青藏高原东南缘断裂体系新生代构造演化

王洋^{1,2*}, 王岳军^{1,2}, 张培震^{1,2}, 张进江³, 张波³, 刘静⁴, 周人杰⁵, 王伟涛^{1,2}, 张会平⁶, 李长军⁶

1. 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;

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082;

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

4. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072;

5. School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland, St. Lucia, QLD 4072, Australia;

6. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

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

收稿日期: 2021-08-10; 收修改稿日期: 2021-12-22; 接受日期: 2021-12-27; 网络版发表日期: 2022-03-09

广东省自然科学基金项目(编号: 2021A1515011631、202102020490和2019B1515120019)、国家自然科学基金项目(批准号: U1701641和41802213)和第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0703)资助

摘要 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, 新生代以来经历了强烈的构造变形和剥蚀改造。区内发育哀牢山-红河剪切带、高黎贡-抹谷剪切带、崇山-临沧-因他暖剪切带等重要构造边界, 控制地体的挤出与旋转; 块体内部发育呈共轭几何关系的北西向和北东向断裂系, 调节陆内变形。综合已有的地质观测、地貌分析以及年代学数据, 我们厘定了该区新生代构造热事件时序格架与构造变形样式, 揭示了边界构造在早渐新世-早中新世对青藏高原物质向东南逃逸起着控制作用, 梳理了北东向大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂、南汀河断裂以及北西向红河断裂、维西-乔后断裂、澜沧-耿马断裂等的几何学-运动学特征及其新生代构造演化过程。重点厘定断裂运动学性质转变的启动时间, 探究区域断裂体系构造反转时序迁移规律及受控的动力机制。结合地球物理和大地测量等资料, 系统分析该区主要走滑断裂体系现今活动性及动力学背景, 揭示了在中-晚中新世以后边界构造对陆内主要地体的应变承载效应逐渐减弱, 青藏高原东南缘在高原扩展过程中经历了从应变集中(块体侧向挤出)到弥散变形的转变。通过梳理该区新生代浅表构造响应及其与深部动力过程的耦合关联, 探讨青藏高原的生长过程。

关键词 新生代, 青藏高原东南缘, 边界构造, 共轭断裂体系, 构造演化

1 引言

印度大陆与欧亚大陆的汇聚、碰撞塑造了世界上

面积最大、平均海拔最高的青藏高原, 导致了欧亚大陆发生强烈的陆内变形, 同时对全球气候与环境变化、亚洲地形地貌及水系演化产生了巨大的影响(例

中文引用格式: 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(5): 777–802, doi: 10.1360/SSTe-2021-0243

英文引用格式: Wang Y, Wang Y, Zhang P, Zhang J, Zhang B, Liu-Zeng J, Zhou R, Wang W, Zhang H, Li Z. 2022. Cenozoic tectonic evolution of regional fault systems in the SE Tibetan Plateau. Science China Earth Sciences, 65(4): 601–623, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9880-3>

如, 钟大赉和丁林, 1996; Yin和Harrison, 2000; 安芷生等, 2006; Liu-Zeng等, 2008; 许志琴等, 2011). 青藏高原东南缘的滇西地区与中南半岛被持续向北楔入的东喜马拉雅构造结和稳定的华南块体所夹持(图1a), 经历

古特提斯多岛洋发育与增生造山, 新生代以来壳/幔物质-能量交换活跃, 构造-岩浆-流体活动强烈, 是协调东南亚陆内构造变形的关键区域(例如, Wang E等, 1998; Burchfiel和Chen, 2012; Deng等, 2014). 该地区新生代

图 1 青藏高原及东南亚构造纲要图(a)和青藏高原东南缘及中南半岛地形地貌及主要构造单元、断裂体系和河流水系(b) 哀牢山-红河剪切带、崇山-临沧-因他暖剪切带以及高黎贡-抹谷剪切带构成该区一级构造格架, 新生代以来控制着地体的挤出与旋转; 在块体的内部最为显著的构造要素是发育一系列北东走向的弧形断裂和一组北西/北北西走向断裂体系; 黑色箭头代表板块位移速度(Simons等, 2007), 灰色箭头代表最大主应力方向(Tingay等, 2010); 黄色方框及年龄代表断裂发生构造反转的时间. EHS, 东喜马拉雅构造结; MMB, 抹谷变质-变形带; GLSZ, 高黎贡剪切带; CSSZ, 崇山剪切带; LCSZ, 临沧剪切带; IMC, 因他暖变质杂岩; XLSZ, 雪山山剪切带; DCSZ, 点苍山剪切带; ALSZ, 哀牢山剪切带; DNCVSZ, 大象山剪切带; DYJF, 大盈江断裂; LFR, 龙陵-瑞丽断裂; NTHF, 南汀河断裂; MLF, 孟连断裂; NMF, Nam Ma断裂; MF, Mae Chan断裂; DBPF, Dien Bien Phu 断裂; RRF, 红河断裂; WQF, 维西-乔后断裂; QJF, 曲江断裂; JSF, 建水断裂; SGF, 实皆断裂; WCF, 王朝断裂; WLSF, 无量山断裂; PEF, 普洱断裂

发育了深切岩石圈的巨型走滑断裂、强烈流变的剪切变形, 以及叠加复合的构造体系, 记录了丰富的青藏高原侧向生长的信息, 是催生大陆动力学造山理论的理想实验室. 半个世纪以来, 国内外学者在该地区开展了大量地质地貌填图、构造解析、岩石地球化学测试、遥感影像解译、年代学分析、大地测量及地球物理观测、地球动力学模拟等工作, 使我们对区域构造演化、地壳变形、地貌演化、深部动力学过程等都有了一定认识(例如, Tapponnier等, 1982, 1990; Wang和Burchfiel, 1997; Royden等, 1997, 2008; Wang E等, 1998; Clark和Royden, 2000; Zhang等, 2004; Shen等, 2005; Liu-Zeng等, 2008; Bai等, 2010; Zhang, 2013; Müller等, 2019). 但是对于该区断裂体系变形演化时序、浅表构造响应及其与深部动力过程的耦合关联、高原扩展模式等科学问题始终存在争议.

陆块侧向挤出是全球斜向汇聚造山带最为重要的构造模式之一, 而青藏高原东南缘及中南半岛被认为是印度-欧亚大陆汇聚-碰撞过程中典型“逃逸构造”区(例如, Tapponnier等, 1982, 1990; Ratschbacher等, 1991; Liu, 1998; 许志琴等, 2011). 该区呈现向北逐渐变窄的楔形, 前期研究指示其沿东缘哀牢山-红河剪切带和西侧实皆断裂带或印缅缝合带向东南发生大规模侧向挤出(图1a; 例如, Tapponnier等, 1990; Wang和Burchfiel, 1997; Leloup等, 2001; 许志琴等, 2011, 2016). 该区自东向西主要展布有五个构造单元: 哀牢山-红河剪切带、思茅-印支地体、崇山-临沧-因他暖剪切带、保山-掸邦地体、高黎贡-抹谷剪切带和腾冲地体(西缅甸地体), 其中三条剪切带构成该区一级构造格架, 新生代以来控制着地体的挤出与旋转(图1b; 例如, Tapponnier等, 1982, 1990; Leloup等, 1995, 2001; Akciz, 2004; Wang等, 2006; 张进江等, 2006; 许志琴等, 2011, 2016; Liu等, 2012; Deng等, 2014). 然而在块体的内部最为显著的构造要素是发育一系列北东走向的弧形断裂和一组近北西向断裂体系(图1b; Wang等, 2014a, 2019; Shi等, 2018a). 其中近平行展布的北西向或北北西向曲江断裂、建水断裂、红河断裂、无量山断裂、澜沧-耿马断裂等均以右旋走滑为主, 沿线存在明显倾滑分量(Wang等, 2014b; Li等, 2020a). 北东向弧形断裂体系如大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂、南汀河断裂、景洪断裂、Nam Ma断裂等广泛发育在中国滇西、缅甸、老挝、泰国等地区, 延伸超过700km, 均以左旋走滑为主

(例如, Wang等, 2014a, 2019; Shi等, 2018a). 这些断裂体系现今活动强烈, 是众多灾难地震的发震构造, 表明它们对于调节区域应变具有重要的作用(图1b). 目前已有的构造运动学解析、岩相学观测、地貌分析以及年代学数据都指示, 无论是边界构造还是块体内部的断裂体系, 新生代以来都经历了多期变形叠加改造, 北东走向和北西向共轭断裂体系普遍经历了运动学性质的转变(例如, Leloup等, 1993, 2001; Lacassin等, 1998; Akciz, 2004; Zhang等, 2010; Zhang B等, 2012; Deng等, 2014; Wang等, 2019). 这些断裂体系响应和承载了该区地壳的构造变形方式和过程, 其变形演化时序记录了青藏高原向东南侧向生长的整个过程. 因此查明该区主要断裂系的形成演化对于认识板块斜向汇聚区块体内部变形方式、过程和动力学背景具有重要意义.

本文聚焦青藏高原东南缘主要边界构造和断裂体系, 综合该区地质观测、地貌分析、大地测量、地球物理等资料, 以已有的构造年代学和热年代学数据为基础, 厘定上述断裂构造新生代变形时序与变形样式, 建立并完善该区新生代构造热事件时序格架, 重点厘定断裂运动学性质转变的启动时间, 揭示区域断裂体系构造反转时序迁移规律及受控的动力机制, 综合探讨青藏高原东南缘新生代构造格局、演化历史及对高原侧向生长的响应.

2 边界构造新生代变形演化

新生代以来印度板块持续向北楔入使得青藏高原东南缘及东南亚地区发生显著的块体侧向挤出与旋转, 而大型走滑断裂带或剪切带对于调节该区陆内变形起着关键作用. 哀牢山-红河剪切带、高黎贡-抹谷剪切带和崇山-临沧-因他暖剪切带响应和制约了该区主要变形地体的构造变形方式和过程(图1b; Tapponnier等, 1982, 1990; Leloup等, 2001; Akciz, 2004; Wang等, 2006; Zhang等, 2010; Cao等, 2011a; Zhang B等, 2012; Liu等, 2012; Deng等, 2014).

2.1 哀牢山-红河剪切带

哀牢山-红河剪切带被认为是思茅-印支地体新生代向东南挤出的北东边界, 它北起云南省维西县, 向东南延伸经越南进入中国南海, 长度超过1000km(图1b; 例如, Tapponnier等, 1990; Leloup等, 1995, 2001; Liu

等, 2012)。该构造带自北西向南东由雪龙山剪切带、点苍山剪切带、哀牢山剪切带、大象山剪切带组成(图1b), 它们具有相似的岩石组合, 经历了多期不同性质的变形、变质及深熔作用, 在新生代剥蚀至地表(例如, Leloup等, 1995, 2001; Harrison等, 1996; 张进江等, 2006; Cao等, 2011a, 2011b; Liu等, 2012; Wang等, 2016, 2020)。雪龙山剪切带位于哀牢山-红河剪切带最北段, 宽~10km, 长~40km(图2a; Zhang等, 2014); 点苍山剪切带位于大理盆地及洱海西侧, 长度近80km, 宽10~20km(图3; Cao等, 2011a, 2011b)。它们都表现为北西向展布的梭形, 横剖面上呈现大型复式背斜构造, 核部出露片麻岩和混合岩, 两翼为片岩和糜棱岩等(Zhang等, 2014; Zhang B等, 2021)。哀牢山剪切带北起弥渡南, 向东南经元江、元阳、老街延伸至越南境内(图2b), 主要由低绿片岩相带(片岩、板岩和变质砂岩等)和高绿片岩-角闪岩相带(包括糜棱岩、片麻岩、混合岩、斜长角闪岩等)组成, 并有多期花岗质岩浆侵入(云南省地质矿产局, 1990; Leloup等, 1995, 2001; 张进江等, 2006; Liu等, 2012)。越南北部的大象山(Day Nui Con Voi)剪切带同样呈北西走向, 宽~20km, 长~270km(图1b), 主要由片麻岩、斜长角闪岩及大量花岗质岩脉组成, 剖面构造形态同样呈现为一个大型的背斜, 两侧被Song Chay断层和Song Hong断层所围限(Jolivet等, 2001)。

哀牢山-红河剪切带岩石发育透入性面理, 产状多倾向东北、南西或近直立, 倾角为缓倾至陡倾(20° ~ 90°), 走向与剪切带展布方向一致; 矿物拉伸和矿物生长线理多为近水平, 倾伏角较小, 广泛发育与左旋韧性走滑相关的变形组构与构造岩(例如, Tapponnier等, 1990; Leloup等, 1995, 2001; 张进江等, 2006; Cao等, 2011a, 2011b; Liu等, 2012; Zhang等, 2014)。关于哀牢山-红河剪切带左旋走滑的时代前人做了大量研究。雪龙山剪切带沿线的淡色花岗岩锆石U-Pb年龄和糜棱岩中同构造黑云母和白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄指示其左旋走滑剪切发生于35~27Ma(Zhang等, 2014; 史鹏亮, 2015)。Cao等(2011a)对点苍山剪切带出露的构造前、同构造和变形后花岗质岩石进行锆石U-Pb定年分析得出点苍山剪切带左行走滑可能始于~31Ma。通过对点苍山剪切带的热演化研究, Cao等(2011b)认为其在28~13、13~4和4~0Ma经历了三期剥露和冷却过程。在哀牢山剪切带沿线, Searle等(2010)测得变质锆石生长

边和同构造花岗岩年龄为31.9~24.2Ma。Liu等(2012)和Tang等(2013)报道了剪切前花岗岩年龄为36.6和30.9Ma, 同构造花岗岩年龄为27.2和25.9Ma, 未变形花岗岩年龄为21.8Ma。剪切带内角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为29.8~20.1Ma(例如, Leloup等, 1995, 2001; Harrison等, 1996), 因此哀牢山剪切带左旋走滑可能发生在30~20Ma(例如, Deng等, 2014; Liu等, 2020)。云母和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果指示剪切带岩石在28~17Ma被快速剥蚀到地壳5~10km深度(例如, Leloup等, 1995, 2001; Harrison等, 1996; Wang P L等, 1998)。大象山剪切带岩石角闪石、白云母和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为25.1~20.4Ma(Liu等, 2013), 老街地区Fansipan杂岩黑云母和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为33.3~25.1Ma, 可能与剪切带左旋兼正断有关(Jolivet等, 2001)。

Wang等(2016, 2020)利用低温热年代学方法及已有的热年代学数据, 对哀牢山剪切带晚新生代剥露过程及剥露机制进行了详细研究(图2b, 2c)。元江附近角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为24.2~24.6Ma, 黑云母和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为24.1~21.0Ma, 钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为21.5~19.5Ma(Harrison等, 1996; Li等, 2009; Liu等, 2013)。结合热模拟结果指示剪切带岩石在25~20Ma经历了从 $>500^{\circ}\text{C}$ 到 $120\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的快速降温, 冷却速率约 $100^{\circ}\text{C Ma}^{-1}$ (Wang等, 2020)。夏洒附近, 角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为21.7~21.3Ma, 黑云母和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为20.7~18.2Ma, 两个锆石(U-Th)/He(ZHe)年龄为 (18.6 ± 0.5) 和 $(16.4\pm 1.5)\text{Ma}$ (图2b)。结合热模拟结果, 剪切带岩石在22~17Ma经历了至少 400°C 降温, 速率约 $75^{\circ}\text{C Ma}^{-1}$ (Wang等, 2020)。粤嘉采样剖面(图2b), 角闪石、黑云母和钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为20.9~17.3Ma, 磷灰石裂变径迹年龄 $(19.7\pm 2.8)\sim (15.1\pm 1.6)\text{Ma}$, 锆石(U-Th)/He年龄为19~16Ma。结合热模拟结果, 剪切带岩石在21~16Ma由 $>500^{\circ}\text{C}$ 降温至磷灰石裂变径迹体系的封闭温度($100\sim 120^{\circ}\text{C}$)附近, 冷却速率约 $80^{\circ}\text{C Ma}^{-1}$ (Wang等, 2020)。已有的构造形变观测及年代学数据指示, 雪龙山剪切带、点苍山剪切带、哀牢山剪切带和大象山剪切带岩石在韧性走滑过程中, 由于倾滑分量的存在均发生了大规模快速剥蚀(例如, Harrison等, 1996; Leloup等, 2001; Cao等, 2011b; 任龙龙等, 2020; Wang等, 2020)。但值得注意的是, 虽然四个剪切带左旋走滑的启动时间一致, 但是沿线岩石剥露历史存在较大区别, 我们将在下文中详述。

图 2 雪山山剪切带和哀牢山剪切带及其邻区地质图((a), (b))和哀牢山-红河剪切带热年代学数据总结(c)

红河断裂位于哀牢山剪切带北东, 包括山前断裂和中谷断裂; 维西-乔后断裂沿雪山山剪切带北东缘发育, 形成维西半地堑盆地; 年代学数据来源Harrison等(1992, 1996)、Leloup等(1993, 1995, 2001)、Bergman等(1997)、张进江等(2006)、Viola和Anczkiewicz(2008)、Li等(2009, 2012)、Cao等(2011b)、Liu等(2013)、史鹏亮(2015)、Wang等(2016, 2020)。(c) 改自Wang等(2020)

2.2 高黎贡-抹谷剪切带

高黎贡剪切带自东喜马拉雅构造结沿怒江河谷向南展布, 在潞江县以北剪切带呈南-北向展布, 以南则

呈北东向展布, 经瑞丽进入缅甸境内, 长度超过600km, 宽约600m~10km, 分隔了保山-掸邦地体和腾冲地体(图1b, 4; 例如, Wang等, 2006; Zhang B等, 2012; 许志

图 3 高黎贡剪切带、崇山剪切带及其邻区地质图(改自Zhang等, 2010)

崇山-临沧剪切带沿线年代学数据引自陈新跃等(2006)、Wang等(2006)、Akciz等(2008)、Zhang等(2010). Ms, 白云母; Bi, 黑云母

琴等, 2016). 高黎贡剪切带沿线出露片麻岩、花岗质糜棱岩和不同成分的浅色脉体, 以及变沉积岩、片岩、千枚岩等(例如, Zhong等, 2000; 季建清等, 2000; Akciz, 2004). 剪切带内岩石发育透入性面理构造, 走向与剪切带近平行或小角度相交, 在北段面理倾向较陡, 在南段面理倾向变缓; 矿物拉伸线理多为近水平(Zhang B等, 2012). 岩相学观测和变质温压研究表明高黎贡剪切带经历了早期角闪岩相的变质作用, 之后又经历了绿片岩相的退变质和冷却作用(Song等, 2010). 构造解析结合年代学观测指示剪切带经历了多期变形, 如早期地壳缩短增厚、壳内水平拆离、再到后期的挤压走滑(例如, Wang等, 2006; Zhang B等, 2012; Xu等, 2015). 在韧性走滑阶段, S-C组构、不对称碎斑和褶皱等变形组构均指示了右旋剪切的运动学特征(例如, Akciz, 2004; Wang等, 2006; Zhang B等, 2012; Xu等, 2015).

大量的野外观测及锆石U-Pb年龄指示高黎贡剪切带岩石在早新生代至晚渐新世经历了显著的缩短变形和深熔作用, 形成碰撞型花岗岩以及早期角闪岩相-麻粒岩相变质作用(Song等, 2010; Zhang B等, 2012). 根据剪切带内角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄, 高黎贡剪切带右旋走滑启动时间约为32~30Ma(Wang等, 2006; Xu等, 2015), 与哀牢山-红河剪切带启动时间一致. 高黎贡剪切带在潞江以北白云母和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄主要为18~11Ma(图4, 5b; Akciz, 2004; Lin等, 2009; Zhang B等, 2012); 潞江附近及以南构造岩白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的年龄集中在24~14Ma(图4, 5b; 季建清等, 2000; Lin等, 2009; Xu等, 2015), 指示剪切带右旋剪切主要发生在中新世. Wang等(2018)和Ge等(2020)对高黎贡剪切带中段(六库县附近)的剥露历史进行了详细研究. 锆石(U-Th)/He年龄为 $(11.0\pm 1.0)\sim(20.7\pm 3.1)\text{Ma}$, 样品年龄-高程呈现正相关. 磷灰石(U-Th)/He(AHe)年龄范围为 $(6.0\pm 0.9)\sim(14.1\pm 1.4)\text{Ma}$. 采样剖面上部样品的AHe和ZHe年龄相近或相互重叠, 表明采样剖面样品经历快速的降温过程, 迅速冷却至两个体系的封闭温度以下. 低温热年代学数据年龄-高程关系和热历史反演结果揭示了两期快速冷却: 第一期发生在韧性走滑过程中(11Ma之前), 剪切带岩石发生大规模快速剥蚀; 之后冷却速率变慢, 在~8Ma或早上新世经历第二期快速冷却, 可能与构造抬升和河流下切有关(Wang等, 2018; Ge等, 2020). 而高黎贡剪切带在六库以北的磷灰石和

图4 高黎贡剪切带及邻区地质图

数据引自季建清等(2000)、Akciz(2004)、Wang等(2006)、Wang等(2008)、Lin等(2009)、Zhang等(2010)、Xu等(2015)、Yang等(2016)、Wang等(2018). Ms, 白云母; Bi, 黑云母

图5 高黎贡剪切带和崇山-临沧剪切带热年代学数据总结

数据来源: 季建清等(2000)、Akciz(2004)、陈新跃等(2006)、Wang等(2006)、Akciz等(2008)、Lin等(2009)、Wang等(2008)、Zhang等(2010)、Xu等(2015)、Yang等(2016)、Wang等(2018, 2019)、刘方斌等(2021)

锆石(U-Th)/He数据则指示了更年轻的剥蚀冷却过程(图4, 5; Yang等, 2016)。

高黎贡剪切带向东南延伸至缅甸, 与抹谷变质-变形带相连(图1b)。抹谷变质-变形带具有相似的岩石组合和变形特征, 沿线出露角闪岩相的高级变质岩和不同期次的侵入岩, 具有右旋韧性剪切的运动学特征(Searle等, 2007, 2017)。白云母和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 ^{40}K - ^{40}Ar 年代学结果显示构造带自南向北构造变形具有明显的穿时性, 其中南段变形和冷却时代为32.2~25.9Ma, 中段为25~17Ma, 而北段抹谷地区为19.5~15.8Ma(Bertrand等, 2001)。其变形演化可能与东喜马拉雅构造结的向北楔入有密切的关系。实皆断裂位于抹谷变质-变形带西侧, 以右旋走滑为主, 呈近南北向展布, 向北可延伸至东喜马拉雅构造结, 向南直至安达曼海(图1b; 例如, Socquet和Pubellier, 2005)。实皆断裂右旋走滑可能始于晚中新世-早上新世, 然而也有学者认为断裂变形可以追溯到早中新世或渐新世, 其累计位错量超过400km(Morley和Arboit, 2019)。实皆断裂地震活动频繁, 自1839年至今共发生十余次6.6级以上地震(Wang等, 2014a)。GPS观测显示实皆断裂右旋走滑速率约为 20mm a^{-1} , 吸收了印度和Sunda板块间

近一半的相对运动(Vigny等, 2003; Wang等, 2011)。

2.3 崇山-临沧-因他暖剪切带

崇山-临沧-因他暖剪切带位于保山-掸邦地体和思茅-印支地体之间, 自北向南包括崇山剪切带、临沧剪切带以及因他暖变质杂岩(图1b; 例如, Wang等, 2006; Zhang等, 2010; 许志琴等, 2016)。其中崇山剪切带北段呈南-北走向, 和高黎贡剪切带平行展布, 南段走向变为南东, 沿澜沧江河谷展布(图3; 例如, Akciz, 2004; Wang等, 2006; Zhang等, 2010)。剪切带宽度为几百米到~10km, 西侧为片麻岩带, 东侧为低级变质岩带(Zhang等, 2010)。岩相学观测指示剪切带岩石经历了早期角闪岩相和后期绿片岩相两期变质作用(例如, Akciz, 2004; Wang等, 2006)。剪切带内面理多为南北或北北西走向, 倾角变化较大(缓倾至陡倾), 线理多呈近水平; 崇山剪切带新生代以来经历了多阶段的构造变形, 其中以大规模韧性走滑剪切最为明显, 变形组构指示剪切带北部(约 27°N 以北靠近东喜马拉雅构造结处)具有右旋剪切的运动学性质, 而以南则表现为左旋走滑(图3; 例如, Akciz, 2004; Wang等, 2006; Zhang等, 2010)。这种沿走向运动学性质的变化可能体现了东喜

马拉雅构造结向北楔入过程中的变形改造. 崇山剪切带沿线同构造浅色花岗岩脉的年龄为32.6和31.5Ma, 锆石变质边的U-Pb年龄为33~21Ma, 表明走滑剪切启动时间约为33Ma(例如, Zhang等, 2010; 唐渊等, 2013); 而同构造云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学数据指示剪切带主要走滑阶段为23~13Ma(例如, Akciz, 2004; Zhang等, 2010).

崇山剪切带向南延伸至澜沧变质带与临沧花岗岩基, 带内火山喷发与岩浆侵入、变质作用与多旋回构造变形强烈. 澜沧变质带呈近南北走向, 主要由云母片岩、石英片岩、蓝片岩、绿片岩及透镜状大理岩组成, 主体构造形迹形成于古特提斯洋向东俯冲及随后的陆-陆碰撞的背景(钟大赉, 1998). 临沧花岗岩基是滇西地区出露规模最大且多期侵入的复式花岗岩基(图3), 主体形成于中-晚三叠世(莫宣学, 1998; Peng等, 2013). 新生代走滑剪切变形(即临沧剪切带)主要叠加于临沧花岗岩基内部及东侧(图3). Wang等(2006)和陈新跃等(2006)通过运动学分析与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学数据揭示其在31~27Ma发生左旋韧性剪切.

泰国北部因他暖变质杂岩中-新生代以来变形、变质作用强烈, 与北部临沧花岗岩基和临沧剪切带断续相连(图1b). 因他暖变质杂岩包含角闪岩相的片麻岩、混合岩和绿片岩相的糜棱岩及古生代变沉积岩, 此外沿线出露有晚三叠-早侏罗世的花岗岩, 并在白垩纪经历区域变质作用(图6; 例如, Dunning等, 1995; Macdonald等, 2010; Morley, 2012). 在新生代由于地壳增厚、构造抬升以及后期伸展变形, 变质基底被快速剥蚀至浅表, 并伴随有晚渐新世的岩浆侵位, 其构造变形样式类似于变质核杂岩(Barr等, 2002; Macdonald等, 2010; Morley, 2012). 因他暖变质杂岩东侧通过低角度拆离断层与清迈盆地毗邻(泰国北部最大的新生代盆地; 图6). 具有正断变形组构的花岗质糜棱岩的锆石U-Pb年龄为40~28Ma, 白云母和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和磷灰石裂变径迹的冷却年龄指示拆离断层活动时代约为21~15Ma(Barr等, 2002; Upton, 1999; Macdonald等, 2010), 因此伸展变形可能始于晚始新世, 但主要发生在早-中中新世(Dunning等, 1995; Macdonald等, 2010). 此外, 该期区域性伸展变形使得因他暖及其邻区发育大量新生代断陷盆地, 形成近南北走向的山脉和地堑/半地堑式断陷盆地相伴分布的构造格局和地貌景观(图6; 例如, Morley, 2007). 盆地发育时间具有明

显穿时性, 根据盆地沉积物时代推测该区盆地形成时代为晚渐新世至早中新世(Morley, 2001).

3 NE向弧形断裂体系构造演化

青藏高原东南缘及中南半岛广泛发育了一系列北东向弧形断裂, 自北西向南东为大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂、畹町断裂、南汀河断裂、孟连断裂、景洪断裂以及位于缅甸、老挝境内的Wan Ha断裂、Nam Ma断裂、Mae Chan断裂等(图1b). 这些断裂现今均具有左旋走滑的运动学性质, 沿线构造地貌发育, 指示了强烈的第四纪活动(Wang等, 2014a; Shi等, 2018a). 该组断裂历史上发生多次破坏性地震, 如2011年 M_w 5.5大盈江地震(大盈江断裂)、1976年 M_w 6.7和 M_w 6.6龙陵地震(龙陵-瑞丽断裂)、2011年 M_w 6.8塔莱地震(Nam Ma断裂)等(Wang等, 2014a). 这些断裂多沿先存变形带或剪切带展布, 例如大盈江断裂东南侧毗邻盈江剪切带, 而龙陵-瑞丽断裂西北侧为高黎贡剪切带南段(Wang等, 2019). 上述剪切带岩石发育陡倾的剪切面理和近水平的矿物拉伸线理, 岩石变形组构指示了右旋剪切的运动学性质. 此外, 怒江和澜沧江干流及其支流流经该组断裂时, 常呈现发卡形(hairpin loop), 暗示该断裂系可能经历了由早期右旋走滑向左旋的构造转换(Lacasín等, 1998). 这组断裂具有相似的几何展布和运动学性质, 指示它们可能形成于统一的构造体制且具有相似的演化历史. 因此, 综合已有的构造运动学解析、地貌分析和年代学数据, 我们以大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂和南汀河断裂为例, 对该组断裂体系的构造演化和构造反转的时限进行梳理.

3.1 大盈江断裂和龙陵-瑞丽断裂

大盈江断裂和龙陵-瑞丽断裂位于腾冲地体, 卫星影像上腾冲地体最显著的构造地貌特征是内部发育了一系列近北东向断层与断陷盆地, 盆间山地为北东向展布的高级变质岩带或剪切带(图7a). 大盈江断裂位于盈江剪切带北西侧山前, 全长约140km(图7a); 断裂走向 $N40^\circ\sim 50^\circ E$, 主体倾向北西, 倾角较陡(常祖峰等, 2011; Wang等, 2019). 水系流经断裂处发生了100~600m的左旋拐折(常祖峰等, 2011). 盈江盆地和梁河盆地发育在断裂沿线. 盈江盆地内第四纪沉积以更新世-全新世河流相砂砾石为主, 厚达数百米; 下部

图6 泰国北部因他暖及邻区地质图(改自Wang等, 2021)
热年代学数据引自Upton(1999)和Barr等(2002)

为晚中新世-上新世砂砾岩和黏土夹褐煤层(云南省地质矿产局, 1990)。而相邻的梁河盆地最早的盆地沉积为中新世晚期的南林组, 主要为花岗质砾岩夹砂岩或粉砂岩, 分选较差, 具有河流相沉积特征; 第四纪以来主要为大盈江冲洪积相的砂砾石松散堆积(云南省地质矿产局, 1990)。根据盆地形态及沉积特征, 盈江盆地的形成可能受控于南侧大盈江断裂和东侧南北向断裂的走滑张性尾端效应(Morley, 2007)。盈江剪切带出露宽度约为500~700m, 沿线出露花岗质糜棱岩和片麻岩, 具有缓倾至陡倾的剪切面理和近水平的矿物拉伸

线理, 岩石变形组构指示了右行剪切的运动学性质(Xu等, 2015; Zhang等, 2017)。

龙陵-瑞丽断裂总体走向约为N55°E, 向东南延伸至缅甸中央盆地, 发育在高黎贡剪切带山前或盆地边缘(图7b), 以左旋走滑兼正断为主, 沿线可见错断的水系和山脊(黄学猛等, 2010; 贺根文等, 2014)。断裂沿线发育具有走滑拉分性质的龙陵盆地、潞西盆地、遮放盆地和瑞丽盆地(图7b; Morley, 2007)。在潞西盆地可见厚度达1400m的晚中新世-上新世地层, 主要为砂砾岩、砂岩夹褐煤和泥炭层(云南省地质矿产局, 1990)。

图7 大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂、南汀河断裂及邻区地质图(改自Wang等, 2019)

大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂和南汀河断裂沿先存构造或剪切带展布, 现今均具有左旋走滑的运动学性质。大盈江断裂和龙陵-瑞丽断裂沿线发育多个走滑拉分性质的盆地, 南汀河断裂左旋走滑导致其北东尾端临沧花岗岩带和澜沧江发生转折; 热年代学数据引自Wang等(2019)

盆地内第四系广泛分布, 以冲洪积相砂砾石为主。断裂带北西侧为高黎贡剪切带南段, 剪切带核部出露片麻岩、花岗质糜棱岩等; 面理倾角缓倾至陡倾, 矿物拉伸线理近水平, 具有右旋走滑的变形组构(Xu等, 2015; Zhang等, 2017)。角闪石和云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为29.8~14Ma(Xu等, 2015; Lin等, 2009)。

大盈江断裂的正断分量在盆山交界处形成~1500m地形高差, Wang等(2019)横跨盈江剪切带采集

样品垂直剖面进行磷灰石和锆石(U-Th)/He测试(图7a)。采样剖面最底部样品ZHe年龄为 $(14.7 \pm 0.2)\text{Ma}$, 最顶部样品ZHe年龄为 $(19.4 \pm 3.1)\text{Ma}$, 样品年龄和高程呈正相关关系。海拔较低的五个样品AHe年龄为 $(9.7 \pm 0.6)\text{Ma}$ (1361m)到 $(11.2 \pm 0.6)\text{Ma}$ (2034m), 比对应样品的ZHe年龄小5~10Ma。采样剖面AHe年龄-高程剖面显示在~11Ma时, 年龄-高程曲线斜率变陡, 指示冷却速率加快。而热史反演结果指示了剪切带在中新世经历了两期快速冷却。第一期发生在~15Ma之前, 所有的样品快速冷却至锆石(U-Th)/He封闭温度以下。盈江剪切带内可见不同尺度的褶皱构造和走滑变形组构, 指示走滑挤压的运动学性质, 其右旋剪切的时代可能与高黎贡剪切带南段同期(Xu等, 2015; Zhang等, 2017)。因此, 盈江剪切带的右旋走滑挤压变形导致了早-中中新世快速剥蚀。11Ma之后剪切带北西侧大盈江断裂发生左旋走滑兼正断, 导致剪切带发生进一步剥蚀。因此, 腾冲地区盆山地貌形成的起始时间约为11Ma(Wang等, 2019)。

3.2 南汀河断裂

南汀河断裂北起临沧花岗岩基, 整体呈北东向走向, 自云县盆地经勐冒, 然后顺南汀河向南西展布, 逐渐转为北60°东延伸入缅甸, 全长超过200km(图1b, 6b)。Wang等(2019)通过构造运动学解析、岩相学观测, 结合年代学方法在断裂带内厘定出NW-SE向地壳缩短、右旋剪切、构造反转三期变形。南汀河断裂沿先存构造发育, 断裂带沿线出露的岩石主要为低级变质的片岩和糜棱岩等, 变形强烈, 发育陡倾至缓倾的透入性面理构造(图7b)。在垂直于面理、平行于线理的剖面上, 可见不对称布丁和褶皱以及北西向倾伏的矿物拉伸线理, 均指示北西盘向南东的逆冲剪切。具有缩短变形组构的糜棱岩的绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为92Ma(Wang等, 2019)。之后的变形以韧性走滑为主, 表现为应变局部化, 形成陡立的面理和劈理, 走向平行于断裂带, 切割早期缓倾的面理构造。矿物拉伸线理近水平, 不对称布丁构造、S-C组构以及微观尺度上不对称的云母鱼和长石碎斑等都指示了左旋走滑的运动学性质; 部分露头岩石变形组构指示了右旋剪切(Wang等, 2019)。上述野外观测表明南汀河断裂带类似于盈江剪切带和高黎贡剪切带南段, 很可能经历了由早期右旋向左旋走滑的构造反转。现今南汀河断裂, 沿线发育

一系列大型冲沟的左旋位错、断层槽谷、断层三角面、陡坎等构造地貌, 其中错断的地貌单元指示了8~21km的左旋位错(Wang和Burchfiel, 1997; Wang等, 2014a; Wang等, 2019). 而Wang和Burchfiel(1997)根据孟连蛇绿岩带的位错认为南汀河断裂左旋滑动量为40~50km. 通过对阶地位错的测量和 ^{14}C 测年, 石峰(2015)得到断裂左旋走滑速率为 $(3.6\pm 0.4)\text{mm a}^{-1}$, 垂直滑动速率为 $(1.1\pm 0.3)\text{mm a}^{-1}$. 为了限定南汀河断裂构造反转的时代, Wang等(2019)获得了具有左旋走滑变形组构的糜棱岩的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 (20.3 ± 0.9) 和 $(19.2\pm 1.7)\text{Ma}$. 此外, 断裂左旋走滑导致其北东尾端临沧花岗岩带和澜沧江发生拐折, 形成凸向北东的弧状构造(图7b), 因此断裂的活动可能会影响该区岩石的剥露历史. 断裂北东尾端的锆石和磷灰石(U-Th)/He数据及热史反演结果指示该区基岩在~20Ma经历了一期快速冷却过程. 综上所述, 南汀河断裂左旋走滑可能始于~20Ma(Wang等, 2019).

4 NW向断裂体系新生代变形及构造反转

4.1 红河断裂

红河断裂位于哀牢山剪切带北东, 北起点苍山山前, 沿红河河谷展布, 向东南可一直延伸至中国南海(图1b; 例如, Allen等, 1984; Replumaz等, 2001; 虢顺民, 2001; Schoenbohm等, 2006a). 红河断裂整体走向 $\text{N}40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{W}$, 中段在元江-蔓耗走向变为 $\text{N}60^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{W}$, 呈现凹形拐弯(图2b). 关于该断层展布形态的形成目前有两种主要认识, 一是认为红河断裂受到高原物质绕东喜马拉雅构造结旋转挤出的影响发生被动偏折(Wang和Burchfiel, 1997; Gan等, 2021); 二是认为其为断弯构造, 形成于哀牢山剪切带左旋走滑阶段, 并随着断层运动学性质反转, 由走滑伸展型断弯转变为走滑挤压型断弯(Wang等, 2016). Allen等(1984)调查发现红河断裂包括位于哀牢山北东边界的山前断裂和河谷内部的中谷断裂(图2b); 应变在这两条平行的分支断裂上发生分解, 山前断裂主要发生正断, 而中谷断裂以右旋走滑为主. 之后国内外地质学家通过野外地质地貌填图和遥感影像解译揭示了红河断裂更为复杂的几何结构(例如, Replumaz等, 2001; 虢顺民, 2001; Schoenbohm等, 2006a). 虢顺民(2001)在红河断裂沿线开展大比例尺活断层填图工作, 发现红河断裂北段在点苍山

山前由多条平行断裂组成, 各次级断裂第四纪以来以正断为主, 沿线发育弥渡、洱海等断陷盆地; 断裂在弥渡-号嘉之间沿哀牢山山前展布, 以右旋走滑为主, 局部具有拉张作用; 号嘉以南, 山前断裂与中谷断裂平行展布, 山前断裂几何结构简单, 而中谷断裂行迹相对不连续(图2b).

红河断裂整体以右旋走滑兼伸展为主, 在中部断弯处具有明显的逆冲分量(例如, 虢顺民, 2001; Wang等, 2016; Li等, 2020a). 山前断裂沿线发育三角面, 倾向北东或北北东, 倾角 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$. 前人认为该地貌特征反映了山前断裂具有正断分量(例如, Tapponnier等, 1990; Replumaz等, 2001). 然而, 由于哀牢山剪切带面理多倾向河谷一侧, 因此该三角面也可能是沿面理发生差异侵蚀所导致(Allen等, 1984). 断裂沿线水系的拐折以及错断的地质、地貌单元指示其右旋位错量为几十米至50km(例如, Allen等, 1984; Wang等, 1998; Replumaz等, 2001; Schoenbohm等, 2006a). Allen等(1984)通过右旋拐折的支流并利用下切速率估算支流的形成时间, 得到断裂第四纪以来右旋滑动速率约为 $2\sim 5\text{mm a}^{-1}$. Weldon等(1994)通过在元江盆地北西的探槽研究, 得出断裂在该处的滑动速率为 2.7mm a^{-1} , 横跨整个断裂带的滑动速率约为 $1\sim 4\text{mm a}^{-1}$. Shi等(2018b)在夏洒附近的探槽研究结果指示该处中谷断裂的滑动速率为 1.1mm a^{-1} . GPS观测数据指示红河断裂右旋滑动速率为 $1.6\sim 3.4\text{mm a}^{-1}$ (Shen等, 2005; Zheng等, 2017; Li等, 2020a).

红河断裂的构造反转可能影响哀牢山剪切带岩石剥露过程. 夏洒县靠近山前断裂的样品磷灰石(U-Th)/He年龄为 $(14.9\pm 1.3)\sim (13.9\pm 1.2)\text{Ma}$ (图2b). 元江县附近样品垂直剖面的磷灰石(U-Th)/He年龄为 $(7.0\pm 1.5)\sim (21.3\pm 1)\text{Ma}$, 元阳县采样剖面磷灰石(U-Th)/He年龄为 $(10.9\pm 0.9)\sim (15.9\pm 1.0)\text{Ma}$ (图2b). 以上两个采样剖面样品AHe年龄和采样点海拔呈现明显正相关, 且~13Ma之前样品年龄-高程曲线斜率较缓, 在~13Ma后年龄-高程曲线斜率变陡(Wang等, 2016, 2020). 利用QTQt软件对元阳、元江和夏洒采样剖面的低温热年代学数据进行热史反演, 结果也揭示了在14~10Ma的一期加速冷却过程, 冷却速率约为 $20\sim 30^{\circ}\text{C Ma}^{-1}$ (Wang等, 2016, 2020). 通过分析气候、构造等方面因素的影响, Wang等(2020)认为剪切带经历的第二期快速冷却过程可能与红河断裂右旋兼正断有关, 因此其构造反转可

能始于14~10Ma.

4.2 维西-乔后断裂

维西-乔后断裂北起雪龙山东麓白济汛, 经维西、乔后, 止于巍山盆地南端, 走向为北北西, 长约280km, 南连红河断裂(图1b; 常祖峰等, 2016). 断裂以右旋走滑为主, 沿线可见山脊和河流发生右旋位错; 发育维西、通甸、马登等多个晚新生代盆地, 指示断裂具有明显的正断分量(常祖峰等, 2016). 通过对错断阶地进行的断距测量以及 ^{14}C 定年, 得到晚更新世以来断裂平均右旋滑动速率为 $1.8\sim 2.4\text{mm a}^{-1}$ (常祖峰等, 2016). 维西-乔后断裂北西段沿雪龙山剪切带发育(图2a), 指示断裂的演化具有继承性, 且在雪龙山山前形成显著的断层三角面和维西半地堑盆地. 在雪龙山剪切带东缘采集的磷灰石(U-Th)/He年龄为 $6.4\sim 5.3\text{Ma}$, 而位于剪切带内部样品的AHe年龄为 $\sim 9\text{Ma}$ (Wang等, 2020). 热史反演结果显示雪龙山剪切带岩石在 $\sim 5\text{Ma}$ 冷却速率加快, 样品经历 $40\sim 80^\circ\text{C}$ 快速冷却被剥露至地表, 可能

指示维西-乔后断裂右旋走滑兼正断的启动(Wang等, 2020). Zhang J Y等(2021)对澜沧江河流纵剖面 and 阶地分析表明维西-乔后断裂的西延部分控制了澜沧江的裂点位置和河流下切速率的空间分布. 维西-乔后断裂与红河断裂具有相似的几何展布、运动学特征以及地质演化历史, 因此可以看作红河断裂的北延部分, 共同构成了川滇地体的西部边界.

4.3 曲江断裂及建水断裂

曲江断裂和建水断裂平行于红河断裂并位于后者凹形拐弯部位的北侧, 向南东止于小江断裂西侧(图8a). 闻学泽等(2011)认为曲江断裂和建水断裂是红河断裂的分支断裂, 它们在深部汇入同一基底滑脱面. 两条断裂虽然规模较小, 但构造活动强烈, 尤其是曲江断裂, 历史上发生过多次破坏性地震(图8a), 是1970年 $M_s 7.7$ 通海地震的发震断裂(朱成男, 1984, 1985; 刘祖荫等, 1999).

曲江断裂位于红河断裂北侧约70km, 沿曲江河谷

图8 青藏高原东南缘北东向断裂体系(a)和区域面膨胀率及主应变率(b)

除靠近实皆断裂和小江断裂的区域, 整个地区基本上以近E-W向的拉张和近N-S向的挤压为主, 且拉张应变率略大于挤压应变率; 地震精定位结果及区域应变率引自Li等(2020a). RRF, 红河断裂; CXF, 楚雄断裂; QJF, 曲江断裂; JSF, 建水断裂; ALSF, 哀牢山断裂; WLSF, 无量山断裂; PWF, 普文断裂; PEF, 普洱断裂; LGF, 澜沧-耿马断裂

展布,北起摆依寨,向南东经峨山、沿曲溪盆地北缘向东延伸,长约80km,断层几何结构简单,局部存在分叉、平行展布或雁列排列的现象(Wang等, 2014b). 曲江断裂以右旋走滑为主且具有倾滑分量,由于受到小江断裂活动的影响,断裂在运动学上具有明显的分段性:北西段以右旋走滑为主,局部有正断分量,发育具有拉分性质的盆地;南东段表现为右旋走滑兼北东盘向南西逆冲,发育压性挠曲盆地(Wang等, 2014b). 曲江断裂在全新世活动强烈,沿走向错断地貌发育,水平位错量3.7~830m. 通过对错断地质体、地貌单元的断距进行测量,并对其进行 ^{14}C 或光释光定年,得到其晚第四纪平均滑动速率为 $2.3\sim 4.0\text{mm a}^{-1}$ (王洋等, 2015). 建水断裂位于曲江断裂和红河断裂之间,自建水至化念,长约100km,总体为北西走向,呈向西南突出的弧形(王怡然等, 2015). 历史记载该断裂发生过7次6级以上的地震,包括两次7级地震,是一条活动性较强的断裂(图8a; 王怡然等, 2015). 建水断裂以右旋走滑为主,根据断裂沿线水系发育时代与错断距离估算其第四纪以来平均滑动速率为 $3\sim 3.6\text{mm a}^{-1}$ (韩新民等, 1982). Li等(2020a)基于该区最新的GPS数据,分析了该区现今

的地壳变形特征以及断裂的滑动速率,结果表明曲江断裂右旋滑动速率为 $(2.8\pm 1.4)\text{mm a}^{-1}$,建水断裂滑动速率为 $(1.7\pm 0.7)\sim (2.2\pm 0.8)\text{mm a}^{-1}$. 此外,当小江断裂穿过曲江断裂和建水断裂时,其左旋走滑速率由 $8\sim 11\text{mm a}^{-1}$ 下降到 $(4.1\pm 0.4)\text{mm a}^{-1}$,而川滇地体东南尖端挤压应变和断裂的逆冲分量显著增加(图8b; Li等, 2020a). 由此可见曲江断裂和建水断裂对于吸收小江断裂的左旋走滑,调节区域应变起了重要的作用. 虽然曲江断裂和建水断裂现今都表现为右旋走滑,但其断裂两侧的对应的地层界线和构造单元都指示了明显的左旋位错,错断距离为3~25km(Burchfiel和Wang, 2003),指示断裂曾发生过运动学性质的转变.

4.4 澜沧-耿马断裂

澜沧-耿马断裂北西向延伸约210km,包括三条分支断裂,彼此近平行展布,遥感和DEM影像上呈明显的线性(图9a, 9b; 魏顺民等, 2000; Wang等, 2014a). 1988年11月6日在云南省西南部的澜沧县和耿马县之间发生7.6级地震和7.2级地震,而澜沧-耿马断裂被认为是其发震断裂(魏顺民等, 2000). 该断裂以右旋走滑

图9 澜沧-耿马断裂和邻区地质图及断裂体系(改自Wang等, 2021)

F1、F2、F3为澜沧-耿马断裂的分支断裂,现今均以右旋走滑为主,但临沧花岗岩体被断裂左旋错断~41km,在断裂带北东段可见平行走向的变质-变形带,具有左旋的运动学性质;地震精定位结果引自Li等(2020a)

为主,并具有一定倾滑分量,沿线构造地貌发育,可见断层槽谷、断层三角面、陡坎以及右旋位错的冲沟和山脊等(刘兴旺等, 2013). 结合探槽研究,断裂第四纪以来的平均走滑速率约为 $(4.7 \pm 0.5) \text{ mm a}^{-1}$ (刘兴旺等, 2013). 而GPS观测显示断裂的滑动速率为 $(3.8 \pm 1.2) \text{ mm a}^{-1}$ (Wang等, 2021). 断裂可能沿袭先存构造发育,在断裂带北东段可见平行走向的变质-变形带(图9b). 出露变形强烈的片岩和糜棱岩,发育透入性陡倾或近直立的面理和劈理,走向与断裂带平行,其上可见近水平的矿物拉伸线理. 不对称碎斑构造指示了左旋走滑的运动学性质. 此外,澜沧-耿马断裂切穿临沧花岗岩体,使其左旋错断 $\sim 41 \text{ km}$ (图9b; Wang等, 2021). 由此可以推断澜沧-耿马断裂可能与红河断裂一致,经历了早期左旋剪切到后期右旋走滑的构造反转.

在澜沧-耿马断裂和红河断裂之间,近平行分布着哀牢山断裂、无量山断裂、普洱断裂、普文断裂和澜沧江断裂,它们虽然具有不同的规模,但都具有右旋走滑的运动学性质,并伴随众多破坏性地震(图8a; Li等, 2020a). Li等(2020a)基于该区GPS观测数据并采用三维弹性半空间错位模型获得了该组北西/北北西向走滑断层的走滑速率:哀牢山断裂 $((1.3 \pm 1.2) \text{ mm a}^{-1})$,无量山断裂 $((0.9 \pm 1.2) \sim (2.8 \pm 1.0) \text{ mm a}^{-1})$,普洱及普文断裂 $((2.1 \pm 0.9) \text{ 及 } (1.6 \pm 0.5) \text{ mm a}^{-1})$ 以及澜沧江断裂 $((0.3 \pm 0.9) \sim (2.4 \pm 1.9) \text{ mm a}^{-1})$. 根据它们的几何展布与运动性质,推测它们与红河断裂、澜沧-耿马断裂、曲江断裂、建水断裂形成于统一的构造体制并具有相似的演化历史.

5 讨论

5.1 青藏高原东南缘新生代构造演化

综合已有的野外地质观测、遥感影像解译、年代学分析、地球物理观测、地球动力学模拟等工作,我们认为位于印度-欧亚大陆东侧斜向汇聚区的青藏高原东南缘新生代以来主要经历了三期区域性构造变形(图10),而构造运动学和变形样式的变化可能指示了高原扩展过程中动力学机制的转变.

5.1.1 地壳缩短增厚

新生代早期青藏高原东南缘可能发生了显著的地壳缩短变形. 思茅-印支地体内的中-新生代地层广泛

发育褶皱与逆冲构造,走向主要为北西至北北西(图3);川滇地体内部楚雄盆地中-新生代地层同样发生褶皱变形,具有相似的变形样式和几何形态(例如, Burchfiel和Chen, 2012; Wang等, 2020). 三条巨型剪切带内广泛出露混合岩和片麻岩,往往具有透入性的矿物分异层,被大量的淡色花岗质岩脉切穿或顺层侵入,指示了强烈的地壳缩短增厚与深熔作用(例如, Wang等, 2006; Zhang等, 2010; Zhang B等, 2012, 2021; Liu等, 2012, 2020). 在缩短变形中片麻岩/混合岩面理形成不同尺度的褶皱,剪切带内可见这些面理构造形成波长达几百米到几公里褶皱变形,褶皱轴面走向和剪切带走向平行或小角度斜交,指示了近东西向或北东-南西向的地壳缩短;在露头尺度上,面理往往形成轴面直立的对称褶皱,形态紧闭或宽缓,指示纯剪变形(例如, Zhang等, 2010; Zhang B等, 2012, 2014; Liu等, 2012). 此外,块体内部呈共轭几何关系的断裂体系可能也形成于该构造体制下(图10a). 该期变形可能发生在始新世至早渐新世. 根据兰坪-思茅地体内古近纪地层内部和底部的不整合面及其同沉积的变形特征, Burchfiel和Chen(2012)推测该区缩短变形发生在古近纪. 而位于褶皱带内部和附近的低温热年代学数据揭示了始新世至早渐新世的快速冷却过程,可能受控于该期变形(图2b; Wang等, 2020). 位于川滇地体内部的吕合盆地内新生代地层呈现不对称的向斜,具有同沉积构造的特征,结合磁性地层学和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年指示缩短变形始于 $\sim 35 \text{ Ma}$ (Li等, 2020b). 雪龙山变质杂岩附近的褶皱逆冲带北东东向缩短变形可能发生在 $50 \sim 39 \text{ Ma}$ (Cao等, 2021).

该区强烈的地壳缩短往往会造成地表海拔抬升与快速剥蚀. 古海拔数据显示云南西北部(大理以北)在始新世中期($\sim 40 \text{ Ma}$)就已经达到现今的海拔高度(Hoke等, 2014). 位于羌塘地体东部的贡觉盆地和芒康盆地可能在晚始新世就已经到达 $2.5 \sim 3 \text{ km}$ 的高程(Su等, 2019; Tang等, 2017; Li等, 2020b). 越来越多的热年代学数据指示该区在始新世或更早存在一期广泛的快速剥蚀(例如, Liu-Zeng等, 2018; Cao等, 2021; Wang等, 2020). 此外,加厚的地壳会导致深部温度升高,如果青藏高原东南缘地壳同喜马拉雅结晶岩一样富集放射性生热元素,则会产生更高的温度,从而导致中-下地壳发生部分熔融(尤其是在有水的条件下;例如, Nelson等, 1996). 地震波速度结构、泊松比及大地电磁探

图 10 青藏高原东南缘及中南半岛新生代构造演化

新生代早期青藏高原东南缘可能发生了显著的地壳缩短变形, 广泛发育褶皱与逆冲构造, 块体内部呈共轭几何关系的断裂体系可能形成于该构造体制下。受到印澳板块向东南亚洋-陆俯冲过程中板片后撤的影响, 青藏高原东南缘在早渐新世发生大规模侧向挤出, 三条巨型构造带发生准同时性走滑剪切。随着印度板块的持续向北楔入, 青藏高原东南缘及邻区主要断裂体系在中-晚新世普遍经历了运动学性质的转变

测等都指示该区中-下地壳存在部分熔融(Zhang, 2013)。该软弱层的形成会限制哀牢山剪切带、崇山剪切带和高黎贡剪切带等边界构造向岩石圈地幔的延伸, 并对上地壳变形产生巨大影响。剪切带走滑启动之后, 由于倾滑分量的存在, 加之几百公里的水平位错, 从而会产生巨大的垂向剥蚀, 使得低黏度的中-下地壳物质被快速剥露至近地表(Wang等, 2020)。

5.1.2 块体挤出逃逸

三条巨型构造带在晚渐新世发生准同时性走滑剪切(图10b), 形成绿片岩相的糜棱岩和片岩等, 这些变形强烈的构造岩叠加于角闪岩相-麻粒岩相的变质岩之上。该期变形形成陡立的面理和近水平的矿物拉伸和矿物生长线理; 不对称褶皱和布丁、碎斑系和S-C组构等指示: 高黎贡-抹谷剪切带具有右旋走滑的运动学性质; 崇山-临沧-因他暖剪切带整体为左旋剪切, 北段靠近东喜马拉雅构造结处转变为右旋剪切; 哀牢山-红河剪切带统一具有左旋剪切的运动学性质(例如, Leloup等, 1995, 2001; 张进江等, 2006; Wang等, 2006; Zhang等, 2010, 2014; Zhang B等, 2012; Cao等, 2011a, 2011b; Liu等, 2012)。剪切带沿线绿片岩相-角闪岩相岩石在韧性走滑过程中被剥露至近地表, 已有的热年代学数据、变形组构、矿物组合等均指示了10~20km的剥蚀量, 而块体内部主要为古生代-中生代沉积盖层。上述观测与刚性块体挤出模型的预测相符, 即应变主要集中在边界断裂带上, 而块体内部变形相对微弱(例如, Tapponnier等, 1982)。但是由于缺乏明显的被错断

地质体, 加之后期变形的改造, 关于上述边界构造带的走滑位错量依然存在诸多争议。例如, 根据中国南海扩张规模、剪切带两侧蛇绿岩带、中生代盆地、白垩纪花岗岩等地质体的对比以及印支地块和华南地块白垩纪磁极对比等方法, 估计哀牢山-红河剪切带左旋位错量可达500~1150km(例如, Briais等, 1993; Leloup等, 1995, 2001; Chung等, 1997)。根据断裂沿线地质体、水系错断以及安达曼海的扩张规模推测实皆断裂中新世以来的右旋位错量为203~460km(Wang等, 2014a; Morley和Arboit, 2019)。边界构造的大规模走滑剪切伴随显著的块体旋转, 古地磁数据显示在印度板块与欧亚板块持续汇聚碰撞过程中, 印支地块北部发生了达70°的顺时针旋转(例如, Li等, 2017)。此外, 该区可能存在多个次级地体, 新生代以来发生不同程度的旋转(例如, Tong等, 2016; Li等, 2017)。崇山-临沧-因他暖剪切带的左旋剪切指示思茅-印支地体相对于西侧的保山-掸邦地体顺时针旋转量更大, 三江地区及中南半岛也非如块体挤出模型所预想的整体滑移挤出。

青藏高原东南缘在早渐新世发生大规模侧向挤出可能受控于印澳板块向东南亚的洋-陆俯冲(例如, 许志琴等, 2016)。俯冲过程中苏门答腊-爪哇岛一带的俯冲洋壳可能发生板片后撤并引起弧后扩张, 从而为块体逃逸提供了空间。如上文所述, 虽然三条剪切带走滑的启动时间一致, 但是剪切带沿走向以及它们之间变形及相关冷却时代存在较大差异(图2c, 5a, 5b)。例如抹谷变质带沿线 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ 年龄自南向北逐渐变年轻: 南部马达班海湾附近年龄约为36~26Ma,

中段为26~16Ma, 北部抹谷地区年龄减小为20~16Ma (Bertrand等, 2001). 北部高黎贡剪切带在其南段(潞江及以南)白云母和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄主要为24~14Ma, 而其北段变形及冷却年龄为18~10Ma(图4, 5a; 例如, Akciz, 2004; Lin等, 2009; Zhang B等, 2012; Xu等, 2015). 同构造黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄揭示的临沧剪切带变形时代为32~27Ma, 而北部崇山剪切带黑云母和白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为20~13Ma(图3, 5b; Wang等, 2006; Zhang B等, 2012). 作为思茅-印支地体的东边界, 哀牢山剪切带沿线角闪石、云母、钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为29~17Ma, 从南东向北西逐渐变年轻(图2c; 例如, Leloup等, 1995, 2001; Harrison等, 1996; Wang P L等, 1998). 三条构造带的变形和冷却时代向北越年轻的变化趋势指示变形的力源来可能自于南侧, 应该与印度板块持续向北楔入有关.

5.1.3 区域构造反转

随着印度板块的持续向北楔入, 青藏高原东南缘及邻区主要断裂体系在中-晚新世普遍经历了运动学性质的转变, 变形样式也经历了早期应变集中(块体挤出为主)到后期弥散变形的改变(图10c). 该区主要发育两组呈共轭关系的断裂体系: 北西/北北西走向的断裂如红河断裂、澜沧江断裂、王朝断裂, 以及规模较小的曲江断裂、建水断裂、哀牢山断裂、无量山断裂、普洱断裂、普文断裂、澜沧-耿马断裂等; 北东向弧形断裂系包括大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂、畹町断裂、南汀河断裂、孟连断裂、景洪断裂、Wan Ha断裂、Nam Ma断裂、Mae Chan断裂等(图1b). 北东向断裂体系往往经历了早期右旋剪切到后期左旋走滑的转变; 相反北西/北北西向断裂则由左旋转变为右旋走滑. 这些区域性走滑断裂体系运动学性质转变的原因以及时间一直存在争议. 例如, Tapponnier等(1990)通过印支地块与华南地块的两期挤出来解释哀牢山-红河剪切带的运动学反转; Schoenbohm等(2006b)提出中-下地壳流在青藏高原东南缘的扩展可能导致红河断裂的右旋走滑的启动; 而北东向断裂系左旋走滑可能与加持在实皆断裂和红河断裂之间上地壳块体顺时针转动有关(Wang和Burchfiel, 1997). Shi等(2018a)认为印度板片的后撤和软流圈物质的对流可能对该区断裂活动产生影响.

上述断裂体系发生构造反转的时空变化规律对于

探讨其动力驱动机制具有重要的意义. Wang等(2020)通过研究雪山山剪切带晚新生代剥露历史, 认为维西-乔后断裂的右旋走滑兼正断启动时间为~5Ma, 形成维西半地堑式盆地. Leloup等(1993)根据点苍山具有右旋变形组构的糜棱岩钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 冷却年龄, 认为点苍山山前断裂及红河断裂右旋走滑始于~5Ma. 但是, 但是该年龄可能代表了剪切带岩石持续冷却的时代, 而非起始时间. Li等(2013)利用磁性地层学方法确定了点苍山东侧大理盆地最老的沉积物为~7.6Ma. Wang等(2020)总结了点苍山东缘的热年学数据, 认为山前断裂正断发生的时间为~8Ma. 而南部哀牢山剪切带在14~10Ma剥蚀速率加速, 可能指示红河断裂右旋走滑的启动(Wang等, 2020). 位于红河断裂南端的中国南海地区由走滑伸展转换为走滑挤压的时间约为16~5.5Ma(例如, Rangin等, 1995, Zhu等, 2009). 而腾冲地体内的北东向大盈江断裂与龙陵-瑞丽断裂在~11Ma发生构造反转, 表现为左旋走滑兼正断, 在该区形成山脉和断陷盆地相伴分布的构造地貌格局(Wang等, 2019). 位于其西南侧的南汀河断裂左旋走滑始于20Ma, 导致其北东尾端临沧花岗岩体发生同期快速剥蚀和澜沧江干流的拐折(Wang等, 2019). 在中南半岛西南部, 与红河断裂平行展布的王朝断裂在23~18Ma由早期左旋剪切转化为右旋走滑(Lacassin等, 1997; Morley等, 2007). 因此, 青藏高原东南缘和中南半岛断裂构造反转的起始时间可能始于~20Ma, 集中在中-晚中新世, 并一直持续至上新世, 且整体呈现由南向北扩展的趋势(Wang等, 2019).

在印度板块持续向北楔入的过程中, 青藏高原东南缘新生代发生了大规模顺时针旋转(例如, Tong等, 2016; Li等, 2017), 区域应力场也发生显著改变. 剪切带内部发育的不同尺度的面理褶皱构造、思茅-印支地体和川滇地体内褶皱带轴面走向和逆冲断裂体系展布特征, 指示了近东西向或北东向的地壳缩短, 考虑到地体的顺时针旋转变量, 早先的区域应力场方向应为近北东-北北东向挤压(图10a). 而现今GPS观测得到的区域应变场显示该区地壳变形以东西向伸展为主(图8b; Li等, 2020a). 这种区域应力场的转变, 利于现今北西向断裂发生右旋走滑, 而北东向断裂发生左旋走滑(图10c). 此外, 该区构造变形样式也经历了显著改变. 构造解析、岩相学观测以及年代学数据都指示三个主要构造边界构成了三江地区和中南半岛一级构造格架,

在渐新世-早中新世控制着块体的挤出和旋转, 吸收了主要的地壳变形. 而GPS观测结果指示现今该区地壳变形表现为围绕喜马拉雅构造结做顺时针旋转(Zhang等, 2004; Shen等, 2005; Wang和Shen, 2020). 除实皆断裂和鲜水河-小江断裂以外, 边界断层例如红河断裂及澜沧江断裂滑动速率为 $1\sim 4\text{mm a}^{-1}$, 而其他规模较小但地震活动强烈的断裂具有相似的走滑速率, 例如北西/北北西向曲江断裂、建水断裂、澜沧-耿马断裂以及北东向的大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂和南汀河断裂等, 表明它们在调节区域应变方面可能具有同样重要的作用. 因此青藏高原东南缘在高原扩展过程中可能经历了从应变集中到弥散变形的转变.

5.2 深部动力学过程及浅表响应

5.2.1 地球物理观测结果

近年来, 随着对地观测技术(GPS)和深部成像技术(地震成像、电磁测深、深反射剖面等)的发展, 为揭示青藏高原东南缘及邻区现今地壳形变特征和岩石圈深部结构提供了大量基础观测资料, 对于认识高原扩展和深部动力学过程具有重要意义. 该区上地壳物质主要表现为沿着鲜水河-小江断裂带围绕东喜马拉雅构造结做顺时针旋转(例如, Zhang等, 2004; Wang和Shen, 2020). 从区域主应变率的分布来看, 上地壳变形主要呈现张扭特征, 除了靠近实皆断裂和鲜水河-小江断裂的区域, 整个地区基本上以近E-W向的拉张和近N-S向的挤压为主, 且拉张应变率略大于挤压应变率(Wang和Shen, 2020; Li等, 2020a). 青藏高原东南缘中-下地壳深度处广泛发育低阻高导层, 具有高热流, 高 V_p/V_s 速度比的特征(例如, Hu等, 2000; Bai等, 2010; Sun等, 2014). P波、S波速结构指示该区中-下地壳的低速层呈现为两个围绕东喜马拉雅构造结的弧形通道(Wang等, 2007; Yao等, 2010; Sun等, 2014; Bao等, 2015). Bai等(2010)根据青藏高原东部大地电磁资料, 提出川滇地体在 $15\sim 50\text{km}$ 深度处存在低阻层, 并解释该低阻层代表了中-下地壳部分熔融. 剪切波快播分裂方向(SKS)一般认为平行于地幔流动方向, 垂直于岩石圈缩短方向. 该区上地幔SKS在 26°N 以南的区域主要以东西方向为主, 且这一特征在断裂两侧没有显著变化, 指示其不受控于断裂的影响(常利军等, 2015). 地震波各向异性指示该区地壳与岩石圈地幔变形可能存在解耦(常利军等, 2015; Huang等, 2018). 在中南半岛

西侧俯冲边界处, 层析成像研究指示印度板片向东呈高角度(60° 或 $>60^\circ$)俯冲于缅甸弧之下, 俯冲深度达上地幔或者更深(Li等, 2008; Lei等, 2019). 然而在 22°N 横跨缅甸弧、中央盆地和掸邦高原的接收函数分析指示印度板片以 $\sim 19^\circ$ 俯冲至 100km 的深度(Zheng等, 2020). 俯冲板片沿走向俯冲角度的变化指示其可能存在撕裂的过程.

5.2.2 构造动力学模型

除上文所述的刚性块体侧向挤出模式外(Tapponnier等, 1982, 1990), 中-下地壳流和岩石圈底部拆沉等模型的提出为解释该区新生代构造及地貌演化带来了深远的影响. 随着印度-欧亚板块的汇聚, 中-下地壳高温、富含流体的物质在高原中部积累, 并在重力作用的驱动下向周缘扩展, 使得青藏高原东南缘发生地壳增厚, 地表经历长波形抬升, 并导致金沙江、澜沧江、怒江、红河等水系的快速下切(例如, Royden等, 1997, 2008; Clark等, 2005; Schoenbohm等, 2006b; Wang等, 2017). 虽然现今的地球物理观测佐证了该区这些软弱的中-下地壳物质的存在, 但是其源于高原内部还是原地生成尚存在争议. 该模型中预测的地表抬升和河流下切的时空变化规律受到河流溯源侵蚀、水系重组、局部断裂活动、冰川作用或气候变化等因素的影响, 所以该区近年来报道的大量热年代学数据及其所代表的冷却事件并未呈现明显的空间变化趋势, 无法对中-下地壳流动和地表抬升的过程提供有效约束. 中-下地壳物质的流动可以为上地壳变形提供拖拽力, 导致鲜水河-小江断裂左旋走滑及红河断裂右旋走滑的启动, 该区现今地壳形变特征也符合模型的预测(Schoenbohm等, 2006b; Zhang, 2013). 但是如果中-下地壳流是滇西地区和中南半岛北东向断裂和北西向断裂发生构造反转的主要驱动力的话, 南汀河断裂运动学性质发生转变的时间一定晚于位于其北部的大盈江断裂、大理山前断裂和维西-乔后断裂, 这与我们的观测结果相反(Wang等, 2019, 2020). 此外, 哀牢山-红河剪切带南段大象山剪切带和Fansipan杂岩新生代剥蚀历史和北部哀牢山剪切带存在明显差异(图2c), 低温热年代学数据指示其在 $\sim 20\text{Ma}$ 之后没有发生快速剥蚀(任龙龙等, 2020). 上述观测表明中-下地壳物质流动影响的范围可能远小于前期的假设.

青藏高原及其周缘中-晚中新世的地表抬升和构

造变形也可能是由于岩石圈底部拆沉及地幔物质上涌导致(Molnar等, 1993). 地震层析成像技术揭示了在高原底部和东南缘地幔中存在T型的S波高速结构, 可能代表被拆沉的岩石圈底部(Chen等, 2017). 有研究认为, 高原岩石圈底部发生拆沉后可能会引起高原内部和周缘发生准同时性变形, 例如, (1) 青藏高原内部南北向裂谷在~13Ma开始形成(例如, Blisniuk等, 2001; Zhang J等, 2012); (2) 青藏高原东南缘在13~10Ma发生河流快速下切(例如, Clark等, 2005; Ouimet等, 2010); (3) 青藏高原东北缘在15~10Ma发生快速抬升并向北扩展(例如, Zheng等, 2010; Yuan等, 2011); (4) 青藏高原东缘龙门山在15~10Ma发生快速隆升剥蚀(例如, Kirby等, 2002; Wang E等, 2012); (5) 高原内部及周缘大型走滑断裂如鲜水河断裂、甘孜断裂、海原断裂等在中-晚中新世启动(例如, Roger等, 1995; Lee等, 2003). 但是青藏高原东南缘金沙江缝合带沿线出露高钾花岗岩, 它们通常被解释为拆沉作用导致富集岩石圈地幔部分熔融所致, 其就位年龄集中在37~32Ma(Lu等, 2015; Liu等, 2020), 远早于上述高原主体发生拆沉的

间接证据所对应时限(Molnar等, 1993). 此外, 单一拆沉的深部动力学过程难以解释现今青藏高原东南缘地壳变形特征和断裂体系普遍的构造反转.

前文中所总结的地质与地球物理观测指示了青藏高原东南缘及邻区岩石圈流变学结构不均一旦不同构造层次可能受控于不同的动力学过程(图11). 虽然印度板块的向东俯冲可能已经停止, 但是已经发生俯冲的板片由于榴辉岩化, 在重力的作用下就会发生后撤, 从而与南部板片发生撕裂, 并导致俯冲板片上方软流圈产生向西的回旋流, 引起岩石圈地幔SKS波以东西向为主(图11; 常利军等, 2015). 青藏高原东南缘及邻区富含流体、低黏度的部分熔融中-下地壳物质在重力的作用下可能在地质年代尺度上发生流动, 从而驱动上地壳变形和断裂的活动(Zhang, 2013; Huang等, 2018). 但是, 这些软弱的中-下地壳也可能如同滑脱层一样, 在上地壳块体旋转滑动过程中发生被动的水平剪切(图11). 这两个看似端元的过程从流变学的角度可以得到统一: 在变形速率大的时候(即地体快速挤出的过程中), 软弱的中-下地壳可能作为拆离层或滑脱

图 11 青藏高原东南缘及邻区动力学模型

青藏高原东南缘及邻区岩石圈流变学结构不均一旦不同构造层次可能受控于不同的动力学过程: 浅部不同块体间的相互作用, 影响上地壳变形; 富含流体、低黏度的中-下地壳物质在地体快速挤出过程中可作为拆离层或滑脱层调节块体的变形; 而在变形速率变小时, 在重力的作用下可在地质年代尺度上发生主动流动, 驱动上地壳变形和断裂的活动; 中南半岛西侧俯冲的印度板块在重力的作用下发生后撤, 从而导致深部软流圈产生对流作用

层调节块体的变形;而在变形速率小的时候,软弱的中-下地壳物质就可能发生主动流动。目前的观测也支持这种假设,例如在20~10Ma期间,印度板块相对欧亚板块的汇聚速率下降了40%(Molnar和Stock, 2009)。最新的古地磁观测显示中-晚中新世以后,青藏高原东南缘不发生明显的块体旋转(Li等, 2017)。该区地壳变形样式也在中-晚中新世经历了由早先的应变集中到弥散变形的转变。

在上地壳层次,实皆断裂的右旋走滑和鲜水河-小江断裂的左旋走滑在该区最为显著。实皆断裂带的活动体现了东喜马拉雅构造结持续向北楔入,从而对其东侧斜向汇聚区施加明显的牵引力。而鲜水河-小江断裂的活动体现了高原物质绕构造结的旋转挤出,从而使得青藏高原东南缘和中南半岛整体处于右旋剪切的构造背景(England和Molnar, 1990; Wang等, 2019)。受此影响,红河断裂以及邻区近平行的北西/北北西向断裂体系可能在14~10Ma开始右旋走滑。北东向断裂多沿先存构造展布,在西侧拖拽力的影响下,上地壳的次级块体可能发生顺时针旋转,导致左旋走滑的启动,并形成弧形的断裂展布(图10)。此外,该区应力场以东向西向伸展为主,利于区域断裂体系发生构造反转。综上所述,深部软流圈所产生的回旋流作用、中-下地壳主动或被动剪切、浅部不同块体间的相互作用共同控制着青藏高原东南缘及邻区新生代构造变形与地貌演化(图11)。但从更大范围来看,青藏高原及周缘的演化发生在印澳板块向北俯冲碰撞的构造背景之下。青藏高原及周缘新生代脉冲式构造变形与印度板块汇聚速率存在耦合关联(Li等, 2020c)。无论是青藏高原东南缘新生代早期缩短增厚、渐新世-早中新世块体旋转挤出,还是中-晚中新世区域构造反转,可能都受到印澳板块俯冲过程、俯冲角度及速率变化的影响,从而使整个俯冲-碰撞带的构造体制发生巨大变革。

6 结论

(1) 青藏高原东南缘新生代以来经历了三期主要区域性构造变形:①受到印度-欧亚大陆碰撞的影响,该区在始新世-早渐新世发生显著地壳缩短与增厚,导致区域性变质和深熔作用;②在早渐新世发生块体大规模侧向挤出,主要边界构造准同时性启动走滑剪切,部分熔融的低黏度中-下地壳物质沿剪切带快速剥露

至近地表;③中-晚中新世之后构造格局发生转变,断裂运动学性质及区域变形样式发生改变。

(2) 该区主要发育两组呈共轭关系的断裂体系,近平行展布的北西/北北西向断裂如维西-乔后断裂、红河断裂、澜沧-耿马断裂等均以右旋走滑为主;北东向弧形断裂体系如大盈江断裂、龙陵-瑞丽断裂、南汀河断裂等均以左旋走滑为主。此外,该区断裂体系滑动速率为 $1\sim 4\text{mm a}^{-1}$,且边界断层与其他规模较小但地震活动强烈的断层具有相似的走滑速率(实皆断裂与鲜水河-小江断裂例外),指示它们对于调节区域应变可能具有同样重要的作用。因此该区在青藏高原扩展过程中经历了从应变集中到弥散变形的转变。

(3) 该区断裂发育具有明显的继承性,往往沿剪切带或变质-变形带展布。北东向断裂往往经历右旋到左旋走滑的转变,而北西/北北西向断裂则发生左旋到右旋的构造反转。该区主要断裂的构造反转具有穿时性和由南向北扩展的趋势:始于~20Ma,主体发生在中-晚中新世(14~10Ma),持续至早上新世。这可能与东喜马拉雅构造结向北楔入过程相关联,使得该区应力场由早期近北东-南西向挤压变为近东西向伸展。深部软流圈所产生的回旋流作用、中-下地壳主动或被动剪切、浅部不同块体间的相互作用共同控制着现今印度-欧亚大陆东侧斜向汇聚区的构造变形与地貌演化。

致谢 感谢主编及审稿人对本文提出的宝贵意见。感谢Lindsay Schoenbohm教授和朱良玉博士的讨论,以及林浩、崔亚、汪意对野外工作及数据分析的协助。

参考文献

- 安芷生, 张培震, 王二七, 王苏民, 强小科, 李力, 宋友桂, 常宏, 刘晓东, 周卫健, 刘卫国, 曹军骥, 李小强, 沈吉, 刘禹, 艾莉. 2006. 中新世以来我国季风-干旱环境演化与青藏高原的生长. 第四纪研究, 26: 1-16
- 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, 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, 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
- 陈新跃, 王岳军, 范蔚茗, 彭头平. 2006. 云南崇山剪切断裂系显微构造特征及其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学约束. 大地构造与成矿学, 30: 41-51

- 魏顺民, 向宏发, 徐锡伟, 张晚霞, 周瑞琦, 董兴权. 2000. 滇西南龙陵-澜沧第四纪新生断裂带特征和形成机制研究. 地震地质, 22: 277-284
- 魏顺民. 2001. 红河活动断裂带. 北京: 海洋出版社
- 韩新民, 柴天俊, 肖九安, 李盛德. 1982. 石屏-建水断裂中段的新活动与地震. 地震研究, 5: 220-225
- 贺根文, 付碧宏, 刘鸣, 杨顺虎, 时丕龙, 刘锋. 2014. 龙陵-瑞丽断裂带附近的构造地貌与断裂活动性. 地震地质, 36: 434-448
- 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
- 季建清, 钟大赉, 张连生. 2000. 滇西南新生代走滑断裂运动、年代学、及对青藏高原东南部块体运动的意义. 地质科学, 35: 336-349
- 刘方斌, 聂军胜, 郑德文, 庞建章. 2021. 青藏高原东南缘新生代剥露历史及驱动机制探讨: 以临沧花岗岩地区为例. 地球科学进展, 36: 421-441
- 刘兴旺, 袁道阳, 张波, 方良好, 邵延秀. 2013. 滇西南地区汉母坝-澜沧断裂晚第四纪构造活动的地质地貌证据. 西北地震学报, 35: 108-115
- 刘祖荫, 皇甫岗, 金志林. 1999. 一九七〇年通海地震. 北京: 地震出版社
- 莫宣学. 1998. 三江中段火山岩-蛇绿岩与成矿. 北京: 地质出版社
- 任龙龙, 张波, 郑德文, 王洋, 张进江, 李晓蓉, 陈思雨, 张磊. 2020. 哀牢山-红河剪切带渐新世的构造体制转换与剥露历史: 来自哀牢山南段磷灰石裂变径迹的证据. 岩石学报, 36: 1787-1802
- 石峰. 2015. 南汀河断裂带构造地貌研究. 国际地震动态, (7): 46-48
- 史鹏亮. 2015. 三江构造带新生代变形构造的时空变化. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 唐渊, 尹福光, 王立全, 王冬兵, 廖世勇, 孙志明, 孙洁. 2013. 滇西崇山剪切带南段左行走滑作用的构造特征及时代约束. 岩石学报, 29: 215-228
- 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
- 王怡然, 李有利, 司苏沛. 2015. 石屏-建水断裂水平错断河流的几何特征与断层活动性研究. 第四纪研究, 35: 100-108
- 闻学泽, 杜方, 龙锋, 范军山, 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: 地球科学, 41: 713-724
- 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 威学祥, 李化启, 蔡志慧. 2011. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造. 岩石学报, 27: 3157-3170
- 许志琴, 王勤, 李忠海, 李化启, 蔡志慧, 梁风华, 董汉文, 曹汇, 陈希节. 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
- 云南省地质矿产局, 云南省区域地质志. 1990. 北京: 地质出版社
- 张进江, 钟大赉, 桑海清等. 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
- 钟大赉, 丁林. 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨, 中国科学D辑, 26: 289-295
- 钟大赉. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社
- 朱成男. 1984. 曲江断裂几何及其与地震活动的关系. 地震研究, (5): 525-532
- 朱成男. 1985. 曲江断裂的第四纪活动. 云南地质, (2): 178-187
- Akciz O S. 2004. Structure and geochronological constraints on the ductile deformation observed along the Gaoligong Shan and Chong Shan Shear Zones, Yunnan (China). Dissertation for Doctoral Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology
- Akciz S, Burchfiel B C, Crowley J L, Yin J Y, Chen L Z. 2008. Geometry, kinematics, and regional significance of the Chong Shan shear zone, Eastern Himalayan Syntaxis, Yunnan, China. *Geosphere*, 4: 292-314
- Allen C R, Gillespie A R, Yuan H, Sieh K E, Buchan Z, Chengnan Z. 1984. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard. *GSA Bull.*, 95: 686-700
- 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
- Barr S M, Macdonald A S, Miller B V, Reynolds P H, Rhodes B P, Yokart B. 2002. New U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the Doi Inthanon and Doi Suthep metamorphic core complexes, north-western Thailand. In: Proceedings of the Symposium on Geology of Thailand. Bangkok: Department of Mineral Resources. 284-294
- Bergman S C, Leloup P H, Tapponnier P. 1997. Apatite fission track thermal history of the Ailao Shan-Red River shear zone. China paper presented at meeting, Eur Union of Geosci, Strasbourg France, 23-27
- Bertrand G, Rangin C, Maluski H, Bellon H. 2001. Diachronous cooling along the Mogoke metamorphic belt (Shan scarp, Myanmar): The trace of the northward migration of the Indian syntaxis. *J Asian Earth Sci*, 19: 649-659
- Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, Ratschbacher L, Bi S, Wu Z, McWilliams M O, Calvert A. 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago. *Nature*, 412: 628-632
- Briaes A, Patriat P, Tapponnier P. 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia.

- J Geophys Res*, 98: 6299–6328
- Burchfiel B C, Chen Z. 2012. Tectonics of the southeastern Tibetan Plateau and its adjacent foreland. Boulder, CO: Geological Society of America Publications. 210: 1–231
- Cao K, Leloup P H, Wang G, Liu W, Mahéo G, Shen T, Xu Y, Sorrel P, Zhang K. 2021. Thrusting, exhumation, and basin fill on the western margin of the South China block during the India-Asia collision. *GSA Bull*, 133: 74–90
- Cao S Y, Liu J L, Leiss B, Neubauer F, Genser J, Zhao C Q. 2011a. Oligo-Miocene shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Constraints from structural analysis and zircon U/Pb geochronology of magmatic rocks in the Diancang Shan massif, SE Tibet, China. *Gondwana Res*, 19: 975–993
- Cao S Y, Neubauer F, Liu J L, Genser J, Leiss B. 2011b. Exhumation of the Diancang Shan metamorphic complex along the Ailao Shan-Red River belt, southwestern Yunnan, China: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology. *J Asian Earth Sci*, 42: 525–550
- Chen M, Niu F, Tromp J, Lenardic A, Lee C T A, Cao W, Ribeiro J. 2017. Lithospheric foundering and underthrusting imaged beneath Tibet. *Nat Commun*, 8: 15659
- Chung S L, Lee T Y, Lo C H, Wang P L, Chen C Y, Yem N T, Hoa T T, Genyao W. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan-Red River shear zone. *Geology*, 25: 311–314
- Clark M K, House M A, Royden L H, Whipple K X, Burchfiel B C, Zhang X, Tang W. 2005. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet. *Geology*, 33: 525–528
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28: 703–706
- 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
- Dunning G R, Macdonald A S, Barr S M. 1995. Zircon and monazite U-Pb dating of the Doi Inthanon core complex, northern Thailand: Implications for extension within the Indosinian Orogen. *Tectonophysics*, 251: 197–213
- England P, Molnar P. 1990. Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks. *Geology*, 18: 1173–1177
- 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*, 10.1130/B36069.1
- Ge Y, Liu-Zeng J, Zhang J, Wang W, Tian Y, Fox M, Zeng L, Shen X, Wang H, Su Z, Xie K. 2020. Spatio-temporal variation in rock exhumation linked to large-scale shear zones in the southeastern Tibetan plateau. *Sci China Earth Sci*, 63: 512–532
- Harrison T M, Chen W J, Leloup P H, Ryerson F J, Tapponnier P. 1992. An Early Miocene transition in deformation regime within the Red River Fault Zone, Yunnan, and its significance for Indo-Asian tectonics. *J Geophys Res*, 97: 7159–7182
- Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, Tapponnier P, Lacassin R, Chen W J. 1996. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River shear zone, Yunnan and Vietnam. In: Yin A, Harrison T M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. New York: Cambridge University Press. 208–226
- Hoke G D, Liu-Zeng J, Hren M T, Wissink G K, Garzione C N. 2014. Stable isotopes reveal high southeast Tibetan Plateau margin since the Paleogene. *Earth Planet Sci Lett*, 394: 270–278
- Hu S B, He L J, Wang J Y. 2000. Heat flow in the continental area of China: A new data set. *Earth Planet Sci Lett*, 179: 407–419
- Huang Z C, Wang L S, Xu M J, Zhao D P. 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
- Jolivet L, Beyssac O, Goffé B, Avigad D, Lepvrier C, Maluski H, Thang T T. 2001. Oligo-Miocene midcrustal subhorizontal shear zone in Indochina. *Tectonics*, 20: 46–57
- Kirby E, Reiners P W, Krol M A, Whipple K X, Hodges K V, Farley K A, Tang W, Chen Z. 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology. *Tectonics*, 21: 1001
- Lacassin R, Maluski H, Leloup P H, Tapponnier P, Hinthong C, Siribhakdi K, Chuaviroj S, Charoenravat A. 1997. Tertiary diachronic extrusion and deformation of western Indochina: Structural and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence from NW Thailand. *J Geophys Res*, 102: 10013–10037
- Lacassin R, Replumaz A, Hervé Leloup P. 1998. Hairpin river loops and slip-sense inversion on Southeast Asian strike-slip faults. *Geology*, 26: 703–706
- Lee H Y, Chung S L, Wang J R, Wen D J, Lo C H, Yang T F, Zhang Y Q, Xie Y W, Lee T Y, Wu G Y, Ji J Q. 2003. Miocene Jiali faulting and its implications for Tibetan tectonic evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 205: 185–194
- Lei J S, Zhao D P, Xu X W, Xu Y G, Du M F. 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, Harrison T M, Ryerson F J, Chen W J, Qi L, Tapponnier P, Lacassin R. 1993. Structural, petrological and thermal evolution of a Tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan. *J*

- Geophys Res*, 98: 6715–6743
- 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
- Li B L, Ji J Q, Fu X Y, Gong J F, Song B, Qing J C, Zhang C, Ma Z J. 2009. Metamorphic time limits study on the metamorphic rocks series of Ailao Shan-Diancang Mountain Ranges, west Yunnan. *Acta Petrol Sin*, 25: 595–608
- Li B L, Ji J Q, Lo C H, Gong J F, Qing J C. 2012. The structural style and timing of uplift of the Ailaoshan-Diancang range, West Yunnan, China. *Seismol Geol*, 34: 696–712
- 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 S H, Advokaat E L, van Hinsbergen D J J, Koymans M, Deng C, Zhu R. 2017. Paleomagnetic constraints on the Mesozoic-Cenozoic paleolatitudinal and rotational history of Indochina and South China: Review and updated kinematic reconstruction. *Earth-Sci Rev*, 171: 58–77
- Li S H, Deng C L, Yao H T, Huang S, Liu C Y, He H Y, Pan Y X, Zhu R X. 2013. Magnetostratigraphy of the Dali Basin in Yunnan and implications for late Neogene rotation of the southeast margin of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 791–807
- Li S H, Su T, Spicer R A, Xu C L, Sherlock S, Halton A, Gregory H, Tian Y M, Zhang S T, Zhou Z K, Deng C L, Zhu R X. 2020b. Oligocene deformation of the Chuandian terrane in the SE margin of the Tibetan Plateau related to the extrusion of Indochina. *Tectonics*, 39: e05974
- Li S H, van Hinsbergen D J J, Najman Y, Liu-Zeng J, Deng C, Zhu R. 2020c. Does pulsed Tibetan deformation correlate with Indian plate motion changes? *Earth Planet Sci Lett*, 536: 116144
- Li Z J, Wang Y, Gan W J, Fang L H, Zhou R J, Seagren E G, Zhang H P, Liang S M, Zhuang W Q, Yang F. 2020a. Diffuse deformation in the SE Tibetan Plateau: New insights from geodetic observations. *J Geophys Res-Solid Earth*, 125: e19383
- Lin T H, Lo C H, Chung S L, Hsu F J, Yeh M W, Lee T Y, Ji J Q, Wang Y Z, Liu D. 2009. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Jiali and Gaoligong shear zones: Implications for crustal deformation around the Eastern Himalayan Syntaxis. *J Asian Earth Sci*, 34: 674–685
- Liu F L, Wang F, Liu P H, Liu C H. 2013. Multiple metamorphic events revealed by zircons from the Diancang Shan-Ailao Shan metamorphic complex, southeastern Tibetan Plateau. *Gondwana Res*, 24: 429–450
- Liu J L, Chen X Y, Tang Y, Song Z J, Wang W. 2020. The Ailao Shan-Red River shear zone revisited: Timing and tectonic implications. *GSA Bull*, 132: 1165–1182
- Liu J L, Tang Y, Tran M D, Cao S, Zhao L, Zhang Z C, Zhao Z D, 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 S. 1998. The coupling mechanism of basin and orogen in the western Ordos basin and adjacent regions of China. *J Asian Earth Sci*, 16: 369–383
- 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
- Liu-Zeng J, Zhang J, McPhillips D, Reiners P, Wang W, Pik R, Zeng L, Hoke G, Xie K, Xiao P, Zheng D, Ge Y. 2018. Multiple episodes of fast exhumation since Cretaceous in southeast Tibet, revealed by low-temperature thermochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 490: 62–76
- Lu Y J, Campbell McCuaig T, Li Z X, Jourdan F, Hart C J R, Hou Z Q, Tang S H. 2015. Paleogene post-collisional lamprophyres in western Yunnan, western Yangtze Craton: Mantle source and tectonic implications. *Lithos*, 233: 139–161
- Macdonald A S, Barr S M, Miller B V, Reynolds P H, Rhodes B P, Yokart B. 2010. P-T-t constraints on the development of the Doi Inthanon metamorphic core complex domain and implications for the evolution of the western gneiss belt, northern Thailand. *J Asian Earth Sci*, 37: 82–104
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Rev Geophys*, 31: 357–396
- Molnar P, Stock J M. 2009. Slowing of India's convergence with Eurasia since 20 Ma and its implications for Tibetan mantle dynamics. *Tectonics*, 28: TC3001
- Morley C K, Smith M, Carter A, Charusiri P, Chantraprasert S. 2007. Evolution of deformation styles at a major restraining bend, constraints from cooling histories, Mae Ping fault zone, western Thailand. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 290: 325–349
- 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. 2001. Combined escape tectonics and subduction rollback arc extension: A model for the evolution of Tertiary rift basins in Thailand, Malaysia and Laos. *J Geol Soc*, 158: 461–474
- Morley C K. 2007. Variations in Late Cenozoic-Recent strike-slip and oblique-extensional geometries, within Indochina: The influence of pre-existing fabrics. *J Struct Geol*, 29: 36–58
- Morley C K. 2012. Late Cretaceous-Early Palaeogene tectonic

- development of SE Asia. *Earth-Sci Rev*, 115: 37–75
- Müller R D, Zahirovic S, Williams S E, Cannon J, Seton M, Bower D J, Tetley M G, Heine C, Le Breton E, Liu S, Russell S H J, Yang T, Leonard J, Gurnis M. 2019. A global plate model including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the Triassic. *Tectonics*, 38: 1884–1907
- Nelson K D, Zhao W, Brown L D, Kuo J, Che J, Liu X, Klemperer S L, Makovsky Y, Meissner R, Mechie J, Kind R, Wenzel F, Ni J, Nabelek J, Leshou C, Tan H, Wei W, Jones A G, Booker J, Unsworth M, Kidd W S F, Hauck M, Alsdorf D, Ross A, Cogan M, Wu C, Sandvol E, Edwards M. 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of project indepth results. *Science*, 274: 1684–1688
- Ouimet W, Whipple K, Royden L, Reiners P, Hodges K, Pringle M. 2010. Regional incision of the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Lithosphere*, 2: 50–63
- Peng T P, Wilde S A, Wang Y J, Fan W M, Peng B X. 2013. Mid-Triassic felsic igneous rocks from the southern Lancangjiang Zone, SW China: Petrogenesis and implications for the evolution of Paleotethys. *Lithos*, 168–169: 15–32
- Rangin C, Klein M, Roques D, Le Pichon X, Le Van Trong X. 1995. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam. *Tectonophysics*, 243: 209–222
- Ratschbacher L, Frisch W, Linzer H G, Merle O. 1991. Lateral extrusion in the eastern alps, part 2: Structural analysis. *Tectonics*, 10: 257–271
- Replumaz A, Lacassin R, Tapponnier P, Leloup P H. 2001. Large river offsets and Plio-Quaternary dextral slip rate on the Red River fault (Yunnan, China). *J Geophys Res*, 106: 819–836
- Roger F, Calassou S, Lancelot J, Malavieille J, Mattauer M, Xu Z Q, Hao Z W, Hou L W. 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
- 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
- Schoenbohm L, Burchfiel B C, Chen L Z Y J Y. 2006a. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation, and lower-crustal flow. *GSA Bull*, 118: 672–688
- Schoenbohm L, Burchfiel B C, Chen L Z. 2006b. Propagation of surface uplift, lower crustal flow, and Cenozoic tectonics of the southeast margin of the Tibetan Plateau. *Geology*, 34: 813–816
- Searle M P, Morley C K, Waters D J, Gardiner N J, Htun U K, Nu T T, Robb L J. 2017. Tectonic and metamorphic evolution of the Mogok Metamorphic and Jade Mines belts and ophiolitic terranes of Burma (Myanmar). *Geol Soc London Memoirs*, 48: 261–293
- Searle M P, Noble S R, Cottle J M, Waters D J, Mitchell A H G, Hlaing T, Horstwood M S A. 2007. Tectonic evolution of the mogok metamorphic belt, Burma (Myanmar) constrained by U-Th-Pb dating of metamorphic and magmatic rocks. *Tectonics*, 26: TC3014
- Searle M P, Yeh M W, Lin T H, Chung S L. 2010. Structural constraints on the timing of left-lateral shear along the Red River shear zone in the Ailao Shan and Diancang Shan Ranges, Yunnan, SW China. *Geosphere*, 6: 316–338
- Shen Z K, Lü J, Wang M, Bürgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 110: B11409
- Shi X, Sieh K, Weldon R, Zhu C, Han Y, Yang J, Robinson S W. 2018b. 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. 2018a. 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
- 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: B06420
- Socquet A, Pubellier M. 2005. Cenozoic deformation in western Yunnan (China-Myanmar border). *J Asian Earth Sci*, 24: 495–515
- Song S G, Niu Y L, Wei C J, Ji J Q, Su L. 2010. Metamorphism, anatexis, zircon ages and tectonic evolution of the Gongshan block in the northern Indochina continent—An eastern extension of the Lhasa Block. *Lithos*, 120: 327–346
- Su T, Spicer R A, Li S H, Xu H, Huang J, Sherlock S, Huang Y J, Li S F, Wang L, Jia L B, Deng W Y D, Liu J, Deng C L, Zhang S T, Valdes P J, Zhou Z K. 2019. Uplift, climate and biotic changes at the Eocene-Oligocene transition in south-eastern Tibet. *Natl Sci Rev*, 6: 495–504
- Sun X X, Bao X W, Xu M J, Eaton D W, Song X D, Wang L S, Ding Z F, Mi N, Yu D Y, Li H. 2014. Crustal structure beneath SE Tibet from joint analysis of receiver functions and Rayleigh wave dispersion. *Geophys Res Lett*, 41: 1479–1484
- Tang M Y, Liu-Zeng J, Hoke G D, Xu Q, Wang W T, Li Z F, Zhang J Y, Wang W. 2017. Paleoelevation reconstruction of the Paleocene-Eocene Gonjo basin, SE-central Tibet. *Tectonophysics*, 712–713: 170–181

- Tang Y, Liu J L, Tran M D, Song Z J, Wu W B, Zhang Z C, Zhao Z D, Chen W. 2013. Timing of left-lateral shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Constraints from zircon U-Pb ages from granitic rocks in the shear zone along the Ailao Shan Range, Western Yunnan, China. *Int J Earth Sci-Geol Rund*, 102: 605–626
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schärer U, Zhong D L, Wu H W, Liu X H, Ji S C, Zhang L S, Zhong J Y. 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: 611–616
- Tingay M, Morley C, King R, Hillis R, Coblenz D, Hall R. 2010. Present-day stress field of Southeast Asia. *Tectonophysics*, 482: 92–104
- Tong Y B, Yang Z Y, Jing X Q, Zhao Y, Li C H, Huang D J, Zhang X D. 2016. New insights into the Cenozoic lateral extrusion of crustal blocks on the southeastern edge of Tibetan Plateau: Evidence from Paleomagnetic results from paleogene sedimentary strata of the Baoshan Terrane. *Tectonics*, 35: 2494–2514
- Upton D R. 1999. A regional fission track study of Thailand: Implications for thermal history and denudation. Dissertation for Doctoral Degree. London: University of London
- Vigny C, Simons W J F, Abu S, Bamphenyu R, Satirapod C, Choosakul N, Subarya C, Socquet A, Omar K, Abidin H Z, Ambrosius B A C. 2003. Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia. *Nature*, 436: 201–206
- Viola G, Anczkiewicz R. 2008. Exhumation history of the Red River shear zone in northern Vietnam: New insights from zircon and apatite fission-track analysis. *J Asian Earth Sci*, 33: 78–90
- Wang C Y, Han W B, Wu J P, Lou H, Chan W W. 2007. Crustal structure beneath the eastern margin of the Tibetan plateau and its tectonic implications. *J Geophys Res*, 112: B07307
- 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. Geological Society of America Special Paper, 327
- 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 E, Kirby E, Furlong K P, van Soest M, Xu G, Shi X, Kamp P J J, Hodges K V. 2012. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic. *Nat Geosci*, 5: 640–645
- Wang G, Wan J L, Wang E Q, Zheng D W, Li F. 2008. Late Cenozoic to recent transtensional deformation across the southern part of the Gaoligong shear zone between the Indian plate and SE margin of the Tibetan plateau and its tectonic origin. *Tectonophysics*, 460: 1–20
- 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: e18774
- 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. *Geology*, 26: 887–890
- Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, Peng T P, Chen X Y, Xu Y G. 2006. Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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, Schoenbohm L M, Zhang B, Granger D, Zhou R J, Zhang J J, Hou J J. 2017. Late Cenozoic landscape evolution along the Ailaoshan shear zone, SE Tibetan Plateau: Evidence from fluvial longitudinal profiles and cosmogenic erosion rates. *Earth Planet Sci Lett*, 472: 323–333
- Wang Y, Sieh K, Aung T, Min S, Khaing S N, Tun S T. 2011. Earthquakes and slip rate of the southern Sagaing fault: Insights from an offset ancient fort wall, lower Burma (Myanmar). *Geophys J Int*, 185: 49–64
- Wang Y, Sieh K, Tun S T, Lai K Y, Myint T. 2014a. Active tectonics and earthquake potential of the Myanmar region. *J Geophys Res-Solid Earth*, 119: 3767–3822
- Wang Y, Wang Y, Schoenbohm L M, Zhang P, Zhang B, Sobel E R, Zhou R, Shi X, Zhang J, Stockli D F, Guo X. 2020. Cenozoic exhumation of the Ailaoshan-Red River shear zone: New insights from low-temperature thermochronology. *Tectonics*, 39: e06151
- 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. 2019. Intracontinental deformation within the India-Eurasia oblique convergence zone: Case studies on the Nantinghe and Dayingjiang faults. *GSA Bull*, 132: 850–862
- Wang Y, Wang Y J, Zhang P Z, Zhang J J, Zhang B, Zhang Y Z, Zhou R J, Seagren E G, Qian X, Li Z J. 2021. Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Lincang-Inthanon tectonic belt: Implications for Cenozoic tectonic extrusion of SE Asia. *GSA Bull*, doi: 10.1130/B36187
- Wang Y, Zhang B, Hou J, Xu X. 2014b. Structure and tectonic geomorphology of the Qujiang fault at the intersection of the Ailao Shan-Red River fault and the Xianshuihe-Xiaojiang fault system, China. *Tectonophysics*, 634: 156–170
- 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 Z, Schoenbohm L M, Zheng W J, Zhang B, Zhang J J, Zheng D W, Zhou R J, Tian Y T. 2018. Two-phase exhumation along major shear zones in the SE Tibetan Plateau in the late Cenozoic. *Tectonics*, 37: 2675–2694
- Weldon R, Sieh K, Zhu C, Han Y, Yang J, Robinson S. 1994. Slip rate and recurrence interval of earthquake on the Hong He (Red River) fault, Yunnan, P.R.C. In: International Workshop on Seismotectonics and Seismic Hazard in SE Asia. 244–248
- Xu Z Q, Wang Q, Cai Z H, Dong H W, Li H Q, Chen X J, Duan X D, Cao H, Li J, Burg J P. 2015. Kinematics of the Tengchong terrane in SE Tibet from the late Eocene to early Miocene: Insights from coeval mid-crustal detachments and strike-slip shear zones. *Tectonophysics*, 665: 127–148
- 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
- Yao H J, 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: B12307
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 28: 211–280
- Yuan D Y, Champagnac J D, Ge W P, Molnar P, Zhang P Z, Zheng W J, Zhang H P, Liu X W. 2011. Late Quaternary right-lateral slip rates of faults adjacent to the lake Qinghai, northeastern margin of the Tibetan Plateau. *GSA Bull*, 123: 2016–2030
- Zhang B, Chai Z, Yin C Y, Huang W T, Wang Y, Zhang J J, Wang X X, Cao K. 2017. Intra-continental transpression and gneiss doming in an obliquely convergent regime in SE Asia. *J Struct Geol*, 97: 48–70
- Zhang B, Chen S Y, Wang Y, Reiners P W, Cai F L, Speranza F, Zhang J J, Zhong D L, Liu K. 2021. Crustal deformation and exhumation within the India-Eurasia oblique convergence zone: New insights from the Ailao Shan-Red River shear zone. *GSA Bull*, doi: 10.1130/B35975.1
- Zhang B, Zhang J J, Liu J, Wang Y, Yin C Y, Guo L, Zhong D L, Lai Q Z, Yue Y H. 2014. The Xuelongshan high strain zone: Cenozoic structural evolution and implications for fault linkages and deformation along the Ailao Shan-Red River shear zone. *J Struct Geol*, 69: 209–233
- 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 B, Zhang J, Zhong D. 2010. Structure, kinematics and ages of transpression during strain-partitioning in the Chongshan shear zone, western Yunnan, China. *J Struct Geol*, 32: 445–463
- Zhang J Y, Yang H L, Liu-Zeng J, Ge Y K, Wang W, Yao W Q, Xu S. 2021. Reconstructing the incision of the Lancang River (upper Mekong) in southeastern Tibet below its prominent knickzone using fluvial terraces and transient tributary profiles. *Geomorphology*, 376: 107551
- Zhang J, Santosh M, Wang X X, Guo L, Yang X Y, Zhang B. 2012. Tectonics of the northern Himalaya since the India-Asia collision. *Gondwana Res*, 21: 939–960
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, Gan W J, Bürgmann R, Molnar P, Wang Q, Niu Z J, Sun J Z, Wu J C, Sun H R, You X D. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32: 809–812
- 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
- Zheng D W, Clark M K, Zhang P Z, Zheng W J, Farley K A. 2010. Erosion, fault initiation and topographic growth of the North Qilian Shan (northern Tibetan Plateau). *Geosphere*, 6: 937–941
- 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 Y, He Y M, Ding L, Jiang M M, Ai Y S, Mon C T, Hou G B, Sein K, Thant M. 2020. Direct structural evidence of indian continental subduction beneath Myanmar. *Nat Commun*, 11: 1944
- Zhong D L, Ding L, Liu F T, Liu J H, Zhang J J, Ji J Q, Chen H. 2000. Multi-oriented and layered structures of lithosphere in orogenic belt and their effects on Cenozoic magmatism—A case study of western Yunnan and Sichuan, China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 43: 120–133
- Zhu M Z, Graham S, McHargue T. 2009. The Red River fault zone in the Yinggehai basin, South China Sea. *Tectonophysics*, 476: 397–417

(责任编辑: 刘少峰)