中国科学: 地球科学 2018 年 第 48 卷 第 1 期: 62 ~ 78
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

中新世以来滇藏怒江峡谷区变形与构造深度层次

刘志成[1,2], 季建清[2*], 洒骁[2], 陈亚鹏[3], 钟大赉[4]

1. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029;
2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
3. 中国电建集团北京勘探设计研究院有限公司, 北京 100024;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* 通讯作者, E-mail: grsange@pku.edu.cn

收稿日期: 2017-05-25; 接受日期: 2017-09-14; 网络版发表日期: 2017-11-14
中国地质调查局项目(编号: 12120113013700)和中国地震灾害防御中心主任基金项目(编号: 201604)资助

摘要 地壳不同深度上的岩石物理性质的差异决定了在垂向上的构造变形呈现不同构造样式. 依据地壳内主导变形机制的差异, 划分出不同的构造层次, 有助于更好地解析出露地质体的构造演化. 滇藏怒江峡谷区具有高差大, 河流切割地壳深度大, 以及在强烈的变形下不同地壳层次的岩石得以出露等独特特征, 因此是地壳变形层次研究的理想区域. 本文通过对怒江流域察瓦龙至福贡区段的详细区域地质考察和构造变形分析, 识别出地壳深层次到浅层次的不同构造变形样式. 其中, 深层次的构造样式以流动构造变形为主, 主要出露于马吉地区. 韧性变形在整个研究区广泛出露. 高黎贡右行走滑剪切带和普拉底-松塔左行走滑剪切带分别出露在马吉南北区域. 以相似褶皱和近直立密集劈理为特征的构造变形样式发育在普拉底以北. 脆性断裂, 为浅层次变形样式, 叠加改造了较深层次变形, 在整个研究区都有广泛发育. 因此, 研究区的主要构造样式由深至浅可划分为流变构造、韧性剪切构造、相似褶皱和脆性断裂构造4个构造层次. 4个构造层次不同变形样式的发育均与北东东-南西西向挤压应力场有关. 结合热史演化和区域构造特征, 滇藏怒江峡谷区不同深度层次构造样式的发育与中新世(21Ma)以来地壳差异性隆起或者剥露有密切的关系.

关键词 构造层次, 怒江, 流动变形, 韧性变形, 热史演化

1 引言

由于垂向上岩石物理性质、温压、构造应力等因素的变化, 地壳不同深度层次发育不同的变形样式. Sibson-Scholz断层模式展示了断层在不同深度层次上的结构特征, 由浅部至深部断层的变形方式和断层岩类型都呈现差异(Sibson, 1977; Scholz, 1988). Mattauer(1980)根据地壳变形随深度变化的规律将地壳划分为上、中、下3个构造层次: 上部构造层次的主导变形机制为剪切变形, 发育断层、节理等变形样式; 中部构造层次为挠曲变形, 发育等厚褶皱变形样式; 下部构造层次首先为压扁作用, 然后为流动作用, 发育相似褶皱、劈理、流动褶皱等变形样式. 通过对川东褶皱带进行构造解析和层次分析, 徐汀滢等(2012)

中文引用格式: 刘志成, 季建清, 洒骁, 陈亚鹏, 钟大赉. 2018. 中新世以来滇藏怒江峡谷区变形与构造深度层次. 中国科学: 地球科学, 48: 62–78, doi: 10.1360/N072017-00171
英文引用格式: Liu Z C, Ji J Q, Sa X, Chen Y P, Zhong D L. 2018. Crustal deformation and tectonic levels of Nujiang Gorge since the Miocene. Science China Earth Sciences, 61: 93–108, doi: 10.1007/s11430-017-9116-x

© 2017 《中国科学》杂志社

进一步细化了近地表构造层次的变形特征.

新生代以来, 印度大陆与欧亚大陆碰撞并持续楔入, 造就了举世瞩目的青藏高原, 对亚洲的地质地貌以至气候都有深远影响(Molnar和Tapponnier, 1975; Tapponnier等, 1982, 2001; Molnar和England, 1990). 大陆碰撞导致青藏高原东南缘地壳强烈缩短和增厚(England和Houseman, 1986; Houseman和England, 1986, 1993), 地壳各层次的物质遭受变形改造. 受构造活动、剥蚀作用等影响, 具有新生代变形变质特征的地壳深层次物质沿大型走滑剪切带广泛出露(Leloup等, 1995; Wang和Burchfiel, 1997). 青藏高原东南缘主要发育高黎贡剪切带、崇山剪切带和哀牢山-红河剪切带, 前人的研究重点探讨了剪切带的变形特征、活动时限、区域构造意义等内容(季建清等, 2000a, 2000b; 钟大赉等, 1989; Schärer等, 1990, 1994; Leloup等, 1995, 2001; Wang和Burchfiel, 1997; Searle, 2006; Searle等, 2010). 不同类型的变质变形岩石在这些剪切带内出露, 包括浅色花岗岩、糜棱岩、混合岩和片麻岩等, 变质程度最高可达麻粒岩相(Searle, 2006; Song等, 2010; Liu等, 2015). 剪切带内出露的物质被认为是多期次变质变形的产物(Searle等, 2010; Zhang等, 2012b), 这些岩石记录了不同温压条件的变质变形改造, 说明地壳中、深层次物质经过了由深到浅的剥露过程.

滇藏怒江峡谷区位于青藏高原东南缘北西西-北西向构造转变为南北向横断山构造的转折部位(图1a). 由北向南, 岩相学和变质特征有明显差异(Song等, 2010), 这表明不同深度层次的地壳岩石在怒江峡谷区差异出露. 以贡山为界, 以南的岩石变质程度相对较高, 前人对区域内的高黎贡剪切带和崇山剪切带开展了一定研究(Akciz, 2004; Song等, 2010; Zhang等, 2010, 2012a; Huang等, 2015). 贡山以北研究资料较少, 缺乏构造变形方面的研究. 本文选取滇藏怒江峡谷区, 重点补充了贡山以北的构造变形测量和分析资料, 根据构造层次理论和热史演化过程分析其新生代以来的构造演化.

2 地质背景

研究区位于滇藏交界怒江峡谷, 北至西藏察隅县察瓦龙乡, 南至云南福贡县匹河乡(图1b). 区内怒江流域地貌高差大, 河流切割深度大, 北部河段流向为南南东向, 至贡山以南, 整体流向转为近南北向. 区内岩浆岩多呈条带状展布于怒江流域西侧, 主体沿高黎贡山产出, 具有多期、多阶段的发育特点, 被认为是冈底斯岩浆岩带的东南延伸(杨启军等, 2006; Song等, 2010). 沿怒江两岸出露古生界石炭系和中生界三叠系, 地层普遍经历不同程度的变质作用. 察瓦龙至贡山的地层主体为石炭系和三叠系砂质板岩、片岩和灰岩等, 普遍经历了亚绿片岩相至绿片岩相变质, 贡山以南主要出露石炭纪沉积地层、糜棱岩、片麻岩和混合岩等, 经历了绿片岩相至高角闪岩相变质(Akciz, 2004; Song等, 2010).

高黎贡剪切带北段沿怒江西岸的高黎贡山山脉呈南北向展布, 至龙陵呈北东东-南西西向往西进入缅甸境内. 高黎贡剪切带为右行走滑运动学特征(季建清等, 2000a, 2000b; Akciz, 2004; Wang等, 2006), 剪切带的活动时限尚未有统一认识, 存在32Ma至29~27Ma(Wang等, 2006)、24~19Ma和14~11Ma两个峰期(季建清等, 2000a, 2000b)、18~13Ma(Lin等, 2009)、16~10Ma(Zhang等, 2012b)等活动时限的认识. 前人厘定的崇山剪切带沿怒江东岸的碧罗雪山和崇山山脉分布, 北段呈近南北向展布, 至泸水县逐渐转为北西-南东向(Wang和Burchfiel, 1997; Akciz等, 2008). 崇山剪切带运动学研究有不同认识, 早期的研究普遍认为崇山剪切带以左行走滑运动为特征(Wang和Burchfiel, 1997; Akciz等, 2008). Zhang等(2010)把高黎贡剪切带在怒江东岸的延伸当作崇山剪切带的一部分, 认为南段为左行走滑, 北段为右行走滑. 关于崇山剪切带的活动时限, 分别有32Ma至29~27Ma(Wang等, 2006)、32Ma至19~14Ma(Zhang等, 2010)、34~17Ma(Akciz等, 2008)等多种认识.

在研究区南部, 前人的研究普遍认为以怒江为界, 高黎贡剪切带和崇山剪切带分别沿怒江东、西两岸呈狭长的南北向条带展布, 两条剪切带中间夹少量的石炭系变质地层(Akciz等, 2008; Zhang等, 2010; Huang等, 2015). 高黎贡剪切带主要出露泥质片麻岩、混合岩、含石榴石浅色花岗岩脉体(Song等, 2010), 崇山剪切带主要出露混合岩、糜棱岩化片麻岩、眼球状片麻岩、浅色花岗岩脉体(Zhang等, 2010; Huang等, 2015). 根据几何形态和叠加关系, Zhang等(2012a)对高黎贡剪切带北段的构造变形进行了解析, 划分出4期韧性、韧-脆性变形(D1~D4). 张波等(2010)在崇山剪切带北

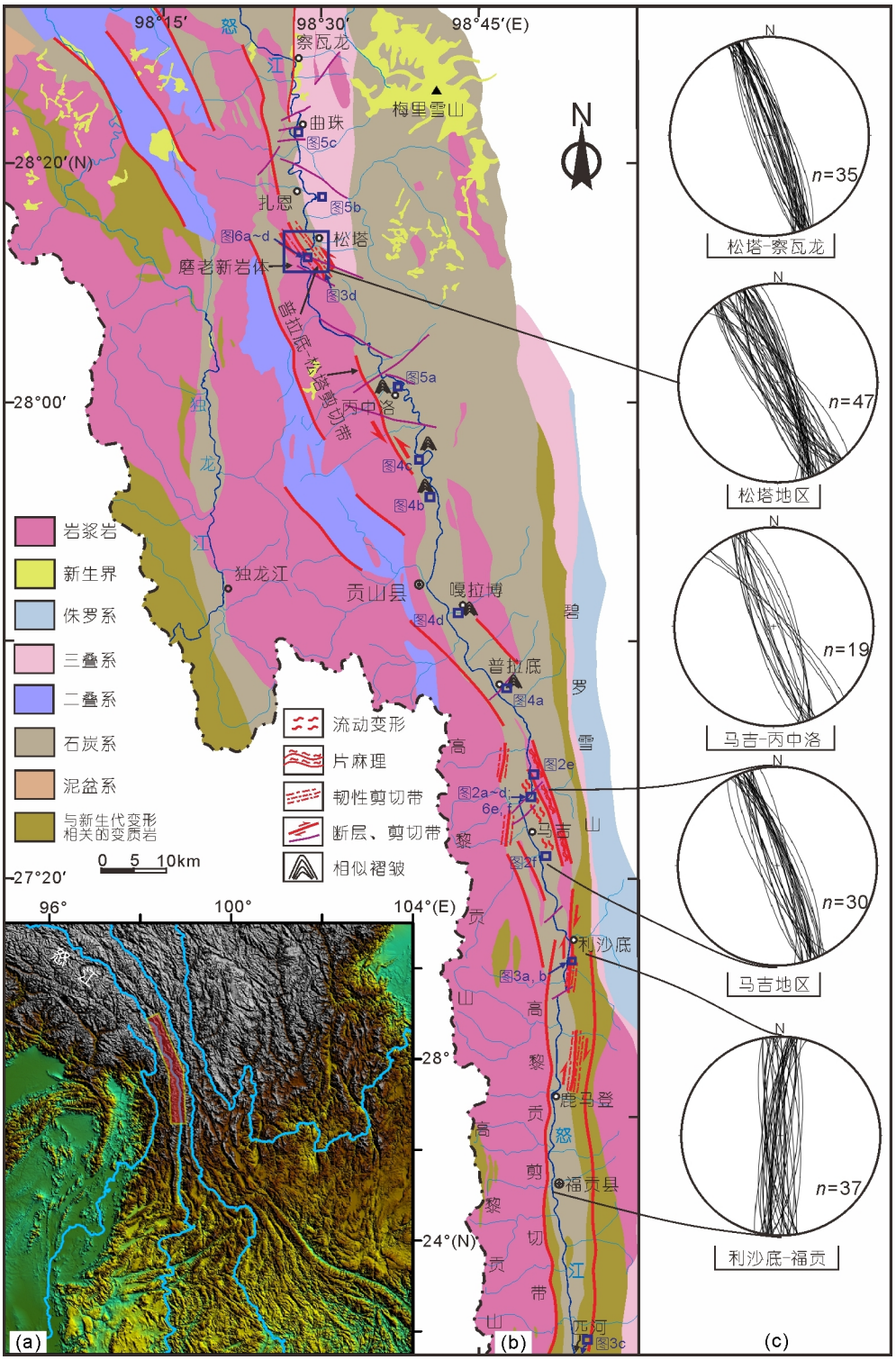


图 1　研究区地理位置和构造简图

(a) 青藏高原东南缘DEM影像, 红框为研究区域; (b) 研究区地质简图(据1:20万地质图福贡幅、贡山幅和德钦幅改编); (c) 研究区不同区段的主构造面理(包括相似褶皱轴面, 不包括浅层次脆性断裂)等面积下半球投影图

段识别了4期韧性、韧-脆性和脆性构造变形(D1~D4). 唐渊等(2013)将崇山剪切带南段出露的韧性变形划分为早期(D1)纯剪条件下的收缩变形和后期(D2)单剪递进条件下的左行走滑剪切变形.

3　野外构造变形样式

本文在研究区进行了区域地质调查, 测量和统计了构造面理、线理产状(图1b和c), 用构造层次的思想, 分析研究区内出露的构造变形样式. 相比于前人有一定研究的贡山以南的区域(例如, Akciz, 2004; Zhang等, 2010; Huang等, 2015), 研究区北段(贡山至察瓦龙)呈现了相对较浅层次的构造变形特征. 根据构造变形的几何样式和空间分布特征, 由深至浅划分出流变构造、韧性剪切构造、相似褶皱和脆性断裂构造4个构造变形层次.

3.1　流变构造

本文所划定的流变构造是指深层次地壳物质发生部分熔融(深熔作用)形成混合岩所呈现的构造变形. 混合岩可分为古成体(母岩)、浅色体和暗色体, 三者的空间分布决定了混合岩的构造特征(Mehnert, 1968; Johannes, 1983).

流变构造的核心出露地区位于马吉一带, 出露石炭系钙质砂岩、大理岩和片麻状花岗岩, 沿怒江两岸还可观测到一定规模的混合岩(图2). 片麻岩、浅色脉体和暗色体相伴出露, 反映地壳较深层次的岩石原地或半原地部分熔融. 深熔成因的浅色花岗岩和S型花岗岩的岩性主要是石榴石白云母花岗岩、含石榴石二云花岗岩(Song等, 2010). 部分熔融的源岩为灰色片麻

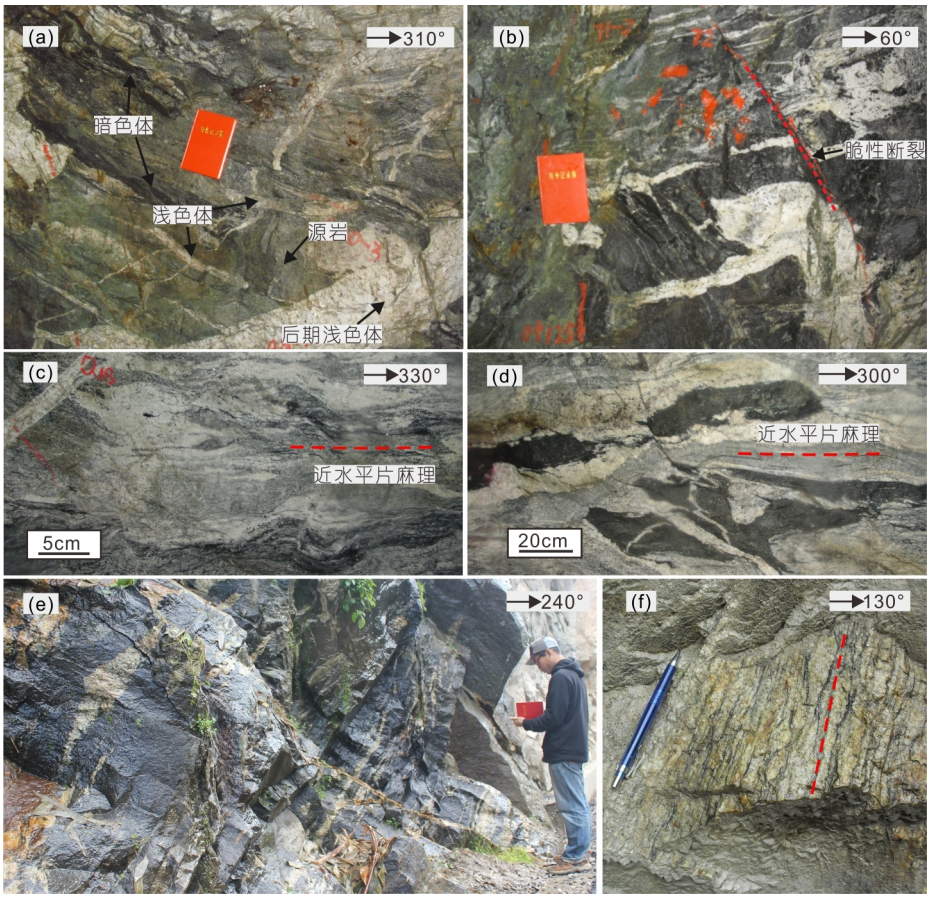


图 2　马吉地区流变构造野外露头

(a) 怒江东岸平硐, 灰色片麻岩重熔生成暗色体和浅色脉体; (b) 怒江东岸平硐, 浅色脉体侵位于暗色体内, 呈复杂褶皱形态; (c) 怒江西岸平硐, 混合岩中发育近水平片麻理; (d) 怒江西岸平硐, 暗色矿物定向形成近水平片麻理; (e) 马吉南, 陡立的条带状构造, 走向约340°; (f) 马吉北, 近直立的片麻状构造

岩, 熔融形成的浅色含石榴石花岗岩呈无根褶皱、流动褶曲、条带状、细脉状、肠状等构造样式(图2a~c). 浅色脉体呈岩枝状、岩脉状侵位于暗色残留体、片麻岩和石炭系中, 脉体规模不一, 宽度多为几厘米至几十厘米, 表明部分熔融过程中新生成的浅色体比暗色体更具有流动性. 混合岩与围岩之间没有明显的界线, 混合岩中可见似层状的片理构造(图2c和d). 面理产状统计显示, 马吉地区深熔作用形成的条带状构造和片麻理产状主要为近直立北北西向(340°~350°)(图1c), 局部残留近水平片麻状构造. 这一现象表明片麻岩在熔融阶段主要呈流动变形, 形成近水平的片麻理(图2c和d), 向上迁移形成近直立的条带状构造或片麻理(图2e和f).

部分熔融作用和矿物组合都反映高角闪岩相变质作用, 已有的研究显示马吉地区的变质温压条件达到685~750℃、6.5~8.4kbar(Song等, 2010), 因此马吉地区出露的构造变形层次最深. 值得注意的是, 在混合岩内可见大量的断层、节理等浅层次变形样式的叠加, 说明地壳深层次物质抬升至浅表叠加了脆性断裂变形.

3.2 韧性剪切构造

韧性剪切带是岩石中的线状高应变带, 岩层中无明显的连续破裂面. 韧性剪切带的规模不一, 在显微和宏观尺度上都可形成. 本文所划定的韧性剪切构造, 是指在研究区出露的构造层次比流变构造层次浅, 以发育近直立糜棱面理和糜棱岩为特征的韧性剪切带.

在研究区识别了两条不同运动性质的韧性剪切带, 分别为高黎贡韧性剪切带和普拉底-松塔韧性剪切带(图1b). 高黎贡剪切带位于研究区南部, 呈近直立右行走滑特征, 走向355°~10°; 普拉底-松塔剪切带主要出露于普拉底以北的地质体中, 呈近直立左行走滑特征, 由一系列走向320°的韧性剪切带组成. 普拉底-松塔剪切带与前人(Wang和Burchfiel, 1997; Akciz等, 2008)厘定的崇山剪切带南段平行, 运动性质和空间展布有相似特征.

高黎贡剪切带主要沿利沙底以南的怒江河谷和高黎贡山脉分布, 出露稳定, 往北可能延伸至碧罗雪山, 地表可见宽度达到数千米. 在这一区域, 前人大致以怒江为界划分出高黎贡剪切带和崇山剪切带(Zhang等, 2010; Huang等, 2015), 但有证据表明利沙底以南的怒江两岸主要出露右行韧性剪切构造形迹, 因此本次研究未沿用前人的认识. 根据野外观测数据, 高黎贡剪切带总体走向为近南北-北北东向(图1c和3a), 倾角一般大于70°. 剪切带内发育近水平的矿物拉伸线理、S-C组构、旋转碎斑系等变形形迹, 在剪切带核部主要发育眼球状糜棱岩. S-C组构和不对称碎斑都显示右行走滑特征(图3b和c). 糜棱岩S-C组构的剪切带内面理(S面理)走向为340°~350°, 糜棱岩剪切面理(C面理)走向为10°.

普拉底-松塔左行剪切带在普拉底以北出露, 沿怒江在普拉底-贡山、丙中洛、松塔-扎恩发育, 剪切带总体走向320°(图1b和c). 受后期构造改造和地层出露等因素影响, 野外只在松塔-扎恩附近观测到韧性变形剖面. 该断裂穿过松塔附近的磨老新岩体(图3d), 透镜状岩体沿北西方向延伸, 岩体与石炭系围岩都经历了绿片岩相变质. 岩体内部发育了一系列平行展布、规模不一的糜棱岩带, 走向约320°, 倾角达到75°以上. 糜棱岩带内的黑云母、长石斑晶等矿物发生明显的定向和旋转, 根据S-C组构、长石斑晶的旋转拉长等(图3e~g), 可以判定该变形带为左行韧性剪切带. 糜棱岩S-C组构的剪切带内面理(S面理)走向为340°~350°, 糜棱岩剪切面理(C面理)走向为320°~330°.

按照几何学特征, 高黎贡右行剪切带和普拉底-松塔左行剪切带应该在普拉底附近交汇, 由于野外出露条件限制, 没有能够获取揭示两条剪切带相互关系的构造证据. 但由于两条剪切带中S-C组构的剪切带内面理(S面理)走向一致, 同时剪切带内岩石都经历了绿片岩相-低角闪岩相变质, 所以仍可以推断两条剪切带为同一挤压应力场条件下发育的共轭韧性走滑剪切带.

3.3 相似褶皱

研究区北部出露的地层主要为石炭系和三叠系, 岩性以钙质板岩、砂岩、灰岩为主, 变质程度为浅变质, 发育的变形样式为相似褶皱和密集劈理(图4和5). 相似褶皱为紧闭-等斜褶皱, 褶皱层在转折端增厚、两翼减薄(图4a~c). 褶皱轴面近直立, 走向NNW(340°)(图1c和4c). 在马吉以北至松塔一带可观测到典型的相似褶皱剖面. 例如, 在嘎拉博褶皱剖面中(图4d), 既有轴面近直立的相似褶皱, 也有两翼不等长的不对称褶皱,

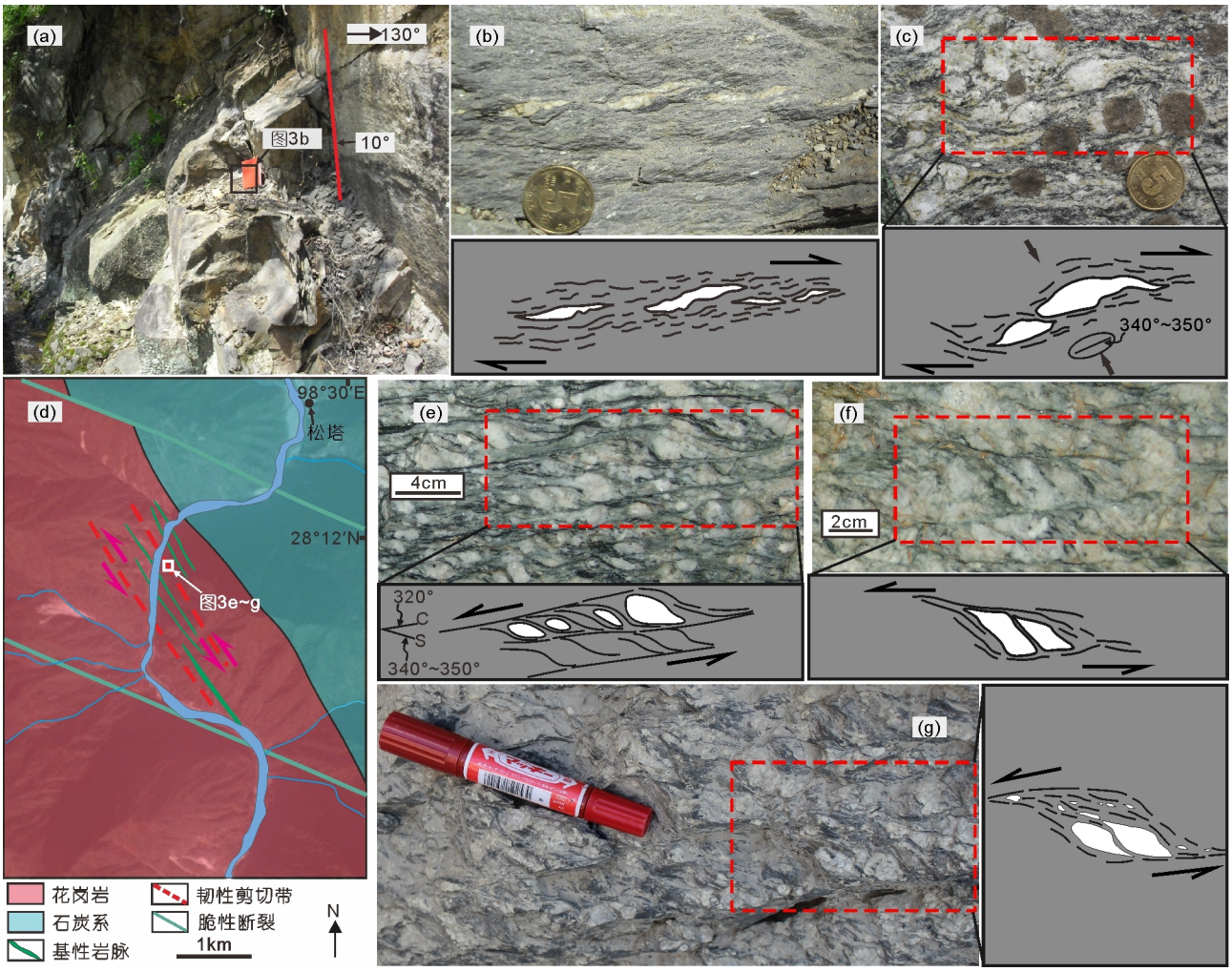


图 3　韧性剪切变形野外露头

(a) 利沙底, 近直立NNE向糜棱面理; (b) 利沙底, 拉长的碎斑指示右行走滑特征; (c) 匹河, 眼球状糜棱岩, 拉长的斑晶指示右行走滑特征; (d) 磨老新岩体地质简图, 底图为Google Earth影像; (e) 松塔平硐, 花岗质糜棱岩, S-C组构指示左行走滑特征; (f) 松塔平硐, 花岗质糜棱岩, 书斜构造指示左行走滑特征; (g) 松塔, 眼球状花岗质糜棱岩, 具左行走滑特征

几何形态的差异反映了褶皱递进变形的不同阶段. 褶皱层能干性差异也是影响褶皱形态的主要因素之一(图4a).

褶皱几何形态特征表明褶皱的形成机制为纵弯褶皱作用, 即岩层遭受了地壳水平应力挤压. 地壳水平应力挤压不仅能导致地层弯曲变形, 同时还会引起物质的压扁, 形成垂直于挤压方向的透入性面理, 面理以劈理面为主. 相似褶皱和透入性构造面理相伴发育(图4c和5a). 在丙中洛以北, 沉积岩的原始层理多被近直立的构造面理置换, 变形样式以近直立的NNW向劈理、片理等为特征(图1c和5), 地表展布宽数可达数公里.

根据上述野外观测, 本文厘定和确认了相似褶皱构造层次. 这一层次以岩石浅变质、发育相似褶皱和密集劈理为特征. 需要说明的是, 本文未对褶皱形态按照传统的褶皱分类进行系统划分, 在Mattauer(1980)划分的构造层次中, 相似褶皱发育于下部构造层次. 相似褶皱变形主要在马吉以北的地层中发育, 劈理和褶皱轴面的走向都为340°. 岩相学和构造交切关系显示相似褶皱构造层次比韧性剪切构造层次浅. 大致从普拉底往南, 相似褶皱逐渐消失, 被片理或片麻理替代, 变质程度也变深(Song等, 2010).

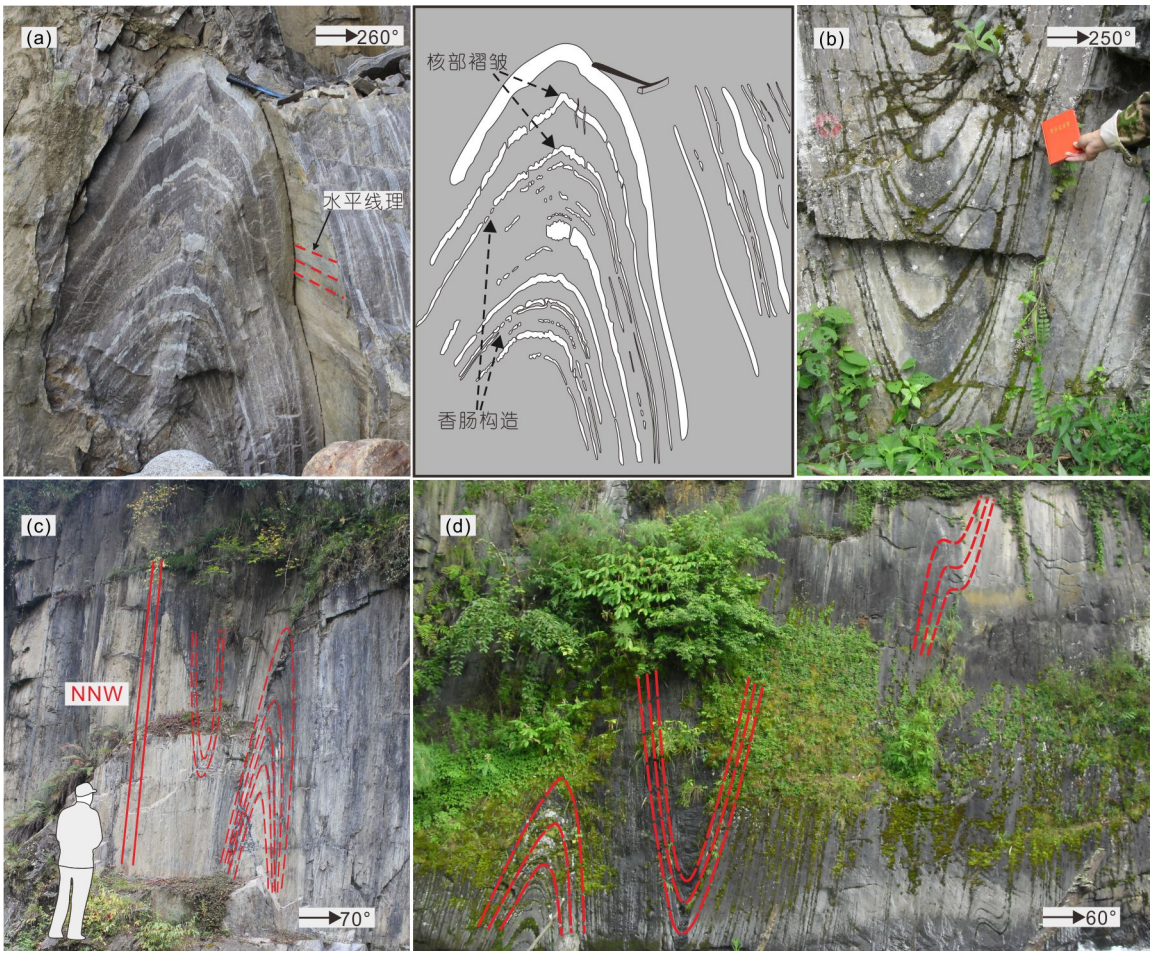


图 4　相似褶皱变形野外露头

(a) 普拉底, 相似褶皱剖面, 浅色层与暗色层的能干性不同导致变形呈现差异, 剖面上发育近水平的拉伸线理; (b) 贡山北, 褶皱层转折端明显增厚; (c) 贡山北, 典型的相似褶皱; (d) 嘎拉博, 变质砂岩内发育多种形态的褶皱

3.4　脆性断裂构造

脆性构造在研究区广泛发育, 在整个区域内观测到了大量的脆性断裂、节理及相关的伴生构造(图6). 通过详细的野外观测, 在研究区识别了两组主要的共轭脆性构造, 分别为走向NWW(280°~290°)和NE(45°)断裂构造, 走向60°和80°节理构造. NWW向和NE向断裂构造是研究区内的主要脆性构造, 分别呈近直立左行和右行走滑运动特征. 这些脆性断裂切割了抬升至地表的中、深层次变形, 在部分区段脆性构造控制了河道的走向.

NWW向脆性构造在丙中洛至松塔之间的区域最为发育, 平面上呈斜列左行错移了早期的构造和地质体. 研究区南部的NWW向断层规模不大, 标志体断错、水平擦痕和阶步都指示左行走滑特征. NE向脆性构造广泛发育于整个研究区, 且较稳定.

在松塔磨老新岩体平硐内观测到了露头尺度的NE和NWW向脆性构造(图6a~d), 两组断裂面上都有伴生的NEE向张节理发育, 分别指示右行和左行走滑运动性质. 这表明NE向和NWW向断裂构造是发育于同一应力场条件下的共轭剪切构造. 马吉地区的脆性构造以NE向断裂为主, 呈等间距发育, 延伸稳定, 具有右行走滑特征. 在马吉的平硐内, 观测到NE向断裂两侧发育了走向60°节理构造(图6e). 这些节理与主断面斜交, 靠近主断面, 节理构造密集且节理面平直; 远离主断面, 节理面多弯曲且被矿物充填. 这些特征表明NE向主断裂是在密集节理构造的基础上发育形成. 在应力作用下, 岩体内发育一系列的斜列节理, 随着

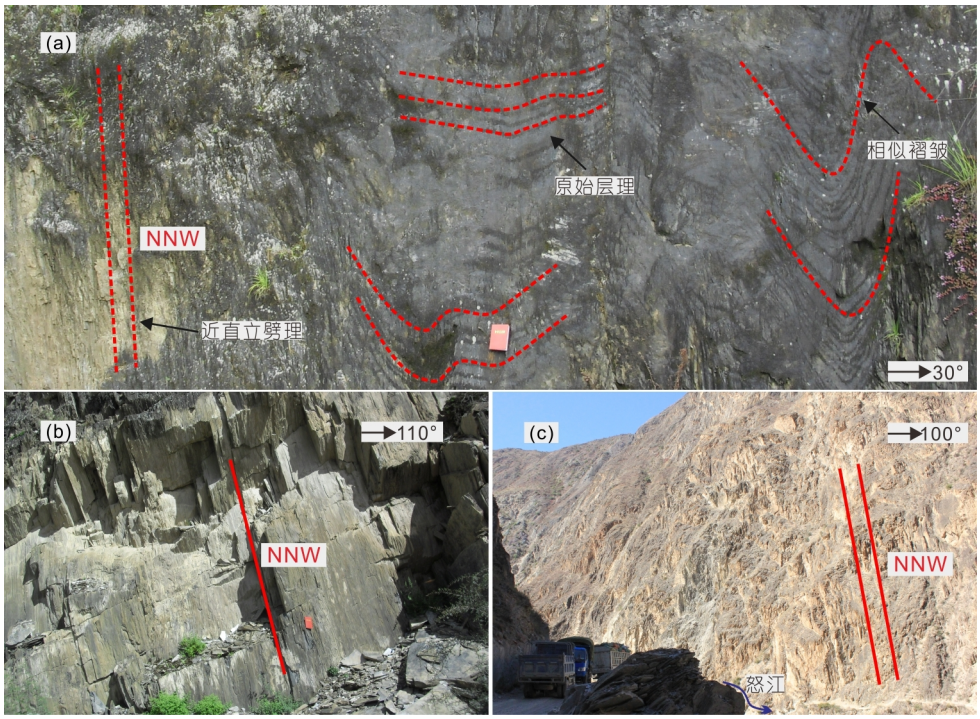


图 5　近直立劈理构造野外照片

(a) 丙中洛, 浅变质砂岩中发育近直立劈理和相似褶皱; (b) 松塔北, 密集板劈理, 走向330°~350°; (c) 松塔北, 沿怒江河道出露近直立板岩和片岩

变形进一步加强, 主剪切裂面开始发育, 并替代密集的节理构造成为主要的变形形迹. 此外, 在混合岩中观测到了大量走向60°和80°张性节理(图6f), 平面和剖面上皆呈X形, 延伸不远, 表现为追踪张节理特性.

4　构造层次分析

地壳的温压条件随深度增加而增加, 岩石的变形机制和变形样式通常随之改变. 地壳浅层次为温压相对较低的脆性域, 变形具有非连续性和局部集中的特点; 随深度的增加, 岩石韧性增强, 发育透入性变形; 当温度条件接近熔点时, 岩石出现部分熔融, 由单一的固相体系转变为固相和熔体共存的双相体系, 发育流变构造(例如, Mattauer, 1980; 刘正宏等, 2011; 徐汀滢等, 2012). 根据构造变形的几何特征和岩石的岩相学特征, 本文在研究区划分了4个构造层次, 其中流变构造、韧性剪切构造和相似褶皱属于地壳中、深层次, 脆性断裂构造为地壳浅表层次. 浅表层次构造变形反映现今的应力场特点, 地壳中、深层次的变形需要经历一定的地质时限才能抬升至地表, 记录了早期的应力场.

本文划分的4个构造层次反映了研究区现今出露的构造变形格架, 即地壳中、深部层次变形在不同区段出露并叠加了浅部层次的脆性断裂构造(图7). 整体上, 研究区中段出露的构造层次最深, 南段次之, 北段最浅. 贡山以北主要出露中、浅地壳层次的浅变质沉积岩; 马吉地区深熔作用普遍发育, 达到地壳深构造层次; 利沙底以南主要出露韧性剪切变形, 构造层次较马吉地区变浅. 贡山以北, 不同方向、不同层次的构造变形都有发育, 但在局部仍能观测到三叠系基本保持原始近水平产状, 反映局部构造发育的非透入性特点, 这与变形发育于地壳中、浅层次有关. 研究区北部怒江整体流向南南东向, 南部流向为近南北向, 与出露构造变形的面理方向基本一致, 反映了构造变形对河流流向的控制作用. Song等(2010)对研究区的变质相划分与本文划分的构造层次和构造格架基本一致, 马吉地区变质相最高, 达到高角闪岩相, 贡山以北至察瓦龙变质程度最浅, 为亚绿片岩相至绿片岩相.

关于岩石的变形, 研究者尚未提出一个统一的符合地质观测的变形准则(Watterson, 1999; Zheng等, 2004; Zhang和Eckert, 2005). 一般认为, 岩石在脆性域

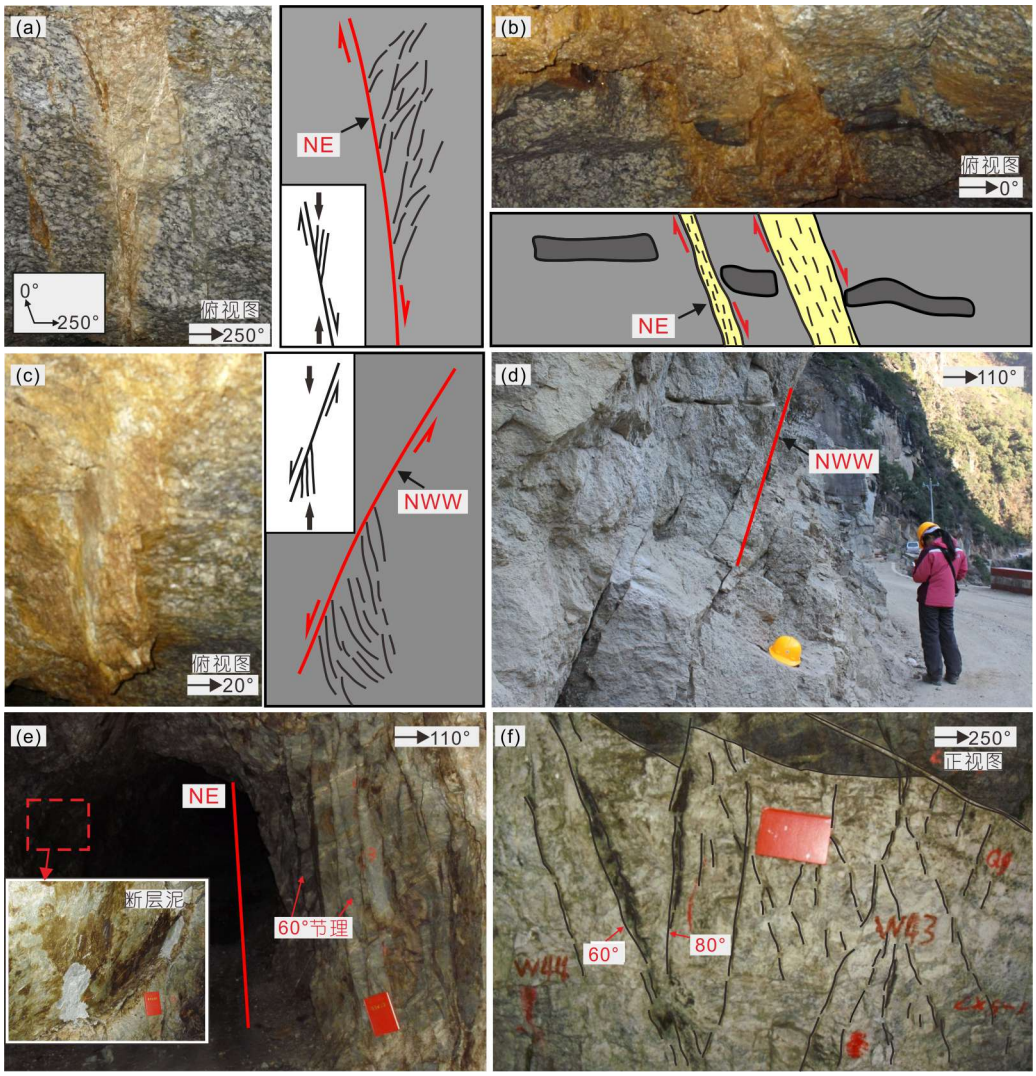


图 6　脆性构造野外照片

(a) 松塔平硐, 水平剖面, 走向NE的脆性断裂, 伴生的张扭裂面显示右行走滑特征; (b) 松塔平硐, 水平剖面, 走向NE断裂错断了暗色脉体, 显示近直立的右行走滑特征; (c) 松塔平硐, 水平剖面, 走向NWW的断裂及伴生的张扭性裂面, 断裂呈近直立左行走滑特征; (d) 松塔, 走向NNW的脆性断裂; (e) 马吉平硐, 走向NE的主断裂(被挖空)两侧发育密集的节理构造; (f) 马吉平硐, 垂向剖面, 走向60°和80°共轭追踪张节理

的破裂遵循摩尔-库仑准则, 即共轭破裂的锐角角平分线对应最大主压应力方向. 根据研究区NE向和NWW向脆性断裂的共轭特征, 判定研究区现今处于近水平的北东东(70°~80°)-南西西向主压应力场条件下(图8a). 应变椭球体常被用于描述岩石的应变状态, 椭球体XY面为压扁面, 可以表示糜棱岩剪切带内面理(S面理)、褶皱轴面、劈理面等面理的方位. 在相似褶皱层次, 密集劈理面的走向与相似褶皱轴面的走向一致, 都为340°~350°, 表明这一层次的构造变形对应北东东-南西西向的最大主压应力(图8b). 在韧性剪切构造层次, 高黎贡右行剪切带和普拉底-松塔左行剪切带的S面理均为340°~350°, 显示这一构造层次的最大主压应力方向为北东东-南西西向(图8c). 两条韧性剪切带的钝角夹角为130°, 不同于最大有效力矩准则提出的110°钝角夹角(Zheng等, 2004). 在流变构造层次, 由于应力梯度作用, 部分熔融作用生成的熔体会沿最大主应变拉长方向(应变椭球体X轴)流动迁移, 形成熔体线理(刘正宏等, 2011)或条带状构造. 在马吉地区, 近直立的NNW向片麻理和条带状构造指示了北东东-南西西向的主压应力(图8d). 基于以上分析, 各构造层次

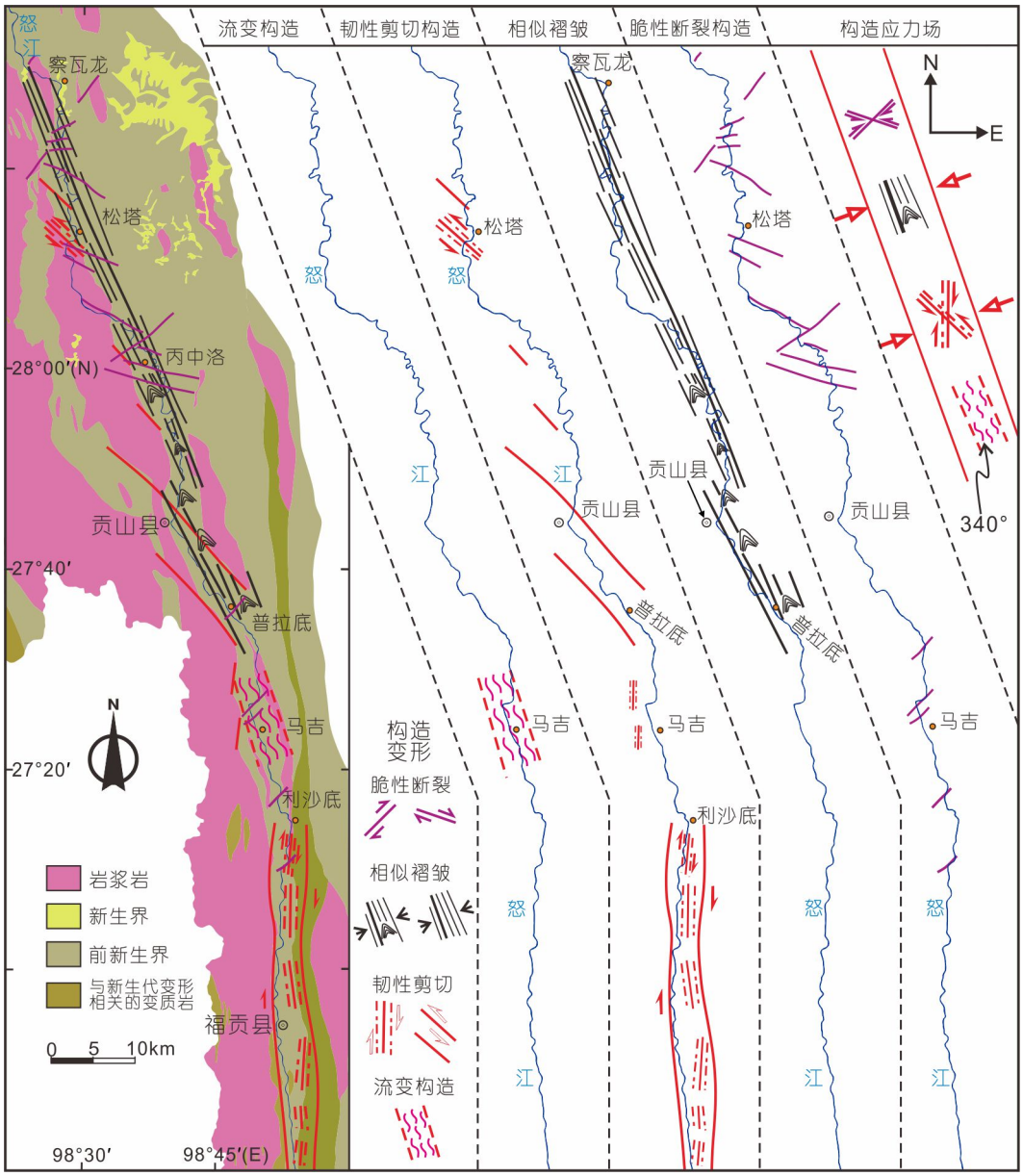


图 7　研究区构造变形格架示意图

均显示同一应力场条件, 研究区长期处于近水平的北东东-南西西向主压应力场条件下.

5　热史演化特征

研究区出露的不同构造层次的变形样式都发育在相同的挤压构造应力场条件下, 这一构造现象有两个方面的指示作用: 一是反映了在特定应力场条件下, 研究区不同构造层次的变形特征; 二是表明研究区存在差异隆升. 为了探讨不同层次变形样式的出露与区域热史之间的关系, 本文系统分析了研究区内的新生代热年代学数据. 贡山以北, 年代学数据较少, 只有少量的K-Ar和磷灰石裂变径迹测年数据. 贡山以南, 浅色花岗岩出露较为普遍, 并且多具有新生代的变质或结晶年龄(Akciz, 2004; Song等, 2010; Zhang等, 2012b). 前人对贡山以南的区域进行了年代学研究, 主要有变质岩、浅色脉体和岩浆岩的锆石U-Pb定年, 糜棱岩和岩浆岩的白云母、黑云母和角闪石K-Ar($^{40}Ar/^{39}Ar$)测

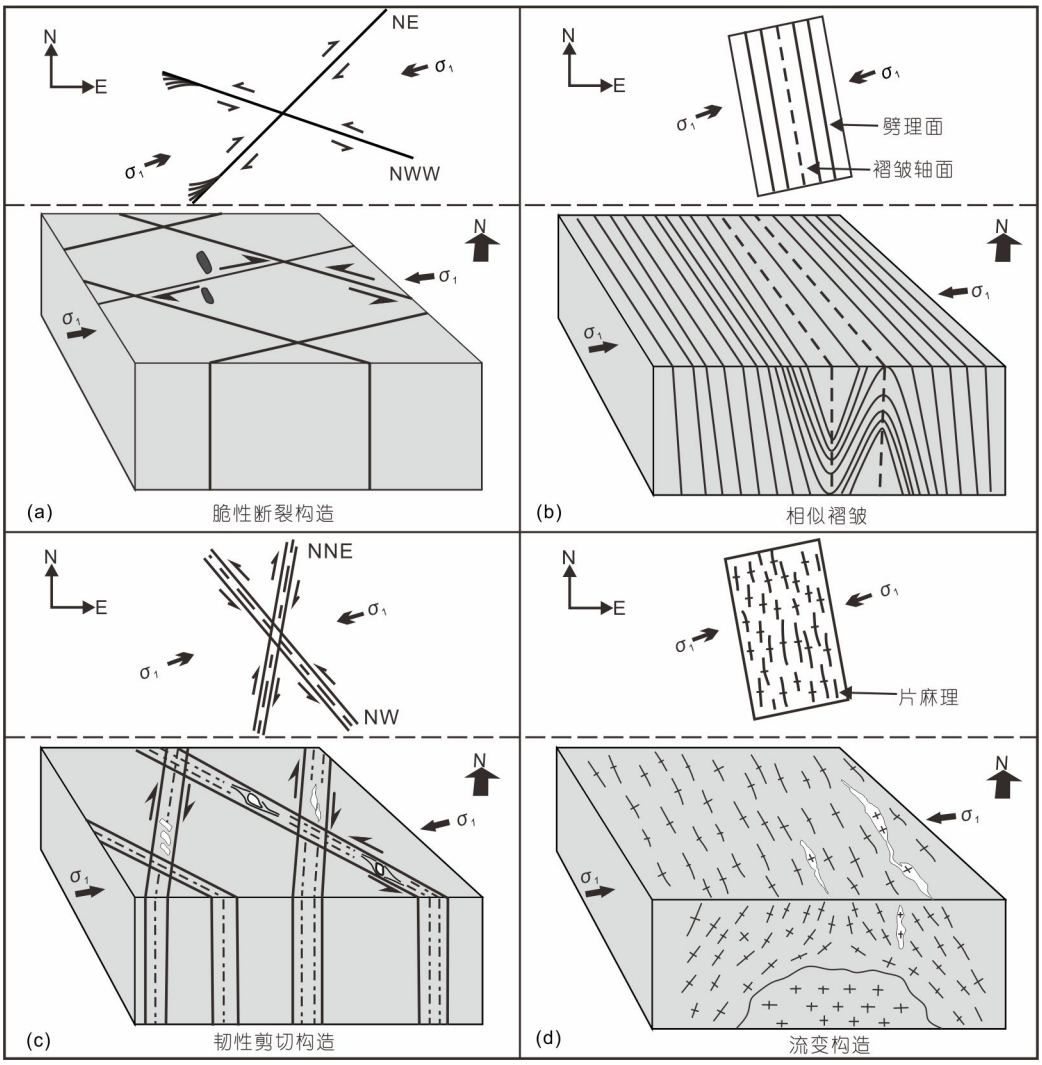


图 8　研究区4个构造层次应力场分析和变形样式示意剖面

(a) 脆性断裂构造层次, 最大主压应力方向对应共轭脆性断裂构造的锐角角平分线; (b) 相似褶皱层次, 最大主压应力垂直于相似褶皱轴面和劈理面; (c) 韧性剪切构造层次, 最大主压应力方向对应共轭韧性剪切带的钝角角平分线; (d) 流变构造层次, 最大主压应力垂直于片麻理或条带状构造

年, 磷灰石裂变径迹测年, 这些年代学数据主要被用于探讨剪切带的活动时限(Akciz, 2004; Akciz等, 2008; Lin等, 2009; Song等, 2010; Zhang等, 2010, 2012a, 2012b; 孙东霞等, 2013; 王丹丹等, 2013).

同位素体系在不同矿物中的封闭温度不同(Harrison, 1981; Harrison等, 1985; Parrish, 2001): 锆石U-Pb的封闭温度一般认为>800℃; K-Ar(^{40}Ar/^{39}Ar)同位素体系在角闪石矿物中的封闭温度约为500℃, 在白云母矿物中的封闭温度约为350℃, 在黑云母矿物中的封闭温度约为300℃; 磷灰石裂变径迹(AFT)的封闭温度约为110℃. 需要注意的是, 马吉地区变质岩的变质温度为685~750℃(Song等, 2010), 低于锆石U-Pb体系的封闭温度. 因此, 本文在热史分析中将变质锆石U-Pb体系的封闭温度设定为700℃, 岩浆锆石U-Pb体系的封闭温度设定为800℃.

根据研究区流变构造、韧性剪切构造和相似褶皱3个构造层次的空间展布, 划分出北段察瓦龙-贡山、中段贡山-利沙底、南段利沙底-福贡3个区域, 统计了前人的年代学数据进行热史演化分析(表1). 这些年代学数据包括了怒江两岸的沿高黎贡山和碧罗雪山分布

表 1　研究区热年代学数据[a)]

研究区	磷灰石裂变径迹			黑云母K-Ar(^{40}Ar/^{39}Ar)			白云母K-Ar(^{40}Ar/^{39}Ar)			锆石U-Pb				其他数据			
	文献	样品号	年龄	文献	样品号	年龄	文献	样品号	年龄	文献	样品号	年龄		文献	样品号	年龄	方法
察瓦龙-贡山	1	NJ-1	12.20	2	ST79	16.70	2	ST42	18.60					2	ST79	29.90	Kf
	1	NJ-4	12.80	2	ST82	11.90	2	ST64	18.10					2	ST82	12.50	Kf
				2	ST87	21.00								2	ST97	3.90	Bi
				2	ST108	12.10											
贡山-利沙底	1	NJ-6	7.70	2	G-83	12.69	2	NJ49	10.10	6	NJ54	22.50	M	2	G-83	11.45	Kf
				3	00JN5.3	12.01	3	98JL14.2	11.61	6	NJ66	44.80	C	3	98JL14.4	64.90~79.20	Mnz
				3	98JN14.4	12.26	3	98JN15.9	11.83	6	NJ66	53.20	C	3	98JL1.10	67.00~70.00	Mnz
				5	No.5	13.70				6	NJ66	22.70	M	3	98JL1.4	62.00~68.00	Mnz
				5	No.6	12.70				6	NJ56	21.60	M	3	00M23.2	18.50	Mnz
				5	No.7	16.10								4	00JN21.4	16.50~17.00	Mnz
				9	GL-8	11.90											
				9	GL-42	16.82											
				9	GL-13	10.04											
利沙底-福贡	1	NJ-7	5.30	2	BT-15	23.80	3	99M28.1	13.44	6	ST122	24.40	M	2	BT-15	22.30	Hb
				4	98JL18.4	13.62	3	98JN12.2	17.52	7	BL-1	24.70	M	4	98JL18.4	24.30~29.40	Mnz
				9	GL-44	16.99	4	99JU4.2	19.41	7	BL-3	49.55	C	9	GD-4	88.00	Hb
				9	GD-4	15.73	4	99JU4.3	19.57	7	BL-3	45.40	C				
				9	GM-11	15.69	4	99JU4.6	23.11	7	BL-3	36.53	M				
							8	Y09-41	17.09	7	BL-5	40.13	C				
							8	Y09-08	16.28	8	Y09-39	22.84	M				
										8	Y09-08	34.40	M				
										8	Y09-40	46.61	C				

a) 年龄单位为Ma, 磷灰石裂变径迹只采用了最年轻的峰值年龄. 锆石U-Pb中, M为变质(深熔)年龄, C为结晶(侵位)年龄. 其他数据只作统计参考, 未被纳入热史演化曲线, Kf指钾长石K-Ar(^{40}Ar/^{39}Ar), Bi指黑云母K-Ar(^{40}Ar/^{39}Ar), Hb指角闪石K-Ar(^{40}Ar/^{39}Ar), Mnz指独居石U-Pb. K-Ar年龄全部来自于王丹丹等(2013), ^{40}Ar/^{39}Ar年龄采用坪年龄. 文献来源: 1. 孙东霞等(2013); 2. 王丹丹等(2013); 3. Akciz(2004); 4. Akciz等(2008); 5. Lin等(2009); 6. Song等(2010); 7. Zhang等(2010); 8. Zhang等(2012a); 9. Zhang等(2012b)

的变质岩和岩浆岩的年代学结果. 虽然前人报导的热年代学数据还包括其他矿物同位素体系的测年数据, 如绢云母和钾长石K-Ar(^{40}Ar/^{39}Ar)、独居石U-Pb等, 但因存在年龄值异常、矿物分同位素体系封闭温度不确定等问题, 未被采纳.

热史数据和热史演化曲线显示空间上的差异(表1; 图9). 贡山以北, 晚白垩世至新生代早期长期显示缓慢冷却的特点. 北段的白云母和黑云母K-Ar(^{40}Ar/^{39}Ar)年龄分布于21~12Ma, 磷灰石裂变径迹年龄稍大于12Ma, 显示区段的快速冷却时限为21~12Ma, 从350℃冷却至110℃(图9a). 中段的U-Pb年代学数据显示53~22Ma为地壳增厚期(Song等, 2010), 白云母和黑云母^{40}Ar/^{39}Ar的年龄主要集中于14~10Ma, 磷灰石裂变径迹年龄为约8Ma. 中段的热年代学特征显示区段的快速冷却时限为22~8Ma, 从700℃冷却至110℃, 8Ma以来冷却速率变缓(图9b). 南段的锆石U-Pb年龄分布于50~23Ma, 黑云母和白云母K-Ar(^{40}Ar/^{39}Ar)的年龄主要分布于20~13Ma, 磷灰石裂变径迹年龄为三个区段内最年轻的5Ma. 热年代学特征显示南段在23~13Ma经历了快速冷却, 从700℃冷却至300℃, 随后一直处于相对较缓的冷却(图9c). 统计显示, 整个研究区在21Ma左右开始经历差异性的冷却过程.

6 讨论

6.1 地壳深度构造变形层次模型

根据前人研究(Mattauer, 1980; 徐汀滢等, 2012), 结合怒江研究区的野外观测和构造解析, 本文建立了较为完整的地壳深度构造变形层次模型(图10), 由浅至深将地壳划分为脆性断裂构造、等厚褶皱、相似褶皱、韧性剪切构造和流变构造5个构造变形层次, 并给出了各层次的示意变形样式. 若只考虑温压因素,

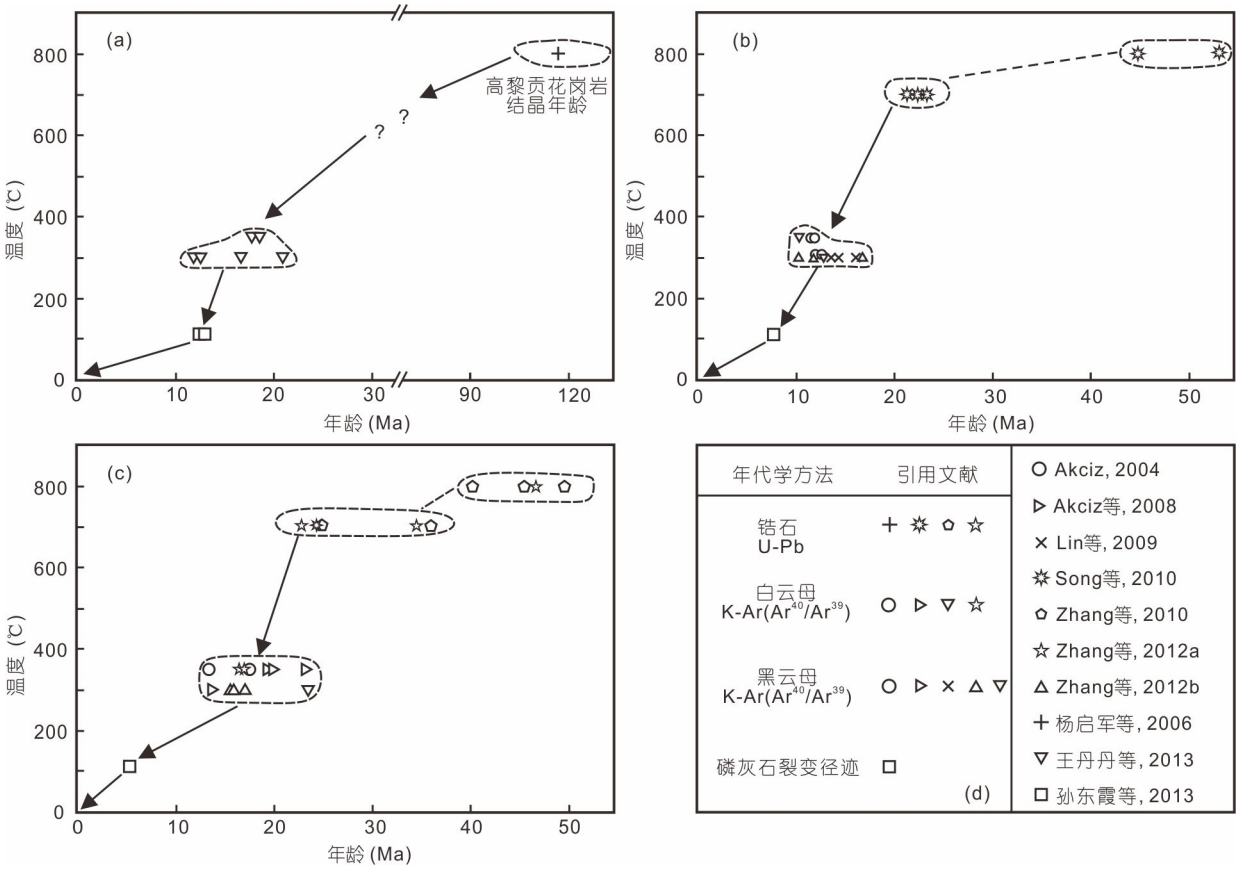


图 9　研究区热史演化曲线

(a) 察瓦龙-贡山区段热史演化曲线, 注意图中横坐标不连续; (b) 贡山-利沙底区段热史演化曲线; (c) 利沙底-福贡区段热史演化曲线; (d) 引用文献

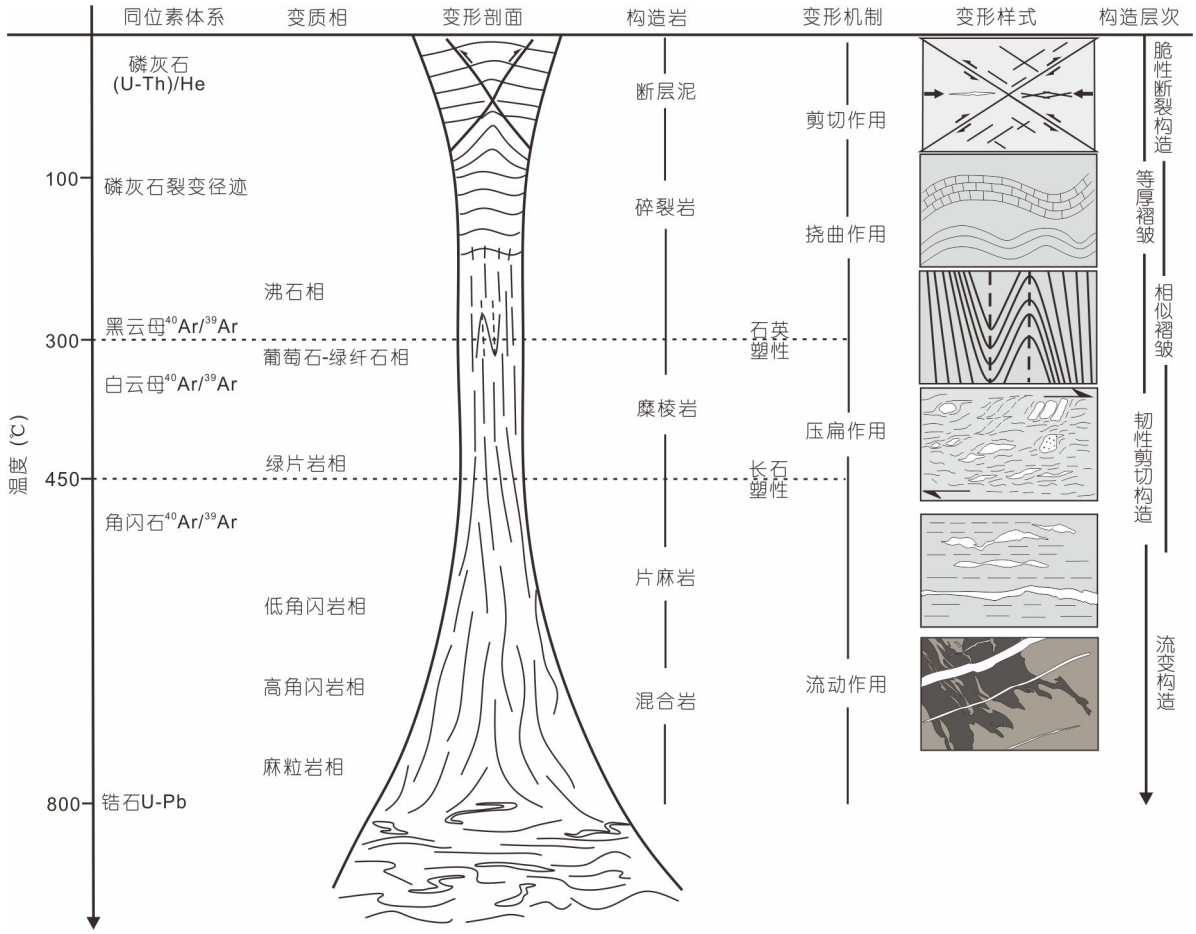


图 10　**地壳深度构造变形层次模型示意图**

修改自Scholz(1988)、van der Pluijm和Marshak (2004)和徐汀滢等(2012)

地壳物质的变质程度会随深度增加而逐渐加深, 由不变质转变为变质, 由低级变质加深至高级变质, 最终进入岩浆作用的深度域. 变形样式方面, 近地表层次以脆性变形为特征, 地层仍能保留原始层理. 进入更深层次, 岩石以韧性变形为特征, 原始层理逐渐被改造, 置换形成构造面理. 在深部层次, 岩石部分熔融并发育流变构造.

脆性断裂构造和等厚褶皱为近地表变形层次, 对应Mattauer(1980)划分的上部和中部构造层次, 变形机制分别为剪切作用和挠曲作用. 通过详细的变形解析和构造层次分析, 徐汀滢等(2012)认为川东褶皱带隔挡式褶皱和隔槽式褶皱是近地表(0~7km)不同深度层次的变形样式, 并建立了近地表构造变形层次模型. 在近地表构造变形层次, 岩石一般不发生区域变质作用, 发育的构造岩为断泥岩和碎裂岩. 进入相似褶皱层次, 岩石遭受变质作用, 变质相不超过绿片岩相. 这一层次的变形机制为压扁作用, 特征变形样式为轴面近直立的相似褶皱, 同时发育与轴面平行的劈理构造. 在韧性剪切构造层次, 主要发育糜棱岩和透入性的糜棱面理, 变质程度为绿片岩相-低角闪岩相. 根据剪切带内发育的S-C组构、旋转碎斑系、不对称褶皱等可以判定韧性剪切带的运动学方向. 在韧性剪切构造层次下部, 变形进一步加强, 开始发育片麻岩. 进入流变构造层次, 岩石出现部分熔融并发育混合岩, 变质相为角闪岩相至麻粒岩相. 流变构造层次的变形机制为流动作用, 变形样式包括条带状构造、无根褶皱、肠状构造等.

本文所给出的地壳变形模型仍是一个理想的简化模型, 这一模型主要考虑地壳温度的变化. 实际上, 地壳的变质变形还受到岩性、地壳应力等诸多因素

影响, 本文模型也无法直接限定各构造层次的深度范围. 将区域出露的构造变形由水平维度上的几何学分析、运动学描述和构造应力场解析提升至深度层次上的演化剖析, 能够更好地探讨构造变形的形成环境及其时空演化特征.

6.2 构造演化意义

构造应力场分析表明研究区4个构造层次的变形都发育于近水平的北东东-南西西向主压应力场条件下. 马吉地区出露的构造层次最深, 发育定向的片麻理和条带状构造, 锆石U-Pb年龄能反映近水平北东东-南西西向挤压应力场的形成时间. 实际上, 研究区的变质(深熔)锆石U-Pb年龄主要集中于25~21Ma. 根据区域热年代学特征, 本文认为北东东-南西西向应力场的形成时代应当不晚于21Ma.

近年来, 研究者普遍认为滇西地区剪切带内出露的变质杂岩或变形样式是不同期次变质变形的产物(Searle, 2006; Searle等, 2010; Liu等, 2012). 通过岩相学分析和锆石U-Pb定年, Song等(2010)认为怒江研究区存在53~22Ma的地壳增厚期, 混合岩形成于这一时期的区域变质作用, 而糜棱岩形成于后期较低级的变质作用. Searle等(2010)认为哀牢山-红河剪切带内出露的片麻岩是抬升的基底岩石, 其形成时代早于左行剪切变形的活动时代, 韧性剪切形成的糜棱面理叠加改造了早期的变质变形. 通过对高黎贡剪切带和哀牢山-红河剪切带内出露的深熔混合岩进行岩相学、地球化学和年代学研究, Liu等(2015)认为两条剪切带都经历了两期部分熔融事件, 早期事件与角闪岩相-麻粒岩相变质有关, 晚期事件对应区域的韧性剪切活动. 本文研究认为地壳的差异隆升导致了不同深度层次的变形样式和构造岩在滇西地区差异出露, 地壳深层次物质由深部剥露至浅表, 会叠加不同层次的变质变形.

通过对区域新生代热年代学数据分析, 本文发现研究区的差异性快速隆升开始于中新世(21Ma), 不同区段的隆升幅度和冷却速率不同, 隆升冷却的核心区域位于地壳层次出露最深的马吉地区. 针对高黎贡剪切带的热史分析也显示剪切带南段和北段存在差异隆升, 北段的抬升幅度大于南段(王丹丹等, 2013). Akciz等(2008)认为崇山剪切带内中地壳物质的出露可能与构造作用和河流侵蚀有关. 孙东霞等(2013)认为气候因素导致了滇西怒江流域的差异地貌演化. 野外考察发现, 研究区南北气候差异显著, 松塔至察瓦龙呈现干热河谷特征, 植被稀少, 贡山以南植被发育茂盛. 因此, 本文推测滇藏怒江峡谷区的差异性快速隆升可能是构造与气候共同作用的结果, 详细的演化机制有待于进一步研究.

Kornfeld等(2014)对高黎贡岩浆岩带的基性岩墙进行了年代学和古地磁研究, 认为新生代以来腾冲块体经历了两期构造旋转, 分别为40~30Ma的快速旋转和30Ma以来的缓慢旋转. 本文发现滇藏怒江峡谷区中新世(21Ma)以来处于稳定的北东东-南西西向挤压应力场条件下, 并没有发现研究区中新世以来构造应力场的变化, 这与滇西其他地区的情况可能不同. 一种可能的解释是研究区作为协调次级块体旋转的解耦带, 不发生明显的构造旋转. 另一种可能解释是滇西地区构造旋转主要发生在中新世以前.

7 结论

(1) 根据构造变形样式的几何形态和空间分布, 将滇藏怒江峡谷区的主要构造样式由深至浅划分为流变构造、韧性剪切构造、相似褶皱和脆性断裂构造4个特征的构造层次.

(2) 结合前人研究, 分析了滇藏怒江峡谷区出露的不同深度层次构造样式, 建立地壳深度构造变形层次模型. 热年代学和构造应力场分析表明, 中新世以来研究区一直处于北东东-南西西向挤压应力场条件下, 现今的地表构造格局为同一应力场条件下不同深度层次的构造变形出露并叠加了浅层次的脆性断裂构造.

(3) 结合热史演化和区域构造特征, 认为藏东南怒江峡谷区不同深度层次构造样式的出露是地壳不同幅度隆起的结果或者与剥蚀有密切的关联, 地壳隆起的核心区域为地壳层次出露最深的马吉地区.

致谢 野外工作中, 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司的金云弼和李济民给予了很大的支持; 在本文写作过程中, 郑亚东教授给予了有益的建议; 两位审稿人细致地审阅了文章初稿, 提出了宝贵的建设性意见和详细的修改建议, 在此一并表示感谢.

参考文献

季建清, 钟大赉, 张连生. 2000a. 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的意义. 地质科学, 35: 336–349
季建清, 钟大赉, 张连生. 2000b. 青藏高原东南部新生代挤出块体西边界. 科学通报, 45: 128–134
刘正宏, 李世超, 徐仲元, 董晓杰, 王兴安. 2011. 内蒙古大青山高级变质岩中熔体线理特征. 地学前缘, 18: 55–61
孙东霞, 季建清, 刘一多, 李宝龙, 陈建军, 钟大赉. 2013. 怒江河砂岩屑磷灰石裂变径迹结果与流域地貌演化. 地质科学, 48: 501–514
唐渊, 尹福光, 王立全, 王冬兵, 廖世勇, 孙志明. 2013. 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. 岩石学报, 29: 1311–1324
王丹丹, 李宝龙, 季建清, 宋述光, 魏春景, 龚俊峰. 2013. 滇西高黎贡变质带热史演化与变形时限研究. 地质学报, 87: 1887–1900
徐汀滢, 季建清, 涂继耀, 刘志成. 2012. 川东褶皱带构造发育深度层次与变形样式. 地质科学, 47: 788–807
杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 罗震宇. 2006. 高黎贡构造带花岗岩的年代学和地球化学及其构造意义. 岩石学报, 22: 817–834
张波, 张进江, 钟大赉, 王晓先, 曲军峰, 郭磊. 2010. 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. 中国科学: 地球科学, 41: 945–959
钟大赉, Tapponnier P, 吴海威, 张连生, 嵇少丞, 钟嘉猷, 刘小汉, Schaerer U, Lacassin R, Leloup P. 1989. 大型走滑断层——碰撞后陆内变形的重要形式. 科学通报, 34: 526–529
Akciz S O. 2004. Structural and geochronological constraints on the ductile deformation observed along the Gaoligong Shan and Chong Shan shear zones, Yunnan (China). Dissertation for Doctoral Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. 1–211
Akciz S, Burchfiel B C, Crowley J L, Yin J Y, Chen L Z. 2008. Geometry, kinematics, and regional significance of the Chong Shan shear zone, Eastern Himalayan Syntaxis, Yunnan, China. Geosphere, 4: 292–314
England P, Houseman G. 1986. Finite strain calculations of continental deformation: 2. Comparison with the India-Asia collision zone. J Geophys Res, 91: 3664–3676
Harrison T M. 1981. Diffusion of ^{40}Ar in hornblende. Contrib Mineral Petrol, 78: 324–331
Harrison T M, Duncan I, McDougall I. 1985. Diffusion of ^{40}Ar in biotite: Temperature, pressure and compositional effects. Geochim Cosmochim Acta, 49: 2461–2468
Houseman G, England P. 1986. Finite strain calculations of continental deformation: 1. Method and general results for convergent zones. J Geophys Res, 91: 3651–3663
Houseman G, England P. 1993. Crustal thickening versus lateral expulsion in the Indian-Asian continental collision. J Geophys Res, 98: 12233–12249
Huang X M, Xu Z Q, Li H Q, Cai Z H. 2015. Tectonic amalgamation of the Gaoligong shear zone and Lancangjiang shear zone, southeast of Eastern Himalayan Syntaxis. J Asian Earth Sci, 106: 64–78
Johannes W. 1983. On the origin of layered migmatites. In: Atherton M P, Gribble C D, eds. Migmatites, Melting and Metamorphism. Nantwich: Shira Publishing. 234–248
Kornfeld D, Eckert S, Appel E, Ratschbacher L, Sonntag B L, Pfänder J A, Ding L, Liu D L. 2014. Cenozoic clockwise rotation of the Tengchong block, southeastern Tibetan Plateau: A paleomagnetic and geochronologic study. Tectonophysics, 628: 105–122
Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, Kienast J R, Harrison T M, Trong T T P, Replumaz A, Tapponnier P. 2001. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia. J Geophys Res, 106: 6683–6732
Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong D L, Liu X H, Zhang L S, Ji S C, Trinh P T. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), tertiary transform boundary of Indochina. Tectonophysics, 251: 3–84
Lin T H, Lo C H, Chung S L, Hsu F J, Yeh M W, Lee T Y, Ji J Q, Wang Y Z, Liu D Y. 2009. ^{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, 34: 674–685
Liu F L, Wang F, Liu P H, Yang H, Meng E. 2015. 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 Asian Earth Sci, 110: 151–169
Liu J L, Tang Y, Tran M D, Cao S Y, Zhao L, Zhang Z C, Zhao Z D, Chen W. 2012. 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 Asian Earth Sci, 47: 231–251
Mattauer M. 1980. Les déformations des matériaux de l′écorce terrestre. Paris: Hermann. 1–493
Mehnert K R. 1968. Migmatites and the Origin of Granitic Rocks. Amsterdam: Elsevier. 1–393
Molnar P, England P. 1990. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: Chicken or egg? Nature, 346: 29–34
Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. Science, 189: 419–426
Parrish R R. 2001. The response of mineral chronometers to metamorphism and deformation in orogenic belts. Geol Soc Lond Spec Publ, 184: 289–301
Schärer U, Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Zhong D L, Ji S C. 1990. Intraplate tectonics in Asia: A precise age for large-scale Miocene movement along the Ailao Shan-Red River shear zone, China. Earth Planet Sci Lett, 97: 65–77

Schärer U, Zhang L S, Tapponnier P. 1994. Duration of strike-slip movements in large shear zones: The Red River belt, China. Earth Planet Sci Lett, 126: 379–397

Searle M P. 2006. Role of the Red River Shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia. J Geol Soc, 163: 1025–1036

Searle M P, Yeh M W, Lin T H, Chung S L. 2010. Structural constraints on the timing of left-lateral shear along the Red River shear zone in the Ailao Shan and Diancang Shan Ranges, Yunnan, SW China. Geosphere, 6: 316–338

Scholz C H. 1988. The brittle-plastic transition and the depth of seismic faulting. Geol Rundsch, 77: 319–328

Sibson R H. 1977. Fault rocks and fault mechanisms. J Geol Soc, 133: 191–213

Song S G, Niu Y L, Wei C J, Ji J Q, Su L. 2010. Metamorphism, anatexis, zircon ages and tectonic evolution of the Gongshan block in the northern Indochina continent—An eastern extension of the Lhasa Block. Lithos, 120: 327–346

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

Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang J S. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. Science, 294: 1671–1677

van der Pluijm B A, Marshak S. 2004. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and Tectonics. 2nd ed. New York: W.W. Norton & Company, Inc. 1–656

Wang E, Burchfiel B C. 1997. Interpretation of cenozoic tectonics in the right-lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the Eastern Himalayan syntaxis. Int Geol Rev, 39: 191–219

Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H, Peng T P, Chen X Y, Xu Y G. 2006. 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, 418: 235–254

Watterson J. 1999. The future of failure: Stress or strain? J Struct Geol, 21: 939–948

Zhang B, Zhang J J, Chang Z F, Wang X X, Cai F L, Lai Q Z. 2012a. The Biluoxueshan transpressive deformation zone monitored by synkinematic plutons, around the Eastern Himalayan Syntaxis. Tectonophysics, 574-575: 158–180

Zhang B, Zhang J J, Zhong D L. 2010. Structure, kinematics and ages of transpression during strain-partitioning in the Chongshan shear zone, western Yunnan, China. J Struct Geol, 32: 445–463

Zhang B, Zhang J J, Zhong D L, Yang L K, Yue Y H, Yan S Y. 2012b. Polystage deformation of the Gaoligong metamorphic zone: Structures, $^{40}Ar/^{39}Ar$ mica ages, and tectonic implications. J Struct Geol, 37: 1–18

Zhang Z F, Eckert J. 2005. Unified tensile fracture criterion. Phys Rev Lett, 94: 094301

Zheng Y D, Wang T, Ma M B, Davis G A. 2004. Maximum effective moment criterion and the origin of low-angle normal faults. J Struct Geol, 26: 271–285