中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 8 期: 2458 ~ 2477
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

地震各向异性与地质构造揭示的红河断裂带分段性

李莹[1,2], 高原[2*]

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;
2. 中国地震局地震预测研究所地震预测重点实验室, 北京 100036
* 通讯作者, E-mail: qzgyseis@163.com; gaoyuan@cea-ies.ac.cn

收稿日期: 2023-09-26; 收修改稿日期: 2024-02-24; 接受日期: 2024-03-29; 网络版发表日期: 2024-07-17
国家自然科学基金重点项目(41730212)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项项目(2021IEF0103)资助

摘要 红河断裂带是青藏高原东南缘一条控制地壳深部运动变形的重要断裂带, 被视为川滇块体西边界, 对东南缘中下地壳流问题具有明显的控制作用. 地球物理资料显示红河断裂带具有分段性, 由北向南地震活动、速度结构与地壳变形皆表现明显的差异性; 地震各向异性表现了区域横向空间展布和垂向层次分布的复杂形态. 从地壳分层角度看, (1) 上地壳: 红河断裂带北段快波方向较为复杂, 可能受三江侧向碰撞带以及附近不同走向断裂的影响; 中段快波方向表现很强的NW向定向排列特征, 暗示可能形成了闭合(或闭锁)的局部变形一致区域; 南段快波方向较为杂乱, 表明楔形交汇区端部具有复杂的构造形态和应力环境. (2) 中下地壳: 断裂带北段和南段的方位各向异性表现出较强的接近壳内低速薄弱带走向的形态, 可能与中下地壳物质的运移有关. 在全地壳(整个地壳)尺度, 红河断裂带两侧快波方向平行NW构造走向, 揭示了红河断裂带作为一个可能贯穿地壳的深大断裂对周围介质有很强的控制作用. 在岩石圈尺度, 红河断裂带附近快波更近EW向, 完全未受断裂带走向的影响, 与上地幔P波和S波低速区以及正径向各向异性形态有很好的一致性. 快波方向可能与岩石圈橄榄岩变形和软流圈物质流动等有关. 本文认为在红河断裂带域, 主要在~26°20′N以南, 地壳与岩石圈地幔可能存在解耦变形, 并可能与板块俯冲和回撤等有关. 综合分析多种地球物理观测数据和反演结果, 可以刻画出红河断裂带附近精细的地壳-上地幔各向异性结构. 更密集的地球物理台阵与更高精度的观测资料有助于探明红河断裂带横向和垂向的壳幔变形细节变化, 深化对该断裂带构造意义的理解.

关键词 红河断裂带, 地震各向异性, 地质构造, 岩石圈, 分段特征

1 引言

青藏高原东南缘位于印度-欧亚板块碰撞带东侧的斜向汇聚区, 由川滇块体等不同构造单元组合而成(阚荣举等, 1977; 图1). 自新生代以来, 受印度板块的持续楔入作用, 青藏高原东南缘经历了强烈的构造变形(Tapponnier等, 1982; Yin和Harrison, 2000). 作为川滇块体西边界的红河断裂带, 不仅是分隔印支块体与华南块体的显著构造界线(阚荣举等, 1983), 还受青藏高原物质侧向挤出的影响, 成为控制地壳深部运动和变形的重要断裂带(Molnar和Tapponnier, 1975; 张进江等, 1999; 许志琴等, 2016). 研究发现, 红河断裂带地质

中文引用格式: 李莹, 高原. 2024. 地震各向异性与地质构造揭示的红河断裂带分段性. 中国科学: 地球科学, 54(8): 2458–2477, doi: 10.1360/SSTe-2023-0239
英文引用格式: Li Y, Gao Y. 2024. Segmental nature of the Red River fault revealed by seismic anisotropy and geological structures. Science China Earth Sciences, 67(8): 2423–2443, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1311-0

© 2024 《中国科学》杂志社

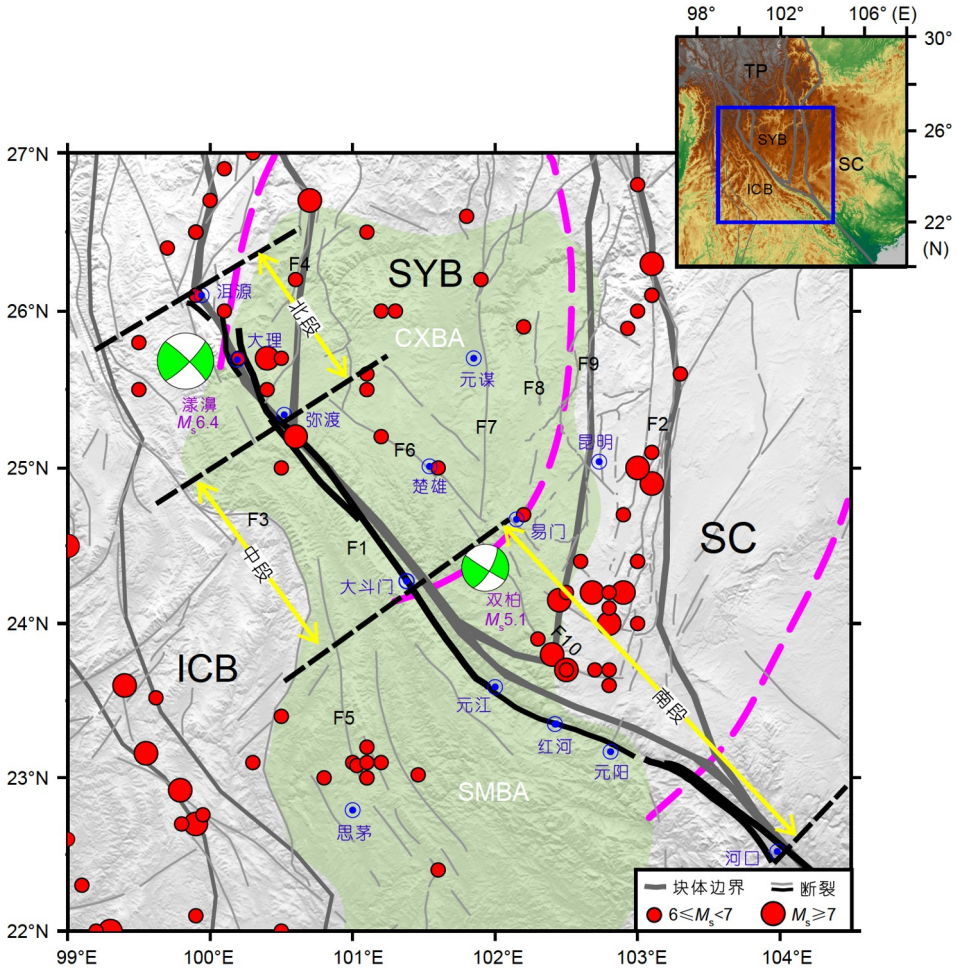

图 1　红河断裂带及附近地区地质构造和地震活动

红色圆圈表示公元前1831年至公元2022年发生的M_S6.0及以上地震，蓝色圆圈表示云南主要县市，粉红色虚线表示峨眉山大火成岩省的内带和中带边界(Xu等, 2004). 主要构造单元包括: TP(Tibetan Plateau, 青藏高原), SC(South China block, 华南块体), SYB(Sichuan-Yunnan block, 川滇块体), ICB(Indo-China block, 印支块体), CXBA(Chuxiong basin, 楚雄盆地), SMBA(Simao basin, 思茅盆地). 淡绿色阴影表示楚雄盆地和思茅盆地的大致范围. F1, 红河断裂带; F2, 小江断裂带; F3, 澜沧江断裂; F4, 程海断裂; F5, 无量山断裂; F6, 楚雄断裂; F7, 元谋断裂; F8, 易门断裂; F9, 普渡河断裂; F10, 石屏-建水断裂. 两个震源球分别表示2021-05-21漾濞M_S6.4地震和2021-06-10双柏M_S5.1地震(震源机制解数据来源于GCMT, https://www.globalcmt.org/). 断裂数据来源于徐锡伟等(2016), 块体划分依据张培震等(2003)

构造与地壳变形呈现由北向南的分段特征(虢顺民等, 2001). 这一分段性与二叠纪时期古地幔柱作用形成的峨眉山大火成岩省内-中带的岩石侵蚀程度划分位置高度相近(Xu等, 2004). 2021年5月21日和6月10日, 在红河断裂带北段和中南段附近相继发生了漾濞M_S6.4和双柏M_S5.1地震(图1). 基于断层闭锁程度与大震活动等证据, 研究认为, 红河断裂带北段和中段北侧存在发生较大地震的可能性(孙庆山和李乐, 2020; 邵志刚等, 2022), 南段可能具有孕育长周期大震的潜在危险性(李西等, 2016).

红河断裂带地处中国南北地震带南段, 地震活动表现极强的分布不均匀性: 北段附近区域地震活动最强、大震频发, 曾发生M_S6.0以上地震9次, 其中M_S7.0以上大地震2次; 形成鲜明对比的是, 中段几乎是无震区; 而南段附近的地震活动大多集中在东侧的石屏-建水断裂上(Wen等, 2008; Dong和Yang, 2022). 红河断裂带两侧的平均地壳厚度突变, 东侧地壳厚度最深可达~50km, 而西侧地壳厚度最浅仅为~30km(Wang等, 2017; Hu等, 2018), 但地壳厚度并非简单跃变, 而是沿着断裂带呈分段性变化(Zhang和Gao, 2019). GNSS资

料显示, 相对稳定的欧亚板块, 云南地区地表运动近NW向(Allen等, 1984; 徐锡伟等, 2003). 红河断裂带右旋滑动速率~3.5mm a^{-1}, 但变形速率明显低于两侧地块, 这可能暗示红河断裂带在调节区域应变方面具有关键作用(Pan和Shen, 2017; Wang和Shen, 2020). 沿红河断裂带各段滑动速率存在差异, 表现复杂分段变形(Shen等, 2005; Jin等, 2019; Wang和Shen, 2020). 震源机制解显示, 云南地区主压应力近NW向, 由北到南方位发生顺时针旋转(钱晓东等, 2011; Tian等, 2019). 红河断裂带附近主要受NW或NNW向主压应力控制, 其中中段应力场更近NS向, 但断裂带两侧主压应力场存在差异(朱俊江等, 2004; Zhao L等, 2013; Luo等, 2016; 盛书中等, 2022).

复杂的地质构造和地震活动导致红河断裂带及其附近地区的速度结构表现显著横向不均匀性(Yao等, 2010; Bao等, 2015, 2020; Qiao等, 2018; 邓山泉等, 2020; 张智奇等, 2020; Han等, 2022). 红河断裂带两侧P波和S波速度结构变化明显, 西侧地区具有较高波速比; 断裂带北段和南段附近中下地壳呈明显低S波速度(张中杰等, 2005; Yao等, 2010; Lei等, 2014; Han等, 2022). 地震学成像观测到青藏高原东南缘的中下地壳可能存在两条围绕喜马拉雅东构造结的弧形地壳流通道(Bao等, 2015; 王琼等, 2015; Liu等, 2019; 张智奇等, 2020; Peng等, 2023). 尽管不同学者观测到的低速形态存在一些差异, 但似乎均被红河断裂带和小江断裂带限制在一定区域内. 有一个存在较大争议的科学问题是, 小江断裂带下方的壳内低速异常体是否向南跨过了红河断裂带进入印支块体内部? 该问题涉及到上地幔物质运移和驱动机制, 比如, 低速是否与印度板块下插可能造成的软流圈物质上涌或部分熔融有关(张智奇等, 2020; Han等, 2022; Peng等, 2023). 因此, 贯穿全地壳甚至延伸至上地幔顶部的红河断裂带, 可能对地壳结构具有极强的控制作用(Liu等, 2021; Hou等, 2023; 刘影等, 2023).

地震各向异性的本质是介质的各向异性, 可以指示研究区古今地质构造、应力状态以及深部运动等信息(Crampin和Peacock, 2005). 充液EDA(Extensive Dilatancy Anisotropy, 大范围扩容各向异性)和晶间微裂隙(Intergranular Microcracks)是造成地震波分裂的主要原因(Crampin和Peacock, 2008). 来自不同方位的S波、Pms波和XKS波(PKS、SKS和SKKS波的统称, 下同)分裂参数, 以及不同周期的体波和面波成像是揭示地震各向异性的两种主要手段; 其中前者具有较好的横向分辨率, 而后者具有较好的垂向分辨率(Yao等, 2010; Shi等, 2012; Lei等, 2014; Cai等, 2016; Kong等, 2018). 横向和垂向分辨率的互补性有助于约束分层各向异性, 获得更加精细的各向异性空间形态(高原和滕吉文, 2005; 李莹和高原, 2021). 复杂的地质构造、变化的应变应力以及非均匀的速度结构, 导致青藏高原东南缘地震各向异性表现独特的区域横向空间展布和垂向层次分布(Liu等, 2019; 高原等, 2020; Li Y和Gao, 2023). 作为青藏高原物质东南向挤出、旋转和逃逸过程中的大型陆内变形带, 针对红河断裂带的各向异性研究有助于更好地了解区域构造运动、壳幔变形特征及深部动力过程, 揭示板块碰撞机制和青藏高原东南缘变形演化等科学问题.

2 地质构造和地球物理特征

作为中国最长的走滑断裂带之一, 红河断裂带斜贯云南西部和南部, 西北始于洱源, 往东南经大理、弥渡、元江和元阳, 到河口后进入越南和北部湾, 全长约1,000km, 整体形态北窄南宽(图1; 阚荣举等, 1983; Leloup等, 1995). 虢顺民等(2001)综合分析地表地质和地震活动, 将红河断裂带由北至南分为三段: 北段为洱源-弥渡, 中段为弥渡-大斗门, 南段为大斗门-河口, 各段具有漫长又复杂的发育和演化历史. 中-晚二叠纪时期, 红河断裂带可能为峨眉山大火成岩省岩浆熔体的移动、上升和喷发提供了通道(Xu等, 2004). 古近纪时期, 红河断裂带可能存在多期左旋走滑剪切运动, 分别与印度-欧亚板块初始碰撞、青藏高原剧烈隆升变形以及青藏高原物质东向挤出相关(张进江等, 2006). 这一系列构造活动导致红河断裂带左旋位错量高达500~700km, 大约吸收大陆10%~25%的地壳缩短量(Leloup等, 2001). 新近纪以来, 红河断裂带经历了从早期左旋到后期右旋的走滑运动转化(Schoenbohm等, 2006; 黄学猛等, 2017). Schoenbohm等(2006)认为青藏高原东南缘中下地壳物质流动可能为上地壳变形提供拖曳力, 导致红河断裂带右旋走滑启动. 黄学猛等(2017)认为印度板片后撤以及软流圈对流可能影响了红河断裂带的活动. 第四纪以来, 红河断裂带整体走向N40°~50°W, 以右旋走滑兼伸展运动为特征, 沿线存在

明显倾滑分量; 中段(元江-元阳)走向N60°~70°W, 呈限制性凹形大断弯并表现逆冲分量(何希虎等, 1983; 张进江等, 1999; Wen等, 2022). 目前关于大断弯构造的形成主要有两种认识: 一是认为红河断裂带受到青藏高原物质绕喜马拉雅东构造结旋转挤出影响发生被动偏折(Wang和Burchfiel, 1997; Gan等, 2022); 二是认为其形成于哀牢山-红河剪切带左旋走滑阶段, 并随着断裂带运动学性质转化, 由走滑伸展型断弯转变为走滑挤压型断弯(Wang等, 2016). 这种复杂的构造现象揭示红河断裂带域具有深部地球物理和深部介质变形的复杂成因.

2.1　非均匀分布的地壳厚度和泊松比

红河断裂带两侧地势差异清晰, 整体呈现西北高、东南低的起伏特征(虢顺民等, 2001; Hu等, 2018). 人工地震测深孟连-马龙剖面(白志明和王椿镛, 2003)、玉溪-临沧剖面(王夫运等, 2014)以及接收函数研究(徐鸣洁等, 2005; Hu等, 2018; Xu等, 2020)显示红河断裂带是一条莫霍面深度变化梯度带, 断裂带以西地壳较薄, 约30~35km; 断裂带以东加厚至40~45km. 航磁资料显示, 红河断裂带还是一条航磁异常梯级带, 其西侧为正磁异常区, 东侧为负磁异常区(虢顺民等, 2001). 王椿镛等(2015)通过滇西中地壳密度扰动平面图, 发现红河断裂带还是一条密度剧变梯度带, 认为其穿透中地壳并可能延伸至下地壳, 是切穿地壳的深大断裂. 在印度板块与欧亚板块的碰撞推挤下, 青藏高原中下地壳物质向东运移, 遇到坚硬华南块体阻挡, 导致川滇块体下地壳增厚, 使得红河断裂带NE侧地壳厚于SW侧. 然而, 红河断裂带两侧地壳厚度并非简单跃变, 而是沿着断裂带呈差异性变化; 相较于中段, 北段和南段更薄一些(图2a; Zhang和Gao, 2019).

红河断裂带及附近地区地壳泊松比值约为0.20~0.30, 沿红河断裂带呈现明显分段性(图2b; Zhang和Gao, 2019): 北段泊松比值高达0.28~0.30, 可能与富含铁镁质的地幔物质底侵有关(徐鸣洁等, 2005; Hou等, 2023); 南段泊松比值相对较低, 表明地壳组分可能以长英质为主, 更易发生部分熔融(Wang等, 2017). 大地电磁资料显示, 红河断裂带北段端部有一个明显高电导率体, 并从上地幔延伸至地壳, 暗示附近的地壳结构可能受到上地幔影响(Bai等, 2010; Yu等, 2020, 2022). 云南地区布格重力异常为负值, 总体趋势呈东高西低、南高北低(Deng等, 2014). 红河断裂带北段和

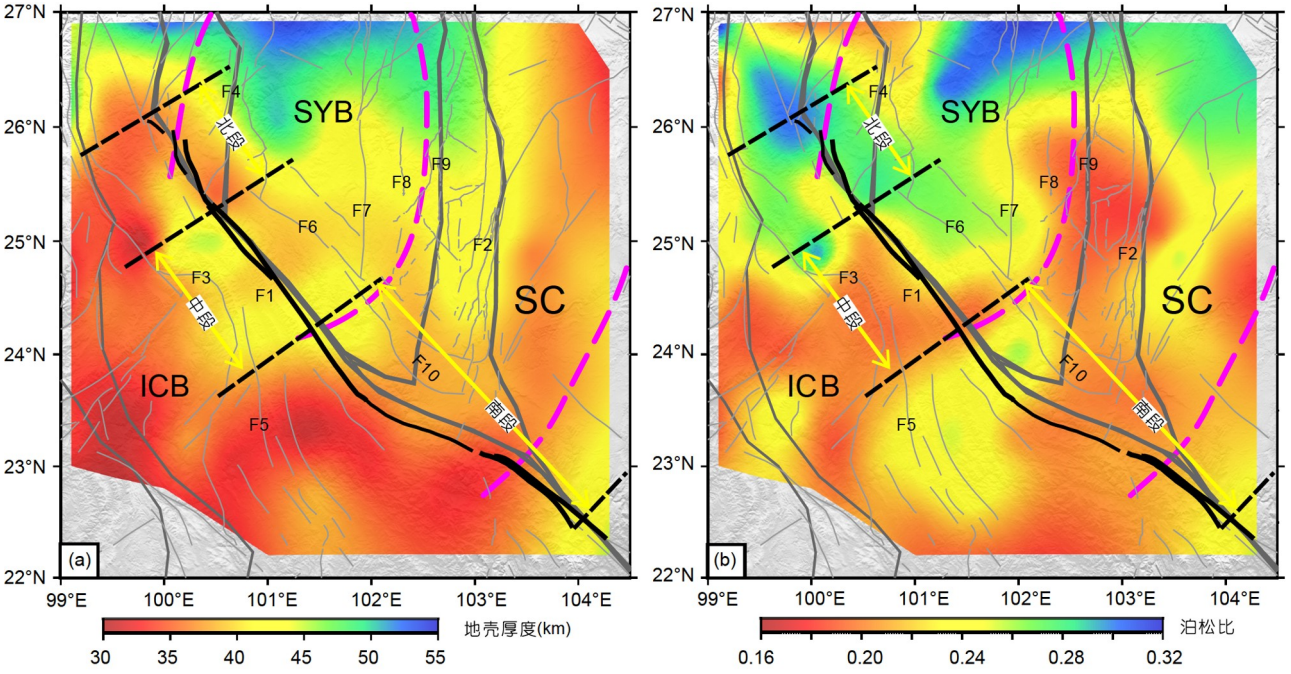

图 2　红河断裂带及附近地区地壳厚度和泊松比

(a) 地壳厚度分布图; (b) 泊松比值分布图. 数据来源于Zhang和Gao(2019). 图中断裂符号与构造线含义同图1

南段均为较大的重力梯度带, 而中段为不规则畸变带且重力变化率较低(虢顺民等, 2001; Deng等, 2014). 这些异常特征揭示了红河断裂带地下岩石密度的显著差异, 暗示该地区具有复杂深部构造环境.

2.2 分区分段变化的应变-应力场

GPS观测资料显示, 相对稳定的欧亚板块, 云南地区地表运动以NW向为主, 呈围绕喜马拉雅东构造结的顺时针运动, 可能是对青藏高原物质东向逃逸受阻而转向东南滑移的应变响应(图3a; 徐锡伟等, 2003; Wang和Shen, 2020; Gan等, 2022). 沿红河断裂带, 晚第四纪右旋滑动速率约3.5mm a^{-1}, 顺时针转动量约25°±16°或44°±16°(Allen等, 1984; 徐锡伟等, 2003). 虢顺民等(2001)测定红河断裂带由北向南各段的走滑速率分别为大约3.6、2.8和2.8mm a^{-1}. Shen等(2005) 利用速度剖面法反演红河断裂带北段和中段的走滑速率分别为(2±2)和~4mm a^{-1}. 王阎昭等(2008)测算红河断裂带由北向南各段的走滑速率分别约(0.4±1.6)、(0.3±1.3)和(1.5±2.7)mm a^{-1}. 基于1999~2017年密集的观测数据, Jin等(2019)得出红河断裂带北段为4.3mm a^{-1}右旋走滑和6.7mm a^{-1}拉张, 南段为1.9mm a^{-1}右旋走滑和拉张. 借助块体模型对GPS水平速度场建模, 徐文等(2019)发现红河断裂带从北向南各段由拉张转换为压缩; 中段剪切应变率较低, 认为闭锁程度与滑动亏损速率高于北段和南段. 通过识别和分析重复地震, 孙庆山和李乐(2020)估算红河断裂带北段0~15km区域的滑动速率约4.5mm a^{-1}, 6.0~13.4km区域的滑动速率约2.3~10.0mm a^{-1}. 尽管不同的研究结果有些差异, 但一致表明红河断裂带各段经历了多阶段复杂的构造活动, 呈现分段滑动和变形特征. 多位研究者认为在多条断裂交汇的红河断裂带北段可能有较高的深部滑动速率.

云南地区应力场具有非均匀特征, 主压应力方位由北向南呈顺时针旋转, 由西向东呈逆时针旋转(谢富仁等, 1993; 钱晓东等, 2011; 盛书中等, 2022). 作为中国西南地区现代构造应力场分区的重要边界之一, 红河断裂带两侧主压应力方向存在差异: 东北侧为NW或NNW向, 而西南侧近NS向, 部分区域表现为NNE向

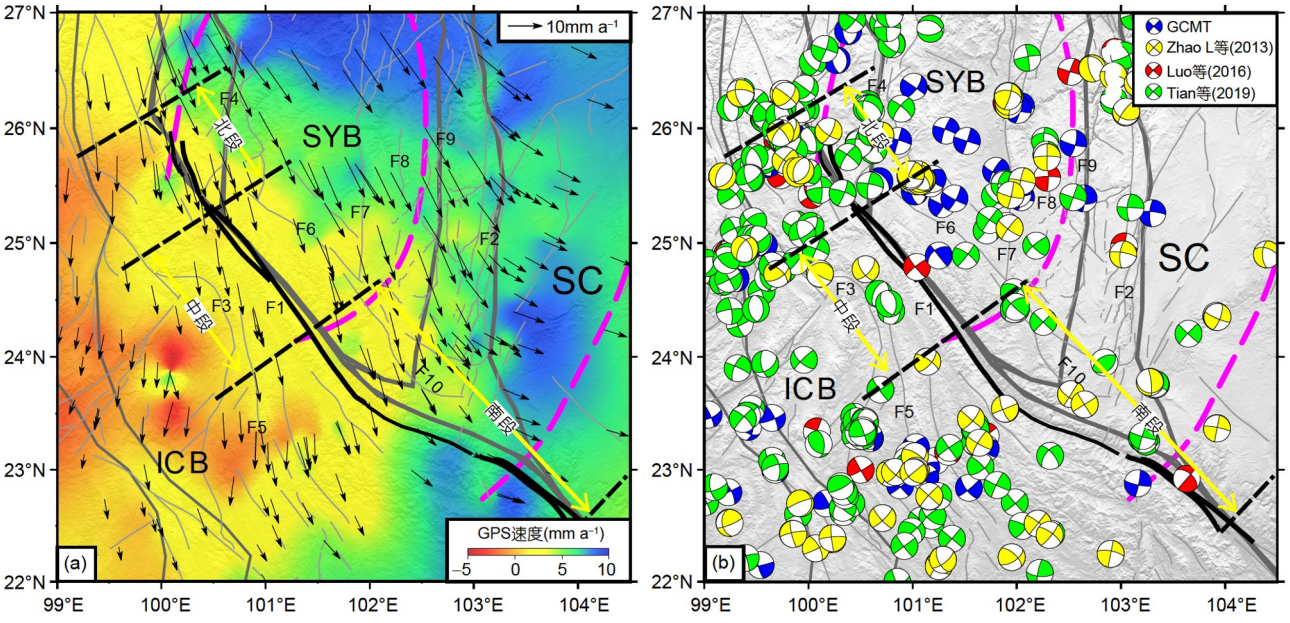

图 3 红河断裂带及附近地区GPS速度场和震源机制解

(a) GPS速度场. GPS数据来源于Wang和Shen(2020), 箭头方向表示相对稳定的欧亚板块, 云南地区的GPS运动方向; 箭头长短及底色表示GPS速度大小. (b) 震源机制解分布图. 不同颜色的震源球对应不同作者的结果. 其中蓝色震源球表示自历史地震记录至2023-07-01, 从GCMT获取的M_S5.0及以上地震的震源机制解(https://www.globalcmt.org/); 黄色震源球表示2008年1月至2011年3月云南地区3.4≤M_W≤6.0的震源机制解(Zhao L等, 2013); 红色震源球表示2007年8月至2014年12月云南地区3.5≤M_S≤7.4的震源机制解(Luo等, 2016); 绿色震源球表示2008年1月至2018年5月云南地区M_S≥3.0的震源机制解(Tian等, 2019). 图中断裂符号与构造线含义同图1

(Zhao L等, 2013; Luo等, 2016; Tian等, 2019; 盛书中等, 2022; 张致伟等, 2022). 受区域应力场制约, 红河断裂带各段应力作用存在差异(Zhao L等, 2013; Tian等, 2019). 基于强震和中小地震震源机制解分析, 红河断裂带各段的地震类型存在差异: 北段为混合型, 中段呈剪切走滑和局部拉张, 而南段为剪切走滑(图3b; 朱俊江等, 2004; 李亚敏等, 2008; Tian等, 2019). 根据174个中小地震震源机制解, Zhao L等(2013)发现川滇块体内主压应力近NW向, 红河断裂带附近呈近NS向, 直至印支块体内旋转至NE向. Luo等(2016)反演青藏高原东南缘300多个震源机制解, 得到红河断裂带北段和南段主压应力近NW或NNW向, 中段更近NS向. 基于丰富的1300多个震源机制解, 盛书中等(2022)观察到云南地区主压应力方位呈以西北角为中心的扇形分布, 其中红河断裂带北段应力场较为复杂, 表现NW、NS及NE多种方向.

2.3 显著区域变化的速度结构

人工地震测深和地球物理观测显示青藏高原东南缘体波和面波速度结构存在显著横向和垂向差异(图4; 张中杰等, 2005; 胥颐等, 2013; 王夫运等, 2014; Bao等, 2015, 2020; Fu等, 2017; Qiao等, 2018; 邓山泉等,

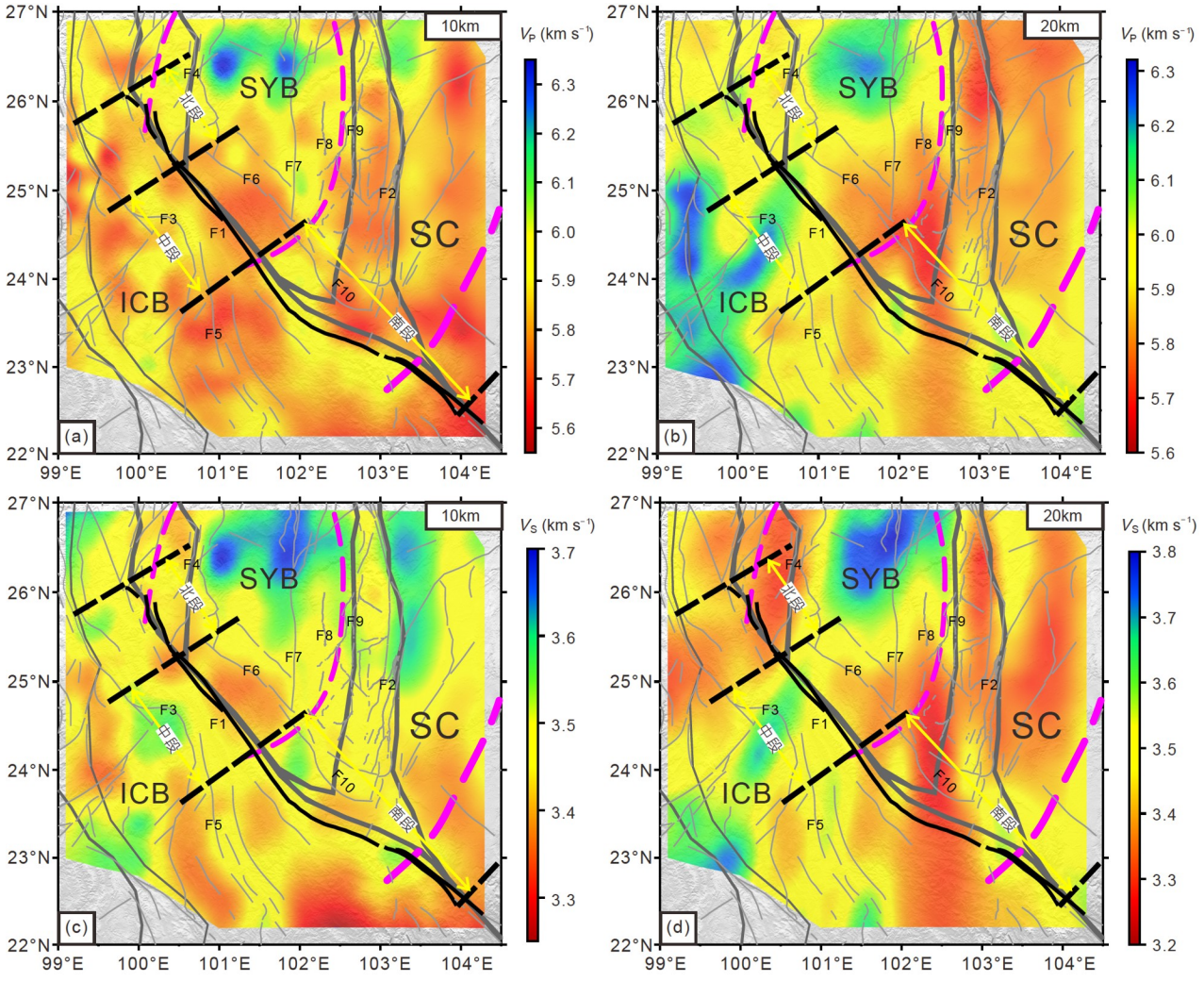

图 4　红河断裂带及附近地区P波和S波速度分布图

(a) 10km深度P波速度; (b) 20km深度P波速度; (c) 10km深度S波速度; (d) 20km深度S波速度. 数据来源于SWChinaCVM-2.0公共速度模型, 横向分辨率约为20~30km(刘影等, 2023). 图中断裂符号与构造线含义同图1

2020; 张智奇等, 2020; Liu等, 2021; Han等, 2022). 这些研究有一个重要的研究共识: 青藏高原东南缘中下地壳(20~30km)分布两条沿着块体边界断裂带向东南延伸的、较大范围的显著低速带, 其中西侧低速带从川滇块体北部向南可能跨越红河断裂带北段延伸至滇缅泰块体内, 而东侧低速带从川滇块体东南部向南可能穿过红河断裂带南段延伸至印支块体内(Bao等, 2015; 王琼等, 2015; Han等, 2017; 张智奇等, 2020; Liu等, 2021; 刘影等, 2023). 这一现象说明沿红河断裂带不存在连续的低速异常, 北段和南段低速区域并未相连(图4d). 红河断裂带北段的低速成因目前主要有两种解释(张智奇等, 2020; Liu等, 2022). 王琼等(2015)使用云南区域地震台网背景噪声数据, 反演得到周期5~34s的方位各向异性; 发现红河断裂带南段短周期Rayleigh波相速度表现大范围低速, 中长周期转为相对低速, 更长周期呈显著低速, 推测低速可能是上地幔部分熔融物质上涌所致(王琼和高原, 2014). 张智奇等(2020)利用川滇固定台站背景噪声和远震资料反演三维S波速度, 发现红河断裂带北段低速异常一直延伸至约150km, 推测低速可能与壳幔连通的岩浆侵入有关. Liu等(2022)根据程函方程反演P波到时数据, 发现显著低速异常跨丽江-小金河断裂向南延伸至红河断裂带北段, 认为低速可能与青藏高原物质韧性流动有关. 许多研究显示, 红河断裂带南段低速起源于小江断裂带下方通道化的壳内低速薄弱带, 甚至可能延伸至越南北部(Qiao等, 2018; Liu等, 2019; 张智奇等, 2020). 对于小江断裂带中下地壳低速成因, 有以下主要观点: (1) 可能源自青藏高原的弱物质地壳流(Bai等, 2010; Bao等, 2015), (2) 可能与走滑断裂带快速剪切、加热和软流圈热物质上涌相关(Qiao等, 2018), 以及(3) 可能是地壳挤压增厚导致长英质矿物塑性变形而原位形成(张智奇等, 2020; Han等, 2022; Peng等, 2023); 这些解释突显了红河断裂带南段复杂且多样的速度结构. 下地壳至上地幔顶部, 红河断裂带北段和南段速度差异明显: 北段持续表现低速, 而南段为相对高速(韦伟等, 2010; 张智奇等, 2020), 暗示红河断裂带南段可能已延伸至上地幔深度(Wang等, 2017; Zhang和Gao, 2019). 徐鸣洁等(2005)通过远震体波接收函数, 观测到红河断裂带附近S波速度在Moho深度处增大较快, 认为壳幔边界表现复杂的速度递增梯度带特征. 上地幔顶部, 红河断裂带两侧Pn波和Sn波速度呈明显分块特征, 东侧相对低速而西侧相对高速; 表明两侧介质性质可能不同, 暗示红河断裂带对地壳结构有重要的控制作用(裴顺平等, 2004; 黎源和雷建设, 2012; Zhou和Lei, 2016).

3 地震各向异性

大量地震学研究已经证实在地壳、地幔和核幔边界普遍存在介质各向异性(Fukao, 1984; Crampin等, 1985; Vinnik等, 1992; Pulliam和Sen, 1998). 地球内部不同深度的各向异性记录了历史及现今构造演变过程, 在地壳和上地幔尤为显著(Crampin和Peacock, 2005). 研究表明, 各向异性与介质构造中微裂隙或矿物晶格的优势排列方向等密切相关, 通常可造成地震波长尺度的各向异性(Silver和Chan, 1991; Wu等, 2015). 上地壳分布着大量受大型构造或区域主压应力场约束的充液定向排列EDA微裂隙是各向异性形成的主要原因(Gao等, 2011; Crampin和Gao, 2014). 中下地壳各向异性主要源于广泛存在的石英、长石、黑云母和角闪石在应力作用下的定向排列, 也受地壳流变特征的影响(Kong等, 2016). 而上地幔以特定方式排列的橄榄岩晶体, 一般认为是上地幔各向异性的主要来源(Silver, 1996). 通过分析地壳各向异性, 可以讨论区域构造性质和指示区域应力状态; 通过研究地壳与地幔各向异性, 还可以探讨区域深部动力结构和壳幔变形机制等科学问题(高原和滕吉文, 2005).

穿透地球不同深度介质的地震波是研究深部构造的重要信息来源(Gao等, 2011). 对于地震体波, 利用S波、Pms波以及XKS波在各向异性介质中分裂成快、慢波的性质, 可获取浅部地壳直至上地幔的各向异性, 但由于其相对陡峭的入射角, 反映的是介质平均效应, 具有较高的横向分辨率(Shi等, 2012; Lei等, 2014; Cai等, 2016; Kong等, 2018). 而对于不同周期的地震体波和面波资料, 由于其传播路径的特殊性, 约束的是不同深度的各向异性, 具有较高的垂向分辨率(Yao等, 2010; 王琼等, 2015; Liu等, 2019). 方位各向异性指地震波速度在垂直对称轴的不同方位上存在差异; 径向各向异性定量描述了水平方向(V_{SH})和垂直方向(V_{SV})极化的地震波速度间的差异: 正径向各向异性($V_{SH}>V_{SV}$)和负径向各向异性($V_{SH}<V_{SV}$)分别指示介质水平层状和垂向排列(Huang等, 2010).

围绕红河断裂带及附近区域，研究者利用不同的资料和方法反映了不同深度的地壳与地幔各向异性，提供了认识红河断裂带构造变形的观测依据(Liu等, 2019; 高原等, 2020; Han等, 2022; Li Y和Gao, 2023). 通过综合对比这些资料，结合横向和垂向分辨率互补的优势，可开展区域各向异性空间分布及分层现象的讨论.

3.1　地壳各向异性

3.1.1　近震S波各向异性

近震S波分裂，受震源深度及剪切波窗口大小限制，主要约束的是台站下方中上地壳各向异性(Crampin等, 1985; Gao等, 2011). 穿过上地壳各向异性介质的S波分裂成两列速度不同但偏振近乎垂直的快、慢S波列，其分裂参数表征介质的各向异性，还可以指示区域复杂构造和应力状态(Gao等, 2011; Li Y和Gao, 2023). 通过SAM(Systematic Analysis Method of S-wave splitting; 高原等, 2008)方法, Shi等(2012)、太龄雪等(2015)以及张艺和高原(2017)分别利用云南区域地震台网32个台站和中国地震科学台阵有效数据台站，均观测到川滇地区快S波近NNW向(图5a)，大致平行于区域主压应力方向或主压应变方向(Tian等, 2019; Wang和Shen, 2020)，但受区域内大量近NS和NE走向断裂带影响. 沿红河断裂带，快S波方向一般平行断裂带NW走向；但北段快S波方向呈相对复杂的形态，中南段两侧快S波方向存在显著差异：北侧呈NW向，而南侧为NNE向. 利用MFAST(Multiple Filter Automatic Splitting Technique; Savage等, 2010)方法，Zhang等(2018)获得了云南区域台网42个台站的S波分裂参数. 在红河断裂带北段附近, 快S波方向呈现较为复杂的特征，但位于断裂带上的洱源台(EYA)和团山台(TUS)更趋向平行于断裂带走向；而距离断裂带中段一定距离的楚雄台(CUX)则与近NS的主压应力方向相近. 然而，青藏高原东南缘有限覆盖的稀疏的固定台站限制了小尺度地壳结构的研究，密集的流动台阵提供了探测上地壳各向异性细节变化的机会. 通过微震识别补充遗漏地震资料，Gao等(2019)利用密集线性地震台阵(SL Array，平均台间距小于10km)，Li X和Gao(2023)利用密集面状地震台阵(SJ Array, 覆盖~1°×1°的26个台站)，均发现在三江侧向碰撞带(红河断裂带北端)各向异性有分区性，快S波方向自西向东由NNW向转至NS向，再转至NNE向. Li Y和Gao(2023)利用横跨红河断裂带和小江断裂带的密集线性地震台阵(HX Array, 平均台间距~19km)，发现红河断裂带中段两侧快S波平行于断裂带走向，可能形成了闭合(或闭锁)的变形一致的局部区域.

近震S波分裂参数指示, 红河断裂带控制了上地壳介质变形，但快S波方向存在分段差异. 北段快S波方向相对杂乱，暗示该区域具有复杂的构造形态和应力环境.

3.1.2　接收函数Pms波各向异性

接收函数Pms波分裂是利用P波在莫霍界面转换成的S波所携带的信息，只反映地壳内部的各向异性(Sun等, 2012; Kong等, 2016). 与近震S波分裂结果相比, 川滇地区接收函数各向异性剧烈变化, 但靠近红河断裂带, Pms快波方向似与断裂带走向相关(图5). 徐震等(2006)计算红河断裂带南段4个宽频带流动台站的接收函数，得到平均快波方向为132°，平行构造NW走向. 对于红河断裂带南段元江台(YUJ), Sun等(2012)利用径向和切向接收函数确定地壳各向异性的方法，得到快波方向约115°，与断裂带走向平行；而Chen等(2013)利用最小切向能量方法，得到快波方向约28°，与断裂带走向大角度相交，却与Xu等(2016)获得的原地主压应力方向相近. 基于红河断裂带中南段两侧流动台站，孙长青等(2013)使用最小切向能量方法，得到中段快波方向近似平行断裂带走向，南段呈复杂形态. 通过从观测地震图径向分量中直接拾取Pms震相，Yang等(2015)发现红河断裂带北段洱源台(EYA)和团山台(TUS)快波方向分别近NNE和NE向，认为可能受到丽江-小金河断裂的影响；南段元江台(YUJ)和金平台(JIP)快波方向近断裂带走向；但南端个旧台(GEJ)快波方向较复杂，推测可能受与小江断裂带相交的影响. 利用中国地震科学台阵(平均台间距~35km)资料，Cai等(2016)利用径向和切向接收函数确定地壳各向异性的方法，发现红河断裂带快波方向平行于断裂带走向，北段受周围不同走向断裂影响表现复杂特征.

徐震等(2006)得到红河断裂带南段平均慢波时间延迟~0.24s；Sun等(2012)和Chen等(2013)得到元江台(YUJ)慢波时间延迟分别为0.58s和0.22s；孙长青等(2013)得到红河断裂带中南段平均慢波时间延迟~0.25s；Cai等(2016)得到川滇地区平均慢波时间延迟

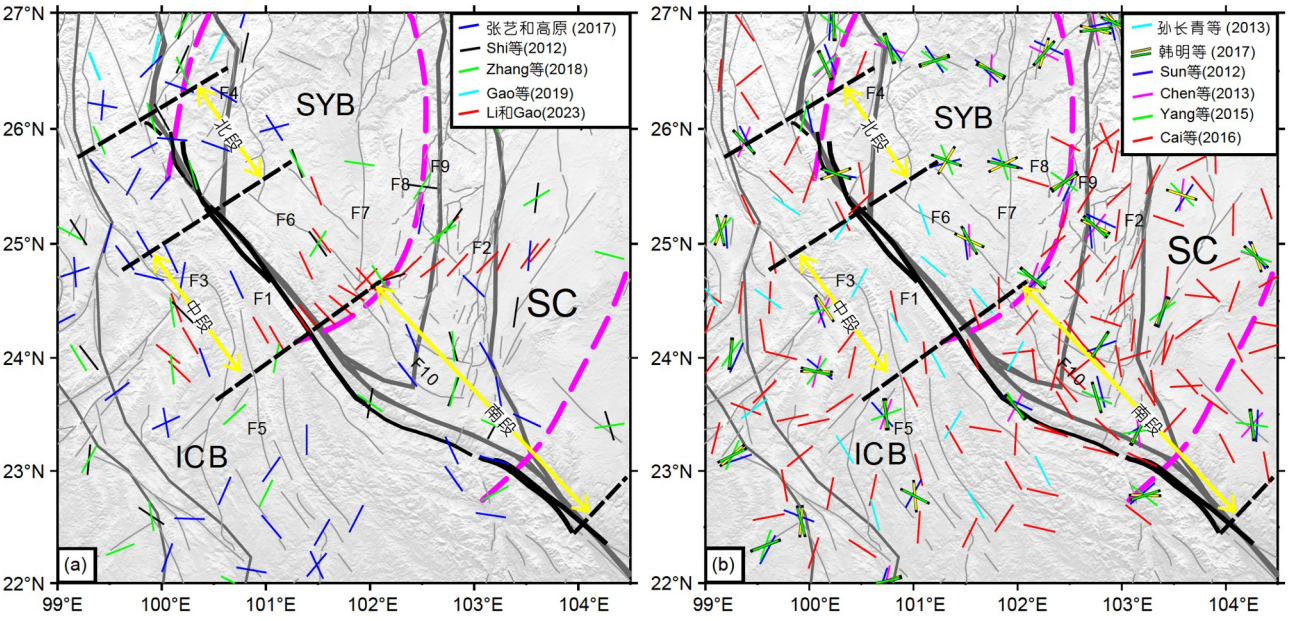

图 5　红河断裂带及附近地区地壳各向异性

(a) 近震S波各向异性; (b) 接收函数Pms波各向异性, 其中黄色和绿色短线表示来自韩明等(2017)的Pms波分裂参数, 黄色短线代表到时方差最小法获得的结果, 绿色短线表示叠加振幅最大法获得的结果. 图中断裂符号与构造线含义同图1

~0.28s, 沿红河断裂带中段大于北段和南段; 韩明等(2017)分别利用方位叠加到时方差最小法和叠加振幅最大法获得了青藏高原东南缘108个地震台站的Pms波分裂参数, 时间延迟在(0.05±0.06)s到(1.27±0.10)s; Hu等(2018)利用方位叠加到时方差最小法, 得到川滇地区固定台站平均分裂时间为(0.54±0.12)s, 沿红河断裂带分裂时间偏大.

川滇地区地壳表现显著的各向异性. 靠近红河断裂带, 平均分裂时间延迟较大, 中段大于北段和南段, 与地壳厚度分布特征一致(Wang等, 2017; Zhang和Gao, 2019). 沿着红河断裂带, Pms快波方向平行断裂带走向, 其中北段和南段可能分别受与丽江-小金河断裂和小江断裂带交汇的影响, 各向异性呈相对复杂形态. 离开红河断裂带一定距离后, Pms快波方向不再平行断裂带走向, 暗示红河断裂带作为一个可能贯穿地壳的深大断裂, 对周围介质有强烈的控制作用(高原等, 2020; Li Y和Gao, 2023).

3.1.3　地壳各向异性层析成像

利用地震体波和面波(包括背景噪声)资料可以获得不同周期、不同深度的方位和径向各向异性, 能够连贯约束垂向的壳幔变形特征(Yao等, 2010; Wei等, 2013). 方位各向异性指地震波速度对传播方位的依赖关系, 径向各向异性代表了两种偏振特性不同的地震波传播速度的差异, 都是推断地壳变形模式和深部构造动力机制的重要手段(Dong和Yang, 2022).

利用青藏高原东南缘10万多条近震和远震P波到时, Wei等(2013)首次获得三维P波各向异性: 10km深度, 红河断裂带北段P波各向异性较中段和南段更强, 北段快轴平行断裂带走向, 中段和南段快轴趋近NS向, 南段端部快轴偏NNE向; 25km深度, 北段快轴近断裂带走向但各向异性强度减弱, 南段快轴呈NNE向. 基于中国地震科学台阵记录的2万条P波和S波到时资料, Huang等(2018)获得青藏高原东南缘P波各向异性: 10km深度, 红河断裂带快轴平行断裂带走向, 离开断裂带两侧一定距离快轴方向发生变化; 25km深度, 断裂带附近快轴近NS或NNW向.

联合青藏高原东南缘77个宽频带台站的背景噪声和远震面波, Yao等(2010)观测到区域内的Raleigh波相速度快轴在上地壳平行于断裂带走向, 下地壳快轴指示可能的物质流动只发生在断裂带附近. 基于中国地震科学台阵Ⅰ期300多个台站的噪声资料, 鲁来玉等(2014)得到南北地震带南段Rayleigh面波群速度方位各向异性: 上地壳(8s), 红河断裂带附近快轴近NS向;

中下地壳(16~30s)，断裂带北段和南段快轴自近NS向过渡至NW向；下地壳(38s)，快轴在约26°N以南趋于断裂带走向. 利用云南55个固定台站的噪声数据，王琼等(2015)获得Rayleigh面波相速度方位各向异性：上地壳(5~12s)，红河断裂带附近快轴平行断裂带走向，北段呈NNW或近NS向；中下地壳(16~26s)，北段快轴更近NS向，可能与地壳弱物质运移有关. 基于云南49个固定台站的背景噪声，Liu等(2019)利用直接面波层析成像获取S波方位各向异性：5~30km深度，红河断裂带附近快轴近NS向，两端平行断裂带走向. 利用青藏高原东缘643个地震台站的噪声资料，Bao等(2020)反演S波速度方位各向异性：7km深度，红河断裂带附近快轴平行断裂带走向，北段各向异性强于中段和南段；~30km深度，大部分快轴垂直于断裂带走向，北段和南段快轴可能分别受丽江-小金河断裂和小江断裂带的影响发生偏转. 基于青藏高原东南缘540个流动台站的远震面波，王怀富等(2020)利用程函方程面波层析成像Rayleigh面波相速度方位各向异性：中上地壳(14~20s)，红河断裂带附近快轴近NS向，与断裂带走向有较大夹角；中下地壳(25~35s)，红河断裂带西侧快轴大致平行断裂带走向. 基于川滇地区100多个台站的噪声资料，杨元(2021)利用直接面波层析成像S波方位各向异性：5~10km深度，红河断裂带附近快轴近NW向，平行断裂带走向；15~20km深度，近NS向快轴平行区域主压应力方向；25~30km深度，断裂带南段快轴为NE向，与断裂带走向和区域应力场均有较大差异，认为可能与中下地壳弱物质运移有关.

利用川滇地区13个台站的Rayleigh波与Love波群速度频散数据，Chen等(2009)反演不同深度的径向各向异性：8km深度，红河断裂带附近呈负径向各向异性；18km深度，红河断裂带东侧呈大范围正径向各向异性；35km深度，红河断裂带中南段和小江断裂带之间表现强负径向各向异性. Xie等(2013，2017)结合青藏高原东南缘的Rayleigh波和Love波频散资料，发现上地壳红河断裂带中段为负径向各向异性，中下地壳断裂带附近主要呈正径向各向异性，认为可能存在分层各向异性结构. 通过云南固定台站Rayleigh波和Love波相速度资料，陈浩朋等(2018)获得径向各向异性：10km深度，红河断裂带附近表现弱正径向各向异性，但北段和南段呈弱负径向各向异性；20km深度，断裂带附近正径向各向异性增强，但北段端部存在一条带状负径向各向异性区域；30km深度，断裂带南段表现较强的正径向各向异性，似乎与小江断裂带下方正径向各向异性区联通；40km深度，断裂带附近呈弱正径向各向异性，但北段呈弱负径向各向异性. 利用青藏高原东缘187个固定台站和189个流动台站的噪声资料，杨志高等(2019)得到5km深度红河断裂带西侧为弱正径向各向异性，东侧为弱负径向各向异性；15km深度断裂带两侧均为正径向各向异性. 基于川滇100多个台站的噪声资料，Yang等(2020)利用直接面波层析成像径向各向异性：5~10km深度，红河断裂带附近为负径向各向异性；20~30km深度，断裂带中段两侧为正径向各向异性.

尽管体波和面波各向异性层析成像结果有差异，但二者均揭示了复杂的地壳各向异性. 上地壳，红河断裂带附近方位各向异性快轴近NS或NNW向，与断裂带走向存在较大夹角，但北段和南段快轴更平行断裂带走向. 中下地壳，断裂带北段各向异性程度比周围更强；南段端部快轴近NE向，与断裂带走向和区域应力方向均有较大差异，可能与小江断裂带下方的地壳弱物质运移有关. 对于径向各向异性，红河断裂带附近上地壳普遍表现负径向各向异性，中下地壳则多呈正径向各向异性，但北端可能存在较强负径向各向异性.

3.1.4　地壳各向异性结果的差异性

中上地壳，红河断裂带中南段的近震S波分裂和面波各向异性出现较大差异. 具体而言，快S波呈NW或NNW向，而方位各向异性快轴更近NS向. 这一差异可能是由于近震S波相对高频而更敏感，能反映局部构造和原地应力影响；而面波反映了特定深度范围的综合效应. 此外，各向异性和非均匀性的耦合效应，增加了模型的平滑性.

汇集不同研究者的结果显示，接收函数各向异性的快波方向和慢波时间延迟较为杂乱(图5b). 较低的Pms波信噪比和方位覆盖不足的数据会影响结果的稳定性，也与分析方法及使用数据的不同以及倾斜莫霍界面等因素有关(王琼等，2016；黄臣宇和常利军，2021). 由于全地壳各向异性的复杂性，多层各向异性也是一个不可忽视的重要因素(Liu和Park，2017；李莹和高原，2021). 基于青藏高原东南缘密集的500多个地震台站，Han等(2020)利用接收函数马尔科夫链-蒙特

卡罗(MCMC)方法反演地壳分层各向异性: 上地壳红河断裂带北段和南段快波平行断裂带走向, 各向异性约2%; 下地壳北段快波平行断裂带走向, 而中段和南段垂直断裂带走向, 各向异性高达4%. 多层各向异性结构会导致计算单层参数时的结果不稳定. 目前, 多层各向异性问题的探讨仍在初步阶段.

3.2 上地幔各向异性

3.2.1 远震Pn波各向异性

Pn波入射至莫霍面, 沿上地幔顶部近水平传播, 对确定壳幔边界介质结构和建立壳幔构造联系有着十分重要的意义(Hearn, 1996). Pn波各向异性被认为是构造应力控制的岩石圈地幔变形导致上地幔顶部橄榄岩晶格形成优势定向排列(Pei等, 2007). 利用2万多个Pn波到时, 黄金莉等(2003)反演了川滇上地幔顶部Pn波结构: 红河断裂带附近Pn快波近NS或NNW向, 北段和南段快波近断裂带走向; 靠近断裂带各向异性较强, 且南段各向异性强度大于北段和中段. 收集到30余万个Pn波到时, 崔仲雄和裴顺平(2009)得到了青藏高原东构造结及周边Pn波结构(分辨率为3°×3°): 红河断裂带附近Pn快波在东构造结呈顺时针旋转趋势, 断裂带两侧时间延迟变化与地壳厚度东深西浅的分布特征一致(Wang等, 2017). 严格挑选5万多个Pn波到时, 李飞等(2011)获得了川滇分辨率1°×1°的Pn波结构: 红河断裂带中南段Pn快波呈NW或NNW向, 与断裂带走向有很强的一致性; 但在离开断裂带一定距离后, 北侧Pn快波更近NS向. 基于5万多个Pn波到时, Lei等(2014)计算了青藏高原东缘分辨率1°×1°的Pn波结构(尤其加密了红河断裂带中南段的射线路径覆盖): 红河断裂带附近Pn快波呈近NS或NNW向, 与近EW向的远震SKS波分裂结果存在显著差异. 使用5万多个Pn波到时, Zhou和Lei(2016)获得了中国Pn波结构(分辨率为2°×2°): 在青藏高原东南缘有两条被川滇块体隔开、沿块体边界断裂带的近NS向低速带, Pn快波方向平行于低速走向; 沿红河断裂带Pn快波在北段近NE或ENE向, 中段快波近EW或WNW向, 南段快波近NW向, 表现明显分段性. 基于2万多个Pn波到时, Mi等(2021)获得中国南海地区的Pn波结构(分辨率为4°×4°), 观测到Pn快波方向与Zhou和Lei(2016)的结果大致相同, 但可能在红河断裂带中北段有较大夹角.

据Pn波各向异性结果(图6a), 红河断裂带附近变形呈现分段特征: 北段Pn快波方向较为杂乱, 中段近ENE或EW向, 南段更近NW向; 沿断裂带的时间延迟变化与地壳厚度分布有一致性(Wang等, 2017; Zhang和Gao, 2019), 即中段各向异性强度相对偏小, 南段各向异性强度最大.

3.2.2 远震XKS波各向异性

近垂直入射的XKS(PKS、SKS和SKKS)波穿过核幔边界返回地表, 穿过整个地壳和地幔. 不少研究者认为远震XKS波分裂反映上地幔各向异性, 但更准确地是反映岩石圈和软流圈顶面的各向异性(Lev等, 2006; Sol等, 2007). 利用云南固定台站11次地震记录的SKS数据, 阮爱国和王椿镛(2002)采用拟合理论与实测切向分量方法, 发现红河断裂带附近快波近NE向, 大致与印度板块的挤入方向一致. 通过测量红河断裂带两侧流动台站SKS和SKKS有效数据, Lev等(2006)观测到红河断裂带附近快波近ENE或EW向, 平均时间延迟值为0.5s, 个别台站延迟可达0.8s. 利用云南固定台站的SKS记录, 常利军等(2006)观测到红河断裂带北段EYA(洱源台)、TUS(团山台)和南段HHE(红河台)的快波方向分别为92°±10°、105°±9°和110°±6°; 整体近EW向, 平均时间延迟约1.0s, 表现强烈上地幔各向异性. 通过偏振分析SKS数据, 王椿镛等(2007)得到台站EYA、TUS和HHE的快波方向分别为103°±3°、113°±2°和104°±6°, 其中红河断裂带北端大致位于川滇西部26°~27°N的壳幔变形过渡带. Huang等(2007)测量了哀牢山-红河剪切带附近21个地震台站的SKS和SKKS波, 快波方向为105°±6°, 时间延迟为(1.68±0.44)s. 结合常利军等(2006)的结果, 统计得到红河断裂带西南侧快波方向为110°±19°, 东北侧为83°±30°, 并且西南侧平均慢波时间延迟比东北侧小0.27s, 暗示可能受到不同区域构造作用的影响. 通过测量红河断裂带附近50个地震台站1000多条XKS记录, Kong等(2018)发现红河断裂带附近快波近WNW或EW向, 个别台站部分SKS快波近NS向; 通过双层各向异性拟合, 显示上层分裂参数平行于红河断裂带走向, 而下层分裂参数以EW向为主. 高原等(2020)综合Shi等(2012)测量云南固定台站的284条XKS波数据和常利军等(2015)测量中国地震科学台阵的440条XKS波数据, 并增加四川地震台网23个台站495条XKS波资料, 清晰地确定XKS快波方向变化的南北分界约在~26°20′N, 沿红河断裂带快

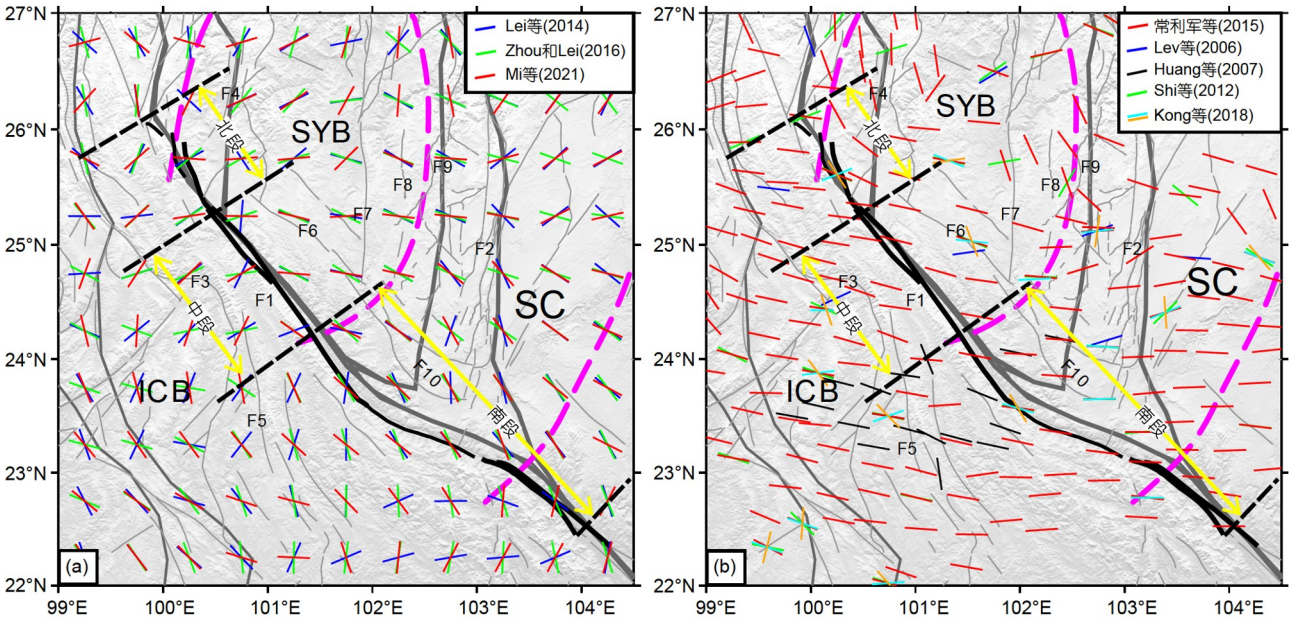

图 6　红河断裂带附近上地幔各向异性

(a) Pn波各向异性; (b) XKS波各向异性. 其中淡蓝色和橙色短线分别表示Kong等(2018)获得的XKS波第一优势偏振方向和第二优势偏振方向. 图中断裂符号与构造线含义同图1

波方向近EW向. 通过分析中国地震科学台阵记录的173条XKS数据, Huang和Chevrot(2021)发现高频(2~8s)的延迟时间通常低于低频(8~20s), 认为红河断裂带附近岩石圈和软流圈存在不同的地震各向异性模式: 岩石圈深度, XKS快波平行断裂带走向, 可能受到构造的控制作用; 软流圈深度, XKS快波近EW向, 可能受到印度板块东向俯冲和回撤驱动软流圈物质流动的影响. 基于横亘滇西的东西向密集线性地震台阵(~27°N)的354个XKS记录, Li等(2021)发现红河断裂带北端XKS快波表现强烈的近NS向, 而两侧呈WNW向弱各向异性.

红河断裂带附近XKS快波普遍近EW向(图6b). 在~26°20′N壳幔变形过渡带的红河断裂带北段端部, 快波方向相对复杂, 揭示存在复杂的壳幔物质运移和深部构造运动. 沿红河断裂带较大的分裂时间延迟表明强烈的上地幔各向异性.

3.2.3　上地幔各向异性层析成像

长周期地震波可用于探究深部各向异性(Yao等, 2010; Wei等, 2013).

Wei等(2013)反演P波各向异性, 观测到40km深度红河断裂带附近快轴近NE向; 60~100km深度, 快轴逐渐过渡至EW向, 认为地壳和岩石圈地幔可能存在解耦变形. Huang等(2018)测量P波各向异性发现, 40km深度, 红河断裂带北段快轴呈NE向, 中段快轴近NS或NNE向, 南段快轴近NS或NNW向; 60km深度, 各段快轴近EW或ENE向, 北段各向异性强于中段和南段.

王琼等(2015)观测Rayleigh面波相速度方位各向异性发现, 红河断裂带上地幔顶部(30~34s)快轴近NW和NNW向, 但向EW偏转. 利用云南固定台站远震资料, Chen等(2016)测量Rayleigh波相速度方位各向异性, 显示红河断裂带北段, 50~60km深度快轴近NW向; 80~110km深度快轴近EW向. Liu等(2019)反演S波速度方位各向异性观测到, 35~40km深度, 红河断裂带约24°N以南, 快轴出现近EW向; 45~60km深度, 近EW向快轴北扩至25°N且越来越强, 即红河断裂带北段快轴呈NW向, 中段和南段近EW向. 基于云南地区132个固定和流动台站的远震资料, Wu等(2019)测量Rayleigh面波方位各向异性: 35s红河断裂带附近快轴平行断裂带走向; 45s断裂带西侧快轴方向发生变化, 认为可能与上地幔橄榄岩变形和深部物质上涌有关; 60s断裂带附近快轴近EW向, 东侧各向异性强度明显减弱. Bao等(2020)反演S波速度方位各向异性, 观测到~60km深度红河断裂带两侧快轴近EW向, 斜交断裂带走向. 王

怀富等(2020)测量Rayleigh波相速度方位各向异性, 显示红河断裂带附近长周期(45~55s)快轴由NW或NE向转至WNW向, 认为可能与印支块体挤出相关. 杨元(2021)直接反演S波速度方位各向异性, 发现在35~40km深度, 红河断裂带东侧低速区快轴近NW向, 西侧高速区快轴近NE向, 认为可能受上地幔物质运动影响.

Chen等(2009)获得的径向各向异性显示: 55~75km深度, 红河断裂带两侧均为正径向各向异性; 90km深度, 断裂带东侧出现小范围负径向各向异性; 110~170km深度, 断裂带两侧完全变为负径向各向异性. 陈浩朋等(2018)反演的径向各向异性显示: 50~60km深度, 红河断裂带中段表现强正径向各向异性, 而北段和南段呈弱正径向各向异性; 80~100km深度, 断裂带北段变为负径向各向异性, 中段和南段呈大范围强正径向各向异性.

上地幔各向异性层析成像与远震XKS波分裂结果较为相似, 都显示红河断裂带附近快轴近EW向. 但层析成像展现了方位各向异性随深度的变化, EW向快轴呈由南向北扩展的特征. 由于云南地区的平均岩石圈厚度~90km(An和Shi, 2006; Yang等, 2017), 上地幔大范围正径向各向异性可能反映EW向软流圈物质流动. 岩石圈变形和软流圈物质流动共同影响了上地幔各向异性.

3.2.4 地壳与地幔各向异性结果的差异性

个别接收函数Pms波各向异性显示, 若干台站测得的平均时间延迟~0.5s(Sun等, 2012), 接近甚至超过主要由上地幔各向异性以及包括地壳各向异性的XKS波时间延迟. 除了前述接收函数分析多方面影响因素外, 另一个可能的重要原因就是壳幔综合各向异性效应. 左佳卉和钮凤林(2019)利用剥去台站下方地壳各向异性的分析技术, 结果显示红河断裂带中段北侧楚雄台(CUX)一层分裂参数随着不同方位角变化, 表明地壳和岩石圈地幔存在双层各向异性. 综合多个研究结果, 本文认为远震XKS波分裂并不必然是上地幔各向异性, 不能轻易忽略地壳各向异性的影响.

一些学者认为云南地区的各向异性层厚度可能分布在60~200km深度, 覆盖岩石圈和软流圈(阮爱国和王椿镛, 2002; 常利军等, 2006; Lev等, 2006; Shi等, 2012). 然而, 刚性岩石圈和韧性软流圈分别指示不同的上地幔介质变形机制. 由于远震XKS波分裂反映的是核幔边界到地表传播路径各向异性的累积效应, 探测准确的各向异性深度分布, 需要各向异性分析技术的发展.

4 壳幔地震各向异性讨论

上地壳, 川滇地区快S波方向近NNW向, 大致平行于区域主压应力方向; 但受区域内大量近NS和NE走向断裂影响, 表现明显空间分区特征(Shi等, 2012; 李莹和高原, 2021). 沿红河断裂带, 快波呈NNW或近NS向, 近似平行构造走向和应力方向. 红河断裂带北段快S波方向较为复杂, 端部快S波自西向东由NNW向偏至NS向再至NNE向, 可能受周边NS走向程海断裂、NE走向丽江-小金河断裂以及三江侧向碰撞带应力场影响(Gao等, 2019; Liu等, 2019). 红河断裂带中段和南段, 距离断裂带两侧一定范围内, 快S波呈NW向定向排列特征(Li Y和Gao, 2023). 大地测量资料表明, 红河断裂带中段的应变较弱、闭锁程度较高(Pan和Shen, 2017; 徐文等, 2019; Wang和Shen, 2020; 邵志刚等, 2022). 由于地壳运动和应力作用, 红河断裂带中段地壳可能闭合(或闭锁), 形成NW向变形一致的局部区域(高原等, 2020; Li Y和Gao, 2023). 然而, 红河断裂带中南段面波方位各向异性快轴更近NS向(Huang等, 2018; Liu等, 2019; 王怀富等, 2020), 与断裂带走向存在较大夹角, 但与原地主压应力方向相近(Zhao L等, 2013; Luo等, 2016). 研究显示约10km深度, 红河断裂带中段表现较高S波速度、较高Q值、较低重力变化率和弱负径向各向异性(Chen等, 2009; Zhao L F等, 2013; Deng等, 2014; 陈浩朋等, 2018; He等, 2021; Liu等, 2021; 刘影等, 2023). 这些现象一方面表明红河断裂带中段可能存在相对坚硬物质, 控制两侧一定宽度区域的变形(Li Y和Gao, 2023); 另一方面暗示这一位置可能经历过垂向运移, 方位各向异性快轴方向变化可能与峨眉山大火成岩省的岩浆活动有关(Xu等, 2004; 张智奇等, 2020). 红河断裂带南段部分台站的快S波呈NNW、近NS和NNE向, 显然受与小江断裂带和华南块体相接的影响(高原等, 2020). 有趣的是, 红河断裂带南段端部的北侧快S波近NNE向, 南侧则呈NW向; 这一差异暗示两侧物质可能受控于不同的构造作用, 表明楔形交汇区具有复杂的构造形态和应力环境.

中下地壳, 川滇地区体波和面波方位各向异性快轴呈现更为一致的NS优势取向, 沿红河断裂带快波方向发生偏转(Huang等, 2018; Liu等, 2019). 红河断裂带北段方位各向异性快轴表现复杂形态; 随着深度增加, 低速区内近NS向快轴持续加强(王琼等, 2015; Liu等, 2019). 更大范围的研究表明, 这里的低速异常可能起源于青藏高原内部, 向南跨越丽江-小金河断裂延伸至红河断裂带北段(张智奇等, 2020; Peng等, 2023). 方位各向异性快轴可能指示近NS向的地壳软弱物质运动(Liu等, 2019; Han等, 2022). 研究显示, 红河断裂带北段地壳泊松比值高达0.28~0.30(徐鸣洁等, 2005; Zhang和Gao, 2019), 端部表现明显高电导率(Yu等, 2020, 2022), 东北部表现显著P波和S波低速异常(邓山泉等, 2020; Liu等, 2021; 刘影等, 2023). 这些现象支持红河断裂带北段地壳可能曾发生富含铁镁质的地幔物质底侵, 形成具有不同物理性质的复杂地壳介质(Bai等, 2010; Bao等, 2015; 高原等, 2020). 红河断裂带中段的方位各向异性快轴逐渐偏离NS向(Liu等, 2019; Han等, 2022), 这一变化可能与川滇块体旋转运动以及峨眉山大火成岩省内带的岩浆活动有关(Xu等, 2004; Gan等, 2022). 红河断裂带南段的方位各向异性快轴由近NS向转至NE向, 与断裂带走向有较大夹角(王琼等, 2015; Liu等, 2019). 研究认为小江断裂带中下地壳可能存在一条近NNE向通道化低速高导薄弱带, 并可能穿过红河断裂带南段影响中下地壳物质运移(Bai等, 2010; Bao等, 2015; Qiao等, 2018; 张智奇等, 2020). 红河断裂带南段附近表现低泊松比值(徐鸣洁等, 2005; Zhang和Gao, 2019)、低Q值(Zhao L F等, 2013; He等, 2021)、高热流值(Wang, 2001; Jiang等, 2019)、高电导率值(Yu等, 2020)和强正径向各向异性(Chen等, 2013; 陈浩朋等, 2018). 这些结果表明红河断裂带南段富含长英质的软弱地壳可能较易发生部分熔融; 受红河断裂带尾端走滑拖曳以及块体交汇形成的复杂应力场的共同影响, 促使塑性物质水平运移, 导致各向异性发生变化.

就全地壳各向异性而言, 川滇地区地壳各向异性十分强烈. 红河断裂带两侧接收函数Pms快波方向与NW构造走向有很好的一致性; 但离开断裂带一定距离后, 快波方向发生变化(Li Y和Gao, 2023). 沿红河断裂带, 接收函数平均分裂时间延迟较大(Sun等, 2012; Cai等, 2016; Hu等, 2018), 暗示红河断裂带作为一个可能贯穿地壳的深大断裂对周围介质有强烈控制作用(高原等, 2020; Li Y和Gao, 2023).

上地幔顶部, 红河断裂带南段约24°N以南, 面波方位各向异性快轴出现近EW向, 并逐渐向北扩展; 但红河断裂带北段快轴方向相对杂乱(王琼等, 2015; Liu等, 2019). 沿断裂带的时间延迟变化较大, 南段各向异性强度大于北段和中段(李飞等, 2011; Lei等, 2014), 与地壳厚度分布有一致性(Zhang和Gao, 2019). Zhou和Lei(2016)观测到川滇块体附近可能存在两条近NS向的Pn波低速带, 其位置正好围绕峨眉山大火成岩省内带, 分别跨过红河断裂带北段和南段. 向东及向南运移的上地幔顶部部分熔融弱物质, 跨过红河断裂带北段后可能遇坚硬的印支块体阻挡, 导致物质积聚和应力积累(Liu等, 2019; 张智奇等, 2020). 红河断裂带南段可能受小江断裂带中下地壳物质运移以及不同块体的侧向挤压作用, 形成复杂的构造和应力环境(Han等, 2022; Peng等, 2023).

上地幔, 川滇南部近EW向面波方位各向异性逐渐增强(Liu等, 2019; 高原等, 2020). 研究显示, 青藏高原东缘远震XKS快波方向以26°~27°N为南北分界, 北部快波近NS向, 南部快波近EW向(Lev等, 2006; 常利军等, 2015; 高原等, 2020). 在~26°20′N壳幔变形过渡带的红河断裂带北端, XKS快波方向相对复杂(常利军等, 2015; 高原等, 2020), 地壳厚度、岩石圈厚度和泊松比值都发生剧烈变化(徐鸣洁等, 2005; An和Shi, 2006; Wang等, 2017; Yang等, 2017). 大地电磁测深显示红河断裂带上地幔东北部存在较大高电导率体, 并延伸至地壳(Bai等, 2010; Yu等, 2020, 2022); 大地热流和地球化学观测到这一位置呈高地热异常和高幔源氦值(王云等, 2019; 周晓成等, 2020). 这些现象表明红河断裂带北段具有复杂壳幔结构和深部运动. 红河断裂带中段和南段上地幔各向异性均近EW向, 完全未受断裂走向的影响(Lev等, 2006; 高原等, 2020). 上地幔P波和S波速度成像显示川滇南部存在大范围低速区域(Li等, 2008; Wang等, 2010), 上地幔顶部广泛的正径向各向异性可能反映了EW向软流圈物质流动(Chen等, 2009). 上地幔XKS快波方向可能受印度板块下插或回撤导致的岩石圈橄榄岩变形以及软流圈物质流动影响(常利军等, 2015; Huang等, 2018). 本文认为在红河断裂带, 主要在~26°20′N以南区域, 低速韧性、易于流动的中下地壳可能如同滑脱层, 促使地壳与岩石圈

地幔解耦变形, 并可能与印度板块俯冲和回撤等有关.

5 结论

俯冲的印度板块持续楔入, 遇坚硬华南块体阻挡, 导致青藏高原东南缘的川滇块体和印支块体SE向挤出, 形成了多条切割块体的深大断裂带. 作为川滇块体西边界的红河断裂带, 不仅是分隔印支块体与华南块体的显著构造界限, 也是控制地壳深部运动变形的重要断裂带. 地球物理资料显示红河断裂带具有分段性, 地震各向异性表现区域横向空间展布和垂向层次分布的复杂形态.

(1) 从地壳分层角度看, 红河断裂带两侧快S波方向与NW构造走向有一致性, 离开断裂带一定距离后方向发生变化, 揭示红河断裂带作为一个可能贯穿地壳的深大断裂对周围介质有强烈的控制作用. 上地壳, 红河断裂带从北至南各段快S波方向存在差异: 北段较为复杂, 可能受三江侧向碰撞带以及附近NS和NE走向断裂的影响; 中段呈NW向定向排列特征, 可能形成了局部闭合(或闭锁)的变形一致区域; 南段较为杂乱, 可能受与小江断裂带相接影响, 表明楔形交汇区具有复杂的构造形态和应力环境. 中下地壳, 红河断裂带北段和南段方位各向异性表现较强的、更近壳内低速高导薄弱带走向的形态, 暗示各向异性可能与中下地壳塑性物质的运移有关.

(2) 在岩石圈尺度, 随着深度增加, 红河断裂带附近方位各向异性快轴由南向北逐渐出现近EW向. 位于壳幔各向异性过渡带(26°~27°N)以南, 红河断裂带XKS快波更近EW向, 完全未受断裂带走向影响, 与上地幔P波和S波低速以及正径向各向异性形态有很好的一致性. 然而, 红河断裂带北段可能受到印支块体、峨眉山大火成岩省以及深部直立墙形构造的联合作用, 形成复杂的深部构造和应力状态.

(3) 浅层地壳, 巨型走滑的红河断裂带和区域应力场共同形成NW的构造走向. 中下地壳, 红河断裂带北段和南段各向异性快波与壳内低速薄弱通道走向一致, 但整体受断裂走向影响. 岩石圈深度, 红河断裂带附近XKS快波近EW向, 可能与印度板块下插或回撤, 导致岩石圈橄榄岩变形和软流圈物质流动有关. 本文认为在红河断裂带域, 主要在~26°20′N以南, 地壳与岩石圈地幔可能存在解耦变形, 并可能与板块俯冲和回撤等有关.

综合分析多种地球物理观测数据和反演结果, 我们能够刻画出红河断裂带附近精细的地壳-上地幔各向异性结构. 然而, 关于红河断裂带横向和垂向的规模尺度和影响范围, 以及北段和南段受中下地壳物质流变影响的各向异性结构等科学问题, 还需深入地定量化或理论化探讨. 随着更密集的地球物理台阵与更高精度的观测资料的支持, 多种数据和方法有助于探明红河断裂带分段和分层的细节各向异性, 不断深化理解该断裂带构造意义.

致谢 感谢执行主编、责任编委和两位审稿人对本文提出的宝贵修改意见和建议. 感谢雷建设研究员提供研究团队相关文章的Pn波各向异性数据.

参考文献

白志明, 王椿镛. 2003. 云南地区上部地壳结构和地震构造环境的层析成像研究. 地震学报, 25: 117–127

常利军, 王椿镛, 丁志峰. 2006. 云南地区SKS波分裂研究. 地球物理学报, 49: 197–204

常利军, 丁志峰, 王椿镛. 2015. 南北构造带南段上地幔各向异性特征. 地球物理学报, 58: 4052–4067

陈浩朋, 李志伟, 储日升, 谢军, 崇加军, 叶庆东. 2018. 云南地区地壳上地幔三维S波速度与径向各向异性结构研究. 地球物理学报, 61: 3219–3236

崔仲雄, 裴顺平. 2009. 青藏高原东构造结及周边地区上地幔顶部Pn速度结构和各向异性研究. 地球物理学报, 52: 2245–2254

邓山泉, 章文波, 于湘伟, 宋倩, 王小娜. 2020. 利用区域双差层析成像方法研究川滇南部地壳结构特征. 地球物理学报, 63: 3653–3668

高原, 滕吉文. 2005. 中国大陆地壳与上地幔地震各向异性研究. 地球物理学进展, 20: 180–185

高原, 石玉涛, 梁维, 刘希强, 郝平. 2008. 剪切波分裂分析系统SAM (2007)——软件系统. 中国地震, 24: 345–353

高原, 石玉涛, 王琼. 2020. 青藏高原东南缘地震各向异性及其深部构造意义. 地球物理学报, 63: 802–816

虢顺民, 计凤桔, 向宏发. 2001. 红河活动断裂带. 北京: 海洋出版社

韩明, 李建有, 徐晓雅, 胡家富. 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. 地球物理学报, 60: 4537–4556

何希虎, 周瑞琦, 张双林, 龙建章. 1983. 红河断裂带地震地质特征. 云南地质, 2: 88–101

黄臣宇, 常利军. 2021. 基于横波分裂的青藏高原多圈层各向异性研究进展. 地球与行星物理论评, 52: 164–181

黄金莉, 宋晓东, 汪素云. 2003. 川滇地区上地幔顶部Pn速度细结构. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 144–150

黄学猛, 许志琴, 张进江. 2017. 哀牢山-红河断裂带新生代构造转换及其动力学机制. 地球学报, 38: 7–10

阚荣举, 张四昌, 晏枫桐, 俞林胜. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨. 地球物理学报, 20: 96–109

阚荣举, 王绍晋, 黄崐, 宋文. 1983. 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动. 地震地质, 5: 79–90

黎源, 雷建设. 2012. 青藏高原东缘上地幔顶部Pn波速度结构及各向异性研究. 地球物理学报, 55: 3615–3624

李飞, 周仕勇, 苏有锦, 李鹏, 邓存华, 李雷, 王兰兰. 2011. 川滇及邻区Pn波速度结构和各向异性研究. 地球物理学报, 54: 44–54

李西, 冉勇康, 陈立春, 王虎, 于江, 张彦琪, 谢英情. 2016. 红河断裂带南段全新世地震活动证据. 地震地质, 38: 596–604

李亚敏, 徐辉龙, 孙金龙, 丘学林, 施小斌. 2008. 红河断裂带及其邻区的震源机制解特征及其反映的断裂活动分段性. 热带海洋学报, 27: 32–39

李莹, 高原. 2021. 青藏高原东南缘地质构造基本形态与地震各向异性基本特征. 地震, 41: 15–45

刘影, 于子叶, 张智奇, 姚华建, 王伟涛, 张海江, 方洪健, 房立华. 2023. 基于密集流动台阵构建的川滇地区高分辨率公共速度模型2. 中国科学: 地球科学, 53: 2407–2424

鲁来玉, 何正勤, 丁志峰, 王椿镛. 2014. 基于背景噪声研究云南地区面波速度非均匀性和方位各向异性. 地球物理学报, 57: 822–836

裴顺平, 许忠淮, 汪素云. 2004. 中国大陆及邻近地区上地幔顶部Sn波速度层析成像. 地球物理学报, 47: 250–256

钱晓东, 秦嘉政, 刘丽芳. 2011. 云南地区现代构造应力场研究. 地震地质, 33: 91–106

阮爱国, 王椿镛. 2002. 云南地区上地幔各向异性研究. 地震学报, 24: 260–267

邵志刚, 武艳强, 季灵运, 刁法启, 石富强, 李玉江, 龙锋, 张辉, 朱良玉, 陈长云, 王武星, 魏文薪, 王芃, 刘晓霞, 刘琦, 潘正洋, 尹晓菲, 刘月, 冯蔚, 邹镇宇, 曹建玲, 徐晶, 韩立波, 程佳, 鲁人齐, 徐岳仁, 李西, 孙鑫喆. 2022. 中国大陆活动地块边界带主要断层的强震震间晚期综合判定. 地球物理学报, 65: 4643–4658

盛书中, 胡晓辉, 王晓山, 万永革, 李红星, 李振月, 田宵, 王向腾, 张苏祥. 2022. 云南及邻区地壳应力场研究. 地球物理学报, 65: 3252–3267

孙庆山, 李乐. 2020. 利用重复微震估算红河断裂带北段深部滑动速率. 地球物理学报, 63: 478–491

孙长青, 雷建设, 李聪, 张广伟, 查小惠, 李飞. 2013. 云南地区地壳各向异性及其动力学意义. 地球物理学报, 56: 4095–4105

太龄雪, 高原, 刘庚, 肖卓. 2015. 利用中国地震科学台阵研究青藏高原东南缘地壳各向异性: 第一期观测资料的剪切波分裂特征. 地球物理学报, 58: 4079–4091

王椿镛, 常利军, 吕智勇, 秦嘉政, 苏伟, Silver P, Flesch L. 2007. 青藏高原东部上地幔各向异性及相关的壳幔耦合型式. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 495–503

王椿镛, 杨文采, 吴建平, 丁志峰. 2015. 南北构造带岩石圈结构与地震的研究. 地球物理学报, 58: 3867–3901

王夫运, 潘素珍, 刘兰, 刘宝峰, 张建狮, 邓晓果, 马策军, 张彩军. 2014. 玉溪-临沧剖面宽角地震探测——红河断裂带及滇南地壳结构研究. 地球物理学报, 57: 3247–3258

王怀富, 吴建平, 周仕勇, 房立华, 王未来, 刘雅宁. 2020. 青藏高原东南缘基于程函方程的面波方位各向异性研究. 地球物理学报, 63: 1070–1084

王琼, 高原. 2014. 青藏东南缘背景噪声的瑞利波相速度层析成像及强震活动. 中国科学: 地球科学, 44: 2440–2450

王琼, 高原, 石玉涛. 2015. 青藏高原东南缘基于背景噪声的Rayleigh面波方位各向异性研究. 地球物理学报, 58: 4068–4078

王琼, 高原, 钮凤林, 陈运泰. 2016. 利用接收函数计算地壳各向异性的可靠性分析及倾斜界面的影响. 地震, 36: 14–25

王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 王敏, 甘卫军, 乔学军, 孟国杰, 李铁明, 陶玮, 杨永林, 程佳, 李鹏. 2008. 基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 582–597

王云, 李其林, 赵慈平. 2019. 红河断裂带水热活动与构造活动分析. 国际地震动态, 7: 136–137

韦伟, 孙若昧, 石耀霖. 2010. 青藏高原东南缘地震层析成像及汶川地震成因探讨. 中国科学: 地球科学, 40: 831–839

谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 刘光勋. 1993. 中国西南地区现代构造应力场基本特征. 地震学报, 15: 407–417

胥颐, 杨晓涛, 刘建华. 2013. 云南地区地壳速度结构的层析成像研究. 地球物理学报, 56: 1904–1914

徐鸣洁, 王良书, 刘建华, 钟锴, 李华, 胡德昭, 徐震. 2005. 利用接收函数研究哀牢山-红河断裂带地壳上地幔特征. 中国科学D辑: 地球科学, 35: 729–737

徐文, 许才军, 肖卓辉, 王帅. 2019. 利用GPS数据反演中国红河断裂带活动特性. 武汉大学学报(信息科学版), 44: 706–713

徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 马文涛, 宋方敏, 于贵华. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学D辑: 地球科学, 33(增刊): 151–162

徐锡伟, 韩竹军, 张国民, 等. 2016. 中国及邻近地区地震构造图. 北京: 地震出版社

徐震, 徐鸣洁, 王良书, 刘建华, 钟锴, 童蔚蔚. 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. 地球物理学报, 49: 438–448

许志琴, 王勤, 李忠海, 李化启, 蔡志慧, 梁凤华, 董汉文, 曹汇, 陈希节, 黄学猛, 吴婵, 许翠萍. 2016. 印度-亚洲碰撞: 从挤压到走滑的构造转换. 地质学报, 90: 1–23

杨元. 2021. 青藏高原东缘地壳上地幔横波速度和各向异性结构研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学. 1–141

杨志高, 陈运泰, 张雪梅. 2019. 青藏高原东缘及东北缘S波速度结构

和径向各向异性. 地球物理学报, 62: 4554–4570
张进江, 钟大赉, 周勇. 1999. 东南亚及哀牢山-红河构造带构造演化的讨论. 地质论评, 45: 337–344
张进江, 钟大赉, 桑海清, 周勇. 2006. 哀牢山-红河构造带古新世以来多期活动的构造和年代学证据. 地质科学, 41: 291–310
张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学D辑: 地球科学, 33(增刊): 12–20
张艺, 高原. 2017. 中国地震科学台阵两期观测资料近场记录揭示的南北地震带地壳剪切波分裂特征. 地球物理学报, 60: 2181–2199
张致伟, 龙锋, 赵小艳, 王迪. 2022. 川滇地区的震源机制解及应力场特征. 地震地质, 44: 170–187
张智奇, 姚华建, 杨妍. 2020. 青藏高原东南缘地壳上地幔三维S波速度结构与动力学意义. 中国科学: 地球科学, 50: 1242–1258
张中杰, 白志明, 王椿镛, 滕吉文, 吕庆田, 李继亮, 刘一峰, 刘振宽. 2005. 三江地区地壳结构及动力学意义: 云南遮放-宾川地震反射/折射剖面的启示. 中国科学D辑: 地球科学, 35: 314–319
周晓成, 王万丽, 李立武, 侯健民, 邢蓝田, 李中平, 石宏宇, 颜玉聪. 2020. 金沙江-红河断裂带温泉气体地球化学特征. 岩石学报, 36: 2197–2214
朱俊江, 詹文欢, 丘学林, 徐辉龙, 唐诚. 2004. 红河断裂带两侧地震震源机制及构造意义. 大地构造与成矿学, 28: 239–247
左佳卉, 钮凤林. 2019. 利用多层横波各向异性测量方法计算两层介质的分裂参数. 地球物理学报, 62: 2885–2898
Allen C R, Gillespie A R, Han Y, Sieh K E, Zhang B, Zhu C. 1984. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard. GSA Bull, 95: 686–700
An M, Shi Y. 2006. Lithospheric thickness of the Chinese continent. Phys Earth Planet Inter, 159: 257–266
Bai D, Unsworth M J, Meju M A, Ma X, Teng J, Kong X, Sun Y, Sun J, Wang L, Jiang C, Zhao C, Xiao P, Liu M. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging. Nat Geosci, 3: 358–362
Bao X, Sun X, Xu M, Eaton D W, Song X, Wang L, Ding Z, Mi N, Li H, Yu D, Huang Z, Wang P. 2015. Two crustal low-velocity channels beneath SE Tibet revealed by joint inversion of Rayleigh wave dispersion and receiver functions. Earth Planet Sci Lett, 415: 16–24
Bao X, Song X, Eaton D W, Xu Y, Chen H. 2020. Episodic lithospheric deformation in eastern Tibet inferred from seismic anisotropy. Geophys Res Lett, 47: e2019GL085721
Cai Y, Wu J, Fang L, Wang W, Yi S. 2016. Crustal anisotropy and deformation of the southeastern margin of the Tibetan Plateau revealed by Pms splitting. J Asian Earth Sci, 121: 120–126
Chen H, Zhu L, Su Y. 2016. Low velocity crustal flow and crust–mantle coupling mechanism in Yunnan, SE Tibet, revealed by 3D S-wave velocity and azimuthal anisotropy. Tectonophysics, 685: 8–20
Chen Y, Badal J, Zhang Z. 2009. Radial anisotropy in the crust and upper mantle beneath the Qinghai-Tibet Plateau and surrounding regions. J Asian Earth Sci, 36: 289–302
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. Gondwana Res, 24: 946–957
Crampin S, Peacock S. 2005. A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic Earth. Wave Motion, 41: 59–77
Crampin S, Peacock S. 2008. A review of the current understanding of seismic shear-wave splitting in the Earth's crust and common fallacies in interpretation. Wave Motion, 45: 675–722
Crampin S, Gao Y. 2014. Two species of microcracks. Appl Geophys, 11: 1–8
Crampin S, Evans R, Üçer S B. 1985. Analysis of records of local earthquakes: The Turkish Dilatancy Projects (TDP1 and TDP2). Geophys J Int, 83: 1–16
Deng Y, Zhang Z, Mooney W, Badal J, Fan W, Zhong Q. 2014. Mantle origin of the Emeishan large igneous province (South China) from the analysis of residual gravity anomalies. Lithos, 204: 4–13
Dong X, Yang D. 2022. Positions of large earthquakes revealed from velocity heterogeneities and radial anisotropy in the eastern Tibetan Plateau. Sci Bull, 67: 2026–2029
Fu Y V, Gao Y, Li A, Li L, Chen A. 2017. Lithospheric structure of the southeastern margin of the Tibetan Plateau from Rayleigh wave tomography. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 4631–4644
Fukao Y. 1984. Evidence from core-reflected shear waves for anisotropy in the Earth's mantle. Nature, 309: 695–698
Gan W, Molnar P, Zhang P, Xiao G, Liang S, Zhang K, Li Z, Xu K, Zhang L. 2022. Initiation of clockwise rotation and eastward transport of southeastern Tibet inferred from deflected fault traces and GPS observations. GSA Bull, 134: 1129–1142
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
Gao Y, Chen A, Shi Y, Zhang Z, Liu L. 2019. Preliminary analysis of crustal shear-wave splitting in the Sanjiang lateral collision zone of the southeast margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications. Geophys Prospect, 67: 2432–2449
Han C, Xu M, Huang Z, Wang L, Xu M, Mi N, Yu D, Gou T, Wang H, Hao S, Tian M, Bi Y. 2020. Layered crustal anisotropy and deformation in the SE Tibetan Plateau revealed by Markov-Chain-Monte-Carlo inversion of receiver functions. Phys Earth Planet Inter, 306: 106522
Han C, Huang Z, Hao S, Wang L S, Xu M J, Hammond J O S. 2022.

Restricted lithospheric extrusion in the SE Tibetan Plateau: Evidence from anisotropic Rayleigh-wave tomography. Earth Planet Sci Lett, 598: 117837

Han F, Jia R, Fu Y V. 2017. Love wave phase velocity models of the southeastern margin of Tibetan Plateau from a dense seismic array. Tectonophysics, 712-713: 125–131

He X, Zhao L F, Xie X B, Tian X, Yao Z X. 2021. Weak crust in southeast Tibetan Plateau revealed by Lg-wave attenuation tomography: Implications for crustal material escape. J Geophys Res-Solid Earth, 126: e2020JB020748

Hearn T M. 1996. Anisotropic Pn tomography in the western United States. J Geophys Res, 101: 8403–8414

Hou Z, Wang Q, Zhang H, Xu B, Yu N, Wang R, Groves D I, Zheng Y, Han S, Gao L, Yang L. 2023. Lithosphere architecture characterized by crust-mantle decoupling controls the formation of orogenic gold deposits. Natl Sci Rev, 10: nwac257

Hu J, Badal J, Yang H, Li G, Peng H. 2018. Comprehensive crustal structure and seismological evidence for lower crustal flow in the southeastern margin of Tibet revealed by receiver functions. Gondwana Res, 55: 42–59

Huang H, Yao H, van der Hilst R D. 2010. Radial anisotropy in the crust of SE Tibet and SW China from ambient noise interferometry. Geophys Res Lett, 37: 2010GL044981

Huang Z, Chevrot S. 2021. Mantle dynamics in the SE Tibetan Plateau revealed by teleseismic shear-wave splitting analysis. Phys Earth Planet Inter, 313: 106687

Huang Z, Wang L, Xu M, Liu J, Mi N, Liu S. 2007. Shear wave splitting across the Ailao Shan-Red River fault zone, SW China. Geophys Res Lett, 34: 2007GL031236

Huang Z, Wang L, Xu M, Zhao D. 2018. P wave anisotropic tomography of the SE Tibetan Plateau: Evidence for the crustal and uppermantle deformations. J Geophys Res-Solid Earth, 123: 8957–8978

Jiang G, Hu S, Shi Y, Zhang C, Wang Z, Hu D. 2019. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications. Tectonophysics, 753: 36–48

Jin H L, Gao Y, Su X N, Fu G Y. 2019. Contemporary crustal tectonic movement in the southern Sichuan-Yunnan block based on dense GPS observation data. Earth Planet Phys, 3: 53–61

Kong F, Wu J, Liu K H, Gao S S. 2016. Crustal anisotropy and ductile flow beneath the eastern Tibetan Plateau and adjacent areas. Earth Planet Sci Lett, 442: 72–79

Kong F, Wu J, Liu L, Liu K H, Song J, Li J, Gao S S. 2018. Azimuthal anisotropy and mantle flow underneath the southeastern Tibetan Plateau and northern Indochina Peninsula revealed by shear wave splitting analyses. Tectonophysics, 747–748: 68–78

Lei J, Li Y, Xie F, Teng J, Zhang G, Sun C, Zha X. 2014. Pn anisotropic tomography and dynamics under eastern Tibetan Plateau. J Geophys Res-Solid Earth, 119: 2174–2198

Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong D, Liu X, Zhang L, Ji S, Phan Trong T T. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. Tectonophysics, 251: 3–84

Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, Kienast J R, Harrison T M, Trong T T P, Replumaz A, Tapponnier P. 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia. J Geophys Res, 106: 6683–6732

Lev E, Long M D, van der Hilst R D. 2006. Seismic anisotropy in Eastern Tibet from shear wave splitting reveals changes in lithospheric deformation. Earth Planet Sci Lett, 251: 293–304

Li C, van der Hilst R D, Meltzer A S, Engdahl E R. 2008. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. Earth Planet Sci Lett, 274: 157–168

Li W, Chen Y, Liang X, Xu Y G. 2021. Lateral seismic anisotropy variations record interaction between Tibetan mantle flow and plume-strengthened Yangtze Craton. J Geophys Res-Solid Earth, 126: e2020JB020841

Li X, Gao Y. 2023. Seismic Anisotropy in the upper crust beneath the Sanjiang lateral collision zone in the southeastern margin of the Tibetan Plateau revealed by S wave splitting from a temporary array. Ann Geophys, 66: SE212

Li Y, Gao Y. 2023. Rigid widths of active block boundary faults and crustal layered anisotropy in the intersection of faults Honghe and Xiaojiang in the SE margin of the Tibetan Plateau. Geophys J Int, 235: 1504–1518

Liu C, Yao H, Yang H Y, Shen W, Fang H, Hu S, Qiao L. 2019. Direct inversion for three-dimensional shear wave speed azimuthal anisotropy based on surface-wave ray tracing: Methodology and application to Yunnan, southwest China. J Geophys Res-Solid Earth, 124: 11394–11413

Liu S, Chang K, Yang D, Xu X, Wang W, Yang S, Li M. 2022. Velocity and azimuthal anisotropy structures beneath the Dianzhong Block and its vicinity, SE Tibetan Plateau, revealed by eikonal equation-based traveltime tomography. Tectonophysics, 839: 229525

Liu Y, Yao H, Zhang H, Fang H. 2021. The community velocity model V.1.0 of southwest China, constructed from joint body- and surface-wave travel-time tomography. Seismol Res Lett, 92: 2972–2987

Liu Z, Park J. 2017. Seismic receiver function interpretation: Ps splitting or anisotropic underplating? Geophys J Int, 208: 1332–1341

Luo J, Zhao C, Lü J, Zhou L, Zheng S. 2016. Characteristics of focal mechanisms and the stress field in the southeastern margin of the

Tibetan Plateau. Pure Appl Geophys, 173: 2687–2710

Mi Q, Lei J, Du M, He J, Lu H, Sun C, Yang S, Zhang G, Duan Y. 2021. Pn anisotropic tomography and mantle dynamics underneath the South China Sea and surrounding areas. J Asian Earth Sci, 214: 104796

Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. Science, 189: 419–426

Pan Y, Shen W B. 2017. Contemporary crustal movement of southeastern Tibet: Constraints from dense GPS measurements. Sci Rep, 7: 45348

Pei S, Zhao J, Sun Y, Xu Z, Wang S, Liu H, Rowe C A, Toksöz M N, Gao X. 2007. Upper mantle seismic velocities and anisotropy in China determined through Pn and Sn tomography. J Geophys Res, 112: 2006JB004409

Peng H, Hu J, Yang H, Badal J. 2023. Remnants of magma underplating by the Emeishan mantle plume within the lithosphere beneath southeastern margin of the Tibetan Plateau. Tectonophysics, 858: 229886

Pulliam J, Sen M K. 1998. Seismic anisotropy in the core-mantle transition zone. Geophys J Int, 135: 113–128

Qiao L, Yao H, Lai Y C, Huang B S, Zhang P. 2018. Crustal structure of southwest China and northern Vietnam from ambient noise tomography: Implication for the large-scale material transport model in SE Tibet. Tectonics, 37: 1492–1506

Savage M K, Wessel A, Teanby N A, Hurst A W. 2010. Automatic measurement of shear wave splitting and applications to time varying anisotropy at mount Ruapehu volcano, New Zealand. J Geophys Res, 115: 2010JB007722

Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen L. 2006. Propagation of surface uplift, lower crustal flow, and Cenozoic tectonics of the southeast margin of the Tibetan Plateau. Geology, 34: 813–816

Shen Z, Lü J, Wang M, Bürgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. J Geophys Res, 110: B11409

Shi Y, Gao Y, Su Y, Wang Q. 2012. Shear-wave splitting beneath Yunnan area of Southwest China. Earthq Sci, 25: 25–34

Silver P G. 1996. Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depths of geology. Annu Rev Earth Planet Sci, 24: 385–432

Silver P G, Chan W W. 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. J Geophys Res, 96: 16429–16454

Sol S, Meltzer A, Bürgmann R, van der Hilst R D, King R, Chen Z, Koons P O, Lev E, Liu Y P, Zeitler P K, Zhang X, Zhang J, Zurek B. 2007. Geodynamics of the southeastern Tibetan Plateau from seismic anisotropy and geodesy. Geology, 35: 563–566

Sun Y, Niu F, Liu H, Chen Y, Liu J. 2012. Crustal structure and deformation of the SE Tibetan Plateau revealed by receiver function data. Earth Planet Sci Lett, 349–350: 186–187

Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. Geology, 10: 611–616

Tian J H, Luo Y, Zhao L. 2019. Regional stress field in Yunnan revealed by the focal mechanisms of moderate and small earthquakes. Earth Planet Phys, 3: 243–252

Vinnik L P, Makeyeva L I, Milev A, Usenko A Y. 1992. Global patterns of azimuthal anisotropy and deformations in the continental mantle. Geophys J Int, 111: 433–447

Wang E, Burchfiel B C. 1997. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the Eastern Himalayan Syntaxis. Int Geol Rev, 39: 191–219

Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications. J Geophys Res-Solid Earth, 125: e2019JB018774

Wang W, Wu J, Fang L, Lai G, Cai Y. 2017. Crustal thickness and Poisson's ratio in southwest China based on data from dense seismic arrays. J Geophys Res-Solid Earth, 122: 7219–7235

Wang Y. 2001. Heat flow pattern and lateral variations of lithosphere strength in China mainland: Constraints on active deformation. Phys Earth Planet Inter, 126: 121–146

Wang Y, Zhang B, Schoenbohm L M, Zhang J, Zhou R, Hou J, Ai S. 2016. Late Cenozoic tectonic evolution of the Ailao Shan-Red River fault (SE Tibet): Implications for kinematic change during plateau growth. Tectonics, 35: 1969–1988

Wang Z, Zhao D, Wang J. 2010. Deep structure and seismogenesis of the north-south seismic zone in southwest China. J Geophys Res, 115: 2010JB007797

Wei W, Zhao D, Xu J. 2013. P-wave anisotropic tomography in Southeast Tibet: New insight into the lower crustal flow and seismotectonics. Phys Earth Planet Inter, 222: 47–57

Wen X, Ma S, Xu X, He Y. 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block, southwestern China. Phys Earth Planet Inter, 168: 16–36

Wen X, Ma S, Fang L, Liang M, Du F, Long F, Zhao X. 2022. Complex structural fault system and distributed deformation across the Big Bend of the Red River fault, Yunnan, China. Phys Earth Planet Inter, 333: 106942

Wu J, Zhang Z, Kong F, Yang B B, Yu Y, Liu K H, Gao S S. 2015. Complex seismic anisotropy beneath western Tibet and its geodynamic implications. Earth Planet Sci Lett, 413: 167–175

Wu T, Zhang S, Li M, Hong M, Hua Y. 2019. Complex deformation within the crust and upper mantle beneath SE Tibet revealed by anisotropic Rayleigh wave tomography. Phys Earth Planet Inter, 286: 165–178

Xie J, Ritzwoller M H, Shen W, Yang Y, Zheng Y, Zhou L. 2013. Crustal radial anisotropy across Eastern Tibet and the Western Yangtze Craton. J Geophys Res-Solid Earth, 118: 4226–4252

Xie J, Ritzwoller M H, Shen W, Wang W. 2017. Crustal anisotropy across eastern Tibet and surroundings modeled as a depth-dependent tilted hexagonally symmetric medium. Geophys J Int, 209: 466–491

Xu M, Huang Z, Wang L, Xu M, Zhang Y, Mi N, Yu D, Yuan X. 2020. Sharp lateral Moho variations across the SE Tibetan margin and their implications for Plateau growth. J Geophys Res-Solid Earth, 125: e2019JB018117

Xu Y G, He B, Chung S L, Menzies M A, Frey F A. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. Geology, 32: 917–920

Xu Z, Huang Z, Wang L, Xu M, Ding Z, Wang P, Mi N, Yu D, Li H. 2016. Crustal stress field in Yunnan: Implication for crust-mantle coupling. Earthq Sci, 29: 105–115

Yang H, Peng H, Hu J. 2017. The lithospheric structure beneath southeast Tibet revealed by P and S receiver functions. J Asian Earth Sci, 138: 62–71

Yang Y, Zhu L, Su Y, Chen H, Wang Q, Zhang P. 2015. Crustal anisotropy estimated by splitting of Ps-converted waves on seismogram and an application to SE Tibetan Plateau. J Asian Earth Sci, 106: 216–228

Yang Y, Hu S, Yao H, Fang L, Wu J. 2020. Crustal shear wave velocity and radial anisotropy in the Xiaojiang fault zone system (SE Tibet) revealed by ambient noise interferometry. Tectonophysics, 792: 228594

Yao H, van der Hilst R D, Montagner J P. 2010. Heterogeneity and anisotropy of the lithosphere of SE Tibet from surface wave array tomography. J Geophys Res, 115: 2009JB007142

Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. Annu Rev Earth Planet Sci, 28: 211–280

Yu N, Unsworth M, Wang X, Li D, Wang E, Li R, Hu Y, Cai X. 2020. New insights into crustal and mantle flow beneath the Red River Fault Zone and adjacent areas on the southern margin of the Tibetan Plateau revealed by a 3-D magnetotelluric study. J Geophys Res-Solid Earth, 125: e2020JB019396

Yu N, Wang E, Wang X, Kong W, Li D, Li R. 2022. The influence of the Ailaoshan-Red River shear zone on the mineralization of the Beiya deposit on the southeastern margin of the Tibetan Plateau revealed by a 3-D magnetotelluric survey. J Geophys Res-Solid Earth, 127: e2021JB022923

Zhang B, Zhang S, Wu T, Hua Y. 2018. Upper crustal anisotropy from local shear-wave splitting and crust-mantle coupling of Yunnan, SE margin of Tibetan Plateau. Geodesy Geodyn, 9: 302–311

Zhang Z Q, Gao Y. 2019. Crustal thicknesses and Poisson's ratios beneath the Chuxiong-Simao Basin in the Southeast Margin of the Tibetan Plateau. Earth Planet Phys, 3: 69–84

Zhao L F, Xie X B, He J K, Tian X, Yao Z X. 2013. Crustal flow pattern beneath the Tibetan Plateau constrained by regional Lg-wave Q tomography. Earth Planet Sci Lett, 383: 113–122

Zhao L, Luo Y, Liu T Y, Luo Y J. 2013. Earthquake focal mechanisms in Yunnan and their inference on the regional stress field. Bull Seismol Soc Am, 103: 2498–2507

Zhou Z, Lei J. 2016. Pn anisotropic tomography and mantle dynamics beneath China. Phys Earth Planet Inter, 257: 193–204

(责任编委: 高尚行)