

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

张秉良¹, 刘瑞珣², 向宏发¹, 万景林¹, 黄雄南¹

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要:通过对红河断裂带中南段 18 个糜棱岩、12 个角砾岩、10 个碎裂岩和 8 个砂砾岩详细的显微结构观察, 部分典型样品的磷灰石裂变径迹 (FT) 测年及利用断层滑动资料反演构造应力张量的方法, 获得了红河断裂带中南段断层活动转换过程微观特征的变化。断层岩为糜棱岩的微结构特征显示红河断裂带早期断层活动为左旋走滑, 糜棱岩和未变形的砂砾岩 FT 年龄均大于 20 Ma, 表明这期间红河断裂带曾发生过一次构造热事件。断层岩为碎裂岩和角砾岩的微结构特征显示红河断裂带后期断层活动为右旋走滑。微结构特征不同的碎裂岩和角砾岩的 FT 年龄可分为 3 个时段 (9.9~12.7 Ma, 6.8~8.4 Ma, 2.0~4.6 Ma), 测年结果和应力场特征表明红河断裂带中新世以来曾发生过 3 次断层错动事件, 且第 1 次事件应力结构为走滑型, 第 2、3 次事件应力结构为正断型。

关键词:红河断裂; 断层岩; 显微结构; FT 测年; 应力场

中图分类号: P545

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)06-0529-09

Tectonite features and stress field variations associated with fault motion transformation in the central southern part of the Red River fault zone

ZHANG Bing-liang¹, LIU Rui-xun², XIANG Hong-fa¹, WAN Jing-lin¹ and HUANG Xiong-nan¹

(1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The variations of microstructures associated with the motion transformation in the central southern part of the Red River fault were studied in this paper. The researches included careful observation of microstructures in eighteen mylonite, twelve breccia, ten cataclasite, and eight sandy conglomerate samples from the fault, of which some were dated by the fission track in apatite (FT) method. In addition, the fault slip data were used to infer tectonic stress tensors. The results show that the microstructure of mylonite is indicative of left-slip during the early activity of the Red River fault. The FT ages of the mylonite and undeformed sandy conglomerate exceed 20 Ma, implying that a thermal event occurred in the Red River fault at that time. The microstructures of cataclasite and breccia imply the existence of right-slip during the late activity period of the fault. The above features, the FT ages (9.9~12.7 Ma, 6.8~8.4 Ma, 2.0~4.6 Ma), and the different stress fields suggest that the Red River fault has undergone three dislocations since the Miocene, of which the first was strike-slip, and the second and third were of normal faulting.

Key words: Red River fault; fault rock; microscopic structure; FT dating; stress field

位于印支和扬子地块间的红河断裂带是东南亚最重要的构造带之一,长期以来为国内外众多地质学家所关注。对于红河断裂带经历早期左旋和后期右旋的走滑运动基本上已达成共识。研究认为红河断裂带大型左旋走滑运动大致发生在 20~30 MaBP,其走滑位移量约 400~500 km(钟大赉等,1989;Tapponnier *et al.*,1990;Leloup *et al.*,1995;Harrison *et al.*,1996;Gilley *et al.*,2003)。然而从左旋剪切到右旋剪切的转化,由于各研究者侧重点不同而有着不同的看法。一些学者通过热年代方法研究认为 15~5 MaBP 是红河断裂从左旋剪切到右旋剪切的转化时间,而 15 MaBP 以来右旋走滑位移量约 62~69 km(向宏发等,2006;Xiang *et al.*,2007),但对与这一运动相关的断层错动所造成的岩石变形及相应的构造演化研究相对较弱。

众所周知,断层岩是断层活动的直接产物,是保存断层活动遗迹的载体,因此,红河断裂带的构造活动必定会在断层上和相应的断层岩中留下变形遗迹。本文将通过断层特征和相应的变形断层岩研究,讨论红河断裂带后期右旋走滑发生的时代和应力场演化。

1 断裂带概述及样品描述

红河断裂带作为扬子地块与印支地块间的边界,长期以来为众多地质学家所关注,从沉积建造、岩浆活动、构造变形、地球化学、地球物理等方面探讨了红河断裂带的形成、演化与构造变形历史(钟大赉等,1989;Tapponnier *et al.*,1990;陈文寄等,1992;Harrison *et al.*,1992;Wang *et al.*,1998;张进江等,1999,2006;Schoenbohm,2003;向宏发等,2004a,2004b,2006;Xiang *et al.*,2007)。研究确认红河断裂带是一条经历了长期演化(陆-陆碰撞、陆核增生、挤压剪切)的块间构造变形带,该断裂带经历了早期(古近纪)的大型左旋走滑和后期(新近纪以来)的右旋走滑运动。红河断裂西南侧为一套经韧性剪切形成的糜棱岩。研究区糜棱岩带中的面理无论沿走向或同一剖面的不同部位都有所不同。沿断裂糜棱岩面理走向一般为 $310^{\circ}\sim 320^{\circ}$,倾向北东,倾角 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。在糜棱岩 XY 面上,长石碎斑组成的拉伸线理走向一般 $150^{\circ}\sim 160^{\circ}$,倾伏角 10° 左右,局部可达 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$;另一种线理是糜棱岩折叠层组成的鞘褶曲的线理,走向和倾伏方向都与拉伸

线理平行。糜棱岩中的错动面及面上的擦痕极为发育,并兼有小型平卧褶皱。错动面倾向 NE,倾角一般 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 不等。错动面上的擦痕、不对称褶皱、S-C 组构和不对称碎斑系均表明它们是断层左旋走滑逆冲形成的。沿断裂带发育许多新生代沉积盆地,多呈长条状展布。新近纪砂岩、砂砾岩中发育有柔皱变形带和剪切陡立断层,从片劈理与主断层走向可看出为右旋剪切变形(图 1)。

在野外观察的基础上,根据断裂带的宏观地质特征,在研究区共采集糜棱岩、碎裂岩、砂砾岩以及定向样品 48 件。室内磨制两组定向薄片:一组平行于断层走向、垂直于断层面;另一组垂直于断层走向、垂直于断层面。48 件样品中有 18 件糜棱岩、12 件角砾岩、10 件碎裂岩和 8 件砂砾岩,同时对上述部分典型样品作磷灰石裂变径迹测年。

2 岩石类型及变形特征

沿红河断裂带中南段出露的断层岩明显有先后两期,糜棱岩是断裂早期以挤压剪切错动为主形成的,胶结坚硬,分布在哀牢山一侧。碎裂岩、角砾岩属后期以剪切正断错动为主形成的,呈半胶结状,较为疏松破碎,且多分布在靠近红河谷一侧,并多发育在中新统上新统间,断层岩类型显然属于力学性质和运动学方式不同的两期断层构造岩体系。由于它们原岩类型和变形条件的不同,其变形显微结构特征也不同(何永年等,1988;刘瑞珣,1988;胡玲,1998;刘俊来等,2007;张秉良等,2008),部分样品主要微观特征见表 1。

2.1 糜棱岩

红河断裂带中南段出露的早期断层岩是糜棱岩,胶结坚硬,分布在哀牢山一侧。糜棱岩(图 2a)发育透入性剪切面理、矿物拉伸线理和不对称碎斑系等构造,动态重结晶的石英和黑云母基质组成的纹带构成平行的糜棱面理,长石碎斑呈大小不一的菱形。微观变形的主要特征有石英、长石波状消光、核幔构造、石英动态重结晶,单颗粒压扁拉长及石英条带等。几乎所有的石英老颗粒均经历重结晶,重结晶的石英颗粒是由微观拉长的等粒形和矩形新颗粒组成,小石英颗粒边界普遍呈不规则的锯齿状或港湾状,表现为缝合线结构。糜棱岩中其他的矿物如长石和云母等变形特征也很明显。长石碎斑呈棱角状至半圆形,有的被压扁、拉长,其长轴方向常和片

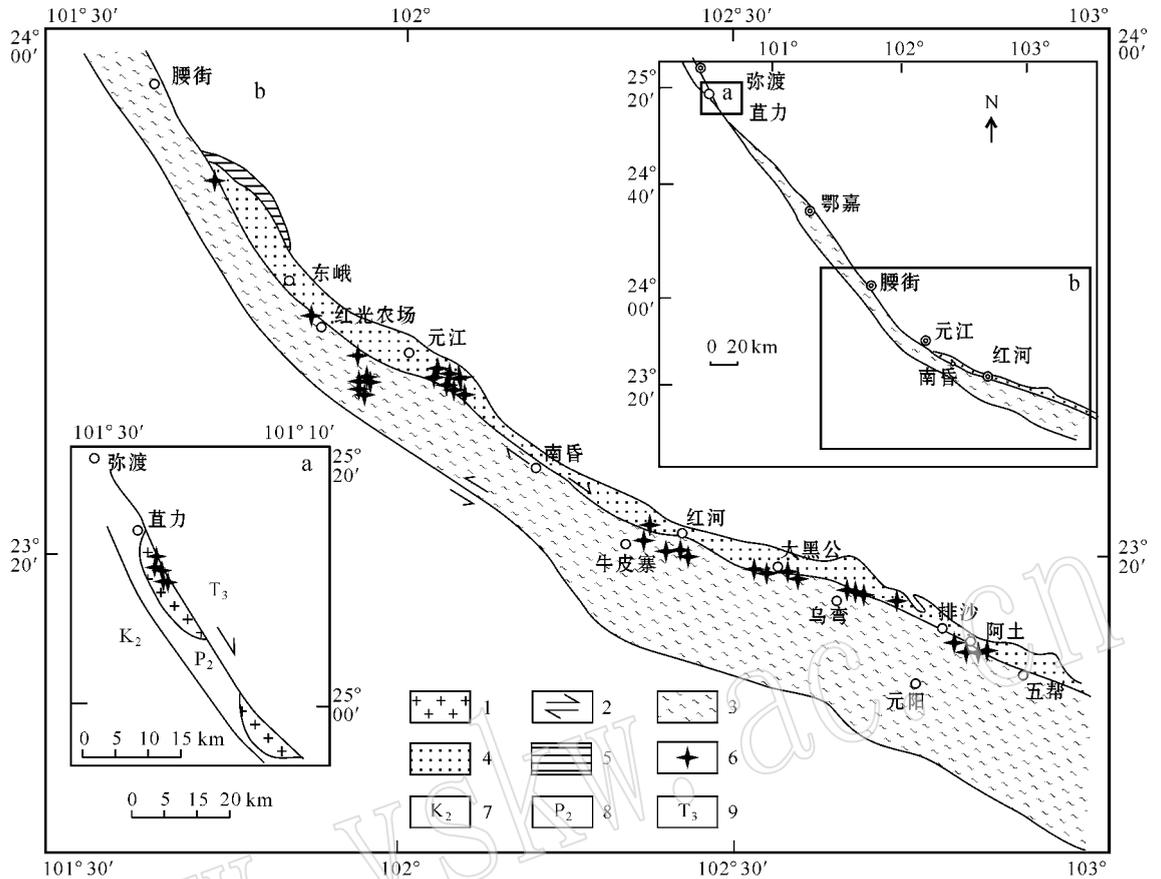


图 1 红河断裂带地质略图及采样点

Fig. 1 Sketch geological map of the Red River shear zone, showing sampling sites

1—花岗岩；2—走滑断层；3—糜棱岩；4—古近纪、新近纪砂岩；5—第四系；6—样点；7—上白垩系；8—中二叠系；9—上三叠系
 1—granite；2—strike-slip fault；3—mylonite；4—Palaeogene and Neogene sandstone；5—Quaternary；6—sampling site；7—Upper Cretaceous；
 8—Middle Permian；9—Upper Triassic

表 1 断层岩显微构造特征

Table 1 Microstructural features of fault rock

| 采样点 | 样号 | 主要显微构造特征 | 岩石名称 | 断层特征 | FT/Ma |
|------|--------|--|--------|-----------------------|----------|
| 直力 | APU-1 | 碎裂花岗岩，碎斑棱角状、不规则状，有方解石脉穿入 | 碎裂岩 | 10°/NW∠66° 擦痕 N∠38° | 6.8±1.1 |
| 深沟河 | APU-2 | 劈理化砂、泥岩，角砾岩不规则，泥质碳酸盐胶结，张裂隙发育 | 角砾岩 | | 4.3±2.1 |
| 大寨 | APU-3 | 重结晶石英及长石碎裂，石英和长石波状消光，局部劈理发育，发育近于平行的微裂隙 | 碎裂化糜棱岩 | 320°/NE∠37° 擦痕 S∠20° | 9.9±1.4 |
| 大黑公 | APU-4 | 角砾化砂岩，张裂隙发育，裂隙充填有泥质和母岩碎屑 | 角砾岩 | 265°/SE∠62° 擦痕 SW∠65° | 3.0±0.8 |
| 大黑公 | APU-5 | 角砾化灰岩，裂隙碳酸盐胶结，角砾棱角状 | 碎裂岩 | 285°/SW∠45° 擦痕 NW∠62° | 4.2±1.1 |
| 弯东 | APU-8 | 长石强烈破碎，裂隙呈 X 型，隙间充填碎屑 | 碎裂岩 | | 2.0±0.7 |
| 弯东 | APU-9 | 角砾化灰岩，砾石成分复杂，角砾棱角状、不规则状 | 角砾岩 | 285°/NE∠32° 擦痕 S∠35° | 2.5±0.5 |
| 排沙 | APU-10 | 拉长的石英和长石脆性破裂，后期方解石脉斜穿近于平行的稍有位错的早期微裂隙 | 碎裂化糜棱岩 | 310°/NE∠70° 擦痕 SE∠30° | 11.5±1.7 |
| 俄贾 2 | APU-11 | 缎带状石英破碎，长石扭裂 X 型，长石、石英波状消光，糜棱结构明显 | 碎裂化糜棱岩 | 320°/NE∠60° 擦痕 SE∠25° | 12.7±1.6 |
| 阿土 | APU-12 | 碎裂化砂岩，流动构造显示右旋滑动，粘土含量高 | 碎裂岩 | 280°/NE∠60° 擦痕 SE∠45° | 8.4±3.0 |
| 红光农场 | APU-13 | 石英动态重结晶发育，长石压扁拉长，书斜状长石碎斑显示左旋滑动 | 糜棱岩 | | 24.7±2.5 |
| 元江北 | APU-14 | 缟状层理，层理颜色和碎粒粒度不同 | 砂砾岩 | | 20.7±2.4 |
| 俄贾 1 | APU-16 | 碎斑小于 2 mm，基质占 80%，碎粒结构，松散无胶结 | 粉碎岩 | 270°/N∠46° 擦痕 E∠70° | 2.1±0.6 |
| 俄贾 1 | APU-17 | 碎斑棱角、次棱角状，裂隙充填泥质和碎粒，张裂隙发育 | 碎裂岩 | 270°/N∠45° 擦痕 E∠70° | 4.6±1.0 |
| 那炳 | APU-18 | 层理结构，砾石棱角、次棱角状，碎屑随机分布 | 砂砾岩 | | 26.1±2.5 |
| 五帮 | APU-19 | 中砂粒结构，碎屑混杂分布，颗粒具棱角、次棱角状 | 砂砾岩 | | 20.8±7.7 |

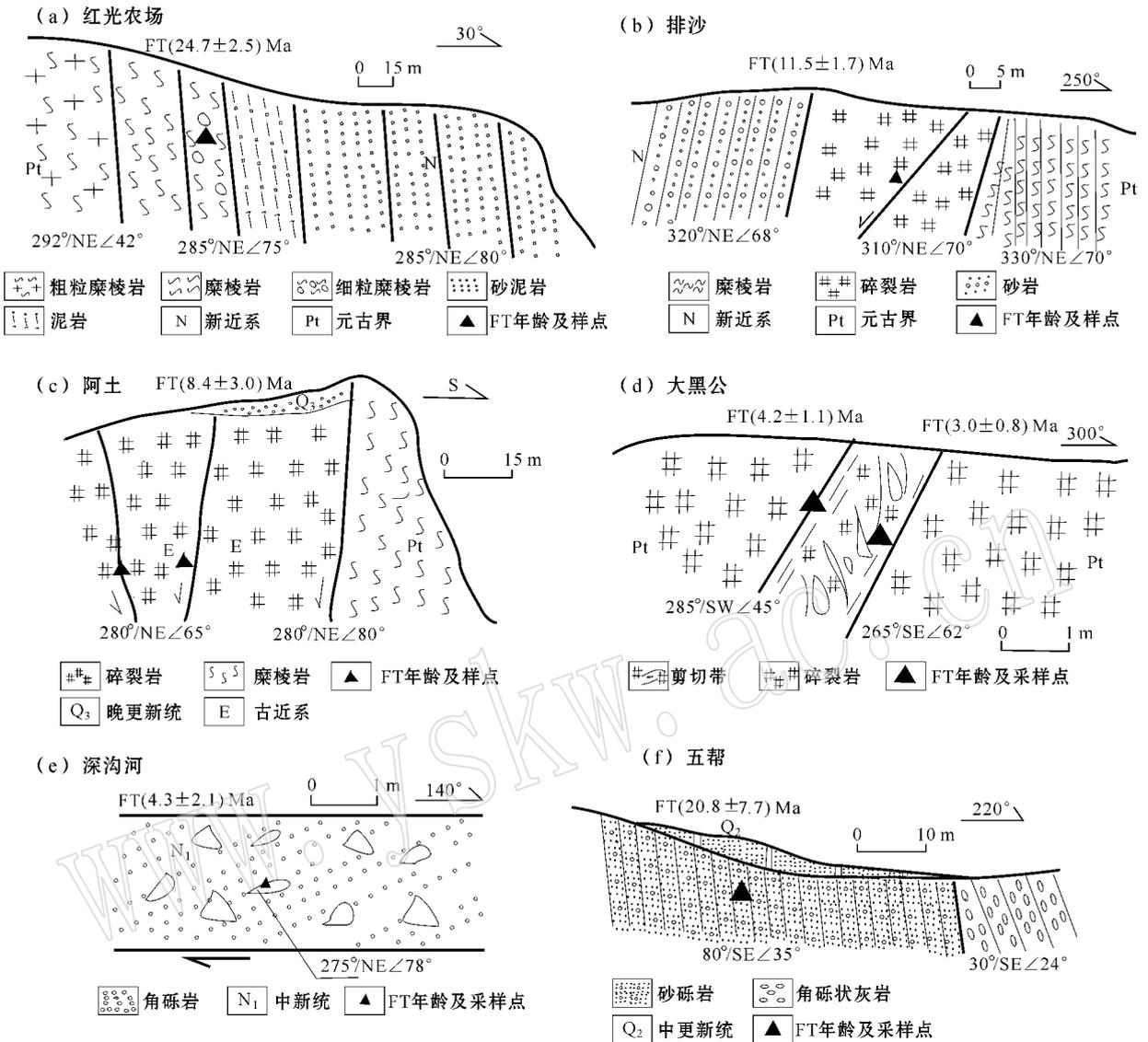


图2 红河断裂带典型剖面

Fig. 2 Typical section across the Red River shear zone

理斜交,有的长石和角闪石发生塑性变形。说明这种变形温度可能高于长石脆-韧性转换温度(450~500℃)。有的长石碎斑为许多微剪切缝交切和错动,沿微裂隙间和碎斑周围常有重结晶细粒石英,说明两者是同构造形成的。定向薄片中有典型的书斜式构造、云母的反S构造(图3a)及S-C构造以及σ构造,上述特征都显示了断裂呈左旋剪切位移的特点。

2.2 碎裂岩

红河断裂带后期断层右旋走滑兼正断错动形成的断层岩是碎裂岩、角砾岩和断层泥,呈半胶结状,较为疏松破碎,主要分布在靠近红河谷一侧的中新统、上新统地层中,也有部分碎裂岩分布在哀牢山变

质岩和古近系、新近系地层的接触带中。由于原岩性质不同,碎裂岩的特征也不同,归纳起来有2种:一种是经晚期碎裂作用形成的碎裂化糜棱岩,另一种是经多期碎裂作用形成的碎裂岩或超碎裂岩。

2.2.1 碎裂化糜棱岩

所观察到的这类碎裂岩分布在哀牢山变质岩和古近系、新近系地层的接触带中(图2b),为早期经历韧性剪切形成的糜棱岩再次受到构造作用碎裂而成,其碎裂作用主要反映在长石、石英上,原先形成的糜棱岩中已变形的长石、石英产生碎裂作用形成外形不规则棱角状,大小不等的碎斑,石英、长石波状消光,长石双晶稍有弯曲,剪裂隙发育,有些微

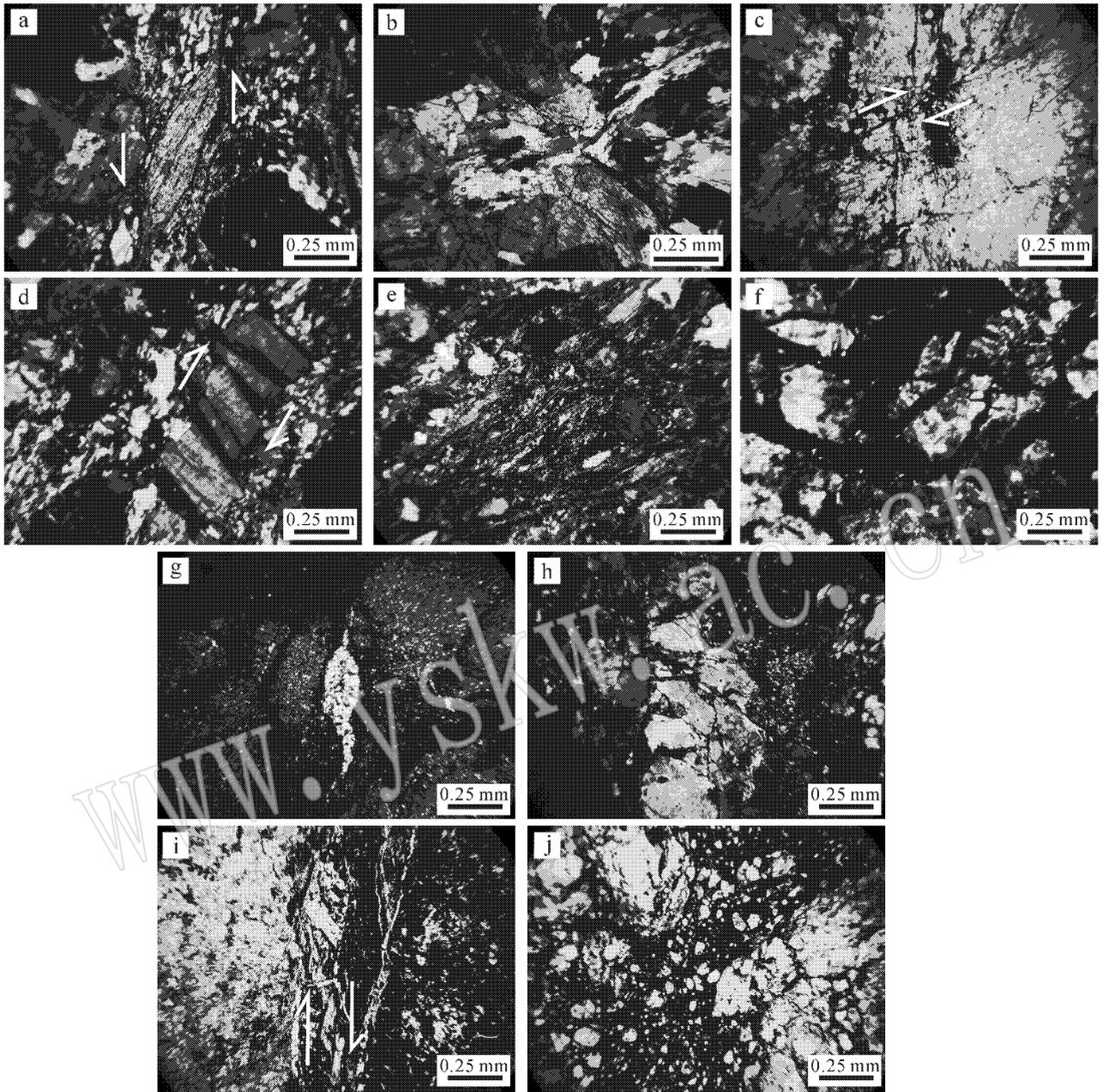


图 3 红河断裂带断层岩显微照片

Fig. 3 Microphotographs of fault rock from the Red River shear zone

a—云母反 S 构造 b—共轭扭破裂组成 X 型 c—显示断层为右旋错动 d—书斜式构造 e—先存的糜棱构造 f、g—碎斑棱角分明，可完全拼结 h—碎块书斜式构造 i—长条状碎块雁行式排列 j—角砾之间具有流动构造
 a—reverse-S structure of mica ; b—X form of conjugate shears ; c—right-lateral dislocation ; d— tilted book-like structure ; e—existing mylonite structure ; f , g—matching mortar structure with sharp angles ; h—tilted book-like structure of fragments ; i—en echelon long fragments ; j—flow structure between breccias

裂隙近于平行。破碎的各碎块之间，或仍彼此紧贴，或略出现隙缝，但均无明显的转动迹象，边界仍可拟合、拼接。扭破裂组成 X 型(图 3b)，微断层错动特征显示断层为右旋错动(图 3c)，长石的书斜式构造同样表明断裂为右旋滑动(图 3e)，局部岩石虽然被

后来的破裂作用切割破碎，但却不能消灭碎块本身先存的糜棱构造(图 3e)，因此可以作为红河断裂带断层岩韧性变形在先、脆性破裂在后的佐证。

2.2.2 碎裂岩

研究区出现的这类碎裂岩疏松破碎，主要分布

在靠近红河谷一侧的古近纪、新近纪地层中(图 2c、2d),有的样品采自花岗岩和古近纪地层断层面上,有的样品采自新近纪地层断层面上,虽然采自不同的地层和岩性,但它们确有类似的岩石疏松破碎特征。显微镜下岩石发生脆性破裂,显示出明显的碎屑构造,张裂隙发育是这类岩石的主要特点。虽然碎斑形状不同,但其边界一般呈锯齿状,且棱角分明,碎屑可完全拼结,表明位移较小(图 3f、3g);有的岩石破碎成许多棱角状或次棱角状碎块,碎块间有少量由破碎所形成的细粒及粉末状物质充填,局部显示为超碎裂岩,碎块中呈锯齿状共轭微裂隙的方向不同,似书斜式构造(图 3h);有的碎块棱角分明,呈长条状,定向排列成雁行式,张裂隙中充填由岩石破碎所形成的细粒及粉末状物质,反映断裂为右旋滑动(图 3i)。

2.3 角砾岩

出露的角砾岩主要为张性角砾岩,主要分布在靠近红河谷一侧的中新统上新统地层中(图 2e),岩石疏松破碎。显微镜下,仍显示原岩结构特征,角砾成分单一,大小不等,形状各异,有棱角状、似圆状等。有的角砾似鱼状,成雁行式排列;有的区域角砾之间充填有碎屑和粘土,碎屑经研磨基本无棱角,大小不等,显示有流动构造特征,而其他区域角砾之间裂隙较发育,角砾基本为棱角状,角砾间位移较小,表明可能断层位移主要集中在具有流动构造特征的局部区域(图 3j)。

2.4 砂砾岩、砂岩

样品采自上新统地层,该地层分布于红河两岸,为一套成分复杂的灰色、土黄色块状砾岩,钙质砾岩夹杂色薄层砂岩等(图 2f)。显微镜下岩石完全保持砂岩、砂砾岩、泥砂岩等原岩结构特征,细砂和粘土沉积韵律明显清晰,既无破裂现象,也未见其他变形特征,表明这类岩石基本上未受到断层活动的影响。

3 FT 测年

3.1 实验样品及条件

用于测年的样品采自红河断裂构造岩带内部、断层附近或断层面上,其岩性包括糜棱岩、碎裂岩、角砾岩和变形不明显的沉积岩。分别对上述不同类型的样品进行磷灰石裂变径迹测年。测年方法采用外探测器法。磷灰石蚀刻条件为 5.5 N HNO_3 , 20°C , 20 s ;外探测器采用低铀含量白云母,蚀刻条件为

$40\% \text{ HF}$, 室温 20 min Zeta 标定选用国际标准样,标准玻璃为美国铀标准玻璃;径迹统计用 OLYMPUS 偏光显微镜,在放大 1 000 倍浸油条件下完成(所有这些流程都由中国地震局国家重点实验室裂变径迹实验室完成)。本次研究选择了有代表性的样品 16 个,其中糜棱岩样品 2 个,碎裂岩化糜棱岩样品 3 个,碎裂岩样品 5 个,角砾岩 3 个,砂岩粉砂岩 3 个,磷灰石裂变径迹测试数据见表 1。

3.2 测年结果与讨论

用裂变径迹热年代学研究断裂活动,是基于一定规模的断裂活动所产生的热量足以使断裂带内的磷灰石中累积的裂变径迹发生部分或完全退火,从而使磷灰石裂变径迹重新累积,再次启动时钟。利用磷灰石裂变径迹研究断裂活动的热历史已取得一些有价值的研究成果。研究证明,红河断裂带这样右旋走滑位移量大于 60 km 的断裂活动所产生的热量足以使断层面的磷灰石裂变径迹发生部分或完全退火(Galbraith, 1981; Hurford and Green, 1983; Laslett *et al.*, 1987; Le loup *et al.*, 1993; 万景林等, 1997; 张峰等, 2000, 2001; Dalessio *et al.*, 2003; Xiang *et al.*, 2007)。

对典型样品进行了磷灰石裂变径迹测年,结果列于表 1。从表 1 可以看出,FT 年龄落在 4 个区间,即 $2.0 \sim 4.6$ 、 $6.8 \sim 8.4$ 、 $9.9 \sim 12.7$ 和 $20.7 \sim 26.1 \text{ Ma}$,而这 4 个区间所对应的岩石类型不同,无疑表明红河断裂活动具有多期次的特点。综合 FT 数据和岩石类型分析,本文对红河断裂后期右旋走滑可能发生的时代讨论如下。

表 1 中的 APU-13、APU-18 采自坚硬的构造糜棱岩中,APU-14、APU-19 采自远离断层的沉积地层中,其余是采自靠近断层或断面上的断层岩,宏观上多表现为成岩度、胶结较差的碎裂岩或角砾岩。APU-3、APU-10 和 APU-11 采自哀牢山变质岩和古近纪、新近纪地层的接触破碎带中,岩石特征显示它们经历了后期的断层作用,糜棱岩破碎为碎裂岩,断层产状和断面上的擦痕倾伏角小于 30° (表 1),表明该断层活动是以右旋走滑为主,FT 年龄显示在 $9.9 \sim 12.7 \text{ Ma}$ 期间有过一次断裂错动事件,断层岩中的劈理和共轭扭破裂等特征反映了断层活动为压剪性;APU-1 和 APU-12 采自碎裂的燕山期花岗岩和古近纪地层破裂带中。断面上的擦痕倾伏角在 $35^\circ \sim 45^\circ$ 之间(平均 42° , 表 1),表明该断层经历了一次以右旋走滑为主具有正断分量的滑动,FT 年龄

反映此次事件可能发生在 6.8~8.4 Ma 之间,断层岩中的裂隙表明断层活动为张性;APU-2、APU-5、APU-17、APU-4、APU-8、APU-9 和 APU-16 均采自新近纪地层中的断层面上或附近,这类岩石的主要特点是明显的碎屑构造,张裂隙发育,碎斑形状不同,有的岩石破碎成许多棱角状或次棱角状碎块,碎块间有少量由破碎所形成的细粒及粉末状物质充填,断层产状和断面上的擦痕倾伏角在 35°~70°之间(平均 65°,表 1)表明该断层活动是以正断为主具有走滑分量,磷灰石的裂变径迹年龄显示这次事件可能发生在 2.0~4.6 Ma 之间。

上述资料表明,红河断裂带新近纪以来经历过多期次的断裂滑动事件。但在 9.9~12.7 Ma 期间,由于断层岩是碎裂化糜棱岩,其显微结构显示压性特征,断层面上擦痕倾伏方向表明断层为右旋走滑错动,因此,红河断裂的这次活动应属右旋走滑、压性错动。而在此后的 6.8~8.4、2.0~4.6 Ma 的 2 期活动中,断层岩显微结构均显示张性特征,断层面上擦痕倾伏方向表明 6.8~8.4 Ma 期间断层活动是以右旋走滑为主兼有正断分量的滑动,而 2.0~4.6 Ma 期间断层活动是以正断错动为主兼有走滑分量,因此这 2 期断层活动应同属于右旋走滑、张性错动。

4 构造应力场特征

利用断层滑动资料反演构造应力张量的方法是根据一组含有断层运动特征的断层观测数据来确定这些断层所在区域的构造应力状态(Angelier, 1979; 1984; Etchecopar *et al.*, 1981)。该方法的实质是用计算出的断面上的剪应力方向拟合断面上的滑动方向,最终给出应力张量的 4 个特征参数,它们是 3 个主应力方向(σ_1 、 σ_2 、 σ_3)与 1 个反映主应力相对量值比关系的应力形因子 $\varphi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ (Angelier, 1984; 谢富仁等, 1993)。

研究区内保存有大量反映区域构造应力作用的断层滑动形迹,通过仔细观察并系统地测量了研究区断层产状和断面上的滑动擦痕,获得了一些具有区域构造意义的断层擦痕数据。所测擦痕分布在不同的地层中,而且断层的特征也不同,反映了断层多期次滑动的特征。

表 2 为区内各期计算应力张量结果。从表 2 可以看出,红河断裂带中南段右旋走滑断层据其特征可分 3 种不同类型:a 断层走向北西,最大主应力场

以北北东挤压、北西西拉张为主要特征(图 4a),其最大主压应力(σ_1)方向为 N13°E 左右,平均倾角 40°;最小主应力(σ_3)方向 279°左右,平均倾角 5°;中间主应力(σ_2)183°左右,平均倾角 50°,应力结构为走滑型。在这类断层附近或断面上的磷灰石裂变径迹年龄为 9.9~12.7 MaBP。b 断层走向北西,最大主应力场以北东东拉张为主要特征(图 4b),其最大主压应力(σ_1)为 298°,平均倾角 83°;最小主应力(σ_3)方向 65°左右,平均倾角 4°;中间主应力(σ_2)156°,平均倾角 5°,应力结构为正断。这类断层附近或断层面上磷灰石裂变径迹年龄为 6.8~8.4 MaBP。c 断层走向也是北西向,最大主应力场为北东东拉张为主要特征(图 4c),最大主压应力(σ_1)方向为 N15°E 左右,平均倾角 80°;最小主应力(σ_3)方向 236°,平均倾角 7°;中间主应力(σ_2)146°,平均倾角 6°,应力结构为正断型。这类断层面上磷灰石裂变径迹年龄为 2.0~4.6 MaBP。

表 2 区内各期计算应力张量结果

Table 2 Calculation result of stress tensors

| 期次 | σ_1 (°) | | σ_2 (°) | | σ_3 (°) | | 应力结构 |
|----------|----------------|----|----------------|----|----------------|----|------|
| | 方位 | 倾角 | 方位 | 倾角 | 方位 | 倾角 | |
| 第 1 期(a) | 13 | 40 | 183 | 50 | 279 | 5 | 走滑型 |
| 第 2 期(b) | 298 | 83 | 156 | 5 | 65 | 4 | 正断型 |
| 第 3 期(c) | 15 | 80 | 146 | 6 | 236 | 7 | 正断型 |

5 结论

(1)红河断裂带大规模右旋走滑运动发生在中新世以后并可分为多期,但就其断层活动性质而言可分为压性和张性两种不同的类型,第 1 种类型仅为一期,发生在中新世中期,这期断裂活动造成在哀牢山变质岩和古近纪、新近纪地层的接触带糜棱岩碎裂化,碎裂化糜棱岩结构特征显示构造活动为压性,断面上的擦痕特征揭示断层的滑动为右旋走滑,因此发生在红河断裂带中新世中期断层的滑动,应属于右旋走滑、压性错动;第 2 种类型可分为 2 期,它们分别发生在中新世晚期、上新世早期和上新世晚期,这 2 期断裂活动造成构造岩破碎、角砾化,碎裂岩和角砾岩的显微结构特征显示断层活动为张性,其中一期断面上的擦痕倾伏角在 35°~45°之间(平均 42°),揭示断层活动是以右旋走滑为主兼有正断分量;另一期断层面上擦痕倾伏角在 35°~70°之

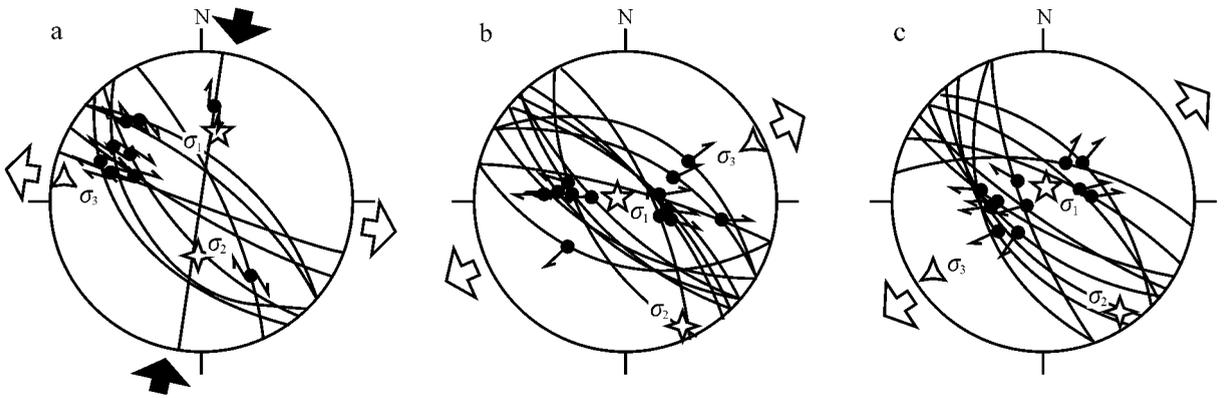


图 4 研究区构造应力张量的吴氏网投影(下半球投影)

Fig. 4 Wulff net projection diagram (lower hemisphere) of calculated stress tensors

σ_1 —最大主压应力; σ_2 —中间主应力; σ_3 —最小主应力

σ_1 —maximum principal stress; σ_2 —medium principal stress; σ_3 —minimum principal stress

间(平均 65°)表明该断层活动是以正断错动为主兼有走滑分量。因此第 2 种类型的断层活动应属于右旋走滑、张性错动。

(2) 根据地质特征,断层岩微结构和断层岩中磷灰石的 FT 测年结果,初步认为红河断裂带由早期左旋走滑运动转为右旋走滑的时间可能开始于 9.9~12.7 MaBP,而后又发生多期右旋走滑错动。

(3) 红河断裂带中新世以来经历 3 期主要的构造应力场作用,第 1 期大约在中中新世中期,构造应力场以北北东挤压,北西西拉张为主要特征,应力结构以走滑为主;第 2 期大约发生在中新世晚期,构造应力场以北东东拉张为主要特征,应力结构为正断型;第 3 期大约发生在上新世,构造应力场以北东东拉张为主要特征,应力结构为正断型。

致谢 研究工作中史兰斌研究员提供了多方面的帮助和讨论,利用断层滑动资料反演构造应力张量是中国地震局地壳应力研究所副所长谢富仁研究员帮助完成的,在此深表谢意。

References

Angelier J. 1979. Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population[J]. *Tectonophysics*, 56: 17~26.

Angelier J. 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets[J]. *J. Geophys. Res.*, 89(B7): 5 835~5 848.

Chen Wenji, Harrison F M and Lvera O M. 1992. Thermochronology of the Ailaoshan-Red River shear zone—A case study of multiple diffu-

sion domain mode[J]. *Seismology and Geology*, 14(2): 122~128 (in Chinese).

Dalessio M A, Blythe A E and Burgmann R. 2003. No frictional heat along the San Gabriel fault, California: Evidence from fission track thermochronology[J]. *Geology*, 31(6): 541~544.

Etchecopar A, Vasseur G and Daignieres M. 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis[J]. *Struct. Geol.*, 3(1): 51~55.

Galbraith R F. 1981. ON statistical models for fission track counts[J]. *Math Geology*, 13: 471~478.

Gilley L D, Harrison T M, Leloup P H, et al. 2003. Direct dating of left-lateral deformations, along the Red River shear zone, China and Vietnam[J]. *Jour. Geophys. Res.*, 108(B2): 2 127.

Harrison T M, Chen W and Leloup P H. 1992. An early Miocene Transition in deformation region with the Red River fault zone, Yunnan and its significance for Indo-Asian Tectonics[J]. *J. G. R.*, 97(135): 7 559~7 682.

Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, et al. 1996. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan-Red River shear zone, Yunnan and Vietnam[A]. Yin A and Harrison T M. *The Tectonic Evolution of Asia*[C]. New York: Cambridge University Press, 208~226.

He Yongnian, Lin Zhuanyong and Shi Lanbin. 1988. *An Outline of Structural Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Hu Ling. 1998. *An Introduction to Microstructural Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Hurford A J and Green P F. 1983. The zeta age calibration of fission-track dating[J]. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 1: 285~317.

Laslett G M, Greeh P E, Duddy I R, et al. 1987. Thermal annealing of fission track in apatite 2, a quantitative analysis[J]. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 65: 1~13.

Leloup P H, Harrison T M, Ryerson F J, et al. 1993. Structural

- Petrological and thermal evolution of a tertiary ductile strike-slip shear zone, Diancang Shan, Yunnan [J]. *J. G. R.*, 98(84): 6715~6743.
- 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: 1~84.
- Liu Junlai, Cao Shuyun and Zhai Yunfeng. 2007. Rotation of crustal blocks as an explanation of oligo-Miocene extension in southeastern Tibet-evidenced by the Diancangshan and nearby metamorphic core complexes [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(4): 40~48 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ruixun. 1988. *Microstructural Geology* [M]. Beijing: Peking University Press, 95~100 (in Chinese).
- Schoenbohm L, Burchfiel B C, Chen L, *et al.* 2003. Pliocene uplift, river incision and faulting in the Red River region, Yunnan province, China [J]. *Geophys. Res. Abs.*, 6: 11678.
- Tapponnier P, Lacassin R and Leloup P H. 1990. The Ailao Shan Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 343: 431~437.
- Wan Jinglin, Li Qi and Chen Wenji. 1997. Fission track evidence of diachronic uplift along the Ailao Shan-Red River left-lateral strike shear zone [J]. *Seismology and Geology*, 19(1): 87~97 (in Chinese).
- Wang E, Burchfiel B C, Chen L Z, *et al.* 1998. Late Cenozoic Xian Shuihe-Xiaojia, Red River and Daili fault systems of southwestern Sichuan and central Yunnan, China [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 227: 1~108.
- Xiang Hongfa, Han Zhujun, Guo Shunmin, *et al.* 2004a. Large-scale dextral strike-slip movement and associated tectonic deformation along the Red River fault zone [J]. *Seismology and Geology*, 26(4): 598~610 (in Chinese).
- Xiang Hongfa, Han Zhujun, Guo Shunmin, *et al.* 2004b. Several questions about the quantitative study of the large-scale right-lateral strike-slip movement of the Red River fault zone [J]. *Advances in Earth Science*, 19(Suppl.): 56~59 (in Chinese).
- Xiang Hongfa, Wan Jinglin, Han Zhujun, *et al.* 2006. Geological analysis and FT dating of the large-scale right-lateral strike-slip movement of the Red River fault zone [J]. *Science in China (Ser. D)*, 36(11): 977~987 (in Chinese).
- Xiang Hongfa, Wan Jinlin, Han Zhujun, *et al.* 2007. Geological analysis and dating of the large-scale right-lateral strike-slip movement of the Red River fault zone [J]. *Science in China (Ser. D)*, 50(3): 331~342.
- Xie Furen, Zhu Jingzhong, Liang Haiqing, *et al.* 1993. The basic characteristics of recent tectonic stress field in south west region of China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 15(4): 407~417 (in Chinese).
- Zhang Bingliang, Liu Ruixun, Xiang Hongfa, *et al.* 2008. Features of mylonite at central southern section of the Red River fault zone and estimation of its primary rheological parameters [J]. *Seismology and Geology*, 30(2): 473~483 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Feng and Wang Shijie. 2000. The age of Jiuanxi fracture belt in three-gorge region: A fission track study [J]. *Geochimica*, 29(2): 162~166 (in Chinese).
- Zhang Feng and Wang Shijie. 2001. Fission track age of fault gouge in the Yangtze three-gorge damsite [J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 101~106 (in Chinese).
- Zhang Jinjiang, Zhong Dalai, Sang Haiqing, *et al.* 2006. Structural and geochronological evidence for multiple episodes of deformation since Paleocene along the Ailao Shan-Red River shear zone, southeastern Asia [J]. *Chinese Journal of Geology*, 41(2): 291~310 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Zhong Dalai, Zhou Yong, *et al.* 1999. Tectonic evolution of southeast Asia and the Ailao-Honghe tectonic belt [J]. *Geological Review*, 45: 337~344 (in Chinese).
- Zhong Dalai, Tapponnier P, Wu Haiwei, *et al.* 1989. Large-scale strike-slip fault-The main pattern of post-collision intracontinental deformation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 34(7): 526~529 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈文寄, 哈里森 F M, 洛弗拉 O M. 1992. 哀牢山-红河剪切带的热年代学研究 [J]. *地震地质*, 14(2): 122~128.
- 何永年, 林传勇, 史兰斌. 1988. *构造岩石学基础* [M]. 北京: 地质出版社.
- 胡玲. 1998. *显微构造地质学概论* [M]. 北京: 地质出版社.
- 刘俊来, 曹淑云, 翟云峰. 2007. 用陆块旋转解释藏东南渐新世-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*, 14(4): 40~48.
- 刘瑞珣. 1988. *显微构造地质学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 95~100.
- 万景林, 李齐, 陈文寄. 1997. 哀牢山-红河左旋走滑剪切带构造抬升的时间序列的裂变径迹证据 [J]. *地震地质*, 19(1): 87~97.
- 向宏发, 韩竹军, 魏顺民, 等. 2004a. 红河断裂带大型右旋走滑运动与伴生构造地貌变形 [J]. *地震地质*, 26(4): 598~610.
- 向宏发, 韩竹军, 魏顺民, 等. 2004b. 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): 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(D辑)*, 36(11): 977~987.
- 谢富仁, 祝景忠, 梁海庆, 等. 1993. 中国西南地区现代构造应力场基本特征 [J]. *地震学报*, 15(4): 407~417.
- 张秉良, 刘瑞珣, 向宏发, 等. 2008. 红河断裂带中南段糜棱岩分形特征及主要流变参数的估算 [J]. *地震地质*, 30(2): 473~483.
- 张峰, 王世杰. 2000. 裂变径迹研究三峡九湾溪断裂带断裂时期 [J]. *地球化学*, 29(2): 162~166.
- 张峰, 王世杰. 2001. 长江三峡坝区断层泥的裂变径迹法年龄 [J]. *地质科学*, 36(1): 101~106.
- 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 [J]. *地质科学*, 41(2): 291~310.
- 张进江, 钟大赉, 周勇, 等. 1999. 东南亚及哀牢山红河构造演化的讨论 [J]. *地质论评*, 45: 337~344.
- 钟大赉, Tapponnier P, 吴海威, 等. 1989. 大型走滑断层-碰撞后陆内变形的形式 [J]. *科学通报*, 34(7): 526~529.