

杨宜海. 2025. 基于接收函数方位变化的青藏高原地壳各向异性研究进展[J]. 地球与行星物理论评 (中英文), 56(3): 313-326. doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-052.

Yang Y H. 2025. Review on crustal anisotropy investigations beneath the Qinghai-Xizang Plateau based on azimuthal variations of receiver functions[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 56(3): 313-326 (in Chinese). doi:10.19975/j.dqyxx.2024-052.

## 基于接收函数方位变化的青藏高原地壳各向异性研究进展

杨宜海<sup>1,2</sup>

1 陕西省地震局, 西安 710068

2 陕西西安地球深部构造中国地震局野外科学观测研究站, 西安 710068

**摘要:** 地震各向异性提供了地壳和地幔在过去及现今变形情况等关键信息, 对理解地球内部结构及深部动力学过程至关重要. 接收函数是探测地下速度间断面、物质组成和各向异性的常用手段, 具有较高的横向分辨率. 近年来, 基于接收函数方位变化分析地壳方位各向异性的方法被广泛应用到青藏高原隆升和扩展机制的研究中, 构建了青藏高原较高分辨率的地壳各向异性图像. 本文首先介绍了关于青藏高原隆升扩展的主要模型、地震各向异性的成因机制和利用接收函数分析地壳各向异性的研究方法. 然后对近年来基于接收函数方位变化研究青藏高原地壳各向异性的进展进行了详细介绍. 最后总结了存在的不足和主要认识. 尽管目前对于地壳各向异性的成因机制仍存在争议, 但是这些研究为青藏高原的地壳各向异性特征提供了重要的观测约束, 同时对于高原隆升扩展机制具有重要启示意义. 基于接收函数方法较高的横向分辨率和越来越多的密集台阵观测, 未来有望观测到更多的地壳变形细节, 在深部动力学过程研究中发挥重要作用.

**关键词:** 青藏高原; 接收函数; 各向异性; S 波分裂; 动力学过程

doi: 10.19975/j.dqyxx.2024-052

中图分类号: P315

文献标识码: A

## Review on crustal anisotropy investigations beneath the Qinghai-Xizang Plateau based on azimuthal variations of receiver functions

Yang Yihai<sup>1,2</sup>

1 Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China

2 Shaanxi Xi'an Deep Earth Structure Observation and Research Station of China Earthquake Administration, Xi'an 710068, China

**Abstract:** Seismic anisotropy provides key information about the past and present deformations of the crust and mantle below and is crucial for understanding the interior structure of the Earth and deep dynamic processes. Receiver function is a frequently used method with high lateral resolution to detect velocity discontinuity, composition and anisotropy. In recent years, investigating crustal azimuthal anisotropy based on the azimuthal variations of receiver functions has been widely applied to the study of the uplift and expansion mechanisms of the Qinghai-Xizang Plateau. This paper first briefly introduces several main models regarding the uplift and expansion of the Qinghai-Xizang Plateau, the formation mechanisms of seismic anisotropy, and the methods for analyzing crustal anisotropy using receiver functions. Then the recent advances in studying crustal anisotropy of the Qinghai-Xizang Plateau based on the azimuthal variations of receiver functions are introduced in detail. Finally, based on the current research status, this paper briefly summarizes the challenges and conclusions. Although the formation mecha-

收稿日期: 2024-10-31; 录用日期: 2024-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42004048); 陕西省创新人才推进计划 (2022KJXX-22); 陕西省自然科学基金研究计划资助项目 (2024JC-YBMS-219, 2020JQ-979)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42004048), the Innovation Talents Promotion Plan of Shaanxi Province (Grant No. 2022KJXX-22), and the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (Grant Nos. 2024JC-YBMS-219, 2020JQ-979)

第一作者: 杨宜海 (1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事地震学研究. E-mail: yangyh529@163.com



nisms of the observed crustal anisotropy remain controversial, these studies provide important observational constraints on the crustal anisotropy characteristics of the Qinghai-Xizang Plateau and significant implications into its uplift and expansion mechanisms. Based on the high lateral resolution of the receiver function method and an increasing number of dense seismic array observations, it is expected that more details of crustal deformation will be observed in the future, which will play a significant role in the study of deep dynamic processes.

**Keywords:** Qinghai-Xizang Plateau; receiver function; seismic anisotropy; S-wave splitting; dynamic process

## 0 引言

新生代印度板块与欧亚大陆板块的挤压碰撞造就了全球最大、海拔最高的青藏高原 (吕苗苗, 2019; 吴中海, 2024)。数十年来, 青藏高原一直是全球造山带研究的热点地区之一, 是研究陆陆碰撞变形的理想实验室。国内外科学家在青藏高原开展了大量野外观测和研究, 提出了许多模型来解释青藏高原的隆升和扩展机制, 如对流减薄模型 (Houseman et al., 1981)、纯剪切模型 (Tapponnier et al., 1982, 2001)、下地壳流模型 (Clark and Royden, 2000; Royden et al., 1997)、黏性薄片模型 (England and Houseman, 1985; Flesch et al., 2005)。不同模型具有不同的岩石圈强度和变形特征, 探讨不同模型需要厘清形变集中在块体边界、中下地壳还是广泛分布于整个岩石圈, 以及壳幔是耦合变形还是解耦变形。因此研究壳幔变形特征为上述科学问题探讨提供重要约束, 而地震各向异性是探讨深部地壳及地幔变形特征的最主要手段之一。

为了研究青藏高原的深部结构, 国内外地震学家在青藏高原布设了大量野外流动地震台站。这些流动观测经历了由早期的国际合作观测为主, 如 PASSCAL (Owens et al., 1993)、INDEPTH (Kosarev et al., 1999)、Hi-CLIMB (Nabelek et al., 2009), 逐渐发展到由我国研究机构独立观测为主, 如中国地震局的 ChinArray (ChinArray, 2006)、中国科学院青藏高原研究所的 ANTILOPE (Zhao et al., 2010)、中国科学院地质与地球物理研究所的 TW-80 (Zhang et al., 2014) 和 SANDWICH (Liang et al., 2016)、中国地震局地质研究所的川西台阵 (Liu et al., 2014; 王怀富等, 2020)。基于丰富的观测数据取得了诸多重要研究进展, 其中许多研究开展了利用接收函数方位变化研究青藏高原的地壳各向异性工作, 构建了较高分辨率的地壳各向异性图像。这些研究为青藏高原的地壳各向异性特征提供了重要的观测约束, 同时对于高原隆升扩展机制具有重要

启示意义。本文重点对这部分工作进行梳理和详细介绍, 总结青藏高原隆升扩展机制研究的最新进展。

## 1 各向异性的成因机制

地震各向异性广泛存在于地壳和地幔。它可以通过快波偏振方向和慢波延迟时间描述, 分别表征了介质的变形方向和强度。根据各向异性的成因机制, 可以分为形态优选 (shape-preferred orientation, SPO) 各向异性和晶格优选 (lattice-preferred orientation, LPO) 各向异性。在地壳内部, 上地壳裂隙的定向排列、断层组构以及中下地壳各向异性矿物 (如云母和角闪石) 的晶格定向排列均可引起各向异性。在地幔, 上地幔的各向异性主要来源于橄榄石的晶格定向排列, 软流圈顶部与岩石圈地幔的相对运动 (简单剪切) 也可形成可观测的各向异性。这些各向异性的强度通常只有几个百分量 (<5%), 但却对地下的深部变形过程提供了重要约束 (Stein and Wysession, 2003)。

此外, 一些实验和观测研究还揭示了强各向异性的产生机制。如熔体的定向分布 (melt-preferred orientation, MPO) 能够引起强烈的地震波各向异性 (杨彧等, 2010; Yang Y et al., 2019)。当地壳深部岩石发生低度部分熔融并适度定向, 则熔体产生的各向异性可以接近甚至超过 LPO 产生的各向异性强度。而由于熔体囊长轴方向与构造面理方向接近, 因此观测的各向异性为两者叠加的结果。只需要 5%~7% 的熔融度, MPO 就可产生 3%~12% 的 S 波各向异性 (Yang Y et al., 2019)。强烈剪切作用同样可以产生强地震各向异性。实验研究表明, 强烈剪切变形的角闪石可具有高达 13% 的 S 波各向异性 (Tatham et al., 2008)。此外, 橄榄石的蛇纹石化也可贡献强地震各向异性。研究表明, 20.4% 的蛇纹石化就可产生 10% 的 S 波各向异性, 完全改变橄榄石组构产生的快波方向 (Boudier et al., 2010; Sun et al., 2016; 孙圣思等, 2024)。

## 2 地壳各向异性分析方法

接收函数是从远震体波记录中分离的台站下方介质响应 (Langston, 1979), 记录了地震波对地下速度间断面的响应. 由于接收函数方法采用的远场地震射线以近垂直方向入射到观测台站 (图 1), 对台站下方结构为小孔径采样, 具有较高的横向分辨率 (陈凌等, 2022). 因此接收函数在探测观测台站下方速度结构 (Ammon et al., 1990)、速度间断面 (Zhu, 2000)、波速比 ( $V_p/V_s$ ; Zhu and Kanamori, 2000) 和各向异性 (McNamara and Owens, 1993) 等方面均有广泛应用.

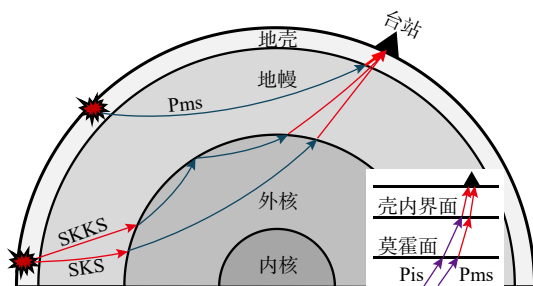


图 1 Pms 及 SKS、SKKS 传播路径示意图. 插图为 Pis 和 Pms 在地壳内传播示意图

Fig. 1 Illustration of ray paths of Pms, SKS and SKKS phases. Inset map: illustration of ray paths of Pis and Pms phases within the crust

目前已有多种方法从接收函数中提取地壳各向异性. 采用 S 波分裂测量方法可以便捷获取地壳各向异性信息 (如, Chen et al., 2013; McNamara and Owens, 1993; 孙长青等, 2013; 谢振新等, 2017; 徐震等, 2006; Yang et al., 2015), 但是该方法容易受到 Pms 震相信噪比不高的影响 (Liu and Niu, 2012; Zeng et al., 2024). 利用接收函数反演地壳结构是获取地壳各向异性的另一个方法, 通过拟合实际观测与模型合成的接收函数波形确定地壳各向异性 (如, Levin and Park, 1997; Ozacar and Zandt, 2004; 齐少华等, 2016; 田宝峰等, 2008; Wang et al., 2020), 然而该方法依赖一定的先验信息 (如模型分层及波速比等) 以提供合理约束.

近年来, 通过分析接收函数的方位变化获取地壳方位各向异性已成为一种常规手段. 该方法的基本思路是基于单台观测的接收函数数据集, 通过分析 Pms 震相到时和/或振幅随反方位角的变化特征以确定地壳各向异性参数 (Liu and Niu, 2012). 不同学者基于该思路发展了不同的具体分析方法. 如 Liu 和 Niu (2012) 提出了联合径向接收函数和切向接收函数 Pms 方位变化的分析方法. Rumpker 等

(2014) 进一步发展了基于壳内 P-S 转换震相 (Pis) 和 Pms 震相 (图 1) 分析多层各向异性的“剥层法” (layer stripping). Shen 等 (2015) 在对径向接收函数进行谐波分析的同时, 引入了基于切向接收函数的方位加权叠加方法 AWST (azimuth-weighted stacking of TRFs), 综合分析获取可靠的各向异性参数. Wu 等 (2015) 通过拟合径向接收函数 Pms 到时的方位变化获取了青藏高原西部的地壳各向异性. 韩明等 (2017) 通过测试发现拟合 Pms 到时比振幅叠加方法更稳定可靠. Xu 等 (2018) 提出了多台叠加方法, 在对单台分析时, 加入分析台站周边  $0.5^\circ$  范围内其他台站的接收函数, 进行统一谐波分析获取分析台站的地壳各向异性. Li 等 (2019) 在分析 Pms 方位变化时同时考虑了倾斜界面、水平和倾斜对称轴各向异性等情况, 提出了  $H-\kappa-c$  方法, 即利用谐波校正后的接收函数 (移除上述影响) 进行  $H-\kappa$  域叠加搜索. Yang 等 (2022) 测试发现是否考虑倾斜界面影响会导致平均  $15^\circ$  的地壳快波方向误差和  $\sim 25\%$  的延迟时间误差.

与 S 波分裂方法类似, 接收函数方位变化获取的各向异性是 S 波传播路径上各向异性的采样, 反映了地壳内各向异性的综合效应, 因此尽管接收函数方法能将观测的各向异性约束到地壳内, 但是不具有纵向分辨率. 利用剥层法获取地壳分层各向异性, 可以在一定程度上克服上述缺陷. 综合分析地壳各向异性与地表形变场、区域应力场及各向异性层析成像资料, 也可以约束地下不同层位的耦合变形情况. 此外, 远震 S 波 (XKS) 同样以高角度入射到台站下方 (图 1), 通常被认为反映了观测点下方岩石圈各向异性, 因此许多研究通过对比 Pms 与 XKS 的各向异性差异, 分析岩石圈地幔的变形特征及其与地壳变形的关系. 近年来, 利用接收函数方位变化分析地壳各向异性的方法在青藏高原 (图 2) 和我国东北 (张凯文等, 2020)、华北 (Miao et al., 2023; Wu et al., 2021; Xu et al., 2021; 杨妍等, 2018; 张永谦等, 2024; Zheng et al., 2019; Zheng et al., 2024) 及华南 (Han et al., 2022; 穆青等, 2023; 聂仕潭等, 2023; Shahzad et al., 2021; Shi et al., 2023) 等地区开展了广泛应用.

## 3 研究进展

### 3.1 青藏中南部

青藏高原中南部位于欧亚板块与印度板块碰撞

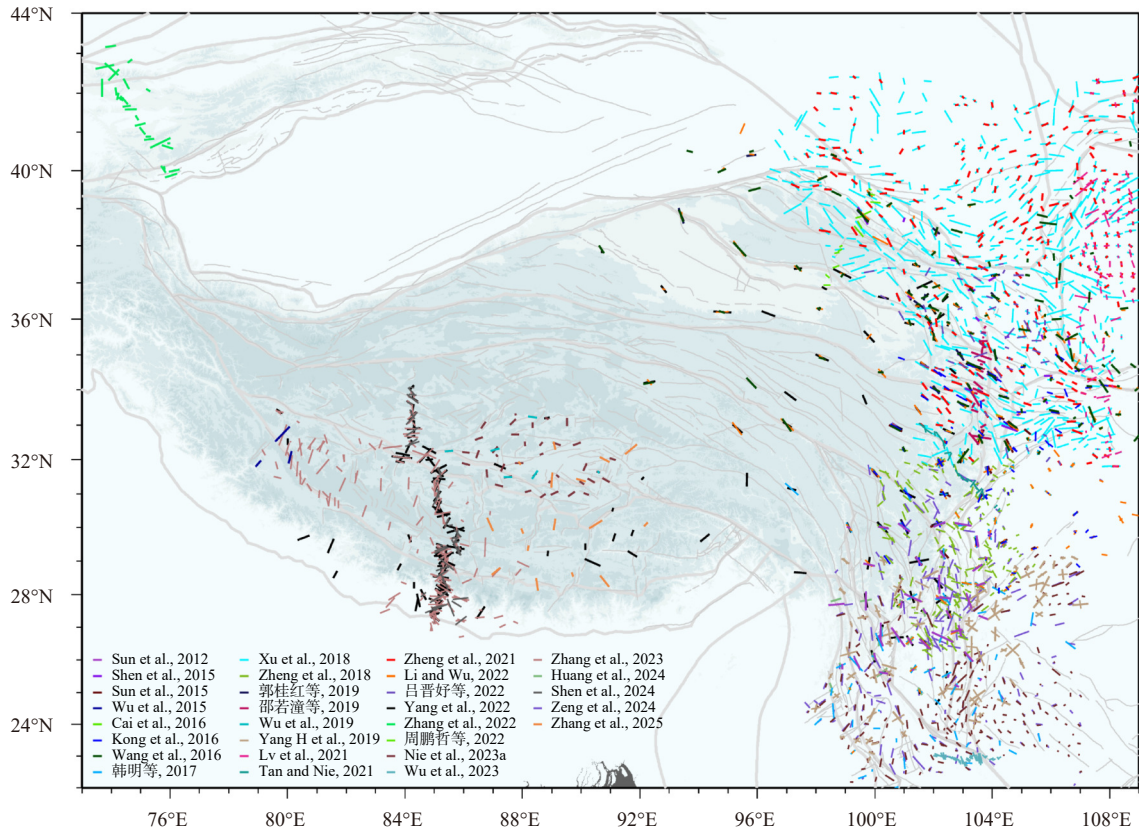


图 2 不同研究组利用接收函数方位变化获取的青藏高原地壳各向异性分布图 (不完全统计). 图中灰色粗线和细线分别表示块体边界和断裂. 短棒方向和长度分别表示地壳快波方向和延迟时间. 左下图例中短棒长度代表 0.5 s 地壳延迟时间. 对于多层地壳各向异性, 图中分别用细短棒与粗短棒表示上、下地壳各向异性

Fig. 2 Map view of crustal anisotropy in the Qinghai-Xizang Plateau determined by various studies based on the azimuthal variations of receiver functions (incomplete statistics). The gray thick and thin lines denote the block boundaries and faults, respectively. The direction and length of the short bar indicate the fast polarization direction and delay time, respectively. The length of the short bar in the legend (lower left of the map) denotes a delay time of 0.5 s. For multi-layered crustal anisotropy, the upper and lower crustal anisotropy are depicted with thin and thick bars, respectively

挤压前沿, 目前该地区的研究焦点主要集中在印度俯冲板片形态 (如印度板片俯冲还是底冲及其前沿位置、板片撕裂位置等) 及其浅表响应 (如裂谷形成、强震活动及成矿作用等) 以及高原侧向生长机制等 (如, Kind et al., 2002; Li and Song, 2018; Liang and Song, 2006; Liang et al., 2016; Liu Z et al., 2020; Nabelek et al., 2009; Shi et al., 2016; Zhang et al., 2014; Zhao et al., 2010). 不同研究组在青藏中南部观测的地壳快波方向总体呈近 N-S 向和近 E-W 向, 前者与最大主应力和裂谷走向一致, 后者与断裂走向一致 (图 3). 目前对于地壳各向异性的成因机制仍存在较大争议.

一部分研究认为该地区观测的地壳各向异性与地壳流有关. 在藏南西部, Wu 等 (2015) 揭示地壳快波方向与地表构造走向存在显著差异 (图 3), 估算中下地壳各向异性强度为 5%~15%, 认为是由地壳流所致. 在青藏中部, Wu 等 (2019) 观测到部分地壳快波方向与班公湖—怒江缝合带的地表

痕迹接近, 估算的各向异性强度约为 5%, 认为反映了 NEE 向中下地壳流引起的角闪石 LPO. Shen 等 (2024) 认为羌塘地块 E-W 地壳快波方向、Pms 和 XKS 相近的延迟时间以及 4%~9% 的中下地壳各向异性为东向地壳流提供了证据, 拉萨地块存在较弱的南向地壳流.

值得一提的是, 上述研究同时开展了 XKS 分裂研究. Wu 等 (2015) 通过 XKS 分裂获取了双层各向异性, 上层快波方向与地壳快波方向一致, 认为首次通过 Pms 各向异性将 XKS 的上层各向异性约束到地壳内, 下层各向异性指示了印度俯冲板片前沿可能延伸到羌塘地块北缘. Wu 等 (2019) 在青藏中部观测到 200 多个方位覆盖较广的无效分裂, 认为可能与印度俯冲板片撕裂造成软流圈上涌有关. Shen 等 (2024) 揭示了拉萨地块下方存在印度板片俯冲引起的地幔流及喜马拉雅地块下方的地幔上涌.

另一部分研究倾向支持其他变形机制. 如 Yang

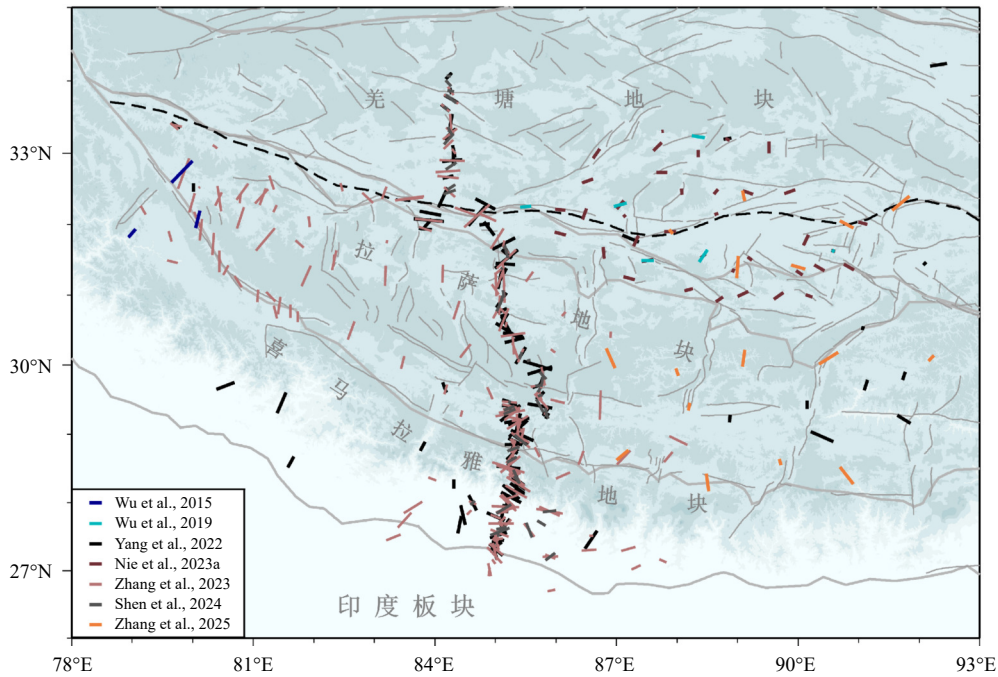


图 3 同图 2，但仅展示青藏高原中南部地壳各向异性。黑色虚线表示班公湖—怒江缝合带

Fig. 3 The same as Fig. 2, but only shows crustal anisotropy in the central-southern Qinghai-Xizang Plateau. The black dashed lines indicate the Bangonghu-Nujiang suture

等 (2022) 在青藏中南部观测的两个地壳优势快波方向分别与最大主应力方向和构造走向一致，且地壳厚度与泊松比呈负相关，认为地壳变形受印度板片俯冲和断裂活动的共同作用，中下地壳强各向异性 (>6%) 由断裂强剪切作用和壳内部分熔融所致。利用与 Wu 等 (2019) 相同的台阵，Nie 等 (2023a) 采用考虑倾斜界面的谐波分析获取了青藏中部更多的地壳各向异性结果。除班公湖—怒江缝合带附近地壳各向异性较弱，大部分台站都观测到较强的地壳各向异性，认为中下地壳稳定的班公湖—怒江缝合带及其两侧发生的强烈变形导致了该地区共轭走滑断裂的形成，简单剪切是青藏中部的主要变形模式。

此外，Zhang 等 (2023, 2025) 认为印度板片底冲产生的基底剪应力与青藏中南部的地壳各向异性密切相关，是藏南裂谷系形成的主要因素，该地区不太可能发育大规模的东向地壳流。基于多个流动台阵资料，Zhang 等 (2023) 揭示了平行板块汇聚方向的地壳快波方向，空间上与藏南裂谷有很好一致性，认为由底冲的印度地壳与上覆青藏地壳间强烈的近水平剪切作用所致。底冲印度板片施加的强烈北向近水平剪切作用与地形产生的应力相结合，平衡了板块汇聚引起的南北向挤压，从而将最大和最小主应力轴旋转到垂直向和东西向。Zhang 等 (2025) 进一步研究发现，距喜马拉雅主前缘逆冲

断裂约 450~500 km，地壳快波方向由平行板块汇聚方向转为平行造山带方向，认为标志了位于青藏下方的印度下地壳的北边界，且反映了印度板片在高原下方为底冲而非俯冲形态。

## 3.2 青藏东部

### 3.2.1 青藏东南缘

青藏东南缘的地壳快波方向总体呈近 N-S 向，与大型断裂走向及最大主应力方向有较好的一致性 (图 4)。目前该地区的地壳各向异性研究多数倾向支持下地壳流模型，主要依据包括观测的较大地壳延迟时间 (强地壳各向异性)，结合高地壳波速比以及低地震波速 (韩明等, 2017; Sun et al., 2012)。如 Sun 等 (2012) 基于 S-P 到时差及地壳延迟时间，估算下地壳各向异性强度~6%，较高的地壳波速比 (平均 1.79) 与青藏中部来自中下地壳捕虏体的泊松比一致，支持下地壳流模型。此外，该研究观测的地壳各向异性与 XKS 各向异性接近，认为上地幔变形很弱或存在地幔上涌及部分岩石圈拆沉，后者与地震学成像相吻合。韩明等 (2017) 基于较大的地壳延迟时间和大尺度的下地壳低速区，认为观测的地壳各向异性主要由地壳流引起。Yang H 等 (2019) 对青藏东南缘的地壳分层各向异性开展了专门研究，获取的 75 个台站的上、下地壳平

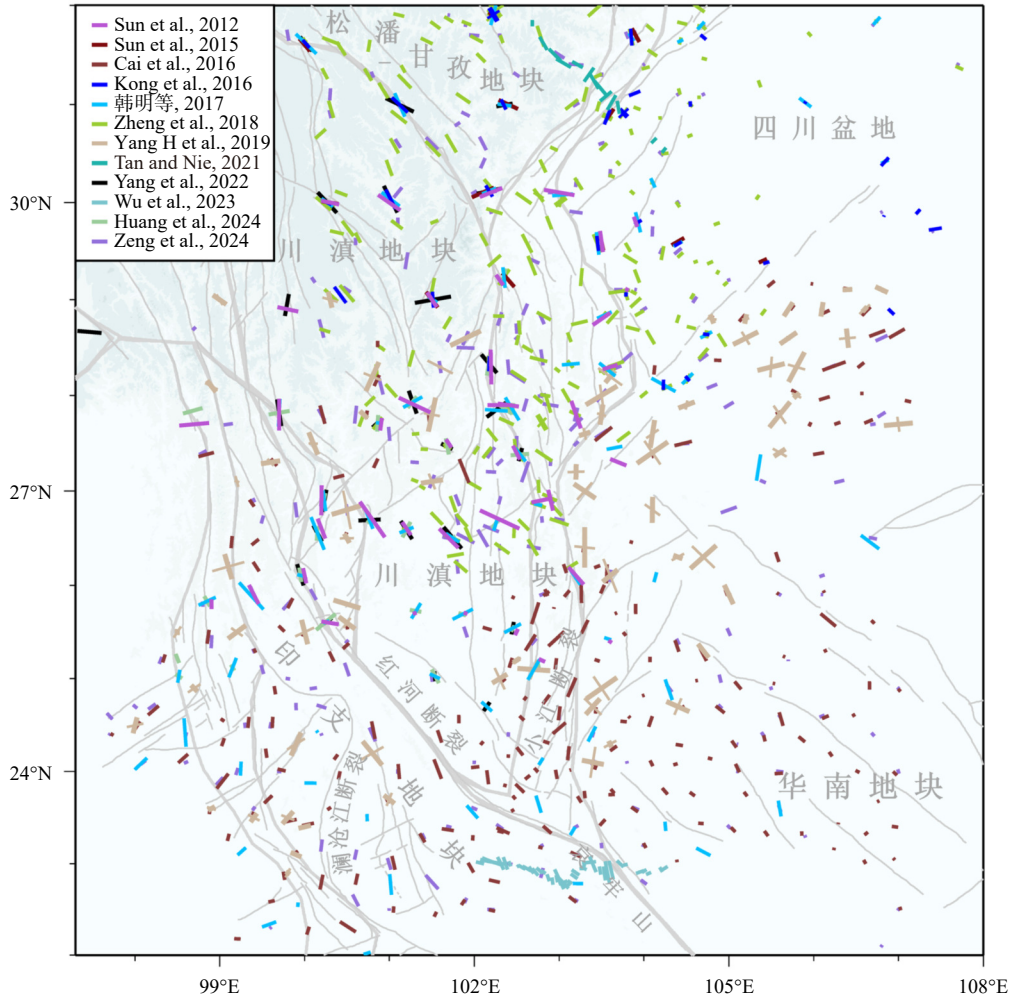


图4 同图2, 但仅展示青藏高原东南缘地壳各向异性

Fig. 4 The same as Fig. 2, but only shows crustal anisotropy in the southeast margin of Qinghai-Xizang Plateau

均延迟时间分别为 0.53 s 和 0.62 s, 认为上地壳各向异性不仅与青藏中部刚性挤出引起的伸展流体饱和和裂隙有关, 还有来自含云母和角闪石岩石的贡献, 而下地壳各向异性主要来自地壳流的贡献。

值得一提的是, Yang H 等 (2019) 观测到较大的上地壳延迟时间, 与 Kong 等 (2016) 和 Zheng 等 (2018) 采用同样方法在青藏东缘观测的上地壳延迟时间接近 (0.49 s 和 0.52 s), 但是显著高于青藏东南缘近震 S 波分裂的平均延迟时间 (0.03 s; Huang et al., 2024)。该研究认为近震 S 波分裂主要反映沿射线路径的各向异性变化, 而不是垂直方向的变化。此外, 本文注意到这些研究分析 Pms 到时变化时未考虑倾斜界面影响。Yang 等 (2022) 对 192 个台站的测试表明, 未考虑倾斜界面影响会造成平均 0.16 s 的延迟时间差异, 其中多数结果的延迟时间平均偏大 0.21 s, 还有少数结果延迟时间平均偏小 0.1 s。因此本文推测, 壳内倾斜界面可能造成了上述研究观测的上地壳平均延迟时

间比实际情况偏大。尽管如此, 实际的上地壳延迟时间可能仍远高于近震 S 波的延迟时间。

一些研究基于观测的地壳各向异性约束了东南缘地壳流的具体分布, 认为地壳流仅存在局部地区并非广泛分布。如 Huang 等 (2024) 推测川滇地块南部的地壳流仅分布在其东北和西南两个区域, 观测的地壳延迟时间由北向南从 0.85 s 逐渐减小至 0.2 s, 并且地壳厚度大于~45 km 的台站下方地壳延迟时间随地壳厚度增大而显著增大。基于多个流动台阵和区域台网资料, Zeng 等 (2024) 观测到地壳快波方向在峨眉山大火成岩省前端附近呈顺时针旋转, 认为南向的下地壳流遇到峨眉山大火成岩省转向西南方向流动, 推测的地壳流区域与 Huang 等 (2024) 相近; 而川滇地块南部的地壳各向异性不太稳定且广泛发散, 与北部存在不同的地壳变形机制。

还有一些研究也观测到川滇地块北部和南部不同的地壳各向异性特征, 但提出了不同的深部变形

机制. 如 Zheng 等 (2018) 发现川滇地块北部 (26°N 以北) 的地壳快波方向与断裂走向、GPS 速度方向和 XKS 快波方向存在差异, 但接近最大水平主应力方向, 认为地壳各向异性主要与区域应力场作用下伸展的流体饱和和裂隙有关. 基于中国地震科学台阵一期数据, Cai 等 (2016) 在东南缘 26°N 以南地区也观测到类似的地壳各向异性特征, 且在小江断裂、红河断裂和澜沧江断裂附近, 地壳快波方向与断裂走向平行, 结合低地震波速、高泊松比和高热流值, 认为走滑运动造成了矿物定向排列和局部熔融, 形成观测的强各向异性. 相似地, Wu 等 (2023) 利用短周期密集流动地震台阵资料, 在哀牢山剪切带观测到平行构造走向的地壳快波方向, 结合高地壳波速比、显著横向变化地壳各向异性和壳幔解耦变形, 认为地壳尺度的块体挤出是该地区的主要变形模式, 走滑运动引起了哀牢山剪切带的局部熔融和中下地壳显著的各向异性. 此外, Yang 等 (2022) 观测显示川滇地块北部的地壳各向异性明显强于其南部, 部分地壳快波方向与预测的地壳流方向垂直或高角度斜交, 综合地壳厚度与地壳泊松比的强正相关, 认为地壳伸展变形更符合该地区的观测结果.

### 3.2.2 青藏东缘

位于青藏东缘与四川盆地交汇地带的龙门山是青藏高原最陡峭的边界. 下地壳流模型认为, 高原软弱的中下地壳物质遭到四川盆地的强烈阻挡, 导致了龙门山的抬升 (Clark and Royden, 2000). 而地壳缩短模型认为, 上地壳纯剪切缩短是导致龙门山抬升和强震的主要原因 (Hubbard and Shaw, 2009). 不同研究组在青藏东缘观测的地壳快波方向总体呈 NW-SE 向 (图 5), 与前人观测的 XKS 快波方向基本一致 (如, Liu J et al., 2020; Yang et al., 2018); 地壳延迟时间约为 XKS 延迟时间的一半, 壳幔均具有显著各向异性 (Sun et al., 2015; Yang et al., 2022).

基于区域台网观测资料, 一些研究综合较大的地壳延迟时间、高地壳波速比和大尺度下地壳低速区支持青藏东缘存在地壳流 (韩明等, 2017; Sun et al., 2015), 而有的研究综合 Pms 和 XKS 相近的快波方向, 地壳厚度与泊松比之间的弱负相关, 支持松潘—甘孜地块垂直连贯变形 (Yang et al., 2022). 还有研究观测到到龙门山断裂带较低的地壳延迟时间 (0.35 s), 结合前人观测的中等地壳波速比, 认为地壳缩短导致了龙门山断裂带剧烈的地

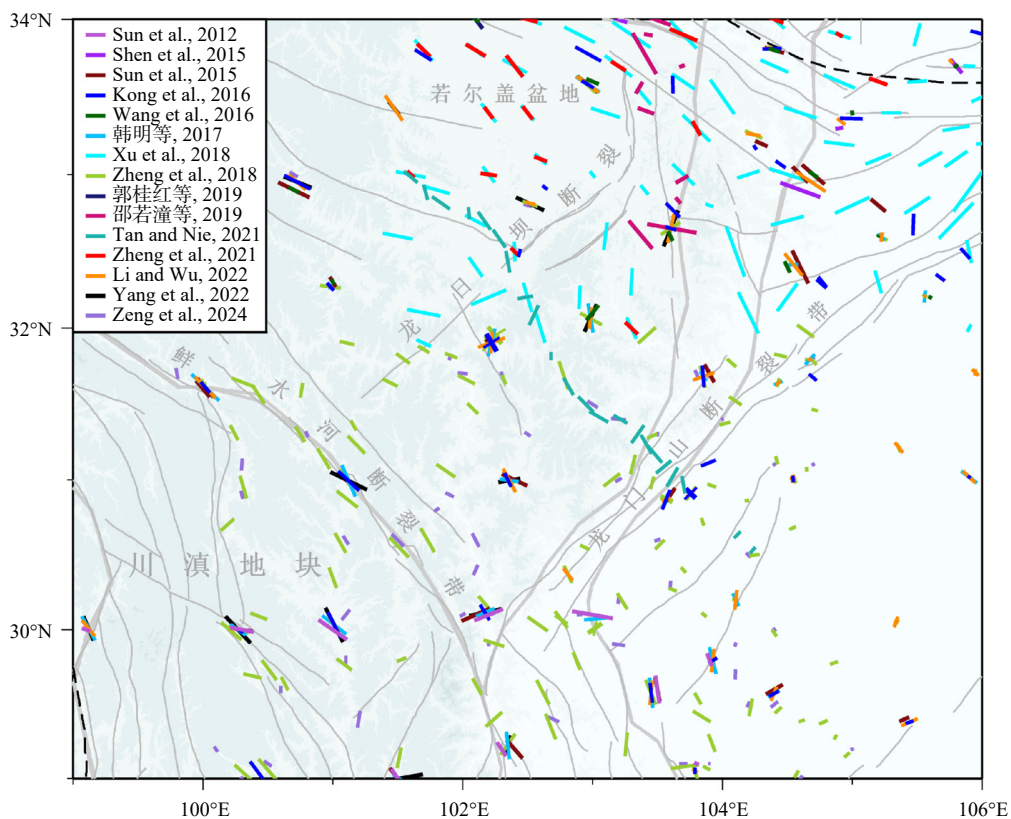


图 5 同图 2, 但仅展示青藏高原东缘地壳各向异性

Fig. 5 The same as Fig. 2, but only shows crustal anisotropy in the east margin of Qinghai-Xizang Plateau

形起伏和大震发生, 上、下地壳正交的快波方向是由于孔隙压力超过最大水平主应力造成 90° 翻转所致 (Kong et al., 2016). 此外, 该研究还分析了地壳延迟时间与距主要构造的距离之间的关系, 认为昆仑—慕士塔格缝合带附近较大的延迟时间与缝合带的破裂有关, 而鲜水河—小江断裂带的高地壳延迟时间主要源于下地壳流或剪切相关的矿物线理 (图 5 和图 6).

基于更密集的流动台阵观测揭示了地壳快波方向在局部地区存在明显变化. 如在若尔盖盆地附近, 地壳快波方向转为 NNW-SSE 向, 在龙日坝断裂至龙门山断裂带, 还存在近 N-S 向快波方向 (图 5). 这些研究倾向于地壳流仅存在局部地区而非广泛分布. Zheng 等 (2018) 等研究认为地壳流只存在于龙门山南段, 北段地壳各向异性受应力场主导, 中段具有最小地壳平均延迟时间是由断层区流体填充的破裂所致. 此外, 尽管有研究表明汶川地震改变了龙门山北段的上地壳各向异性特征, 但该研究未检测到其对整个地壳各向异性产生影响. 相似地, Zeng 等 (2024) 基于区域地震台网、中国地震科学台阵一期和川西流动台阵的观测资料, 认为松潘—甘孜地块的东南侧存在下地壳流, 东北侧为纯剪切缩短变形, 龙门山与其西侧不同的地壳快波方向暗示了两者的地壳变形存在潜在差异. 与上述两个研究不同, 跨龙门山和龙日坝断裂的线性密集台阵

观测揭示了地壳快波方向在龙日坝断裂发生剧烈变化, 认为龙日坝断裂阻挡了其西侧 NW-SE 向的地壳流, 断裂东西两侧存在不同的地壳增厚模式 (Tan and Nie, 2021).

### 3.2.3 青藏东北缘

青藏东北缘最典型的构造应当是中国大陆的十字构造结, 后者在古生代—印支期形成的东西向中央造山系基础上, 叠加了受新生代青藏高原扩展贯通形成的南北向贺兰—川滇构造带, 拥有繁多的构造样式和丰富的地质信息 (董云鹏等, 2019; Dong et al., 2022; 张国伟等, 2004). 不同研究组在青藏东北缘观测的地壳快波方向总体呈 NW-SE 向, 与主要构造走向和 XKS 快波方向一致 (图 6).

目前仅有少数研究支持青藏东北缘存在下地壳流. 如 Shen 等 (2015) 采用 AWST 方法分析了甘肃台网的宽频带资料, 提取了下地壳低速层的各向异性, 认为观测的快波方向与地壳流模型预测的流动方向一致. 此外, Li 和 Wu (2022) 揭示了东昆仑至西秦岭西段及龙门山一带的地壳快波方向与噪声成像获得的下地壳快波方向一致, 结合反演的下地壳高波速比 (>1.85) 和前人观测的中下地壳低密度特征, 认为地壳各向异性主要由地壳流所致.

更多研究则倾向支持青藏东北缘岩石圈垂直连贯变形或块体挤出模式. 利用区域台网和/或中国地

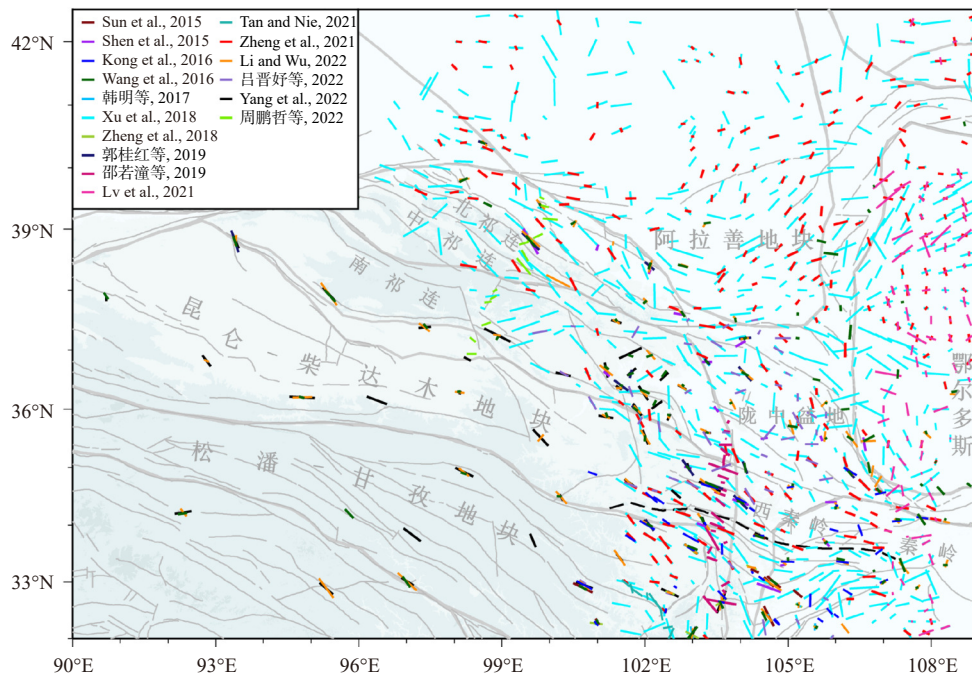


图 6 同图 2, 但仅展示青藏高原东北缘地壳各向异性. 黑色虚线表示昆仑—慕士塔格缝合带

Fig. 6 The same as Fig. 2, but only shows crustal anisotropy in the northeast margin of Qinghai-Xizang Plateau. The black dashed lines indicate the Kunlun-Muztagh suture

震科学台阵二期的观测数据, 多数研究观测到地壳快波方向与地表构造走向和 XKS 快波方向有很好的一致性, 支持东北缘岩石圈垂直连贯变形 (如, 郭桂红等, 2019; Wang et al., 2016; Xu et al., 2018; Zheng et al., 2021), 同时也为区域深大断裂提供了依据 (郭桂红等, 2019; Zheng et al., 2021)。其中郭桂红等 (2019) 推测昆仑断裂为岩石圈尺度深大断裂, 阿尔金断裂西部是岩石圈尺度断裂, 而东部可能仅为地壳尺度。Zheng 等 (2021) 认为东北缘的左旋走滑断裂对整个地壳都有显著影响。此外, 吕晋好等 (2022) 认为陇中地块存在侧向挤出, 地壳各向异性保留了多期次构造作用的叠加信息, 造成强烈的横向不均匀特征。

还有一些研究强调了区域深部变形模式存在横向差异。如邵若潼等 (2019) 分析中国地震科学台阵一期南北带北段 (甘东南台阵) 数据发现, 甘东南中北部和南部地区壳幔可能分别为耦合变形和解耦变形。Zheng 等 (2021) 揭示阿拉善地块西部的地壳各向异性特征与受印度—欧亚碰撞影响的区域相似, 而阿拉善地块东部的地壳各向异性特征更类似稳定的华北克拉通。在昆仑至祁连地块一带, 郭桂红等 (2019) 发现昆仑地块的 Pms 延迟时间与 XKS 的接近, 而东祁连地块 Pms 延迟时间约为 XKS 延迟时间的一半。Yang 等 (2022) 发现昆仑—柴达木地块及其与祁连地块边界, 地壳快波方向总体与构造走向和 XKS 快波方向平行; 而在祁连地块东端, 地壳快波方向与构造走向、XKS 快波方向垂直而平行最大主应力方向。综合低地壳泊松比 ( $<0.26$ ) 及其与地壳厚度的负相关性, 认为昆仑—柴达木地块为垂直连贯变形, 而祁连地块为上地壳缩短增厚。跨祁连山中部的线性密集台阵也观测到部分地壳快波方向与最大主应力方向平行, 尤其是在地壳波速比最低 (平均 1.69) 的中祁连和南祁连北部 (周鹏哲等, 2022)。该研究认为祁连下地壳俯冲到南祁连与柴达木盆地间的微陆块下方, 可能同时存在中上地壳增厚和下地壳拆沉。

此外, 基于中国地震科学台阵二期数据, Lv 等 (2021) 对鄂尔多斯地块西部的地壳各向异性开展了专门研究, 揭示南、北鄂尔多斯地块 (大致  $38.5^{\circ}\text{N}$  为界) 存在不同的地壳各向异性特征, 南部地壳快波方向与 XKS 快波方向近垂直, 北部两者没有显示明显相关性, 认为南、北鄂尔多斯地块下方分别存在水平的地幔流和地幔物质上涌, 鄂尔多斯地块北部正经历缓慢的克拉通破坏。Li 和 Wu

(2022) 观测到秦岭造山带东部存在分层变形, 同样强调了东向地幔流对上地幔变形的作用, 认为上地壳保留了主要造山运动的化石变形, 中下地壳变形受 N-S 向俯冲、碰撞及华南、华北和秦岭微陆块汇聚控制, 壳幔解耦变形。

不难注意到, 在部分地区, Xu 等 (2018) 与其他研究的观测结果存在比较明显差异 (图 6)。这可能是由于该研究加入了分析台站周边  $0.5^{\circ}$  范围内其他台站的接收函数, 这种处理可以提高接收函数的方位覆盖, 但在地壳结构和地震波速存在强烈横向变化时, 可能使结果产生了一定偏差 (Zheng et al., 2018)。

### 3.3 青藏西部

青藏西部的天山造山带是中亚造山带的重要组成部分, 被周围多个刚性地体所夹持, 具有复杂的构造演化历史和深部动力学过程。基于多个流动台阵和固定台网组成的线性密集台阵资料, Zhang 等 (2022) 对中天山的陆内造山过程及其与流变性关系开展了研究, 在中天山的北部和南部分别观测到平行汇聚方向和平行造山带走向的地壳快波方向 (图 2)。该研究认为前者与哈萨克地槽俯冲造成的下地壳单剪变形有关, 后者反映了塔里木盆地北向推挤引起的天山南部岩石圈纯剪增厚, 两侧变形的显著差异与天山南北侧的流变性差异有关。厚约 50 km 的岩石圈根发生拆沉, 造成中天山在晚新生代发生加速缩短变形。

## 4 存在的不足

(1) **地壳分层各向异性研究较少。**地壳分层各向异性提供了壳内不同层位变形方向和强度的直接信息, 可以帮助更好分析各向异性的形成机制。本文梳理的研究中, 仅有少数开展了地壳分层各向异性研究 (Kong et al., 2016; Tan and Nie, 2021; Yang H et al., 2019; Zheng et al., 2018)。这导致目前对于上、下地壳各向异性的认识仍存在不足。例如一些研究通过对比地壳延迟时间与近震 S 波分裂延迟时间, 得出地壳各向异性主要来自下地壳的结论。显然, 目前的地壳分层各向异性观测对这一认识提出了挑战。

(2) **大部分研究未考虑倾斜界面影响。**尽管需要更好的事件方位覆盖, 考虑倾斜界面影响的 Pms 方位变化分析有助于获得更加准确的地壳各向

异性信息 (Yang et al., 2022) 以及更多的结果 (如, Nie et al., 2023a; Wu et al., 2019), 从而对地壳变形提供更可靠的约束. 如前文所述, 一些研究基于地壳延迟时间估算了 (下) 地壳各向异性强度, 较大的地壳各向异性强度被多数研究作为支持地壳流模式的主要依据之一. 还有研究根据地壳延迟时间与距主要构造距离之间的关系分析了各向异性的成因机制. 因此, 对于构造运动活跃的青藏高原地区, 在分析地壳各向异性时考虑潜在倾斜界面的影响是十分必要的.

此外, 通过梳理发现, 地壳各向异性往往与地震波速及波速比等参数结合讨论深部变形机制. 地震波速在某种程度上反映了介质黏性 (Tian et al., 2021), 地震波速比与泊松比正相关, 因而反映了介质的变形能力 (Christensen, 1996). 基于相似的地震波速和波速比特征有时会得出不同的结论, 本文认为主要原因是缺乏对地震波速和地壳波速比与介质流变性之间的定量分析 (Nie et al., 2023b).

## 5 总 结

本文梳理和总结了近年来基于接收函数方位变化研究青藏高原地壳各向异性取得的进展, 对这些研究成果总结如下:

(1) 在青藏中南部, 地壳快波方向总体呈近 N-S 向和近 E-W 向, 一些研究认为由地壳流所致, 另一些研究认为反映了印度板片的底冲运动和青藏中部的单剪变形;

(2) 在东缘和东南缘, 多数研究倾向支持地壳流模型, 地壳流可能只存在局部地区并非广泛发育. 另一些研究则支持东缘为垂直连贯变形或地壳缩短增厚, 东南缘的地壳各向异性与伸展流体饱和裂隙、断层走滑运动、地壳尺度的块体挤出或地壳伸展变形有关;

(3) 在东北缘, 地壳快波方向总体呈 NW-SE 向, 与主要构造走向和 XKS 快波方向一致. 多数研究倾向岩石圈垂直连贯变形, 地壳各向异性为区域深大断裂提供了证据. 少数研究支持地壳各向异性由地壳流所致. 在祁连地块, 地壳各向异性与上地壳缩短增厚有关;

(4) 在青藏西部, 中天山北部和南部总体地壳快波方向分别与块体汇聚方向和构造走向一致, 反映了天山北部下地壳单剪变形和天山南部岩石圈纯剪增厚.

尽管目前对于地壳各向异性的成因机制仍存在争议, 这些研究对于青藏高原的地壳各向异性特征提供了重要的观测约束, 同时对于高原隆升扩展机制具有重要启示意义. 基于接收函数方法较高的横向分辨率和越来越多的密集台阵观测, 未来有望观测到更多的地壳变形细节 (Gao et al., 2019; 田小波等, 2025), 在深部动力学过程研究中发挥重要作用.

## 致谢

感谢三位审稿专家提供的建设性修改意见. 本文资料收集过程中得到了 Kelly H. Liu 教授、沈旭章教授、杨海燕副教授、武澄沅副研究员、叶卓副研究员、李孟奎副教授、Cong Shen 博士和周鹏哲博士的帮助, 作者在此致以衷心感谢.

## References

- Ammon C, Randall G, Zandt G. 1990. On the nonuniqueness of receiver function inversions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 95(B10): 15303-15318.
- Boudier F, Baronnet A, Mainprice D. 2010. Serpentine mineral replacements of natural olivine and their seismic implications: Oceanic lizardite versus subduction-related antigorite[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 495-512.
- Cai Y, Wu J, Fang L, et al. 2016. Crustal anisotropy and deformation of the southeastern margin of the Tibetan Plateau revealed by Pms splitting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 121: 120-126.
- Chen L, Wang X, Wang X, et al. 2022. Advances and perspectives for receiver function imaging of the Earth's internal discontinuities and velocity structures[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 53(6): 680-701 (in Chinese).
- Chen Y, Zhang Z, Sun C, Badal J. 2013. Crustal anisotropy from Moho converted Ps wave splitting analysis and geodynamic implications beneath the eastern margin of Tibet and surrounding regions[J]. *Gondwana Research*, 24(3-4): 946-957.
- ChinArray. 2006. China Seismic Array waveform data[BD/OL]. China Earthquake Administration. doi: 10.12001/ChinArray.Data.
- Christensen N. 1996. Poisson's ratio and crustal seismology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 101(B2): 3139-3156.
- Clark M, Royden L. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. *Geology*, 28(8): 703-706.
- Dong Y P, Zhang G W, Sun S S, et al. 2019. The "cross-tectonics" in China continent: Formation, evolution, and its significance for continental dynamics[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 769-797 (in Chinese).
- Dong Y P, Sun S, Santosh M, et al. 2022. Cross orogenic belts in central China: Implications for the tectonic and paleogeographic evolution of the east Asian continental collage[J]. *Gondwana Research*, 109: 18-88.
- England P, Houseman G. 1985. Role of lithospheric strength heterogen-

- ities in the tectonics of Tibet and neighbouring regions[J]. *Nature*, 315(23): 297-301.
- Flesch L, Holt W, Silver P, et al. 2005. Constraining the extent of crust-mantle coupling in central Asia using GPS, geologic, and shear wave splitting data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 238(1-2): 248-268.
- Gao Y, Chen L, Wang X, Ai Y. 2019. Complex lithospheric deformation in eastern and northeastern Tibet from shear wave splitting observations and its geodynamic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(10): 10331-10346.
- Guo G H, Wu C L, Tang G B, et al. 2019. Seismic anisotropy of the northeastern margin of the Tibetan Plateau derived from analysis of SKS and Pms seismic phases[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(5): 1650-1662 (in Chinese).
- Han M, Li J, Xu X, Hu J. 2017. Analysis for crustal anisotropy beneath the southeastern margin of Tibet by stacking azimuthal receiver functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(12): 4537-4556 (in Chinese).
- Han R, Yang D, Li Q, et al. 2022. Crustal structure and anisotropy in the lower Yangtze Region and its metallogenic implications[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 849088.
- Houseman G, McKenzie D, Molnar P. 1981. Convective instability of a thickened boundary layer and its relevance for the thermal evolution of continental convergent belts[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86: 6115-6132.
- Huang P, Gao Y, Wu J. 2024. Crustal anisotropy beneath southeast Tibet revealed by Pms arrival times[J]. *Terra Nova*, 36(5): 315-326.
- Hubbard J, Shaw J. 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan ( $M=7.9$ ) earthquake[J]. *Nature*, 458: 194-197.
- Kind R, Yuan X, Saul J, et al. 2002. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian plate subduction[J]. *Science*, 298: 1219-1221.
- Kong F, Wu J, Liu K, Gao S. 2016. Crustal anisotropy and ductile flow beneath the eastern Tibetan Plateau and adjacent areas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 442: 72-79.
- Kosarev G, Kind R, Sobolev S, et al. 1999. Seismic evidence for a detached India lithospheric mantle beneath Tibet[J]. *Science*, 283: 1306-1309.
- Langston C. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 84(B9): 4749-4762.
- Levin V, Park J. 1997. Crustal anisotropy in the Ural Mountains foredeep from teleseismic receiver functions[J]. *Geophysical Research Letters*, 24(11): 1283-1286.
- Li J, Song X. 2018. Tearing of Indian mantle lithosphere from high-resolution seismic images and its implications for lithosphere coupling in southern Tibet[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33): 8296-8300.
- Li J, Song X, Wang P, Zhu L. 2019. A generalized  $H-\kappa$  method with Harmonic corrections on Ps and its crustal multiples in receiver functions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(4): 3782-3801.
- Li M, Wu T. 2022. Ps-splitting analysis reveals differential crustal deformation beneath the Qinling Orogenic Belt and its surrounding areas[J]. *Geophysical Journal International*, 229(2): 853-861.
- Liang C, Song X. 2006. A low velocity belt beneath northern and eastern Tibetan Plateau from Pn tomography[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(22): 2006GL027926.
- Liang X, Chen Y, Tian X, et al. 2016. 3D imaging of subducting and fragmenting Indian continental lithosphere beneath southern and central Tibet using body-wave finite-frequency tomography[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 443: 162-175.
- Liu H, Niu F. 2012. Estimating crustal seismic anisotropy with a joint analysis of radial and transverse receiver function data[J]. *Geophysical Journal International*, 188(1): 144-164.
- Liu J, Wu J, Wang W, et al. 2020. Seismic anisotropy beneath the eastern margin of the Tibetan Plateau from SKS splitting observations[J]. *Tectonophysics*, 785: 228430.
- Liu Q, Hilst R, Li Y, et al. 2014. Eastward expansion of the Tibetan Plateau by crustal flow and strain partitioning across faults[J]. *Nature Geoscience*, 7(5): 361-365.
- Liu Z, Tian X, Yuan X, et al. 2020. Complex structure of upper mantle beneath the Yadong-Gulu rift in Tibet revealed by S-to-P converted waves[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 115954.
- Lü J Y, Shen X Z, Jin R Z, et al. 2022. Laterally heterogeneous crustal anisotropy in the northeastern margin of Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(6): 1980-1990 (in Chinese).
- Lv J, Shen X, Huang L, et al. 2021. The crustal anisotropy of west Ordos Block and its geodynamic implications[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 22(7): e2020GC009553.
- Lv M M. 2019. Upper mantle velocity structure and its dynamic implications beneath the Tibetan Plateau from triplicated seismic P waveforms[J]. *CT Theory and Applications*, 28(2): 175-186 (in Chinese).
- McNamara D, Owens T. 1993. Azimuthal shear wave velocity anisotropy in the Basin and Range Province using Moho Ps converted phases[J]. *Journal of Geophysical Research*, 98(B7): 12003-12017.
- Miao W, Niu F, Chen H. 2023. Sharp changes of crustal seismic anisotropy across the ventral Tanlu Fault Zone in east China[J]. *Geophysical Research Letters*, 50(1): e2022GL099184.
- Mu Q, Huang R, Yan J Y, et al. 2023. Constraining the crustal structure of the southern segment of the north-south gravity lineament by the receiver function  $H-\kappa-c$  method[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(5): 369-383 (in Chinese).
- Nabelek J, Hetenyi G, Vergne J, et al. 2009. Underplating in the Himalaya-Tibet collision zone revealed by the hi-climb experiment[J]. *Science*, 325: 1371-1374.
- Nie S T, Duan Y H, Tan P, et al. 2023. Crustal structure in eastern areas of South China Block based on P-wave receiver functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(10): 4149-4161 (in Chinese).
- Nie S, Li J, Wu C, Tan P. 2023a. Formation of the V-shaped conjugate strike-slip faults revealed by crustal anisotropy in the central Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 258: 105725.
- Nie S, Tian X, Liang X, Wan B. 2023b. Less-well-developed crustal channel-flow in the central Tibetan Plateau revealed by receiver

- function and surface wave joint inversion[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(4): e2022JB025747.
- Owens T, Randall G, Wu F, et al. 1993. Pascal instrument performance during the Tibetan Plateau passive seismic experiment[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83: 1959-1970.
- Ozacar A, Zandt G. 2004. Crustal seismic anisotropy in central Tibet: Implications for deformational style and flow in the crust[J]. *Geophysical Research Letters*, 31(23): L23601.
- Qi S H, Liu Q Y, Chen J H, et al. 2016. Stratified crustal anisotropy from receiver function and its particle swarm inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(12): 4544-4559 (in Chinese).
- Royden L, Burchfiel B, King R, et al. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. *Science*, 276: 788-90.
- Rumpker G, Kaviani A, Latifi K. 2014. Ps-splitting analysis for multilayered anisotropic media by azimuthal stacking and layer stripping[J]. *Geophysical Journal International*, 199(1): 146-163.
- Shahzad S, Liu J, Sun Y, Li C. 2021. Crustal structure and deformation in southeastern China revealed by receiver functions[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 221: 104937.
- Shao R T, Shen X Z, Zhang Y S. 2019. Crustal anisotropy and tectonic implications beneath southeastern Gansu Province in northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(9): 3340-3353 (in Chinese).
- Shen C, Gao S, Kong F, Liu K. 2024. Tectonic implications of seismic anisotropy layering beneath the southern Tibetan Plateau revealed by integrated shear wave splitting and receiver function analyses[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(8): e2024JB029268.
- Shen X, Yuan X, Ren J. 2015. Anisotropic low-velocity lower crust beneath the northeastern margin of Tibetan Plateau: Evidence for crustal channel flow[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 16(12): 4223-4236.
- Shi D, Zhao W, Klemperer S, et al. 2016. West-east transition from underplating to steep subduction in the India-Tibet collision zone revealed by receiver-function profiles[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 452: 171-177.
- Shi Y T, Gao Y, Zhang Z Q, et al. 2023. Azimuthal anisotropy of receiver functions in the central South China Block and its tectonic implications[J]. *Annals of Geophysics*, 66(2): SE212.
- Stein S, Wysession M. 2003. *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*[M]. Wiley-Blackwell Press.
- Sun C Q, Lei J S, Li C, et al. 2013. Crustal anisotropy beneath the Yunnan region and dynamic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(12): 4095-4105 (in Chinese).
- Sun S, Ji S, Michibayashi K, Salisbury M. 2016. Effects of olivine fabric, melt-rock reaction, and hydration on the seismic properties of peridotites: Insight from the Luobusha ophiolite in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(5): 3300-3323.
- Sun S S, Dong Y P, Li Y X, et al. 2024. Rheology of continental lithosphere and seismic anisotropy[J]. *Science China Earth Science*, 67(1): 31-60 (in Chinese).
- Sun Y, Niu F, Liu H, et al. 2012. Crustal structure and deformation of the SE Tibetan Plateau revealed by receiver function data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 349-350: 186-197.
- Sun Y, Liu J, Zhou K, et al. 2015. Crustal structure and deformation under the Longmenshan and its surroundings revealed by receiver function data[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 244: 11-22.
- Tan P, Nie S. 2021. Crustal deformation in eastern margin of Tibetan Plateau from a dense linear seismic array[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 321: 106801.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A, et al. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. *Geology*, 10(12): 611-616.
- Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Geology*, 29(23): 1671-1677.
- Tatham D, Lloyd G, Butler R, Casey M. 2008. Amphibole and lower crustal seismic properties[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 267: 118-128.
- Tian B F, Li J, Wang W M, et al. 2008. Crustal anisotropy of Taihangshan mountain range in north China inferred from receiver functions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(5): 1459-1467 (in Chinese).
- Tian X, Bai Z, Klemperer S, et al. 2021. Crustal-scale wedge tectonics at the narrow boundary between the Tibetan Plateau and Ordos Block[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 554: 116700.
- Tian X B, Shen X Z, Wei Y H, et al. 2025. Research progress of short period dense nodal array in deep crustal structure research[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 56(2): 131-147.
- Wang H F, Wu J P, Zhou S Y, Feng T. 2020. Rayleigh wave azimuthal anisotropy in western Sichuan region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 42(3): 293-305 (in Chinese).
- Wang P, Huang Z, Wang X. 2020. A method for estimating the crustal azimuthal anisotropy and Moho orientation simultaneously using receiver functions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2): e2019JB018405.
- Wang Q, Niu F, Gao Y, Chen Y. 2016. Crustal structure and deformation beneath the NE margin of the Tibetan Plateau constrained by teleseismic receiver function data[J]. *Geophysical Journal International*, 204(1): 167-179.
- Wu C, Tian X, Xu T, et al. 2019. Deformation of crust and upper mantle in central Tibet caused by the northward subduction and slab tearing of the Indian lithosphere: New evidence based on shear wave splitting measurements[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 514: 75-83.
- Wu C, Xu T, Ai Y, et al. 2021. Crustal azimuthal anisotropy in the Jiaodong Peninsula: Evidence for the suture between the North China Craton and South China Block[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 314: 106705.
- Wu C, Xu T, Bai Z. 2023. Detailed crustal deformation in the Ailaooshan Orogenic Belt revealed by receiver functions from a dense array[J]. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1343474.
- Wu J, Zhang Z, Kong F, et al. 2015. Complex seismic anisotropy beneath western Tibet and its geodynamic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 413: 167-175.
- Wu Z H. 2024. The  $M_w \geq 6.5$  strong earthquake events since 1990 around the Tibetan Plateau and control-earthquake effect of active

- tectonic system[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 54(1): 10-24 (in Chinese).
- Xie Z X, Wu Q J, Zhang R Q. 2017. Crustal anisotropy beneath north-eastern margin of the Tibetan Plateau and its dynamic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(6): 2315-2325 (in Chinese).
- Xu X, Niu F, Ding Z, Chen Q. 2018. Complicated crustal deformation beneath the NE margin of the Tibetan Plateau and its adjacent areas revealed by multi-station receiver-function gathering[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 497: 204-216.
- Xu X M, Ding Z F, Li L, et al. 2021. Crustal anisotropy beneath the Trans-North China orogen and its adjacent areas from receiver functions[J]. *Frontiers in Earth Science*, 9: 753612.
- Xu Z, Xu M J, Wang L S, et al. 2006. A study on crustal anisotropy using P to S converted phase of the receiver function: Application to Ailaoshan-Red River fault zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(2): 438-448.
- Yang H, Badal J, Hu J, Peng H. 2019. Disaggregated anisotropy and deformation style of the upper and lower crust in the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 184: 103999.
- Yang Y, Chen J Y, Yang X S, et al. 2010. Does alignment of melt enhance seismic anisotropy beneath Tibet?[J]. *Seismology and Geology*, 32: 59-69 (in Chinese).
- Yang Y, Zhu L, Su Y, et al. 2015. Crustal anisotropy estimated by splitting of Ps-converted waves on seismogram and an application to SE Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 106: 216-228.
- Yang Y, Liang C, Fang L, et al. 2018. A comprehensive analysis on the stress field and seismic anisotropy in eastern Tibet[J]. *Tectonics*, 37: 1648-1657.
- Yang Y, Yao H J, Zhang P, et al. 2018. Crustal azimuthal anisotropy in the trans-north China orogen and adjacent regions from receiver functions[J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 903-913 (in Chinese).
- Yang Y, Abart R, Yang X, et al. 2019. Seismic anisotropy in the Tibetan lithosphere inferred from mantle xenoliths[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 515: 260-270.
- Yang Y, Zhang X, Dong Y, et al. 2022. Crustal deformation patterns in the Tibetan Plateau and its adjacent regions as revealed by receiver functions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112: 1297-1314.
- Zeng S, Niu F, Sun Y, et al. 2024. Crustal structure and anisotropy measured by CHINArray and implications for complicated deformation mechanisms beneath the eastern Tibetan margin[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 129(6): e2023JB028332.
- Zhang B, Bao X, Xu Y. 2022. Seismic anisotropy in the central Tien Shan unveils rheology-controlled deformation during intracontinental orogenesis[J]. *Geology*, 50(7): 812-816.
- Zhang B, Bao X, Wu Y, et al. 2023. Southern Tibetan rifting since late Miocene enabled by basal shear of the underthrusting Indian lithosphere[J]. *Nature Communications*, 14(1): 2565.
- Zhang B, Bao X, Wu Y, et al. 2025. Indian crustal front beneath Tibet inferred from seismic anisotropy[J]. *Seismological Research Letters*, 96(1): 449-460.
- Zhang G W, Guo A L, Yao A P. 2004. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23-32 (in Chinese).
- Zhang K W, Chen Q F, Chen Y. 2020. Crustal structure beneath the southwestern Xing'an-Mongolia Orogenic Belt revealed by receiver function analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(4): 1484-1504 (in Chinese).
- Zhang Y Q, Lü Q T, Shi Y T, et al. 2024. Seismic anisotropy in and around the region of the middle and lower reaches of the Yangtze River and its insight into the regional tectonics[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 67(3): 900-915 (in Chinese).
- Zhang Z, Wang Y, Houseman G A, et al. 2014. The Moho beneath western Tibet: Shear zones and eclogitization in the lower crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 408: 370-377.
- Zhao J, Yuan X, Liu H, et al. 2010. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107: 11229-11233.
- Zheng T, Ding Z, Ning J, et al. 2018. Crustal azimuthal anisotropy beneath the southeastern Tibetan Plateau and its geodynamic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(11): 9733-9749.
- Zheng T, Ding Z, Ning J, et al. 2019. Crustal azimuthal anisotropy beneath the central North China Craton revealed by receiver functions[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 20(5): 2235-2251.
- Zheng T, Gao S, Ding Z, et al. 2021. Crustal azimuthal anisotropy and deformation beneath the northeastern Tibetan Plateau and adjacent areas: Insights from receiver function analysis[J]. *Tectonophysics*, 816: 229014.
- Zheng T, Wang J X, Gao S, et al. 2024. Crustal deformation in the vicinity of the Tan-Lu Fault Zone in east China constrained by receiver function analyses[J]. *Tectonophysics*, 876: 230265.
- Zhou P Z, Gao R, Ye Z. 2022. Crustal anisotropy study in the central Qilian Mountains: Evidence from teleseismic P wave receiver functions[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(4): 265-277 (in Chinese).
- Zhu L. 2000. Crustal structure across the San Andreas Fault, southern California from teleseismic converted waves[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 179(1): 183-190.
- Zhu L, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B2): 2969-2980.

## 附中文参考文献

- 陈凌, 王旭, 王新, 等. 2022. 接收函数界面和波速成像研究进展与展望[J]. *地球与行星物理论评*, 53(6): 680-701.
- 董云鹏, 张国伟, 孙圣思, 等. 2019. 中国大陆“十字构造”形成演化及其大陆动力学意义[J]. *地质力学学报*, 25(5): 769-797.
- 郭桂红, 武澄澆, 唐国彬, 等. 2019. 青藏高原东北缘壳幔各向异性研究: 基于 SKS 和 Pms 震相分析[J]. *地球物理学报*, 62(5): 1650-1662.
- 韩明, 李建有, 徐晓雅, 等. 2017. 按方位叠加接收函数分析青藏高原东南缘的地壳各向异性[J]. *地球物理学报*, 60(12): 4537-4556.

- 吕晋好, 沈旭章, 金睿智, 等. 2022. 青藏高原东北缘地壳介质各向异性非均匀特征及其构造意义[J]. *地球物理学报*, 65(6): 1980-1990.
- 吕苗苗. 2019. 基于 P 波三重震相研究青藏高原上地幔速度结构及其动力学意义[J]. *CT 理论与应用研究*, 28(2): 175-186.
- 穆青, 黄荣, 严加永, 等. 2023. 利用接收函数  $H-\kappa-c$  叠加方法约束武陵山重力梯度带地壳结构[J]. *地学前缘*, 30(5): 369-383.
- 聂仕潭, 段永红, 谭萍, 等. 2023. 基于 P 波接收函数资料的华南大陆东部地壳结构研究[J]. *地球物理学报*, 66(10): 4149-4161.
- 齐少华, 刘启元, 陈九辉, 等. 2016. 地壳分层各向异性介质接收函数及其粒子群反演[J]. *地球物理学报*, 59(12): 4544-4559.
- 邵若潼, 沈旭章, 张元生. 2019. 青藏高原东北缘甘东南地区地壳各向异性特征及构造意义[J]. *地球物理学报*, 62(9): 3340-3353.
- 孙长青, 雷建设, 李聪, 等. 2013. 云南地区地壳各向异性及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, 56(12): 4095-4105.
- 孙圣思, 董云鹏, 黎乙希, 等. 2024. 大陆岩石圈流变与地震波速各向异性[J]. *中国科学: 地球科学*, 67(1): 31-60.
- 田宝峰, 李娟, 王卫民, 等. 2008. 华北太行山区地壳各向异性的接收函数证据[J]. *地球物理学报*, 51(5): 1459-1467.
- 田小波, 沈旭章, 魏运浩, 等. 2025. 短周期密集台阵深部地壳结构探测研究进展[J]. *地球与行星物理论评(中英文)*, 56(2): 131-147.
- 王怀富, 吴建平, 周仕勇, 冯甜. 2020. 川西地区瑞雷波方位各向异性[J]. *地震学报*, 42(3): 293-305.
- 吴中海. 2024. 青藏高原 1990 年以来的  $M_w \geq 6.5$  强震事件及活动构造体系控震效应[J]. *地震科学进展*, 54(1): 10-24.
- 谢振新, 吴庆举, 张瑞青. 2017. 青藏高原东北缘地壳各向异性及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, 60(6): 2315-2325.
- 徐震, 徐鸣洁, 王良书, 等. 2006. 用接收函数 Ps 转换波研究地壳各向异性—以哀牢山—红河断裂带为例[J]. *地球物理学报*, 49(2): 438-448.
- 杨戩, 陈建业, 杨晓松, 等. 2010. 部分熔融强化了青藏高原地壳的各向异性? [J]. *地震地质*, 32: 59-69.
- 杨妍, 姚华建, 张萍, 等. 2018. 用接收函数方法研究华北克拉通中部造山带及其邻域地壳方位各向异性[J]. *中国科学: 地球科学*, 61: 903-913.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. *地学前缘*, 11(3): 23-32.
- 张凯文, 陈棋福, 陈赟. 2020. 接收函数揭示的兴蒙造山带西南部的地壳结构特征[J]. *地球物理学报*, 63(4): 1484-1504.
- 张永谦, 吕庆田, 石玉涛, 等. 2024. 长江中下游及邻区地震各向异性对区域构造演化的启示[J]. *地球物理学报*, 67(3): 900-915.
- 周鹏哲, 高锐, 叶卓. 2022. 祁连山中部地壳各向异性研究: 来自远震接收函数的证据[J]. *地学前缘*, 29(4): 265-277.