



# 青藏高原东南缘岩石圈变形特征及其深部动力学过程

李长军<sup>1</sup>, 王洋<sup>2\*</sup>, 刘丽军<sup>3</sup>, 邵志刚<sup>4</sup>, 程丰<sup>1</sup>, 张进江<sup>1</sup>, 甘卫军<sup>5</sup>, 郝明<sup>6</sup>

1. 北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

4. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

5. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

6. 中国地震局第二监测中心, 西安 710054

\* 通讯作者, E-mail: wangyang26@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2024-03-29; 收修改稿日期: 2024-07-15; 接受日期: 2024-08-19; 网络版发表日期: 2024-10-15

国家重点研发计划项目(2023YFC3007301)、国家自然科学基金项目(U2344212、42372249、42272247)和国家资助博士后研究人员计划项目(GZC20230043)资助

**摘要** 作为印度-欧亚板块斜向汇聚区重要的组成部分, 青藏高原东南缘构造变形复杂且地震频发, 其复杂岩石圈变形特征及其动力学机理一直是地学研究的热点. 通过综合地球物理、活动构造和大地测量等资料, 本文分析了青藏高原东南缘岩石圈变形特征及其成因机理. 青藏高原东南缘上地壳围绕喜马拉雅东构造结做顺时针旋转运动, 除实皆断裂和鲜水河-小江断裂外, 整体呈现弥散变形的特征. 下地壳变形方向与地表构造明显不同, 以大约 $26^{\circ}\text{N}$ 为界, 研究区北侧的地震各向异性主要来自于地壳, 而南侧的地震各向异性源自于软流圈地幔. 此外, 以 $26^{\circ}\text{N}$ 为界, 其南、北两侧的地壳和岩石圈厚度以及地形呈现明显差异, 其中北部的地壳厚度为60~70km, 岩石圈厚度达到140~180km, 地表平均海拔超过4000m; 南部地壳厚度约为30km, 岩石圈厚度为80~100km, 地表平均海拔降低至2000m. 青藏高原东南缘岩石圈力学性质较弱, 等效弹性厚度较薄, 地壳和上地幔均存在孕震脆性层, 中-下地壳存在两个力学性质较弱的区域, 在重力(地形)驱动下在地质时间尺度上可能发生流动. 青藏高原东南缘岩石圈变形的动力学成因复杂, 其中, 大约在 $26^{\circ}\text{N}$ 以北, 变形可通过重力垮塌及其驱动的中-下地壳物质流动和上地壳块体挤出予以综合解释; 大约在 $26^{\circ}\text{N}$ 以南, 除了块体挤出和重力垮塌之外, 地幔流的牵引力可能是该区域岩石圈变形的主控因素, 而该地幔流可能来自缅甸和巽他板块后撤或者与海南地幔柱的地幔上涌有关.

**关键词** 青藏高原东南缘, 岩石圈变形, 应变率, 地震各向异性, 动力学机理

中文引用格式: 李长军, 王洋, 刘丽军, 邵志刚, 程丰, 张进江, 甘卫军, 郝明. 2025. 青藏高原东南缘岩石圈变形特征及其深部动力学过程. 中国科学: 地球科学, 55(5): 1351–1376. doi: [10.1360/SSTe-2024-0095](https://doi.org/10.1360/SSTe-2024-0095)

英文引用格式: Li Z, Wang Y, Liu L, Shao Z, Cheng F, Zhang J, Gan W, Hao M. 2025. Lithospheric deformation and corresponding deep geodynamic process of the SE Tibetan Plateau. Science China Earth Sciences, 68(5): 1303–1325. <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1414-4>

# 1 引言

新生代以来, 印度板块和欧亚大陆的汇聚和碰撞, 造就了世界屋脊(又称“第三极”)青藏高原, 进而改变了整个亚洲大陆的构造格局, 影响了亚洲乃至全球的气候、环境和生物多样性等(例如, Willett等, 1993; Beaumont等, 2001; Molnar等, 2010; Cao等, 2022; Ding等, 2022; Shen等, 2022; Cheng等, 2023; Wu等, 2023). 由于印度板块的持续楔入, 导致高原的垂向抬升和侧向扩展, 并在高原内部及周缘发育大型走滑断裂系统、逆冲断裂、裂谷等复杂的构造体系, 调节青藏高原内部及其周缘的构造变形(例如, Molnar和Tapponnier, 1975; England和Molnar, 1990; Tapponnier等, 2001; Gan等, 2007, 2021; Bischoff和Flesch, 2018; Ding等, 2022). 青藏高原东南缘位于印度与欧亚大陆的斜向汇聚区, 发育了复杂的断裂系统, 且强震频发, 是调节和吸收高原侧向挤出/扩展的关键区(Schoenbohm等, 2004; Zhang等, 2004; Wang等, 2020). 半个世纪以来, 国内外学者在该地区开展了大量构造变形研究(例如, Tapponnier等, 1990; Wang E等, 1998; Leloup等, 2001; Replumaz等, 2004; Schoenbohm等, 2004; Wang等, 2016, 2020)、区域构造地貌演化(例如, Liu-Zeng等, 2008; Yang等, 2016; Wang Y等, 2017)、大地测量及地球物理观测(Zhang等, 2004; Shen等, 2005; Bai等, 2010; Bao等, 2015; Li Z等, 2020; Gan等, 2021; 刘影等, 2023)、地球动力学模拟等工作(Royden等, 1997; Ghosh等, 2006; Bischoff和Flesch, 2018; Li Y等, 2019; Schellart等, 2019; Jiao等, 2023), 使我们对其构造及地貌演化过程、地壳变形特征、深部动力学机制等都有了一定认识. 然而, 迄今关于青藏高原东南缘的岩石圈变形特征和深部动力学机理的研究仍有较大争议, 主要包括: ① 地壳变形样式表现为应变集中的块体挤出变形(Tapponnier等, 2001)还是连续变形(Zhang等, 2004)? ② 以~26°N为界, 岩石圈深浅部耦合特征及驱动机制如何(常利军等, 2015; 高原等, 2020; Hou等, 2024)? ③ 是否存在中下地壳流以及软流圈地幔流, 及其如何影响地表抬升和构造变形(Royden等, 1997; Bai等, 2010; Wang C等, 2013; Bao等, 2015; Bischoff和Flesch, 2018; Clark和Royden, 2000; Huang和Chevrot, 2021; Li和Kreemer, 2021). 地球物理和大地测量观测手段的不断涌现和完善, 为进一步探索上述关键科学

问题提供了丰富的理论和方法基础(例如, Silver和Chan, 1991; Silver, 1996; Flesch等, 2000; Silver和Holt, 2002; Bürgmann和Dresen, 2008; Bahadori和Holt, 2019; Bahadori等, 2022).

复杂断裂体系和密集地震活动反映了青藏高原东南缘复杂的岩石圈变形特征和动力学机制(图1和2). GNSS水平速度场及区域活动断裂的几何学-运动学特征揭示出青藏高原东南缘地壳物质围绕喜马拉雅东构造结呈现明显的顺时针旋转运动(图1和2; Shen等, 2005; Ge等, 2015; Zheng等, 2017; Li Z等, 2020; Wang和Shen, 2020; Gan等, 2021), 是高原东南缘最显著的地壳变形特征. 此外, 该区域还主要发育了两组呈共轭形态且具有不同规模的活动断裂体系, 其中北东向断裂多以左旋走滑为主, 北西向断裂则呈现右旋走滑(图2). 上述断裂孕育了诸多 $M \geq 6$ 级强震(图1), 表明其在调节和吸收高原东南缘地壳变形中具有重要的作用(例如, Shen等, 2005; Li Z等, 2020; Wang和Shen, 2020; Wang et al., 2020; Morley和Wang, 2023). 而关于青藏高原地壳变形样式的讨论存在两个主流观点, 即以块体挤出模型为代表的应变集中模型(Tapponnier等, 1982; Peltzer和Tapponnier, 1988; Tapponnier等, 2001; Jiao等, 2023)和基于黏弹性牛顿薄板假设的连续变形模型(England和Houseman, 1986; Holt等, 2000; Zhang等, 2004; Li Z等, 2020). 两者的差别在于不同尺度断裂系统在吸收变形中所承担的作用. 其中, 块体挤出模型认为地壳及岩石圈地幔被大尺度断裂切割成不同规模的刚性块体, 应变主要集中在边界断裂上, 块体内部变形微弱; 连续变形模型认为地壳变形呈现连续、弥散的特征, 断裂带两侧速度梯度相对平滑. 然而, 受限于观测资料的匮乏, 目前针对断裂活动性(特别是小尺度NE-和NW/NNW向断裂系统)的认识存在一定争议, 对青藏高原东南缘运动学特征的理解和认识有待进一步加深. 此外, 上述两种模型也并非相互排斥, 青藏高原东南缘可能在不同的地质历史时期呈现不同的变形样式(王洋等, 2022).

与地表运动相比, 岩石圈深部(包括中-下地壳和岩石圈地幔)的变形特征不能被直接观测. 而深部地球物理探测技术(如地震层析成像、深地震测深和大地电磁测深(MT))的发展和完善, 为探究地球的深部结构(例如, Shapiro等, 2005; Bai等, 2010; Rawlinson等, 2010)、壳-幔耦合特征(例如, Silver和Chan, 1991; Sil-

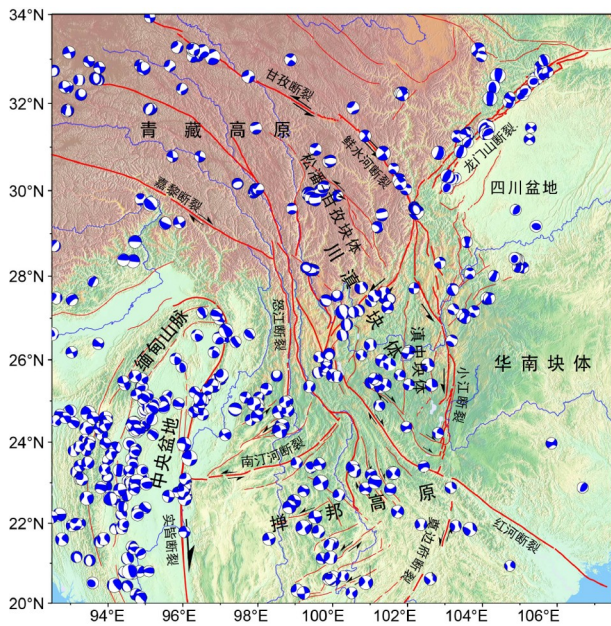


图1 青藏高原东南缘及邻区主要活动构造单元及历史地震分布

蓝色沙滩球为1900年以来 $M_s \geq 6.0$ 级以上历史地震, 地震震源机制解来自GCMT(<https://www.globalcmt.org/>); 红线示意主要活动断裂分布; 黑色箭头表示地质和大地测量资料反映的主要活动断裂的运动方式

ver, 1996)、岩石圈变形和地幔流(例如, Silver和Holt, 2002; Becker等, 2008)等深部动力学过程提供了可能。近年来, 随着国家数字地震台网(ChinaArray)的逐步建成和完善, 在青藏高原东南缘涌现出了大量的地球物理观测成果, 进一步完善了对该区岩石圈变形特征及其动力学机制的研究。例如: 地震层析成像和MT成像结果表明青藏高原东南缘软弱中-下地壳的范围主要位于丽江-小金河断裂以北和沿小江断裂展布(例如, Huang等, 2015a; Bao等, 2015; Liu等, 2019; Li X等, 2020; Han等, 2022; Ai等, 2023)。但上述软弱的中-下地壳物质的成因及对地表变形和抬升的影响存在较大争议。通过与地质构造、应变率和绝对板块运动方向(APM; 例如, Gripp和Gordon, 2002; Kreemer, 2009; Becker等, 2015)对比分析, 前人认为以 $\sim 26^\circ\text{N}$ 为界, 其北侧壳幔耦合而南侧壳幔解耦(例如, Chen等, 2013; Chang等, 2015; Bao等, 2020; Cao等, 2020; 高原等, 2020; Huang和Chevrot, 2021; Shi等, 2023)。然而, 关于 $\sim 26^\circ\text{N}$ 南、北两侧壳幔呈现不同耦合特征的动力学机理, 目前尚不清晰。通过将基于APM框架的岩石圈运

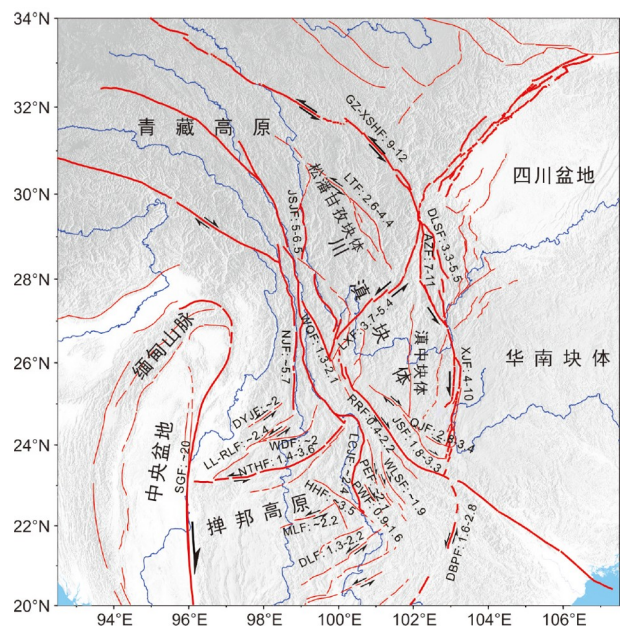


图2 青藏高原东南缘主要活动断裂及其走滑速率

速率单位: mm/a. GZ-XSHF: 甘孜-鲜水河断; DLSF: 大凉山断裂; AZF: 安宁河-则木河断裂; XJF: 小江断裂; LTF: 理塘断裂; JSJF: 金沙江断裂; LXF: 丽江-小金河断裂; WQF: 维西-乔后断裂; QJF: 曲江断裂; JSF: 建水断裂; RRF: 红河断裂; WLSF: 无量山断裂; PEF: 普洱断裂; PWF: 普文断裂; NJF: 怒江断裂; DYJF: 大盈江断裂; LL-RLF: 龙陵-瑞丽断裂; WDF: 晚町断裂; NTHF: 南汀河断裂; LCJF: 澜沧江断裂; HHF: 黑河断裂; MLF: 孟连断裂; DLF: 打洛断裂; DBPF: 莫定府断裂

动模型与地震各向异性结果对比分析, 前人定性研究揭示了青藏高原东南缘岩石圈底部存在软流圈地幔流, 然而, 由于所使用的岩石圈运动学模型和参考基准的不同而得到的地幔流的方向和大小呈现多样性, 主要观点包括: ① 存在速度为15~20mm/a的南西向流动的地幔流场(Wang等, 2013); ② 存在速度为1~2cm/a的向东流动的地幔流(Li和Kreemer, 2021); ③ 存在向东流动的地幔流, 但速度不确定(常利军等, 2015; Huang和Chevrot, 2021; Hou等, 2024); ④ 存在向西流动的地幔流, 但速度不确定(Fan等, 2021)等。上述分析所得到的地幔流的深度并不确定, 且地幔流方向存在 $180^\circ$ 的不确定性(Silver和Holt, 2002; Li和Kreemer, 2021)。此外, 关于青藏高原东南缘复杂岩石圈变形的动力学机制仍然缺乏统一的认识。主要观点包括: ① 在印度板块斜向汇聚的驱动下, 围绕喜马拉雅东构造结的侧向生长和挤出(Tapponnier等, 2001; Jiao等2023); ② 岩石圈增厚(England和Houseman, 1986); ③ 中-下地壳流

(Royden等, 1997; Clark和Royden, 2000; Bischoff和Flesch, 2018); ④ 重力垮塌(Flesch等, 2001; Ghosh等, 2006; Li等, 2019); ⑤ 由印缅和巽他板片后撤或海南地幔柱活动引起的地幔对流的牵引作用(Huang等, 2015a, 2019; Schellart等, 2019; Bao等, 2020; Fan等, 2021; Hou等, 2024; Wang等, 2022)等。

综上所述, 青藏高原东南缘复杂的岩石圈变形特征及其动力学机理深受地学界的关注(例如, Royden等, 1997; Tapponnier等, 2001; 李秋生等, 2018; Bischoff和Flesch, 2018; Li等, 2019; 高原等, 2020; Bao等, 2020; Fan等, 2021; 黄周传等, 2021; Hou等, 2024)。随着国家数字地震台网(ChinaArray)和地壳运动观测网络(CMONOC I, II)的逐步建成和完善, 丰富的数据积累为更进一步认识上述问题提供了新的机遇。因此, 本文在总结该区地质背景和主要活动构造格局的基础上, 聚焦已有研究中存在的关键问题及其潜在研究方向, 通过概括和梳理已发表的地球物理和大地测量观测资料和研究成果, 厘定地壳变形特征、应变分配和主要活动断裂的活动性, 揭示青藏高原东南缘地壳结构和变形模式, 分析岩石圈变形特征及其深浅部耦合机制, 进而探讨该区深部动力学过程及浅表的地质地貌响应。

## 2 地质背景和主要活动构造格局

青藏高原东南缘夹持于向北推挤的喜马拉雅东构造结和稳定华南地块之间, 从西向东包括四个主要的构造单元(图1和2)。最西端的缅甸山脉, 受到早新生代印度板块持续向东北方向俯冲汇聚的影响, 缅甸山脉发育有一系列褶皱和冲断体系, 整体呈弧状近南北向展布(Le Dain等, 1984; Steckler等, 2008)。根据卷入褶皱的地层时代(第三纪的浊积岩)以及中新世-上新世地层中的同沉积构造, 前人推测缅甸山脉缩短构造形成的时间为中新世-上新世(Pivnik等, 1998; Steckler等, 2008)。GNSS地壳形变观测结果和震源机制解指示缅甸山脉现今表现为右旋走滑兼挤压缩短的变形特征, 吸收和调节着印度板块在缅甸地区的斜向俯冲(Le Dain等, 1984; Shi等, 2018b; Mallick等, 2019; Panda等, 2020; Panda和Kundu, 2022)。中央盆地是位于缅甸山脉以东至掸邦高原之间的一个低地, 地震反射剖面和测井资料揭示了中央盆地之下第三纪地层发育褶皱和断

裂构造, 指示中央盆地在中-晚中新世(15~10Ma)可能由伸展拉张转变为挤压缩短(Pivnik等, 1998; Maury等, 2004)。实皆断裂是中央盆地和掸邦高原之间的边界断裂, 以右旋走滑为主, 从喜马拉雅东构造结延伸1300km进入安达曼海(Socquet和Pubellier, 2005; Wang等, 2022)。实皆断裂的右旋运动始于中新世-上新世早期或中新世早期-渐新世(常祖峰等, 2022; Wang等, 2022; Morley和Wang, 2023)。根据安达曼海的扩张幅度推测在中新世以来实皆断裂的右旋走滑位错量约为460km(Curray等, 1979)。此外, 实皆断裂现今右旋滑动速率为~20mm/a, 吸收了印度板块和巽他板块之间60%的相对运动(Simons等, 2007; Mallick等, 2019; Panda等, 2020; Panda和Kundu, 2022)。

实皆断裂以东至红河断裂之间夹持的地区称为掸邦高原(图1和2)。该区经历了古-中生代特提斯洋的俯冲闭合以及新生代强烈的陆内变形和岩浆活动(例如, Chung等, 1998; Schoenbohm等, 2004; Deng等, 2014; Morley和Wang, 2023)。发育了哀牢山-红河、高黎贡-抹谷和崇山-临沧三条巨型构造带, 构成该区的一级构造格架。它们在新生代发生了数百公里的水平位错, 以调节块体的旋转与滑移(例如, Leloup等, 1995, 2001; Akciz等, 2008; Zhang Z等, 2010; Zhang B等, 2012; Deng等, 2014)。此外, 现今的活动断裂体系具有明显的构造继承性。例如: 右旋红河断裂沿哀牢山-红河剪切带的东北缘展布, 该断裂从点苍山延伸到中国南海(图1; Leloup等, 2001; Replumaz等, 2004; Schoenbohm等, 2004; Liu等, 2012; Wang等, 2016; Shi等, 2018a)。已有的构造解析和年代学数据指示哀牢山-红河剪切带在渐新世晚期-中新世中期为左旋韧性剪切; 中-晚中新世(14~10Ma)时期, 构造带发生运动学性质的反转, 红河断裂转变为右旋走滑(Leloup等, 2001; Gilley等, 2003; Chung等, 2008; Wang等, 2016, 2018)。除了红河断裂中部断弯区具有逆冲分量之外, 红河断裂运动学特征整体主要以右旋张扭为主(魏顺民等, 2013; Wang等, 2016; Wen等, 2022), 其错断位移为5.5~54km(Replumaz等, 2004; Schoenbohm等, 2006)。红河断裂现今的右旋滑动速率为(0.4±1.6)~(2.2±1.4)mm/a, 正倾滑速率为(1.5±0.8)mm/a, 断弯区的逆冲速率为(1.0±0.5)mm/a(王阎昭等, 2008; 魏顺民等, 2013; Shi等, 2018a; 李长军等, 2019; Li Z等, 2020; Huang等, 2023), 存在发生 $M_w$ 7.0级地震的可能(李长军等, 2019; Li Z等, 2020)。澜

沧江断裂带北段主要沿崇山剪切带展布, 其南段与临沧花岗岩体平行(图1; 邓起东等, 2002). 该断裂有史记载以来的地震活动性较低(Shi等, 2018a; Wen等, 2022),  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等热年代学证据表明, 崇山剪切带左旋韧性剪切可能始于~30Ma(Wang等, 2006). 澜沧江断裂现今地震活动性较弱, 右旋走滑和逆冲速率分别为( $2.4 \pm 1.9$ )和( $1.4 \pm 1.5$ )mm/a(李长军等, 2019; Li Z等, 2020).

川滇块体位于红河断裂以东至鲜水河~小江断裂之间, 李坪和汪良谋(1975)根据川滇地区活动构造特征, 认为由于印度板块与欧亚板块的汇聚, 由哀牢山-红河构造带和鲜水河-小江断裂带所围限的川滇菱形块体向东南发生侧向滑移. GNSS速度场也揭示了川滇块体顺时针旋转的运动特征(例如, Zhang等, 2004; Li Z等, 2020; Wang和Shen, 2020; Gan等, 2021). 相对于构造活动性较弱的红河断裂而言, 鲜水河-小江断裂带是青藏高原东南缘地震活动最为强烈的断裂之一. 该断裂自西北向东南包括甘孜断裂、鲜水河断裂、安宁河-则木河断裂、大凉山断裂和小江断裂, 整体具有左旋走滑的运动学特征, 启动时间可能为13~10Ma(Roger等, 1995; Wang E等, 1998). 鲜水河-小江断裂带的总左旋位移约为60km(Allen等, 1991; Wang E等, 1998). 小江断裂终止于哀牢山-红河剪切带的北侧, 并形成了一系列的分支断裂(Wang E等, 1998). 位于哀牢山-红河剪切带南侧的莫边府断裂与小江断裂的运动学和几何学特征一致(Liu等, 2012; Duong等, 2013), 因此也被认为可能是鲜水河-小江断裂的南延(Wang E等, 1998; Wang等, 2014; 韩竹军等, 2017). GNSS观测资料揭示鲜水河-小江断裂带现今左旋滑动速率为4~12mm/a, 其中, 甘孜和鲜水河断裂的滑动速率为9~12mm/a(Zhang, 2013; Jiang等, 2015; Zheng等, 2017; Wang和Shen, 2020), 安宁河-则木河断裂的滑动速率为7~11mm/a(Zhang, 2013; Jiang等, 2015; Zheng等, 2017; Wang和Shen, 2020; Li Y等, 2021), 大凉山断裂的走滑速率为3.3~5.5mm/a(陈桂华等, 2008; Li Y等, 2021), 小江断裂的滑动速率从北往南递减, 速率位于4~10mm/a之间(宋方敏等, 1998; 闻学泽等, 2011; Li Z等, 2020; Wang和Shen, 2020). 莫边府断裂的左旋走滑速率为1.6~2.8mm/a(Lai等, 2012; Duong等, 2013; Li Z等, 2020; Wang等, 2021; Huang等, 2023). 基于GNSS等大地测量资料的研究表明, 鲜水河-小江断裂带存在8个滑动亏损段, 每段积累的地震矩超过 $M_w 6.21$ (Jiang

等, 2015; Li Y等, 2021; Li等, 2023). 滑动亏损区域与地震空区一致, 共同指示了鲜水河-小江断裂存在较高的地震危险性.

除了上述大尺度的构造边界断裂之外, 青藏高原东南缘最显著的构造特征之一是发育了两组规模不等的NE和NW/NNW走向的左旋和右旋走滑断裂体系(图1和2; 例如, Wang Y等, 2014; Wang等, 2016; Shi等, 2018b; Li Z等, 2020; Morley和Wang, 2023). 上述断裂体系虽然在规模上远小于鲜水河-小江断裂等区域性构造边界断裂, 但其地震频发, 孕育了诸多 $M_6$ 级以上强震(图1), 例如曲江断裂是1970  $M_{7.7}$ 通海地震的发震断裂(Wang Y等, 2014); 楚雄断裂是1680 楚雄 $M_6$ 地震的发震断裂(常祖峰等, 2015); 无量山、普文和普洱断裂等共同组成了思茅-普洱地震带, 自1900年以来孕育了10次 $M \geq 6.0$ 级和20次 $M \geq 5.0$ 地震(魏顺民等, 2013; 常祖峰等, 2016). GNSS观测和野外地质调查结果表明, 上述两组活动断裂体系的走滑速率较为接近, 均为1~4mm/a(图2和网络版附表S1(<http://earthcn.scichina.com>)), 例如: 建水断裂的右旋速率为1.8~3.3mm/a(常祖峰等, 2015; 李长军等, 2019; 韩新民等, 1993; 闻学泽等, 2011)、曲江断裂的右旋速率为2.8~3.4mm/a(Huang等, 2023; 徐锡伟等, 2003; Wang Y等, 2014)、普洱断裂的右旋走滑速率为( $2.1 \pm 0.9$ )mm/a(Li Z等, 2020)、普文断裂的右旋走滑速率为0.9~1.6mm/a(Li Z等, 2020; Xu等, 2022)、黑河断裂的右旋走滑速率为( $3.5 \pm 0.5$ )mm/a(方良好等, 2013)、无量山断裂的右旋走滑速率为( $1.9 \pm 1.9$ )mm/a(常祖峰等, 2016; Li Z等, 2020)、南汀河断裂的左旋滑动速率为1.4~3.6mm/a(石峰等, 2015; Xu等, 2022)、畹町断裂的左旋滑动速率为( $2 \pm 0.2$ )mm/a(常祖峰等, 2012)、大盈江断裂的左旋滑动速率为( $2 \pm 0.2$ )mm/a(常祖峰等, 2011)、龙陵-瑞丽断裂的左旋滑动速率为( $2.4 \pm 0.6$ )mm/a(黄学猛等, 2010; 杜义等, 2012)、孟连断裂的左旋滑动速率为( $2.2 \pm 0.4$ )mm/a(刘炳旭等, 2019). 表明两组断裂体系在调节和吸收青藏高原东南缘地壳变形中扮演着很重要的角色(Wang等, 2016; Shi等, 2018b; Wang等, 2019; Morley和Wang, 2023).

### 3 地球物理成像和深部结构

随着地球物理成像技术(包括接收函数、面波、

体波和大地电磁成像)的不断发展和完善,可以反映热结构和深部介质的物性成分及其存在的局部异常特征,为探究区域岩石圈详细结构和变形提供了契机(例如, Aki和Lee, 1976; Langston, 1979; Silver和Chan, 1991; Silver, 1996; Ligorria和Ammon, 1999; Yanovskaya和Kozhevnikov, 2003; Unsworth等, 2005; Rawlinson等, 2010). 近年来,在青藏高原东南缘涌现了大量的地球物理成像结果,为更好地理解认识研究区深部物质能量运移、不同圈层的耦合变形特征、圈层相互作用以及区域复杂岩石圈变形的动力学机理等热点科学问题提供了数据和资料支撑(例如, Li等, 2008; Bao等, 2015, 2020; Huang等, 2015a; Wang等, 2017; Fu等, 2017; Hu等, 2018; Hua等, 2018).

### 3.1 地壳、岩石圈厚度以及泊松比

地壳、岩石圈厚度和泊松比是研究区域地壳均衡状态、地壳-地幔耦合特征、岩石圈变形和深部介质物性成分的重要参数. 地震波接收函数和面波层析成像是研究地壳-地幔速度界面的重要手段(Dueker和

Sheehan, 1997; Zhu和Kanamori, 2000). 基于上述研究方法,前人获取了青藏高原东南缘详细的地壳和岩石圈厚度以及平均泊松比(图3; 例如, Li等, 2008; Wang等, 2010; Sun等, 2012; Xu等, 2013; Wang等, 2017; Yang等, 2017; Hu等, 2018; Wen等, 2019; Xu等, 2020; Zhang等, 2021; Wu等, 2021). 结果表明,以丽江-小金河断裂为界,北侧的松潘-甘孜块体的地壳厚度为60~70km,岩石圈厚度达到140~180km;地壳和岩石圈往南逐步减薄,在滇中块体和掸邦高原地壳厚度约为30km(图3a),岩石圈厚度为80~100km(Yang等, 2017; Hu等, 2018, 2012). 四川盆地的地壳厚度约为30~50km、岩石圈厚度为120~150km;华南块体的地壳和岩石圈厚度约为27~34和100~160km(Zhang等, 2010; Hu等, 2018). 研究区地形变化与地壳和岩石圈厚度的变化基本一致,即随着地壳和岩石圈厚度向南逐步减薄,海拔由北向南也逐步降低. 其中,松潘-甘孜地块的海拔超过4000m,跨过丽江-小金河断裂往南,海拔逐步减低到2000 m(图3a). 青藏高原东南缘的泊松比较低,平均泊松比为0.24~0.32(图3b; 例如, Wang

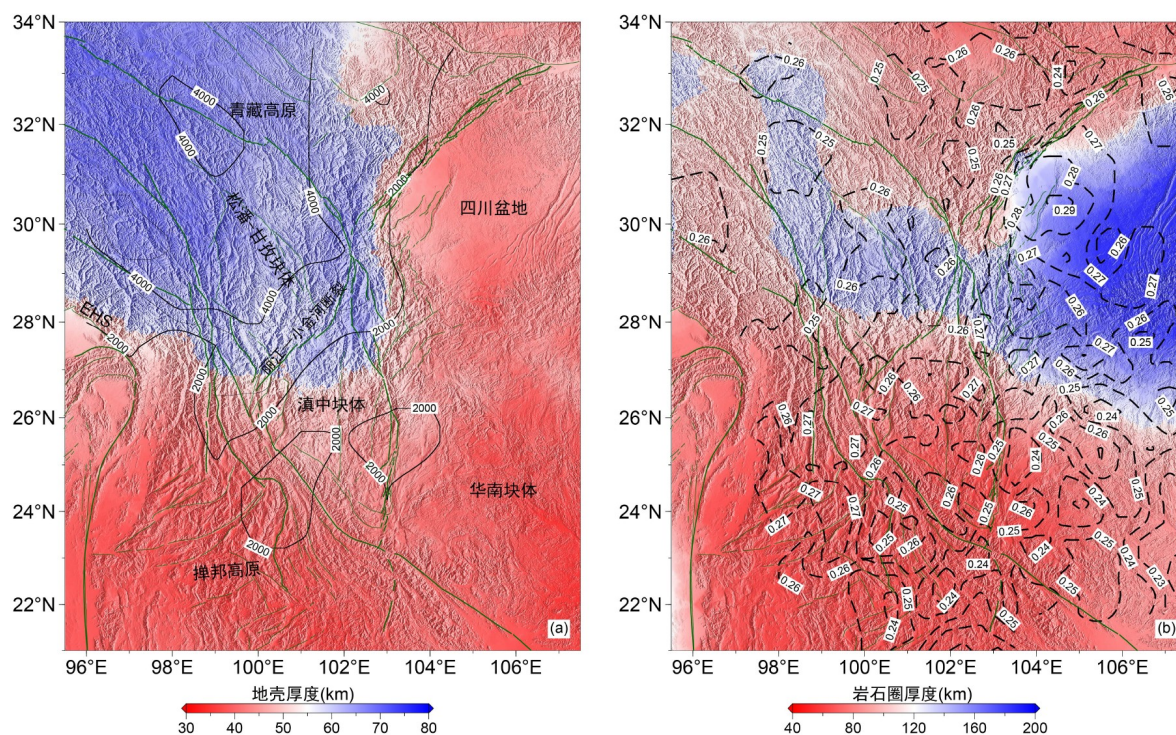


图3 青藏高原东南缘地形、地壳和岩石圈厚度

(a) 地形(等值线, 单位: m)和地壳厚度(背景色, 单位: km); (b) 岩石圈厚度(背景色, 单位: km)和泊松比(等值线). 地壳厚度和泊松比数据来自 Wang等(2017), 岩石圈厚度数据来自 Pasyanos等(2014). 深绿色曲线为主要活动断裂

等, 2010; Xu等, 2013; Wang W等, 2017; Yang等, 2017; Hu等, 2018), 其中, 泊松比高值区位于四川盆地, 鲜水河-小江断裂、丽江-小金河断裂及NE走向的弧形左旋走滑断裂附近, 泊松比值为0.26; 而华南块体的泊松比相对较低, 小于0.24.

### 3.2 地壳结构

地球物理成像结果表明, 在四川盆地和华南块体, 10km及以上深度存在低速和高Q值异常及明显的横向不均匀特性, 可能与该区域较厚的沉积层有关(图4和5). 在10km以深, 地壳介质呈现出明显的高速异常, 反映了四川盆地和华南地块的克拉通属性(图4和5; Zhao等, 2013; Huang等, 2015a, 2018; Fu等, 2017; Liu等, 2019; He等, 2021; 刘影等, 2023; 李龙等, 2024). 在川滇菱形块体内部, 在20~40km或更深的范围内存在两个明显的地震波低速、低Q值和高导异常区域, 虽然不同研究结果所揭示的介质结构异常的范围或尺度存在差异(王新等, 2024), 但其主要位于丽江-小金河-龙门山断裂的西北侧和沿小江断裂带周缘展布(图4和5; Bai等, 2010; Zhao等, 2013; Wang W等, 2014; Bao等, 2015; Huang等, 2015a, 2018; Fu等, 2017; Liu等, 2019; Li X等, 2020; Han等, 2022; Zhang J等, 2022; 刘影等, 2023; 李龙等, 2024). 低地震波速、高电导率、低Q值异常和广泛存在的较低泊松比表明由于高温或部分熔融而导致中-下地壳力学性质较弱(Beaumont等, 2001; Yu等, 2020), 在横向地形(重力势能)梯度的驱动下可能存在流动(Royden等, 1997; Clark和Royden, 2000; Bischoff和Flesch, 2018). 前人研究认为, 下地壳流模型可用来解释在缺少足够的上地壳缩短和地形梯度变化的情况下, 在青藏高原东南缘观测到的地壳增厚(Clark等, 2006; Yu等, 2020; Zhang G等, 2022).

在滇中地块内部存在明显的壳内高速和高阻体(图4和5), 其空间位置与地质研究识别出的峨眉山大火成岩省(ELIP)的内带较为一致(例如, Xu等, 2004, 2007; Chen等, 2015; Li X等, 2020; Li W等, 2021; Han等, 2022; Hu等, 2022). 峨眉山大火成岩省的岩浆活动发生于二叠纪, 在此之后, 大量的基性和超基性岩浆从深部侵入到地表, 侵入的岩浆冷却之后可能形成力学性质更强的新岩石圈, 与稳定的四川盆地一起, 阻挡了晚新生代以来高原内部软弱的中下地壳物质的

南东向挤出. 而在小江断裂带及其周边存在的壳内软弱区可能与局部地幔物质上涌有关(Huang等, 2015b; Yu等, 2020; Wang等, 2022), 从而形成了壳内软弱区(Bai等, 2010; Bao等, 2015; Li X等, 2020; Li W等, 2021; Hu等, 2022). 然而, 由于反演结果的多解性, 到目前为止, 关于峨眉山地幔柱头的位置以及软弱中-下地壳的范围仍然存在不同认识. 此外, 掸邦高原广泛存在的壳内高速和高Q值异常, 表明青藏高原东南缘上地壳物质挤出和下地壳流可能并未到达该区域(图4和5; 例如, Bao等, 2015; Zhao等, 2013; Liu等, 2019; He等, 2021; 刘影等, 2023).

### 3.3 岩石圈流变性和地震孕育背景

区域岩石圈三维流变结构是理解岩石圈物质迁移、地震的发生机理和地震波传播路径及地壳变形的机制和过程的基础(Bürgmann和Dresen, 2008). 青藏高原东南缘岩石圈力学性质较弱, 等效弹性厚度( $T_e$ )为8~20km(Shi W等, 2023; Wang等, 2023), 中-下地壳的等效黏滞系数 $<10^{21}$  Pa s, 岩石圈地幔的等效黏滞系数为 $10^{21-22}$  Pa s(例如, 孙玉军等, 2013; Deng和Tesauro, 2016; She和Fu, 2019; Zhu等, 2022; Wang等, 2023). 综合地震精定位资料和地震波速度结构, 地震活动主要集中在20km以上的上地壳(图4b), 表明研究区的孕震(脆韧性转换带)深度可能为20km. 我们基于研究区的地表热流值、地温结构和岩性流变参数估算出东南缘脆-韧性转换带的深度范围为8~18km, 上地壳脆性层厚度则不超过8km; 该区小震震源深度的统计结果显示, 地震活动在10~11km深度范围达到峰值, 考虑到小震精定位结果的垂向精度为5~6km, 我们认为地壳岩石强度曲线所揭示的脆-韧性转换带的深度与地震活动最强烈区域的深度是一致的, 两者共同揭示了东南缘地区的脆性地壳厚度为8~11km(Li Z等, 2020; 李长军等, 2021). 此外, 部分地震震源深度达到了40km或以深, 考虑到研究区~26°N南、北存在明显的深部结构差异, 结合区域速度结构图像(图4和5), 研究区南部40km可能已进入上地幔, 而北部40km则位于中地壳且鲜有震源深度超过40km的地震发生. 因此, 本文认为研究区南部的岩石圈强度包络线可能存在双峰模式, 即地壳和上地幔均存在孕震脆性层; 而在北侧局部区域的壳内孕震深度可能达到30km.

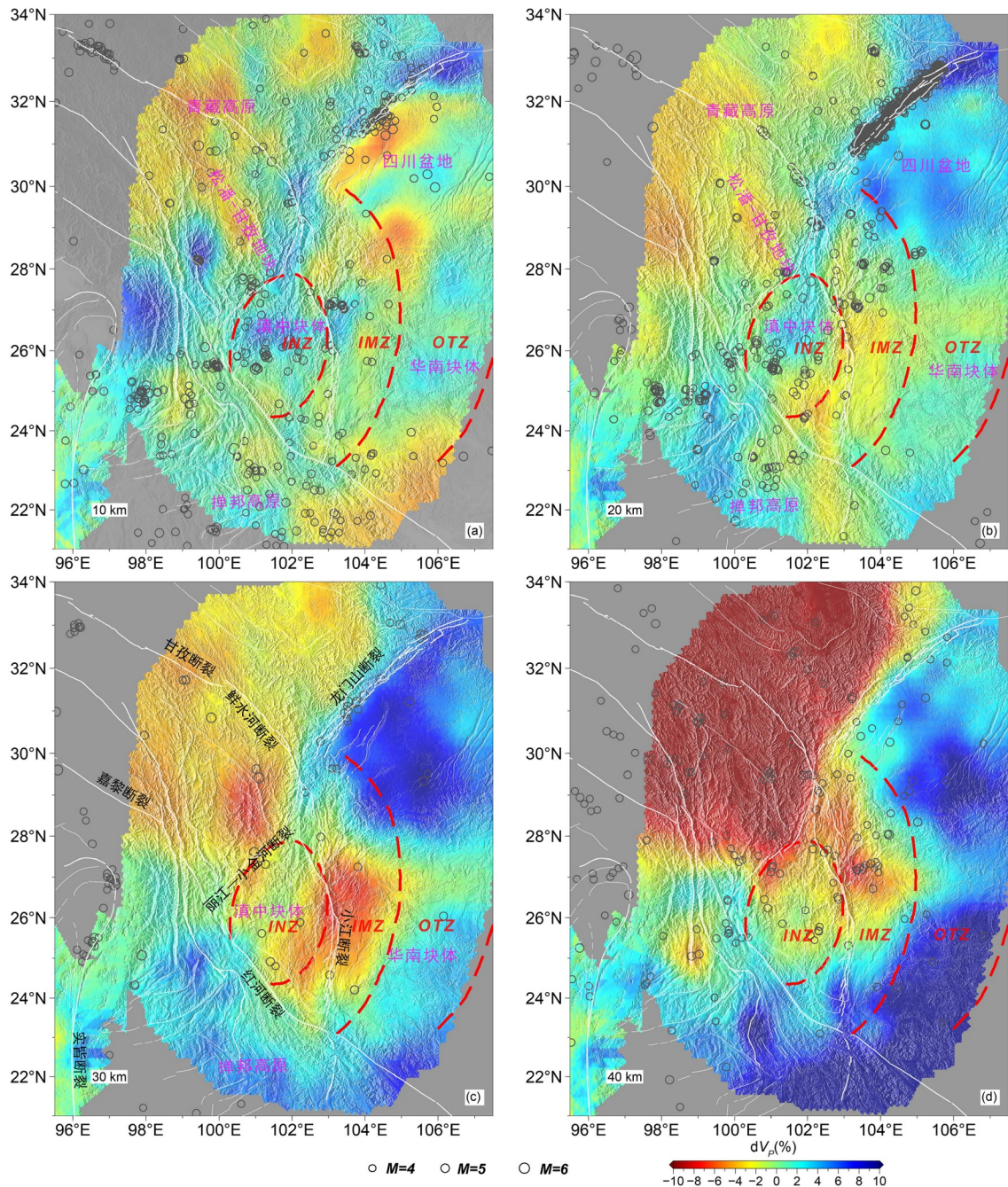


图 4 青藏高原东南缘地壳不同深度的地震P波速度结构和地震精定位目录

(a)~(d)分别为地壳深度10、20、30和40km, 黑色圆圈示意2000年以来 $M \geq 4$ 级地震. INZ、IMZ、OTZ分别表示峨眉山大火成岩省内带、中带和外带. 地震波速度结构和地震精定位数据分别来自Long等(2015)、Zhang等(2021)和刘影等(2023)

## 4 地震各向异性和岩石圈变形

### 4.1 地震各向异性和绝对板块运动模型

GNSS、活动断裂、地震震源机制解等资料被广

泛用于揭示地表或者脆性上地壳的变形信息(Holt等, 2000; Wang和Shen, 2020). 地震各向异性资料则被用于反映上地壳和深部地幔的物质运移或者变形特征(例如, Silver和Chan, 1991; Barruol和Mainprice, 1993;

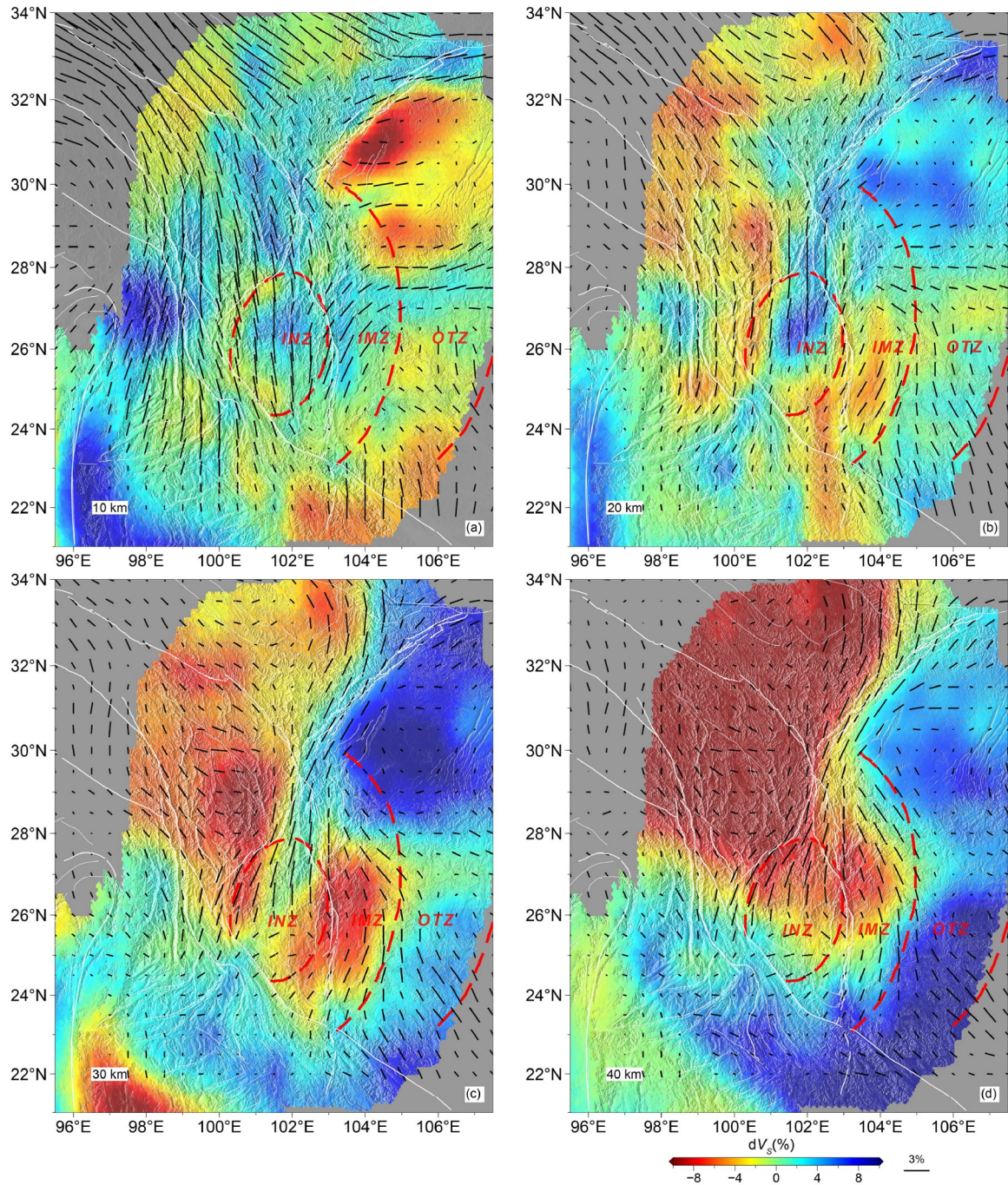


图 5 青藏高原东南缘地壳不同深度的地震S波速度结构(背景色)和面波方位各向异性(黑色短线)

INZ、IMZ、OTZ分别表示峨眉山大火成岩省内带、中带和外带。地震波速度数据和方位各向异性数据分别来自Bao等(2020)、Wu等(2021)和刘影等(2023)

Crampin和Peacock, 2005; 高原等, 2020). 地震各向异性成因包括微裂隙或矿物晶格的定向排列(lattice preferred orientation, LPO; Barruol和Mainprice, 1993). 其

中, 地壳介质的地震各向异性特征与地壳结构、应力状态和断裂活动等密切相关(例如, Crampin, 1981; Crampin等, 1990, 2008; 高原等, 1995, 2010, 2020;

Gao等, 2011; Crampin和Gao, 2018), 下地壳介质的各向异性还可能与矿物晶体的定向排列或者物质流动有关(Yao等, 2006; Sun等, 2012; Chen等, 2016; Xie等, 2017), 地壳中广泛存在的EDA(Extensive-Dilatancy Anisotropy, “广泛扩容各向异性”)微裂隙被认为是地壳各向异性的主要原因(Crampin和Peacock, 2005; Crampin和Gao, 2014; 高原等, 2020). 上地幔各向异性是由于应变作用导致地幔橄榄岩等岩石中矿物的晶格的定向排列引起的(LPO; Zhang和Karato, 1995; Nicolas和Christensen, 2013). 剪切波分裂现象是各向异性在地震波记录最明显的表现形式. 目前, 常用的地震各向异性分析方法包括: ① 近震剪切波分裂技术(SWS分析技术), 用以获取上地壳介质物性和区域应力场(Ando等, 1980; Crampin等, 1985; Gao等, 1995); ② 远震剪切波分裂技术(包括PKS、SKS、SKKS震相, 称为XKS震相分裂分析技术), 主要反映岩石圈各向异性特征, 用来研究地幔对流、板块运动和板内块体变形等(Silver和Chan, 1991; Silver和Holt, 2002); ③ 面波层析成像技术, 用以约束壳内不同深度的剪切波速度异常和方位各向异性, 反映区域内地壳到上地幔不同深度的变形特征(Griot等, 1998; Simons等, 2002; Yao等, 2010).

绝对板块运动模型(APM)是动态地幔在地表的表达, 反映了多种综合动力作用下岩石圈相对于下地幔的总体运动特征(Li和Kremer, 2021), 被广泛用于解释XKS地震各向异性观测结果及推测地幔流场(例如, Wang等, 2013; Chang等, 2015; Huang等, 2015a; Huang和Chevrot, 2021). 目前, 常用的APM模型包括NNR(Kremer等, 2006, 2014)、HS3(Gripp和Gordon, 2002)、以及Kremer(2009)和Becker等(2015)模型等. 上述模型的区别在于基于不同资料定义的全局板块相对于深部地幔存在不同的刚体净旋转量, 其中, NNR模型是通过假定全球板块的净旋转量为0而得到的数学框架; HS3是利用热点地幔柱相对深部地幔的运动轨迹作为参考基准; Kremer(2009)通过假定大洋板块和稳定克拉通的XKS各向异性方向与岩石圈运动方向一致, 获取全球板块的净旋转; Becker等(2015)利用海底扩张速率定义了全球板块运动参考框架. 上述模型中, NNR和HS3是两个端元模型, 揭示出东亚大陆整体分别以约4和2cm/a的速率向SE和NW方向运动; 而在Kremer(2009)和Becker等(2015)模型中, 东亚大陆

则以1~2cm/a的速率向E/NE方向运动. Li和Kremer(2021)重新分析了东亚大陆的XKS各向异性观测结果及其与不同APM模型之间的关系, 认为介于两个端元模型之间的Kremer(2009)和Becker等(2015)APM框架能够更为合理的反映东南缘乃至东亚大陆的岩石圈运动, 同时, 解释东亚大陆的XKS各向异性观测结果, 需要考虑由太平洋板片俯冲后撤引起的地幔流场.

## 4.2 地壳各向异性和变形

GNSS水平速度场和活动断裂的空间展布揭示出青藏高原东南缘地壳围绕喜马拉雅东构造结呈现顺时针旋转运动(图1和6a; Shen等, 2005; Gan等, 2007, 2021; Li Z等, 2020; Wang和Shen, 2020). 基于MELD应变率场稳健估计方法(Kremer等, 2018, 2020), 我们计算了研究区应变率场(图6b-6d). 主应变率结果表明, 该区域地壳变形以绕喜马拉雅东构造结的压扭变形和其它地区的张扭变形为主要特征(图6b), 由北向南, 挤压方向从近W-E转为近N-S, 与区域主压应力场方向一致(图7), 拉张方向由近N-S转为W-E. 剪应变率高值区沿实皆断裂和鲜水河-小江断裂展布, 此外, 在南汀河断裂的北端也存在高剪应变率. 值得一提的是, 除了实皆断裂之外, 其余两个强剪切带与壳内地震波低速异常带有所重合(Bao等, 2015; Huang等, 2018; Liu等, 2019; 刘影等, 2023), 反映了壳内地震波低速异常与断裂剪切变形之间可能存在关联, 即剪切生热可能减小中-下地壳的黏性; 同时, 中-下地壳低速带的存在, 能够促进上地壳块体的相对运动. 面应变率结果表明, 挤压区域位于东构造结周缘和龙门山地区, 而川滇菱形块体整体则以拉张变形为主. 旋转应变率结果表明, 以鲜水河-小江断裂为界, 其西侧的青藏高原东南缘地壳整体呈现顺时针旋转运动.

综合高原的地形、地壳运动速率及应变率观测, 前人研究结果表明高原地壳运动满足牛顿通道流模型, 应力-应变率符合幂律关系(即地壳运动符合“冰川流”)(例如, Holt等, 2000; Gan等, 2007; Panda等, 2019; Panda和Kundu, 2022). 此外, 除了沿喜马拉雅东构造结、鲜水河-小江断裂和实皆断裂存在强变形带之外, 该区域其余地方的应变率分布较为平滑, 结合较为一致的断裂滑动速率(1~4mm/a; 图2和网络版附表S1)、较薄的上地壳脆性层(8~11km)和软弱的中-下地壳(图4和5), 我们认为青藏高原东南缘现今地壳呈现弥散变

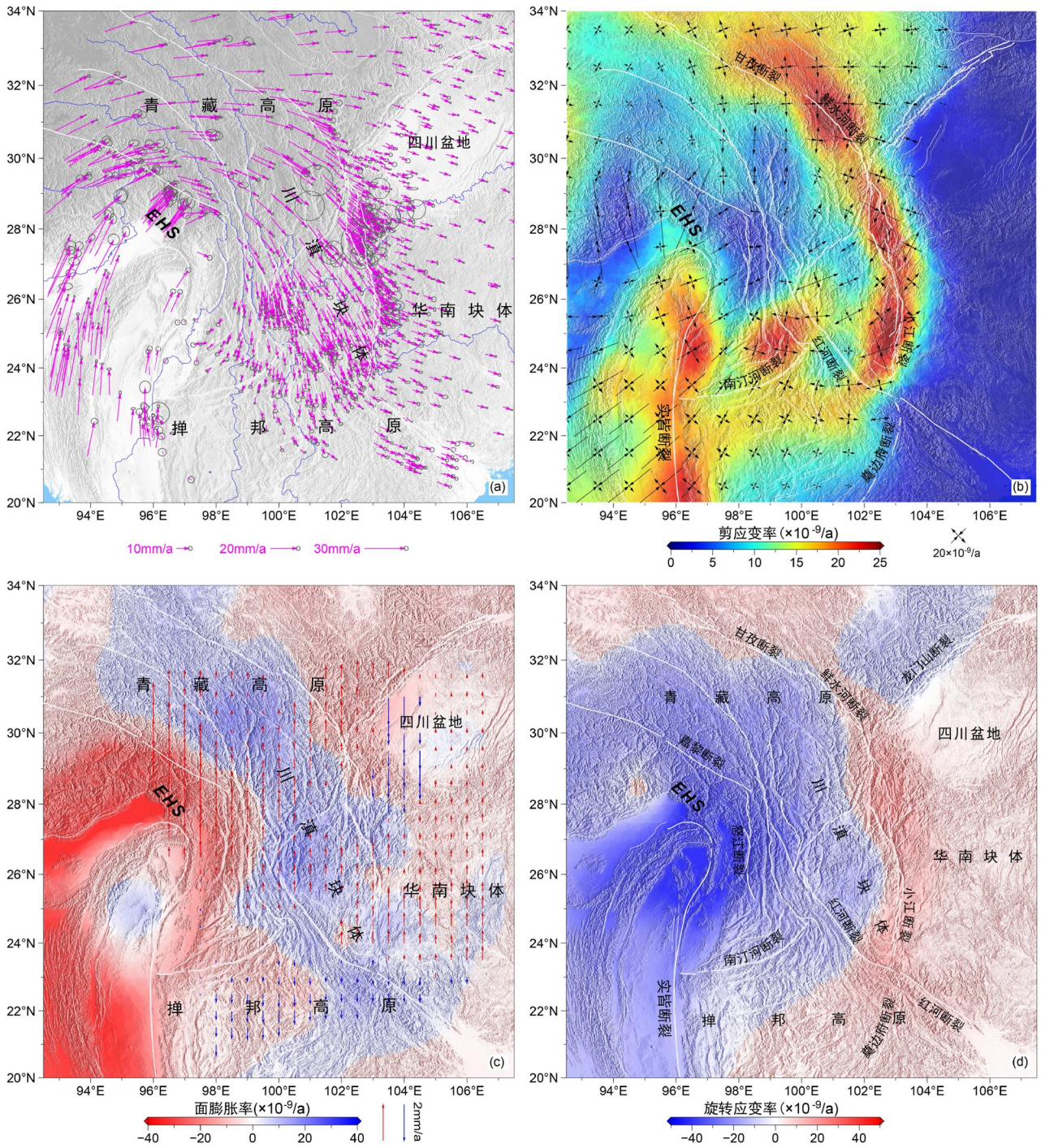


图 6 GNSS水平速度场(a)、主应变率和剪应变率(b)、面应变率和地壳垂直运动速率(c)及旋转应变率(d)

应变率场采用MELD方法(Kreemer等, 2018, 2020)计算获取, GNSS速度场数据来自Mallick等(2019)、Li Z等(2020)、Wang和Shen(2020)和Huang等(2023); 地壳垂直运动速率为Pan等(2018)和Zhao Q等, 2023的内插结果。面应变率负值为挤压, 正值为拉张; 旋转应变率负值为顺时针旋转, 正值为逆时针旋转。GNSS速度场相对于稳定的欧亚参考框架。EHS: 喜马拉雅东构造结

形特征. 其主要成因是该区低黏度的中-下地壳和较薄的上地壳脆性层的存在, 使得断裂与其周围完整岩石的强度差变小, 从而易于在脆性上地壳产生新的破裂 (Yang等 2020).

SWS各向异性能够反映上地壳介质的物性和区域应力场. 青藏高原东南缘SWS优势快波方向整体为NNW或近N-S方向(图8; Shi等, 2009, 2012; 太龄雪等, 2015; 张艺和高原, 2017; 高原等, 2020), 与基于震源机制解反演的区域主压应力方向(图7; Huang等, 2018)和基于GNSS观测得到主压应变率方向近乎一致(图6b; Zheng等, 2017; Li Z等, 2020; Wang和Shen, 2020). 然而SWS快波优势方向由于受到区域构造的影响而呈现分区特性(图8). 例如: 在三江流域(图8的A区域), SWS的优势快波方向为NNW或近N-S方向; 往南至约23°~25°N区域(图8的B和E区域), 优势快波方向出现变化, 西侧为近NNE向, 东侧为近NW向; 在掸邦高原(图8的C区域), 优势快波方向为近NE方向; 在靠近红河、鲜水河-小江、澜沧江等大尺度断裂附近, SWS优势快波方向与断裂走向近乎一致. 总体而言, 我们认为青藏高原东南缘上地壳各向异性与地壳变形特征和区域应力场一致, SWS优势快波方向呈现与地表运动特征一致的发散性, 但受到区域构造特征的影响.

利用接收函数获得的Ps震相分裂(即Pms分裂技术)结果能够用来约束整个地壳的各向异性特征(Liu和Niu, 2011). 通过与SWS各向异性结果进行比较, 可以获取下地壳各向异性特征. 利用Pms分裂技术获得的青藏高原东南缘快慢波时差范围是0.02~1.27s, 前人研究认为各向异性的主要来源是中下地壳, 各向异性快波方向在块体内部与挤压应力平行, 在断裂带附近与断裂带走向基本一致(图6a, 7和9; Sun等, 2012; Cai等, 2016; Kong等, 2016; 韩明等, 2017; Zheng等, 2018; Hu等, 2018).

作为一种面波反演技术, 背景噪声成像技术不依赖于地震事件, 更有利于获取区域地壳不同深度的结构和各向异性特征. 前人使用不同的地震台网台站资料, 计算了瑞利波和勒夫波的速度和各向异性(例如, Yao等, 2010; Xie等, 2013; 鲁来玉等, 2014; 王琮等, 2015; Liu等, 2019; Wu等, 2019; Bao等, 2020; Cao等, 2020). 在青藏高原东南缘, 背景噪声资料反演结果显示了地壳中的低速异常分布和方位各向异性特征(图4和5). 其中, 该区域上地壳的各向异性快波方向与主要

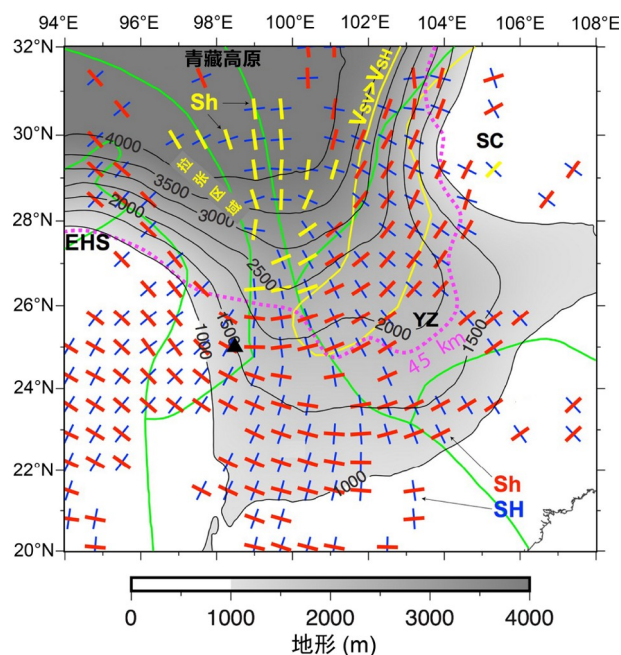


图7 青藏高原东南缘地壳应力场

改自Huang等(2018). 蓝色短线为利用震源机制解反演的水平最大主压应力(SH). 黄色和红色短线为拉张背景和挤压-走滑背景下的水平拉张方向(Sh), 黑线为高程等值线, 绿线为主要块体边界

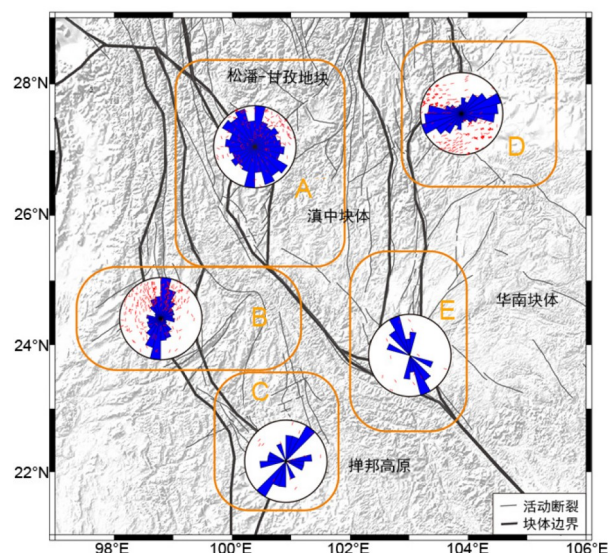


图8 青藏高原东南缘上地壳快剪切波偏振方向

改自高原等(2020). 图中的A、B、C、D和E为分区标识符. 蓝色玫瑰图为汇集不同分区全部台站资料的等面积投影图, 反映了快波的优势方向, 即地壳变形方向

断裂走向一致, 受到地表先存断裂带的控制, 平均各向异性强度小于2%(图8); 各向异性主要由下地壳产生,

强度平均在4%左右, 但下地壳的各向异性与地表构造明显不同(图5和9; 黄周传等, 2021); 此外, 在川滇菱形块体中部的各向异性较弱, 快波方向与边界断裂一致, 可能与峨眉山大火成岩省有关(图5; Huang等, 2018; Wu等, 2019; Cao等, 2020; Han等, 2020). 另外, 该区域9km深度的各向异性快波方向与SWS快波方向一致, 反映了研究区上地壳绕喜马拉雅东构造结旋转, 与地表断裂走向和最大主压应力的方向密切相关; 22.5~32.5km深度的各向异性强度弱于上地壳, 但快波方向显示更为一致的NS优势方向, 结合该深度的壳内低速异常, 本文认为该结果指示了下地壳流的范围可能位于丽江-小金河断裂以北及沿小江断裂展布; 在42.5km及以深, 各向异性快波方向出现明显的分区特性, 其中, 在~26°N以北, 由于地壳厚度较厚(图3a), 该区域的各向异性主要反映了下地壳介质变形, 在其南部出现的近EW向的各向异性快波方向与XKS快波方向一致(常利军等, 2015; 王琼等, 2015), 更可能反映了上地幔顶层的介质结构特性和变形.

#### 4.3 岩石圈各向异性和变形

远震XKS剪切波分裂资料主要反映岩石圈的变形特征. 前人使用区域固定和流动地震台站的地震资料, 得到了东南缘地区丰富的XKS剪切波分裂结果(图10a; Lev等, 2006; Wang等, 2008; Shi等, 2012; 常利军等, 2015; 高原等, 2020; Fan等, 2021; Huang和Chevrot, 2021). 考虑到不同台站存在多个结果, 本文利用稳健的GPS-Imaging中位值滤波方法(Hammond等, 2016; Kreemer等, 2020)对已有观测结果进行滤波, 并插值到 $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ 网格点(图10b). 在图10中, 以~26°N(常利军等, 2015; 高原等, 2020)为界, XKS快波方向呈现明显的分区特征, 其中, 北部的XKS快波方向为近N-S方向, 慢波平均延迟时间为0.8s; 南部的XKS快波方向为近W-E向, 平均延迟时间为1.1s. XKS剪切波分裂观测的地震各向异性, 在横向上具有很高的分辨率, 但是在其传播路径上难以确定各向异性层的深度. 综合东南缘的地震波速度结构、地壳和岩石圈厚度的研究结果(图3-5), 前人研究推测认为研究区北部的各向异性层主要位于岩石圈, 而南部的各向异性层则分布在岩石圈和软流圈(即双层各向异性)(常利军等, 2015; Huang和Chevrot, 2021; Zhu和Ma, 2021).

以~26°N为界, 其北部的XKS剪切波分裂快波方

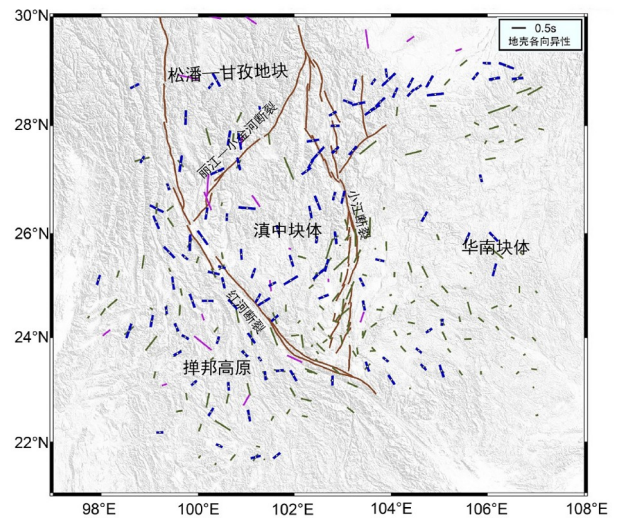


图9 青藏高原东南缘Pms分裂各向异性快波方向(短线的方向)和慢波延迟时间(短线的长度)

改自Han等(2020). 其中, 紫色绿色和蓝色短线的数据分别来自Sun等(2012)、Cai等(2016)和Han等(2020)

向与主压应变率方向、地壳各向异性快波优势方向和地表构造(包括断裂和山脉)走向一致, 表明上地幔变形特征与地壳变形特征一致, 揭示了岩石圈地幔和地表变形场的一致性(常利军等, 2015), 地震各向异性主要来自于地壳(Zhu和Ma, 2021). 其南侧XKS快波方向与地表应力场、地壳各向异性快波优势方向和构造走向差别很大, 而与NNR、Kreemer (2009)和Becker等(2015)得到的绝对板块运动方向接近(Wang等, 2013; Li和Kreemer, 2021), 表明地壳与上地幔变形存在差异, 地震各向异性主要来自于软流圈, XKS各向异性反映了软流圈地幔流和岩石圈之间的剪切运动(Silver和Holt, 2002; Wang等, 2013; 常利军等, 2015; Li和Kreemer, 2021). 地震层析成像结果揭示了缅甸板片东向俯冲及后撤引起的小尺度的地幔对流(Li等, 2008; Lei等, 2019); 板块几何形态重构提供了缅甸和巽他板片的东北向俯冲及南西向后撤的证据(Richards等, 2007); 地震层析成像和大地电磁成像资料揭示了海南地幔柱的岩浆活动和范围(Huang等, 2015a; Yu等, 2020; Wang等, 2022). 因此, 我们认为印度板片的后撤, 在研究区域南部的岩石圈底部和软流圈之间产生了水平差异运动, 进而形成了观测到的E-W方向的各向异性. 此外, 海南地幔柱的地幔上涌也可能对其产生一定程度的影响. 针对研究区南、北部XKS快波方

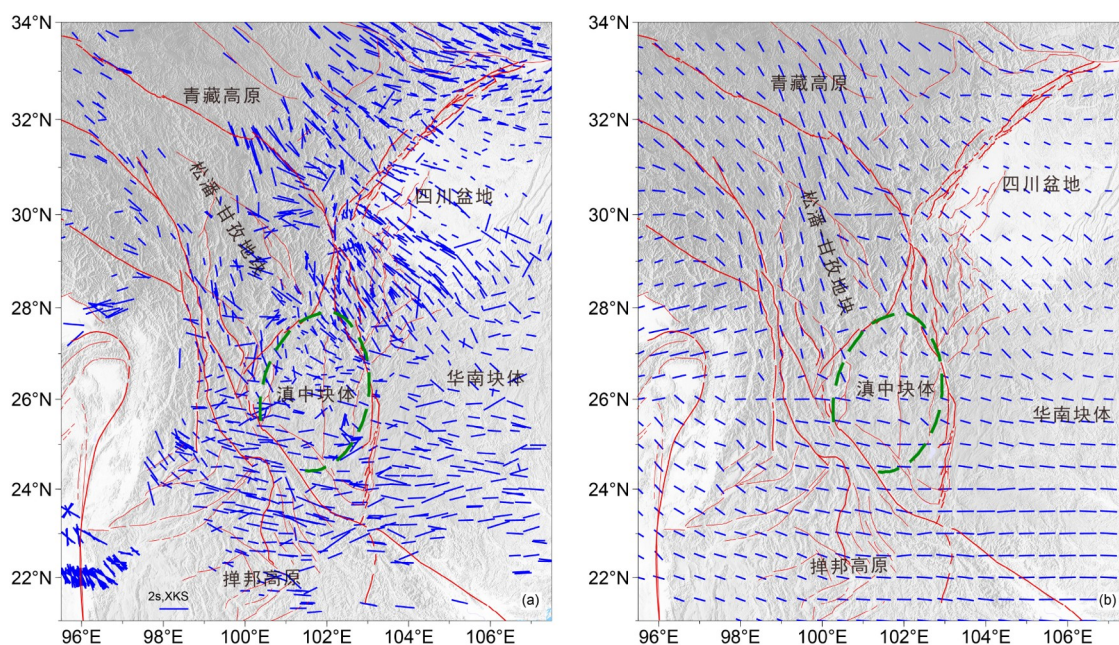


图 10 青藏高原东南缘XKS各向异性快波方向和慢波延迟时间(蓝色短线)

数据来自Barruol等(2009)以及Li和Kreemer(2021). (a) XKS各向异性观测结果, (b) 基于GPS-Imaging中位值滤波方法(Kreemer等, 2020)得到XKS观测的稳健估计结果. 绿色虚线为峨眉山大火成岩省内带, 红色线条为主要活动断裂

向存在明显差异, 结合研究区存在明显的地壳厚度、泊松比和岩石圈厚度变化(图3), 前人研究表明, 东向俯冲的印度板块在~26°N存在撕裂, 以北呈现缓俯冲, 而在以南呈现陡俯冲(Hou等, 2024). 因此, 我们认为印度板块的撕裂及其形成的俯冲角度的差异可能引起了地球物理资料揭示的~26°N南、北侧岩石圈的变形差异.

## 5 动力学机理

青藏高原东南缘岩石圈变形极其复杂(图11). 地质、地球物理和大地测量资料均揭示出在印度板块的斜向汇聚作用下, 研究区地壳物质绕喜马拉雅东构造结呈现顺时针旋转, 该区域的地壳变形同时受到了大尺度断裂的控制(如实皆断裂和鲜水河-小江断裂; 图5-8和11). 地震各向异性资料揭示的下地壳变形方向与地表构造明显不同(图11; 黄周传等, 2021). 在两个壳内低速区呈现较强的各向异性, 指示可能受到地壳流的影响, 而滇中块体内部(即峨眉山大火成岩省的内带)各向异性较弱, 可能反映了峨眉山大火成岩省对地壳结构的改造. 此外, 以~26°N为界, 其南侧的面波各

向异性快波方向与XKS快波方向和绝对板块运动方向一致, 呈E-W方向展布, 可能反映了深部地幔流的强烈作用, 北侧的壳内各向异性较强且方向与XKS快波方向近乎一致, 表明各向异性层主要位于地壳(Zhu和Ma, 2021).

前人提出多种模式来解释青藏高原东南缘复杂的岩石圈变形, 主要认识包括印度板块的推挤(Tapponnier等, 2001; Jiao等, 2023)、重力垮塌(Flesch等, 2001; Ghosh等, 2006; Li等, 2019)、下地壳流(Bischoff和Flesch, 2018; Royden等, 1997)、深部地幔流的牵引(例如, Wang C等, 2013; Jolivet等, 2018; Schellart等, 2019; Huang和Chevrot, 2021)等. 综合地质、大地测量和地球物理等观测资料, 我们认为研究区的复杂岩石圈变形的驱动机制存在明显的分区特征(图12). 在~26°N以北, 由于存在明显的地形梯度, 该区的水平变形和垂向抬升(Hao等, 2016; Pan等, 2018, 2021)可通过重力垮塌(Flesch等, 2001; Ghosh等, 2006; Li等, 2019)、中-下地壳物质流动(Royden等, 1997; Clark和Royden, 2000; Bischoff和Flesch, 2018; He等, 2021)及其驱动的上地壳块体滑移予以综合解释; 在~26°N以南, 地形差异并不明显, 地壳和岩石圈均较薄(图3), 近

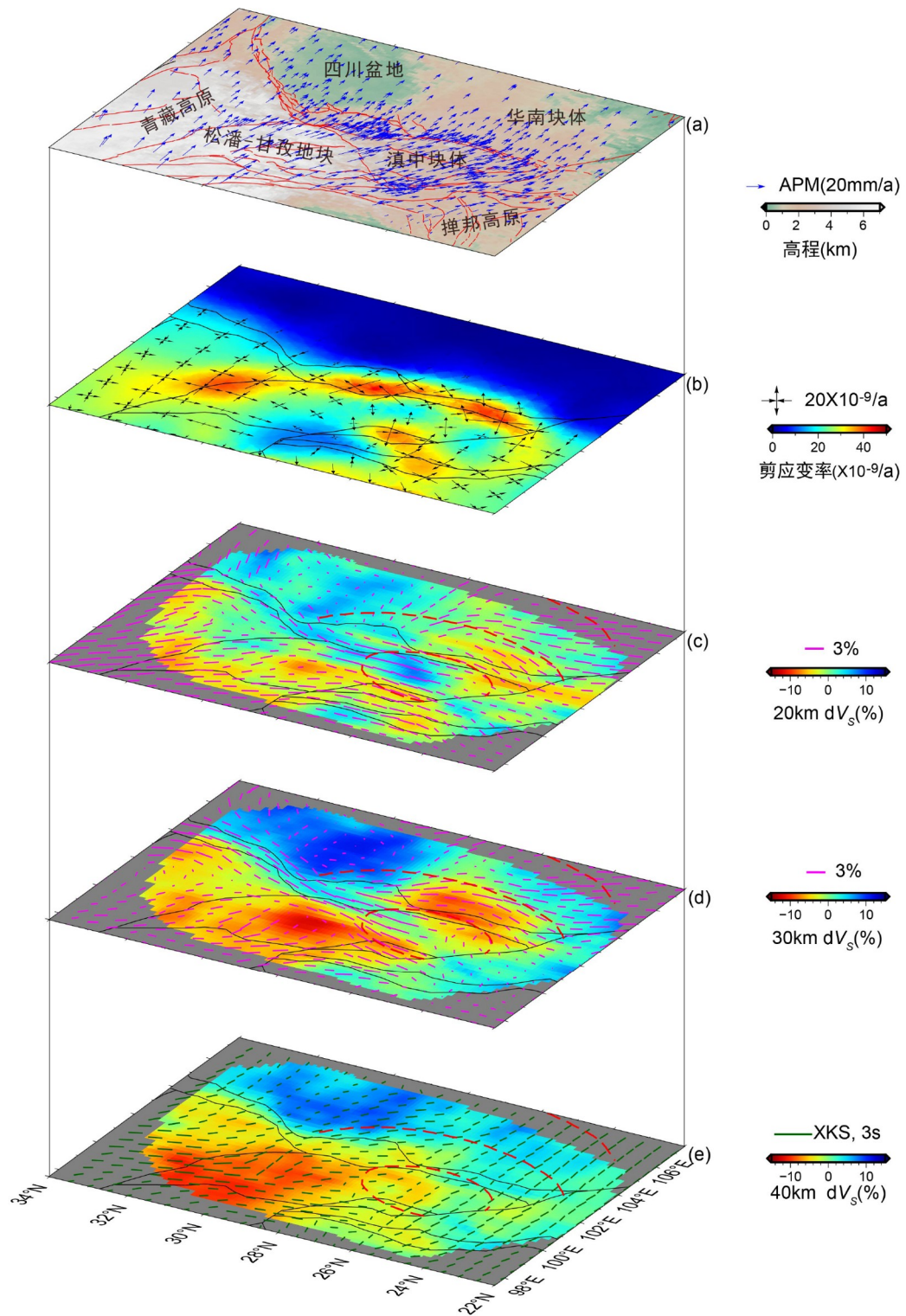


图 11 青藏高原东南缘岩石圈不同深度的变形图像

(a) 地形、活动断裂和地表运动速度场(相对于Kreemer(2009)APM框架); (b) 应变率场; (c) 20km深度的S波速度结构; (d) 30km深度的S波速度结构; (e) 40km深度的S波速度和XKS各项异性结果

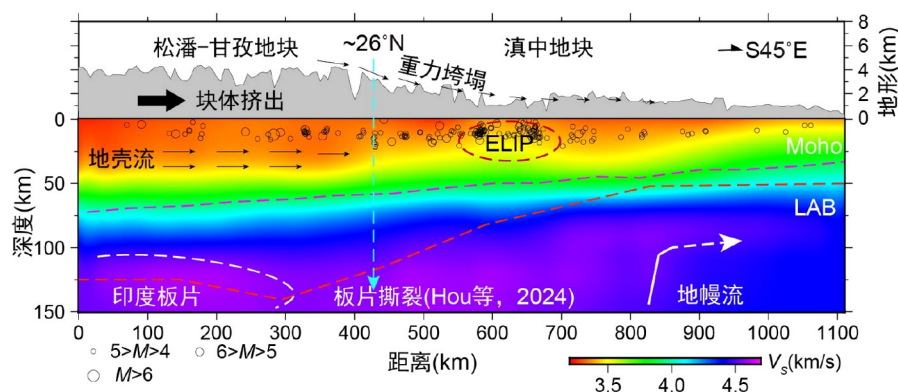


图 12 青藏高原东南缘动力学模型概念图

地震S波结构引自刘影等(2023). ELIP: 峨眉山大火成岩省; LAB: 岩石圈-软流圈界面

E-W向的XKS各向异性和65~200km深度存在的地震波低速异常揭示出该区域可能存在近E-W向的地幔流(常利军等, 2015; Huang等, 2015b; 高原等, 2020; Fan等, 2021; Huang和Chevrot, 2021), 该地幔流可能来自缅甸和巽他板块后撤(例如, Li等, 2008; Lei等, 2019; Zheng等, 2020; Wu等, 2021; Hou等, 2024)或者与海南地幔柱的地幔上涌有关(Huang等, 2015b; Wang等, 2022), 因此, 除了块体挤出和重力垮塌之外, 地幔流的牵引力可能是该区域岩石圈变形的主控因素。

总体而言, 本文认为在印度板块NE向楔入和E向俯冲、汇聚作用下, 青藏高原东南缘不同构造区浅部岩石圈变形受到上地壳块体侧向挤出、重力扩展及其驱动的下地壳流等动力过程的影响。然而, 高原周缘存在的印度-亚洲大陆碰撞动力系统, 印缅-巽他俯冲动力系统、太平洋俯冲动力系统等, 多板块俯冲-汇聚过程中可能导致大洋板片断离、大陆岩石圈拆沉、俯冲板片撕裂、地幔过渡带脱水作用等, 并由此产生的大尺度的软流圈上涌和地幔对流, 可能是控制青藏高原东南缘乃至整个东亚岩石圈复杂变形的深部原因(例如, Conrad和Lithgow-Bertelloni, 2002; Ghosh和Holt, 2012; Jolivet等, 2018; 李秋生等, 2018; Schellart等, 2019; 陈凌等, 2020; Li和Kreemer, 2021; Hou等, 2024)。

## 6 结论

本论文总结和梳理了青藏高原东南缘岩石圈变形的研究成果, 主要结论包括如下几个方面:

(1) 在印度板块NE楔入的强烈作用下, 青藏高原

东南缘上地壳呈现围绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动。基于活动构造、GNSS观测以及地震活动性揭示青藏高原东南缘主要断裂体系的滑动速率均介于1~4mm/a, 且近年来的 $M \geq 6$ 级主震主要发生在小尺度活动断裂。综合该区域较薄的上地壳脆性层厚度(8~11km)和软弱中-下地壳, 我们认为青藏高原东南缘现今地壳变形整体呈现出弥散特征。

(2) 青藏高原东南缘岩石圈力学性质较弱, 等效弹性厚度较薄(8~20km), 中-下地壳的等效黏滞系数 $< 10^{21}$  Pa s, 地震精定位资料揭示其存在地壳和上地幔均存在孕震脆性层。此外, 该区还存在两个中-下地壳低速、高导和低Q值异常区(其被峨眉山大火成岩省内带隔开), 其力学性质较弱, 在重力(地形)驱动下可能发生地质时间尺度上的流动, 可用来解释沿川滇菱形块体拉张区存在的地壳隆升。

(3) 青藏高原东南缘岩石圈变形极其复杂, 以 $\sim 26^\circ\text{N}$ 为界, 其南、北两侧存在明显的地壳和岩石圈厚度、地形差异; 上地壳呈现围绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动, 该地表变形同时受控于大尺度活动断裂; 下地壳变形方向与地表构造明显不同, 但与莫霍面和地表高程的等值线一致。此外, 以 $\sim 26^\circ\text{N}$ 为界, 其南侧的面波各向异性快波方向与XKS快波方向和绝对板块运动方向一致, 呈E-W方向展布, 可能反映了深部地幔流的强烈作用, 北侧的壳内各向异性较强且方向与XKS快波方向近乎一致, 表明各向异性层主要位于地壳。

(4) 青藏高原东南缘复杂岩石圈变形的动力学成因可能存在分区特征。其中, 在 $\sim 26^\circ\text{N}$ 以北, 水平变形

和垂向抬升可通过重力垮塌、及其驱动的中-下地壳物质流动和上地壳块体挤出予以综合揭示; 在 $\sim 26^{\circ}\text{N}$ 以南, 除了块体挤出和重力垮塌之外, 地幔流的牵引力可能是该区域岩石圈变形的主控因素.

**致谢** 责编委及审稿人对本文提出宝贵意见, 王宇扬和阳钰权对数据分析提供协助, 参与GNSS外业测量和数据处理的人员为本工作提供了支持与帮助, 本文使用的画图软件为GMT, 在此一并表示感谢.

## 参考文献

- 安晓文, 常祖峰, 石静芳. 2009. 大盈江断裂西南段晚第四纪活动研究. 地震研究, 32: 193–197
- 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
- 常祖峰, 安晓文, 张艳凤. 2012. 畹町断裂晚第四纪活动与水系构造变形. 地震地质, 34: 228–239
- 常祖峰, 常昊, 李鉴林, 代博洋, 周青云, 朱家龙, 罗宗其. 2016. 维西-乔后断裂南段正断层活动特征. 地震研究, 39: 579–586
- 常祖峰, 常昊, 李鉴林, 侯家学, 宋志峰, 毛德培. 2015. 楚雄-南华断裂晚第四纪活动与 1680 年楚雄 6 3/4 级地震. 中国地震, 31: 492–500
- 常祖峰, 陈刚, 余建强. 2011. 大盈江断裂晚更新世以来活动的地质证据. 地震地质, 33: 877–888
- 常祖峰, 张建国, 申重阳, 李春光, 刘昌伟, 王光明, 于江. 2022. 2012 年缅甸德贝金 M7.0 地震及其地表破裂特征. 地质力学学报, 28: 169–181
- 陈桂华, 徐锡伟, 闻学泽, 王亚丽. 2008. 川滇块体北-东边界活动构造带运动学转换与变形分解作用. 地震地质, 30: 58–85
- 陈凌, 王旭, 梁晓峰, 万博, 刘丽军. 2020. 俯冲构造 vs. 地幔柱构造——板块运动驱动力探讨. 中国科学: 地球科学, 50: 501–514
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学 D 辑: 地球科学, 32: 1020–1030
- 杜义, 张效亮, 黄学猛, 杜宇本, 谢富仁. 2012. 龙陵-瑞丽断裂北段晚第四纪活动性特征及强震复发间隔. 震灾防御技术, 7: 215–226
- 方良好, 袁道阳, 邵延秀, 何文贵, 刘兴旺, 张波. 2013. 滇西南地区黑河断裂中西段晚第四纪构造活动特征. 地震工程学报, 35: 342–353
- 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
- 高原, 吴晶, 易桂喜, 石玉涛. 2010. 从壳幔地震各向异性初探华北地区壳幔耦合关系. 科学通报, 55: 2837–2843
- 高原, 郑斯华, 孙勇. 1995. 唐山地区地壳裂隙各向异性. 地震学报, 17: 283–293
- 虢顺民, 计凤桔, 向宏发, 张双林, 董兴权, 严富华, 张晚霞, 李新元. 2013. 云南红河活动断裂地质图. 北京: 地震出版社
- 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
- 韩新民, 毛玉平. 1993. 石屏-建水断裂带未来三十年内七级以上大地震危险性分析. 地震研究, 16: 52–59
- 韩竹军, 董绍鹏, 毛泽斌, 呼楠, 谭锡斌, 袁仁茂, 郭鹏. 2017. 小江断裂带南段全新世活动的地质地貌证据与滑动速率. 地震地质, 39: 1–19
- 黄学猛, 杜义, 舒赛兵, 谢富仁. 2010. 龙陵-瑞丽断裂 (南支) 北段晚第四纪活动性特征. 地震地质, 32: 222–232
- 黄周传, 吉聪, 吴寒婷, 石宇通, 耿嘉琪, 徐弥坚, 韩存瑞, 徐鸣洁, 王良书. 2021. 青藏高原东南缘地壳结构与变形机制研究进展. 地球与行星物理论评, 52: 291–307
- 李龙, 王新, 侯广兵, 凌媛, 艾印双. 2024. 青藏高原东南缘川滇地区中地壳两条薄状低速层及其构造意义. 中国科学: 地球科学, 54: 1702–1713
- 李坪, 汪良谋. 1975. 云南川西地区地震地质基本特征的探讨. 地质科学, 4: 308–325
- 李秋生, 鄯少英, 白志明, 高原, 高嵩, 熊小松, 王晓冉, 郎超, 韩如冰, 吴庆宇, 卢占武, 王海燕, 李文辉, 张洪双, 张新彦. 2018. 青藏高原东南缘壳幔结构探测研究新进展. 地球科学与环境学报, 40: 757–778
- 李长军. 2021. 青藏高原东南缘现今岩石圈变形特征及其成因机制. 博士论文. 中国地震局地质研究所
- 李长军, 甘卫军, 秦姗姗, 郝明, 梁诗明, 杨帆. 2019. 青藏高原东南缘南段现今变形特征研究. 地球物理学报, 62: 4540–4553
- 刘炳旭, 袁道阳, 王爱国, 何文贵, 邵延秀, 方良好, 高效东. 2019. 滇西南地区孟连断裂晚第四纪走滑速率的厘定. 地震工程学报, 41: 770–780
- 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 2.0 版本. 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
- 吕江宁, 沈正康, 王敏. 2003. 川滇地区现代地壳运动速度场和活动块体模型研究. 地震地质, 25: 543–554
- 任俊杰, 张世民, 侯治华, 刘旭东. 2007. 滇西北通甸-巍山断裂中段的晚第四纪滑动速率. 地震地质, 29: 756–764
- 石峰. 2015. 南汀河断裂带构造地貌研究. 国际地震动态, 7: 46–48
- 宋方敏, 汪一鹏, 俞维贤. 1998. 小江活动断裂带. 北京: 地震出版社
- 孙玉军, 董树文, 范桃园, 张怀, 石耀霖. 2013. 中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构. 地球物理学报, 56: 2936–2946
- 唐荣昌, 韩渭宾. 1993. 四川活动断裂与地震. 北京: 地震出版社
- 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
- 王新, 陈凌, 陈棋福. 2024. 川滇地区三维地壳速度模型评估: 可靠性、局限性和未来突破方向. *中国科学: 地球科学*, 54: 622–637
- 王阎昭, 王恩宁, 沈正康等. 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
- 王阎昭, 王敏, 沈正康, 邵德盛, 施发奇. 2015. 怒江断裂现今错动速率与地震危险性. *地震地质*, 37: 374–383
- 王洋, 张波, 侯建军, 艾晟. 2015. 曲江断裂晚第四纪活动特征及滑动速率分析. *地震地质*, 37: 1177–1192
- 王洋, 王岳军, 张培震, 张进江, 张波, 刘静, 周人杰, 王伟涛, 张会平, 李长军. 2022. 青藏高原东南缘断裂体系新生代构造演化. *中国科学: 地球科学*, 52: 777–802
- 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 周春景, 冯卉, 杨振宇, 全亚博. 2015. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制. *地质通报*, 34: 1–31
- 闻学泽, 杜方, 龙锋, 范军, 朱航. 2011. 小江和曲江-石屏两断裂系统的构造动力学与强震序列的关联性. *中国科学D辑: 地球科学*, 41: 713–724
- 向宏发, 徐锡伟, 虢顺民, 张晚霞, 李洪武, 于贵华. 2002. 丽江-小金河断裂第四纪以来的左旋逆推运动及其构造地质意义——陆内活动地块横向构造的屏蔽作用. *地震地质*, 24: 188–198
- 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: 151–162
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 秦尊丽, 陈桂华, 朱艾斓. 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型. *地震地质*, 27: 446–461
- 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: 地球科学*, 33: 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
- Ai S, Zheng Y, Zeng S, Wang S. 2023. Measurements of Rayleigh wave ellipticity anisotropy and implications for distinct crustal deformation styles across the SE Tibet margin. *Tectonophysics*, 856: 229863
- Akciz S, Burchfiel B C, Crowley J L, Jiyun Y, Liangzhong C. 2008. Geometry, kinematics, and regional significance of the Chong Shan shear zone, Eastern Himalayan Syntaxis, Yunnan, China. *Geosphere*, 4: 292
- Aki K, Lee W H K. 1976. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes: 1. A homogeneous initial model. *J Geophys Res*, 81: 4381–4399
- Allen C R, Luo Z L, Qian H, Wen X Z, Zhou H W, Huang W S. 1991. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China. *GSA Bull*, 103: 1178–1199
- Ando M, Ishikawa Y, Wada H. 1980. S-wave anisotropy in the upper mantle under a volcanic area in Japan. *Nature*, 286: 43–46
- Bahadori A, Holt W E, Feng R, Austermann J, Loughney K M, Salles T, Moresi L, Beucher R, Lu N, Flesch L M, Calvelage C M, Rasbury E T, Davis D M, Potochnik A R, Ward W B, Hatton K, Haq S S B, Smiley T M, Wootton K M, Badgley C. 2022. Coupled influence of tectonics, climate, and surface processes on landscape evolution in southwestern North America. *Nat Commun*, 13: 4437
- Bahadori A, Holt W E. 2019. Geodynamic evolution of southwestern North America since the late Eocene. *Nat Commun*, 10: 5213
- 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, Sandvol E, Ni J, Hearn T, Chen Y J, Shen Y. 2011. High resolution regional seismic attenuation tomography in eastern Tibetan Plateau and adjacent regions. *Geophys Res Lett*, 38: L16304
- 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
- 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
- Barrauol G, Mainprice D. 1993. A quantitative evaluation of the contribution of crustal rocks to the shear-wave splitting of teleseismic SKS waves. *Phys Earth Planet Inter*, 78: 281–300
- Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, Lee B. 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 414: 738–742
- Becker T W, Kustowski B, Ekström G. 2008. Radial seismic anisotropy as a constraint for upper mantle rheology. *Earth Planet Sci Lett*, 267: 213–227
- Becker T W, Schaeffer A J, Lebedev S, Conrad C P. 2015. Toward a generalized plate motion reference frame. *Geophys Res Lett*, 42: 3188–3196
- Bischoff S H, Flesch L M. 2018. Normal faulting and viscous buckling in the Tibetan Plateau induced by a weak lower crust. *Nat Commun*, 9: 4952
- Barrauol G, Wuestefeld A, Bokelmann G. 2009. SKS-Splitting-database. Université de Montpellier, Laboratoire Géosciences. [https://doi.org/10.18715/SKS\\_SPLITTING\\_DATABASE](https://doi.org/10.18715/SKS_SPLITTING_DATABASE)
- 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

- 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
- Cao F, Liang C, Zhou L, Zhu J. 2020. Seismic azimuthal anisotropy for the southeastern Tibetan Plateau extracted by wave gradiometry analysis. *J Geophys Res: Solid Earth*, 125: e2019JB018395
- Cao K, Tian Y, van der Beek P, Wang G, Shen T, Reiners P, Bernet M, Husson L. 2022. Southwestward growth of plateau surfaces in eastern Tibet. *Earth-Sci Rev*, 232: 104160
- Cao K, Zhang D, Shen X, Zhang J, Wang D, Xu Y, Wang G. 2023. Middle miocene onset of the Litang fault system records kinematic change in eastern Tibet. *Tectonics*, 42: e2023TC007931
- Chang L, Flesch L M, Wang C Y, Ding Z. 2015. Vertical coherence of deformation in lithosphere in the eastern Himalayan syntaxis using GPS, Quaternary fault slip rates, and shear wave splitting data. *Geophys Res Lett*, 42: 5813–5819
- 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 L, Jiang M, Yang J, Wei Z, Liu C, Ling Y. 2014. Presence of an intralithospheric discontinuity in the central and western North China Craton: Implications for destruction of the craton. *Geology*, 42: 223–226
- 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
- Chen Y, Xu Y, Xu T, Si S, Liang X, Tian X, Deng Y, Chen L, Wang P, Xu Y, Lan H, Xiao F, Li W, Zhang X, Yuan X, Badal J, Teng J. 2015. Magmatic underplating and crustal growth in the Emeishan Large Igneous Province, SW China, revealed by a passive seismic experiment. *Earth Planet Sci Lett*, 432: 103–114
- Cheng F, Zuza A V, Jolivet M, Mulch A, Meijer N, Guo Z. 2023. Linking source and sink: The timing of deposition of Paleogene syntectonic strata in Central Asia. *Geology*, 51: 1083–1088
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Zhang Y, Xie Y, Li X, Wang K L, Wang P L. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40Myr ago. *Nature*, 394: 769–773
- Chung S L, Searle M P, Yeh M W. 2008. The age of the potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan-Red River Shear Zone: Implications for the onset age of left-lateral shearing: A discussion. *J Geol*, 116: 201–204
- Clark M K, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W. 2006. Use of a regional, relict landscape to measure vertical deformation of the eastern Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 111: 2005JF000294
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28: 703
- Conrad C P, Lithgow-Bertelloni C. 2002. How mantle slabs drive plate tectonics. *Science*, 298: 207–209
- Cowie P A, Scholz C H, Roberts G P, Faure Walker J P, Steer P. 2013. Viscous roots of active seismogenic faults revealed by geologic slip rate variations. *Nat Geosci*, 6: 1036–1040
- Crampin S, Booth D C, Evans R, Peacock S, Fletcher J B. 1990. Changes in shear wave splitting at Anza near the time of the North Palm Springs Earthquake. *J Geophys Res*, 95: 11197–11212
- Crampin S, Evans R, Ucer S B. 1985. Analysis of records of local earthquakes: The Turkish Dilatancy Projects (TDP1 and TDP2). *Geophys J Int*, 83: 1–16
- Crampin S, Gao Y, Peacock S. 2008. Stress-forecasting (not predicting) earthquakes: A paradigm shift. *Geology*, 36: 427–430
- Crampin S, Gao Y. 2014. Two species of microcracks. *Applied Geophysics*, 11: 1–8
- 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, Gao Y. 2018. Evidence supporting new geophysics. *Earth Planet Phys*, 2: 173–188
- Crampin S. 1981. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic-media. *Wave Motion*, 3: 343–391
- Curry J, Moore D, Lawver L, Emmel F, Raitt R, Henry M, Kieckhefer R. 1979. Tectonics of the Andaman Sea and Burma: Convergent margins. *Am Assoc Pet Geol Mem*, 29: 189–198
- Deng J, Wang Q, Li G, Santosh M. 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. *Earth-Sci Rev*, 138: 268–299
- Deng Y, Tesauro M. 2016. Lithospheric strength variations in Chinese Mainland: Tectonic implications. *Tectonics*, 35: 2313–2333
- Diao F, Xiong X, Wang R, Walter T R, Wang Y, Wang K. 2019. Slip rate variation along the Kunlun Fault (Tibet): Results from new GPS observations and a viscoelastic earthquake-cycle deformation model. *Geophys Res Lett*, 46: 2524–2533
- Ding L, Kapp P, Cai F, Garzione C N, Xiong Z, Wang H, Wang C. 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift. *Nat Rev Earth Environ*, 3: 652–667
- Dueker K G, Sheehan A F. 1997. Mantle discontinuity structure from midpoint stacks of converted P to S waves across the Yellowstone hotspot track. *J Geophys Res*, 102: 8313–8327
- Duong N A, Sagiya T, Kimata F, To T D, Hai V Q, Cong D C, Binh N X, Xuyen N D. 2013. Contemporary horizontal crustal movement estimation for northwestern Vietnam inferred from repeated GPS measurements. *Earth Planet Sp*, 65: 1399–1410
- England P, Houseman G. 1986. Finite strain calculations of continental

- deformation: 2. Comparison with the India-Asia Collision Zone. *J Geophys Res*, 91: 3664–3676
- England P, Molnar P. 1990. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet. *Nature*, 344: 140–142
- Fan E, He Y, Ai Y, Gao S S, Liu K H, Jiang M, Hou G, Mon C T, Thant M, Sein K. 2021. Seismic anisotropy and mantle flow constrained by shear wave splitting in central Myanmar. *J Geophys Res: Solid Earth*, 126: e2021JB022144
- Flesch L M, Haines A J, Holt W E. 2001. Dynamics of the India-Eurasia collision zone. *J Geophys Res*, 106: 16435–16460
- Flesch L M, Holt W E, Haines A J, Shen-Tu B. 2000. Dynamics of the Pacific-North American Plate boundary in the western United States. *Science*, 287: 834–836
- 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
- Gan W, Molnar P, Zhang P, Xiao G, Liang S, Zhang K, Li Z, Xu K, Zhang L. 2021. Initiation of clockwise rotation and eastward transport of southeastern Tibet inferred from deflected fault traces and GPS observations. *GSA Bull*, 134: 1129–1142
- Gan W, Zhang P, Shen Z K, Niu Z, Wang M, Wan Y, Zhou D, Cheng J. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J Geophys Res*, 112: 2005JB004120
- 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, Zheng S H, Sun Y. 1995. Crack-induced anisotropy in the crust from shear wave splitting observed in Tangshan region, North China. *Acta Seismol Sin*, 8: 351–363
- Ge W P, Molnar P, Shen Z K, Li Q. 2015. Present-day crustal thinning in the southern and northern Tibetan Plateau revealed by GPS measurements. *Geophys Res Lett*, 42: 5227–5235
- Ghosh A, Holt W E, Flesch L M, Haines A J. 2006. Gravitational potential energy of the Tibetan Plateau and the forces driving the Indian plate. *Geology*, 34: 321
- Ghosh A, Holt W E. 2012. Plate motions and stresses from global dynamic models. *Science*, 335: 838–843
- Gilley L D, Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, Lovera O M, Wang J H. 2003. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam. *J Geophys Res*, 108: 2001JB001726
- Griot D, Montagner J, Tapponnier P. 1998. Phase velocity structure from Rayleigh and Love waves in Tibet and its neighboring regions. *J Geophys Res*, 103: 21215–21232
- Gripp A E, Gordon R G. 2002. Young tracks of hotspots and current plate velocities. *Geophys J Int*, 150: 321–361
- Hammond W C, Blewitt G, Kreemer C. 2016. GPS Imaging of vertical land motion in California and Nevada: Implications for Sierra Nevada uplift. *J Geophys Res: Solid Earth*, 121: 7681–7703
- Han C, Huang Z, Hao S, Wang L, Xu M, 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 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
- Hao M, Freymueller J T, Wang Q, Cui D, Qin S. 2016. Vertical crustal movement around the southeastern Tibetan Plateau constrained by GPS and GRACE data. *Earth Planet Sci Lett*, 437: 1–8
- 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
- Holt W E, Chamot-Rooke N, Le Pichon X, Haines A J, Shen-Tu B, Ren J. 2000. Velocity field in Asia inferred from Quaternary fault slip rates and Global Positioning System observations. *J Geophys Res*, 105: 19185–19209
- Hou Z, Liu L, Zhang H, Xu B, Wang Q, Yang T, Wang R, Zheng Y, Li Y, Gao L, Yu N, Wang X, Miao Z, Han S, Lü Q. 2024. Cenozoic eastward growth of the Tibetan Plateau controlled by tearing of the Indian slab. *Nat Geosci*, 17: 255–263
- 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
- Hu J, Yang H, Badal J, Peng H, Miao S. 2022. Decoding the Emeishan Permian mantle plume in the southeastern margin of Tibet from the seismic signature of the local lithosphere. *Geophys J Int*, 232: 81–96
- Hu J, Yang H, Xu X, Wen L, Li G. 2012. Lithospheric structure and crust-mantle decoupling in the southeast edge of the Tibetan Plateau. *Gondwana Res*, 22: 1060–1067
- Hua Y, Zhang S, Li M, Wu T, Qin W, Wang F, Zhang B. 2018. A new geodynamic model related to seismicity beneath the southeastern margin of the Tibetan Plateau revealed by regional tomography. *Geophys J Int*, 214: 933–951
- Huang M H, Bürgmann R, Freed A M. 2014. Probing the lithospheric rheology across the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 396: 88–96
- Huang Y, Meng G, Cheng X, Wu W, Yang Y. 2023. Present-day crustal

- deformation in the southeastern Tibetan Plateau: Insights from three-dimensional finite-element modeling. *Tectonophysics*, 863: 229983
- 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, Ding Z, Wu Y, Wang P, Mi N, Yu D, Li H. 2015a. Teleseismic shear-wave splitting in SE Tibet: Insight into complex crust and upper-mantle deformation. *Earth Planet Sci Lett*, 432: 354–362
- Huang Z, Wang L, Xu M, Zhao D, Mi N, Yu D. 2019. *P* and *S* wave tomography beneath the SE Tibetan Plateau: Evidence for lithospheric delamination. *J Geophys Res: Solid Earth*, 124: 10292–10308
- Huang Z, Wang L, Xu M, Zhao D. 2018. *P* wave anisotropic tomography of the SE Tibetan Plateau: Evidence for the crustal and upper-mantle deformations. *J Geophys Res: Solid Earth*, 123: 8957–8978
- Huang Z, Wang P, Xu M, Wang L, Ding Z, Wu Y, Xu M, Mi N, Yu D, Li H. 2015b. Mantle structure and dynamics beneath SE Tibet revealed by new seismic images. *Earth Planet Sci Lett*, 411: 100–111
- Jiang G, Xu X, Chen G, Liu Y, Fukahata Y, Wang H, Yu G, Tan X, Xu C. 2015. Geodetic imaging of potential seismogenic asperities on the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault system, southwest China, with a new 3-D viscoelastic interseismic coupling model. *J Geophys Res: Solid Earth*, 120: 1855–1873
- Jiao L, Tapponnier P, Donzé F, Scholtès L, Gaudemer Y, Xu X. 2023. Discrete Element Modeling of Southeast Asia's 3D Lithospheric Deformation During the Indian Collision. *J Geophys Res: Solid Earth*, 128: e2022JB025578
- Jolivet L, Faccenna C, Becker T, Tesauro M, Sternai P, Bouilhol P. 2018. Mantle flow and deforming continents: From India-Asia convergence to Pacific subduction. *Tectonics*, 37: 2887–2914
- Julià J, Ammon C J, Herrmann R B, Correig A M. 2000. Joint inversion of receiver function and surface wave dispersion observations. *Geophys J Int*, 143: 99–112
- 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
- Kreemer C, Blewitt G, Davis P M. 2020. Geodetic evidence for a buoyant mantle plume beneath the Eifel volcanic area, NW Europe. *Geophys J Int*, 222: 1316–1332
- Kreemer C, Blewitt G, Klein E C. 2014. A geodetic plate motion and global strain rate model. *Geochem Geophys Geosyst*, 15: 3849–3889
- Kreemer C, Hammond W C, Blewitt G. 2018. A robust estimation of the 3-D intraplate deformation of the north American Plate From GPS. *J Geophys Res: Solid Earth*, 123: 4388–4412
- Kreemer C, Lavallée D A, Blewitt G, Holt W E. 2006. On the stability of a geodetic no-net-rotation frame and its implication for the international terrestrial reference frame. *Geophys Res Lett*, 33: 2006GL027058
- Kreemer C. 2009. Absolute plate motions constrained by shear wave splitting orientations with implications for hot spot motions and mantle flow. *J Geophys Res*, 114: 2009JB006416
- Lai K Y, Chen Y G, Lâm D Đ. 2012. Pliocene-to-present morphotectonics of the Dien Bien Phu fault in northwest Vietnam. *Geomorphology*, 173–174: 52–68
- Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves. *J Geophys Res*, 84: 4749–4762
- Le Dain A Y, Tapponnier P, Molnar P. 1984. Active faulting and tectonics of Burma and surrounding regions. *J Geophys Res*, 89: 453–472
- Lei J, Zhao D, Xu X, Xu Y G, Du M. 2019. Is there a big mantle wedge under eastern Tibet? *Phys Earth Planet Inter*, 292: 100–113
- 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
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong D, Liu X, Zhang L, Ji S, Trinh P T. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3–84
- 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, Engdahl E R, Burdick S. 2008a. A new global model for *P* wave speed variations in Earth's mantle. *Geochem Geophys Geosyst*, 9: 2007GC001806
- Li C, van der Hilst R D, Meltzer A S, Engdahl E R. 2008b. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. *Earth Planet Sci Lett*, 274: 157–168
- Li W, Chen Y, Xu Y G. 2021. Crustal SiO<sub>2</sub> Content of the emeishan large igneous province and its implications for magma volume and plumbing system. *Geochem Geophys Geosyst*, 22: e2021GC009783
- Li X, Ma X, Chen Y, Xue S, Varentsov I M, Bai D. 2020. A plume-modified lithospheric barrier to the southeastward flow of partially molten Tibetan crust inferred from magnetotelluric data. *Earth Planet Sci Lett*, 548: 116493
- Li Y, Liu M, Li Y, Chen L. 2019. Active crustal deformation in

- southeastern Tibetan Plateau: The kinematics and dynamics. *Earth Planet Sci Lett*, 523: 115708
- Li Y, Hao M, Song S, Zhu L, Cui D, Zhuang W, Yang F, Wang Q. 2021. Interseismic fault slip deficit and coupling distributions on the Anninghe-Zemuhe-Daliangshan-Xiaojiang fault zone, southeastern Tibetan Plateau, based on GPS measurements. *J Asian Earth Sci*, 219: 104899
- Li Y, Shan X, Gao Z, Huang X. 2023. Interseismic coupling, asperity distribution, and earthquake potential on major faults in southeastern Tibet. *Geophys Res Lett*, 50: e2022GL101209
- Li Z, Cheng F, Li Y, Liu L, Zhu L, Wang Y, Hao M, Zhuang W, Xiong R, Gan W. 2024. Lithospheric rheology and crustal deformation across the northeastern Tibet and their implications for plateau growth. *Geophys Res Lett*, 51: e2023GL106666
- Li Z, Kreemer C. 2021. Eastward mantle flow field underneath East Asia quantified by combining shear-wave splitting orientations and absolute plate motion observations. *Earth Planet Sci Lett*, 566: 116969
- Li Z, Wang Y, Gan W, Fang L, Zhou R, Seagren E G, Zhang H, Liang S, Zhuang W, Yang F. 2020. Diffuse deformation in the SE Tibetan Plateau: New insights from geodetic observations. *J Geophys Res: Solid Earth*, 125: e2020JB019383
- Ligorria J P, Ammon C J. 1999. Iterative deconvolution and receiver-function estimation. *Bull Seismol Soc Am*, 89: 1395–1400
- 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 H, Niu F. 2011. Estimating crustal seismic anisotropy with a joint analysis of radial and transverse receiver function data. *Geophys J Int*, 188: 144–164
- Liu J, Tang Y, Tran M D, Cao S, Zhao L, Zhang Z, Zhao Z, Chen W. 2012. The nature of the Ailao Shan–Red River (ASRR) shear zone: Constraints from structural, microstructural and fabric analyses of metamorphic rocks from the Diancang Shan, Ailao Shan and Day Nui Con Voi massifs. *J Asian Earth Sci*, 47: 231–251
- Liu-Zeng J, Tapponnier P, Gaudemer Y, Ding L. 2008. Quantifying landscape differences across the Tibetan plateau: Implications for topographic relief evolution. *J Geophys Res*, 113: F04018
- Long F, Wen X Z, Ruan X, Zhao M, Yi G X. 2015. A more accurate relocation of the 2013  $M_s$ 7.0 Lushan, Sichuan, China, earthquake sequence, and the seismogenic structure analysis. *J Seismol*, 19: 653–665
- Mallick R, Lindsey E O, Feng L, Hubbard J, Banerjee P, Hill E M. 2019. Active Convergence of the India-Burma-Sunda Plates Revealed by a New Continuous GPS Network. *J Geophys Res: Solid Earth*, 124: 3155–3171
- Maury R C, Pubellier M, Rangin C, Wulput L, Cotten J, Socquet A, Bellon H, Guillaud J P, Htun H M. 2004. Quaternary calc-alkaline and alkaline volcanism in an hyper-oblique convergence setting, central Myanmar and western Yunnan. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 175: 461–472
- Molnar P, Boos W R, Battisti D S. 2010. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: Thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 38: 77–102
- 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
- Morley C K, Arboit F. 2019. Dating the onset of motion on the Sagaing fault: Evidence from detrital zircon and titanite U-Pb geochronology from the North Minwun Basin, Myanmar. *Geology*, 47: 581–585
- Morley C K, Wang Y. 2023. The Cenozoic hyper-oblique collision zone of Indochina: A re-appraisal of escape tectonics. *Earth-Sci Rev*, 243: 104453
- Nicolas A, Christensen N I. 2013. Formation of anisotropy in upper mantle peridotites—A review. In: *Composition, Structure and Dynamics of the Lithosphere-Asthenosphere System*. American Geophysical Union (AGU). 111–123
- Pan Y, Hammond W C, Ding H, Mallick R, Jiang W, Xu X, Shum C K, Shen W. 2021. GPS imaging of vertical bedrock displacements: Quantification of two-dimensional vertical crustal deformation in China. *J Geophys Res: Solid Earth*, 126: e2020JB020951
- Pan Y, Shen W B, Shum C K, Chen R. 2018. Spatially varying surface seasonal oscillations and 3-D crustal deformation of the Tibetan Plateau derived from GPS and GRACE data. *Earth Planet Sci Lett*, 502: 12–22
- Panda D, Kundu B, Gahalaut V K, Rangin C. 2020. India-Sunda Plate motion, crustal deformation, and seismic hazard in the Indo-Burmese Arc. *Tectonics*, 39: e2019TC006034
- Panda D, Kundu B. 2022. Geodynamic complexity of the Indo-Burmese Arc region and its interaction with Northeast Himalaya. *Earth-Sci Rev*, 226: 103959
- Panda D, Mondal A, Kundu B. 2019. Eastward “glacier-like flow” of the Tibetan crust constrained from power-law rheology. *J Asian Earth Sci*, 177: 129–133
- Pasyanos M E, Masters T G, Laske G, Ma Z. 2014. LITHO1.0: An updated crust and lithospheric model of the Earth. *J Geophys Res: Solid Earth*, 119: 2153–2173
- Peltzer G, Tapponnier P. 1988. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia Collision: An

- experimental approach. *J Geophys Res*, 93: 15085–15117
- Penney C, Copley A. 2021. Lateral variations in lower crustal strength control the temporal evolution of mountain ranges: Examples from south-east Tibet. *Geochem Geophys Geosyst*, 22: e2020GC009092
- Pivnik D A, Nahm J, Tucker R S, Smith G O, Nyein K, Nyunt M, Maung P H. 1998. Polyphase Deformation in a Fore-Arc/Back-Arc Basin, Salin Subbasin, Myanmar (Burma). *AAPG Bull*, 82: 1837–1856
- Rawlinson N, Pozgay S, Fishwick S. 2010. Seismic tomography: A window into deep Earth. *Phys Earth Planet Inter*, 178: 101–135
- Replumaz A, Kárasen H, van der Hilst R D, Besse J, Tapponnier P. 2004. 4-D evolution of SE Asia's mantle from geological reconstructions and seismic tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 221: 103–115
- Richards S, Lister G, Kennett B. 2007. A slab in depth: Three-dimensional geometry and evolution of the Indo-Australian plate. *Geochem Geophys Geosyst*, 8: 2007GC001657
- Roger F, Calassou S, Lancelot J, Malavieille J, Mattauer M, Zhiqin X, Ziwen H, Liwei H. 1995. Miocene emplacement and deformation of the Konga Shan granite (Xianshui He fault zone, west Sichuan, China): Geodynamic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 130: 201–216
- Romanowicz B. 2003. Global mantle tomography: Progress status in the past 10 years. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 31: 303–328
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, Wang E, Chen Z, Shen F, Liu Y. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276: 788–790
- Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321: 1054–1058
- Schellart W P, Chen Z, Strak V, Duarte J C, Rosas F M. 2019. Pacific subduction control on Asian continental deformation including Tibetan extension and eastward extrusion tectonics. *Nat Commun*, 10: 4480
- Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Liangzhong C, Jiyun Y. 2006. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation, and lower-crustal flow. *Geol Soc Am Bull*, 118: 672–688
- Schoenbohm L M, Whipple K X, Burchfiel B C, Chen L. 2004. Geomorphic constraints on surface uplift, exhumation, and plateau growth in the Red River region, Yunnan Province, China. *Geol Soc Am Bull*, 116: 895
- Shapiro N M, Campillo M, Stehly L, Ritzwoller M H. 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307: 1615–1618
- She Y, Fu G. 2019. Viscosities of the crust and upper mantle constrained by three-dimensional GPS rates in the Sichuan-Yunnan fragment of China. *Earth Planets Space*, 71: 33
- Shen J, Wang Y P, Song F M. 2003. Characteristics of the active Xiaojiang fault zone in Yunnan, China: A slip boundary for the southeastward escaping Sichuan-Yunnan Block of the Tibetan Plateau. *J Asian Earth Sci*, 21: 1085–1096
- Shen X, Braun J, Yuan X. 2022. Southeastern margin of the Tibetan Plateau stopped expanding in the late Miocene. *Earth Planet Sci Lett*, 583: 117446
- Shen Z -, Lü J, Wang M, Bürgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 110: 2004JB003421
- Shi W, Chen S, Zhang H, Zhang Z, Han J. 2023. Insights on the uplift mechanism of the eastern Tibetan Plateau from the flexural isostasy study. *Terra Nova*, 35: 533–541
- Shi X, Sieh K, Weldon R, Zhu C, Han Y, Yang J, Robinson S W. 2018a. Slip rate and rare large prehistoric earthquakes of the Red River Fault, southwestern China. *Geochem Geophys Geosyst*, 19: 2014–2031
- Shi X, Wang Y, Sieh K, Weldon R, Feng L, Chan C H, Liu-Zeng J. 2018b. Fault slip and GPS velocities across the shan plateau define a curved southwestward crustal motion around the eastern Himalayan Syntaxis. *J Geophys Res: Solid Earth*, 123: 2502–2518
- Shi Y, Gao Y, Su Y, Wang Q. 2012. Shear-wave splitting beneath Yunnan area of Southwest China. *Earthq Sci*, 25: 25–34
- Shi Y T, Gao Y, Wu J, Su Y J. 2009. Crustal seismic anisotropy in Yunnan, southwestern China. *J Seismol*, 13: 287–299
- Shi Y, Gao Y, Zhang H, Zhang Z, Li G. 2023. Crustal azimuthal anisotropy in the lateral collision zone of the SE margin of the Tibetan Plateau and its tectonic implications. *Geophys J Int*, 234: 1–11
- Silver P G, Chan W W. 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *J Geophys Res*, 96: 16429–16454
- Silver P G, Holt W E. 2002. The mantle flow field beneath western North America. *Science*, 295: 1054–1057
- Silver P G. 1996. Seismic anisotropy beneath the continents: Probing the depths of geology. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 24: 385–432
- Simons F J, van der Hilst R D, Montagner J P, Zielhuis A. 2002. Multimode Rayleigh wave inversion for heterogeneity and azimuthal anisotropy of the Australian upper mantle. *Geophys J Int*, 151: 738–754
- Simons W J F, Socquet A, Vigny C, Ambrosius B A C, Haji Abu S, Promthong C, Subarya C, Sarsito D A, Matheussen S, Morgan P, Spakman W. 2007. A decade of GPS in Southeast Asia: Resolving Sundaland motion and boundaries. *J Geophys Res*, 112: 2005JB003868
- Socquet A, Pubellier M. 2005. Cenozoic deformation in western

- Yunnan (China–Myanmar border). *J Asian Earth Sci*, 24: 495–515
- Steckler M S, Akhter S H, Seeber L. 2008. Collision of the Ganges–Brahmaputra Delta with the Burma Arc: Implications for earthquake hazard. *Earth Planet Sci Lett*, 273: 367–378
- 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: 186–197
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schärer U, Dalai Z, Haiwei W, Xiaohan L, Shaocheng J, Lianshang Z, Jiayou Z. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343: 431–437
- 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
- Tapponnier P, Zhiqin X, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Jingsui Y. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671–1677
- Unsworth M J, Jones A G, Wei W, Marquis G, Gokarn S G, Spratt J E, Bedrosian P, Booker J, Leshou C, Clarke G, Shenghui L, Chanhong L, Ming D, Sheng J, Solon K, Handong T, Ledo J, Roberts B. 2005. Crustal rheology of the Himalaya and Southern Tibet inferred from magnetotelluric data. *Nature*, 438: 78–81
- Wang C Y, Flesch L M, Silver P G, Chang L J, Chan W W. 2008. Evidence for mechanically coupled lithosphere in central Asia and resulting implications. *Geology*, 36: 363–366
- Wang C Y, Mooney W D, Zhu L, Wang X, Lou H, You H, Cao Z, Chang L, Yao Z. 2019. Deep structure of the eastern Himalayan collision zone: Evidence for underthrusting and delamination in the postcollisional stage. *Tectonics*, 38: 3614–3628
- Wang C Y, Zhu L, Lou H, Huang B S, Yao Z, Luo X. 2010. Crustal thicknesses and Poisson's ratios in the eastern Tibetan Plateau and their tectonic implications. *J Geophys Res*, 115: 2010JB007527
- Wang C Y, Flesch L M, Chang L, Zheng T. 2013. Evidence of active mantle flow beneath South China. *Geophys Res Lett*, 40: 5137–5141
- Wang E, Burchfiel B C, Royden L H, Chen L Z, Chen J S, Li W X, Chen Z L. 1998. Late Cenozoic Xianshuihe–Xiaojiang, Red River, and Dali Fault Systems of Southwestern Sichuan and Central Yunnan, China. Boulder, CO: Geological Society of America Publications
- Wang H, Wright T J, Biggs J. 2009. Interseismic slip rate of the northwestern Xianshuihe fault from InSAR data. *Geophys Res Lett*, 36: 2008GL036560
- 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 P L, Lo C H, Lee T Y, Chung S L, Lan C Y, Yem N T. 1998. Thermochronological evidence for the movement of the Ailao Shan–Red River shear zone: A perspective from Vietnam 5. *Geology*, 26: 887–890
- Wang W, Qiao X, Ding K. 2021. Present-day kinematics in South-eastern Tibet inferred from GPS measurements. *J Geophys Res: Solid Earth*, 126: e2020JB021305
- 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 W, Wu J, Fang L, Lai G, Yang T, Cai Y. 2014. S wave velocity structure in southwest China from surface wave tomography and receiver functions. *J Geophys Res: Solid Earth*, 119: 1061–1078
- Wang Y, Fan W, Zhang Y, Peng T, Chen X, Xu Y. 2006. Kinematics and 40Ar/39Ar geochronology of the Gaoligong and Chongshan shear systems, western Yunnan, China: Implications for early Oligocene tectonic extrusion of SE Asia. *Tectonophysics*, 418: 235–254
- Wang Y, Zhang B, Hou J, Xu X. 2014. Structure and tectonic geomorphology of the Qujiang fault at the intersection of the Ailaoshan–Red River fault and the Xianshuihe–Xiaojiang fault system, China. *Tectonophysics*, 634: 156–170
- Wang Y, Schoenbohm L M, Zhang B, Granger D E, Zhou R, Zhang J, Hou J. 2017. Late Cenozoic landscape evolution along the Ailao Shan Shear Zone, SE Tibetan Plateau: Evidence from fluvial longitudinal profiles and cosmogenic erosion rates. *Earth Planet Sci Lett*, 472: 323–333
- Wang Y, Wang Y, Zhang P, Schoenbohm L M, Zhang B, Zhang J, Zhou R, Stockli D F, Seagren E G, Wang F, Wu L. 2020. Intracontinental deformation within the India–Eurasia oblique convergence zone: Case studies on the Nantinghe and Dayingjiang faults. *GSA Bull*, 132: 850–862
- 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 Y, Zhang P, Schoenbohm L M, Zheng W, Zhang B, Zhang J, Zheng D, Zhou R, Tian Y. 2018. Two-phase exhumation along major shear zones in the SE Tibetan Plateau in the late Cenozoic. *Tectonics*, 37: 2675–2694
- Wang Z, Xu J, Shao Z, Wang W, Pan Z. 2023. Extent of the lower crustal flow constrained by the rheological structure at the eastern boundary of the Chuan–Dian Rhombus Block. *Tectonophysics*, 868: 230087
- Wang Z, Zhao D, Chen X, Gao R. 2022. Subducting slabs, Hainan plume and intraplate volcanism in SE Asia: Insight from P-wave

- mantle tomography. *Tectonophysics*, 831: 229329
- Wen L, Badal J, Hu J. 2019. Anisotropic H-k stacking and (revisited) crustal structure in the southeastern margin of Tibet. *J Asian Earth Sci*, 169: 93–104
- 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
- Willett S, Beaumont C, Fullsack P. 1993. Mechanical model for the tectonics of doubly vergent compressional orogens. *Geology*, 21: 371
- Wu S, Yao J, Wei S, Hubbard J, Wang Y, Min Htwe Y M, Thant M, Wang X, Wang K, Liu T, Liu Q, Tong P. 2021. New insights into the structural heterogeneity and geodynamics of the Indo-Burma subduction zone from ambient noise tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 562: 116856
- 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
- Wu X, Hu J, Chen L, Liu L, Liu L. 2023. Paleogene India-Eurasia collision constrained by observed plate rotation. *Nat Commun*, 14: 7272
- 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
- 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
- Xu B B, Wang Y, Zhang Z Q, Yan Y G, He X H, Hao M, Wang W T, Li Z G, Zhang Y P, Tian Q Y, Wang Y J, Zheng W J, Zhang P Z. 2022. Slip distribution and block rotation of the Indo-South China region inferred from GNSS analyses. *J Asian Earth Sci*, 233: 105206
- 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 X, Ding Z, Shi D, Li X. 2013. Receiver function analysis of crustal structure beneath the eastern Tibetan plateau. *J Asian Earth Sci*, 73: 121–127
- 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 Y G, He B, Huang X, Luo Z, Chung S L, Xiao L, Zhu D, Shao H, Fan W M, Xu J, Wang Y J. 2007. Identification of mantle plumes in the Emeishan large igneous province. *Episodes*, 30: 32–42
- Yang H, Moresi L N, Quigley M. 2020. Fault spacing in continental strike-slip shear zones. *Earth Planet Sci Lett*, 530: 115906
- 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 J, Kaus B J P, Li Y, Leloup P H, Popov A A, Lu G, Wang K, Zhao L. 2020. Lower crustal rheology controls the development of large offset strike-slip faults during the Himalayan-Tibetan orogeny. *Geophys Res Lett*, 47: e2020GL089435
- Yang R, Fellin M G, Herman F, Willett S D, Wang W, Maden C. 2016. Spatial and temporal pattern of erosion in the Three Rivers Region, southeastern Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 433: 10–20
- Yanovskaya T B, Kozhevnikov V M. 2003. 3D S-wave velocity pattern in the upper mantle beneath the continent of Asia from Rayleigh wave data. *Phys Earth Planet Inter*, 138: 263–278
- Yao H, van der Hilst R D, de Hoop M V. 2006. Surface-wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis - I. Phase velocity maps. *Geophys J Int*, 166: 732–744
- 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
- Ye T, Chen X, Huang Q, Zhao L, Zhang Y, Uyeshima M. 2020. Bifurcated crustal channel flow and seismogenic structures of intraplate earthquakes in western Yunnan, China as revealed by three-dimensional magnetotelluric imaging. *J Geophys Res: Solid Earth*, 125: e2019JB018991
- 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
- Zhang B, Zhang J, Zhong D, Yang L, Yue Y, Yan S. 2012. Polystage deformation of the Gaoligong metamorphic zone: Structures,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  mica ages, and tectonic implications. *J Struct Geol*, 37: 1–18
- Zhang G, He Y, Ai Y, Jiang M, Mon C T, Hou G, Thant M, Sein K. 2021. Indian continental lithosphere and related volcanism beneath Myanmar: Constraints from local earthquake tomography. *Earth Planet Sci Lett*, 567: 116987
- Zhang G, Tian Y, Li R, Shen X, Zhang Z, Sun X, Chen D. 2022. Progressive tectonic evolution from crustal shortening to mid-lower crustal expansion in the southeast Tibetan Plateau: A synthesis of structural and thermochronological insights. *Earth-Sci Rev*, 226: 103951
- Zhang J, Chen X, Cai J, Liu Z, Dong Z, Guo C, Han B, Jiang F, Cui T. 2022. Magnetotelluric evidence for the crustal deformation beneath the region around the Lijiang-Xiaojinhe fault, SE margin of the

- Tibetan Plateau. *J Asian Earth Sci*, 235: 105308
- Zhang P Z. 2013. A review on active tectonics and deep crustal processes of the Western Sichuan region, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 584: 7–22
- Zhang P Z, Shen Z, Wang M, Gan W, Bürgmann R, Molnar P, Wang Q, Niu Z, Sun J, Wu J, Hanrong S, Xinzhaoy Y. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32: 809
- Zhang S, Karato S I. 1995. Lattice preferred orientation of olivine aggregates deformed in simple shear. *Nature*, 375: 774–777
- Zhang Z, Yuan X, Chen Y, Tian X, Kind R, Li X, Teng J. 2010. Seismic signature of the collision between the east Tibetan escape flow and the Sichuan Basin. *Earth Planet Sci Lett*, 292: 254–264
- 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 Q, Chen Q, Van Dam T, She Y, Wu W. 2023. The vertical velocity field of the Tibetan Plateau and its surrounding areas derived from GPS and surface mass loading models. *Earth Planet Sci Lett*, 609: 118107
- Zheng G, Wang H, Wright T J, Lou Y, Zhang R, Zhang W, Shi C, Huang J, Wei N. 2017. Crustal deformation in the India-Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements. *J Geophys Res: Solid Earth*, 122: 9290–9312
- Zheng T, Ding Z, Ning J, Chang L, Wang X, Kong F, Liu K H, Gao S S. 2018. Crustal azimuthal anisotropy beneath the southeastern Tibetan Plateau and its geodynamic implications. *J Geophys Res: Solid Earth*, 123: 9733–9749
- Zheng T, He Y, Ding L, Jiang M, Ai Y, Mon C T, Hou G, Sein K, Thant M. 2020. Direct structural evidence of Indian continental subduction beneath Myanmar. *Nat Commun*, 11: 1944
- Zhu L, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions. *J Geophys Res*, 105: 2969–2980
- Zhu T, Ma X. 2021. Upper mantle shear-wave splitting measurements in Chinese Mainland: A review. *Earth-Sci Rev*, 212: 103437
- Zhu Y, Diao F, Wang R, Hao M, Shao Z, Xiong X. 2022. Crustal shortening and rheological behavior across the Longmen Shan fault, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL098814

(责任编辑: 刘静)