

奠边府断裂与南北地震带若干问题讨论*

张建国¹, 丁志峰²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 纵贯中国大陆的南北地震带以其巨大规模和频繁的大震活动而长期备受关注, 然而它延向何方? 终止于何处? 原因是什么? 这些问题关乎能否全面、完整地理解南北地震带大震活动的特征, 进而能否不断深化对南北地震带大震活动动力学过程与机理的认识。处于南北地震带南段的中国—东南亚毗邻区, 展布着一系列与大震活动相关的大型走滑断裂带, 跨越中国、越南、老挝和泰国国境的奠边府断裂就是其中之一。以往国内外对奠边府断裂的关注和研究相对较少, 但以鲜水河—小江—奠边府断裂为外边界, 围绕东喜马拉雅构造结存在大规模顺时针旋转运动的现象被揭示以来, 关于奠边府断裂的地位、作用及其与小江断裂、红河断裂的关系等问题吸引了越来越多的关注。从区域大地构造基本格局的形成与演化、晚新生代活动的运动学与动力学特征、浅表运动状态与深部介质性质等方面, 本文对与奠边府断裂相关的研究动态和进展进行了综述, 结合以往相关研究的积累, 认为奠边府断裂可能是南北地震带的南端边界。

关键词: 南北地震带; 奠边府断裂; 古陆核; 侧向挤出; 低速带

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)04-0527-10

0 引言

一般认为, 素以地震活动频繁、地震灾害严重著称的云南地区主体属于纵贯中国大陆的南北地震带南段。由此必然会引出一个问题, 即南北地震带南段终止于何处? 终止的条件是什么? 或者说是哪些因素对南北地震带南段的展布起控制作用? 这些问题既关乎能否全面、完整地理解南北地震带, 更对南北地震带大震活动时空特征及其动力学机制的把握与探索具有重要影响。

全球数字地震台网建设与国际交流共享机制的不断完善以及空间对地 GPS 观测技术的不断进步和应用所提供的广阔时空视野, 使得人们对上述问题的深入探究成为可能。与之相关的 2 个突出现象是:

(1) 在分别作为新生代早期青藏高原物质向东南逃逸通道东、西边界的红河/哀牢山断裂与实皆 (Sagaing) 断裂之间的三角形区域内, 发育着一系列大致相互平行呈梳齿状展布的 NE 向断裂系, 在约 700 km 的南北向跨度内, 基本可以确认的全新世活动断裂就有 11 条, 如大盈江断裂、龙

陵—瑞丽断裂、南汀河断裂、孟连断裂、南玛 (Nam Ma) 断裂、梅江 (Mae Chan) 断裂、奠边府 (Dien Bien Phu) 断裂等。这些断裂的平均间距仅为数十千米量级, 且其中多数都与历史记载的 10 余次 7 级地震相关, 在如此有限空间范围内的全新世活动断裂发育密度和强震活动频度之高均属罕见 (Wang *et al.*, 2013)。然而, 以其中最南端的奠边府断裂为界, 其南北两侧区域的地震活动和大地形变, 都存在着显著差异。即奠边府断裂及其以北地震活动频度高、强度大、地壳变形剧烈, 而奠边府断裂以南的印度支那半岛乃至整个巽他地块内部迄今没有 6 级及以上地震记载或记录, 小震活动也非常稀少, 同时地壳变形微弱 (Simons *et al.*, 2007; Iwakuni *et al.*, 2004)。

(2) 自 20 世纪末以来, 随着青藏高原及其边缘地区现今地壳运动 GPS 观测与研究成果的陆续发表 (Wang *et al.*, 2001; 张培震等, 2002), 越来越多的资料和成果表明: 大致以鲜水河断裂—小江断裂—奠边府断裂为外边界, 存在着一个围绕东喜马拉雅构造结, 半径约 500 km 的大规模顺时针旋转运动与相对强烈变形区域 (Shen *et al.*, 2005; Iwakuni *et al.*, 2004; Simons *et al.*, 2007)。

* 收稿日期: 2016-07-24.

基金项目: 国家国际科技合作专项项目“中国—东南亚毗邻区大震活动地球动力学研究”(2015DFA21260) 资助。

尤其引人注目的是,该运动与变形图像似乎并没有受到长期以来一直被视为青藏高原东南最重要大地构造单元与活动地块边界 NW 向红河/哀牢山断裂带的显著影响,由此引发了关于该区域红河/哀牢山、小江及奠边府 3 条大型走滑断裂之间相互关系的质疑,即小江断裂与奠边府断裂是否已经以某种方式相互连接或贯通了 (Lai *et al*, 2012; Zuchiewicz *et al*, 2004)?

上述现象都涉及到同一条断裂带,即穿越中国、越南、老挝和泰国的奠边府断裂。与本区域其它类似规模断裂带,如红河断裂、小江断裂等相比较,以往国内外对奠边府断裂的考察与研究要少得多。但近年来这一状况正在迅速发生改变,其中包含的重要科学意义和沿线各国预防和减轻地震灾害的迫切需求是主要原因。

基于近年来国内外相关调查、观测与研究进展的追踪和概括,结合笔者在本地区工作与认识的积累,本文试图从区域大地构造基本格架和相关断裂新生代活动的动力学特征等方面,就奠边府断裂在区域现今地壳运动与变形方面可能扮演的角色或发挥的作用等相关问题进行综述和讨论,以期推进对本区域大震时空演变及其动力学机制等重要科学问题的关注和探讨。

1 区域大地构造基本格局的形成

关于奠边府断裂所处的东南亚区域大地构造基本格局的形成与演化,国内外有许多学者进行过相关研究 (李春昱等, 1982; 丁国瑜等, 1991; 李方夏, 1995; 许志琴等, 2011), 由于该问题的复杂性, 尽管在部分大地构造单元的划分与归属、部分演化阶段的具体时间过程等方面存在着不同观点或看法, 但有 2 点是绝大多数研究者的基本共识: 一是其总体格架是以大小古陆块或古陆核的“拼贴”为特征; 二是其演化进程始终处于多期“特提斯”的影响和控制下。本文着重讨论的问题, 恰恰与这 2 点普遍共识密切相关。基于板块构造理论的基本原则, 同时借鉴传统大地构造学的观点和方法, 李方夏 (1995) 把东南亚区域大地构造基本格局的形成与演化分为 4 个阶段。

1.1 陆核形成阶段

东南亚原始陆核由早元古代抹谷群 (2 200Ma

±?)、昆嵩群 (2 300Ma) 及范士坂杂岩 (2 030 ~ 2 300 Ma) 组成, 大致对应云南三江地区的哀牢山群、瑶山群。依据古地磁、古生物群区系特征, 一般认为构成掸泰马克拉通, 又称 Sibumasu 古陆 (许志琴等, 2012) 的抹谷群属原始冈瓦纳古陆核, 而构成印支陆核的昆嵩群和范士坂杂岩则为原始劳亚古陆核的组成部分 (刘增黔, 1993)。前者沿实皆断裂以东的掸邦高原一带展布, 构成掸泰马地台的主体; 后者则分布于奠边府断裂以南的越南昆嵩至泰国呵叻一带, 构成呵叻—昆嵩地台, 许志琴等 (2011) 称之为印支克拉通的主体, 两者之间早期曾被原特提斯洋分隔。

1.2 板块活动阶段

早元古代原始刚性陆核形成后, 东南亚板块活动体制大致始于中元古代 (1 700 Ma) 后, 经 (晋宁) 加里东、海西、印支等旋回, 基本结束板块活动阶段并转入陆内汇聚阶段。

中元古代, 原特提斯洋壳分别向掸泰马抹谷古陆和印支昆嵩古陆俯冲, 沿澜沧江、黑水河—马江产生古沟、弧、盆系或古裂谷, 自西向东形成昌马支群、澜沧群、大勐龙群 (1 176 Ma) 及红河、春大、玉岭等杂岩带 (云南省地质矿产局, 1990), 越北马江裂谷有蛇绿岩整合于纳木错组 (1 390 Ma) 中。

晚元古代 (晋宁期), 掸泰马、印支、越北 (华南) 大陆边缘增生, 黑河—马江裂谷转入优地槽发育阶段, 有晚元古代齐江群等火山复理石建造, 而掸泰马板块东侧进入冒地槽发育, 有巨厚类复理石沉积。至晋宁期, 原特提斯洋闭合转入残留海盆地, 掸邦—保山、越北、华南进入冒地槽沉积, 抹谷、昆嵩陆核地区隆升为陆。

早古生代 (加里东期), 寒武纪开始, 华南裂谷盆地扩张, 印支板块中的昆嵩至越北地区, 以及掸泰马板块中的抹谷地带也抬升成陆。早奥陶世晚期, 古特提斯洋打开, 地处冈瓦纳大陆低纬度地区的掸泰马板块, 开始从澳大利亚板块分离并向北漂移。志留纪开始, 沿实皆、澜沧江、哀牢山—黑水河等大陆边缘相继形成克拉通盆地或冒地槽带, 使华南、印支、扬子 3 大板块被焊接成为统一的中国南方大陆板块, 而此时掸泰马板块与印支板块之间仍为古特提斯洋 (澜沧江洋) 所分隔。

晚古生代（海西期），泥盆纪开始古特提斯洋（分东西2支，西支为澜沧江洋，东支为金沙江—程逸洋）扩张、俯冲加快。东部印支、华南板块结合带被再次拉开，主体沿三江地带东南亚地区分布，其中沿金沙江—莫边府—程逸形成古特提斯洋东支，这是莫边府断裂的发端！即自晚古生代泥盆纪时期开始，程逸洋与金沙江洋一同构成古特提斯洋的东支洋盆，只不过其间哀牢山断裂开始左旋走滑转化为转换断层，致使金沙江洋与程逸洋蛇绿岩俯冲带错位；中部兰坪—思茅—南邦一带从中国南方板块西缘分离，成为挟持在金沙江—程逸洋与澜沧江洋之间的一个中间陆块；西部澜沧江洋沿澜沧江—清迈—巴真—劳勿一线形成洋脊裂谷带，洋壳向东俯冲，有洋脊蛇绿岩及裂谷型碱性玄武岩分布；再向西至缅甸东部，沿实皆断裂谷特提斯洋西支发育大陆边缘海盆。晚二叠世，即海西旋回晚期，是古特提斯洋的主要关闭期，其后，东南亚地区基本转入板内活动阶段，仅印缅那加—若开地带因印度洋向东俯冲止于中新世晚期，其后碰撞缝合并于更新世初期才转入陆内汇聚。

1.3 板内活动阶段

海西晚期至印支早期，随着古特提斯洋的关闭，掸泰马板块与印支板块沿澜沧江洋初次缝合，印支板块与华南板块也再次焊接，唐古拉—兰坪—思茅—南邦中间板块与掸泰马、印支板块结合成统一大陆块，东南亚洋盆消失，结束洋壳活动历史转入中特提斯残留海盆发育阶段，各板块间或陆—陆碰撞，或仅有狭窄海槽和浅水台地相隔，总体进入陆缘裂谷、碰撞期滞后型弧后盆地等板内活动阶段。

1.4 陆内汇聚阶段

晚三叠世开始，印支运动进入高潮，统一后的东南亚板块，在周边洋壳消亡后的挤压应力作用下，全区抬升，海水退出，基本结束海相历史，转入陆内汇聚阶段。其转化时间因各小板块基底固结、陆壳增生年代不一而有较大差异。其中，印支板块东侧与华南板块二次焊接及两侧长山、黎府褶皱带形成时间为海西中、晚期；印支板块西侧与唐古拉—兰坪—思茅—南邦中间板块东侧沿莫边府—程逸缝合线拼结时间为海西晚期至印支早期；而唐古拉—兰坪—思茅—南邦中间板块

西侧沿澜沧江缝合线与掸泰马板块拼结时间为印支晚期；掸泰马板块西侧沿实皆断裂与印缅岛弧的结合期为燕山早期；印缅岛弧西侧的若开缝合线关闭期为中新世。总体呈自东向西逐次拼接的过程。

以上论述包含几点重要认识：

（1）莫边府断裂带最早发端于晚古生代海西运动早期，是一条伴随古特提斯洋东支发育形成的洋脊扩张—俯冲带，于早二叠世初次关闭，早中生代印支运动早中期再次拉开成残留海槽，最后于诺利克期后碰撞，成为以昆嵩古陆核为核心的印支板块与唐古拉—兰坪—思茅—南邦中间板块（地槽褶皱系）的缝合带。

（2）莫边府断裂是东南侧印支板块（昆嵩古陆核）与北西侧是唐古拉—兰坪—思茅—南邦中间板块（地槽褶皱系）2个一级大地构造单元之间的分界，依照传统大地构造学基本原理，前者属于相对完整、坚硬和稳定的大地构造单元，后者则属于相对破碎、软弱和活动的大地构造单元。

2 相关断裂活动的动力学特性

作为新生代印度—欧亚板块碰撞以来最为显著的效应之一，青藏高原物质南东方向的大规模侧向挤出作用席卷了川、滇、缅和印度支那广大地区，经历长期、复杂演化过程后形成的区域大地构造格局再次发生了剧烈的变动，或继承、或新生，或复活、或重组，以不断调节和适应新的地球动力学环境。这其中，至少在空间展布上显然存在交集的红河、小江、莫边府3条大型走滑断裂带，无论是其各自的活动表现，还是它们之间的相互联系与相互作用，对于深入剖析和探索区域现今地壳运动与大震活动机理，无疑都具有重要节点和窗口作用。

2.1 红河/哀牢山断裂带

即便不强调它悠久的发育演化历史和对区域地质环境与大地构造格局形成的重大影响，仅就其在新生代早期曾作为被向南挤出的印度支那半岛的东边界，而在晚期又作为整体向 SSE 方向运动的川滇菱形地块的西南边界，运动方式也随之由早期左旋旋转为晚期右旋的复杂过程，就足以受到广泛而持续的关注。其中，为何长达数百千米

的整个东南段长期以来一直缺乏大震活动证据,甚至现今小震活动也显稀少?它由新生代早期左旋走滑至晚期转为右旋走滑的确切时代、根本原因及转换机理是什么?尤其是近年来 GPS 观测所揭示的,围绕东喜马拉雅构造结大规模顺时针旋转的运动与变形状态中,这条重要的大地构造边界和活动地块边界到底在扮演什么角色?发挥什么作用?等等。关于红河/哀牢山断裂的疑问似乎从未停止。

然而,对比和综合近年来得到的不同方面的资料与认识,可能有助于我们逐步逼近相关问题的答案。

(1) 诸多学者利用越南北部跨越南红河断裂的多期 GPS 观测数据研究表明,越南境内红河断裂的滑动速率不大于 $1 \sim 2 \text{ mm/a}$, 考虑到误差因素,绝大多数研究认为华南地块与印支地块间基本没有明显相对运动 (Feigl *et al.*, 2003; Michel *et al.*, 2000; Iwakuni *et al.*, 2004; Simons *et al.*, 2007)。中国地壳运动观测网络 1998 ~ 2004 年 GPS 观测数据研究也表明,跨红河断裂南段无明显变形 (Shen *et al.*, 2005)。这些观测结果意味着,至少在现今红河哀牢山断裂南段,即小江—奠边府断裂以东段两侧的华南地块与印支地块基本上是作为一个整体,彼此之间没有明显的相对运动 (Iwakuni *et al.*, 2004; Michel *et al.*, 2000; Sella *et al.*, 2002)。

(2) 与具有明显全新世活动特征的北段不同,笔者对越南境内红河断裂的野外调查与研究也未发现其晚第四纪活动的任何证据,迄今也未见国外关于越南境内红河断裂晚第四纪活动的任何报道 (张建国等, 2009)。

(3) 由于印度支那半岛挤出模式要求挤出通道的东缘断裂应为左旋走滑运动,红河/哀牢山断裂被认为最有可能是被挤出地块与稳定的扬子和华南地块之间的边界。迄今较为有限的研究表明,我国境内红河/哀牢山断裂在新生代早期的左旋累积位错量大于 200 km (吴海威等, 1989), 甚至大于 350 km (李齐等, 2000)。而在小江断裂和奠边府断裂以东,则几乎没有红河/哀牢山断裂大规模左旋走滑运动的直接证据。来自越南北部近海区域的地球物理研究揭示,经地震剖面的深井校正,在东京湾内红河断裂的左旋位错量仅为数十千米

量级,表明所谓“大规模”左旋走滑在奠边府断裂以东段缺失 (Takemoto *et al.*, 2005);

(4) 关于红河/哀牢山断裂带由新生代早期左旋转为晚期右旋的时代。迄今为止有诸多不同的认识,甚至同一学者在不同年份发表成果也不尽相同。如 22 Ma 之后 (吴海威等, 1989)、17 Ma (陈文寄等, 1996)、5 Ma (李齐等, 2000)、 $5 \text{ Ma} \pm$ (孙珍等, 2003)、 $7 \sim 8 \text{ Ma} \pm$ (向宏发等, 2004)、16 Ma (张岳桥, 2004), $(5.5 \pm 1.5) \text{ Ma}$ (向宏发等, 2006)、 $13.7 \text{ Ma} \pm$ (向宏发等, 2007)、 $9.9 \sim 12.7 \text{ Ma}$ (张秉良等, 2008)。考虑到青藏高原发育演化及其侧向挤出作用的显著时空不均匀性 (傅容珊等, 1999; 马宗晋等, 2001; 张岳桥, 2004), 以及测试样本取自不同构造部位或段落实际,还有早期左旋到晚期右旋的转变应当有一个渐变过程的认识等,有诸多不同结果反而是正常的,更符合青藏高原挤出的“连续变形模式”。

(5) 有许多涉及本区域的地震层析成像研究,不仅为跨红河/哀牢山断裂的顺时针旋转运动与变形提供了深部地壳结构与介质条件方面的支持,而且证明奠边府断裂是印度支那地区南北分界的截然分界。胥颐等 (2003) 应用体波到时成像揭示,分别在红河/哀牢山断裂北段及其与小江断裂、奠边府断裂交汇区的下地壳深度,明显存在跨断裂的低速带分布。徐果明等 (2007) 采用 Rayleigh 面波双台法反演表明,青藏高原东缘地区下地壳和上地幔速度明显偏低,很可能是青藏高原地壳低速物质沿青藏高原东部边缘地区向南运动、形成经川滇地区连接缅甸北部低速区的低速物质运移通道。Bai 等 (2010) 利用远震接收函数方法,观测到印度支那北部下地壳内存在可能是延自青藏高原东南部的低速带,且该低速带中止于奠边府断裂。Bai 等 (2009) 利用在越南布设的流动宽频带数字地震台阵,采用地核折射震相 S 波分裂研究发现,以奠边府断裂为界,印度支那地区的地壳与上地幔各向异性存在显著差异:以北区域快波偏振方向与 GPS 观测的地表变形及板块绝对运动方向几乎完全平行,而在以南区域快速偏振方向与板块绝对运动方向不同。Bao 等 (2015) 基于最新的中国地震台阵宽频带数字地震观测数据,开展了 Rayleigh 面波频散与体波接收函

数联合反演，这是迄今为止与 GPS 观测结果一致性最高的地震波层析成像工作，其结果非常清晰地揭示：从青藏高原东南部直到印度支那北部的中下地壳深度（21 km），存在着 2 条呈弧形弯曲围绕东喜马拉雅构造结，并穿越红河/哀牢山断裂的壳内低速通道。特别需要强调的是，2 个通道都位于小江断裂和莫边府断裂以西区域，且其中规模最大的一个通道的东南边界，基本是沿着小江断裂和莫边府断裂展布。

上述种种证据显示，大致以小江—莫边府断裂为界，红河/哀牢山断裂的北西段与南东段在 GPS 观测反映的现今活动，地质调查反映的第四纪时期活动，以及壳内或地壳—上地幔深度范围的介质状态等方面都存在着明显差异。

2.2 莫边府断裂带

具有长期发育演化历史，作为区域一级大地构造单元的分界，莫边府断裂北起中越边境附近的云南金平五台山一带，向西南方向经越南婣讷、莱州、莫边府，老挝孟威、琅勃拉邦、沙耶武里、班纳占，直至泰国程逸、达府以南，总体呈北东向收敛、南西向帚状撒开并略向南东凸出的弧形，总长约 750 km。相对于红河/哀牢山断裂和小江断裂，对莫边府断裂的研究程度总体较低，尤其是国内对莫边府断裂的研究较少。另一方面，由于该断裂穿越多国，造成其在各国境内段的研究程度又存在明显差别。其中研究相对较多的是越南境内段，最近泰国境内段的研究也得到加强，而老挝境内段的研究最为薄弱，仅限于部分建设工程项目地震安全性评价的需要而有零星的考察工作。

唐渊等（2009）基于对莫边府断裂越南段的遥感数据解译与野外实地考察，发现该断裂存在 5.5 km 的左行走滑位移，并根据断裂两侧水系变形程度的明显差异，推测断裂西盘为主动盘，认为这一来自西侧的拉拽作用有利于沿断裂的顺时针转动。

Koszowska 等（2006）对莫边府盆地沉积中心底部玄武岩 K—Ar 法或 Ar—Ar 法定年测定为 5 Ma 左右，以此推断莫边府断裂在经历了早期的右行走滑之后，在 5 Ma 开始了左行走滑运动。Zuchiewicz 等（2004）对莫边府断裂越南段的实地考察发现，在断裂不同段落有最小从 6 ~ 8 m 至 150 m

的全新世河谷位错，1.2 ~ 9.75 km 的中晚更新世河谷位错。被错断的阶地和冲积扇揭示断裂全新世时期左旋走滑速率为 0.6 ~ 2 mm/a，更新世时期左旋走滑速率为 0.5 ~ 3.8 mm/a。

这里还需要指出，根据最近笔者对莫边府断裂泰国段，也就是属于该断裂最南段的野外调查发现，可能反映断裂在该段全新世时期的累积水平位错量基本上都在 2 ~ 3 m 范围，即明显低于越南段的累积位错量，显示出类似于从鲜水河断裂到小江断裂，再到莫边府断裂的累积位错逐渐降低的特点。

Lai 等（2012）基于遥感影像判读和野外填图，发现莫边府断裂具有单条迹线与斜列叠接等不同样式的几何结构，根据大量水系位错复位获得 12.5 km 的最大左旋位错，据此推算该断裂自上新世以来平均滑动速率为 2.5 mm/a，这与 GPS 观测获得的莫边府断裂现今左旋滑动速率为 2 ~ 3 mm/a 基本一致。越南北部至华南区域有大量 GPS 速度场观测结果显示，跨红河断裂南段，即印支地块与华南地块之间的相对运动为零（Cong *et al.*, 1999; Michel *et al.*, 2000; Feigl *et al.*, 2003; Iwakuni *et al.*, 2004; Simons *et al.*, 2007）。因此，鲜水河—小江断裂系统的左旋剪切穿越红河断裂并传递至莫边府断裂是可能的。

2.3 小江断裂带

小江断裂带主体发育于跨越我国南方大部区域的扬子地台西南隅，是一条由发育时代迥异的不同段落逐渐贯通之后形成的断裂带。其部分段落的发育历史可追溯至元古代，而有的段落则是到了第四纪晚期才形成。就其现今规模与结构意义而言，小江断裂带的最终整体贯通和成形时代是第四纪中、晚期。因此，这条中外著名的大型强震构造带实际上是一条十分年轻的断裂带。研究表明，小江断裂带发育最早的段落，如北段呈 NNW 走向的东川段是于中元古代末期的晋宁运动期间形成。之后，在相对稳定的地台演化环境下，区域以长期相对和缓的整体升降运动为主，仅在志留纪末期的广西运动、晚二叠世的海西运动、三叠纪的印支运动、中生代晚期的燕山运动等时期，有其现今组成部分的段落断续发育。甚至到了上新世晚期，印度—欧亚板块碰撞与青藏高原的强烈隆起，区域高原面大规模抬升、解体、一

系列断陷盆地形成的背景下,小江断裂带仍未完全贯通成形。直到早更新世末、中更新世初,又一次强烈的构造运动使川西和云南高原加速抬升,青藏高原在挤压隆升过程中的侧向挤出作用进一步加剧,以鲜水河、安宁河、则木河、小江断裂为东边界,红河断裂为西南边界的川滇菱形地块形成(宋方敏等,1998),至此,小江断裂才完成了整体贯通。

以往较长时期关于小江断裂的研究,关注点更多是放在其作为川滇菱形地块的东边界上。然而,随着青藏高原发育演化过程、机理及效应等一系列国际前缘和热点课题的持续深入,特别是在空间对地 GPS 观测、宽频带数字地震台阵观测与地震波层析成像,以及同位素岩石地球化学等领域关键技术进步的有力推动下的大陆动力学理论的发展,帮助人们可以从更加广阔的时间和空间视野,审视和思考这条断裂的地位和作用。即小江断裂不仅是川滇菱形地块的东边界,更可能是与具有板块边界地位的实皆断裂相对应,共同构成控制青藏高原南东方向侧向挤出运动与变形整个区域的,许志琴等(2011)称之为“川滇缅甸支侧向挤出地体群”的东、西边界。如此一来,一个更加充满吸引力的问题是:同样是与实皆断裂相对应,至少在欧亚板块碰撞、青藏高原隆起、侧向挤出作用启动的新生代早期阶段,曾经以大规模左旋走滑方式扮演印度支那半岛挤出或逃逸东边界的红河/哀牢山断裂,其角色之后是被小江断裂替代了吗?它们又是因为什么原因,在什么时代,以什么方式实现了“边界角色”的更替?答案可能涉及以下几个关键线索及其相互关系:(1)红河/哀牢山断裂停止左旋走滑并向右旋走滑转换的时间;(2)小江断裂完成整体贯通并启动左旋走滑的时间;(3)青藏高原侧向挤出作用显著加剧的时间。

由于篇幅所限,在此不能详细罗列相关研究的成果和认识(许志琴等,2011;宋方敏等,1998),但依据目前相关线索,几个重要时间节点之间确实存在相互衔接的可能。但需要特别注意的是,上述“边界角色”的转换不应被理解为是短暂或突然间完成,而应当是一个逐步的、渐变的过程。据此笔者可以做出如下推测:川滇菱形地块的形成,很可能是原先以实皆断裂为西界、

红河断裂为东界的印度支那半岛被向南挤出的通道,已经不足以调节遭受印度板块持续挤压的青藏高原的强烈变形和物质逃逸,尤其是随着东构造结的不断北移和原挤出通道的逐渐变窄甚至关闭,必然要催生一条更宽的、可容许大量物质挤出的空间,即以鲜水河、安宁河、则木河、小江断裂为东界的新通道。晚新生代以来,自北西向南东累积左旋走滑位移量总体呈递减分布的特征,反映了这条东边界自青藏高原内部逐渐向南东扩展的特征:玉树—甘孜段 78 ~ 100 km,炉霍—康定段 60 km,小江断裂带 30 km(许志琴等,2011),莫边府断裂 5 ~ 12.5 km(唐渊等,2009;Lai *et al.*, 2012)。

从区域大地构造单元划分的角度来看,所谓的川滇菱形地块实际上至少是由 2 个性质截然不同的大地构造单元拼贴而成,即北半部的松潘—甘孜地槽和南半部的扬子准地台,以北东向的丽江—小金河断裂为界,二者在地壳结构上也存在着显著差异,包括地壳厚度、地震波速度等方面。换句话说,菱形地块的南半部,实际上是由年轻的小江断裂从相对坚固、稳定的扬子准地台强行“削切”下来的,这从一方面反映了来自青藏高原侧向挤出动力之强大。

3 讨论与展望

如前所述,莫边府断裂在区域现今地壳运动与变形格局中地位与作用问题,实际上涉及到更加广泛、重要而复杂的,诸如青藏高原发育演化、南北地震带构成以及区域大震活动时空特征与动力学机制等方面的许多重大地球科学问题。本文着重就 2 个关系问题作简要讨论,并简述下一步研究工作的设想。

3.1 关于青藏高原侧向挤出与南北地震带的关系

作为新生代,特别是晚新生代以来全球规模最壮观、变动最剧烈、影响最深远的地质事件,由印度—欧亚板块碰撞引起的青藏高原隆起、变形以及由此牵动或延伸的周缘地壳与岩石圈的变动,是一个极其复杂的动力学过程。然而,基于弹塑性力学基本原理和简单的模拟实验可以证明,一个存在自由表面的物体遭受水平挤压而隆起或抬升的前提,是该物体的周缘必须存在一定程度

的约束。换句话说,一个周缘没有相对完整、坚固和稳定地块约束的青藏地块,能够在印度板块的推挤下不断隆起抬升,最终成为全球独一无二的“世界屋脊”是难以想象的。正如许志琴等(2011)所指出:“青藏高原是一个正在快速隆起的大陆地块,其周缘为高峻陡峭、剧烈起伏的山链,构成了一堵与外界刚性地块(东北面的阿拉善地块、北面的塔里木地块、东面的扬子地块及南面的印度地块)隔绝的屏障”。在这些围绕青藏高原的“刚性地块”(张培震等,2002),或称青藏高原“周缘克拉通”(许志琴等,2011)当中,高原北东侧的阿拉善、东侧的扬子和东南侧的印支3个克拉通陆块与青藏高原及其侧向挤出体之间的边界,实际上也构成了南北地震带的重要组成部分。从该意义上说,南北地震带实际上是“借用”了青藏活动地块与其北东侧、东侧和东南侧3个方向上相对稳定地块之间的边界(张建国等,2014)。而根据本文所归纳的相关信息,莫边府断裂具备作为南北地震带南端边界的特征和条件。

3.2 关于红河、小江、莫边府断裂之间的关系

近年来关于红河、小江、莫边府断裂之间相互关系的探讨逐渐增多,其原因似乎不难理解:这些问题都关系到如何认识正在发生着的,涉及整个青藏高原及其以东、以南广大区域现今地壳运动、变形以及大震活动的动力学机制,因而具有极其重要的科学意义和应用价值(Wang *et al.*, 1998; Michel *et al.*, 2000; Lacassin *et al.*, 1998)。此外,由于迄今为止在浅表并没有发现三者之间清晰的相互交汇、交切或归并关系,因而还存在不同的看法或猜测。

唐渊等(2009)根据遥感影像解译和野外调查认为,越南境内呈NNE向展布的莫边府断裂向北延入云南境内,与金平地区近南北向的三家河断裂相连,再向北逐渐呈NW向弧形弯曲,最后并入哀牢山剪切带中。Zuchiewicz等(2004)根据水系位错所反映的莫边府断裂滑动速率与红河断裂具有可比性,结合地貌变形及GPS观测的反映发现,莫边府断裂西盘的活动性明显强于东盘,即西侧相对东侧为主动盘的认识,认为莫边府断裂与红河/哀牢山断裂之间是共轭关系。该看法同时也就意味着莫边府断裂与小江断裂没有直接关系。

Wang等(1998)根据区域GPS观测所发现的

红河/哀牢山断裂南段不活动或微弱活动,南段与北段之间在运动学上不协调的情况认为:莫边府断裂承担了转换的左旋运动的大部,并且,鲜水河—小江—莫边府断裂系统构成了晚新生代地壳物质相对华南地块顺时针转动的东边界。也就是说,虽然在浅表小江断裂与莫边府断裂似乎没有切穿红河/哀牢山断裂并相互连接,但在地壳深部可能已经形成剪切带切穿了红河/哀牢山断裂。

然而,无论是“共轭”关系,还是“剪切”关系,都共同面临一个必须回答的问题,即如何解释第四纪时间尺度地质证据和现今GPS观测结果所提供的——鲜水河—小江左旋走滑断裂系统30~60 km的累积位错量和平均10 mm/a左右的滑动速率(许志琴等,2011)都明显大于莫边府断裂5~12.5 km的累积左旋位错量和2~3 mm/a(Zuchiewicz *et al.*, 2004)的滑动速率的现象。更直白地说,即鲜水河—小江左旋走滑断裂系统“亏损”的累积位错量和滑动速率被分配到哪里去了?是以什么方式分配的?对此问题,Leloup等(1995)、Replumaz等(2001)、Schoenbohm等(2006)认为是在川滇地块推挤作用下,红河断裂中、南段向南西方向达数十千米量级的弯曲变形,加上断裂带内沉积物的缩短来调节或消化小江断裂反映的累积位错量和滑动速率。Lacassin等(1998)则根据河流等地貌的长期位错推测:左旋剪切变形广泛分布于莫边府断裂及其以北的一系列NE向走滑断裂上,它们共同分担和消化了小江断裂以西川滇地块的水平滑移和顺时针旋转变形。也就是说,在红河断裂以西、莫边府断裂以北存在着区域性的、弥散式的,而非局部的、仅仅沿个别断裂的剪切变形,调节来自川滇地块的水平滑移和顺时针旋转变形。而Shen等(2005)认为区域GPS观测结果支持Lacassin的观点。与此相应,Cong等(2006)、Lai等(2012)基于在越南北部跨莫边府断裂GPS测量所发现的在莫边府断裂以西区域内存在宽150 km,约7 mm/a东西向拉张变形带的现象认为,作为一条复活的断裂构造,莫边府断裂同时还扮演着印度支那强烈变形的北部与相对稳定的南部之间被动边界作用。

综合以上研究可以认为,莫边府断裂与鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂一道,共同构成围绕东喜马拉雅构造结的现今地壳大规模顺时针

旋转运动的外边界,同时也极有可能作为中国大陆南北地震带的南边界绝非偶然。也就是说以“削切”部分扬子地块而最终贯通的鲜水河、安宁河、则木河、小江断裂,是调节、消化来自青藏高原晚新生代不断加剧的挤压、抬升和侧向挤出作用的必然结果。而莫边府断裂作为南侧相对坚固、稳定的昆嵩古陆核与北侧相对软弱、活动的印支地槽褶皱带之间的边界,恰恰具备了与之大致平行展布的一系列其它断裂,如 Mae Chan 断裂、孟连断裂、南汀河断裂等所不具备的作为南北地震带典型边界,即活动地块与相对稳定地块之间边界的条件。

3.3 展望

莫边府断裂及与其相关的红河断裂、小江断裂地处中国与东南亚多国毗邻区,区域自然资源丰富、战略地位凸显,是“一带一路”战略的重要组成部分和我国西出印度洋的能源战略通道。受印度—欧亚板块碰撞和青藏高原侧向挤出的显著影响,该区域地壳变动剧烈、大震活动频繁、构造类型多样、地质演化复杂,是国际公认的在资源、环境、气候等方面具有全球影响意义的区域。同时,与大震活动相关的地震构造带的空间展布、动力作用等都具有显著的跨国境特征。因此,通过与越南、老挝、泰国、缅甸等相关国家开展国际科技合作,从跨国数字地震观测、GPS 观测和联合野外地质调查等方面,大力推进对区域重要跨国地震构造带的深入研究,对于完善关于南北地震带研究,探索区域大震活动机理,服务“一带一路”国家战略,指导区域内跨国重大经济基础设施建设布局与设防,都具有重要的科学价值和战略意义。

参考文献:

- 陈文寄,李齐,汪一鹏. 1996. 哀牢山—红河左旋走滑剪切带中新世抬升的时间序列[J]. 地质评论,42(5):385-389.
- 丁国瑜,蔡文伯,于品清等. 1991. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京:地震出版社,142-154.
- 傅容珊,李力刚,黄建华等. 1999. 青藏高原隆升过程的三阶段模式[J]. 地球物理学报,42(5):609-616.
- 李春昱,王荃,刘雪亚等. 1982. 亚洲大地构造图[M]. 北京:地图出版社.
- 李方夏. 1995. 东南亚地质矿产与矿业经济[M]. 昆明:云南省地质矿产局,11-16.
- 李齐,陈文寄,万景林等. 2000. 哀牢山—红河剪切带构造抬升和运动形式转换时间的新证据[J]. 中国科学:地球科学,30(6):576-583.
- 刘增黔. 1993. 三江地区构造岩浆带的划分和矿产分布规律[M]. 北京:地质出版社,86-107.
- 马宗晋,张家声,汪一鹏. 2001. 青藏高原三维变形运动随时间的变化—论青藏高原构造变动的非平稳性[M]//马宗晋,汪一鹏,张燕平. 青藏高原岩石圈现今变动与动力学. 北京:地震出版社,88-105.
- 宋方敏,汪一鹏,俞维贤等. 1998. 小江活动断裂带[M]. 北京:地震出版社,48-50.
- 孙珍,钟志洪,周蒂等. 2003. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据[J]. 热带海洋学报,22(2):1-9.
- 唐渊,刘俊来,TRAN My Dung 等. 2009. 莫边府走滑断裂带的构造特征、遥感解译及其区域构造意义[J]. 地质学报,83(10):1401-1414.
- 吴海威,张连生,嵇少丞. 1989. 红河—哀牢山断裂带—喜山期陆内大型左行走滑剪切带[J]. 地质科学,(1):1-8.
- 向宏发,魏顺民,张晚霞等. 2007. 红河断裂带南段中新世以来大型右旋位错量的定量研究[J]. 地震地质,29(1):52-64.
- 向宏发,韩竹军,魏顺民等. 2004. 红河断裂带大型右旋走滑运动定量研究的若干问题[J]. 地球科学进展,19(增刊1):56-59.
- 向宏发,万景林,韩竹军等. 2006. 红河断裂带大型右旋走滑运动发生时代的地质分析与 FT 测年[J]. 中国科学:地球科学,36(11):977-987.
- 胥颐,刘建华,刘福田等. 2003. 哀牢山—红河断裂带及其邻区的地壳上地幔结构[J]. 中国科学:地球科学,33(12):1201-1209.
- 徐果明,姚华建,朱良保等. 2007. 中国西部及其邻域地壳上地幔横波速度结构[J]. 地球物理学报,50(1):193-208.
- 许志琴,杨经绥,李海兵等. 2011. 印度—亚洲碰撞大地构造[J]. 地质学报,85(1):1-33.
- 许志琴,杨经绥,李化启等. 2012. 中国大陆印支碰撞造山系及其造山机制[J]. 岩石学报,28(6):1697-1709.
- 云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,611-634.
- 张秉良,刘瑞珣,向宏发等. 2008. 红河断裂带中南段断层活动转换构造岩特征及应力场演化[J]. 岩石矿物学杂志,27(6):735-735.
- 张建国,皇甫岗,龙飞. 2014. 巽他地块的构造演化与介质特性的动力学意义[J]. 地震研究,37(3):323-331.
- 张建国,谢英情,金明培等. 2009. 中越红河断裂活动性研究[M]. 昆明:云南科技出版社,40-67.
- 张培震,王琪,马宗晋等. 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块[J]. 地学前缘,9(2):430-440.
- 张岳桥. 2004. 晚新生代青藏高原构造挤出及其对中国东部裂陷盆地晚期油气成藏的影响[J]. 石油与天然气地质,25(2):162-169.
- Bai L, Iidaka T, Kawakatsu H, et al. 2009. Upper mantle anisotropy beneath Indochina block and adjacent regions from shear-wave splitting analysis of Vietnam broadband seismograph array data[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors,176(1):33-43.

- Bai L, Tian X, Ritsema J. 2010. Crustal structure beneath the Indochina peninsula from teleseismic receiver functions [J]. *Geophysical Research Letters*, 37(24): 701–719.
- Bao X, Sun X, Xu M, *et al.* 2015. Two crustal low-velocity channels beneath SE Tibet revealed by joint inversion of Rayleigh wave dispersion and receiver functions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 415: 16–24.
- Cong D C, Feigl K L. 1999. Geodetic measurement of horizontal strain across the Red River fault near Thac Ba, Vietnam, 1963–1994 [J]. *Journal of Geodesy*, 73(6): 298–310.
- Cong D C, Yun H, Cho J. 2006. GPS measurements of horizontal deformation across the Lai Chau–Dien Bien (Dien Bien Phu) fault, in Northwest of Vietnam, 2002–2004 [J]. *Earth Planets Space*, 58(5): 523–528.
- Feigl K L, Cong D C, Becker M, *et al.* 2003. Insignificant horizontal strain across the Red River fault near Thac Ba, Vietnam from GPS measurements 1994–2000 [J]. *Geophysical Research Abstracts*, 5: 04707, EGS–AGU–EUG Joint Assembly, Nice, France, 6–11 April 2003.
- Iwakuni M, Kato T, Takiguchi H, *et al.* 2004. Crustal deformation in Thailand and tectonics of Indochina peninsula as seen from GPS observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 31(11): 373–374. doi: 10.1029/2004GL020347.
- Koszowska E, Wolska A, Zuchiewicz W, *et al.* 2006. Crustal contamination of Late Neogene basalts in the Dien Bien Phu Basin, NW Vietnam: Some insights from petrological and geochronological studies [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(1): 1–17.
- Lacassin R, Replumaz A, Leloup P H. 1998. Hairpin river loops and slip-sense inversion on southeast Asian strike-slip faults [J]. *Geology*, 26(8): 703–706.
- Lai K Y, Chen Y G, Lâm D. 2012. Pliocene–present morphotectonics of the Dien Bien Phu fault in northwest Vietnam [J]. *Geomorphology*, 173–174(9): 52–68, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.05.026.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, *et al.* 1995. The Ailao Shan–Red River shear zone (Yunnan, China), tertiary transform boundary of Indochina [J]. *Tectonophysics*, 251(1–4): 3–84.
- Michel G W, Becker M, Angermann D, *et al.* 2000. Crustal motion in E– and SE–Asia from GPS measurements [J]. *Earth Planets Space*, 52(10): 713–720.
- Replumaz A, Lacassin R, Tapponnier P, *et al.* 2001. Large river offsets and Plio–Quaternary dextral slip rate on the Red River fault (Yunnan, China) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 106(B1): 819–836.
- Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen L, *et al.* 2006. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper crustal rotation, and lower crustal flow [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 118(5/6): 686–700.
- Sella G F, Dixon T H, Mao A. 2002. REVEL: A model for Recent plate velocities from space geodesy [J]. *Journal of Geophysical Research*, 107(B4): 2081. doi: 10.1029/2000JB000033.
- Shen Z K, Lu J, Wang M, *et al.* 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research*, 110(11): 1–17.
- Simons W J F, Socquet A, Vigny C, *et al.* 2007. A decade of GPS in Southeast Asia: resolving Sundaland motion and boundaries [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112(B6): 623–626. doi: 10.1029/2005JB003868.
- Takemoto K, Halim N, Otofujii Y, *et al.* 2005. New paleomagnetic constraints on the extrusion of Indochina: Late Cretaceous results from the Song Da terrane, northern Vietnam [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 229(3): 273–285.
- Wang E, Burchfiel B C, Royden L H, *et al.* 1998. Late Cenozoic Xianshuihe–Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China [J]. *Spec Pap Geol Soc Am*, 327: 1–108.
- Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, *et al.* 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements [J]. *Science*, 294(5542): 574–577. doi: 10.1126/science.1063647.
- Wang Y, Sieh K, Tun S T, *et al.* 2013. Active tectonics and earthquake potential of the Myanmar region [J]. *AGU Publications, Research Article, Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(4): 3767–3822.
- Zuchiewicz W, Cuong N Q, Bluszcz A, *et al.* 2004. Quaternary sediments in the Dien Bien Phu fault zone, NW Vietnam: a record of young tectonic processes in the light of OSL–SAR dating results [J]. *Geomorphology*, 60(3–4): 269–302.

Discussion about Several Issues on Dien Bien Phu Fault & North – South Seismic Belt

ZHANG Jianguo¹, DING Zhifeng²

(1. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China*)

Abstract

The North – South Seismic Belt (NSSB) distributed through the mainland China have been paid a great deal of attention for a long term because of its huge scale and very frequent activity of big earthquake. However, where does the NSSB extend and end? Why? All of these questions concern the more important issues such as the possibility to understand the features, the geodynamic process and mechanism of big earthquake in the NSSB better. On the other hand, there are a series of large scale strike – slip active faults in the border area between mainland China and Southeast Asia, the southern segment of NSSB, such as Dien Bien Phu Fault. The survey and study related to Dien Bien Phu Fault were no so much in the past at home and abroad, but more and more attention has been attracted to the issues such as the status, the role of the Dien Bien Phu Fault, the possible relationships among the Dien Bien Phu Fault, Red River Fault and Xiaojiang Fault since the phenomenon of the large scale clockwise rotation movement and deformation around the Eastern Himalayan Syntaxis revealed by GPS observation that take the Xianshuihe – Xiaojiang – Dien Bien Phu Fault system as outer limitation. Based on the review on the studies about the formation and evolution of regional geotectonic framework, the kinematic and dynamic characters of fault activity in late Cenozoic, and the relation between the active situation on the surface and the medium property in the deep, and combining with the studies accumulated in the past, we proposed that the Dien Bien Phu Fault could be taken as the southern end of the NSSB.

Key words: North – south seismic belt; Dien Bien Phu Fault; craton; lateral extrusion; low velocity zone