中国科学: 地球科学 2011 年 第 41 卷 第 7 期: 945 ~ 959
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

喜马拉雅东构造结东缘碧罗雪山-崇山剪切带北段构造变形特征及构造意义

张波[①②*], 张进江[①②], 钟大赉[③], 王晓先[①], 曲军峰[③], 郭磊[④]

① 北京大学地球与空间科学学院地质系, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;
② 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;
③ 中国科学院地质与地球物理研究所, 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;
④ 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
* E-mail: geozhangbo@pku.edu.cn

收稿日期: 2010-07-24; 接受日期: 2010-11-19
国家自然科学基金青年基金(批准号: 40802050)、中国博士后科学基金(编号: 20070420065)和中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室科学基金(编号: GPMR0937)资助

摘要 位于喜马拉雅东构造结东缘的新生代碧罗雪山-崇山剪切带出露各类构造岩, 其西侧翼主要为片麻岩带, 以条带片麻岩、眼球状糜棱岩化片麻岩和混合片麻岩为特征, 东侧翼为糜棱岩化片岩带; 基于野外构造-组构几何关系和叠加-改造痕迹, 可识别出多期韧性、韧-脆性和脆性构造变形(D1~D4). 第一期变形 D1 主要发育等斜-紧闭褶皱 F1(褶皱轴近 N-S 走向)和陡立的轴面劈理 S1, 以及代表地壳物质垂向增厚和侧向减薄的布丁构造; 第二期变形 D2 构造特征为发育大规模韧性走滑剪切面理 S2, 部分 S2 面理发生褶皱变形, 形成褶皱 F2, 褶皱轴陡倾伏, 褶皱面陡立, 近 N-S 走向, 与剪切面理 S2 近平行, D2 构造样式表现为左旋走滑挤压应变(Transpression)特征; D1 和 D2 构造变形均被晚期 NW-SE 和 NE-SW 走向的第三期 D3 构造改造, 即走滑剪切带 S3 和共轭走滑断裂; 第四期构造 D4 以脆性右旋走滑伸展应变(Transtension)为特征, 即 N-S 走向的走滑组分和正断组分同时发生. 结合邻区新生代哀牢山-红河剪切带和高黎贡剪切带的构造几何、运动学和年代学数据, 分析认为自新生代印度-欧亚汇聚-碰撞以来, 环喜马拉雅东构造结及东缘地区的陆内构造变形经历了地壳增厚(D1)、左旋走滑挤压(韧性域 D2 和韧-脆性域 D3)和右旋走滑伸展(D4)多期构造变形和变形体制的转换.

关键词
碧罗雪山-崇山剪切带
新生代
构造-组构
多期变形

喜马拉雅东构造结东缘地区为印度大陆楔入而引发的陆内物质逃逸、挤出和流动的通道区[1~5]; 大陆物质的流动和旋转主要沿巨大线形弯曲的走滑剪切带和断裂带, 这些剪切带和断裂带也是次级地体和板块的边界(图 1)[4,6].

在我国滇西地区, 新生代以来的构造格局及其演化是印度-欧亚大陆汇聚-碰撞的直接响应, 其构造特征主要表现为地壳物质围绕喜马拉雅东构造结顺

英文引用格式: Zhang B, Zhang J J, Zhong D L, et al. Structural feature and its significance of the northernmost segment of the Tertiary Biluoxueshan-Chongshan shear zone, east of the Eastern Himalayan Syntaxis. Sci China Earth Sci, 2011, 54, doi: 10.1007/s11430-011-4197-y

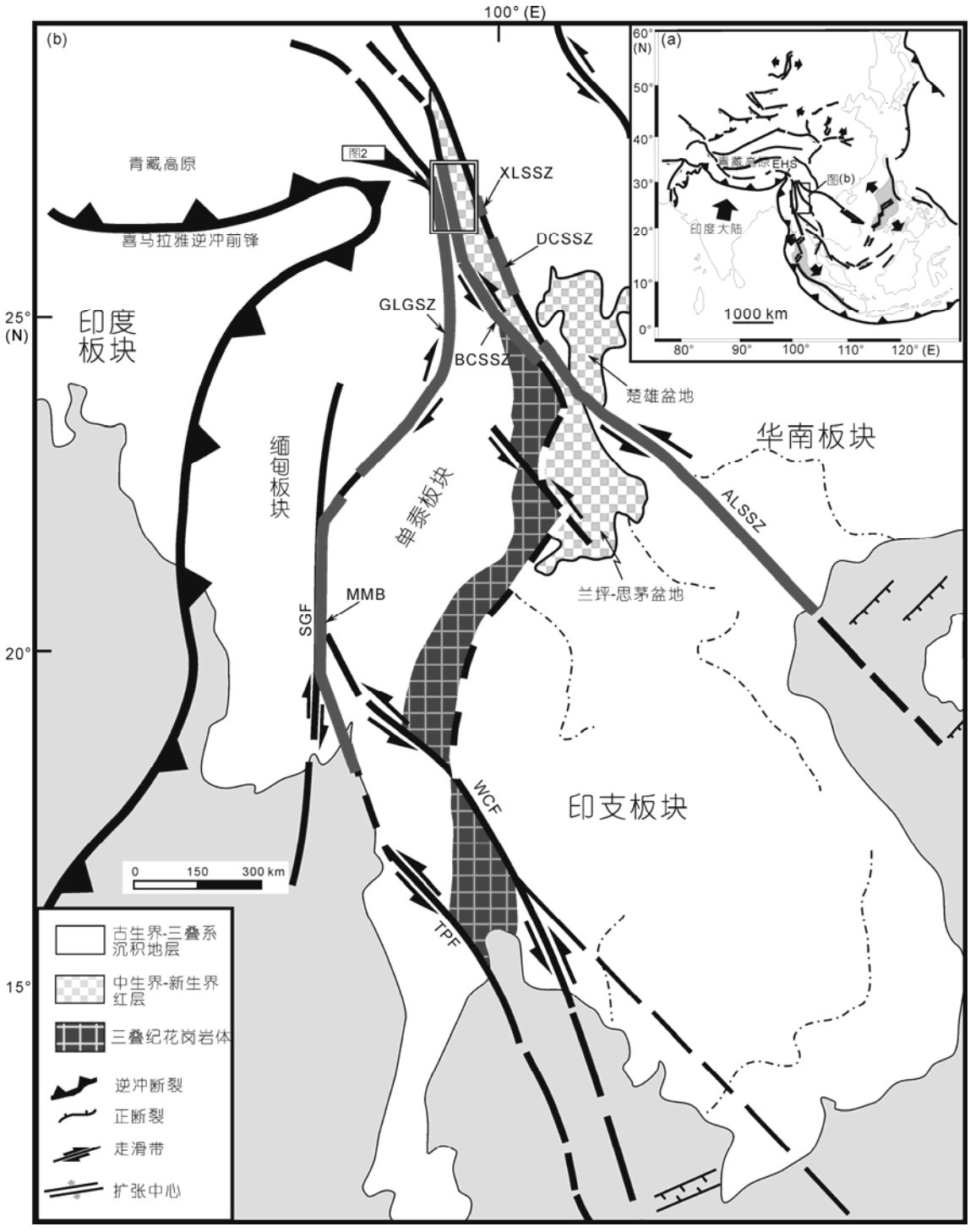

图 1　东南亚构造简图

修改自 Zhong 和 Tapponnier[2], Leloup 等[6], Wang 和 Burchfiel[4]. BCSSZ, 碧罗雪山-崇山剪切带; XLSSZ, 雪龙山剪切带; DCSSZ, 点苍山剪切带; ALSSZ, 哀牢山剪切带; EHS, 喜马拉雅东构造结; WCF, Wangchao 断裂; TPF, Three Pagodas 断裂; SGF, Sagaing 断裂; MMB, Mogok 变质带

时针旋转[4], 并伴随高黎贡剪切带和哀牢山-红河剪切带之间相关地体向东南方向的挤出/逃逸(图 1(a)). 因此, 喜马拉雅东构造结东缘滇西地区被视为揭示板块斜向汇聚而引发陆内变形的关键, 为国内外学者研究的焦点. 近年来, 一些学者试图用应力-应变模型预测和解释该区大陆汇聚-碰撞之后的应力场和构造变形体系[1,5,7,8], 分析表明环喜马拉雅东构造结的构造变形场呈辐射状, 即强烈构造变形主要集中于构造结附近, 或沿构造结东缘大型走滑剪切带和断裂带分布[5,9~13]. 高黎贡剪切带紧邻构造结, 出露陡立糜棱岩面理, 向西南延伸并入缅甸境内 Mogok 变质带(Sagaing 断裂带)[2,4,14]; 高黎贡剪切带以东分别为碧罗雪山-崇山剪切带和雪龙山-点苍山-哀牢山剪切带[6,15~21], 这两条剪切带发育各类陡立的构造面理和近水平矿物拉伸线理, 表现为韧性走滑剪切运动. 这些剪切带夹持着单泰板块(我国境内为保山地体)和印支板块(在我国境内为兰坪-思茅盆地)(图 1), 向北延伸, 这些构造单元强烈汇聚收缩, 进入东构造结内部(图 1(b))[4,10,11,22].

碧罗雪山-崇山剪切带为一条狭长弯曲线形新生代韧性剪切带, 自西藏向东南延伸进入临沧花岗岩体, 全长超过 500 km, 宽度 2~20 km(图 1(b))[4,23~26]. 该剪切带北段走向近 N-S, 中段转为 NNW-SSE, 向南逐渐为 NW-SE 走向; 根据构造岩特征, 剪切带内平行出露西侧翼糜棱岩化片麻岩, 东侧翼糜棱岩化片岩[4,27~29]. 构造岩的变质程度从绿片岩相到高角闪岩相[23,24,26,30]; Akciz 等[30]报道了剪切带北段构造岩韧性剪切作用为绿片岩相; 沿碧罗雪山-崇山侵位的花岗岩地球化学特征指示后碰撞构造环境[29].

本次研究聚焦于碧罗雪山-崇山剪切带最北段, 主要沿碧罗雪山脉, 出露片麻岩、花岗岩和片岩(图 2). 该区的构造研究较为缺乏, Akciz 等[30]曾报道了该区有限的韧性剪切变形构造和初步的晚新生代年代学数据. 张波等[25,26]认为该带为一条渐新世-中新世的走滑挤压(Transpression)应变带. 这些构造和年代学工作揭示该带为响应印度-欧亚大陆汇聚-碰撞而引发的新生代陆内变形之产物[23,26,30], 而不是以往所解释的前寒武纪变质带[27,28,31]. 然而, 该带向北延伸的野外地质证据以及最北段构造几何学特征和运动学观测数据缺乏, 制约了人们对喜马拉雅东构造结及其东缘地区深大断裂体系构造演化的认识和理解. 因此, 本次研究着重对该带向北延伸的构造特征开展相关解析, 即碧罗雪山北段, 解析其韧性、韧-脆性和脆性构造, 厘定其构造期次、变形类型及新生代构造演化, 探讨该带与邻区高黎贡和哀牢山-红河剪切带的关系, 及其对 65 Ma 以来的欧亚大陆碰撞的响应机制[22,32,33].

1 地质背景

研究区位于 28°30′~26°40′N 和 98°00′~99°00′E 之间区域, 即吉义-贡山-福贡地区(图 1~3). 区内片麻岩、花岗岩和片岩大量出露, 也可发现小规模花岗岩出露, 但主要岩石类型为糜棱岩化片麻岩和片岩, 片麻岩以条带、眼球状和面理化混合片麻岩为特征. 条带片麻岩为研究区内主要的构造岩类型, 表现出丰富的韧性剪切变形构造, 由中-粗粒长石、石英和云母颗粒组成, 深色富云母的和浅色富长英质矿物微条带交互分布. 面理化混合片麻岩由细颗粒长石、石英、黑云母和白云母等矿物组成, 定向排列的石英和长石形成透入性面理, 表现为 S 糜棱岩特征[34]. 各种类型构造岩内发育许多不对称褶皱和紧闭-宽缓褶皱, 侵位于片麻岩中的部分花岗岩发生不同程度的变形[26,30].

2 构造变形

剪切带北段的构造类型主要为叠加褶皱和剪切带(图 2). 为厘定其构造样式, 我们沿该带东西两翼, 自北向南开展野外观测; 基于构造-组构几何和叠加关系, 识别出 4 期变形, 即 D1~D4. 表 1 总结了这些构造-组构的基本特征, 其相关的野外露头如图 2~7 所示.

2.1 第一期变形构造 D1

最早的 D1 组构以等斜-紧闭褶皱 F1 和相关的轴面面理 S1 为特征. 在野外露头, F1 等斜-紧闭褶皱在剪切带边部的糜棱岩化片岩中保存最为明显, 而优选定向排列的长石、石英和云母形成的片麻岩主面理所形成的 F1 褶皱, 由于遭受后期强烈的构造变形改造而保存较少或不易识别(图 3(f); 4(a), (c); 5(a)). 不同规模的等斜-紧闭褶皱 F1, 其翼部普遍发生强烈减薄, 而枢纽端物质显著增厚(图 5(a)), 表现出变形物质沿 *Y* 方向增厚, 而沿 *Z* 方向减薄的应变特征; 这一

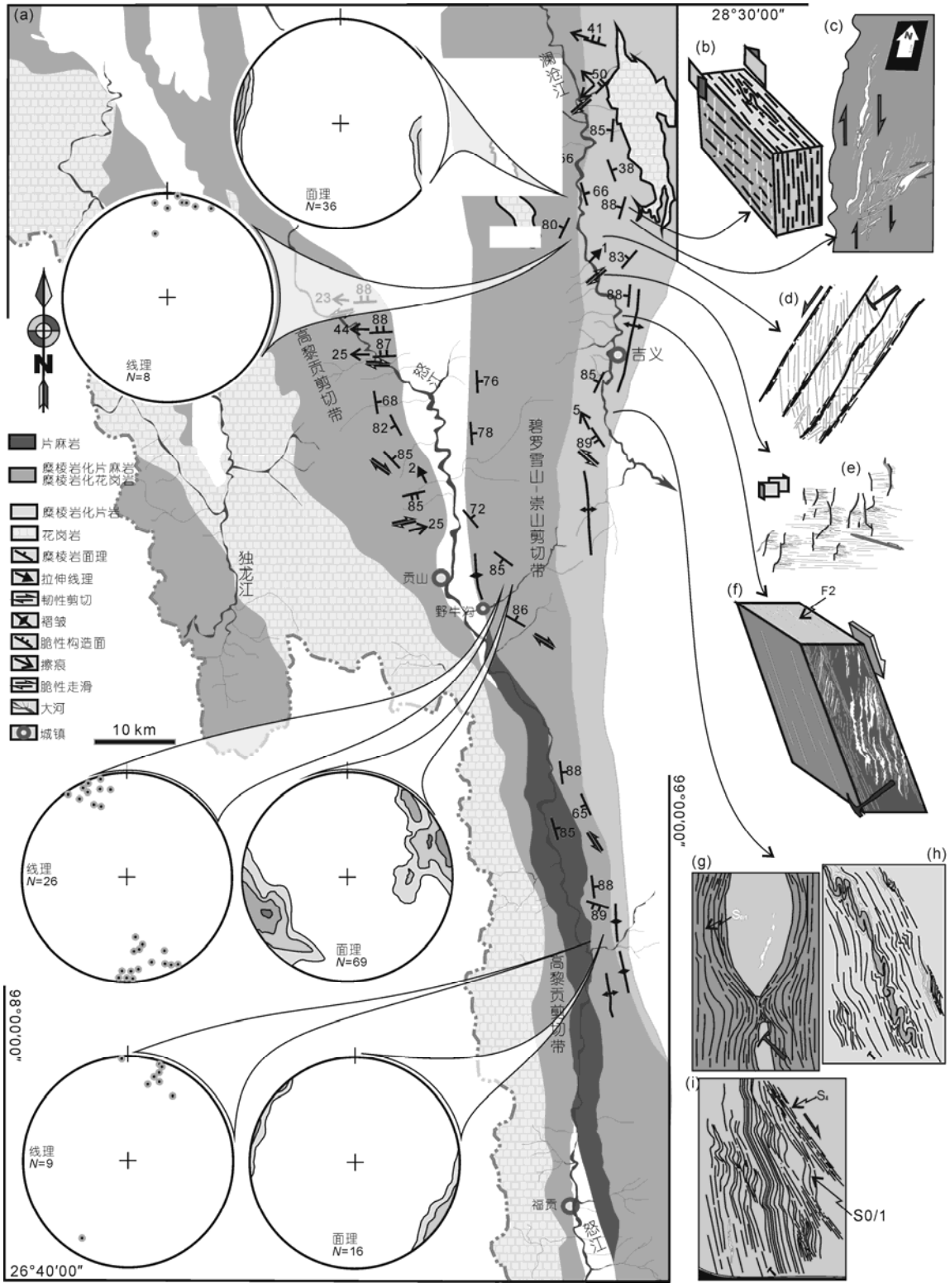

图 2　碧罗雪山-崇山剪切带北端构造简图及构造岩组构要素施密特下半球投影(a)及吉义地区各类构造岩构造-组构和运动学特征((b)~(i))

(g)~(i)观测面为垂直面理和线理

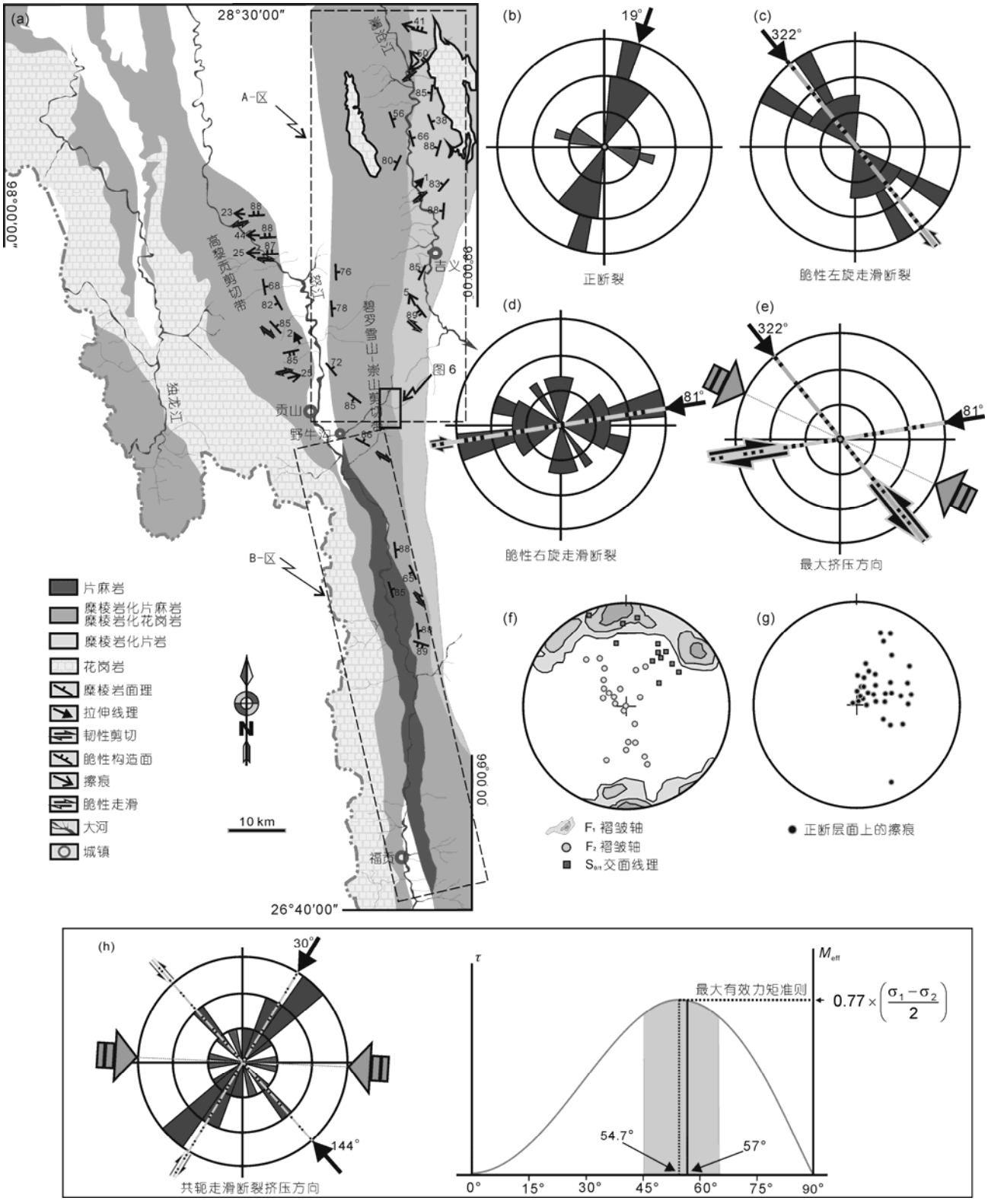

图 3　碧罗雪山-崇山剪切带韧-脆性构造要素走向玫瑰花图((b)~(d)和(g))和褶皱构造要素施密特下半球投影((f)和(h))

(e)和(g)指示主挤压方向; (b)~(e)观测数据源于 A-区, (g)观测数据来源于 B-区, (f)和(h)投影数据来源于 A-区和 B-区

表 1　各变形期次构造-组构要素及特点

期次	构造/运动学	规模	应力-应变类型
D1	等斜-紧闭褶皱 F1, 轴面陡立, 褶皱轴走向 N-S, NE-SW 和 NW-SE 向; S0/S1 交面线理中-低角度北倾伏; 浅色花岗岩脉沿 F1 褶皱轴面侵位; F1 褶皱翼部发育平行 S0/1 面理的布丁构造	各种尺度: 小、大和超大型	收缩变形, 物质垂向挤出
D2	糜棱岩化面理 S2; 部分 S2 面理发生褶皱变形, 形成 F2 褶皱; F2 褶皱面陡立, 与 S2 面理近平行或平行, 褶皱轴陡倾伏; 矿物拉伸线理水平或近水平; 不对称 F2 褶皱和韧性剪切构造一致指示右旋为主的韧性走滑剪切运动	大、中和小尺度	右旋为主的走滑挤压应变
D3	NW-SE, 近 W-E 和 NE-SW 走向的走滑剪切带和断裂, 形成 S3 构造面, 表现出韧-脆性构造变形特征; 伴随有 F3 褶皱和浅色花岗岩的侵位; 小规模雁列状分布的假玄武玻璃脉, 指示右旋剪切破裂	中-小规模	右旋为主的走滑挤压应变
D4	脆性正断, 并伴有少量右旋走滑分量; 脆性破裂面 S4 与糜棱岩面理 S2 近平行, 擦痕倾伏范围 2°~70°	大-中尺度	右旋走滑伸展应变, 即正断和右旋走滑组分同时发生

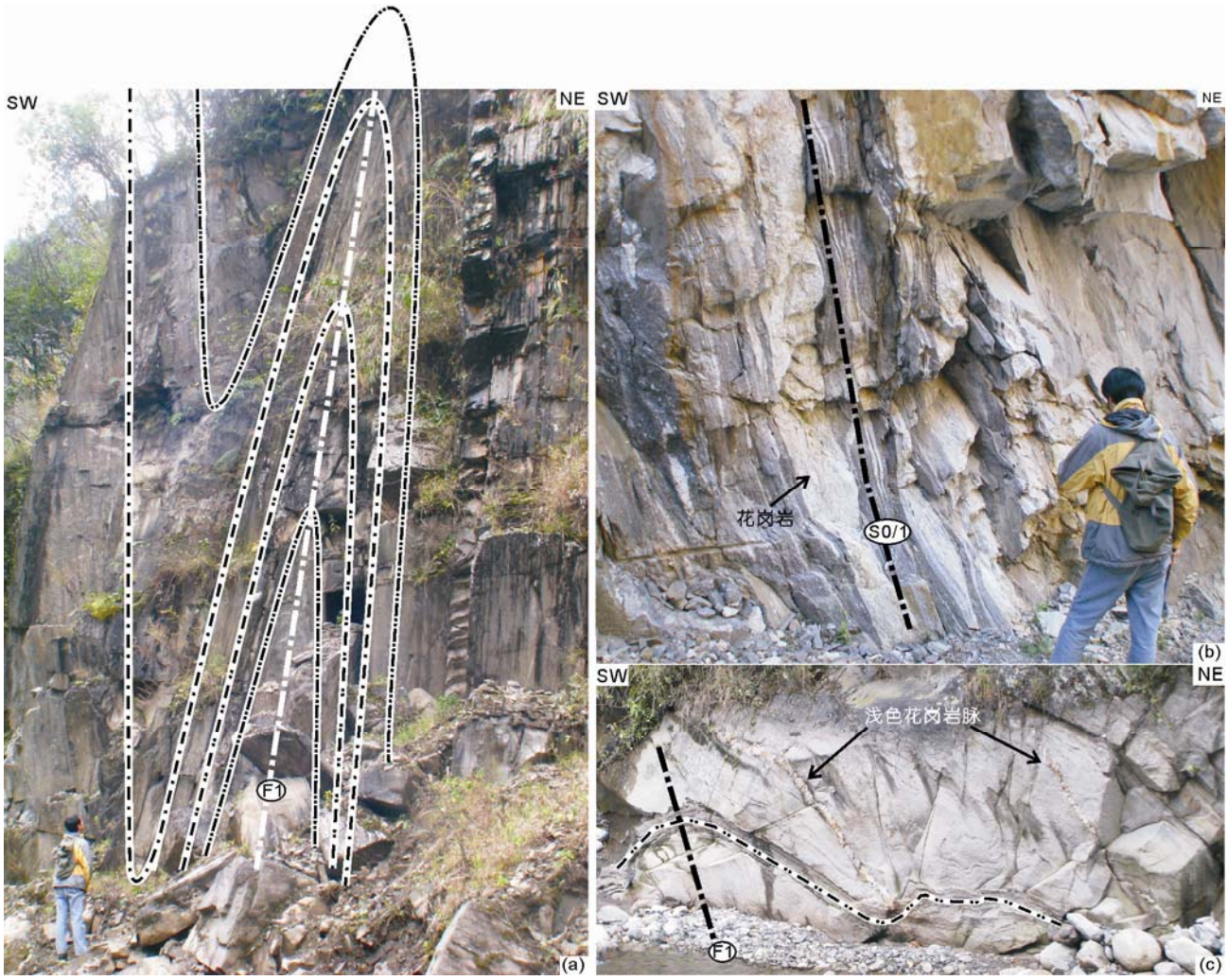

图 4　D1 变形构造野外露头

(a) 片岩内的紧闭褶皱 F1; (b) 弱变形浅色花岗岩脉平行条带片麻岩 S0/1 面理侵位; (c) 浅色花岗岩脉沿 D1 期次变形 F1 褶皱轴面侵位

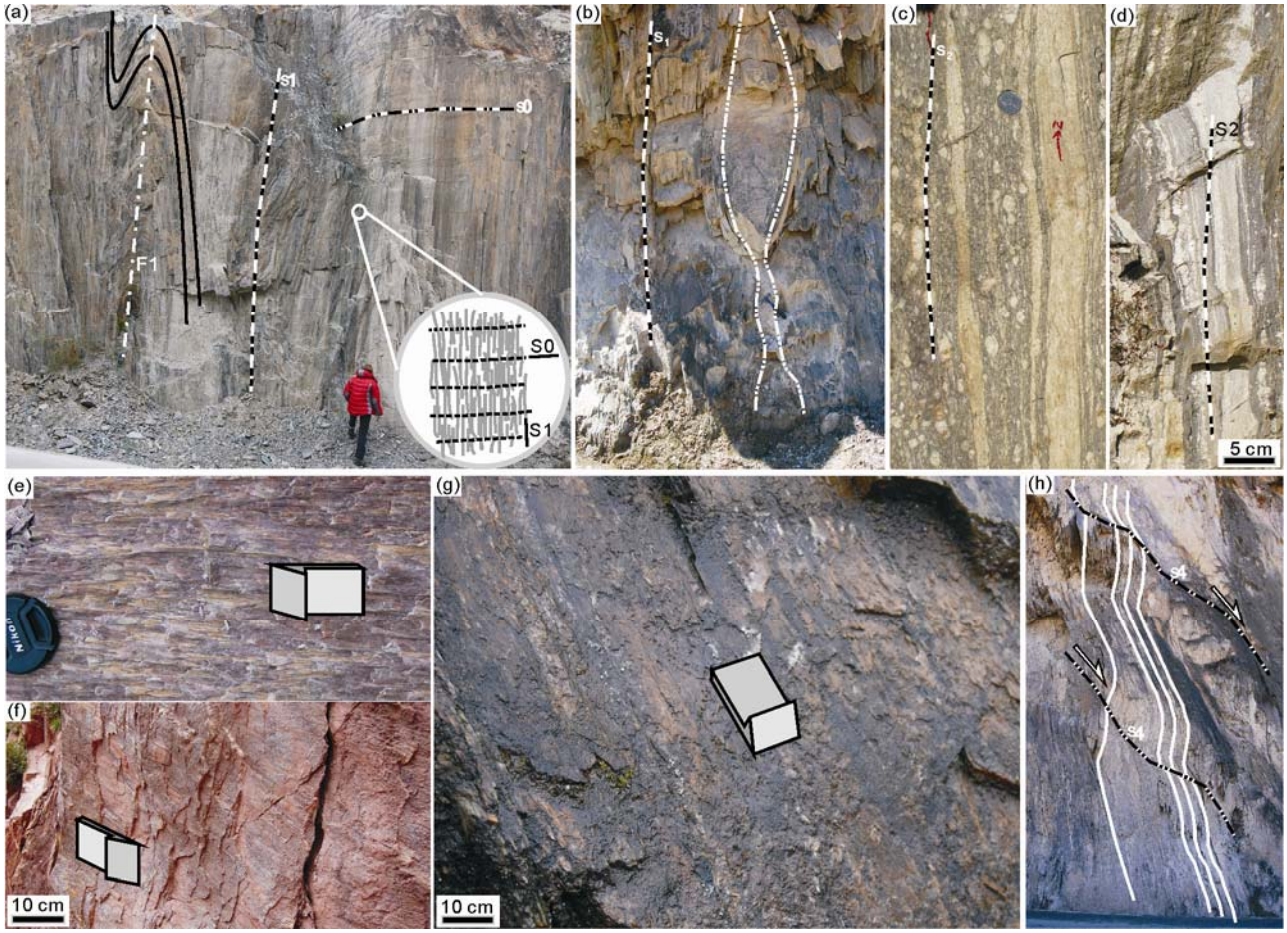

图 5　D1~D4 变形构造-组构野外露头

(a) 片岩带内的 D1 褶皱、S0 层和 S1 面理; (b) 平行片岩面理 S1 发育的大理岩布丁构造; (c) 眼球状花岗糜棱岩形成 S2 面理, 右旋为主的剪切指示; (d) 糜棱化条带片麻岩, 发育陡立 S2 面理; (e) 变质沉积岩内发育的脆性走滑断裂面, 水平擦痕和阶步指示右旋走滑运动; (f) 片麻岩内发育的左旋走滑断裂; (g) 糜棱片麻岩中发育的脆性正断裂, 陡倾伏的擦痕; (h) 片岩中的 D4 构造, 脆性正断改造 S0/1 面理, 注意 S4 构造面

应变特征在褶皱 F1 翼部的岩石变形中以普遍发生布丁化构造为表现形式, 这些布丁构造平行 S0/1 面理(图 2(g); 5(b)), 根据 Goscombe 等[35]建议的布丁分类方案, 这些布丁构造样式属于拉伸布丁, 为褶皱化和收缩应变环境的产物.

等斜-紧闭褶皱轴 N-S, NE-SW 和 NW-SE 走向, 倾伏角范围为低角度-近水平(图 3(f)), 这些 F1 褶皱要素的轻微变化可能暗示存在后期变形干扰作用. 观测点内的构造岩经历了强烈变形, 但 S1 面理和 S0 成分层可以被识别(图 5(a)), 成分层 S0 和轴面面理 S1 形成北倾伏的交面线理; 在 S1 面理上, 线理不发育. 在部分观测点, S1 面理被后期 D2 变形完全叠加, 在褶皱翼面上所观测到的矿物拉伸线理主要代表了新发育的 L2 线理. 在野牛沟观测点, 沿 F1 褶皱轴面方向侵位浅色花岗岩脉体(图 4(b)和(c)), 部分浅色花岗岩脉发生韧性变形(图 4(b)).

2.2　第二期变形构造 D2

D2 变形普遍叠加和改造 D1 变形组构, 所有早期发育在片麻岩和片岩中的 D1 组构都受到 D2 变形的影响, 并形成了宽度超过 3 km 的 N-S 和 NWN-SES 走向的高应变带; 带内 S0/S1 转换为中-陡倾角的 S2 面理(图 2; 5(c), (d); 6; 7(a)), 矿物拉伸线理(普遍为拉长的矿物颗粒)L2 为近水平或水平产出在糜棱面理 S2 上(图 2(a), (b)), 北倾和南倾伏(图 2(a)). 绝大多数剪切指示标志为右旋运动(图 6; 7(b)), 但左旋剪切指

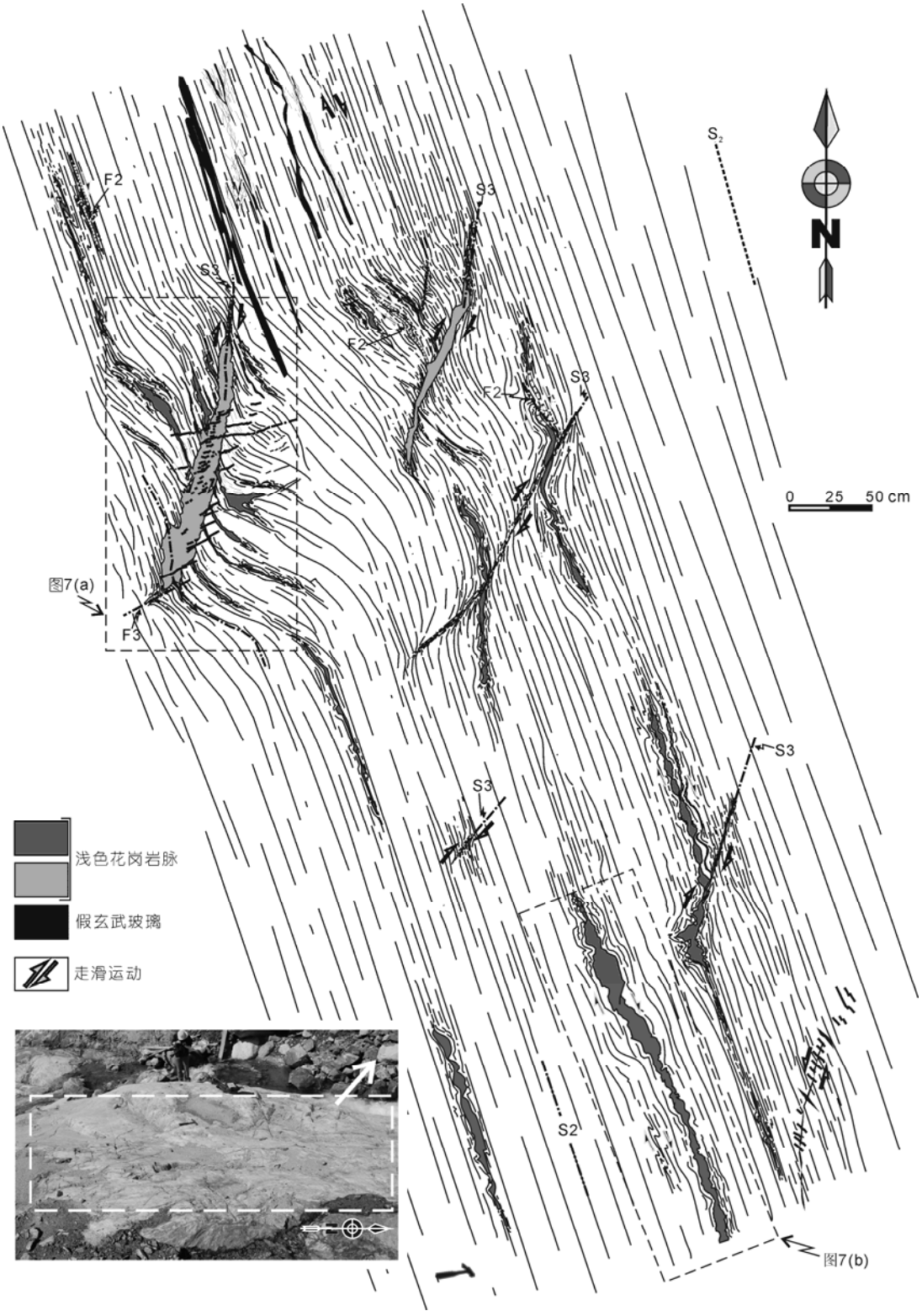

图 6　碧罗雪山西翼野牛沟镇附近地质构造图

位置见图 3, 示韧性和韧-脆性构造要素改造与置换关系



图 7　D2 和 D3 期次构造要素改造与叠加关系

位置见图 6. (a) F2 褶皱发生再次褶皱变形, 形成 F3 褶皱; (b) 发生布丁化的浅色花岗岩脉平行糜棱岩面理 S2, 不对称布丁构造指示右旋为主的剪切运动

示也可以在一些 F2 不对称褶皱中观测到(图 2(b)), Akciz 等[30]曾报道了在碧罗雪山西翼的糜棱岩中普遍发育左旋韧性剪切指示标志. 基于本次野外和显微组构观测, 如 S-C, 以及更多的不对称 F2 褶皱和石英微构造分析[21], 总体认为 D2 构造形成于右旋韧性剪切为主的走滑环境, 且 D2 构造岩变质程度达到高绿片岩相和角闪岩相, 导致部分混合岩化(图 5(d)); 在一些观测点, 部分 S2 面理和浅色花岗岩发生宽缓或紧闭-等斜 F2 褶皱(图 2(f); 6; 7(a)), 这些 F2 褶皱更多表现为局部构造, 主要发育在强烈糜棱岩化的浅色花岗岩脉和石英脉; 这些被褶皱的脉体表现出陡立的褶皱轴和近竖直的轴面(图 3(f)). 长石和石英颗粒的集合体也部分发生褶皱变形. 在一些片岩露头, F1 等斜褶皱被再次褶皱变形, 形成宽缓的 F2 褶皱. 大多 F2 褶皱呈强烈不对称特点, 指示右旋剪切运动, 与韧性剪切指示标志一致. F2 褶皱的轴面与糜棱岩面理 S2 平行或亚平行, 因此, 主剪切面理和褶皱 F2 被解释为同期变形的产物[36].

2.3　第三期变形构造 D3

D1 和 D2 变形之后, 糜棱岩遭受了一期韧-脆性构造改造; 这些韧-脆性构造走向 NW 和 NE, 高角度切割糜棱岩面理(图 1(a); 2(c); 3(c), (d), (g); 6; 7(a)). 部分韧-脆性构造表现为宽度小于 5 cm 的小规模剪切带, 为重结晶长石和定向石英颗粒组成的蚀变面理 S3(图 6; 7(a)), 在显微薄片下, 这些剪切带内的石英普遍发生变形纹和波状消光. F2 褶皱和糜棱岩面理 S2 被再次褶皱变形, 形成牵引褶皱 F3; 浅色花岗岩脉沿 F3 褶皱轴面方向侵位, F3 与 F2 褶皱轴呈高角度相交; 不对称 F3 褶皱指示了右旋剪切变形(图 6; 7(a)); 第三期次变形还包括两组共轭走滑构造, 显著的擦痕和阶步特征指示: 右旋走滑主要沿 NE 方向, 而左旋走滑沿 NW 方向(图 3(c), (d); 5(e), (f)).

韧-脆性剪切带和这些共轭走滑破裂构造表现出较为一致的走向和运动学特征, 表明统一构造应力-应变体系是在近地表层次变形的产物[36~38]; 根据摩尔库伦准则和岩石变形最大有效力矩准则[39], 推测

D3 变形的最大主挤压方向分别为 NW-SE(图 3(d))和近东西向(图 3(g)).

2.4 第四期次构造变形 D4

D4 期次的变形以脆性破裂构造为主, 形式为节理、矿物充填破裂和脆性断裂. 这些脆性破裂构造面, 形成 S4, 产状中等-陡立, 与 S0/1/2 面理呈较高角度相交, 走向 NNE-SSW(图 2(f), (i); 3(b), (h); 5(h)); 脆性 S4 构造面与韧性剪切面理 S2 近平行(图 2(i); 3(b), (g)), 或呈低角度切割 S2 面理(图 5(h)); 破裂面上擦痕陡立(倾向擦痕)或中等角度倾伏(图 2(f); 5(h), (g)), 指示正断性质; 在一些正断裂面上也可观测到右旋脆性构造产生的微弱阶步和擦痕; 部分右旋脆性构造面与 D4 正断裂面走向基本一致(近 NE-SW), 但走滑断裂面与 D4 正断裂面斜交(图 3(g)), 这些特征表明 D4 正断构造变形的同时, 可能存在一定量的右旋走滑组分, 表现出走滑伸展应变特征(Transtensional strain)[34,37,38].

2.5 构造叠加和构造序列

研究区构造岩发育多期变形构造面理和褶皱变形, 构造叠加和改造作用显著(图 8 和 9). F1 褶皱轴产状和倾伏向表现出一定程度的变化, 可能与 D2 变形期剪切变形形成的 F2 褶皱作用的改造和干扰有关; 同时 F1 褶皱的枢纽端明显加厚而翼部减薄, 且减薄的翼部发生再次褶皱变形, 局部形成不对称 F2 褶皱构造, 这种干涉与叠加样式表明挤压应变早于韧性走滑剪切运动(图 9); F2 褶皱轴面和 S2 糜棱面理被后期韧-脆性剪切带所切割和置换, 形成 S3 构造面和不对称 F3 褶皱, 指示韧-脆性变形构造环境为近地表层次(图 8).

D2 和 D3 构造的演化序列如图 8 所示, D2 期次的

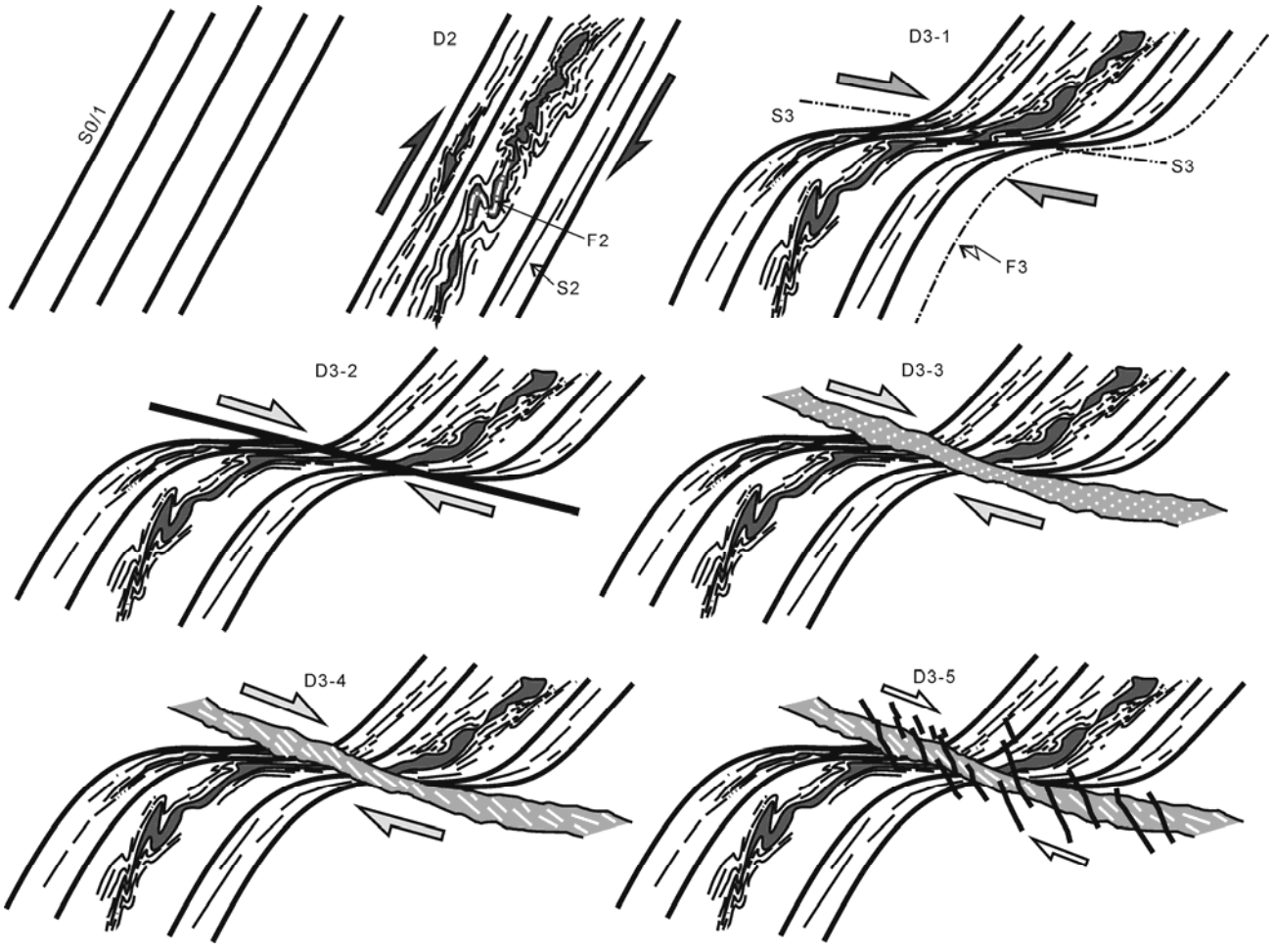

图 8 韧-脆性变形构造 D2 和 D3 演化序列

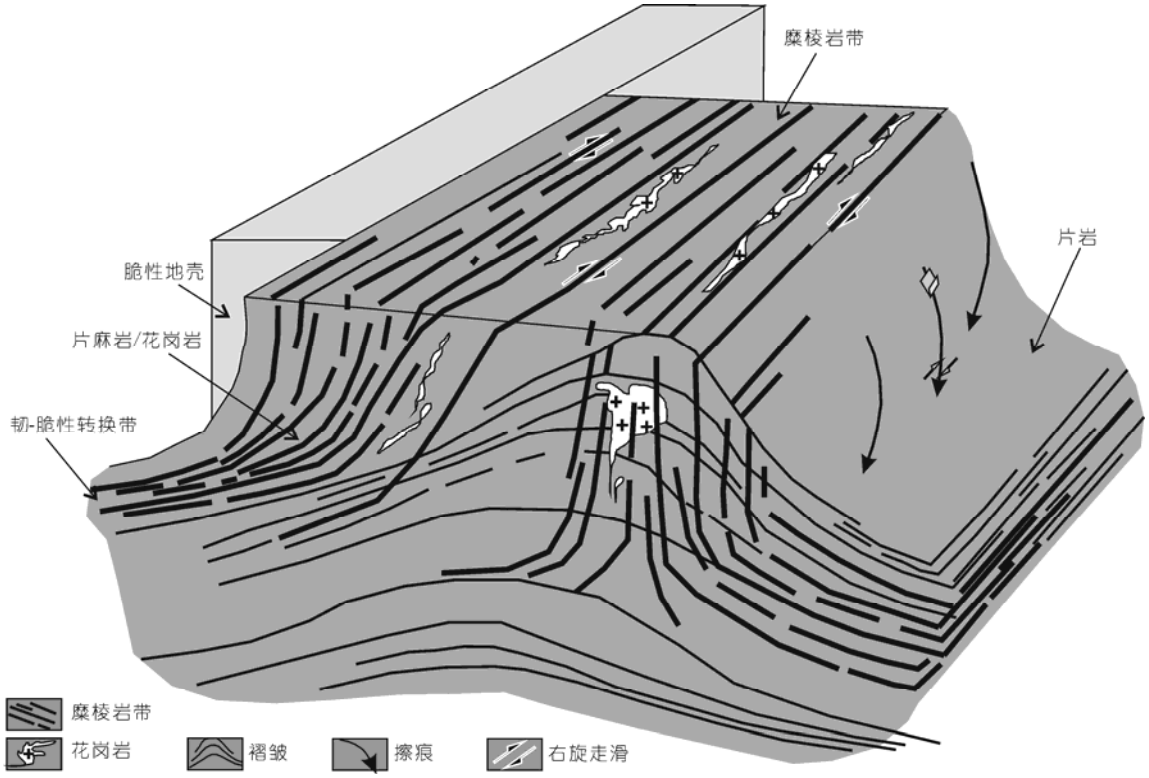

图 9　碧罗雪山-崇山带北段构造岩深部几何学和运动学三维图示

糜棱面理 S2 发生不对称褶皱改造, 沿褶皱轴面方向发生小规模剪切带错断(图 8, D3-1 和 D3-2), 平行褶皱轴面方向, 发生浅色花岗岩侵位, 且脉内矿物长石和石英颗粒呈一定程度定向排列(图 8, D3-3 和 D3-4); 在浅色花岗岩脉表面也可观测到一系列脆性雁列状破裂构造, 也切割脉体、F3 和 S3 组构, 指示其为更晚期构造变形或近地表构造(图 8, D3-5). 这些韧-脆性和脆性构造形成一组共轭走滑断裂, 根据最大有效力矩准则[39], 钝角角分线方向为最大挤压应力方向, 据此推测研究区存在一个近 W-E 向挤压作用(区域-B)和 NW-SE 向挤压应变(区域-A)(图 3).

右旋走滑伸展应变主要以正断作用和少量右旋走滑运动为特征, 对 D1~D3 构造变形样式产生中等程度的改造, 为区域变形晚期地表或近地表构造的产物(图 9).

3　构造意义与讨论

厘定碧罗雪山-崇山剪切带北段新生代构造变形期次和应变类型及其与喜马拉雅东构造结地区的构造变形的关系至关重要. Zhang 等[26]报道沿碧罗雪山-崇山剪切带发育三期变形构造, 本次研究区内的 D1 和 D2 期次构造与 Zhang 等[26]所建议的 F1 和 F2 构造基本一致; 研究区内的 D3 韧-脆性构造变形可以粗略对应崇山带中-南段的 D3 构造样式. 值得注意的是该带北段 D4 期次构造变形显著, 可能暗示走滑伸展构造在该带北段区域更为普遍和强烈(王二七, 个人交流); 当然, 该带中-南段是否发育 D4 期次脆性走滑伸展构造还有待进一步野外观测.

碧罗雪山-崇山剪切带记录了多期构造变形样式(图 9), 如褶皱、韧性剪切带和两期韧-脆性和脆性破裂相关的构造样式. 从大-中尺度构造演化序列而言, 剪切带内构造样式的相对时代可以大致厘定为“同剪切 F2 褶皱变形”和“后剪切 F2 褶皱变形”, F1 褶皱变形明显早于 F2 褶皱, 而韧-脆性和脆性构造则可能发生在碧罗雪山-崇山韧性剪切变形之后(图 10). 我们的工作支持 Wang 和 Burchfiel[4]和王二七等[23,24]的解释方案, 他们认为碧罗雪山-崇山剪切带的韧性变形发生在渐新世-中新世, 自早上新世至今转变为脆性走滑伸展应变带[12,41]. 此外, 大-中尺度 D1 变形样式 F1 褶皱的发育暗示碧罗雪山-崇山带不仅仅是一条走

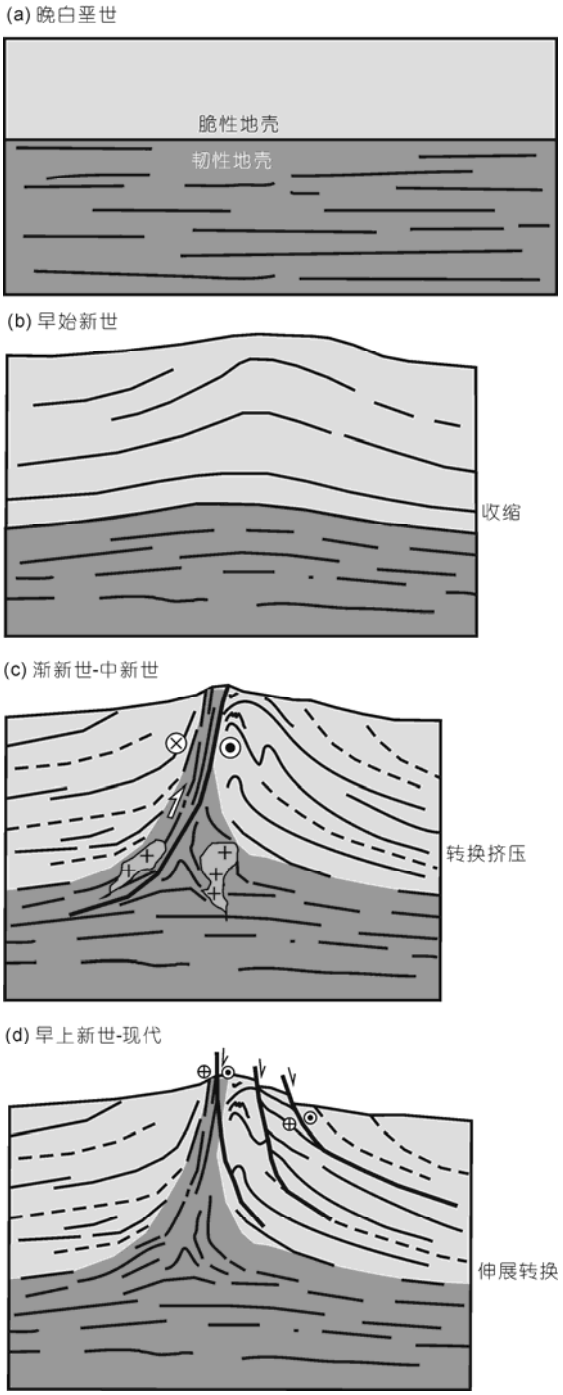

图 10　晚白垩世-现今碧罗雪山-崇山剪切带及邻区构造演化期次剖面示意

(a) 印度-欧亚大陆汇聚-碰撞前(晚白垩世)研究区韧、脆性地壳状态; (b) 早始新世, 响应大陆碰撞而引发的地壳增厚作用; (c) 渐新世-中新世, 走滑挤压应变在中、上地壳形成陡立韧性剪切带[6,40]; (d) 早上新世至今, 走滑伸展体制下的脆性变形构造

受滑挤压应变体系制约的高应变带, 也是一条记录强烈纯剪切变形的收缩变形带(图 9). 据此推断, 碧罗雪山-崇山剪切带发育之前, 在印度-欧亚大陆碰撞的早期阶段, 遭受印度大陆碰撞的相关块体应近东西向展布, 进而造成环喜马拉雅东构造结地区和邻区发生强烈的地壳增厚和物质的垂向挤出.

4　区域构造暗示

喜马拉雅东构造结东缘地区展布的大型剪切带 D1, D2, D3 和 D4 期次变形世代的精细确定至关重要, 但有关该带的形成时代仍然存在不一致的观点, 范围为 40~12 Ma[4,24,26,30,42]; 争论的焦点主要为碧罗雪山-崇山剪切带启动于始新世还是早渐新世.

Akciz 等[30]强调该带为左旋走滑, 其韧性剪切作用启动于 40 Ma; Wang 和 Burchfiel[4,5]认为沿崇山左旋韧性走向剪切发生在 35~20 Ma, 与哀牢山-红河左旋走滑剪切运动时限基本一致[6]. Wang 等[24]也报道了类似的热年代学数据, 并解释该带左旋走滑活动于 32 和 29~27 Ma. 然而, Socquet 和 Pubellier[12]强调碧罗雪山-崇山带早期以左旋走滑剪切为主, 发生在渐新世, 晚期(20~12 Ma)该带遭受邻区高黎贡右旋走滑剪切作用改造. 张波等[25,26,42]认为碧罗雪山-崇山剪切带整体为左旋走滑挤压带, 应变分解导致该带北段发育右旋走滑运动, 中段和南端发生左旋走滑剪切运动, 走滑剪切启动于 32 Ma, 持续活动至 19 和 14 Ma, 他们的工作也证明沿剪切带出现的不同指向的运动学标志是同期走滑挤压应变分解的产物.

如前文所述, D1 早于 D2 构造. F1 褶皱、拉伸布丁和侵位的浅色花岗岩特征暗示区域性或局部地壳增厚事件的存在. Akciz 等[30]和 Zhang 等[26]报道了该区浅色花岗岩脉的 U-Pb 锆石年龄为 55~38 Ma, 沿碧罗雪山-崇山剪切带的始新世花岗岩与察隅-滇西-缅甸花岗岩体的时代可对比[32,33,43~46], 地球化学特征表现为较低的$\varepsilon_{Hf}(t)$值[46], 该花岗岩带被解释为印度-欧亚大陆碰撞开始的重要标志岩体[9,11,32,44,46]. 在晚白垩世, 印度大陆向北汇聚, 到达欧亚大陆的南缘, 碰撞发生在 65~55 Ma[9,10,22,32]; 伴随印度-欧亚大陆的碰撞, 在碰撞大陆边缘和相邻的陆内地区首先发生地壳增厚[13,20,47]; 虽然主要的汇聚变形发生在单泰板块的西侧, 如缅甸地体(图 1)[4,8,13], 但汇聚作用早期引发始新世地壳增厚导致的变质和变形作用已经普遍

发生[4,6,8,13,41]. 因此, 沿碧罗雪山-崇山带北段发生的始新世岩浆事件与收缩变形是印度-欧亚大陆碰撞早期的产物, 在研究区表现为 D1 变形构造(图 10(b)).

本次研究和以往文献研究认为 D2 构造为韧性走滑剪切运动[12,25,26,42], 其主要证据为糜棱岩中的 F2 褶皱轴面与构造岩面理 S2 平行, 且不对称 F2 褶皱样式与糜棱岩中的组构大多指示右旋剪切运动. 基于这些观测, D2 变形构造源于主糜棱岩化作用(图 10(c)). 变形浅色花岗岩脉 U-Pb 锆石年代学数据指示韧性走滑剪切变形启动时代为渐新世-中新世[26]; 该期花岗岩与邻区哀牢山-红河剪切带内的同构造花岗岩时代一致或相近[15,18,19,21,48], 该期岩浆作用也发生在泰国境内的 Wang Chao-Three Pagodas 断裂带之间的走滑挤压应变带内[18,49].

韧-脆性变形构造 D3 和脆性走滑伸展变形 D4 为研究区内重要的浅层次构造变形样式. D3 构造变形为一近 E-W 向挤压和 NNW 向伸展体系, 这种应力-应变式样可能与区域左旋韧性走向挤压应变同期(图 10(c)), 如碧罗雪山-崇山左旋走滑挤压应变区[12,26]、哀牢山-红河左旋走滑挤压应变区[6,12,16,17]以及其间的地体; Zhang 等[26]基于哀牢山-红河带和碧罗雪山-崇山带内各类构造面理和面理几何特征, 认为这些源于地壳深部的韧性构造岩遭受 E-W 向挤压而发生物质的垂向挤出[39,47], 在近地表韧-脆性环境形成 D3 构造; 由此推断, D3 构造变形形成于走滑挤压应变的晚期或近地表层次, 当变形分解接近 100%, 即走滑挤压的简单剪切分量完全沿 N-S 向走滑带发生分解的时期, 类似于 San Andreas 断裂[26].

D4 构造变形以近 N-S 走向的走滑伸展应变为特征, 即同时发生脆性正断和右旋走滑(图 10(d)). 这种应力-应变体系接近于右旋走滑伸展的哀牢山-红河断裂[4,5,19,20,24,40,41,50]和高黎贡断裂体系[51,52]. 这个应力体系也与东南亚地区的震源机制和活动构造体系一致[8,12,13,23,53,54]; Socquet 和 Pubellier[12]认为青藏高原东南缘自上新世至今受控于这个区域性走滑伸展应变体系.

5 结论

碧罗雪山-崇山剪切带北段紧邻喜马拉雅东构造结地区, 区内发育响应印度-欧亚大陆汇聚-碰撞事件的 4 期构造变形样式. 较老的韧性变形体系(约 55~38 Ma), 响应印度-欧亚大陆碰撞的早期, 近 N-S 向强烈收缩变形产生 D1 变形, 以 F1 褶皱变形为特征; 该韧性体系代表了相对深层次地壳变形, 并导致早始新世地壳增厚和物质的垂向挤出. 在渐新世-中新世(开始于约 32 Ma), 先期存在的韧性构造遭受大规模韧性走滑剪切变形的叠加和改造, 以走滑挤压应变为特征, 形成沿主要构造带展布的糜棱岩和变质岩的垂向挤出. 自中新世(约 13 Ma 之后), 先期存在的韧性构造-组构被晚期近地表和地表层次的韧-脆性和脆性构造变形改造; 这些韧-脆性构造也可能是区域韧性走滑挤压应变晚期地壳浅层次变形的产物. 最晚期的脆性构造表现为走滑伸展应变, 以平行主构造岩面理的脆性走滑和正断伸展体系为特征.

总之, 自 65 Ma 印度-欧亚大陆碰撞以来, 环喜马拉雅东构造结及东缘地区的陆内构造经历了大致 4 期构造变形和变形体制转换, 即地壳增厚(D1)、韧性走滑挤压(韧性域 D2 和韧-脆性域 D3)和右旋走滑伸展(D4).

致谢 研究过程得到中国科学院王二七、丁林、肖文交、李献华、王非和林伟研究员的热情帮助和多次鼓励; 郑亚东教授在构造解析和岩石变形基本理论领域给予了启迪和指导; 刘俊来教授在显微构造和构造解析方法研究方面给予帮助和指导; 研究过程得到刘树文、韩宝福、郭召杰、侯贵廷教授以及王涛研究员的多次鼓励和鞭策; 三位匿名审稿人对本文提出了宝贵的意见和修改建议, 在此一并表示衷心感谢.

参考文献

1 Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, et al. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. Geology, 1982, 10: 611–616

2 Zhong D L, Tapponnier P. Large-scale strike slip fault: The major structure of intracontinental deformation after collision. Chin Sci Bull, 1990, 35: 304–309

3 Chen H H, Dobson J, Heller F, et al. Paleomagnetic evidence for clockwise rotation of the Simao region since the Cretaceous: A consequence of India-Asia collision. Earth Planet Sci Lett, 1995, 134: 203–217
4 Wang E Q, Burchfiel B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan Shear Zone and the Eastern Himalayan Syntaxis. Int Geol Rev, 1997, 39: 191–219
5 Wang E Q, Burchfiel B C. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau. Geol Soc Am Bull, 2000, 112: 413–423
6 Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. Tectonophysics, 1995, 251: 3–84
7 England P, Houseman G. Finite strain calculations of continental deformation 2. Comparison with the India-Asia collision zone. J Geophys Res, 1986, 91: 3664–3676
8 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. Tectonophysics,2001, 334: 115–150
9 Zhang J J, Ji J Q, Zhong D L, et al. Structural and chronological evidence for the India-Eurasia collision of the Early Paleocene in the Eastern Himalayan Syntaxis, Namjagbarwa. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2002, 76: 446–454
10 丁林. 西藏雅鲁藏布江缝合带古新世深水沉积和放射虫动物群的发现及对前陆盆地演化的制约. 中国科学: 地球科学, 2003, 33: 47–58
11 Ding L, Kapp P, Zhong D L, et al. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction. J Petrol, 2003, 44: 1833–1865
12 Socquet A, Pubellier M. Cenozoic deformation in western Yunnan (China-Myanmar border). J Asian Earth Sci, 2005, 24: 495–515
13 Morley C K. Variations in Late Cenozoic-Recent strike-slip and oblique-extensional geometries, within Indochina: The influence of pre-existing fabrics. J Struct Geol, 2007, 29: 36–58
14 季建清, 钟大赉, 张连生. 滇西南新生代走滑断裂运动学、年代学及对青藏高原东南部块体运动学的意义. 地质科学, 2000, 35: 336–349
15 Chung S L, Lee T Y, Lo C H, et al. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailaoshan-Red River shear zone. Geology, 1997, 25: 311–314
16 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 Geophys Res, 2001, 106: 6683–6732
17 Leloup P H, Tapponnier P, Lacassin R. Discussion on the role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia. J Geol Soc London, 2007, 164: 1253–1260
18 Searle M P. Role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia. J Geol Soc, 2006, 163: 1025–1036
19 Zhang J J, Zhong D L, Sang H Q, et al. Structural and geochronological evidence for multiple episodes of Tertiary deformation along the Ailao Shan-Red River Shear Zone, southeastern Asia, since the Paleocene. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2006, 80: 79–96
20 Liu J L, Song Z J, Cao S Y, et al. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates: Exemplified by the tectonic evolution of the Three River region, eastern Tibet. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2006, 22: 775–786
21 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. 地质学报, 2009, 83: 1388–1400
22 Ding L, Kapp P, Wan X Q. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet. Tectonic, 2005, 24: TC3001
23 王二七, 樊春, 王刚, 等. 滇西哀牢山-点苍山形成的构造和地貌过程. 第四纪研究, 2006, 26: 220–227
24 Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, et al. Kinematics and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of the Gaoligong and Chongshan shear systems, western Yunnan, China: Implications for early Oligocene tectonic extrusion of SE Asia. Tectonophysics, 2006, 418: 235–254
25 张波, 张进江, 钟大赉, 等. 滇西澜沧江构造带及邻区几何学、运动学和构造年代学分析. 地质科学, 2009, 44: 889–909
26 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 Struct Geol, 2010, 32: 445–463
27 云南省地质矿产局. 云南兰坪-福贡-贡山 1:200000 地质图. 北京: 地质出版社, 1987
28 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1990
29 张波. 滇西澜沧江构造带新生代左行挤压走滑(transpression)的运动学特征和变形机制. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2007. 1–78
30 Akciz S, Burchfiel B C, Crowley J L, et al. Geometry, kinematics, and regional significance of the Chong Shan shear zone, Eastern

Himalayan Syntaxis, Yunnan, China. Geosphere, 2008, 4: 292–314
31 Zhang R, Cong B, Maruyama S, et al. Metamorphism and tectonic evolution of the Lancang paired metamorphic belts, southwestern China. J Metamorph Geol, 1993, 11: 605–619
32 Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, et al. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. Lithos, 2007, 96: 225–242
33 Mo X X, Niu Y L, Dong G C, et al. Contribution of syn-collisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet. Chem Geol, 2008, 250: 49–67
34 Fossen H, Tikoff B. The deformation matrix for simultaneous pure shear, simple shear, and volume change, and its application to transpression/transtension tectonics. J Struct Geol, 1993, 15: 413–422
35 Gosombe B D, Passchier C W, Hand M. Boudinage classification: End-member boudin types and modified boudin structures. J Struct Geol, 2004, 26: 739–763
36 Passchier C W, Trouw R A J. Microtectonics. Berlin: Springer, 1996. 1–353
37 Twiss R J, Moores E M. Structural Geology. New York: W.H. Freeman and Company, 2007. 1–736
38 Tikoff B, Fossen H. The limitations of three-dimensional kinematic vorticity analysis. J Struct Geol, 1995, 17: 1771–1784
39 Zheng Y D, Wang T, Ma M B, et al. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults. J Struct Geol, 2004, 26: 271–285
40 Jolivet L, Beyssac O, Goffe B, et al. Oligo-Miocene midcrustal subhorizontal shear zone in Indochina. Tectonics, 2001, 21: 46–57
41 Wang J H, Yin A, Harrison T K, et al. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collision zone. Earth Planet Sci Lett, 2001, 188: 123–133
42 张波, 张进江, 钟大赉, 等. 滇西澜沧江左旋走滑挤压带应变分解的应变和运动学涡度证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 1268–1283
43 Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, et al. Timing of magma mixing in the Gangdise magmatic belt during the India-Asia collision: Zircon SHIRMP U-Pb dating. Acta Geol Sin-Engl Ed, 2005, 79: 66–76
44 Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. Chem Geol, 2006, 234: 105–126
45 Wu F Y, Ji W Q, Liu C Z, et al. Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic data from the Xigaze fore-arc basin: Constraints on Transhimalayan magmatic evolution in southern Tibet. Chem Geol, 2010, 271: 13–25
46 Ji W Q, Wu F Y, Chung S L, et al. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdese batholith, southern Tibet. Chem Geol, 2009, 262: 229–245
47 胥颐, 刘建华, 刘福田, 等. 哀牢山-红河断裂带及其邻区的地壳上地幔结构. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 1201–1208
48 Chung S L, Chu M F, Zhang Y Q, et al. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. Earth-Sci Rev, 2005, 68: 173–196
49 Lacassin R, Maluski H, Leloup P H, et al. Tertiary diachronic extrusion and deformation of western Indochina: Structural and ^{40}Ar-^{39}Ar evidence from NW Thailand. J Geophys Res, 1997, 102: 10013–10037
50 侯增谦, 王二七, 莫宣学, 等. 青藏高原碰撞造山与成矿作用. 北京: 地质出版社, 2008. 1–980
51 Wang G, Wan J L, Wang E Q, 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. Tectonophysics, 2008, 460: 1–20
52 Lin T H, Lo C H, Chung S L, et al. ^{40}Ar/^{39}Ar dating of the Jiali and Gaoligong shear zones: Implications for crustal deformation around the Eastern Himalayan Syntaxis. J Asian Earth Sci, 2009, 34: 674–685
53 Metcalfe I, Sone M. Biostratigraphy and palaeobiogeography of Lower Permian (lower Kungurian) conodonts from the Tak Fa Formation (Saraburi Limestone), Thailand. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2008, 257: 139–151
54 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社, 1998. 1–231