

藏南裂谷系的研究综述*

才巴央增^{1,2}, 赵俊猛^{1,2}

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在青藏高原的南部发育了数条近南北走向的巨型构造,地质学者通常称之为“藏南裂谷系”,目前对该裂谷系虽有所研究,但对它们的形成机制、深浅部构造关系等仍存在很大的争议。通过综述前人对藏南裂谷系的地质学、地球化学、地球物理学等特性,及其与尼泊尔地震的关系,对该裂谷系的形成机制进行论述,认为藏南裂谷的形成机制与典型意义上的大陆裂谷可能不同。

关键词:藏南裂谷系;深部构造;形成机制;尼泊尔地震

中图分类号: P313.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)01-0014-08

0 引言

青藏高原是大陆中分布最宽、活动最强的构造形变带。自印度板块和欧亚板块在约 70 Ma (Yin, 2000) 前碰撞以来,这个地区发生了强烈的构造变形,造成地壳缩短、岩石圈增厚、高原隆升及喜马拉雅山崛起。如果说雅鲁藏布江、班公—怒江、金沙江等近东西向分布的缝合线是高原形成前特提斯演化的痕迹,那么这些近南北走向的伸展构造(有人称之为裂谷系或正断层体系)是青藏高原南部最显著的构造特征。这种伸展构造由正断层构成的地堑和半地堑体系构成,其形成机制、深浅部构造关系是认识青藏高原形成与演化的关键问题,是研究青藏高原隆升机制与动力学过程所要依据的基础信息。

青藏高原是研究陆-陆碰撞的理想天然“实验室”,尤其是藏南地区,它地处欧亚大陆碰撞的前缘,变形强烈,裂谷系发育。使用不同的地球物理方法探测藏南裂谷系深部结构与构造,研究两大板块的碰撞过程及其影响,揭示高原隆升演化的动力学机制,对板块构造理论的发展,尤其是阐明大陆内部造山活动与演化过程等大陆动力学的理论问题具有重大意义。

在藏南发育有大型、超大型金属矿床。这些金属矿床的形成无不与藏南裂谷系的形成与演化有关。藏南自然条件优越,生活着各民族的同胞,但

生态环境日趋严峻,地震、地质等各种自然灾害频发,对当地民众的生命财产造成巨大的威胁。因此,开展藏南地区,尤其是藏南裂谷系的壳幔结构与地球动力学研究,为开发资源、减轻灾害、保护环境提供基础理论支撑,具有重大的现实意义。

藏南裂谷系与青藏高原隆升或垮塌的关系越发受到人们的关注,其成因机制存在争议,是由于南北挤压下物质东逸而产生的壳内拉张,还是高原隆升到最大高度后的垮塌(Coleman, Hodges, 1995)仍不清楚。

1 藏南裂谷系基本概况

印度板块与欧亚板块的碰撞使得青藏高原成为全球地壳活动最为剧烈的地区,并在第四纪期间被多条巨型边界断裂带分割为多个变形特征明显不同的构造变形域。藏南裂谷系便是其中最为独特和显著的活动构造变形形迹之一(Coleman, Hodges, 1995; Harrison *et al*, 1995; Searle, 1960; Seeber, Pêcher, 1998; Yin, 2000; Hurtado *et al*, 2001; Zhang *et al*, 2002, 2007)。藏南裂谷系是区域构造变形由近南北向挤压转变为近东西向伸展之后的产物,大致被局限在南部的喜马拉雅山前逆冲断裂带与北侧斜列分布的喀喇昆仑—嘉黎大型走滑断裂带之间(Armijo *et al*, 1989; Tapponnier *et al*, 1981)。藏南裂谷系的形成时间大概为 8~23 Ma,虽然不同裂谷系的活动时间略有不同,但在同一裂

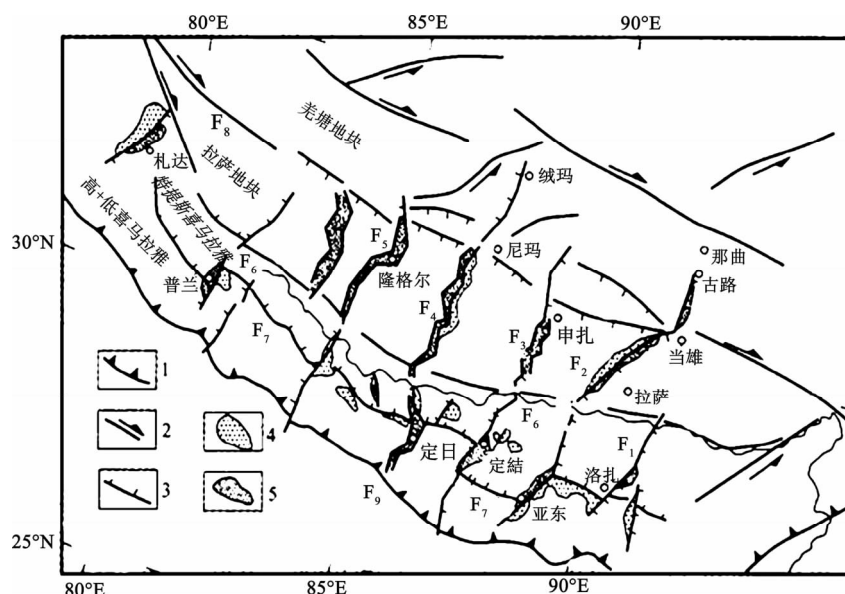
* 收稿日期: 2017-11-15.

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作特点项目(131551KYSB20150009)资助.

谷系的不同位置测得的裂谷系活动年龄接近,表明藏南裂谷系是受相同机制控制的。整体上,除了亚东—谷露裂谷系活动时间较晚外(8~10 Ma),其它裂谷的活动时间都较早,为13 Ma左右。

如图1所示,在藏南从东至西依次分布着桑日—错那裂谷、亚东—谷露裂谷、申扎—定结裂谷、尼玛—定日裂谷、隆格尔裂谷5个裂谷系。这5个裂谷系

中,最东部的桑日—错那裂谷系主要发育在喜马拉雅地块内,而其余4个则穿过了雅鲁藏布江,同时切割了喜马拉雅地块和拉萨地块,它们的南端切割了藏南拆离系,到达高喜马拉雅(丁林等,2006)。另外,这些裂谷系还是现今浅源地震发育区(贺日政,高锐,2003),也是晚新生代岩浆活动集中的地带,从而与金属矿床密切相关(Hou *et al.*, 2004)。



F₁: 桑日—错那裂谷; F₂: 亚东—谷露裂谷; F₃: 申扎—定结裂谷; F₄: 尼玛—定日裂谷; F₅: 隆格尔裂谷;
F₆: 雅鲁藏布江缝合带; F₇: 藏南拆离系; F₈: 喀喇昆仑—嘉黎断裂带; F₉: 主边界断裂;
1: 逆冲断层; 2: 走滑断层; 3: 伸展前层; 4: 浅色花岗岩; 5: 新生代盆地

图1 青藏高原伸展构造示意图(据 Zhang *et al.*, 2002)

Fig. 1 Sketch map of extensional in Qinghai-Tibet plateau and the location of the studied area (based on Zhang *et al.*, 2002)

2 有关藏南裂谷系的研究概述

关于藏南裂谷系的研究历史悠久,它始于20世纪50年代初,之后大致经历了从感性认识、初步分析—调查和系统调查研究,再到逐步深入剖析等阶段。

李璞(1955)提出,藏南的亚东—谷露裂谷系北段存在强烈的断裂活动。Molnar 和 Tapponnier (1978)认为,地堑和正断层系是高原隆升达到最大海拔高度之后重力塌陷作用的结果。成都地震大队围绕亚东—谷露裂谷系北段那曲谷露一带进行了地震烈度和地震地质工作(唐荣昌等,1980)。美、法地质学家利用遥感图像解译和震源机制解分析方法对青藏高原活动断裂进行了全面分析,认为

该区内部,特别是藏南地区正在经历强烈的近东西向拉张作用(Tapponnier *et al.*, 1981)。从此,青藏高原南北向构造受到越来越多的关注。

2.1 地球化学、地质学特征

通过测定岩石构成元素及其同位素的丰度揭示藏南裂谷系的演化过程、形成时间及具经济价值的岩石和矿物的分布和成藏机理。

Yin 等(1999)和 Blisniuk 等(2001)认为,由于高原在整体伸展,因此排除了伸展构造是由于倾斜俯冲、喜马拉雅弧扩展以及向东挤出所导致,推测可能与整个高原的状态或者与过去10 Ma左右广泛的东亚伸展作用有关。Williams 等(2001)将藏南地区一些近南北向岩脉的形成与近南北向裂谷系的发育相联系,并根据它们的发育时代推断,藏南裂谷系出现于8~18 Ma。Garzione 等(2000)

通过分析 Thakkhola 裂谷系中的沉积物的氧同位素,认为裂谷系形成于 10~11 Ma 左右,而其基底大约形成于 8 Ma,当时的古高度与现今相近。Zhang 等 (1999, 2002, 2007) 通过研究藏南的伸展构造,认为伸展期的主导构造运动为挤压和隆升,伸展构造是造山带应变分解所致,而不是高原下降的标志。邹光富等 (2003) 通过藏南定日白垩纪火山岩研究以及定日甲不拉组中的白垩纪岛弧型中酸性火山岩研究表明,该火山岩可能是燕山晚期印度板块向北与欧亚板块发生俯冲碰撞形成的火山岛弧之产物。这些岛弧型火山岩的存在,表明冈瓦纳大陆北缘在白垩纪时期确实存在一些规模不大的点状水下岛弧链,为新特提斯多岛弧(洋)极为重要的组成部分。周志广等 (2005) 通过对藏南江孜盆地北缘火山岩研究认为,雅鲁藏布江结合带在三叠纪和早白垩世为大陆裂谷构造环境,晚白垩世早期为大陆裂谷向大洋演化的构造背景,晚期形成洋壳,其形成至少经历了 4 次脉动式的演化过程。丁林等 (2006) 通过对藏南裂谷系附近的中新世高镁超钾质火山岩研究,认为高原内部正断层的强烈活动时间为 13~23 Ma,高原裂谷系形成于俯冲的印度地壳的断离所造成的高原岩石圈的伸展破裂。童劲松等 (2007) 通过对藏南洛扎地区基性岩墙群锆石 U-Pb 定年研究得出,藏南洛扎地区近东西向产出、13 Ma 左右侵位的基性岩墙群证明喜马拉雅被动陆缘在岩墙侵位时处于强烈的伸展构造环境。何俊国等 (2007) 通过西藏南部热水沉积硅质岩岩石学研究,得到硅质岩形成与藏南拆离系和伸展构造碰撞造山带所造成的构造热事件有关。陈建林等 (2010) 通过研究青藏高原拉萨地块新生代超钾质岩与南北向地堑成因关系认为,拉萨地块超钾质火山岩和南北向地堑(裂谷)在空间上和形成时代上均有着明显的耦合性,两者的产生可能与中新世早期北向俯冲的印度岩石圈地幔发生断离和由此而引发的东西向构造伸展体制有关。颜晗等 (2013) 通过西藏羊八井白榴斑岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学及其与裂谷发育的关系研究认为,锆石 U-Pb 定年结果表明白榴斑岩形成于 8.2~15.4 Ma,加权平均年龄为 (10.9 ± 1.6) Ma,该时代为当雄—羊八井地堑初始形成时间提供了更为有力的证据。高利娥等 (2013) 研究了藏南马拉山高钙二云母花岗岩的年代学特征,得出马拉山二云母花岗岩是变泥质岩在较高温压条件下

水致白云母部分熔融的产物,与藏南裂谷系的東西向伸展作用密切相关。吴中海等 (2015) 通过藏南安岗地堑的史前大地震遗迹、年龄及其地质意义,认为安岗地堑的大地震活动具有较明显的丛集性特征,并且在距今 23~26 ka 以来一直处于大地震活跃期,研究结果指示,藏南裂谷系的大地震活动性比藏北的近南北向正断层更为显著。

2.2 地球物理学特征

很多学者利用地热、电磁及地震反射等地球物理探测方法研究藏南裂谷系的特征、结构、组成及其演变过程。韩同林等 (1988) 试论西藏活动构造系的形成时代,认为西藏地热的分布与藏南活动构造系基本一致,集中分布在班公湖—怒江缝合带与高喜马拉雅中央断裂之间;最强烈的水热活动均与活动构造有关,其展布主要集中在边界断裂附近;水热活动的强度受活动构造现今活动性控制,裂谷区内表现为高热流,变化幅度大,活动构造不仅为水热活动提供了通道,还控制着地壳深处年轻岩浆的分布及其活动。魏文博等 (1997) 研究表明在西藏中、南部地壳中普遍存在 2 组不连续的壳内高导体。在藏中冈底斯构造带处发现的壳内高导体分布范围广,也反映上地壳存在局部熔融区。在雅鲁藏布江未发现显示深断裂的电性痕迹,但在江孜和仁布之间发现了向北倾斜的高导体,该高导体的成因可能与板块碰撞有关,同时,认为雅鲁藏布江缝合带实际出露的位置应在江孜附近。青藏高原的地壳和上地幔大地电磁测深结果 (Wei *et al.*, 2000) 表明,在雅鲁藏布江缝合带和班公—怒江缝合带下具有相似的电性结构,即北倾的高导体,相比之下,雅鲁藏布江缝合带下的导电性更高,藏南喜马拉雅构造带的上地幔软流圈深度大,而藏中的拉萨地体的软流圈急剧上隆。喻成等 (2014) 利用 GPS 水平速度场,采用负位错模型,研究了亚东—谷露裂谷系及邻区的断层运动速率。计算结果表明,亚东—谷露裂谷系南段拉张速率约为 (6.75 ± 0.9) mm/a,北段的拉张速率为 (4.72 ± 0.8) mm/a,均高于地质研究获得的长期运动速率。张丽红 (2015) 通过 He-C 同位素模型计算结果说明谷露—亚东裂谷系北段火山—地热区的气体主要来源于地壳,仅少量来自地幔,且自南向北,幔源的气体组分呈现逐渐增高的趋势,说明印度大陆仍在向北俯冲。Cogan 等 (1998) 通过国际合作的 INDEPTH 地震反射剖面揭示,西藏近东西向伸展变形可能仅局限在上地壳

中。Yin 等(1999)根据对西藏裂谷系跨度的分析结果推断,西藏裂谷系的发育反映了整个岩石圈的减薄过程。Zhao 等(2001)的德庆—龙尾错深地震测深剖面结果表明,在藏西北的班公错—怒江缝合带两侧莫霍面错断达 10 km,其南侧的拉萨地体厚 75 ~ 78 km,而北侧的羌塘地体厚 65 ~ 70 km,这表明拉萨地体的莫霍面的深度比其北侧的羌塘地体深约 10 km 左右。显然,这些裂谷系并没有位于区域性地幔隆起上。苏伟等(2002)地震层析成像结果认为,高原深部结构和速度分布存在明显的横向变化和分区特征,从岩石圈地幔速度来看,喜马拉雅地体和拉萨地体与印度板块是一致的,印度板块岩石圈可能已经俯冲到喜马拉雅地体和拉萨地体之下,造成青藏高原岩石圈增厚。Hirn 等(1995)和 Lave 等(1996)对青藏高原印度—雅鲁藏布缝合带进行各向异性研究,发现该缝合带以北的地震各向异性相对较强,认为印度—亚洲岩石圈的碰撞促使软流圈产生流动,因而在喜马拉雅和青藏高原下方产生各向异性。姜枚等(2001)和许志琴等(2004, 2006)总结了青藏高原内部及周边的各向异性资料,提出青藏高原隆升的动力学模型:南部印度岩石圈向陆内俯冲,北部克拉通向陆内浅俯冲,中部深地幔热结构的右旋隆升及物质向东挤出。张智和田小波(2011)通过青藏高原中部地壳和上地幔各向异性分析研究,发现拉萨块体地壳各向异性层的快轴方向与印度—欧亚板块汇聚方向一致,可能与地壳刚性较强有关,其在板块汇聚过程中不易发生形变;而羌塘块体由于其较强的流变性,在南北向挤压压力的作用下,岩石圈整体向东逃逸,从而表现出较强的各向异性特征。徐强等(2010)通过分析横跨班公湖—怒江缝合带中部的 Hi—Climb 剖面,显示拉萨地体和羌塘地体的 Moho 面在班公湖—怒江缝合带附近叠置和存在约 10 km 的错断,地幔过渡带的厚度沿剖面维持在 255 km 左右,说明印度板块和欧亚板块的碰撞所引起的构造活动局限在 410 km 深度范围内。张衡等(2011)通过远震层析成像方法研究西藏东南裂谷系得到印度板块俯冲至喜马拉雅地体下发生了拆沉,深度大约在 200 ~ 350 km,俯冲前缘并未超过嘉黎断裂。在 92°E 附近的低速异常是地幔物质的倾斜上涌造成的,这也是地表裂谷系形成的主要原因;而产生这种倾斜上涌则是地幔物质的横向流动造成的。刘启民(2013)通过在藏南的尼玛—一定日裂谷系和申扎—

定结裂谷系的研究表明:(1)申扎—一定结裂谷系在 Moho 面的不连续段与地表裂谷系在空间上错位,推测其有向东迁移的特点;(2)尼玛—一定日裂谷系在 Moho 面错断的区域正上方 40 ~ 60 km 处有一块宽阔的低速区域,这些低速物质很可能是从地幔涌上来的岩浆;(3)申扎—一定结裂谷系的 Moho 面起伏比尼玛—一定日裂谷系要大得多,表明其受到地幔物质的强烈改造,推测其形成时间较尼玛—一定日裂谷系要早。

以上是不同学者对藏南裂谷系的地质学、地球化学、地球物理学特性的综述,可见,地质学强调的是裂谷系的构造属性,地球化学强调的是裂谷系的物质属性,而地球物理学强调的是裂谷系的深部结构特征。不同学科具有不同的优势,但同时又具有各自的局限性,因为,他们对藏南裂谷系的认识不完全一致,甚至偏差较大。究其原因,可能是我们所使用的资料的质量与数量有限,缺少不同手段之间的相互匹配、不同方法间的相互渗透,以及不同结果间的相互验证。

3 藏南裂谷系与尼泊尔地震

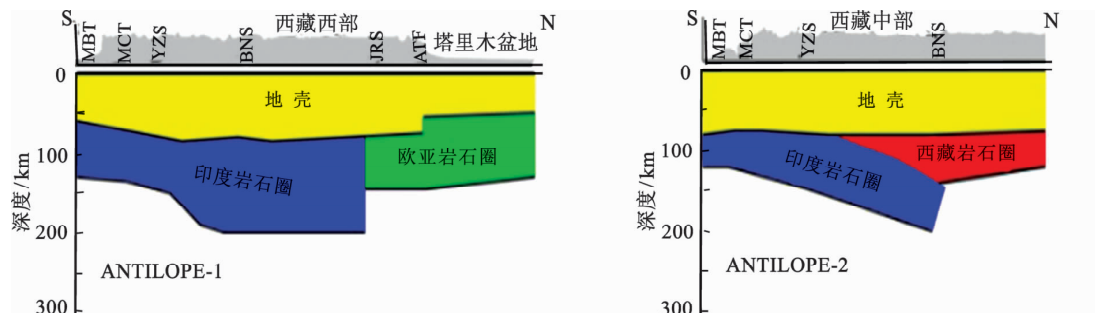
2015 年 4 月 25 日尼泊尔大地震发生在喜马拉雅造山带的南坡,其发震机制是人们关注的重要问题,该地震的发生是否与藏南裂谷系有关是新的研究课题。

在中科院青藏高原研究所 ANTILOPE 计划的总体框架下,笔者所在课题组先后完成了 ANTILOPE - I 和 ANTILOPE - II 剖面的数据分析。由图 2 可看出,沿 ANTILOPE - I 和 ANTILOPE - II 剖面印度向欧亚板块之下俯冲的形态发生了明显的变化(Zhao *et al.*, 2010)。沿 ANTILOPE - I,印度板块向北先以高角度、再以低角度、再以高角度俯冲于青藏高原之下,其北端达塔里木盆地;而沿 ANTILOPE - II,印度板块以高角度向北俯冲,它的北端终止于班公—怒江缝合线附近。那么,由 ANTILOPE - I 到 ANTILOPE - II 的岩石圈尺度的构造差异是渐变,还是突变?若是突变,那么这个突变部位与藏南裂谷系是否一致,与尼泊尔大地震发生是否有关系?

Nábelek 等(2009)沿 85°E 剖面(图 3)研究结果表明,印度板块俯冲至喜马拉雅地体下,印度板块俯冲前缘与亚洲板块向南挤压相结合。沿

92°E 剖面 (图 4), 显示印度板块俯冲至喜马拉雅地体下发生了拆沉, 在深度 200 km 处俯冲向北延伸突然停止 (Shi *et al*, 2015)。对于青藏高原壳幔流变性的问题, 自下地壳流模型提出以来就存在激

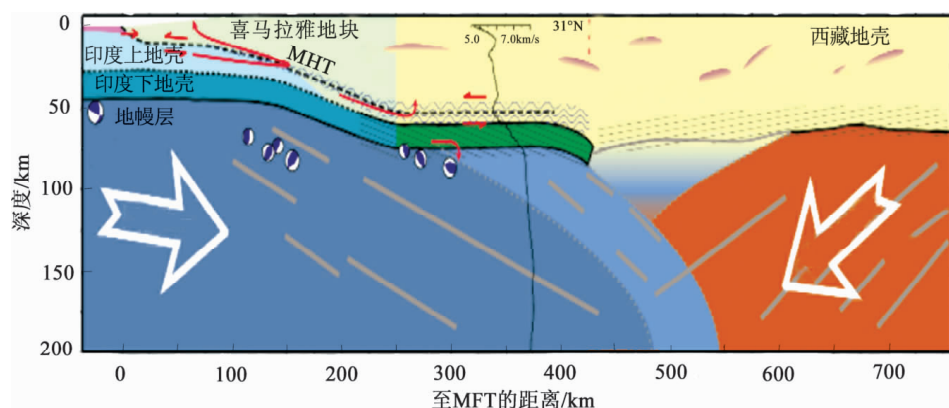
烈的争论。在高原, 究竟是下地壳流 (Roydon *et al*, 2009), 还是整个岩石圈在流动 (Zhao *et al*, 2010) 是需要澄清的, 因为, 二者所产生的地球动力学效果是不同的。



MBT: 主边界逆冲断裂; MCT: 主中央逆冲断裂; YZS: 雅鲁藏布缝合带; BNS: 班公错—怒江缝合带; JRS: 金沙江缝合带; ATF: 昆仑南缘缝合带

图 2 ANTILOPE - I 和 ANTILOPE - II 剖面分析 (据 Zhao *et al*, 2010)

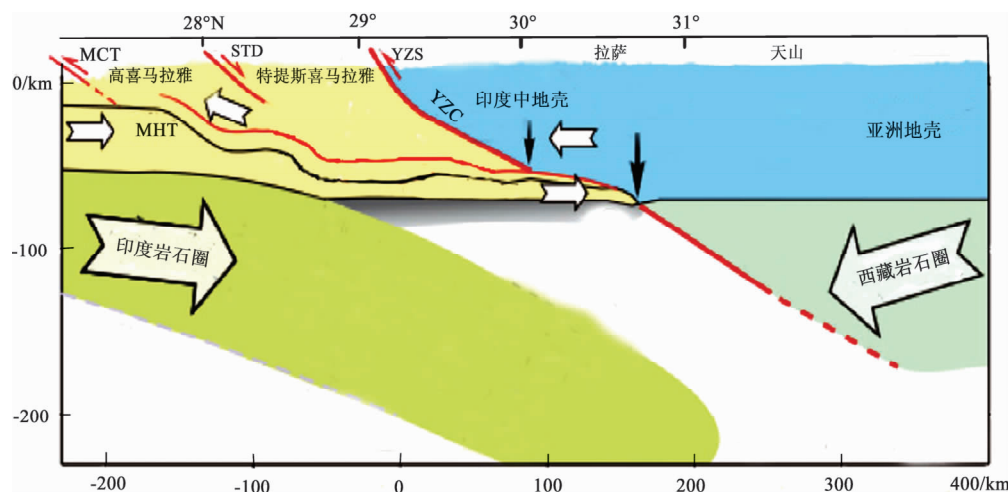
Fig. 2 Analysis on ANTILOPE - I and ANTILOPE - II profiles (based on Zhao *et al*, 2010)



MHT: 主西瓦里克逆冲断裂; MFT: 主前锋逆冲断裂

图 3 沿着 85°E 剖面 (据 Nábelek *et al*, 2009)

Fig. 3 Profiles along 85°E (based on Nábelek *et al*, 2009)



MCT: 主中央逆冲断裂; MHT: 主西瓦里克逆冲断裂; STD: 藏南拆离条; YZS: 雅鲁藏布江缝合带; YZC: 雅江缝合带中心

图 4 沿着 92°E 剖面 (据 Shi *et al*, 2015)

Fig. 4 Profiles along 92°E (based on Shi *et al*, 2015)

4 藏南裂谷系的形成机制

关于藏南裂谷系的形成究竟是局部边界应力变化的产物还是高原隆升至极限高度的标志一直是青藏高原动力学研究的焦点问题之一 (Molnar, Tapponnier, 1978; 李吉均等, 1979; Armijo *et al.*, 1986, 1989; Harrison *et al.*, 1992; Coleman, Hodges, 1995; Yin, 2000)。

目前, 关于藏南裂谷系的形成机制主要有以下几个观点: ①增厚和抬升的大陆地壳的重力塌陷作用或高原岩石圈增厚至极限后地幔岩石圈的拆沉作用 (Molnar, Tapponnier, 1978; England, Houseman, 1989; Harrison *et al.*, 1992; Coleman, Hodges, 1995); ②近南北向强烈挤压作用下热而弱的下地壳物质的侧向流动 (Lee, Whitehouse, 2007); ③东亚上地幔的普遍上涌或亚洲板块东缘边界条件的变化 (Yin, 2000; Tian *et al.*, 2015; Liang *et al.*, 2016); ④印度板块斜向俯冲所产生的底部牵引力 (McCaffrey, Nabelek, 1988); ⑤印度板块对欧亚板块的北北东向撞击作用导致西藏内部发生放射状张裂的结果 (Kapp *et al.*, 2004); ⑥粘塑性的西藏高原地壳在刚性的印度板块之上的向南扩展作用或马蹄形的喜马拉雅造山带的弯曲拉张作用 (Seeber, Pêcher, 1998; Bendick, Bilham, 2001); ⑦高原的不均匀侧向挤出或刚性块体向东横向挤出过程中沿共扼走滑断裂带的一侧或两侧所产生的局部拉张作用 (Ni, York, 1978; Armijo *et al.*, 1989)。

藏南裂谷系的形成机制与典型意义上的大陆裂谷可能不同。一般大陆裂谷不论主动式或者被动式, 都是地表水平方向的2个方向相反的力同时拉张形成的。藏南的裂谷系形成机制可能不同, 由于青藏高原的西边界被固定, 在印度板块向北持续俯冲的背景下, 高原内部物质普遍向东运移。ANTI-LOPE 剖面研究 (Zhao *et al.*, 2010) 揭示, 青藏高原是由3个碰撞板块构成, 由南至北分别为印度板块、西藏板块和亚洲板块。西藏板块位于印度板块与亚洲板块之间, 其形状宛如向东张开的“喇叭”, 且具有低速、高温的特点, 在南北强大的应力作用下整体向东运动。上地幔的物质流动产生地壳拉张是藏南裂谷系形成的重要因素之一。地表GPS位移数据 (Gan *et al.*, 2007)、地震震源机制

(曾融生, 孙为国, 1992) 和 Pn 波各向异性 (Pei *et al.*, 2007) 等资料都证明了这一点。最近, 虚拟地震测深 (Tian *et al.*, 2015)、远震体波走时成像 (Liang *et al.*, 2016)、地震各向异性 (Chen *et al.*, 2015) 等研究得出印度岩石圈在青藏高原下方发生板片撕裂, 板片撕裂、俯冲角度差异提供板片窗, 诱发大规模热物质上涌, 而大规模的热物质上涌引起了岩石圈的伸展, 从而促使了裂谷系的发育。

5 展望

截至目前, 关于藏南伸展构造的性质与形成机理远没有达成一致的意見, 其主要原因是缺少高精度的、综合的、大量的深部地球物理资料以及不同物性参数的约束。根据藏南伸展构造的深部结构与构造我们才有可能确定这些伸展构造的属性, 如裂谷、地堑、半地堑、断裂等; 至于这些伸展构造的形成机理及动力学演化过程更是需要藏南深部地球物理资料的支持, 因为每一种模型都意味着不同的深部结构特点。因此, 在藏南地区横穿这些伸展构造完成一条高密度、高精度、综合的地球物理剖面, 获得地壳与上地幔顶部的详细的信息, 获得藏南伸展构造在空间上的分布图像, 再结合地质学、地球化学等资料综合分析, 确定这些伸展构造的属性与形成机制, 为高原隆升与扩展的理论研究, 为开发资源、减轻灾害、保护环境服务, 为国家“一带一路”战略的实施保驾护航。

参考文献:

- 陈建林, 许继峰, 王保弟, 等. 2010. 青藏高原拉萨地块新生代超钾质岩与南北向地堑成因关系[J]. 岩石矿物学杂志, 29(4): 341 - 354.
- 丁林, 岳雅慧, 蔡福龙, 等. 2006. 西藏拉萨地块高镁超钾质火山岩及对南北向裂谷形成时间和切割深度的制约[J]. Acta Geologica Sinica, 80(9): 24 - 33.
- 高利娥, 曾令森, 王莉, 等. 2013. 藏南马拉山高钙二云母花岗岩的年代学特征及其形成机制[J]. 岩石学报, 29(6): 1995 - 2012.
- 韩同林, P·达包尔叶, R·阿米尔饶. 1988. 试论西藏活动构造系的形成时代[C]//中国地质科学院地质研究所: 中国地质科学院地质研究所文集, 32 - 43.
- 何俊国, 周永章, 聂凤军, 等. 2007. 西藏南部热水沉积硅质岩岩石学和地球化学特征及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 26(1): 74 - 81.
- 贺日政, 高锐. 2003. 青藏高原南北向裂谷研究意义[J]. 地球物理学进展, 18(1): 35 - 43.

- 姜枚,许志琴,Him A,等. 2001. 青藏高原及其部分邻区地震各向异性 and 上地幔特征[J]. 地球学报,22(2):111-116.
- 李吉均,文世宣,张青松,等. 1979. 青藏高原隆起的时代,幅度和形式的探讨[J]. 中国科学,(6):608-616.
- 李璞. 1955. 西藏东部地质的初步认识[J]. 科学通报,5(7):62-71.
- 刘启民. 2013. 藏南裂谷深部结构及形成机制[D]. 北京:中国科学院大学.
- 苏伟,彭艳菊,郑月军,等. 2002. 青藏高原及其邻区地壳上地幔 S 波速度结构[J]. 地球学报,23(3):193-200.
- 唐荣昌,李天招,李介成. 1980. 当雄 7.5 级地震地质构造背景及其成因的初步认识[J]. 地震研究,3(1):89-98.
- 童劲松,刘俊,钟华明,等. 2007. 藏南洛扎地区基性岩墙群锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及构造意义[J]. 地质通报,26(12):1654-1664.
- 魏文博,陈乐寿,谭捍东,等. 1997. 西藏高原大地电磁深探测——亚东—巴木错沿线地区壳幔电性结构[J]. 现代地质,11(3):366-374.
- 吴中海,叶培盛,王成敏,等. 2015. 藏南安岗地堑的史前大地震遗迹、年龄及其地质意义[J]. 地球科学—中国地质大学学报,(10):1621-1642.
- 徐强,赵俊猛,崔仲雄,等. 2010. 青藏高原班公湖—怒江缝合带中部的 Moho 错断[J]. 科学通报,55(1):80-86.
- 许志琴,姜枚,杨经绥,等. 2004. 青藏高原的地幔结构:地幔羽、地幔剪切带及岩石圈俯冲板片的拆沉[J]. 地学前缘,11(4):329-343.
- 许志琴,杨经绥,李海兵,等. 2006. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. 中国地质,33(2):221-238.
- 颜晗,赵志丹,刘栋,等. 2013. 西藏羊八井白榴斑岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学及其与裂谷发育的关系[J]. 岩石学报,29(11):3731-3744.
- 喻成,乔学军,王伟,等. 2014. 亚东—谷露裂谷带与块体运动的特征[J]. 大地测量与地球动力学,34(2):36-40.
- 曾融生,孙为国. 1992. 青藏高原及其邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论[J]. 地震学报,14(S1):534-563.
- 张衡,赵俊猛,徐强. 2011. 西藏东部地区层析成像及东南部裂谷成因讨论[J]. 科学通报,(27):2328-2334.
- 张丽红. 2015. 藏南典型裂谷带温室气体的释放通量与成因[D]. 北京:中国科学院大学.
- 张智,田小波. 2011. 青藏高原中部地壳和上地幔各向异性分析[J]. 地球物理学报,54(11):2761-2768.
- 周志广,刘文灿,梁定益,等. 2005. 藏南江孜盆地北缘火山岩地球化学特征及其大地构造背景[J]. 地质通报,24(4):341-348.
- 邹光富,朱同兴,贾保江,等. 2003. 藏南定日白垩纪火山岩岩石学与地球化学初步研究[J]. 沉积与特提斯地质,23(4):62-67.
- Armijo R, Tapponnier P, Tonglin H. 1989. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research,94(B3):2787-2838.
- Armijo R. 1986. Apatary extension in southern Tibet:field observation-sand tectonic implication[J]. JGR,91:13803-13872.
- Bendick R, Bilham R. 2001. How perfect is the Himalayan arc? [J]. Geology,29(9):791-794.
- Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, et al. 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago[J]. Nature,412(6847):628-32.
- Chen Y, Li W, Yuan X, et al. 2015. Tearing of the Indian lithospheric slab beneath southern Tibet revealed by SKS-wave splitting measurements[J]. Earth & Planetary Science Letters,413:13-24.
- Cogan M J, Nelson K D, Kidd W S F, et al. 1998. Shallow structure of the Yadong-Gulu rift, southern Tibet, from refraction analysis of Project INDEPTH common midpoint data[J]. Tectonics,17(1):46-61.
- Coleman M, Hodges K. 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension[J]. Nature,374(6517):49-52.
- England P, Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research,94:17561-7569.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. J Geophys Res-Sol Ea,112(B8), DOI:10.1029/2005JB004120.
- Garzione C N, Dettman D L, Quade J, et al. 2000. High times on the Tibetan Plateau: Paleoelevation of the Thakkhola graben, Nepal[J]. Geology,28(2000):339.
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. 1992. Raising Tibet[J]. Science,225:1663-1670.
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. 1995. Activation of the Nyainqentanghla Shear Zone: Implications for uplift of the southern Tibetan Plateau[J]. Tectonics,14(3):658-676.
- Hirn A, Jiang M, Sapin M, et al. 1995. Seismic anisotropy as an indicator of mantle flow beneath the Himalayas, and Tibet[J]. Nature,375(6532):571-574.
- Hou Z, Yang Y, Qu X, et al. 2004. Tectonic evolution and mineralization systems of the Yidun Arc Orogen in Sanjiang Region, China[J]. Acta Geologica Sinica,78(1):109-120.
- Hurtado J M, Hodges K V, Whipple K X. 2001. Neotectonics of the Thakkhola graben and implications for recent activity on the South Tibetan fault system in the central Nepal Himalaya[J]. Dirāsāt Sukkāniyah,113(34):222-240.
- Kapp P, Gyun J H. 2004. Indian push rifts Tibet[J]. Geology,32(11):993-996.
- Lave J, Avouac J P, Lacassin R, et al. 1996. Seismic anisotropy beneath Tibet: evidence for eastward extrusion of the Tibetan lithosphere? [J]. Earth & Planetary Science Letters,140(1-4):83-96.
- Lee J, Whitehouse M J. 2007. Onset of mid-crustal extensional flow in southern Tibet: Evidence from U/Pb zircon ages[J]. Geology,35(1):45-48.
- Liang X F, Chen Y, Tian X B, et al. 2016. 基于体波有限频层析成像的青藏高原南部和中部下方印度大陆岩石层俯冲和撕裂的三维图像[J]. 世界地震译丛,47(6):521-542.
- Mccaffrey R, Nabelek J. 1998. Role of oblique convergence in the active deformation of the Himalayas and southern Tibet plateau[J]. Geology,26(8):691.
- Molnar P, Tapponnier P. 1978. Active tectonics of Tibet[J]. Journal of

- Geophysical Research Solid Earth, 83 (B11) : 5361 – 5376.
- Ni J, York J E. 1978. Late Cenozoic tectonics of the Tibetan plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 83 (B11) : 5377 – 5384.
- Nábelek J, Hetényi G, Vergne J, *et al.* 2009. Underplating in the Himalaya – Tibet collision zone revealed by the Hi – CLIMB experiment [J]. Science, 325 (5946) : 1371.
- Pei S, Zhao J, Sun Y, *et al.* 2007. Upper mantle seismic velocities and anisotropy in China determined through Pn and Sn tomography [J]. J Geophys Res, 112 (B5) : B05312.
- Royden L H, Burchfiel B C, VanderHilst, 等. 2009. 青藏高原的地质学演化 [J]. 世界地震译丛, 40 (3) : 46 – 54.
- Searle M. 1960. The rise and fall of Tibet [M]. Van Nostrand; Rise and fall of the Romanov, 17 – 18.
- Seeber L, Pêcher A. 1998. Strain partitioning along the Himalayan arc and the Nanga Parbat antiform [J]. Geology, 26 (26) : 791.
- Shi D, Wu Z, Klemperer S L, *et al.* 2015. Receiver function imaging of crustal suture, steep subduction, and mantle wedge in the eastern India – Tibet continental collision zone [J]. Earth & Planetary Science Letters, 414 : 6 – 15.
- Tapponnier P, Mercier J L, Armijo R, *et al.* 1981. Field evidence for active normal faulting in Tibet [J]. Nature, 294 (5840) : 410 – 414.
- Tian X, Chen Y, Tseng T L, *et al.* 2015. Weakly coupled lithospheric extension in southern Tibet [J]. Earth and Planetary Science Letters, 430 : 171 – 177.
- Wei W, Tan H, Jin S, *et al.* 2000. Electrical structures of the crust and upper mantle of Tibetan Plateau from magnetotelluric profiling of INDEPTH – MT [J]. 地学前缘, (S1) : 319.
- Williams H, Turner S, Kelley S, *et al.* 2001. Age and composition of dikes in Southern Tibet: New constraints on the timing of east – west extension and its relationship to postcollisional volcanism [J]. Cancer, 29 (4) : 188 – 193.
- Yin A, Kapp P A, Murphy M A, *et al.* 1999. Significant late Neogene east – west extension in northern Tibet [J]. Geology, 27 (9) : 787 – 790.
- Yin A. 2000. Mode of Cenozoic east – west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo – Asian collision [J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 105 (B9) : 21745 – 21759.
- Zhang J J, Ding L, Zhong D L, *et al.* 1999. The Himalayan stretching parallel to orogenic belt: is the sign of collapse, or extrusion process of the product ? [J]. Chinese Science Bulletin, 44 (19) : 2031 – 2036.
- Zhang J J, Guo L, Ding L. 2002. The relationship between the middle and southern parts structure characteristics of the shenzha – dingjie normal fault system with the southern Tibet detachment system [J]. Chinese Science Bulletin, 47 (10) : 738 – 743.
- Zhang J J. 2007. A review on the extensional structures in the northern Himalaya and southern Tibet [J]. Geological Bulletin of China, 26 (6) : 639 – 649.
- Zhao J M, Yuan X H, Liu H B, *et al.* 2010. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet [J]. P Natl Acad Sci USA, 107 (25) : 11229 – 33.
- Zhao W, Mechie J, Brown L D, *et al.* 2001. Crustal structure of central Tibet as derived from project INDEPTH wide – angle seismic data [J]. Geophysical Journal International, 145 (2) : 486 – 498.

A Summary of Researches on Southern Tibet Rift System

Caibayangzeng^{1,2}, ZHAO Junmeng^{1,2}

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract

There developed series of giant structures with south-north direction in southern Tibet. The geological scholars usually call them “Southern Tibet Rift System”. At present, the development of the southern rift system has been studied, but its formation mechanism and the relationship between deep structure and shallow one have still a lot of controversy. Through summarizing the predecessors’ geology, geochemistry and geophysics characteristics of the southern Tibet rift system and their relationship with the Nepal earthquake, we discussed the formation mechanism of this rift system, and thought that the formation of the southern Tibet rift system and the typical significance of the continental rift may be different.

Keywords: Southern Tibet Rift System; deep tectonic; formation mechanism; Nepal earthquake