

西南三江地区新生代走滑造山

尹福光, 唐 渊, 徐 波

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要:本文系统论述了西南三江地区那邦、高黎贡山、崇山—澜沧江、点苍山—哀牢山—红河剪切走滑带、区域性伸展与变质核杂岩、新生代盆地及走滑过程中的碱性岩浆活动等特征,认为西南三江地区经历了挤压收缩变形(60~40Ma)、走滑伸展热隆(40~38Ma)、走滑剪切深熔(38~23Ma)、走滑剪切伸展(23~11Ma)、走滑剥蚀隆升(11~5Ma)5个时空演化阶段,并对应5种运动机制及动力学机制:碰撞挤压、走滑拉张热隆(岩浆)、走滑剪切深熔、剪切伸展、走滑垮塌,主要表现为走滑造山。西南三江造山带是印度板块向欧亚板块斜向俯冲形成的多条巨型顺时针走滑剪切带,其间的块体向南逸出并顺时针旋转。走滑断层系起了位移量调节和构造变换的作用,西南三江造山带为典型的走滑造山带。

关键词:西南三江;新生代;走滑造山

中图分类号:P52

文献标识码:A

印度板块与欧亚板块新生代的碰撞造成青藏高原的形成。随着碰撞作用的进行,印度板块逐步俯冲并挤(楔)入到欧亚板块之中,造成青藏高原主体大规模缩短,喜马拉雅山东、西两端形成“构造结”,在“构造结”外缘地区发生了极为复杂的变形,早期历经南北向纯剪切,后期历经南北向简单剪切(图1)。西南三江地区地处东构造结东侧,块体顺时针旋转、走滑,在块体边缘形成南北向走滑剪切带。因而,西南三江地区的造山过程、陆内变形的构造特点、变形历史、陆陆碰撞之间的动力学关联等科学问题成了地球科学的研究热点^[1-8]。

李兴振等(2002)、潘桂棠(2003)、李文昌(2012)先后提出了三江“横断山式”造山,表现为印度板块与扬子陆块之间的非正向、斜向的碰撞而引发大规模的对冲、反冲推覆,走滑旋转及其伴生的拉分盆地构造的形成^[9-11]。李兴振等(2002)、邓军(2010)提出了三江造山带是一个典型的巨型复合造山带^[5,9]。公认的碰撞挤出模型^[8,12]认为印度板块相对于欧亚板块地向北运动,引起印支地块向东南方向逃逸,导致了南海的张开地块边界发育了大型走滑断层,且形成强变形带,陆块内部保留弱的

变形^[12-16]。这种观点强调了大型走滑断层在调节陆陆碰撞应力中所起到的重要作用。许志琴等(2016)提出35~15 Ma期间腾冲地体物质受走滑和拆离构造制约而向北和北东方向运动,形成片麻岩穹隆构造,其形成机制是印度支那地体相对向南东的逃逸^[8]。与之相对的观点是把岩石圈作为一种粘性流体,地块内部为弥散状分布的变形剪切作用则处于次要的地位,只发生了较小规模的走滑位移^[17-20],并且认为地壳的收缩变形与增厚作用才是调节陆陆碰撞的主要机制。刘俊来等(2006)认为西南三江造山带在新生代形成了三种不同类型的构造样式,包括了逆冲断层与推覆构造、走滑断裂构造以及变质核杂岩和地堑、半地堑等伸展构造^[21]。刘宇平等(2003)认为印度板块斜向碰撞导致滇藏涡旋构造的形成,围绕东喜马拉雅构造结的顺时针涡旋,由于涡旋的内外圈旋转速度的差异,形成了青藏高原东部逆时针和顺时针的走滑断层和涡旋^[2]。

本文通过对现今产于西南三江造山带中中国境内研究程度最高的4条主要区域剪切走滑断裂带:哀牢山—红河逆时针走滑断裂带、崇山—澜沧江

收稿日期:2020-04-03;改回日期:2020-05-26

作者简介:尹福光(1965—),男,研究员,主要从事区域地质矿产调查研究工作。E-mail:yfuguang@126.com

资助项目:全国陆域及海区地质图件更新与共享(成都地质调查中心)(DD20190375)

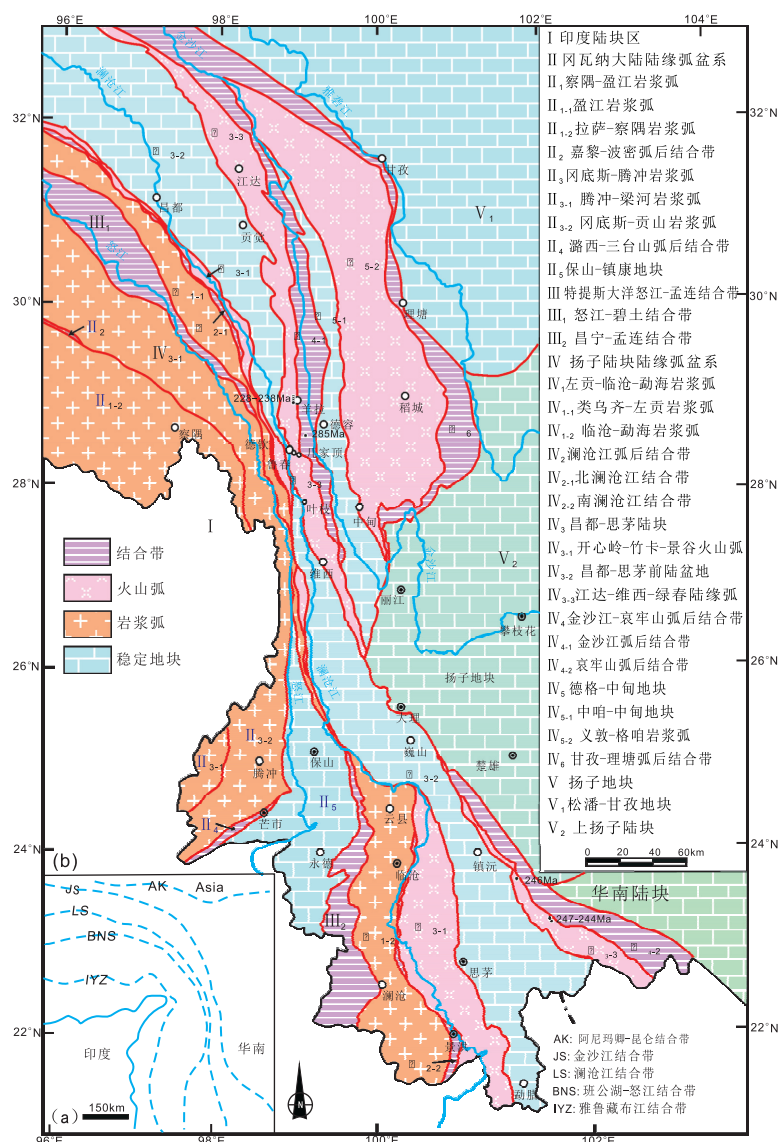


图1 西南“三江”地区大地构造单元划分简图

Fig. 1 Schematic tectonic map of the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang area in southwestern China

逆时针/顺时针走滑断裂带、嘉黎-高黎贡顺时针走滑断裂带和那邦顺时针走滑断裂等(图2)特征的论述,并结合与走滑剪切相关的变质核杂岩、新生代盆地、碱性岩浆活动的讨论^[21-30],探讨西南三江走滑造山阶段划分及动力作用模型。认为走滑造山带也是大陆山链主要类型之一,因此出现走滑造山带和走滑盆地的耦合特征^[21,23-24]、变质核杂岩^[21,24]、碱性岩浆岩侵入与喷发。

1 区域走滑剪切带特征

1.1 那邦走滑剪切走滑带

那邦走滑剪切走滑带东起铜壁关一线,西至缅

甸境内的 Mogok 带,为其东缘组成部分,宽 3 ~ 4 km。发育近南北向直立面理和近水平的拉伸线理,经历了中—高温下的右行韧性剪切。季建清等(2000)对那邦地区高黎贡山群(Mogok 群)内发育的变质基性岩开展了变质时代及温压条件研究,结果显示其经历了两期变质作用的改造,即早期(约 76 ~ 74 Ma)麻粒岩相变质作用和晚期(约 23 ~ 24 Ma)角闪岩相变质作用^[31]。那邦剪切走滑带内发育 3 种岩性:主体的花岗闪长质片麻岩、呈包裹体的变质基性岩和同构造脉体岩浆岩。锆石 SHRIMP U-Pb 测年指示那邦剪切走滑带南段中糜棱岩的变质锆石和岩浆锆石的年龄为 40 ~ 50 Ma^[8]。剪切带

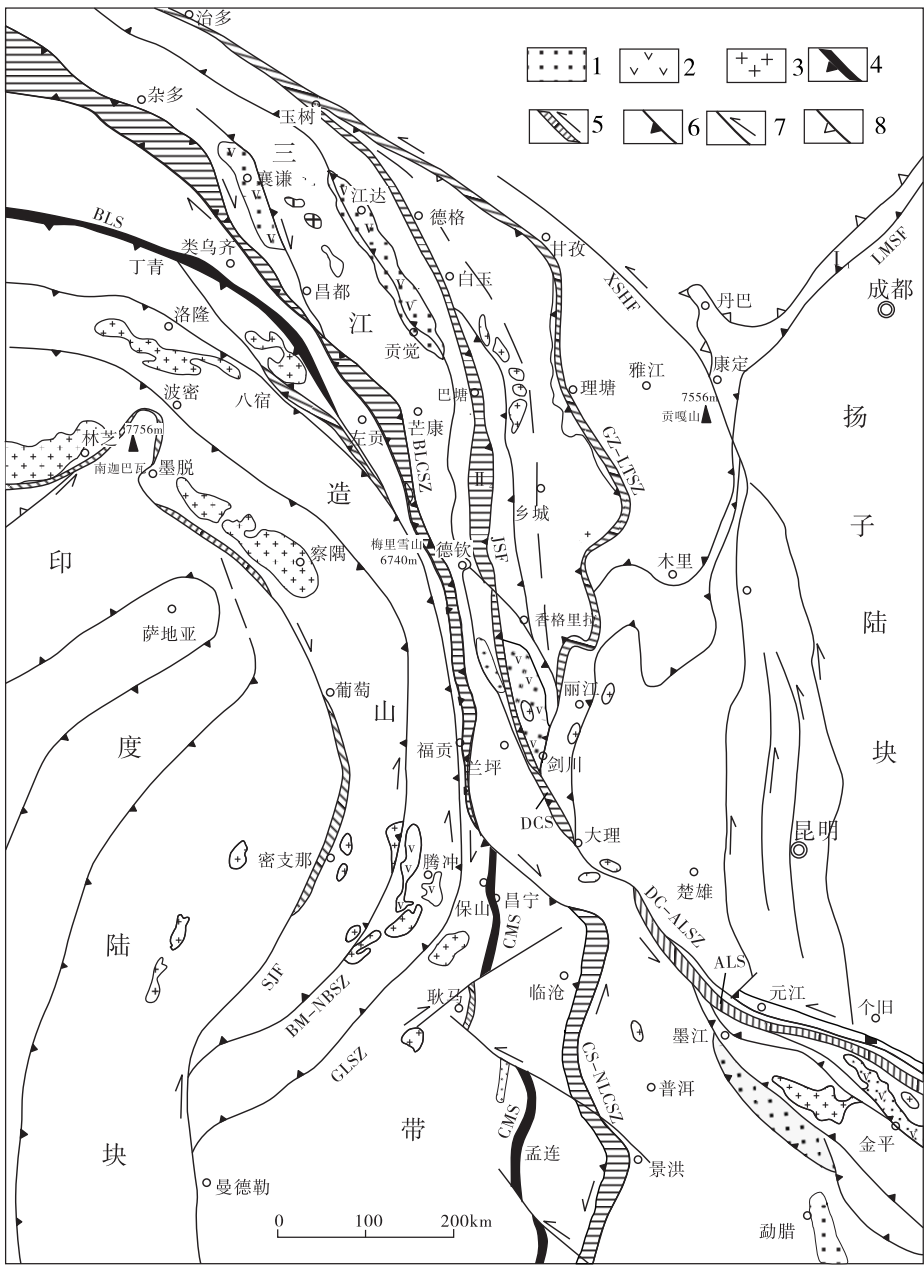


图2 西南三江造山带新构造简图新生代盆地、岩浆岩、核杂岩分布图(据潘桂棠(2003)^[10],补充)

1-新生代盆地;2-新生代火山岩;3-新生代侵入岩;4-板块缝合带;5-板块缝合带及走滑断层;6-推覆逆冲断层;7-走滑断层;8-拆离断层。SJF-实皆断裂;BM-NBSZ-波密-那邦剪切带;GLSZ-高黎贡山剪切带;BLS-班公湖-怒江板块缝合带;CMS-昌宁-孟连板块缝合带;BLCSSZ-北澜沧江剪切走滑带;CS-NLCSZ-崇山-南澜沧江剪切走滑带;JSSZ-金沙江走滑剪切走滑带;DC-AISZ-点苍山-哀牢山剪切走滑带;GZ-LTSZ-甘孜-理塘剪切走滑带;XSHF-断裂;LMS-龙门山断裂带

Fig.2 Neotectonic map of Sanjiang orogenic belt and distribution map of Cenozoic basins, magmatic rocks and core complexes in Southwestern China

中同构造脉体——细粒黑云母花岗岩所得的年龄指示后期顺时针走滑运动的活动期限为 14 ~ 11 Ma。

Mogok 带为一韧性顺时针剪切走滑带,其内的高级变质岩石中的黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 测年揭示南段的

抬升年龄为 36.2 ~ 25.9Ma,中段为 24.2 ~ 16.6 Ma,北段 16 ~ 19.5 Ma。侵入代表 Mogok 韧性顺时针走滑剪切带的变形花岗岩的年龄 15.8 Ma^[8]。

1.2 高黎贡山剪切走滑带

高黎贡山剪切走滑带走向近 N—S,向南终止于

缅甸实皆断裂,向北在西藏与嘉黎剪切带交汇^[32],是一条数百米至数千米宽,几千米长的顺时针的剪切走滑带。

高黎贡剪切带变质变形作用经历了3个阶段:

(1)高黎贡山走滑剪切带形成之前,有61~58Ma的碰撞型花岗岩^[33]和55Ma的变质作用^[27]。Song et al. (2010)认为高黎贡变质岩群经历了早期角闪岩相(650~660℃,7.1~8.3 kbar;685~750℃,6.5~8.4 kbar)和晚期绿片岩相两期变质作用^[34],淡色花岗岩脉的锆石 U-Pb 年龄则分为两期:54~45Ma和23Ma左右。Zhao et al. (2016)采自高黎贡变质岩带南段的花岗质片麻岩变质锆石增生边的 U-Pb 年龄为54~40Ma^[35]。石榴夕线片麻岩和变质泥岩变质锆石增生边的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为22Ma左右^[34]。Liu et al. (2015)在那邦和潞西地区高黎贡变质岩群中发育的淡色花岗岩中得到40~38Ma和27Ma两期年龄,并将前者归因于高黎贡变质岩群早期角闪岩相-麻粒岩相变质作用(720~780℃,8.0~9.0 kbar),而将后者归因于晚期与韧性剪切作用相关的退变质作用^[36]。唐渊等(2016)测试了5个深熔作用过程中形成的淡色花岗岩脉样品的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,显示在45Ma左右形成一个巨大的峰值^[37]。

(2)随着印度大陆和欧亚大陆的进一步碰撞,青藏高原隆升,在喜马拉雅东构造结,主要表现为大型走滑^[38-39]或印支地块群向南东挤出^[40]。新生代大型走滑作用可划三个阶段:40~38Ma、25~22Ma^[34]和13~18Ma^[32]。

李再会(2012)在高黎贡走滑剪切带内的花岗质糜棱岩中获得结晶年龄(41.9 ± 1.0 Ma),锆石增生边的变质年龄($38.4 \text{Ma} \pm 2.1 \text{Ma}$),认为高黎贡剪切走滑断裂顺时针走滑在38.4就已经开始了^[41]。Wang et al. (2006)利用剪切带中的角闪石与黑云母获得的⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代数据表明剪切作用开始于32Ma 终止于27Ma^[42]。

24~19Ma 期变形伴有淡色花岗岩脉的产出,同构造脉体(白云母花岗岩、电气石白云母伟晶岩)的单矿物(白云母)K-Ar 年龄集中在24~22Ma 之间,锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄24~21Ma 之间^[37]。呈捕虏体产于花岗质糜棱岩中的斜长角闪岩的角闪石的 Ar-Ar 法年龄主坪年龄是23.27 Ma,等时线年龄是24.22 Ma。

16~11Ma 期变形表现为顺时针韧性走滑剪切作用,形成了具有高角度或近直立的糜棱面理与N—S 走向、近水平拉伸线理的糜棱岩带。糜棱岩中黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代数据证明顺时针剪切开始于16Ma^[32,39]。丁林等(2013)在瑞丽-龙陵断裂上获得的断裂活动年龄是13.86 Ma,被认为是由于整个地块的顺时针旋转引起的在高黎贡断裂带和那邦断裂带后期脆韧性构造变形^[43]。变形较弱的花岗岩中的黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代数据约束了顺时针剪切终止于10Ma^[39]。16~11Ma 期与安达曼海的扩张、实皆断裂的顺时针活动相一致。

(3)中新世末,约8~5Ma,腾冲地块发生了向南的挤出和顺时针的旋转,引发了腾冲火山岩的喷发和整个地区的快速抬升。剪切带内磷灰石的裂变径迹年龄为8.4~0.9Ma^[44],记录了变质杂岩被抬升到近地表位置时的年龄。新生代腾冲玄武岩、杏仁状玄武岩安山岩、英安质安山岩的形成时代为3.6~0.033Ma。

1.3 崇山-澜沧江走滑剪切带

NNW 走向的崇山-澜沧江走滑剪切带长大于250km、宽10~100km,其向北经碧罗雪山,在东喜马拉雅构造结附近与高黎贡走滑剪切带会聚^[1]。糜棱岩发育,糜棱岩面理产状为 $240^\circ \angle 65^\circ$,具有自西向东的逆冲作用与顺时针走滑特征。崇山-澜沧江走滑剪切带有三期变形^[45]:(1)第一期变形形成直立水平褶皱或斜歪水平褶皱,强烈发育有轴面劈理;(2)第二期变形形成鞘褶皱、无根钩状褶皱、石香肠构造、S-C 组构、碎斑旋转系以及糜棱面理。崇山以北具顺时针剪切的特点,而崇山以南的崇山剪切带为逆时针剪切^[39,46],可能与南汀河 NE 向顺时针走滑错动有关。(3)第三期变形表现为脆性共轭断层,同时变质杂岩抬升到近地表,切过早期的构造。

Akciz et al. (2008)^[46]获得了崇山剪切带内的糜棱岩、变形和未变形的淡色花岗岩脉独居石的 U-Pb 同位素测年,其年龄范围41~17Ma;糜棱岩及淡色花岗岩脉中的白云母或黑云母 Ar-Ar 同位素冷却年龄范围为23~13.5Ma,推测崇山-澜沧江走滑剪切带的走滑剪切作用始于41Ma、终止于17Ma 左右。Wang et al. (1997)认为沿崇山逆时针韧性走滑剪切作用发生在35~20Ma 之间^[1];Wang et al. (2006)据崇山剪切带的变形岩石的 Ar-Ar 热年代学

的数据,认为该带逆时针走滑作用发生在 32Ma 和 29 ~ 27Ma^[42]。Zhang et al. (2010) 据受剪切作用控制的淡色花岗岩的年龄认为剪切作用至少开始于 32Ma^[45],很可能 34Ma 甚至 41Ma 已经开始作用^[45-46];黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代数据表明剪切作用终止于 14 ~ 9Ma^[45-46]。唐渊等(2016)在剪切带内发现的含电气石花岗质脉体获得锆石的 U-Pb 同位素年龄为 21.7 ± 0.3 Ma、 22.7 ± 0.3 Ma,认为代表了剪切作用初期阶段的时代^[37]。该数据与 Akciz et al. (2008) 所得到的糜棱岩中的白云母或黑云母的冷却年龄(~ 23Ma)^[47]大致相当。

1.4 点苍山-哀牢山(红河)剪切走滑带

点苍山-哀牢山(红河)走滑剪切带长度大于 1000km、NW—SE 走向,由北向南依次在雪龙山、点苍山、哀牢山(红河)、瑶山-大象山等地断续出露。

点苍山剪切走滑带长度近 80km,宽 10 ~ 20km、NNW 走向的变质杂岩体^[48]。点苍山剪切带主要由角闪岩相的片麻岩、斜长角闪岩、大理岩、花岗岩以及绿片岩相岩石组成。点苍山剪切带剪切与剥露过程中记录了三期变形^[49]:(1)早期走滑剪切形成 NWW 走向糜棱面理与线理,并指示逆时针剪切;(2)其次为开始剥露,为韧性—脆性过渡的变形;(3)晚期为脆性变形,表现正断层作用,中下地壳物质剥露到地表。

哀牢山(红河)走滑剪切带 SE 向延伸,长大于 350km,为兰坪-思茅地块与扬子陆块分界线。其主要由角闪岩相、绿片岩相变质岩组成。Liu et al. (2012)把哀牢山(红河)走滑剪切带的变形分为三期:第一期为在高温纯剪作用下形成的对称的褶皱、香肠构造以及透镜体,变形温度高达 750℃;第二期变形为单剪变形,经历了逆时针走滑剪切作用,变形温度在 400 ~ 600℃;第三期变形为正断层作用与变质杂岩的抬升与剥露^[3]。

越南北部的瑶山-大象山剪切带为 NE—SE 走向的变质-变形杂岩带,长约 270km、宽约 20km。主要由片麻岩、斜长角闪岩及大量花岗岩脉体组成^[50-51]。表现出韧性剪切的特点^[52],发育中到高角度倾向的糜棱面理与近水平的线理。变质杂岩边界构造带内发育有一些不对称小褶皱和近于直立的线理,为变质杂岩在转换拉张的条件下隆升过程中形成的代表性构造^[51]。

点苍山-哀牢山(红河)剪切走滑带在新生代

经历了复杂的构造演化过程,早期经历左行走滑后期转为右行正断。点苍山-哀牢山-红河剪切带变形分为四期:(1)早期收缩事件的记录表现为大约 58 ~ 56 Ma 的共轴变形和区域性的收缩^[24](2)造山后伸展事件、有高钾碱性岩石组合,大约 43 ~ 30Ma;(3)深变质锆石年龄为 33.1 ~ 28.5 Ma、剪切变形时间为 28 ~ 22Ma 和(4)13 ~ 0 Ma 左右正滑剪切,于 5Ma 开始的顺时针走滑作用^[15,53-55]。

(1)在点苍山地区,大约 55Ma 发生了共轴变形和区域性的早期收缩事件^[24],在点苍山西侧的兰坪盆地广泛发育大规模的逆冲-推覆构造^[56]。

(2)造山后伸展事件以大约在 43 ~ 30Ma 间广泛发育高钾碱性岩石组合为代表,使其在点苍山、哀牢山、大象山地区有富铝变质岩的剥露^[57-59]。赵春强等(2014)认为大约 43 ~ 30Ma 的区域性伸展是存在的。Chung et al. (1997)提出 40 ~ 30Ma 间沿着红河哀牢山构造带上发育的陆内伸展事件^[60],同时在点苍山洱海东部地区和金平地区存在高钾碱性岩浆岩的侵入并伴随着大规模区域金成矿作用。而这次陆内伸展事件与点苍山富铝变质岩中所对应的变质热事件的年龄(31.5 ± 1.5 Ma)^[59]相当。曹淑云等(2009)认为在点苍山地区花岗质岩浆的上升与就位直接受已经发生的逆时针走滑剪切作用的制约,并遭受了剪切作用的强烈改造,而成为花岗质糜棱岩,获得了 30.88 ± 0.32 Ma 的岩浆结晶年龄,并认为逆时针走滑剪切作用的起始时间应该不晚于 30.88 Ma^[26]。Schärer et al. (1990)在哀牢山地区也获得剪切期间发育的花岗质脉体内部的结晶锆石、独居石和磷钇矿的 U-Pb 年龄分别为 33.9 ~ 30.5 Ma、23.9 ~ 22.1 Ma^[61]。这些结果证实了在 43 ~ 30Ma 间发生了造山后伸展事件。

(3)点苍山-哀牢山-红河剪切带在 27 ~ 22Ma 大规模逆时针走滑^[62-63],使得哀牢山-红河剪切带上的变质杂岩体从中下地壳剥露至中上地壳且具有穿时冷却^[3,49]的特点。

红河-哀牢山剪切带变形与未变形的淡色花岗岩锆石测年结果获得的逆时针剪切作用时间为 27 ~ 21Ma^[60,64-66]。Schärer et al (1994)在哀牢山中段获得二长岩内结晶锆石和榍石的 U-Pb 年龄,分别为 26.3 ± 0.3 Ma 和 26.1 ± 0.2 Ma;侵入二长岩内的伟晶岩锆石和榍石 U-Pb 年龄,分别为 24.1 ± 0.2 Ma 和 22.4 ± 0.2 Ma^[61]。Schärer et al (1999)在

点苍山片麻岩内的同剪切就位的浅色脉体内的结晶独居石、磷钇矿和锆石分别获得了 24.2 ± 0.2 Ma、 22.4 ± 0.2 Ma 和 $24 \sim 23$ Ma 的 U-Pb 年龄^[61]。因而,认为沿着红河-哀牢山剪切带的强烈剪切作用($27 \sim 22$ Ma)伴随着剪切带中原岩所遭受的动-热变质作用,同时诱发小规模壳源岩浆活动(24.4 ± 0.89 Ma 岩脉的就位^[61,63])。

通过对哀牢山深变质岩变质锆石的矿物包裹体组合和年代学研究,识别出保存有角闪岩-麻粒岩相矿物组合的变质锆石年龄为 $33.1 \sim 28.5$ Ma,峰期后等温减压熔融时间为 $28 \sim 22$ Ma^[36,67]。由此可见,哀牢山(红河)走滑剪切带存在略早于大规模地壳深熔事件的峰期角闪岩-麻粒岩相变质作用。Searle(2006)提出哀牢山(红河)走滑剪切带内逆时针走滑剪切作用初始活动时间远远晚于前人所述 35 Ma,而是在 21 Ma 后才开始活动^[68]。

大量的 Ar-Ar、K-Ar 数据揭示了瑶山-大象山剪切带的热演化过程。角闪石的测年结果在 $34 \sim 27$ Ma 之间,白云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄在 $33 \sim 24$ Ma 之间,黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄在 $23 \sim 26$ Ma 之间,这些数据可以推测瑶山-大象山剪切带变质杂岩的剥露过程^[15, 52, 69-70]。Tran et al. (1998) 对于大象山变质杂岩开展的变质作用 *P-T-t* 分析揭示出高温变质矿物组合的存在及其后的低温剪切变形作用的发生^[71],并提出大象山杂岩在峰期变质作用后的剥露主要发生于 $31 \sim 24$ Ma 之间,主期剥露作用(从大约 31 Ma 到 28 Ma)是由于哀牢山-红河剪切带伴随着低温糜棱岩化作用发生的逆时针走滑剪切诱发。

(4)在哀牢山-红河逆时针走滑作用结束之后,转为伸展旋扭阶段($10 \sim 0$ Ma)^[6],此时三江东地区发育伸展构造,相伴岩浆侵位^[72],为印度-欧亚陆陆碰撞系与太平洋俯冲系两个动力系统相互作用的结果^[6,73]。约 5 Ma 开始,加厚的地壳伸展塌陷,红河剪切带开始了顺时针走滑作用^[54]。

2 区域性伸展与变质核杂岩、新生代盆地

伸展构造在三江地区及东南亚地区普遍发育。伸展构造最主要的两种表现形式:变质核杂岩和地堑(新生代盆地)。

2.1 区域性伸展与变质核杂岩

在三江地区,变质核杂岩在多地存在,例如雪龙山、点苍山、哀牢山^[24,48,74]、西盟杂岩,越南、泰国以及缅甸的 DayNinConVoi 杂岩、Mogok 片麻岩带、DoiInthanon-DoiSuthep 杂岩和 Bukhang 穹隆(图 2)。

在哀牢山-红河韧性剪切带中出露四个典型变质杂岩体:雪龙山、点苍山、哀牢山、瑶山-大象山^[75]。点苍山变质核杂岩由三部分构成:下盘深变质杂岩和侵位于下盘变质杂岩的侵入体,上盘未变质的古生界地层,以及介于上、下盘之间的拆离断层带。

区域变质核杂岩的主体剥露时间普遍认为介于 $27 \sim 16$ Ma 之间^[76-77],刘俊来等(2007)认为这些变质核杂岩与渐新世-中新世时期区域性伸展作用有关,而伸展作用是由印支地块的差异性旋转产生的^[24],导致地块的伸展和变质核杂岩的剥露。

2.2 区域性伸展与新生代盆地

在新生代,西南三江地区发育一系列走滑拉分盆地,从北向南发育有囊谦盆地、贡觉盆地、兰坪盆地、剑川盆地、洱海盆地、弥渡盆地等(图 2)。

囊谦盆地早期发育古近纪红层,夹有火山碎屑岩;晚期继续有火山活动,主要为粗面岩类,另有浅成侵入的钾长斑岩、二长斑岩和煌斑岩类。张会化等(2004)岩浆岩单矿物黑云母的 Ar-Ar 同位素年龄为 $(37.5 \sim 38.3) \pm 0.2$ Ma^[78]。

贡觉盆地古近纪火山岩以高 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 和低 MgO 、 TiO_2 为特征,属高钾钙碱性中酸性火山岩。火山岩中富集大离子亲石元素(LILE)、轻稀土元素(LREE)、亏损高场强元素(HFSE)和一部分相容元素(Co、Ni、V、Sc);无 Eu 异常但有弱的 Ce 负异常。岩浆源区可能是经历了壳源混合作用的富集交代地幔,反映壳-幔相互作用。全岩和黑云母的表面年龄均在 $40.8 \sim 46.2$ Ma 间^[28],并认为形成于印度-欧亚板块碰撞造山后的伸展环境中,火山活动受水平剪切-走滑断裂带控制^[28]。

剑川盆地是印度板块与欧亚大陆碰撞过程形成的一个新生代拉分盆地,长约 100 km、宽约 40 km 的菱形盆地。在新生代发育一套火山喷发相-火山沉积相组合的剑川组,火山事件的喷发于 $36.23 \pm 0.88 \sim 35.46 \pm 0.76$ Ma^[79-80]。剑川盆地发育在逆时针走滑断裂带中,盆地周围边界断层均表现出正断层性质,为逆时针走滑断裂系中的张裂。向宏发

等(2009)通过裂变径迹测年研究发现盆地遭褶皱变形的双河组(N_{1s})地层年龄为 (15.8 ± 1.8) Ma,表明盆地近 EW 向挤压作用发生在 15Ma 左右;盆缘主断裂的逆时针逆推运动发生在 (5.4 ± 1.1) Ma,表明 NW 向挤压运动发生在 $(15 \sim 5.4)$ Ma 间;后期正断引张运动开始于距今 5.4My 前,强烈活动于 $(1.5 \sim 1.6)$ Ma,被断裂抬升的剑川组(N_{2j})和晚上新世粗面岩的年龄介于 $(2.4 \pm 0.85 \sim 3.1 \pm 0.5)$ Ma^[81],表明后期正断裂运动发生在 (1.6 ± 0.7) Ma。也即区内地壳变形由早期(E_3)近 EW 挤压经中新世(N_2)NW 向挤压,至上新世(N_2)后则以引张裂陷作用为主^[82]。

以上分析表明,西南三江造山带新生代出现了 2 期以发育断陷盆地为特征的构造松弛阶段:古始新世中期至古始新世中期($46.2 \sim 35.46$ Ma);上新世至早更新世($5.4 \sim 1$ Ma),代表了构造挤出造山后的重力垮塌和伸展。

3 走滑过程中的碱性岩浆活动

西南三江地区新生代碱性岩浆岩分布严格受控于青藏高原东侧巨型走滑断裂构造体系。根据新生代岩浆作用的空间分布和岩石组合及特征,大致以澜沧江断裂带为界,将西南三江地区新生代岩浆岩分为东、西两个大的岩带和 10 个小的岩带(或岩区)^[83]。西带岩浆岩主要以酸性和中酸性侵入岩以及各种长英质脉岩为特征,也包括云英岩和电气石石英岩等一些少见的变质作用产物。在腾冲地区除发育大量中酸性火山岩之外,近些年也发现很多玄武岩类火山岩。东带主要分布在金沙江-哀牢山-红河断裂带及其附近,东带新生代岩浆岩的岩石组合类型以浅成和超浅成相的钾质富碱斑岩和富碱火山岩最为瞩目,但也包括大量火山喷发相和溢流相的碱性火山岩。高钾碱性岩浆活动是一次在区域伸展环境条件下发育的岩浆事件,形成了包括岩基、岩株和岩墙(岩脉)等不同规模的岩体,以及相伴发育的火山作用。这次岩浆事件伴随着一系列具有幔源特点的岩浆岩的就位,包括侵入岩和火山岩,如粗面岩、正长岩、煌斑岩等。它们共同组成了世界瞩目的西南三江新生代碱性火山岩带。

岩石具有富集大离子亲石元素、轻重稀土分馏强烈、亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素相似的特征,

具有弱的 Eu 负异常,⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值为 $0.7067 \sim 0.7078$, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为 $-3.8 \sim -3.7$,具有埃达克质岩浆属性,有着较高的 Sr、Sr/Y、La/Yb 值和低的 Y、Yb 含量,表明花岗岩起源于增厚的镁铁质新生下地壳。正长岩是由交代富集的岩石圈地幔熔融产生的基性岩浆演化而来的产物。郭小飞等(2018)认为金沙江-哀牢山富碱侵入岩与区内剪切走滑断裂系统伴生,可能暗示断裂系统切割深度已达岩石圈地幔^[84]。而哀牢山深变质带内同期的岩浆活动被认为是印支地块挤出过程产生,可能说明了挤压和伸展并存的构造应力体制。高钾碱性岩浆活动性发生于印度-欧亚板块碰撞之后,是在后碰撞区域伸展作用过程中发育形成。也有认为印度与欧亚板块的持续汇聚导致哀牢山-红河断裂带下部地壳和岩石圈地幔的增厚,在 35Ma 左右三江地区应力转变引起了岩石圈地幔的拆沉,使得软流圈上涌引起下地壳和岩石圈地幔的部分熔融,然后岩浆沿着地壳裂隙上涌和侵位,形成不同类型的富碱斑岩。

4 西南三江造山带新生代时空演化

西南三江造山带的演化历史复杂,多阶段挤压造山作用、区域性走滑造山作用和后造山伸展作用等在侧向碰撞造山的演化过程中先后发生。

4.1 挤压收缩变形(60~40Ma)

区域性挤压收缩变形在三江造山带表现为不同规模的逆冲与推覆,主体阶段发育于区域构造演化的最早期阶段。大型逆冲断层与推覆构造叠加在古近纪早期(古新世-始新世早期)陆内的沉积盆地上,并相伴发育了古近纪晚期(始新世末与渐新世)山前磨拉石建造,改造了古近纪沉积盆地的原型而使之成为肢解的残余盆地,如新生代剑川、兰坪盆地^[21]。

印度板块与欧亚板块的初始碰撞始于 55Ma 前后。张进江等(2003)认为 62~59Ma 的变形变质事件可能代表印度与欧亚大陆的初期碰撞,同时认为碰撞由西向东依次进行的^[91]。高黎贡剪切带淡色花岗岩脉的锆石 U-Pb 年龄集中在 54~45Ma,丁林等(2013)证明东构造结陆壳高压麻粒岩的峰期变质年龄为 59Ma 左右^[43],说明当时此区已开始陆壳俯冲。这一时期正是印度板块与欧亚板块全面正向碰撞的时期,大规模收缩作用发生,出现了区域性逆冲断层与推覆构造^[92]。

4.2 走滑伸展热隆(40~38Ma)

许志琴等(2016)在厘定青藏高原东南缘大规模走滑断裂的活动时限和运动学特征的基础上,确定40~35 Ma以来,自西向东的那邦、盈江、高黎贡-嘉黎顺时针走滑、澜沧江顺时针/逆时针走滑、金沙江-红河和鲜水河逆时针走滑等断裂的活动的向东迁移,以及西部以顺时针走滑为主,和东侧以逆时针走滑为主的运动学特征^[8]。那邦韧性剪切带中糜棱岩的变质锆石和岩浆锆石的年龄为40~50 Ma^[8]。高黎贡剪切带顺时针走滑可能在~40Ma开始活动^[34]。位于兰坪-思茅地块西侧的崇山剪切带在38Ma之前开始遭受挤压变形^[45],形成区域性褶皱-逆断层组合,代表最早期的纯剪应变。

西南三江地区新生代岩浆作用的时限主要集中在45~30Ma之间。滇西剑川盆地火山作用发生于 $36.23 \pm 0.88 \sim 35.46 \pm 0.76$ Ma。在36Ma左右,金沙江-剑川-哀牢山地区发育一期重要的富钾岩浆事件,Deng et al. (2014a)解释为岩石圈地幔伸展拆沉的结果^[6]。

这样既表现剪切走滑,又有岩浆作用的热事件,此阶段为一走滑伸展热隆。

4.3 剪切走滑深熔(38~22Ma)

36~34Ma的高钾碱性火山岩为西南三江造山带广泛存在的一期高钾岩浆事件^[4,62,93]。高黎贡剪切带淡色花岗岩脉的锆石U-Pb年龄集中在23Ma左右。崇山剪切带淡色花岗岩的年龄为32Ma,表明剪切作用至少开始于32Ma^[46],持续到22Ma左右,如崇山剪切带含电气石花岗质脉体锆石的U-Pb同位素测年为 21.7 ± 0.3 Ma、 22.7 ± 0.3 Ma。哀牢山深变质岩变质锆石年龄为33.1~28.5 Ma,峰期后等温减压熔融时间为28~22Ma^[94]。瑶山-大象山剪切带的热演化过程,角闪石的测年结果显示在34~27Ma之间。根据构造-古地理重建^[21],28Ma时欧亚大陆边界总体呈NWW向延伸,哀牢山地区的深熔碱性岩浆活动发生在30~28Ma期间^[94]。

随着印度板块逐渐向NNE方向挤入,应力场转化为剪切,并于34~32Ma开始发生简单剪切应变^[45-46]。Leloup et al. (1995)也强调了剪切作用与岩浆作用的同期性,并把岩浆作用的发生归因于剪切所产生的热^[14]。

4.4 走滑剪切伸展(22~11Ma)

21Ma时期逆时针剪切作用基本结束;随后21

~5Ma东部地块发生大角度顺时针旋转,红河-哀牢山断裂由逆时针局部转变为高黎贡山顺时针走滑断裂,实皆断裂由逆时针转变为顺时针^[21,94],西南三江地区南北走向的构造带才最终形成^[21,94]。Searle(2006)则把这时变形的淡色花岗岩的结晶年龄作为了剪切运动的开始时间,而将未变形花岗岩的结晶年龄视为剪切变形时间的结束,提出剪切作用最早开始于21Ma,可能终止于5.5Ma^[68,95]。

与此同时,西南三江地区的主要地块沿着两条重要边界断裂,即红河-哀牢山断裂与实皆断裂顺时针走滑。沿着边界断裂的深部层次发育了高温糜棱岩组合,它们后期随着变质核杂岩的下盘一起抬升,并于15Ma前后相继剥露到近地表^[21,96]。

4.5 走滑剥蚀隆升(11~5Ma)

张进江等(2003)认为13Ma左右有一次强烈挤压的事件,并伴生高原内部开始出现东西向伸展^[93]。东亚的气候在~8Ma以来发生了急剧变化,同时整个青藏高原在~8Ma开始快速隆升并达到最大高度,南迦巴瓦构造结7~6Ma的脉岩侵位,表明经历了快速的剥蚀-隆升。南迦巴瓦地区后期高角度正断层体系的活动为快速隆升导致的一种垮塌构造。

红河-哀牢山剪切带顺时针脆性转换断裂活动时间至少是在8Ma之后^[65]。红河-哀牢山与实皆等剪切带由逆时针转变为顺时针走滑具有重要的大地构造意义,被认为是印支块体总体从近东西向展布顺时针旋转为近南北向展布的最关键表现之一,而由逆时针转变为顺时针走滑断裂的年代学证据(8Ma)是印度大陆向北楔入的关键时限制约^[49]。进一步调节着印度-欧亚陆-陆碰撞作用,为加厚的地壳持续伸展塌陷的结果。

5 西南三江地区新生代走滑造山探讨

西南三江造山带的构造模型有多种,主流有两种:(1)第一种,强调了大型走滑断层在调节陆-陆碰撞应力中所起到的重要作用,认为印度板块相对于扬子陆块向北运动,引起夹持于其间的印支地块向东南方向大规模逃逸,并导致了南海的张开,地块边界发育了深切岩石圈的大规模走滑断层,并形成较强的变形带,陆块内部则保留有相对较弱的变形^[8,12-14,16]。(2)第二观点是粘滞性流体模型,认为地壳的收缩变形与增厚作用才是调节陆-陆碰撞

的主要机制,垂直岩石圈方向发生的剪切作用则处于次要的地位,且只发生了较小规模的走滑位移,切割深度也局限在上地壳^[17-20]。另外还有中下地壳韧性通道流模型^[96-97]等。响应两大洲的碰撞,西南三江造山带的块体是“旋转”^[20],还是“逸出”^[49]一直存有争论。因而,目前争议的焦点还是在机制及动力学体制。

作者通过研究认为西南三江地区的造山作用主要表现为走滑造山,为5种运动机制及动力学体制。(1)碰撞挤压造山作用,结晶基底呈大型隆起和拗折,莫霍面下降,从而使地壳增厚,构成造山带。(2)走滑拉张热隆(岩浆)造山作用,印度板块与欧亚板块碰撞由正向转为斜向,喜马拉雅东构造结楔入西南三江地区,区域性大规模走滑作用形成区内不均匀热隆-伸展。这种伸展作用热流上涌时,在壳幔之间形成局部混熔、下地壳层产生区域变质及混合岩化作用、韧性壳层内产生纯剪应变、上地壳产生脆性-脆韧性变形。(3)走滑剪切深熔造山作用,随着印度板块持续向欧亚板块斜向俯冲与碰撞,扬子陆块的阻挡作用突显,从初期的走滑拉张转变为走滑挤压,这些挤压的剪切走滑断裂不仅深切地幔,而且导致下地壳局部熔融形成花岗质岩浆,驱动岩浆斜向上升,并控制岩体侵位,沿断裂带有一系列花岗质深成岩体展布。与此同时地壳在平面上缩短,垂向上增厚,构成造山带。(4)剪切伸展拆离造山作用,区域伸展构造叠加在挤压构造之上,出现局部伸展,伴随岩浆的侵入,使其变质核杂岩剥露,为走滑-拆离构造耦合机制所造成。上覆岩石圈板块受到强烈的伸展,导致地堑与半地堑伸展构造体系的发育,并诱发了亏损地幔减压熔融产生的板内高钾岩浆岩的就位。伸展构造的发生具有继承性,即沿着先前发育的实皆、哀牢山、澜沧江等收缩性和走滑断裂构造部位等发育。点苍山、哀牢山等下地壳深变质岩的剥露、变质核杂岩的发育和微弱的钙碱性岩浆活动性是此间发育的主要地质作用。(5)走滑垮塌造山作用,随着造山垮塌的开始,中上地壳发生了伸展剪切作用,使挤压剪切带与组构重新活化,继承性组构的运动方向逆转,从逆时针转为顺时针剪切走滑,快速隆升、剥蚀导致的一种垮塌造山作用。

西南三江造山带是印度板块向欧亚板块斜向俯冲,形成多条巨型走滑剪切带之一(图2),其间的

块体旋转向南顺时针走滑(图3)。印度板块向北楔入,扬子陆块相对固定,这样西边的实皆断裂以顺时针走滑为主要活动方式、东边哀牢山-红河断裂以逆时针走滑为活动方式,在8Ma之后转为顺时针走滑,并作为西南三江造山带的边界断裂。走滑断层系起了位移量调节和构造变换作用,这样西南三江造山带为一特殊的走滑造山带,走滑断裂活动是其构造体系中主要的断裂活动方式。

同时,西南三江造山带物质整体围绕东喜马拉雅构造结的顺时针旋转运动是非常清晰的。以崇山-澜沧江剪切走滑断裂为界,在活动方式上,东部逆时针走滑断裂最为显著,构成了大多数一级和二级构造边界带的主体,为受反向走滑断裂制约的刚性体的线性侧向挤出运动学模式(图3A-b),以挤出为主;西部是顺时针走滑断裂,一般构成一级与二级构造带中的次级构造,或构成一些三级构造带的主体,为受同向走滑断裂制约的刚性体的旋转挤出运动学模式(图3A-c),以旋转为主。

走滑造山作用对西南三江造山带形成的贡献主要表现在控制和影响着本区的地质演化,包括沉积作用、岩浆作用、变质作用和成矿作用等,造成地壳增厚和减薄以及物质和应力的调整,从而成为造山机制之一。同时使地块发生位移和旋转,大部分地块旋转是通过走滑断层完成的。大型走滑断层强烈的剪切走滑应变在块体边界形成韧性剪切带、动热变质带、伸展盆地、伸展核杂岩、火山活动带和岩浆活动带。值得注意的是,从西南三江造山带由西向东,旋转的规模有减小的趋势,尤其是大的走滑断裂两侧,如哀牢山-红河左旋走滑断裂两侧,旋转的规模具有明显的差别。组成造山带内的地块一般都发生过旋转,相邻地块转动的角度和大小各有差异,这是走滑造山作用的另一主要表现形式。

6 结论

西南三江造山带是印度板块向欧亚板块斜向俯冲,使青藏高原物质东流与相对静止的东构造结和扬子陆块之间形成的简单剪切作用,导致形成多条巨型顺时针走滑剪切带,其间的块体向南逸出并顺时针旋转。走滑剪切带起了位移量调节和构造变换作用。西南三江地区的造山作用主要表现为走滑造山。

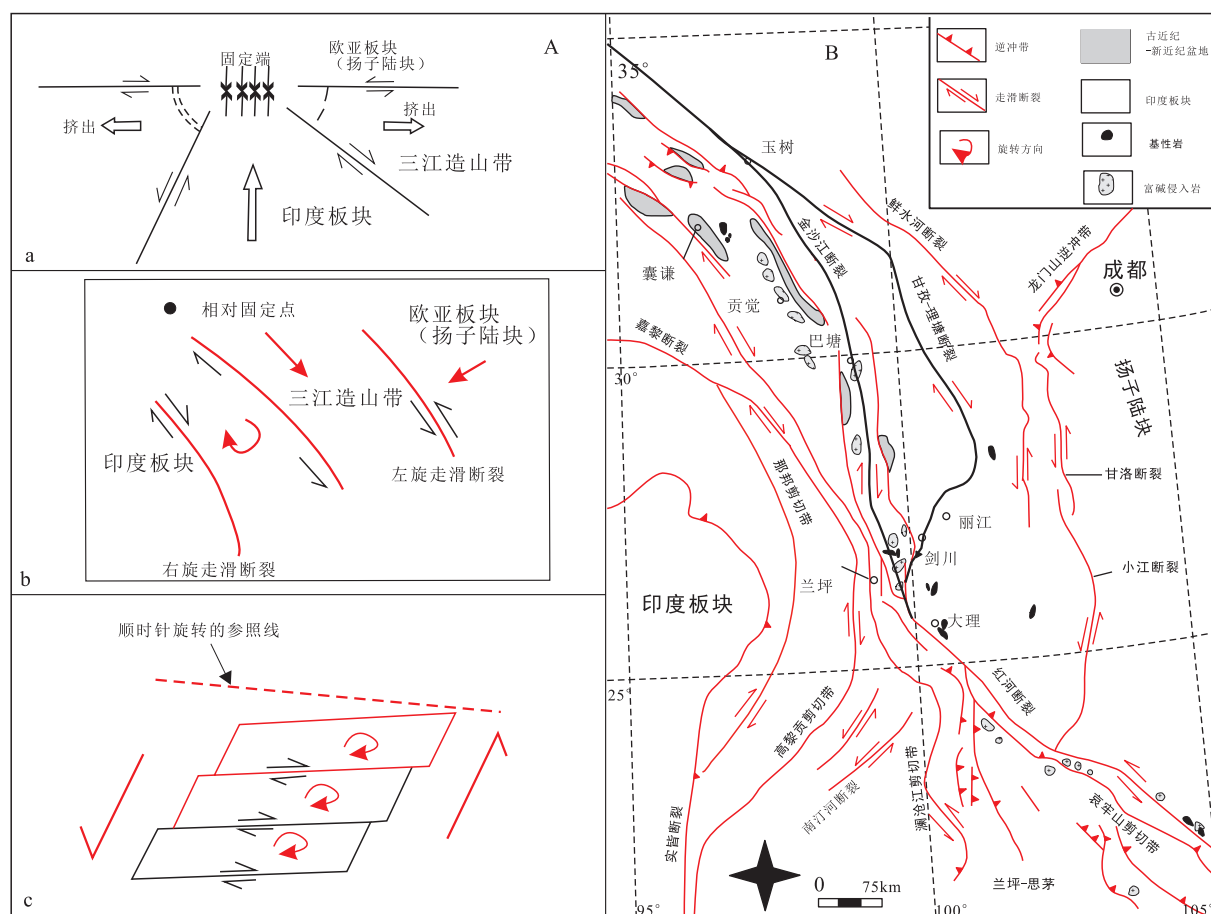


图3 西南三江造山带走滑造山运动学模式

A. 西南三江造山带走滑造山运动学模式, 据吴中海, 2010 修改^[98]; B. 西南三江造山带走滑断裂体系简图

A. a. 印度板块楔入欧亚板块, 西南三江造山带受反向走滑断裂制约, 被侧向挤压、挤出; 断裂制约的刚性地体的侧向挤出; A. b. 受反向走滑断裂制约的刚性体的线性侧向挤出运动学模式; A. c. 受同向走滑断裂制约的刚性体的旋转挤出运动学模式。

Fig. 3 Kinematic model of slip orogeny of Sanjiang orogenic belt in Southwestern China

西南三江造山带经历了 5 次运动学及动力学体制的转变: (1) 60 ~ 40Ma 的俯冲碰撞, 以印度—欧亚板块陆—陆碰撞、地壳加厚为代表, 地壳挤压变形, 推覆为主要的构造样式; (2) 40 ~ 38Ma 的走滑伸展热隆, 地幔上涌、碱性岩浆岩侵入与火山喷发、走滑拉分盆地形成; (3) 38 ~ 23Ma 走滑剪切深熔, 强烈走滑剪切, 伴有深熔花岗岩(脉)侵入, 剪切变质带形成; (4) 23 ~ 14Ma 走滑拆离, 变质核杂岩剥露, 地块向南“逃逸”; (5) 11 ~ 0Ma 的走滑垮塌, 中上地壳形成了伸展剪切带, 使挤压剪切带与组构重新活化, 继承性组构的运动方向逆转, 红河—哀牢山剪切带在 8Ma 由逆时针转为顺时针。

参考文献:

[1] WANG E, BURCHFIEL B C. Interpretation of Cenozoic tectonics

in the Right-Lateral accommodation Zone between the Ailao Shan shear Zone and the eastern Himalayan Syntaxis[J]. International Geology Review, 1997, 39(3): 191–219.

[2] 王二七, 苏哲, 许光. 我国的一些造山带的侧向挤出构造[J]. 地质科学, 2009, 44(4): 1266–1288.

[3] LIU J L, YUAN T, MY-DUNG T, et al. 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]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 47(47): 231–251.

[4] LU Y J, KERRICH R, CAWOOD P A, et al. Zircon SHRIMP U–Pb geochronology of potassic felsic intrusions in western Yunnan, SW China: Constraints on the relationship of magmatism to the Jinsha suture [J]. Gondwana Research, 2012, 22(2): 737–747.

[5] 邓军, 侯增谦, 莫宣学, 等. 三江特提斯复合造山与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 37–42.

[6] DENG J, WANG Q F, LI G J. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang Region, southwestern China

- [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 268–299.
- [7] DENG J, WANG Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework [J]. *Gondwana Research*, 2016, 36: 219–274.
- [8] 许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 等. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. *中国地质*, 2016, 43(1): 1–42.
- [9] 李兴振, 尹福光. 东昆仑与西昆仑地质构造对比研究之刍议[J]. *地质通报*, 2002, 21(11): 777–783.
- [10] 潘桂棠. 西南“三江”多岛弧造山过程成矿系统与资源评价[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1–420.
- [11] 李文昌. 义敦岛弧燕山期钨铜多金属成矿系统研究[J]. *矿床地质*, 2012, 31(S1): 993–994.
- [12] TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 1982, 10(12): 611–616.
- [13] TAPPONNIER P, PELTZER G, ARMijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1986, 19(1): 113–157.
- [14] LELOUP P H, LACASSIN R, TAPPONNIER P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), tertiary transform boundary of Indochina [J]. *Tectonophysics*, 1995, 251(1/4): 3–10, 13–84.
- [15] LELOUP P H, ARNAUD N, LACASSIN R, et al. New constraints on the structure, Thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia [J]. *Journal of geophysical research. Solid earth*, 2001, 106 (B4): 6683–6732.
- [16] REPLUMAZ A, TAPPONNIER P. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks [J]. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 2003, 108(B6): 2285.
- [17] ENGLAND P, HOUSEMAN G. Finite strain calculations of continental deformation: Comparison with the India-Asia Collision Zone [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91 (B3): 3664–3676.
- [18] VILOTTE J P, MADARIAGA R, DAIGNIERES M, et al. Numerical study of continental collision: Influence of buoyancy forces and an initial stiff inclusion [J]. *Geophysical Journal International*, 1986, 84(2): 279–310.
- [19] HOUSEMAN G, ENGLAND P. Finite strain calculations of continental deformation: Method and general results for convergent zones [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B3): 3651–3663.
- [20] ENGLAND P, MOLNAR P. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults [J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 130(3): 551–582.
- [21] 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 等. 印度–欧亚侧向碰撞带构造—岩浆演化的动力学背景与过程—以藏东三江地区构造演化为例[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 775–786.
- [22] 刘宇平, 陈智梁, 唐文清, 等. 青藏高原东部及周边现时地壳运动[J]. *沉积与特提斯地质*, 2003, 23(4): 1–8.
- [23] 刘和甫, 夏义平, 殷进垠. 走滑造山带与盆地耦合机制[J]. *地学前缘*, 1999, 6(3): 121.
- [24] 刘俊来, 曹淑云, 翟云峰, 等. 用陆块旋转解释藏东南新新世—中新世伸展作用——来自点苍山及邻区变质核杂岩的证据[J]. *地学前缘*, 2007, 14(4): 40–48.
- [25] 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造—岩浆事件的约束[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 43–51.
- [26] 曹淑云, 刘俊来, LEISS B, 等. 哀牢山—红河剪切带左行走滑作用起始时间约束—点苍山高温糜棱岩的显微构造与热年代学证据[J]. *地质学报*, 2009, 83(10): 1388–1400.
- [27] 蓝江波, 徐义刚, 杨启军, 等. 滇西高黎贡带 40Ma OIB 型基性岩浆活动: 消减特提斯洋片与印度板块断离的产物[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1334–1346.
- [28] 李忠雄, 陈智梁, STUDNICKE-GIZBER C, 等. 青藏高原东部贡觉盆地新生代火山岩特征及其构造意义[J]. *地球学报*, 2006, 27(4): 297–302.
- [29] 戚学祥, 赵宇浩, 朱路华, 等. 滇西点苍山构造带新生代岩浆活动及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(8): 2217–2228.
- [30] 沈阳, 郑远川, 张爱萍, 等. 滇西剑川始新世富碱岩岩锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学及其对岩石成因的制约[J]. *岩石学报*, 2019, 35(3): 849–866.
- [31] 季建清, 钟大赉, 桑海清, 等. 滇西南那邦变质基性岩两期变质作用的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究[J]. *岩石学报*, 2000, 16(2): 227–232.
- [32] Lin TH, Lo CH, Chung SL, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Jiali and Gaoligong shear zones: Implications for crustal deformation around the Eastern Himalayan Syntaxis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(5): 674–685.
- [33] 丛峰, 林仕良, 谢韬, 等. 滇西腾冲—梁河地区花岗岩锆石稀土元素组成和 U-Pb 同位素年龄[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(3): 573–580.
- [34] Song S G, Niu Y L, Wei C J, et al. Metamorphism, anatexis, zircon ages and tectonic evolution of the Gongshan block in the northern Indochina continent: An eastern extension of the Lhasa Block [J]. *Lithos*, 2010, 120(3–4): 327–346.
- [35] Zhao S W, Lai S C, Qin J F, et al. Tectono-magmatic evolution of the Gaoligong belt, southeastern margin of the Tibetan Plateau: Constraints from granitic gneisses and granitoid intrusions [J]. *Gondwana Research*, 2016, 35: 238–256.
- [36] Liu F, Wang F, Liu P, et al. Multiple partial melting events in the Ailao Shan-Red River and Gaoligong Shan complex belts, SE Tibetan Plateau: Zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within migmatites [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 110: 151–169.
- [37] 唐渊, 王冬兵, 廖世勇, 等. 滇西高黎贡变质岩带南段淡色花岗岩岩脉年代学特征及构造意义[J]. *岩石学报*, 2016, 32(8): 2347–2366.
- [38] Liu J L, Cao S Y, Zhai Y F, et al. Rotation of crustal blocks: an explanation of Oligo-Miocene extension in southeastern Tibet: Evidenced by the Diancangshan and nearby metamorphic core [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(4): 40–48.

- [39] Zhang B, Zhang J J, Zhong D L, et al. Polystage deformation of the Gaoligong metamorphic zone: Structures, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mica ages, and tectonic implications [J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 37: 1–18.
- [40] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. *地质学报*, 2011, 85(1): 1–33.
- [41] 李再会, 王立全, 林仕良, 等. 滇西高黎贡剪切带内花岗质糜棱岩的锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *地质通报*, 2012, 31(8): 1287–1295.
- [42] Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, et al. 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 [J]. *Tectonophysics*, 2006, 418(3–4): 235–254.
- [43] 丁林, 钟大赉. 印度与欧亚板块碰撞以来东喜马拉雅构造结的演化[J]. *地质科学*, 2013, 48(2): 317–333.
- [44] Wang G, Wan J L, Wang E C, et al. 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 [J]. *Tectonophysics*, 2008, 460(1–4): 1–20.
- [45] Zhang B, Zhang J J, Zhong D L. Structure, kinematics and ages of transpression during strain-partitioning in the Chongshan shear zone, western Yunnan, China [J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(4): 445–463.
- [46] Akciz S, Burchfiel B C, Crowley, et al. Geometry, kinematics, and regional significance of the Chong Shan shear zone, Eastern Himalayan Syntaxis, Yunnan, China [J]. *Geosphere*, 2008, 4(1): 292–314.
- [47] Yang T N, Liang M J, Fan J W, et al. Paleogene sedimentation, volcanism, and deformation in eastern: Evidence from structures, geochemistry, and zircon U-Pb dating in the Jianchuan Basin, SW China [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 521–535.
- [48] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 1990, 343(6257): 431–437.
- [49] Cao S Y, Neubauer F, Liu J L, et al. 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]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(3): 525–550.
- [50] Jolivet L, Beyssac O, Goffé B, et al. Oligo-Miocene midcrustal subhorizontal shear zone in Indochina [J]. *Tectonics*, 2001, 20(1): 46–57.
- [51] Anczkiewicz R, Viola G, Müntener O, et al. Structure and shearing conditions in the Day Nui Con Voi massif: Implications for the evolution of the Red River shear zone in northern Vietnam [J]. *Tectonics*, 2007, 26(2): TC2002, doi: 10.1029/2006TC001972.
- [52] Viola G, Anczkiewicz R. Exhumation history of the Red River shear zone in northern Vietnam: New insights from zircon and apatite fission-track analysis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33(1–2): 78–90.
- [53] Allen C R, Gillespie A R, Han Y, et al. Red River and associated faults, Yunnan Province, China: Quaternary geology, slip rates, and seismic hazard [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, 95: 686–700.
- [54] Leloup P H, Kienast J R. High-temperature metamorphism in a major strike-slip shear zone: The Ailao Shan-Red River, People's Republic of China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 118(1–4): 213–234.
- [55] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India Asia collision: an experimental approach [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93: 15085–15117.
- [56] 胡永兴, 方沛英, 李爽, 等. 滇西兰坪盆地构造演化特征与成矿关系[J]. *云南地质*, 2013, 32(01): 113–115 + 101.
- [57] Qi X, Santosh M, Zhu L, et al. Mid-Neoproterozoic arc magmatism in the northeastern margin of the Indochina block, SW China: Geochronological and petrogenetic constraints and implications for Gondwana assembly [J]. *Precambrian Research*, 2014, 245(245): 207–224.
- [58] 吴俊峻, 刘俊来, TRAN My Dung, 等. 越南西北部大象山超高温变质岩的发现及其区域构造意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2809–2820.
- [59] 赵春强, 赵利, 曹淑云, 等. 点苍山变质杂岩新生代变质-变形演化及其区域构造内涵[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 851–866.
- [60] Chung S L, Lee T Y, Lo C H, et al. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan-Red River shear zone [J]. *Geology*, 1997, 25(4): 311–314.
- [61] Schärer U, Tapponnier P, Lacassin R, et al. Intraplate tectonics in Asia: A precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 97(1–2): 65–77.
- [62] Schärer U, Zhang L S, Tapponnier P. Duration of strike-slip movement in large shear zones: The Red River belt, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 126(4): 379–397.
- [63] Harrison T M, Chen W J, Leloup P H. An Early Miocene transition in deformation regime within the Red River fault zone, Yunnan, and its significance for Indo-Asian tectonics [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B5): 7159–7182.
- [64] Chung S L, Searle M P, Yeh M W. The age of the potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan-Red River shear zone: Implications for the onsets age of left-lateral shearing: A discussion [J]. *The Journal of Geology*, 2008, 116(2): 201–204.
- [65] Cao S Y, Liu J L, Leiss B, et al. 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 [J]. *Gondwana*

- Research, 2011, 19(4):975–993.
- [66] Tang Y, Liu J L, Tran M D, et al. Timing of left-lateral shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Constraints from zircon U-Pb ages granitic rocks in the shear zone along the Ailao-Shan Range, western Yunnan, China [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2013, 102(3):605–626.
- [67] Liu J, Chen X, Wu W, et al. New tectono-geochronological constraints on timing of shearing along the Ailao Shan-Red River shear zone: Implications for genesis of Ailao Shan gold mineralization [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103: 70–86.
- [68] Searle M P. Role of the Red River Shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia [J]. *Journal of the Geological Society*, 2006, 163(6):1025–1036.
- [69] Nam TN, Toriumi M, Itaya T. P-T-t paths and post-metamorphic exhumation of the Day Nui Con Voi shear zone in Vietnam [J]. *Tectonophysics*, 1998, 290(3–4):299–318.
- [70] Wang P L, Lo C H, Chung S L, et al. Onset timing of left-lateral movement along the Ailao Shan-Red River shear zone: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating constraint from the Nam Dinh area, northeastern Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18(3): 281–292.
- [71] Tran N N, Toriumi M S, Sano Y J, et al. 2.9, 2.36, and 1.96 Ga zircons in orthogneiss south of the Red River shear zone in Vietnam: evidence from SHRIMP U-Pb dating and tectonothermal implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21:743–753.
- [72] Flower M F J, Hoang N, Lo C H, et al. Potassic magma genesis and the Ailao Shan-Red River fault [J]. *Journal of Geodynamics*, 2013, 69:84–105.
- [73] Burchfiel B C, Zhiliang C. Tectonics of the southeastern Tibetan Plateau and its adjacent foreland [J]. *Memoir of the Geological Society of America*, 2013, 210:1–164.
- [74] 张世涛, 冯庆来, 王义昭. 甘孜-理塘构造带泥盆系的深水沉积 [J]. *地质科技情报*, 2000, 19(3):17–20.
- [75] 刘俊来, 王安建, 曹淑云, 等. 滇西点苍山杂岩中混合岩的地质年代学分析及其区域构造内涵 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(3):413–420.
- [76] Morley C K, Woganan N, Sankumarn N, et al. Late Oligocene - Recent stress evolution in rift basins of northern and central Thailand: Implications for escape tectonics [J]. *Tectonophysics*, 2001, 334(2):115–150.
- [77] Philippe H L, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina [J]. *Tectonophysics*, 1995:3–10 + 13–84.
- [78] 张会化. 金沙江-红河构造带北段新生代高钾岩浆活动的 Ar-Ar 热年代学和地球化学研究 [D]. 北京:中国科学院研究生院硕士论文, 2004.
- [79] 沙绍礼, 敖德恩. 大理-剑川地区新生代火山岩岩石学特征及火山喷发期研究 [J]. *云南地质*, 2001, 20(4):361–368.
- [80] 覃琼, 徐亚东, 张克信, 等. 滇西剑川盆地剑川组火山事件的定年和古环境研究 [J]. *地质学报*, 2015, 92:2096–2105.
- [81] 向宏发, 张秉良, 张晚霞, 等. 剑川盆地第三纪以来地壳变形的地质分析与 FT 测年 [J]. *地质学报*, 2009, 83(2):230–238.
- [82] 唐渊, 尹福光, 王立全, 等. 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 [J]. *岩石学报*, 2013, (4):215–228.
- [83] 莫宣学, 等. 青藏高原新生代碰撞—后碰撞火成岩 [M]. 北京:地质出版社, 2009.
- [84] 郭小飞, 刘汇川, 吴开兴, 等. 金沙江-哀牢山富碱侵入岩带的判别、成因及构造环境 [J]. *江西理工大学学报*, 2018, 39(5):71–78.
- [85] 夏萍, 徐义刚. 滇西岩石圈地幔域分区和富集机制: 新生代两类超钾质火山岩的对比研究 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2004, (12):1118–1128.
- [86] Wang J H, Yin A, Harrison T M, et al. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2001, 188(1–2): 123–133.
- [87] 王江海, 尹安, Harrison T M 等. 青藏东缘新生代高钾岩浆活动的热年代学制约 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, (4): 231–233.
- [88] 王江海, 周江羽, 张玉泉, 等. 青藏东缘新生代两类高钾岩浆活动的热年代学研究 [J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2002, 32(07):529–537.
- [89] 赵欣, 喻学惠, 莫宣学, 等. 滇西新生代富碱斑岩及其深源包体的岩石学和地球化学特征 [J]. *现代地质* 2004, (02):217–228.
- [90] 王建, 李建平. 滇西大理-剑川地区钾玄质岩浆作用: 后碰撞走滑拉伸环境岛弧型岩浆作用的地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2003, 19(1):61–70.
- [91] 张进江, 季建清, 钟大赉, 等. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(4):373–383.
- [92] Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of the South China Sea region [J]. *Tectonophysics*, 1994, 235(1–2):149–180.
- [93] Liang H Y, Campbell I H, Allen C M, et al. The age of the potassic alkaline igneous rocks along the Ailao Shan-Red River shear zone: Implications for the onset age of left-lateral shearing [J]. *The Journal of Geology*, 2007, 115(2):231–242.
- [94] 唐渊, 刘俊来. 川滇西部上新世以来构造地貌: 断裂控制的盆地发育及对于远程陆内构造过程的约束 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(6):1925–1937.
- [95] Rangin C, Klein M, Roques D, et al. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam [J]. *Tectonophysics*, 1995, 243(3–4):209–222.
- [96] Royden L H, Burchfiel B C, King R W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in Eastern Tibet [J]. *Science*, 1997, 276:788–790.

- [97] Clark M K, House M A, Royden L H, et al. Late Cenozoic uplift of Southeastern Tibet [J]. *Geology*, 2005, 33 (6): 525 – 528.
- [98] 吴中海, 赵根模, 龙长兴, 等. 青藏高原东南缘现今大震活动特征及其趋势: 活动构造体系角度的初步分析结果[J]. *地质学报*, 2014, 88(8): 1401 – 1416.

Cenozoic strike slip orogeny in Sanjiang area, Southwestern China

Yin Fuguang, Tang Yuan, Xu Bo

(*Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China*)

Abstract: This paper systematically discusses the characteristics of strike slip shear zones, regional extensions and metamorphic core complexes, Cenozoic basins, and alkaline magmatic activities in the process of strike slip in Sanjiang area of Southwest China. It is considered that Sanjiang area has experienced five temporal and spatial evolution stages: the compression contraction deformation period (60-40Ma), strike slip extension thermal uplift period (40-38Ma), shear deep melting period (38-23Ma), strike slip shear extension period (23-11Ma), and strike slip denudation uplift period (11-5Ma), corresponding to five kinds of motion mechanism and dynamic system: collision and compression, strike slip tension thermal uplift (magma), strike slip shear deep melting, shear extension, strike slip collapse, which are mainly manifested as strike slip orogeny. The Sanjiang Orogenic Belt in Southwest China is the result of the oblique subduction of the Indian plate to the Eurasian plate, forming a number of giant clockwise strike slip shear zones in which the blocks escape to the South and rotate clockwise. The strike slip fault system plays a role in orogeny in the form of displacement adjustment and structural transformation, and the Sanjiang Orogenic Belt in Southwest China is a typical strike slip orogenic belt.

Key words: Sanjiang in Southwestern China; Cenozoic; strike slip orogeny