(Baldock和Stern, 2005; Savage等, 2007a), 地震各向异性的快波方向与阿尔卑斯断裂近平行. 但是基于GPS观测的数值模拟结果认为现今的剪切变形带在地壳和上地幔的宽度不超过30km和100km(Beavan等, 2007), 说明目前观测到的各向异性特征可能代表过去20多个百万年变形的综合效果, 同时包含了之前形成的化石各向异性和

现今沿断裂带剪切变形产生的各向异性特征.

根据断裂带区域的地震各向异性特征判断, 大陆转换断层几乎都深切了整个岩石圈, 由于简单剪切作用形成了矿物的定向排列. 在岩石圈地幔观测到的各向异性变形带的宽度要远超地表破碎带的宽度, 所以大陆转换断层的宽度会随深部增加, 达到几十千米(例如, Bonnin等, 2010; Lin等, 2011; Herquel等, 1999; Weber等, 2009). 地震各向异性方法的垂向和横向分辨率对于约束大陆转换断层剪切应变的分布特征至关重要, 比如受到软流圈各向异性的影响, 单层远震横波分裂结果有时无法约束大陆转换断层的应变分布特征. 虽然各向异性面波层析成像很好地揭示了圣安德烈斯断裂岩石圈剪切应变带和分层各向异性特征(例如Lin等, 2011), 但是当大陆转换断层的应变集中在一条非常窄的剪切带时(比如死海断裂和北安纳托利亚断裂), 区域地震面波或者体波各向异性层析成像的分辨率不足以有效地刻画这些狭窄的剪切应变带(例如Wei等, 2019; Wang等, 2020; Legendre等, 2020). 此外, 地震各向异性特征是整個构造变形历史的综合效应, 要综合地质和地球物理等多学科观测区分现今变形引起的各向异性特征和历史形成的化石各向异性, 才能更好地理解现今大陆转换断层活动对岩石圈结构的影响.

6 大陆转换断层结构演化

基于多学科的观测, 对大陆转换断层的基本结构特征已经具有一定的认识. 大陆转换断层之间存在非常显著的结构差异, 比如圣安德烈斯断裂和阿尔卑斯断裂都表现为一条宽度超过100千米的分布式变形带; 而死海断裂和北安纳托利亚断裂总体上表现为应变非常集中的狭窄剪切带. 由于构造环境更加复杂, 阿尔金断裂在不同位置的结构变化较大(Norris和Toy, 2014; Dai等, 2017; Xiao等, 2017; Shen等, 2024). 尽管每条大陆转换断层都会有一条主断层, 在大陆转换断层演化的过程中, 主要的滑移量可能会转移到另一条近平行的断层上, 比如加利福尼亚南部的San Jacinto断层和新西兰南岛北部的Hope断层目前分别是圣安德烈斯断裂和阿尔卑斯断裂在对应区域滑移速率最高的分支断裂(Wallace等, 2007; Lundgren等, 2009). 大陆转换断层的不同段也可能会有有一定的压缩或者伸展分量, 比如阿尔卑斯断裂和圣安德烈斯断裂的弯折区域都具

有明显的挤压分量, 挤压导致了地壳和岩石圈地幔的挤压增厚(Fuis等, 2012). 而北安纳托利亚断裂的西段具有明显的拉张分量(Şengör等, 2005; Bektaş等, 2007; Ozener等, 2013).

大陆转换断层的宽度和主断层分担整条断裂带滑移位移的比例可能主要取决于切穿岩石圈的性质和剪切带的应变弱化程度. 死海断裂和北安纳托利亚断裂都切穿了古老克拉通的边界, 古老克拉通的地壳并没有发育广泛的变形特征, 应变主要集中在一条很窄的应变带上(England等, 2016; Hussain等, 2018); 而圣安德烈斯断裂和阿尔卑斯断裂都切穿了年轻的增生地体, 虽然大部分应变集中在主断层上, 但是依然发育了宽度超过100km的分布式变形区(Xu等, 2021). 陆内走滑断层阿尔金断裂的青藏高原一侧也具有分布式变形特征, 地壳发生了显著的挤压增厚, 而塔里木盆地一侧变形非常微弱(Ge等, 2022). Platt和Behr(2011a, 2011b)提出剪切带的宽度会随着其与周围地壳强度差异而变化: 如果强度差异较大, 剪切带可能会非常狭窄; 如果差异较低, 剪切带则会变宽. 这也解释了为什么剪切带在上地幔会变宽. 沿阿尔金断裂剪切带宽度的变化(Shen等, 2024)很可能反映了大陆岩石圈强度横向变化特征.

当转换/走滑断层具有显著的汇聚挤压分量时, 比如阿尔卑斯断裂中段、圣安德烈斯断裂的弯折区域和阿尔金断裂, 都能观测到明显增厚的地壳(Wittlinger等, 2004; Van Avendonk等, 2004; Zhao等, 2006; Fuis等, 2012). 阿尔卑斯断裂和圣安德烈斯断裂的弯折区域都观测到了增厚的地壳和高速的地幔异常体, 可能代表了缩短增厚的地幔岩石圈或者俯冲的地幔岩石圈(Sheffels和McNutt, 1986; Stern等, 2000; Fuis等, 2012). 根据现有的阿尔卑斯断裂位移研究结果, 大部分位移都集中在阿尔卑斯主断裂上(Beavan等, 2007; Johnson等, 2024), 沿断裂带的走滑分量主要分配到上地幔的一条陡峭的剪切带上, 在地壳内表现为一条狭窄的高应变带(<30km, Moore等, 2002). 分布式变形占到断裂带总位移量的不超过30%, 主要分布在阿尔卑斯断裂以东约100km的区域. 虽然剪切应变大部分集中在阿尔卑斯断裂附近, 但是挤压变形相对均匀地分布在更广的范围内(Johnson等, 2024). 阿尔卑斯断裂东侧发育了与倾斜断层相连的下地壳滑脱层(Norris等, 1990; Wannamaker等, 2002; Stern等, 2007), 分布式应变可以

沿软弱的下地壳滑脱层向东传导. 地震成像结果显示南阿尔卑斯山下方的地壳增厚到了40km, 而东海岸的正常地壳厚度只有25km(Scherwath等, 2003; Salmon等, 2013). 因此, 大部分剪切应变集中在阿尔卑斯断裂的一条陡峭的剪切应变窄带上, 而其余的剪切应变和大部分的挤压应变则沿下地壳的软弱滑脱层分布于一个更广的区域(图5F)(Fuis等, 2007). GPS观测显示跨过阿尔金断裂同时具有一定的走滑和汇聚分量, 剪切和缩短变形都分布在青藏高原北部超过200km的范围内, 下地壳表现为显著的低速异常, 塔里木盆地内部变形几乎可以忽略(Li等, 2021; Ge等, 2022). 阿尔金断裂分担了近一半的走滑位移分量, 但是汇聚分量则全部均匀分布在青藏高原北缘, 并没有明显集中在断层附近的特征(图6). 根据增厚的地壳和隆起的地形判断, 主要是通过岩石圈的挤压增厚吸收了垂直于断裂带的汇聚分量, 软弱中下地壳或下地壳滑脱层有利于地壳的横向缩短增厚, 而断层下方的局部高应变带则承担了大部分走滑位移.

综上所述, 大陆转换断层可以表现为单一断裂或者较宽的断裂带, 单一断裂在地壳表现为一条非常窄的脆性破裂带, 随着深度增加逐渐变宽, 在岩石圈地幔往往表现为一条宽度不超过50km的应变集中带, 形成平行于断裂带走向的各向异性特征, 而两侧板块的各向异性特征取决于岩石圈结构强度和后期变形程度(图9). 当大陆转换断层存在较大的挤压分量时, 在岩石圈较弱的一侧发生挤压缩短变形, 可能形成软弱的中下地壳或中下地壳塑性滑脱层, 能够更好协调地壳的横向挤压缩短变形. 但是对于纯走滑大陆转换断层, 断裂在中下地壳的结构目前仍然缺少有效约束.

7 研究展望

综合地球物理观测为研究大陆转换断层深部结构提供了重要约束, 基于现有观测可以发现虽然不同转换断层的结构存在显著差异, 但是都包含一条切穿地壳直下方地幔岩石圈的主断裂, 在岩石圈形成窄的剪切应变集中区, 产生与剪切方向平行的各向异性快波方向(例如, Weber等, 2009; Bonnin等, 2010). 大陆转换断层单条破裂在地壳浅部表现为窄的脆性破裂带, 在岩石圈地幔宽度有所增加, 剪切应变带宽度通常<50km(Bonnin等, 2010; Ford等, 2014). 可见大陆转换

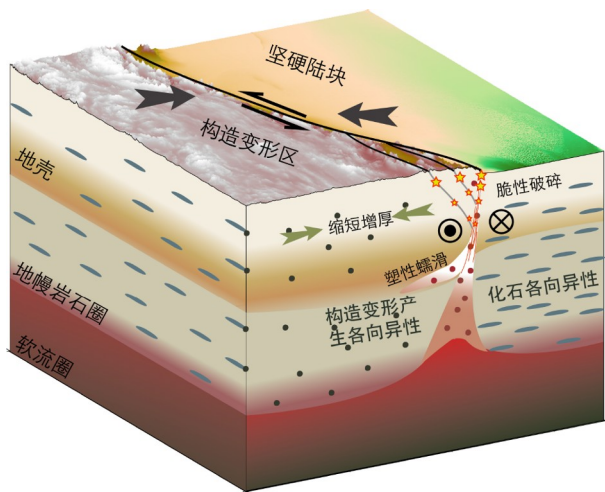


图 9 大陆转换断层的结构与变形示意图

黑色箭头代表相邻板块的相对运动方向, 绿色箭头指示地壳挤压缩短方向, 椭圆表示矿物晶体定向排列特征, 黑色圆点和叉号分别对应垂直于所在平面向外和向内的板块运动方向

断层在岩石圈地幔的剪切应变通常是集中分布, 与图 5A、5E和5F展示的断层模型类似, 断层在下地壳的结构形态是区分这些模型的关键。目前对大陆转换断层在中下地壳的展布特征约束很少, 虽然在阿尔卑斯断裂东侧观测到了向东倾斜的中下地壳滑脱层, 阿尔金断裂南侧也存在软弱的中下地壳结构, 但是对这些弱中下地壳结构的形成、空间展布特征和构造作用仍然认识非常不足, 需要进一步开展研究。这对理解大陆转换断层的演化以及大陆岩石圈的流变学特征至关重要。

大陆转换断层是大陆地震的集中分布区域, 历史上大量沿大陆转换断层的地震灾害造成了巨大的人员伤亡和经济损失, 比如1906年旧金山大地震和1999年土耳其伊兹密特地震等。虽然目前已经对大陆转换断层大尺度结构和变形模式有了较好的认识, 但是要获得大陆转换断层可靠的精细结构以及在地震周期中的结构变化特征, 将断层结构演化与灾害预测结合起来仍然极具挑战性。超密集地震台阵观测技术(Ben-Zion等, 2015; Zhang等, 2022)和分布式光纤观测技术(DAS)(Yang等, 2022; Atterholt等, 2024)的发展为利用地震学方法观测断裂带精细结构提供了新的机遇, 可以在断裂带的关键区域开展密集台阵研究获取断裂带的精细结构, 这对于理解断裂带的力学行为以及破裂模式至关重要。之前对断裂带的研究主要是聚焦在静

态结构刻画, 而大陆转换断层地震的产生是个动态的过程, 所以研究大陆转换断层上的地震发生过程和迁移规律, 除了需要获得精细物性结构, 也要关注断层结构高时间分辨率的动态演化过程。比如利用背景噪声尾波干涉监测跨断裂带的速度变化(Brenguier等, 2008; Qiu等, 2020; Sun等, 2025), 利用GNSS或InSAR网络监测断裂带区域地表形变(Xu等, 2021; Li等, 2021), 以深入剖析断裂带上地震发生的动态过程。

由于大陆岩石圈结构的复杂性, 大陆转换断层相对于大洋转换断层结构更加复杂多样, 地球物理成像结果为揭示断裂带结构和深部变形模式提供了关键依据。将高精度的静态结构成像与动态结构监测相结合, 有望为理解大陆转换断层的深浅部精细结构、动态演化和地震孕育发生机理提供关键线索。

致谢 程怡芳提供了加州地区地震目录, 张乐天提供了大地电磁成像结果; 本文图件采用GMT软件包绘制; 三位匿名审稿人提出的修改建议对本文的修改完善至关重要。在此一并致谢。

参考文献

- 常利军, 王椿镛. 2023. 青藏高原北部和塔里木盆地东部远震横波分裂特征及陆内碰撞变形分析. 中国科学: 地球科学, 53: 1572–1585
- 董云鹏, 惠博, 王博, 孙圣思, 姚华建, 刘俊来, 臧儒韬, 李永成, 罗庆兴. 2025. 转换断层与转移断层: 板块边界和陆内构造动力学转换. 中国科学: 地球科学, 55, doi: 10.1360/SSTe-2024-0233
- 孙圣思, 董云鹏, 黎乙希, 杨宜海, 程超, 惠博, 张彬, 臧儒韬. 2024. 大陆岩石圈流变与地震波速各向异性. 中国科学: 地球科学, 54: 31–63
- 徐锡伟, Tapponnier P, Van Der Woerd J, Ryerson J F, 王峰, 郑荣章, 陈文彬, 马文涛, 于贵华, 陈桂华, Meriaux A S. 2003. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论. 中国科学(D辑), 33: 967–978
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 郑德文. 2009. GPS观测及断裂晚第四纪滑动力率所反映的青藏高原北部变形. 地球物理学报, 52: 2491–2508
- 郑永飞. 2023. 21世纪板块构造. 中国科学: 地球科学, 53: 1–40
- 朱光, 刘程, 顾承申, 张帅, 李云剑, 苏楠, 肖世椰. 2018. 郯庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示. 中国科学: 地球科学, 48: 415–435
- Argus D F, Gordon R G. 2001. Present tectonic motion across the coast

- ranges and San Andreas fault system in central California. *GSA Bull*, 113: 1580–1592
- Atterholt J, Zhan Z, Yang Y, Zhu W. 2024. Imaging the Garlock fault zone with a fiber: A limited damage zone and hidden bimaterial contrast. *J Geophys Res-Solid Earth*, 129: e2024JB028900
- Audet P. 2015. Layered crustal anisotropy around the San Andreas fault near Parkfield, California. *J Geophys Res-Solid Earth*, 120: 3527–3543
- Baldock G, Stern T. 2005. Width of mantle deformation across a continental transform: Evidence from upper mantle (Pn) seismic anisotropy measurements. *Geology*, 33: 741
- Barka A. 1996. Slip distribution along the north Anatolian fault associated with the large earthquakes of the period 1939 to 1967. *Bull Seismol Soc Am*, 86: 1238–1254
- Beavan J, Ellis S, Wallace L, Denys P. 2007. Kinematic constraints from GPS on oblique convergence of the Pacific and Australian Plates, central South Island, New Zealand. In: Okaya D, Stern T, Davey F, eds. Washington D C: American Geophysical Union. 75–94
- Bécel A, Laigle M, de Voogd B, Hirn A, Taymaz T, Galvé A, Shimamura H, Murai Y, Lépine J C, Sapin M, Özalaybey S. 2009. Moho, crustal architecture and deep deformation under the North Marmara Trough, from the SEISMARMARA Leg 1 offshore-onshore reflection-refraction survey. *Tectonophysics*, 467: 1–21
- Becken M, Ritter O, Park S K, Bedrosian P A, Weckmann U, Weber M. 2008. A deep crustal fluid channel into the San Andreas fault system near Parkfield, California. *Geophys J Int*, 173: 718–732
- Becken M, Ritter O, Bedrosian P A, Weckmann U. 2011. Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault. *Nature*, 480: 87–90
- Becker T W, Lebedev S, Long M D. 2012. On the relationship between azimuthal anisotropy from shear wave splitting and surface wave tomography. *J Geophys Res*, 117: 2011JB008705
- Bedrosian P A, Unsworth M J, Wang F. 2001. Structure of the Altyn Tagh Fault and Daxue Shan from magnetotelluric surveys: Implications for faulting associated with the rise of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 20: 474–486
- Bektaş O, Eyüboğlu Y, Maden N. 2007. Different modes of stress transfer in a strike-slip fault zone: An example from the north Anatolian fault system in Turkey. *Turk J Earth Sci*, 16: 1–12
- Ben-Zion Y, Sammis C G. 2003. Characterization of fault zones. *Pure Appl Geophys*, 160: 677–715
- Ben-Zion Y, Peng Z, Okaya D, Seeber L, Armbruster J G, Ozer N, Michael A J, Baris S, Aktar M. 2003. A shallow fault-zone structure illuminated by trapped waves in the Karadere-Duzce branch of the north Anatolian fault, western Turkey. *Geophys J Int*, 152: 699–717
- Ben-Zion Y, Vernon F L, Ozakin Y, Zigone D, Ross Z E, Meng H, White M, Reyes J, Hollis D, Barklage M. 2015. Basic data features and results from a spatially dense seismic array on the San Jacinto fault zone. *Geophys J Int*, 202: 370–380
- Bonnin M, Barruol G, Bokelmann G H R. 2010. Upper mantle deformation beneath the North American-Pacific plate boundary in California from SKS splitting. *J Geophys Res*, 115: 2009JB006438
- Brenguier F, Campillo M, Hadziioannou C, Shapiro N M, Nadeau R M, Larose E. 2008. Postseismic relaxation along the San Andreas fault at Parkfield from continuous seismological observations. *Science*, 321: 1478–1481
- Bürgmann R, Dresen G. 2008. Rheology of the lower crust and upper mantle: Evidence from rock mechanics, geodesy, and field observations. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 36: 531–567
- Bürgmann R, Ergintav S, Segall P, Hearn E H, McClusky S, Reilinger R E, Woith H, Zschau J. 2002. Time-dependent distributed afterslip on and deep below the Izmit earthquake rupture. *Bull Seismol Soc Am*, 92: 126–137
- Chapman T, Milan L, Vry J. 2022. The role of metamorphic fluid in tectonic tremor along the Alpine Fault, New Zealand. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL096415
- Chen Y, Gilder S, Halim N, Cogné J P, Courtillot V. 2002. New paleomagnetic constraints on central Asian kinematics: Displacement along the Altyn Tagh fault and rotation of the Qaidam Basin. *Tectonics*, 21, doi: 10.1029/2001TC901030
- Cheng Y, Burgmann R, Allen R, Taira T, Liao Z. 2025. Statewide California focal mechanism catalog and stress model (1981–2021). 1
- Cowan H A. 1990. Late Quaternary displacements on the Hope fault at Glynn Wye, north Canterbury. *New Zealand J Geol Geophys*, 33: 285–293
- Cowgill E, Gold R D, Xuanhua C, Xiao-Feng W, Arrowsmith J R, Southon J. 2009. Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet. *Geology*, 37: 647–650
- Cox A, Hart R B. 1991. Plate Tectonics: How it Works. John Wiley & Sons
- Cox S C, Stirling M W, Herman F, Gerstenberger M, Ristau J. 2012. Potentially active faults in the rapidly eroding landscape adjacent to the Alpine Fault, central Southern Alps, New Zealand. *Tectonics*, 31: 2011TC003038
- Crampin S, Booth D C. 1985. Shear-wave polarizations near the north Anatolian fault—II. Interpretation in terms of crack-induced anisotropy. *Geophys J Int*, 83: 75–92
- Dai S, Dai W, Zhao Z, Luo J, Qiang L, Ma X, Zhang X, Xu J. 2017. Timing, displacement and growth pattern of the Altyn Tagh Fault: A review. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 91: 669–687

- Darin M H, Dorsey R J. 2013. Reconciling disparate estimates of total offset on the southern San Andreas fault. *Geology*, 41: 975–978
- Davey F J, Henyey T, Kleffmann S, Melhuish A, Okaya D, Stern T A, Woodward D J. South Island Geophysical Transect. 1995. Crustal reflections from the Alpine fault zone, South Island, New Zealand. *New Zealand J Geol Geophys*, 38: 601–604
- DeMets C, Gordon R G, Argus D F. 2010. Geologically current plate motions. *Geophys J Int*, 181: 1–80
- DESERT Group, Weber M, Abu-Ayyash K, Abueladas A, Agnon A, Al-Amoush H, Babeyko A, Bartov Y, Baumann M, Ben-Avraham Z, Bock G, Bribach J, El-Kelani R, Förster A, Förster H J, Frieslander U, Garfunkel Z, Grunewald S, Götze H J, Haak V, Haberland C, Hassouneh M, Helwig S, Hofstetter A, Jäckel K H, Kesten D, Kind R, Maercklin N, Mechie J, Mohsen A, Neubauer F M, Oberhänsli R, Qabbani I, Ritter O, Rumpker G, Rybakov M, Ryberg T, Scherbaum F, Schmidt J, Schulze A, Sobolev S, Stiller M, Thoss H, Weckmann U, Wylegalla K. 2004. The crustal structure of the Dead Sea transform. *Geophys J Int*, 156: 655–681
- Dong Z, Xiao Q, Sun Z, Han B, Wang L, Tang J, Wang J. 2024. Crustal electrical anisotropic structure of the Altyn Tagh Fault in the Subei Area, NW China: Implications for fault zone architecture. *J Geophys Res-Solid Earth*, 129: e2023JB028550
- Dou H, Xu Y, Lebedev S, Chagas de Melo B, van der Hilst R D, Wang B, Wang W. 2024. The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. *Earth-Sci Rev*, 255: 104841
- Duclos M, Savage M K, Tommasi A, Gledhill K R. 2005. Mantle tectonics beneath New Zealand inferred from SKS splitting and petrophysics. *Geophys J Int*, 163: 760–774
- Eccles J D, Gulley A K, Malin P E, Boese C M, Townend J, Sutherland R. 2015. Fault zone guided wave generation on the locked, late interseismic Alpine Fault, New Zealand. *Geophys Res Lett*, 42: 5736–5743
- England P, Houseman G, Nocquet J M. 2016. Constraints from GPS measurements on the dynamics of deformation in Anatolia and the Aegean. *J Geophys Res-Solid Earth*, 121: 8888–8916
- Ergintav S, Doğan U, Gerstenecker C, Çakmak R, Belgen A, Demirel H, Aydın C, Reilinger R. 2007. A snapshot (2003–2005) of the 3D postseismic deformation for the 1999, $M_w=7.4$ İzmit earthquake in the Marmara Region, Turkey, by first results of joint gravity and GPS monitoring. *J Geodyn*, 44: 1–18
- Faccenna C, Becker T W, Jolivet L, Keskin M. 2013. Mantle convection in the Middle East: Reconciling Afar upwelling, Arabia indentation and Aegean trench rollback. *Earth Planet Sci Lett*, 375: 254–269
- Fang H, White M C A, Lu Y, Ben-Zion Y. 2022. Seismic traveltime tomography of southern California using Poisson-Voronoi cells and 20 years of data. *J Geophys Res-Solid Earth*, 127: e2021JB023307
- Fichtner A, Saygin E, Taymaz T, Cupillard P, Capdeville Y, Trampert J. 2013. The deep structure of the north Anatolian fault zone. *Earth Planet Sci Lett*, 373: 109–117
- Flesch L, Holt W, Silver P, Stephenson M, Wang C, Chan W. 2005. Constraining the extent of crust-mantle coupling in central Asia using GPS, geologic, and shear wave splitting data. *Earth Planet Sci Lett*, 238: 248–268
- Ford H A, Fischer K M, Lekic V. 2014. Localized shear in the deep lithosphere beneath the San Andreas fault system. *Geology*, 42: 295–298
- Fraser J, Vanneste K, Hubert-Ferrari A. 2010. Recent behavior of the north Anatolian Fault: Insights from an integrated paleoseismological data set. *J Geophys Res*, 115: 2009JB006982
- Freund R, Garfunkel Z, Zak I, Goldberg M, Weissbrod T, Derin B, Bender F, Wellings F E, Girdler R W. 1970. The shear along the Dead Sea rift. *Philos Trans R Soc Lond Ser Math Phys Sci*, 267: 107–130
- Frisch W, Meschede M, Blakey R C. 2022. Transform Faults. In: Frisch W, Meschede M, Blakey R C, eds. *Plate Tectonics*. Cham: Springer International Publishing. 147–157
- Fu B, Awata Y. 2007. Displacement and timing of left-lateral faulting in the Kunlun fault zone, northern Tibet, inferred from geologic and geomorphic features. *J Asian Earth Sci*, 29: 253–265
- Fuis G S, Kohler M D, Scherwath M, Brink U T, Van Avendonk H J A, Murphy J M. 2007. A comparison between the transpressional plate boundaries of South Island, New Zealand, and southern California, USA: The Alpine and San Andreas fault Systems. In: Okaya D, Stern T, Davey F, eds. *Geophysical Monograph Series*. Washington, D. C.: American Geophysical Union. 307–327
- Fuis G S, Scheirer D S, Langenheim V E, Kohler M D. 2012. A new perspective on the geometry of the San Andreas fault in Southern California and its relationship to lithospheric structure. *Bull Seismol Soc Am*, 102: 236–251
- Gao Y, Wu J, Fukao Y, Shi Y, Zhu A. 2011. Shear wave splitting in the crust in North China: Stress, faults and tectonic implications. *Geophys J Int*, 187: 642–654
- Ge W, Shen Z, Molnar P, Wang M, Zhang P, Yuan D. 2022. GPS determined asymmetric deformation across central Altyn Tagh Fault reveals rheological structure of Northern Tibet. *J Geophys Res-Solid Earth*, 127: e2022JB024216
- Ghisetti F C, Sibson R H. 2006. Accommodation of compressional inversion in north-western South Island (New Zealand): Old faults versus new? *J Struct Geol*, 28: 1994–2010
- Gold R D, Cowgill E, Arrowsmith J R, Chen X, Sharp W D, Cooper K

- M, Wang X F. 2011. Faulted terrace risers place new constraints on the late Quaternary slip rate for the central Altyn Tagh fault, northwest Tibet. *GSA Bull*, 123: 958–978
- Gong J, Fan W, Parnell-Turner R. 2023. Machine learning-based new earthquake catalog illuminates on-fault and off-fault seismicity patterns at the discovery transform fault, East Pacific Rise. *Geochem Geophys Geosyst*, 24: e2023GC011043
- Grevenmeyer I, Rüpke L H, Morgan J P, Iyer K, Devey C W. 2021. Extensional tectonics and two-stage crustal accretion at oceanic transform faults. *Nature*, 591: 402–407
- Haberland C, Agnon A, El-Kelani R, Maercklin N, Qabbani I, Rumpker G, Ryberg T, Scherbaum F, Weber M. 2003. Modeling of seismic guided waves at the Dead Sea Transform. *J Geophys Res*, 108: 2002JB002309
- Haines A J, Wallace L M. 2020. New Zealand-wide geodetic strain rates using a physics-based approach. *Geophys Res Lett*, 47: e2019GL084606
- Hamiel Y, Piatibratova O. 2021. Spatial variations of slip and creep rates along the southern and Central Dead Sea Fault and the Carmel-Gilboa fault system. *J Geophys Res-Solid Earth*, 126: e2020JB021585
- Handy M R, Hirth G, Hovius N. 2007. Continental fault structure and rheology from the frictional-to-viscous transition downward. In: *Tectonic Faults: Agents of Change on a Dynamic Earth*. Cambridge: MIT Press. 139–182
- Hanmer S. 1988. Great Slave Lake shear zone, Canadian Shield: Reconstructed vertical profile of a crustal-scale fault zone. *Tectonophysics*, 149: 245–264
- Hansen S, Schwartz S, Al-Amri A, Rodgers A. 2006. Combined plate motion and density-driven flow in the asthenosphere beneath Saudi Arabia: Evidence from shear-wave splitting and seismic anisotropy. *Geology*, 34: 869
- Hasterok D, Halpin J A, Collins A S, Hand M, Kreemer C, Gard M G, Glorie S. 2022. New maps of global geological provinces and tectonic plates. *Earth-Sci Rev*, 231: 104069
- Hawkesworth C J, Brown M. 2018. Earth dynamics and the development of plate tectonics. *Phil Trans R Soc A*, 376: 20180228
- Hearn E H, McClusky S, Ergintav S, Reilinger R E. 2009. Izmit earthquake postseismic deformation and dynamics of the north Anatolian fault zone. *J Geophys Res*, 114: 2008JB006026
- Herquel G, Tapponnier P. 2005. Seismic anisotropy in western Tibet. *Geophys Res Lett*, 32: 2005GL023561
- Herquel G, Tapponnier P, Wittlinger G, Mei J, Danian S. 1999. Teleseismic Shear wave splitting and lithospheric anisotropy beneath and across the Altyn Tagh Fault. *Geophys Res Lett*, 26: 3225–3228
- Hole J A, Ryberg T, Fuis G S, Bleibinhaus F, Sharma A K. 2006. Structure of the San Andreas fault zone at SAFOD from a seismic refraction survey. *Geophys Res Lett*, 33: 2005GL025194
- Hua J, Fischer K M, Savage M K. 2018. The lithosphere-asthenosphere boundary beneath the South Island of New Zealand. *Earth Planet Sci Lett*, 484: 92–102
- Hubert-Ferrari A, Armijo R, King G, Meyer B, Barka A. 2002. Morphology, displacement, and slip rates along the north Anatolian fault, Turkey. *J Geophys Res*, 107, doi: 10.1029/2001JB000393
- Humphreys E, Clayton R W, Hager B H. 1984. A tomographic image of mantle structure beneath Southern California. *Geophys Res Lett*, 11: 625–627
- Humphreys E D, Hager B H. 1990. A kinematic model for the Late Cenozoic development of southern California crust and upper mantle. *J Geophys Res*, 95: 19747–19762
- Hussain E, Wright T J, Walters R J, Bekaert D P S, Lloyd R, Hooper A. 2018. Constant strain accumulation rate between major earthquakes on the north Anatolian fault. *Nat Commun*, 9: 1392
- Jackson J, McKenzie D. 1988. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. *Geophys J Int*, 93: 45–73
- Janssen C, Hoffmann-Rothe A, Bohnhoff M, Wetzel H U, Matar A, Khatib M. 2007. Different styles of faulting deformation along the Dead Sea Transform and possible consequences for the recurrence of major earthquakes. *J Geodyn*, 44: 66–89
- Jiang X, Jin Y, McNutt M K. 2004. Lithospheric deformation beneath the Altyn Tagh and West Kunlun faults from recent gravity surveys. *J Geophys Res*, 109: 2003JB002444
- Jiménez-Munt I, Sabadini R. 2002. The block-like behavior of Anatolia envisaged in the modeled and geodetic strain rates. *Geophys Res Lett*, 29, doi: 10.1029/2002GL015995
- Jiracek G R, Gonzalez V M, Caldwell T G, Wannamaker P E, Kilb D. 2007. Seismogenic, electrically conductive, and fluid zones at continental plate boundaries in New Zealand, Himalaya, and California, USA. *Geophys Monogr-Am Geophys Union*, 175: 347
- Johnson K M, Wallace L M, Maurer J, Hamling I, Williams C, Rollins C, Gerstenberger M, Van Dissen R. 2024. Inverting geodetic strain rates for slip deficit rate in complex deforming zones: An application to the New Zealand plate boundary. *J Geophys Res-Solid Earth*, 129: e2023JB027565
- Jolivet M, Brunel M, Seward D, Xu Z, Yang J, Malavieille J, Roger F, Leyreloup A, Arnaud N, Wu C. 2003. Neogene extension and volcanism in the Kunlun fault zone, northern Tibet: New constraints on the age of the Kunlun Fault. *Tectonics*, 22: 2002TC001428
- Karato S, Jung H, Katayama I, Skemer P. 2008. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: New

- insights from laboratory studies. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 36: 59–95
- Kaviani A, Hofstetter R, Rumpker G, Weber M. 2013. Investigation of seismic anisotropy beneath the Dead Sea fault using dense networks of broadband stations. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 3476–3491
- Kaya T, Kasaya T, Tank S B, Ogawa Y, Tuncer M K, Oshiman N, Honkura Y, Matsushima M. 2013. Electrical characterization of the north Anatolian fault zone underneath the Marmara Sea, Turkey by ocean bottom magnetotellurics. *Geophys J Int*, 193: 664–677
- Kidder S, Prior D J, Scott J M, Soleymani H, Shao Y. 2021. Highly localized upper mantle deformation during plate boundary initiation near the Alpine fault, New Zealand. *Geology*, 49: 1102–1106
- Koons P O, Norris R J, Craw D, Cooper A F. 2003. Influence of exhumation on the structural evolution of transpressional plate boundaries: An example from the Southern Alps, New Zealand. *Geology*, 31: 3
- Kuna V M, Nábělek J L, Braunmiller J. 2019. Mode of slip and crust-mantle interaction at oceanic transform faults. *Nat Geosci*, 12: 138–142
- Lamb S, Mortimer N, Smith E, Turner G. 2016. Focusing of relative plate motion at a continental transform fault: Cenozoic dextral displacement >700 km on New Zealand's Alpine Fault, reversing >225 km of Late Cretaceous sinistral motion. *Geochem Geophys Geosyst*, 17: 1197–1213
- Laske G, Weber M. 2008. Lithosphere structure across the Dead Sea Transform as constrained by Rayleigh waves observed during the DESERT experiment. *Geophys J Int*, 173: 593–610
- Lay V, Buske S, Townend J, Kellett R, Savage M, Schmitt D R, Constantinou A, Eccles J D, Gorman A R, Bertram M, Hall K, Lawton D, Kofman R. 2021. 3D active source seismic imaging of the Alpine fault zone and the Whataroa glacial valley in New Zealand. *J Geophys Res-Solid Earth*, 126: e2021JB023013
- Le Pichon X, Francheteau J, Bonnin J. 1973. Plate Tectonics. Amsterdam: Elsevier
- Legendre C P, Tseng T L, Zhao L. 2020. Surface-wave phase-velocity maps of the Anatolia region (Turkey) from ambient noise tomography. *J Asian Earth Sci*, 193: 104322
- Li X, Jónsson S, Liu S, Ma Z, Castro-Perdomo N, Cesca S, Masson F, Klinger Y. 2024. Resolving the slip-rate inconsistency of the northern Dead Sea fault. *Sci Adv*, 10: ead8408
- Li Y, Wu Q, Zhang F, Feng Q, Zhang R. 2011. Seismic anisotropy of the Northeastern Tibetan Plateau from shear wave splitting analysis. *Earth Planet Sci Lett*, 304: 147–157
- Li Y, Nocquet J M, Shan X. 2021. Crustal deformation across the western Altyn Tagh fault (86°E) from GPS and InSAR. *Geophys J Int*, 228: 1361–1372
- Li Y G, Aki K, Vidale J E, Lee W H K, Marone C J. 1994. Fine structure of the Landers fault zone: Segmentation and the rupture process. *Science*, 265: 367–370
- Licciardi A, Eken T, Taymaz T, Piana Agostinetti N, Yolsal-Çevikbilen S. 2018. Seismic anisotropy in central north Anatolian fault zone and its implications on crustal deformation. *Phys Earth Planet Inter*, 277: 99–112
- Lin F C, Ritzwoller M H, Yang Y, Moschetti M P, Fouch M J. 2011. Complex and variable crustal and uppermost mantle seismic anisotropy in the western United States. *Nat Geosci*, 4: 55–61
- Little T A, Holcombe R J, Ilg B R. 2002a. Kinematics of oblique collision and ramping inferred from microstructures and strain in middle crustal rocks, central Southern Alps, New Zealand. *J Struct Geol*, 24: 219–239
- Little T A, Savage M K, Tikoff B. 2002b. Relationship between crustal finite strain and seismic anisotropy in the mantle, Pacific-Australia plate boundary zone, South Island, New Zealand. *Geophys J Int*, 151: 106–116
- Liu C, Banerjee R, Grand S P, Sandvol E, Mitra S, Liang X, Wei S. 2024. A high-resolution seismic velocity model for East Asia using full-waveform tomography: Constraints on India-Asia collisional tectonics. *Earth Planet Sci Lett*, 639: 118764
- Lundgren P, Hetland E A, Liu Z, Fielding E J. 2009. Southern San Andreas-San Jacinto fault system slip rates estimated from earthquake cycle models constrained by GPS and interferometric synthetic aperture radar observations. *J Geophys Res*, 114: 2008JB005996
- Luo S, Yao H. 2021. Multistage tectonic evolution of the Tanlu fault: Insights from upper crustal azimuthal anisotropy of the Chao Lake segment. *Tectonophysics*, 806: 228795
- Luo S, Yao H, Zhang Z, Bem T S. 2022. High-resolution crustal and upper mantle shear-wave velocity structure beneath the central-southern Tanlu fault: Implications for its initiation and evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 595: 117763
- Luo S, Yao H, Wen J, Yang H, Tian B, Yan M. 2023. Apparent low-velocity belt in the shallow Anninghe fault zone in SW China and its implications for seismotectonics and earthquake hazard assessment. *J Geophys Res-Solid Earth*, 128: e2022JB025681
- Maia M, Sichel S, Briais A, Brunelli D, Ligi M, Ferreira N, Campos T, Mougél B, Brehme I, Hémond C, Motoki A, Moura D, Scalabrín C, Pessanha I, Alves E, Ayres A, Oliveira P. 2016. Extreme mantle uplift and exhumation along a transpressive transform fault. *Nat Geosci*, 9: 619–623
- Mark H F. 2024. Refining the extent and depth of the shear zone surrounding the Alpine Fault using receiver function harmonics. *Geophys Res Lett*, 51: e2024GL112092

- McClusky S, Balassanian S, Barka A, Demir C, Ergintav S, Georgiev I, Gurkan O, Hamburger M, Hurst K, Kahle H, Kastens K, Kekelidze G, King R, Kotzev V, Lenk O, Mahmoud S, Mishin A, Nadariya M, Ouzounis A, Paradissis D, Peter Y, Prilepin M, Reilinger R, Sanli I, Seeger H, Tealeb A, Toksöz M N, Veis G. 2000. Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. *J Geophys Res*, 105: 5695–5719
- McKenzie D. 1972. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys J Int*, 30: 109–185
- Meade B J, Hager B H. 2005. Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *J Geophys Res*, 110: 2004JB003209
- Meqbel N, Weckmann U, Muñoz G, Ritter O. 2016. Crustal metamorphic fluid flux beneath the Dead Sea Basin: Constraints from 2-D and 3-D magnetotelluric modelling. *Geophys J Int*, 207: 1609–1629
- Merry T A J, Bastow I D, Kounoudis R, Ogden C S, Bell R E, Jones L. 2021. The influence of the north Anatolian fault and a fragmenting slab architecture on upper mantle seismic anisotropy in the eastern Mediterranean. *Geochem Geophys Geosyst*, 22: e2021GC009896
- Miao W, Niu F, Chen H. 2023. Sharp changes of crustal seismic anisotropy across the central Tanlu fault zone in East China. *Geophys Res Lett*, 50: e2022GL099184
- Mohsen A, Hofstetter R, Bock G, Kind R, Weber M, Wylegalla K, Rumpker G. 2005. A receiver function study across the Dead Sea Transform. *Geophys J Int*, 160: 948–960
- Molnar P, Tapponnier P. 1978. Active tectonics of Tibet. *J Geophys Res*, 83: 5361–5375
- Molnar P, Dayem K E. 2010. Major intracontinental strike-slip faults and contrasts in lithospheric strength. *Geosphere*, 6: 444–467
- Molnar P, Burchfiel B C, Ziyun Z, K'uangyi L, Shuji W, Minmin H. 1987. Geologic evolution of northern Tibet: Results of an expedition to Ulugh Muztagh. *Science*, 235: 299–305
- Molnar P, Anderson H J, Audoin E, Eberhart-Phillips D, Gledhill K R, Klosko E R, McEvilly T V, Okaya D, Savage M K, Stern T, Wu F T. 1999. Continuous deformation versus faulting through the continental lithosphere of New Zealand. *Science*, 286: 516–519
- Moore M, England P, Parsons B. 2002. Relation between surface velocity field and shear wave splitting in the South Island of New Zealand. *J Geophys Res*, 107, doi: 10.1029/2000JB000093
- Murray J, Langbein J. 2006. Slip on the San Andreas fault at Parkfield, California, over two earthquake cycles, and the implications for seismic hazard. *Bull Seismol Soc Am*, 96: S283–S303
- Nadeau R M, Dolenc D. 2005. Nonvolcanic tremors deep beneath the San Andreas fault. *Science*, 307: 389
- Norris R J, Cooper A F. 2001. Late Quaternary slip rates and slip partitioning on the Alpine Fault, New Zealand. *J Struct Geol*, 23: 507–520
- Norris R J, Toy V G. 2014. Continental transforms: A view from the Alpine Fault. *J Struct Geol*, 64: 3–31
- Norris R J, Koons P O, Cooper A F. 1990. The obliquely-convergent plate boundary in the South Island of New Zealand: Implications for ancient collision zones. *J Struct Geol*, 12: 715–725
- Okaya D, Stern T, Davey F. 2013. A continental Plate Boundary: Tectonics at South Island, New Zealand. Hoboken: John Wiley & Sons
- Özalaybey S, Savage M K. 1995. Shear-wave splitting beneath western United States in relation to plate tectonics. *J Geophys Res*, 100: 18135–18149
- Ozener H, Yilmaz O, Dogru A, Turgut B, Gurkan O. 2013. GPS-derived velocity field of the Iznik-Mekece segment of the north Anatolian fault zone. *J Geodyn*, 67: 46–52
- Papaleo E, Cornwell D G, Rawlinson N. 2017. Seismic tomography of the north Anatolian fault: New insights into structural heterogeneity along a continental strike-slip fault. *Geophys Res Lett*, 44: 2186–2193
- Paul A, Karabulut H, Mutlu A K, Salaün G. 2014. A comprehensive and densely sampled map of shear-wave azimuthal anisotropy in the Aegean-Anatolia region. *Earth Planet Sci Lett*, 389: 14–22
- Peltzer G, Tapponnier P, Armijo R. 1989. Magnitude of Late Quaternary left-lateral displacements along the north edge of Tibet. *Science*, 246: 1285–1289
- Platt J P, Behr W M. 2011a. Deep structure of lithospheric fault zones. *Geophys Res Lett*, 38, doi: 10.1029/2011GL049719
- Platt J P, Behr W M. 2011b. Lithospheric shear zones as constant stress experiments. *Geology*, 39: 127–130
- Polet J, Kanamori H. 2002. Anisotropy beneath California: Shear wave splitting measurements using a dense broadband array. *Geophys J Int*, 149: 313–327
- Provost A S, Chéry J, Hassani R. 2003. 3D mechanical modeling of the GPS velocity field along the north Anatolian fault. *Earth Planet Sci Lett*, 209: 361–377
- Qiu H, Hillers G, Ben-Zion Y. 2020. Temporal changes of seismic velocities in the San Jacinto fault zone associated with the 2016 M_w 5.2 Borrego Springs earthquake. *Geophys J Int*, 220: 1536–1554
- Quennell A M. 1958. The structural and geomorphic evolution of the Dead Sea rift. *Q J Geol Soc Lond*, 114: 1–24
- Revenaugh J, Reasoner C. 1997. Cumulative offset of the San Andreas fault in central California: A seismic approach. *Geology*, 25: 123–126
- Ross Z E, Idini B, Jia Z, Stephenson O L, Zhong M, Wang X, Zhan Z, Simons M, Fielding E J, Yun S H, Hauksson E, Moore A W, Liu Z,

- Jung J. 2019. Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence. *Science*, 366: 346–351
- Ross Z E, Cochran E S, Trugman D T, Smith J D. 2020. 3D fault architecture controls the dynamism of earthquake swarms. *Science*, 368: 1357–1361
- Rümpker G, Ryberg T, Bock G, Desert Seismology Group G. 2003. Boundary-layer mantle flow under the Dead Sea transform fault inferred from seismic anisotropy. *Nature*, 425: 497–501
- Ryberg T, Rümpker G, Haberland C, Stromeyer D, Weber M. 2005. Simultaneous inversion of shear wave splitting observations from seismic arrays. *J Geophys Res*, 110: 2004JB003303
- Sadeh M, Hamiel Y, Ziv A, Bock Y, Fang P, Wdowinski S. 2012. Crustal deformation along the Dead Sea Transform and the Carmel Fault inferred from 12 years of GPS measurements. *J Geophys Res*, 117: 2012JB009241
- Salmon M, Kennett B L N, Stern T, Aitken A R A. 2013. The Moho in Australia and New Zealand. *Tectonophysics*, 609: 288–298
- Sandvol E, Turkelli N, Zor E, Gok R, Bekler T, Gurbuz C, Seber D, Barazangi M. 2003. Shear wave splitting in a young continent-continent collision: An example from Eastern Turkey. *Geophys Res Lett*, 30: 2003GL017390
- Savage M K, Duclos M, Marson-Pidgeon K. 2007a. Seismic anisotropy in South Island, New Zealand. In: Okaya D, Stern T, Davey F, eds. *Geophys Monogr Ser.* Washington, D. C.: American Geophysical Union. 95–114
- Savage M K, Tommasi A, Ellis S, Chery J. 2007b. Modeling strain and anisotropy along the Alpine Fault, South Island, New Zealand. In: Okaya D, Stern T, Davey F, eds. *Geophys. Monogr. Ser.* Washington, D. C.: American Geophysical Union. 289–305
- Scherwath M, Stern T, Davey F, Okaya D, Holbrook W S, Davies R, Kleffmann S. 2003. Lithospheric structure across oblique continental collision in New Zealand from wide-angle P wave modeling. *J Geophys Res*, 108: 2002JB002286
- Schlaphorst D, Rychert C A, Harmon N, Hicks S P, Bogiatzis P, Kendall J M, Abercrombie R E. 2023. Local seismicity around the Chain Transform Fault at the Mid-Atlantic Ridge from OBS observations. *Geophys J Int*, 234: 1111–1124
- Scholz C H. 1998. Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391: 37–42
- Şengör A M C, Görür N, Şaroğlu F. 1985. Strike-slip faulting and related basin formation in zones of tectonic escape: Turkey as a case study. In: Biddle K T, Christie-Blick N, eds. *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation*. 227–264
- Şengör A M C, Tüysüz O, İmren C, Sakıncı M, Eyidoğan H, Görür N, Le Pichon X, Rangin C. 2005. The north Anatolian fault: A new look. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 33: 37–112
- Şengör A M C, Zabcı C, Natal'in B A. 2019. Continental Transform Faults: Congruence and Incongruence With Normal Plate Kinematics. In: Duarte J C, ed. *Transform Plate Boundaries Fract Zones*. Amsterdam: Elsevier. 169–247
- Şengör A M C, Zabcı C, Natal'in B A. 2021. Continental Transform Faults. In: Alderton D, Elias S A, eds. *Encyclopedia of Geology*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier. 913–929
- Seong Y B, Kang H C, Ree J, Yi C, Yoon H. 2011. Constant slip rate during the late Quaternary along the Sulu He segment of the Altyn Tagh Fault near Changma, Gansu, China. *Island Arc*, 20: 94–106
- Shao Y, Prior D J, Scott J M, Negrini M. 2021. Pre-Alpine fault fabrics in mantle xenoliths from East Otago, South Island, New Zealand. *J Geophys Res-Solid Earth*, 126: e2020JB020196
- Shao Y, Prior D J, Scott J M, Kidder S B, Negrini M. 2022. Alpine fault-related microstructures and anisotropy of the mantle beneath the Southern Alps, New Zealand. *J Geophys Res-Solid Earth*, 127: e2022JB024950
- Sheffels B, McNutt M. 1986. Role of subsurface loads and regional compensation in the isostatic balance of the transverse ranges, California: Evidence for intracontinental subduction. *J Geophys Res*, 91: 6419–6431
- Shelly D R. 2010. Migrating tremors illuminate complex deformation beneath the seismogenic San Andreas fault. *Nature*, 463: 648–652
- Shelly D R, Johnson K M. 2011. Tremor reveals stress shadowing, deep postseismic creep, and depth-dependent slip recurrence on the lower-crustal San Andreas fault near Parkfield. *Geophys Res Lett*, 38, doi: 10.1029/2011GL047863
- Shen L, Hooper A, Elliott J R, Wright T J. 2024. Variability in interseismic strain accumulation rate and style along the Altyn Tagh Fault. *Nat Commun*, 15: 6876
- Shi Y, Gao Y, Shen X, Liu K H. 2020. Multiscale spatial distribution of crustal seismic anisotropy beneath the northeastern margin of the Tibetan plateau and tectonic implications of the Haiyuan fault. *Tectonophysics*, 774: 228274
- Sibson R H. 1983. Continental fault structure and the shallow earthquake source. *J Geol Soc*, 140: 741–767
- Stern T, Molnar P, Okaya D, Eberhart-Phillips D. 2000. Teleseismic P wave delays and modes of shortening the mantle lithosphere beneath South Island, New Zealand. *J Geophys Res*, 105: 21615–21631
- Stern T, Kleffmann S, Okaya D, Scherwath M, Bannister S. 2001. Low seismic-wave speeds and enhanced fluid pressure beneath the Southern Alps of New Zealand. *Geology*, 29: 679–682
- Stern T, Okaya D, Kleffmann S, Scherwath M, Henrys S, Davey F. 2007. Geophysical exploration and dynamics of the Alpine fault zone. In: Okaya D, Stern T, Davey F, eds. *Geophys. Monogr. Ser.* Washington, D. C.: American Geophysical Union. 207–233
- Stirling M, McVerry G, Gerstenberger M, Litchfield N, Van Dissen R,

- Berryman K, Barnes P, Wallace L, Villamor P, Langridge R, Lamarche G, Nodder S, Reyners M, Bradley B, Rhoades D, Smith W, Nicol A, Pettinga J, Clark K, Jacobs K. 2012. National seismic hazard model for New Zealand: 2010 update. *Bull Seismol Soc Am*, 102: 1514–1542
- Sun T, Yao H, Yang H, Yu C, Luo S, Sheng Y. 2025. Pronounced temporal velocity variations within the fault fracture zone in response to Earth tide modes. *Natl Sci Rev*, 12: nwaf023
- Thurber C, Zhang H, Waldhauser F, Hardebeck J, Michael A, Eberhart-Phillips D. 2006. Three-dimensional compressional wavespeed model, earthquake relocations, and focal mechanisms for the Parkfield, California, region. *Bull Seismol Soc Am*, 96: S38–S49
- Tian X, Behn M D, Ito G, Schierjott J C, Kaus B J P, Popov A A. 2024. Magmatism controls global oceanic transform fault topography. *Nat Commun*, 15: 1914
- Toy V G, Prior D J, Norris R J. 2008. Quartz fabrics in the Alpine Fault mylonites: Influence of pre-existing preferred orientations on fabric development during progressive uplift. *J Struct Geol*, 30: 602–621
- Toy V G, Craw D, Cooper A F, Norris R J. 2010. Thermal regime in the central Alpine fault zone, New Zealand: Constraints from microstructures, biotite chemistry and fluid inclusion data. *Tectonophysics*, 485: 178–192
- Türkoğlu E, Unsworth M, Bulut F, Çağlar İ. 2015. Crustal structure of the north Anatolian and east Anatolian fault systems from magnetotelluric data. *Phys Earth Planet Inter*, 241: 1–14
- Van Avendonk H J A, Holbrook W S, Okaya D, Austin J K, Davey F, Stern T. 2004. Continental crust under compression: A seismic refraction study of South Island Geophysical Transect I, South Island, New Zealand. *J Geophys Res*, 109: 2003JB002790
- Vauchez A, Tommasi A. 2003. Wrench faults down to the asthenosphere: Geological and geophysical evidence and thermomechanical effects. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 210: 15–34
- Vinnik L, Oreshin S, Erduran M. 2016. Melt in the mantle and seismic azimuthal anisotropy: Evidence from Anatolia. *Geophys J Int*, 205: 523–530
- Wallace L M, Beavan J, McCaffrey R, Berryman K, Denys P. 2007. Balancing the plate motion budget in the South Island, New Zealand using GPS, geological and seismological data. *Geophys J Int*, 168: 332–352
- Wang C, Mooney W D, Wang X, Chang L, Yao Z, Lou H. 2024. Intra-continental collision of the Tarim Basin and the Northern Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Solid Earth*, 129: e2024JB028668
- Wang H, Huang Z, Eken T, Keleş D, Kaya-Eken T, Confal J M, Erman C, Yolsal-Çevikbilen S, Zhao D, Taymaz T. 2020. Isotropic and anisotropic P wave velocity structures of the crust and uppermost mantle Beneath Turkey. *J Geophys Res-Solid Earth*, 125: e2020JB019566
- Wannamaker P E, Jiracek G R, Stodt J A, Caldwell T G, Gonzalez V M, McKnight J D, Porter A D. 2002. Fluid generation and pathways beneath an active compressional orogen, the New Zealand Southern Alps, inferred from magnetotelluric data. *J Geophys Res*, 107, doi: 10.1029/2001JB000186
- Weber M, AbuAyyash K, Abueladas A, Agnon A, Alasonati-Tašárová Z, Al-Zubi H, Babeyko A, Bartov Y, Bauer K, Becken M, Bedrosian P A, BenAvraham Z, Bock G, Bohnhoff M, Bribach J, Dulski P, Ebbing J, ElKelani R, Förster A, Förster H, Frieslander U, Garfunkel Z, Goetze H J, Haak V, Haberland C, Hassouneh M, Helwig S, Hofstetter A, Hoffmann-Rothe A, Jäckel K H, Janssen C, Jaser D, Kesten D, Khatib M, Kind R, Koch O, Koulakov I, Laske G, Maercklin N, Masarweh R, Masri A, Matar A, Mechie J, Meqbel N, Plessen B, Möller P, Mohsen A, Oberhänsli R, Oreshin S, Petrunin A, Qabbani I, Rabba I, Ritter O, Romer R L, Rumpker G, Rybakov M, Ryberg T, Saul J, Scherbaum F, Schmidt S, Schulze A, Sobolev S V, Stiller M, Stromeyer D, Tarawneh K, Trela C, Weckmann U, Wetzel U, Wylegalla K. 2009. Anatomy of the Dead Sea Transform from lithospheric to microscopic scale. *Rev Geophys*, 47: 2008RG000264
- Wech A G, Boese C M, Stern T A, Townend J. 2012. Tectonic tremor and deep slow slip on the Alpine Fault. *Geophys Res Lett*, 39: 2012GL051751
- Wei W, Zhao D, Wei F, Bai X, Xu J. 2019. Mantle dynamics of the Eastern Mediterranean and Middle East: Constraints from P-wave anisotropic tomography. *Geochem Geophys Geosyst*, 20: 4505–4530
- Weiss T, Siegesmund S, Rabbal W, Bohlen T, Pohl M. 1999. Seismic velocities and anisotropy of the lower continental crust: A review. *Pure Appl Geophys*, 156: 97–122
- Wellman H W, Willett R W. 1942. The geology of the west coast from Abut Head to Milford Sound: Part I. Royal Society of New Zealand, 71: 282–306
- Wessel P, Smith W H F, Scharroo R, Luis J, Wobbe F. 2013. Generic mapping tools: Improved version released. *EoS Trans*, 94: 409–410
- Westaway R, Arger J. 2001. Kinematics of the Malatya-Ovacık fault zone. *Geodinamica Acta*, 14: 103–131
- Wilson J T. 1965. A new class of faults and their bearing on continental drift. *Nature*, 207: 343–347
- Wittlinger G, Vergne J, Tapponnier P, Farra V, Poupinet G, Jiang M, Su H, Herquel G, Paul A. 2004. Teleseismic imaging of subducting lithosphere and Moho offsets beneath western Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 221: 117–130
- Wright T, Parsons B, Fielding E. 2001. Measurement of interseismic strain accumulation across the north Anatolian fault by satellite

- radar interferometry. *Geophys Res Lett*, 28: 2117–2120
- Wu C, Xu T, Tian X, Mitchell R N, Lin J, Yang J, Wang X, Lu Z. 2024. Underthrusting of Tarim lower crust beneath the Tibetan Plateau revealed by receiver function imaging. *Geophys Res Lett*, 51: e2024GL108220
- Xiao Q, Zhao G, Dong Z. 2011. Electrical resistivity structure at the northern margin of the Tibetan Plateau and tectonic implications. *J Geophys Res*, 116: B12401
- Xiao Q, Yu G, Liu-Zeng J, Oskin M E, Shao G. 2017. Structure and geometry of the Aksay restraining double bend along the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, imaged using magnetotelluric method. *Geophys Res Lett*, 44: 4090–4097
- Xu X, Sandwell D T, Klein E, Bock Y. 2021. Integrated sentinel-1 InSAR and GNSS time-series along the San Andreas fault system. *J Geophys Res-Solid Earth*, 126: e2021JB022579
- Yang Y, Atterholt J W, Shen Z, Muir J B, Williams E F, Zhan Z. 2022. Sub-kilometer correlation between nearsurface structure and ground motion measured with distributed acoustic sensing. *Geophys Res Lett*, 49: e2021GL096503
- Yilmaz H, Over S, Ozden S. 2006. Kinematics of the East Anatolian fault zone between Turkoglu (Kahramanmaras) and Celikhan (Adiyaman), eastern Turkey. *Earth Planet Sp*, 58: 1463–1473
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 28: 211–280
- Yin A, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, Ingersoll R V, Qing Z, Xian-Qiang Z, Xiao-Feng W, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. *GSA Bull*, 114: 1257–1295
- Yuan Z, Huang J, Gan J, Liu H. 2024. New constraints for slip rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet Plateau. *J Struct Geol*, 186: 105221
- Yue Y, Ritts B D, Graham S A. 2001. Initiation and long-term slip history of the Altyn Tagh fault. *Int Geol Rev*, 43: 1087–1093
- Zhang L, Unsworth M, Jin S, Wei W, Ye G, Jones A G, Jing J, Dong H, Xie C, Le Pape F, Vozar J. 2015. Structure of the Central Altyn Tagh fault revealed by magnetotelluric data: New insights into the structure of the northern margin of the India-Asia collision. *Earth Planet Sci Lett*, 415: 67–79
- Zhang Z, Deng Y, Qiu H, Peng Z, Liu-Zeng J. 2022. High-resolution imaging of fault zone structure along the creeping section of the Haiyuan fault, NE Tibet, from data recorded by dense seismic arrays. *J Geophys Res-Solid Earth*, 127: e2022JB024468
- Zhao J, Mooney W D, Zhang X, Li Z, Jin Z, Okaya N. 2006. Crustal structure across the Altyn Tagh Range at the northern margin of the Tibetan Plateau and tectonic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 241: 804–814
- Zhao T, Zhu G, Lin S, Wang H. 2016. Indentation-induced tearing of a subducting continent: Evidence from the Tan-Lu fault zone, East China. *Earth-Sci Rev*, 152: 14–36
- Zietlow D W, Sheehan A F, Molnar P H, Savage M K, Hirth G, Collins J A, Hager B H. 2014. Upper mantle seismic anisotropy at a strike-slip boundary: South Island, New Zealand. *J Geophys Res-Solid Earth*, 119: 1020–1040

(责任编委: 李三忠)