滇西点苍山变质杂岩中叠加低温糜棱岩的变形-变质、流体及地质意义

程雪梅¹, 曹淑云^{1*}, 李俊瑜¹, 喻遵谱¹, 董彦龙¹, 吕美霞¹, 刘俊来²

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083

* 通讯作者: E-mail: shuyun.cao@cug.edu.cn

收稿日期: 2017-06-15; 收修改稿日期: 2017-11-29; 接受日期: 2018-03-21; 网络发表日期: 2018-05-10

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0602401)和国家自然科学基金项目(批准号: 41472188, 41722207)资助

摘要 点苍山变质杂岩是发育在哀牢山-红河走滑断层带上的四个变质杂岩体之一, 其遭受了多阶段的变质-变形改造, 特别是自晚渐新世以来其深变质岩石广泛遭受了高温韧性剪切变形及从地壳深部剥露到地表过程. 本文在前人研究成果及详细的野外地质观测的基础上, 对新生代点苍山杂岩的深变质岩石变形-变质作用和剥露过程开展了相关研究, 尤其是重点针对叠加低温糜棱岩开展了详细的研究. 其中通过光学显微镜、扫描电子显微镜的附件电子背散射衍射以及结合阴极发光技术方法和手段, 开展了叠加低温糜棱岩的显微构造、变形矿物晶格优选定向以及矿物相的深入分析. 研究表明: (1) 点苍山深变质杂岩经历了早期的高温左行剪切变形以及晚期的伸展快速剥露过程, 其低温变形-变质构造特征和矿物组合叠加在早期的高温变形-变质基础之上, 且高温显微构造和组构部分或全部遭受晚期叠加低温剪切变形作用改造; (2) 叠加低温变形-变质出现在韧-脆性转换过程中; (3) 同构造剪切叠加低温变形-变质过程中的流体非常活跃, 以及伴随由动态重结晶作用和/或伴随的破裂-微破裂作用导致岩石中主要组成矿物强烈细粒化, 并进一步致使变形应变局部化(如微剪切带发育), 其常常伴随着岩石强度的降低, 并在进一步的演变过程中影响着岩石的整体流变性.

关键词 低温糜棱岩, 韧-脆性转换, 显微构造, 流体, 剥露, 流变弱化

1 引言

大型走滑断层带在地壳岩石圈变形过程中广泛发育, 常常可以形成于不同构造层次和不同构造背景下, 尺度可以从微观构造到造山带内几十公里甚至上千公里长. 走滑断层带不仅仅是强烈的线状高应变带, 也保

留了地壳长期弱化的特性, 反映了不同构造层次、不同物理环境和不同流变机制下岩石的应变局部化特征及岩石圈演化的重要动力学过程(Handy, 1989, 2007; Cao等, 2016). 众所周知, 新生代以来, 印度-欧亚板块碰撞与随之发生的后碰撞过程是东南亚地区岩石圈结构形成与构造演化的重要事件, 其中喜马拉雅造山带

中文引用格式: 程雪梅, 曹淑云, 李俊瑜, 喻遵谱, 董彦龙, 吕美霞, 刘俊来. 2018. 滇西点苍山变质杂岩中叠加低温糜棱岩的变形-变质、流体及地质意义. 中国科学: 地球科学, 48: 997–1015, doi: 10.1360/N072017-00198

英文引用格式: Cheng X, Cao S, Li J, Yu Z, Dong Y, Lv M, Liu J. 2018. Metamorphic, deformation, fluids and geological significance of low-temperature retrogression of Diancangshan metamorphic massif along Ailaoshan-Red River strike-slip fault zone, Yunnan, China. Science China Earth Sciences, 61: 1023–1041, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9194-4>

形成、青藏高原强烈隆升和周缘块体侧向逃逸(包括后来的伸展、旋转), 以及一系列走滑断层带的形成等都直接受碰撞与碰撞后岩石圈结构调整等大陆动力学过程的制约和调节(Tapponnier和Molnar, 1977; England和Molnar, 1990; 张进江等, 2001, 2006; 张连生和钟大赉, 1996; Chung等, 1998; 季建清等, 2000; Maluski等, 2001; Burchfiel和Wang, 2003; 曹淑云, 2007; 张波等, 2008; Cao等, 2009, 2011a, 2011b, 2012, 2016; Liu等, 2007, 2012; Chen等, 2016; Zhang等, 2017). 作为印支地块东部边界的大规模哀牢山-红河走滑断层带(图1a), 其在印度-欧亚板块碰撞与后碰撞演化过程中起着重要的协调作用, 近几十年来已成为国内外学者研究的焦点地区之一(Tapponnier等, 1990; Leloup等, 2007). 前人对哀牢山-红河走滑断层带的地质构造、断层带内深变质岩的组成、构造-岩浆活动及区域构造意义等方面开展了大量的研究工作, 也发表了许多高质量的文章, 然而对这些深变质杂岩所记载的剪切变形的时限、变形-变质环境、剥露构造-热演化史和剥露机制等仍然存在众多的争议(Leloup等, 2007; Cao等, 2011a; Chen等, 2016; Zhang等, 2017).

沿着哀牢山-红河走滑断层带上发育了多个孤立出现的狭长深变质杂岩体, 由北向南分别是雪龙山、点苍山、哀牢山和大象山等, 具独特的线性延伸和复杂而多期的构造演化历史(Leloup等, 1995; 刘俊来等, 2007; Cao等, 2007, 2009, 2010a, 2010b, 2011a, 2011b, 2016; Zhang等, 2017)(图1b). 在哀牢山-红河走滑断层带内这些深变质杂岩与叠加低温退变质岩石及未变质的浅部地壳岩石并置出现(图1b), 然而它们之间的成因联系仍是不清楚的. 对这些深变质杂岩的构造-热演化及剥露机制, 如仅仅聚焦其构造时限以及中下部地壳深变质岩石的研究, 而不考虑这些出露的叠加低温糜棱岩带的构造特性、变形-变质作用、构造-热演化等所建立的单一模型难免具有片面性. 因此, 在考虑其深部地壳岩石剥露历史和机制等问题时, 同时需要考虑到以下几个方面的问题: 这些叠加低温糜棱岩带与高温糜棱岩带的变形-变质成因关联性? 岩石及矿物变形精细微观构造特征、矿物组合、组构发育特征和变化规律及影响因素? 叠加低温剪切变形过程中是否有流体的作用, 又处于怎样的构造层次和变形环境? 而对这些问题开展深入的研究, 对正确理解哀牢山-红河走滑断层带的活动、深变质杂岩从深部到浅部层次

的剥露过程及动力学机制等起着重要的作用. 本文带着这些关键问题, 通过详细的野外观测, 同时利用先进的技术分析手段, 重点针对哀牢山-红河走滑断层带的北延点苍山变质杂岩内叠加低温糜棱岩, 开展了详细的岩石变形-变质矿物组合、显微构造和变形矿物的晶格优选定向分析, 阐释了叠加低温糜棱岩的微观构造特征和演化规律、矿物晶格优选定向和变形环境关系、流体作用, 以及探讨叠加低温糜棱岩在深部地壳岩石剥露过程中的变形-时空成因、耦合关系和对剥露机制的贡献.

2 哀牢山-红河走滑断层带及构造-热演化史

哀牢山-红河走滑断层带总体呈北西-南东向延伸, 其长度超过1000km, 被认为是东南亚地区最明显的构造边界(不连续)(Tapponnier和Molnar, 1977). 沿着走滑断层带内发育的四个孤立狭长的深变质杂岩保存了极其丰富的热-构造演化信息(Leloup等, 1995; Nam等, 1998; Gilley等, 2003; Liu等, 2006; 刘俊来等, 2007; 曹淑云, 2007; Cao等, 2011a, 2011b). 该走滑断层带的剪切变形过程、时限和剥露机制长期以来是国内外学者一直争论的焦点问题. 其中早期通过对变质杂岩体中深变质岩石的构造组成、剪切变形、变质作用结合热年代学开展的初步研究表明, 哀牢山-红河走滑断层带的大规模左行韧性剪切作用发生于距今35~17Ma之间(如Leloup等, 1995, 2001, 2007; 张连生和钟大赉, 1996; Harrison等, 1997; Wang和Burchfiel, 1997; Wang等, 2001, 2007; Gilley等, 2003; 张进江等, 2006; Cao等, 2011a, 2011b). 对于哀牢山-红河走滑剪切带内这些变质杂岩体的剥露历史研究, 其中Leloup等(1995)对哀牢山-点苍山和大象山深变质杂岩的剥露分析中, 突出强调的是走滑剪切过程伴随走滑剥露(Harrison等, 1992, 1996), 并以此提出了构造带中深变质岩石呈现出不等时、拉链式效应(zipper tectonic model)的剪切与剥露(Harrison等, 1992, 1996). 然而Wang等(1998, 2000)开展了大象山的角闪石、云母和钾长石的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年并获得热年龄, 提出大象山变质杂岩分别经历了34~25和25~21Ma的快速与缓慢冷却过程, 左行走滑剪切作用始于27Ma并持续到22Ma, 而且具有穿时剥露特点. 近年来基于对点苍山杂岩的研究, 刘俊来等(2007)提

图 1 东南亚地区构造地质简图

(a) 印度-欧亚板块碰撞简图; (b) 青藏高原东南缘东南亚地区、红河-哀牢山走滑断层带地质构造简图(据Tapponnier等, 2001; Cao等, 2011a, 2016修改)

出点苍山变质杂岩是一个残破的变质核杂岩, 区域性地块旋转所致的局部性伸展作用, 是导致哀牢山-红河走滑断层带上变质杂岩剥露的主要原因。最近Cao等

(2011a)对点苍山变质核杂岩体中斜长角闪质岩石、云母片岩及花岗质岩石中的角闪石、白云母、黑云母、钾长石分别开展了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年, 并结合以前的

新生代岩浆锆石年龄(Cao等, 2009, 2011a, 2011b)获得了一套从高温到低温的冷却历史. 总结得出冷却历史的三阶段: 第一阶段出现在28~21Ma(角闪石结合锆石年龄), 具有相对缓慢的冷却速率, 这一阶段深变质岩石的剥露与高温左行走滑剪切及印支地块向南逃逸相对应; 第二阶段为21~13(6)Ma(白云母结合锆石年龄), 呈现出缓慢的静态冷却过程, 与该区域岩浆间歇期相对应; 第三阶段为13~0Ma(黑云母、钾长石结合磷灰石裂变径迹年龄), 为快速冷却与剥露过程并具有区域不均匀性或差异性分布的特点. 然而对点苍山变质杂岩的剥露过程仍然缺乏一些细节的限定, 如这些叠加低温糜棱岩的分布范围、矿物变形-变质构造特征及影响因素, 以及在叠加低温剪切变形过程中流体的作用等.

3 点苍山变质杂岩的变形宏观构造特征

3.1 高温变形宏观构造

点苍山变质杂岩体是哀牢山-红河走滑断层带内具有代表性的一个变质杂岩体, 其地质构造复杂, 是一个由不同时代、不同构造环境、不同岩石类型组成的复杂构造单元. 整体呈北北西-南南东向的狭长带状延伸, 长约80km, 宽12~20km(Leloup等, 1995; Cao等, 2007)(图2a). 依据野外观测及前人资料等, 点苍山变质杂岩体可分为4个主要构造单元: 深变质岩带, 花岗岩侵入体, 叠加退变质糜棱岩带, 边缘两侧弱变质-未变质岩带(曹淑云, 2007)(图2a、b).

点苍山角闪岩相变质岩中普遍保留了高温变质相组合和高温剪切变形构造组合, 其中早元古代-中元古代斜长角闪岩、片岩、片麻岩、大理岩和花岗质侵入岩均具有典型的高温矿物组合, 包括: 矽线石+石榴石+十字石+蓝晶石、角闪石+斜长石、透闪石+透辉石+橄榄石+方解石+白云石及斜长石+石英+黑云母+白云母(图3a~c). 这些深变质岩石遭受了高温剪切变形, 形成不同类型的糜棱岩. 这些高温糜棱岩发育明显的糜棱叶理和透入性矿物拉伸线理(L_1)(图2c), 形成L型或L-S型构造(图3), 呈现出明显的流动构造特征. 根据大量野外产状测量并投图, 矿物拉伸线理(L_1)倾伏向总体呈NNW-SSE向, 呈低倾伏角度或近水平状产出(不超过25°)(图2c). 其中矿物拉伸线理(L_1)主体是由长英质矿物集合体、旋转石榴石、长石和角闪石残斑的

拖尾以及云母和矽线石等矿物集合体拉长、定向排列而构成(图3a~c). 高温糜棱叶理(S_1)则由矿物或矿物集合体(定向的角闪石、长石、石榴石等矿物、长英质集合体条带、片状矿物黑云母等)平行、定向排列构成(图3). 这些高温变质糜棱岩中, 各种剪切指向标志十分发育, 包括剪切脉、S-C组构、不对称组构(如 σ 型或 δ 型的长石、石榴石或角闪石残斑)等, 这些剪切指向标志均表明这些高温糜棱岩经历了左行剪切变形(图3a~d).

3.2 叠加低温变形宏观构造

值得注意的是我们发现不仅在点苍山深变质岩体的东部发育了一套剪切变形的叠加低温糜棱质岩石, 而且在点苍山深变质岩体的东南部、南部、东北部均有大量的叠加低温糜棱岩发育并剥露到地表(图2a, 图中绿色标识即为叠加低温糜棱岩采样位置点). 绿泥石化糜棱岩(图3d, 图4)是其主要组成部分. 其中叠加变形构造十分发育, 特别是在其透入到非透入性面理(S_2)上可见明显的低温矿物拉伸线理(L_2)(图4d), 其中热擦痕线理是其中的典型代表. 这些热擦痕线理常常由伸展构造快速运动时摩擦生热, 在断层面上形成的来不及完全结晶的新生纤维状矿物(如绿泥石、云母等)组成. 根据测量的大量野外产状数据投图, 获得叠加低温线理(L_2)倾伏向以NEE向为主, 倾伏角较大(超过30°)(图3c), 与早期近水平的拉伸线理(L_1)产状明显不一致, 因此我们认为是两期地质事件的产物. 野外露头上, 在花岗质糜棱岩中局部可见到具有双晶的长石颗粒遭受破裂作用(图3d). 新生矿物绿泥石和白云母等矿物集合体定向分布在基质和长石残斑周围并构成旋转长石的拖尾, 形成S-C组构、 σ 型和 δ 型旋转残斑(图3d, 图4a), 并指示上盘向北东或北东东向下滑(Cao等, 2011b).

4 点苍山变质杂岩的变形-变质显微构造特征

所有显微镜下显微构造观测的样品, 以及后面的阴极发光(CL)分析和电子背散射衍射(EBSD)测试样品, 都是平行于线理和垂直于叶理方向切制的标准薄片(即XZ面). 对点苍山变质杂岩的新生代剪切变形-变质显微构造特征, 我们主要划分为两个期次, 即高温塑

图 2 点苍山变质杂岩地质构造简图

(a) 点苍山区域地质构造图; (b) 变质杂岩 A-A' 剖面图(据 Cao 等, 2011a 修改); (c) 高温矿物拉伸线理与低温矿物拉伸线理极密和点图

图3 点苍山变质杂岩露头尺度高温糜棱岩变形构造

(a) 石榴-矽线-黑云片麻岩(L>S型构造): 矽线石和云母等矿物集合体呈丝状或条带状定向产出, 石榴石呈旋转残斑产出, 可见明显拖尾和“白眼圈”反应边, 局部肉眼可见晚期有绿泥石充填在石榴石破裂系中; (b) 石榴-矽线-黑云片麻岩(L>S型构造): 石榴石粒径较小, 矽线石和云母矿物集合体呈丝状或条带状, 长石呈条带状和 σ 型残斑产出, 指示左行剪切; (c) 黑云母花岗质糜棱岩(L型构造): 斜长石明显细粒化, 残斑显著变小, 黑云母呈条带状产出, 线理极其发育; (d) 绿泥石化黑云母花岗质糜棱岩(L-S型构造): 不同形态的钾长石呈 σ 型旋转碎斑, 拖尾由绿泥石、云母及石英集合体构成, 并指示左行剪切

性变形-变质显微构造(D_1), 以及叠加低温变形-变质显微构造(D_2). 并分别对其中的主要组成矿物进行了描述和分析总结.

4.1 高温塑性变形-变质显微构造(D_1)

点苍山深变质岩石, 其中包括糜棱岩化斜长角闪岩、黑云母片岩、片麻岩、大理岩、花岗质糜棱岩等都经历了高温剪切变形, 且呈现出不同的显微构造变形特征. 主要高温变形显微特征分别描述如下.

(1) 石榴石和矽线石. 石榴石和矽线石主要产出于石榴石-矽线石云母片岩/片麻岩中, 是典型的高温变质矿物组合. 其中石榴石发生了强烈的定向拉长或同构造剪切旋转变形(图3a、b, 图5a、b). 矽线石主要呈纤维状集合体与云母拉长定向排列, 显示出明显的动态重结晶细粒化作用的塑性变形特征. 石榴石、长石残斑长轴与矽线石及其他矿物如石英条带、云母集合

体等构成矿物的拉伸线理.

(2) 长石. 无论是在花岗质糜棱岩还是云母片岩及片麻岩中, 长石颗粒普遍具有高温晶质塑性变形的特征. 长石残斑大部分被拉长定向, 于垂直叶理方向被压扁. 有些长石残斑形成 σ 型和 δ 型旋转残斑, 与露头宏观构造特征相一致, 均指示左行剪切. 钾长石残斑多呈现波状消光和不均匀消光等特征, 残斑边缘常常被细小的长石颗粒基质所环绕, 与石英颗粒等一起构成旋转拖尾. 一些残斑边缘为锯齿状或不规则状, 可见到残斑向基质的转变关系, 并与蠕英结构相伴出现. 这些相对富钠的斜长石交代钾长石与蠕虫状石英构成蠕英结构, 广泛出现在钾长石残斑边缘. 基质主要由细粒化的二长石构成, 但更多的是富钠长石. 在富云母层中, 云母围绕长石残斑, 长石残斑边缘具有明显的细粒化(图5c、d).

(3) 石英. 尽管大部分石英已经遭受晚期叠加低温

图 4 点苍山变质杂岩中叠加低温糜棱岩带岩宏观构造特征

(a) 绿泥石化花岗质糜棱岩(L-S型构造): 大量叠加低温新生矿物绿泥石形成, 致使岩石总体呈绿色, 其中S-C组构造指示上盘向北东下滑; (b) 绿泥石化花岗质糜棱岩(L-S型构造): 可见早期发育的典型高温糜棱结构, 长石残斑拉长定向, 大量的基质是由细粒化的长石和石英构成, 叠加应变局部化带即微剪切带切过早期的糜棱岩叶理; (c) 绿泥石化花岗质糜棱岩(L-S型构造): 早期的糜棱结构上发育热擦痕线理; (d) 绿泥石化云母糜棱岩(L-S型构造): 绿泥石化十分显著, 面上热擦痕线理(L₂)明显发育; (e) 绿泥石化花岗质糜棱岩(L-S型构造): 晚期热擦痕发育(L₂); (f) 绿泥石化黑云母花岗质糜棱岩(L-S型构造): 面理、线理较发育, 且热擦痕(L₂)发育在早期的透入性高温拉伸线理之上. 所有的L₂线理均指示上盘近北东向下滑运动

变形-变质作用改造, 但有些样品中仍保留有典型的高温塑性变形特征, 主要表现为石英矩型条带(包括单晶和多晶石英条带)或拔丝条带及多晶集合体十分发育(图5e、f). 单晶石英条带多呈长条形或绕残斑弯曲, 表

面大多较干净, 而多晶石英条带则由许多形状规则的石英颗粒排列组成, 边界较平直, 此时以动态恢复重结晶为特征. 石英除呈条带状产出外, 一些颗粒边界呈不规则状, 反映出高温颗粒边界迁移重结晶作用.

图 5 点苍山变质杂岩高温以及叠加低温变形显微构造特征

(a)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g) 为正交照片, (b)、(h) 为单偏光显微照片。 (a)、(b) 石榴-矽线-云母片岩: 石榴石残斑与云母、矽线石集合体定向排列; (c) 花岗质糜棱岩: 白云母呈云母鱼状, 指示左行剪切, 和石英细粒化分布在基质中; (d) 花岗质糜棱岩: 长石以细粒化为主, 细粒化的云母呈薄层成分条带; (e) 白云母花岗质糜棱岩: 石英多晶集合体条带, 其中叠加了斜向定向组构, 白云母呈矿物鱼和薄层成分条带与浅色矿物相间分布; (f) 花岗质糜棱岩, 钾长石残斑和细粒化长石发育, 细粒化的白云母和新生绿泥石和石英矿物共同构成集合体条带; (g)、(h) 绿泥石化石榴-矽线黑云母片麻岩: 早期高温变质矿物石榴石在晚期退变质过程中, 可见石榴石破裂被新生矿物如绿泥石充填, 且在石榴石尾部新生矿物绿泥石和白云母形成拖尾

然而在叠加低温岩石中, 大部分石英矩形条带或多晶集合体普遍遭受了进一步细粒化并呈现斜向发育的构造特征(图5e). 细小粒状石英分布在基质中, 常常与细粒化的黑云母或/和白云母、绿泥石等矿物一起构成明显的局部高应变带, 即微剪切条带(图5c、d).

(4) 角闪石和云母. 在点苍山高温变质岩中, 糜棱岩化的斜长角闪岩为典型的高温变质岩石, 且线理十分发育, 常形成L型或S-L型构造. 其中角闪石残斑压扁拉长且定向明显, 多形成 σ 型、 δ 型旋转残斑, 局部可见角闪石鱼, 指示高温左行剪切的特点. 而基质中, 角闪石和长石细粒化强烈, 它们不均匀分布于变形岩石中, 富角闪石域与富长石、石英域相间排列产出(Cao等, 2010b). 点苍山高温糜棱岩带中, 云母普遍遭受强烈的剪切变形, 呈现出明显塑性变形的特点. 如黑云母强烈定向, 常呈条带状集合体平行线理方向产出. 在残斑发育的岩石中黑云母多围绕长石、角闪石或石榴石残斑呈条带状产出(图5a~f), 有些白云母常构成典型的云母鱼构造(图5c).

综合上述矿物的显微镜下观测可知, 点苍山深变质杂岩主要矿物组成(如石榴石、矽线石、角闪石、长石、石英及云母等)与所有的这些剪切指向标志(如云母鱼构造、S-C组构、旋转残斑等)共同表明点苍山变质杂岩早期经历了高温左行剪切作用, 与前人研究结果一致(如Leloup等, 1995; 张进江等, 2001; 刘俊来等, 2007).

4.2 叠加低温变形-变质显微构造(D₂)

点苍山变质杂岩中深变质糜棱岩广泛叠加了低温退变质-变形构造(D₂)(图5f~h, 图6, 图7), 且以普遍发育的退变质矿物(如绿泥石、白云母)及叠加韧性到韧-脆性变形作用为主要特征, 其显微构造变形特征分别描述如下.

4.2.1 石榴石、长石及石英

在这些叠加低温退变质糜棱岩中, 显微构造特征表明晚期低温退变质变形(D₂)组构叠加于早期高温变形(D₁)组构之上, 发育不连续性或非透入性面理S₂和低温矿物拉伸线理L₂. 这些非透入性面理S₂是由定向排列的矿物如白云母、黑云母、绿泥石、细粒化的石英集合体以及压扁拉长的长石残斑所构成的. 拉伸线理L₂更多的是由重结晶石英、新生白云母或绢云母及新

生绿泥石集合体所构成(图5). 有些拉长或旋转变形的石榴石内部破裂, 被退变质成纤维状的矿物, 如云母或绿泥石等充填(图5). 旋转残斑(如石榴石、长石)的拖尾由新生绿泥石、白云母、黑云母以及细粒化的石英矿物集合体所构成(图5a、b、g、h, 图7e、f). 石榴石和长石破裂隙中也由新生绿泥石充填并发生同构造剪切旋转变形. 其中石英不再以矩形条带和拔丝条带及颗粒边界迁移机制为主要特征, 取而代之的是石英亚颗粒旋转动态重结晶作用而出现的明显细粒化(图7a~d), 且在一些长石破裂裂隙中有细粒化的石英充填. 半脆性到脆性长石、石榴石与强烈塑性变形的石英和云母共存, 表明叠加低温退变质-变形出现在明显的长石韧-脆性转换带条件下.

4.2.2 新生矿物:绿泥石和白云母

点苍山叠加低温退变质-变形糜棱岩中新生矿物绿泥石和细粒化白云母常常可见, 且不同岩石类型中绿泥石化程度从5%到50%不等. 在深变质石榴石-矽线石云母片岩中, 可见石榴石在后期退变质-变形过程中发生破裂, 且破裂隙中绿泥石等新生矿物发生充填, 以及石榴石旋转过程中形成绿泥石拖尾(图5g、h), 但更多的纤维状或集合体状绿泥石则分布在基质中. 在花岗质糜棱岩中, 新生矿物绿泥石、白云母和/或黑云母多在长石残斑周围及长石拖尾处形成, 并与长石旋转残斑共同形成 σ 型、 δ 型剪切组构(图7a~d). 一些绿泥石充填长石破裂隙中, 并成核及发生明显的旋转或拖曳. 基质中, 常常有不同颗粒尺度的新生绿泥石与云母相伴出现, 构成不连续的新生线理和面理(图7a~d). 值得注意的是, 虽然不同样品中显微构造的发育程度不同, 但常常可见由极其细粒新生矿物绿泥石、白云母及石英(颗粒直径为1~50 μ m)集合体形成的微剪切带(micro-shear zone)(图6b; 图7g、h).

5 阴极发光分析

近些年来矿物的阴极发光特征是成岩作用研究中的一个重要内容, 它可以帮助鉴别矿物相, 推测矿物内含的杂质元素, 以及可以区分不同世代产物的胶结顺序, 恢复岩石原来的结构构造特征等. 我们进一步对糜棱岩进行了显微镜下的观测结合阴极发光进行了分析. 阴极发光图像显示, 钾长石随成分变化呈现蓝色-

图6 点苍山变质岩晚期绿泥石化叠加低温变形构造特征-薄片尺度

(a) 绿泥石化花岗质糜棱岩: 钾长石和石英含量较高, 石英呈现条带状, 钾长石以定向拉长状的残斑形成核部, 新生矿物绿泥石和石英构成钾长石拖尾, 且石英条带和黑云母及绿泥石明显拉伸定向, 形成新的线理(L_2)和叶理(S_2); (b) 绿泥石化花岗质糜棱岩: 钾长石和石英含量高达80%以上, 呈集合体产出, 绿泥石与石英等细粒化矿物集合体构成微剪切带切过早期的糜棱叶理; (c) 绿泥石化花岗质糜棱岩: 钾长石普遍发生破裂, 晚期由于流体引入和反应交代, 在裂隙和矿物边缘处形成大量绿泥石等新生矿物, 反映晚期流体交代作用频繁的开放系统

红棕色, 而斜长石随成分变化呈绿色-黄色, 方解石呈现橙红-橙黄色, 大部分黑色或暗色区域是由石英、云母和/或绿泥石组成(图8a~f)。在高温条带状花岗质糜棱岩中, 主要特征为细粒化的不同组分集合体构成的条带呈交互状产出。这些条带包括有石英条带、富黑云母条带、钾长石条带以及斜长石>钾长石(>石英+黑云母)条带, 在阴极下呈现暗色。发蓝色阴极光的钾长石残斑周围普遍发育有蠕英石(暗色光), 以及斜长石(绿色)取代钾长石反应残余。钾长石残余颗粒与细粒化的斜长石颗粒共同构成拖尾(图8a、b), 基质中以细粒化的斜长石为主(图8a~d), 而石英条带和富黑云母条带形成面状层或围绕长石残斑或碎斑产出。在叠加低温糜棱岩中, 由斜长石和钾长石构成碎斑, 其中一些长石破裂隙是穿晶的, 而一些则以晶内破裂为主。钾长石碎斑在沿着裂隙方向有一定的重结晶作用发生, 表现为波状消光显微特征。钾长石和斜长石残斑的拖尾通常由钾长石集合体构成, 且部分拖尾中可见有残斑的碎片, 这些细粒的集合体由钾长石(蓝色阴极光)、钾长石-斜长石(蓝色-绿色阴极光)以及斜长石-石

英(绿色-暗色阴极光)构成(图8a~f)。且在钾长石残斑周围发育有细粒的斜长石集合体。长石残斑裂隙内充填的矿物主要是石英、绿泥石、斜长石、方解石(橘黄色)以及绿帘石(图8c~f)等。

6 石英晶格优选定向(LPO)

6.1 电子背散射衍射(EBSD)方法

EBSD(electron backscattered diffraction)即电子背散射衍射技术, 是应用扫描电子显微镜获取岩石矿物晶体结晶学信息的一种方法(曹淑云和刘俊来, 2006; 刘俊来等, 2008)。该实验是在中国地质大学(武汉)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共同完成的, 使用FEI Quanta 450 FEG-SEM场发射扫描电子显微镜(武汉)和钨灯丝扫描电子显微镜(北京)及EBSD探头获取并测定矿物的晶格优选方位(LPO)。在实验测试之前, 对已切制的定向薄片(垂直于面理, 平行于线理, 即XZ面)进行了高精度抛光处理。抛光流程为: 先使用直径为3.5μm和1.5μm的 Al_2O_3 悬浮

图 7 点苍山变质杂岩叠加低温变形显微构造特征

(a)、(c)、(e)、(g)、(i)为正交显微照片, (b)、(d)、(f)、(h)为单偏光显微照片。(a)、(b)绿泥石化花岗质糜棱岩: 岩石以强烈细粒化为主, 基质为极细粒的钾长石、石英和白云母; 长石残斑被拉断, 新生矿物绿泥石在钾长石残斑周围及拖尾处产出; (c)、(d)绿泥石化花岗质糜棱岩: 少见长石残斑, 基质由细粒化的钾长石、石英和绿泥石组成。局部可见白云母构成S-C结构中的S面理或C面理。新生矿物如白云母、绿泥石和石英大量出现; (e)、(f)绿泥石化花岗质糜棱岩: 绿泥石化明显, 石英和长石发生细粒化, 局部可见钾长石残斑, 绿泥石和石英等在钾长石尾部形成旋转状拖尾, 指示上盘向北东下滑; (g)、(h)绿泥石化花岗质糜棱岩: 新生绿泥石大量出现, 出现在细粒化的长石基质中, 应变局部化形成的微剪切条带(Chl+Mus+Qz)发育; (i)绿泥石化云母片岩: 绿泥石化现象十分发育, 主要矿物为细粒化的长石、石英、绿泥石及云母, 矿物明显拉长定向, 线理十分发育。样品中极细粒的新生矿物石英和绿泥石共同构成微剪切带

液, 然后使用0.5 μm 的金刚石悬浮液进一步抛光, 再选择0.05 μm 的 Al_2O_3 悬浮液进行精抛, 最后用超声波对薄片进行清洗, 防止抛光液残留影响实验精度。测试前, 在样品测试区表面周围贴上导电胶带, 以尽量减少放电效应, 然后将抛光好的薄片倾斜70°放于扫描电镜腔内, 且岩石的线理方向平行于扫描电镜的X轴方向。电子背散射图案(EBSP)是在低真空、加速电压为20kV、探头距离为160mm, 工作距离为19~22mm, spot值为6的条件下获得的, 主要采用面扫的模式完成对电

子背散射图案(EBSP)数据的获取。测试时, 至少检测到6条菊池条带与标准分析矿物相结构相匹配时标定结果才可被接受, 且标定点的平均角偏差(MAD)设定为1.5。测试完成后, 使用HKL Channel 5软件包来完成对电子背散射图案(EBSP)的分析和处理, 并且采用下半球等面积赤平投影的方法, 对样品中具代表性晶格优选方位进行投影并绘制极图。系统误标的点将在取向图中显示出来, 这些点的数据将被0分辨率像素所替代, 对实验结果无影响。测试过程中石英面扫选择的

图8 点苍山变质杂岩叠加低温变形显微构造和阴极发光特征

左列是正交显微照片, 右列是对应的阴极发光照片。(a)、(b) 大颗粒的钾长石残斑周围为细粒化的斜长石, 且钾长石与斜长石呈现不规则的接触边界, 基质中长石主要以细粒化的斜长石为主; (c)、(d) 细粒化的斜长石分布在基质中, 拉长状钾长石残斑出现脆性破裂变形, 并被石英充填; (e)、(f) 拉长状的钾长石大残斑发生破裂, 晚期流体交代反应生成白云母和石英及方解石充填裂隙。在长石残斑周围, 主要为细粒化的石英和白云母条带围绕残斑产出

步长为20μm, 而绿泥石面扫选择的步长为15μm。

6.2 EBSD测试的样品描述

本文重点选取点苍山变质杂岩中三个具代表性的叠加低温糜棱岩, 分别进行晶格优选定向(LPO)分析。其中样品DC1612-3A为白云母花岗质糜棱岩, 矿物拉伸线理极其发育。显微镜下观测, 长石发生明显的晶质塑性变形, 具有残斑和细粒化基质的糜棱构造特征。

长石残斑不均匀消光和变形纹十分发育, 其周边亚颗粒和新晶粒环绕形成典型的核-幔结构。白云母或形成云母鱼构造或在长石残斑尾部形成拖尾, 指示左行剪切。石英多形成拉长状的多晶集合体, 表现为亚颗粒旋转重结晶。样品DC1612-2为绿泥石化二云母花岗质糜棱岩(图7a~d), 石英完全细粒化并与细粒化的长石、白云母等分布于基质中, 一定量的新生矿物如绿泥石多平行线理(L₂)产出。样品DC1655-1A为强烈绿

泥石化云母片岩(图7i), 该样品中绿泥石化现象十分发育, 且与细粒化的石英、云母构成微剪切带。

6.3 石英、绿泥石晶格优选定向(LPO)

样品测试过程中所有石英和绿泥石组构的晶格优选定向测定都是从均匀分布区域进行的。晶格优选定向测定结果如下。

(1) 样品DC1612-3A. 该样品晚期流体作用形成的新生绿泥石矿物相对少, 仍然保留了高温变形显微构造特征。从石英EBSD组构分析中获得的极密图显示, 石英 c - $\langle 0001 \rangle$ 在 Y 轴附近形成极密(图9a), m (10-10) 和 a (11-20)形成大圆环带, r (10-11)形成较弱的极密。在反极密图(图9b)中明显可见在 Y 轴方向形成主极密, 与极密图结果一致(图9a)。前人研究认为石英 c - $\langle 0001 \rangle$ 在 Y 轴形成极密, 其主导滑移系为柱面 $\langle a \rangle$ 滑移, 指示中高温变形环境(Stipp等, 2002), 这与显微镜下观测结果相一致。

(2) 样品DC1612-2. 该样品发生较明显的绿泥石化现象, 从石英EBSD组构分析获得, 极密图中石英 c - $\langle 0001 \rangle$ 在靠近 Z 轴附近形成极密(图10a), m (10-10) 和 a (11-20)形成小圆环带, r (10-11)形成较弱的双环带极密。在反极密图(图10b)中明显可见在靠近 Z 轴方向形成主极密, 与极密图结果一致。前人研究认为石英 c - $\langle 0001 \rangle$ 在靠近 Z 轴形成极密, 表明其主导滑移系为底面 $\langle a \rangle$ 滑移, 指示相对低温的变形环境, 且不对称组构可指示左行剪切(图10a)。因此该石英的形成温度属低温环境, 这与显微观测结果一致。

(3) 样品DC1655-1A. 该样品发生大面积的绿泥石化现象, 根据绿泥石的LPO组构分析可知, 绿泥石在 c - $\langle 001 \rangle$ 在 Y 轴中心形成极密, (100) 和 (010)在 XZ 面上分别形成极密, 其中(100)极密相对明显, 与反极密图结果一致(图11a、b)。表明绿泥石滑移系以(100) $\langle 001 \rangle$ 为主。

上述三个样品的组构分析进一步表明, 点苍山早期糜棱岩组构指示了中高温变形, 而晚期退变质糜棱岩带组构指示低温变形, 即点苍山东部退变质糜棱岩带经历了从高温到低温的叠加变质-变形作用。

7 讨论

7.1 高温与叠加低温变形构造关系

我们通过详细的野外宏观构造观测、显微构造分

析结合阴极发光以及矿物晶格优选定向的深入分析, 研究表明点苍山深变质岩经历了至少两期变形-变质作用, 即早期的高温左行剪切(D_1)和晚期叠加低温退变质-剪切变形作用(D_2)。岩石保存了典型的高温矿物组合以及由它们共同构成的宏观和微观塑性变形构造特征, 其中糜棱岩具有极其发育的矿物拉伸线理, 而形成典型的 L 与 $L \gg S$ 型构造是其一个显著的构造特征, 近水平的矿物拉伸线理(L_1)与区域上左行走滑剪切方向相一致。岩石中长石、角闪石、石英等主要矿物具有典型的高温品质塑性变形和动态重结晶生长特征。其中长石压扁拉长、定向以及细粒化, 石英呈矩形或拉长的多晶集合体条带, 云母强烈细粒化等(图5c、d), 均显示了变形矿物的高温塑性变形(Passchier和Trouw, 2005)。前人对该区域温压环境条件进行了相应的估算和讨论, 如曹淑云(2007)应用矿物对地质温度计获得早期高温变形(D_1)的温度介于 $604 \sim 674^\circ\text{C}$ 之间, 平均为 636°C ; 而压力介于 $0.599 \sim 0.710\text{GPa}$ 之间, 平均 0.653GPa , 属低角闪岩相变形-变质环境。研究还表明点苍山地区在左行走滑阶段, 其深变质岩呈现相对缓慢剥露的特点(Cao等, 2011a, 2011b; Chen等, 2016)。此阶段以高温位错蠕变为主导变形机制, 高温变质矿物如矽线石强烈拉伸定向, 与区域拉伸线理方向一致(图3a、b)。

然而值得注意的是, 我们通过详细的构造分析揭示出点苍山东侧、东南侧及东北侧区域叠加低温糜棱岩十分发育, 即早期的高温组构(D_1)叠加了低温变形-退变质的构造特征(D_2)。其中早期压扁拉长的长石在叠加低温变形过程中, 出现破裂并被细粒的石英和新生绿泥石矿物等充填; 高温变形组构的矿物(如石英矩形条带或多晶集合体)被进一步的细粒化, 这些都指示其叠加了低温变形。该过程伴随大量新生细粒化的绿泥石和白云母出现并同时遭受了同剪切变形。其中热擦痕线理(L_2)方向与近水平高温线理方向差别很大, 即在早期近水平的矿物拉伸线理(L_1)上叠加了北东倾伏的热擦痕线理, 说明有近北东-南西向的伸展, 而不是左行走滑剪切。与其他区域变质核杂岩中(如Bu Khang变质核杂岩、Mogok 变质核杂岩)报道的近东向倾伏(NNE或SEE)的拉伸线理一致(Barr等, 2002; Bertrand和Rangin, 2003)。这也意味着这些变质杂岩或变质核杂岩的快速剥露与区域叠加低温伸展构造密切相关(刘俊来等, 2007)。

图9 点苍山退变质糜棱岩带中花岗质糜棱岩石英EBSD 组构极密图

采用下半球等面积赤平投影, 叶理(XY面)垂直平面EW向, 线理(X)与平面 EW向平行, 其中(a)为极图, (b)为反极图

大量研究表明, 变形岩石中, 石英常见的滑移系有四种, 分别为底面 $\langle a \rangle$ 滑移即 $\{0001\}\langle 110 \rangle$ 、菱面 $\langle a \rangle$ 滑移即 $\{101\}\langle 110 \rangle$ 、柱面 $\langle a \rangle$ 滑移即 $\{100\}\langle 110 \rangle$ 、柱面 $\langle c \rangle$ 滑移即 $\{100\}\langle 0001 \rangle$ (Stipp等, 2002; 夏浩然和刘俊来, 2011)。进一步的研究表明, 石英滑移系的启动对温度很敏感, 且石英C轴定向与温度变化直接相关(Toy等, 2008; Law, 2014; Faghih和Soleimani, 2015)。在低温环境下, 滑移系更多的是以底面 $\langle a \rangle$ 滑移为主; 随着温度升高, 差异应力的增加, 滑移系转变为菱面 $\langle a \rangle$ 滑移、柱面 $\langle a \rangle$ 滑移到柱面 $\langle c \rangle$ 滑移。石英C轴组构从交

叉环带到单环带再到Y轴极密, 最后到X轴极密(Stipp等, 2002; Passchier和Trouw, 2005; 王勇生等, 2016)。如Toy(2008)认为糜棱岩和超糜棱岩中石英C轴组构如出现强烈的Y轴极密, 指示其经历了深部地壳层次即角闪岩相条件下的高韧性剪切变形。同时, 根据岩石变形实验报道, 前期出现的糜棱岩化岩石, 当出现叠加变形时, 其滑移系的启动将很可能受控于前期组构(Ralser等, 1985, 1991; Ralser, 2000)。也就是说, 较高温度塑性变形矿物的定向, 在某种程度下不利于低温变形时主导滑移系的启动。这种情况下, 早期变形的组构有

图 10 点苍山退变质糜棱岩带中花岗质糜棱岩的石英EBSD极密图

采用下半球等面积赤平投影, 叶理(XY面)垂直平面EW向, 线理(X)与平面EW向平行, 其中(a)为极图, (b)为反极图

些会被保留下来, 并叠加后期变形的组构(Cao等, 2017). 我们对点苍山具有代表性的叠加低温糜棱岩开展的EBSD分析结果表明, 石英C轴的晶格优选定向既有早期中高温条件下的柱面 $\langle a \rangle$ 滑移即 $\{10\cdot10\}\langle 11\cdot20 \rangle$, 也有晚期低温条件下的底面 $\langle a \rangle$ 滑移即 $\{0001\}\langle 110 \rangle$. 通过显微构造特征结合矿物滑移系, 确定这些晚期低温退变质剪切变形(D_2)的温度条件出现在 $300\sim 400^\circ\text{C}$. $^{40}\text{Ar}\text{-}^{39}\text{Ar}$ 测年黑云母矿物的封闭温度为 350°C 左右, 因此认为低温叠加糜棱岩的出现在约

13Ma 之后(黑云母 $^{40}\text{Ar}\text{-}^{39}\text{Ar}$ 测年, Cao等, 2011a)的快速冷却与剥露过程.

7.2 叠加低温变形出现在韧-脆性转换过程

上面详细的宏观和显微构造特征, 记录了点苍山深变质杂岩剥露过程经历了高温韧性到韧性-脆性的叠加变形-退变质过程. 在叠加低温糜棱岩中, 可见大量以长石为主的 ϕ 型、 σ 型、 δ 型组构和S-C组构在岩石中普遍存在, 它们是变形矿物(残斑)呈现韧-脆性

图 11 点苍山退变质糜棱岩带绿泥石化云母片岩中绿泥石的EBSD极密图

采用下半球等面积赤平投影, 叶理(XY面)垂直平面EW向, 线理(X)与平面 EW向平行. 其中(a)为极图, (b)为反极图

变形的有利证据. 显微构造和阴极发光特征都表明, 钾长石(Kfs)破裂处有新生矿物如石英(Qz)、方解石(Cc)、白云母(Mus)、绿泥石(Chl)等矿物充填, 石英呈塑性流动状愈合充填于长石裂隙中; 新生绿泥石和白云母等矿物集合体在长石破裂处或长石残斑周围及拖尾处产出, 组成典型的 σ 型、 δ 型旋转碎斑. 值得注意的是沿着长石残斑边缘成核生长的绿泥石, 明显发生了旋转和拖尾拉长, 而石英呈明显的细粒化, 具有塑性流动特征. 由塑性和脆性变形形成的具不规则边界的破裂的长石颗粒, 以及局部超碎裂岩与强烈细粒化石英、云母和绿泥石共存. 所有这些证据说明变形发生在250~400℃的韧-脆性转换带内(Passchier和Trouw, 2005).

7.3 流体作用与流变弱化

点苍山变质杂岩在剥露过程中, 其水-岩作用十分强烈, 呈现明显的流体运移. 典型的弱相新生矿物如绿泥石、白云母、石英等的大量出现, 是热液流体作用的最好证据. 晚期退变质过程处于一个类似开放系统, 其流体的参与导致岩石中的矿物变形置换/交代反应

十分显著. 在流体参与的置换反应中, 最明显的是钠长石置换钾长石, 且钠长石颗粒边界总是凸向钾长石(图8a、b), 形成似被吞噬的呈港湾状的钾长石颗粒边界. 其次, 白云母置换钾、钠长石的反应也十分常见, 其产生大约同等体积的白云母和石英. 这些反应置换在点苍山叠加低温糜棱岩中十分普遍.

反应式(Wintsch和Yeh, 2013)如下:

同时沿着发育的面理面或紧邻石英条带, 显著可见绿泥石置换钾长石的反应. 这些置换反应也是交代反应. 用简单的公式表述, 此时用Mg代替Mg+Fe, 得到的公式如下:

这些结果表明, 点苍山深变质岩在剥露过程中, 明显经历了叠加低温退变质-变形作用, 该过程中流体十

分活跃且起着重要的作用。

对流体的大量研究表明, 在岩石变形过程中流体主要通过水解弱化的方式对岩石的力学性质产生影响, 并影响岩石的流变性和变形机制(Yardley和Baumgartner, 2007)。特别是在低温条件下流体的加入可以通过降低或增加围压来改变岩石脆-韧性。从微观机制角度看, 流体通过水解弱化的作用对岩石中矿物晶体内部位错的形成、生长和运动产生影响, 进而改变岩石的流变状态。特别是流体参与反应形成/发生弱矿物相(如白云母和绿泥石)置换强矿物相(如长石), 致使岩石、矿物结构弱化, 并进一步促进应变局局部化, 此时岩石的力学强度和区域整体流变弱化性质随之发生改变。因此在点苍山变质杂岩剥露过程中, 流体的参与可能直接影响着岩石的力学强度, 同时也是促进流变弱化的重要催化剂。而对流体来源, 我们将在后面的工作中持续深入开展。

8 结论

对滇西点苍山变质杂岩中的叠加低温糜棱岩的宏观、显微构造、矿物晶格优选定向及变形温度环境等开展了详细的分析。研究表明, 点苍山变质杂岩经历了早期高温左行走滑剪切作用和晚期快速剥露的伸展构造作用, 呈现出叠加低温变形-变质构造特征, 且晚期低温剪切变形发生于韧-脆性转换域内。在晚期快速剥露过程中, 流体非常活跃, 与矿物发生反应/置换形成大量的新生弱相矿物组合, 进一步导致结构弱化和应变局局部化, 最终可促进岩石的整体流变弱化和致使深部地壳岩石剥露至地表。

致谢 感谢编委和评审专家提出宝贵意见。

参考文献

- 曹淑云. 2007. 滇西点苍山高温糜棱岩显微构造和流动机制研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学. 1-113
- 曹淑云, 刘俊来. 2006. 岩石显微构造分析现代技术——EBSD技术及应用. 地球科学进展, 21: 1091-1096
- 季建清, 钟大赉, 张连生. 2000. 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
- 刘俊来, 曹淑云, 翟云峰, 宋志杰, 王安建, 修群业, 曹殿华, 高兰, 管

- 焯. 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. 地学前缘, 14: 40-48
- 刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 宋志杰. 2008. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用. 地质通报, 27: 1638-1645
- 王勇生, 杨秉飞, 王海峰, 余顶杰. 2016. 石英C轴组构影响因素探讨: 以郯庐断裂带糜棱岩为例. 岩石学报, 32: 965-975
- 夏浩然, 刘俊来. 2011. 石英结晶学优选与应用. 地质通报, 30: 58-70
- 张波, 张进江, 钟大赉, 郭磊. 2008. 滇西澜沧江左旋走滑挤压带应变分解的应变和运动学证据. 中国科学 D辑: 地球科学, 1268-1283
- 张进江, 张波. 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. 地质科学, 41: 291-310
- 张进江, 钟大赉, 季建清, 丁林, 桑海清. 2001. 东喜马拉雅构造结: 大陆碰撞以来构造年代学框架及其与哀牢山-红河构造带的对比. 矿物岩石地球化学通报, 20: 243-244
- 张连生, 钟大赉. 1996. 从红河剪切带走滑运动看东亚大陆新生代构造. 地质科学, 327-341
- Burchfiel B C, Wang E. 2003. Northwest-trending, middle Cenozoic, left-lateral faults in southern Yunnan, China, and their tectonic significance. *J Struct Geol*, 25: 781-792
- Barr S M, Macdonald A S, Miller B V, Reynolds P H, Rhodes B P, Yokart B. 2002. New U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the Doi Inthanon and Doi Suthep metamorphic core complexes, north-western Thailand. Bangkok: Symposium on Geology of Thailand. 284-294
- Bertrand G, Rangin C. 2003. Tectonics of the western margin of the Shan plateau (central Myanmar): Implication for the India-Indochina oblique convergence since the Oligocene. *J Asian Earth Sci*, 21: 1139-1157
- Cao S Y, Liu J L, Hu L. 2007. Micro-and submicrostructural evidence for high-temperature brittle-ductile transition deformation of hornblende: Case study of high-grade mylonites from Diancangshan, western Yunnan. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 50: 1459-1470
- Cao S Y, Liu J L, Bernd L, Axel V, Zou Y X, Zhao C Q. 2009. Timing of initiation of left-lateral slip along the Ailao Shan-Red River shear zone: microstructural, texture and thermochronological evidence from high temperature mylonites in Diancang Shan, SW China. *Acta Geol Sin*, 83: 1388-1400
- Cao S Y, Liu J L, Leiss B, Zhao C Q. 2010a. New zircon U-Pb geochronology of the post-kinematic granitic plutons in the Diancang Shan metamorphic massif along the Ailao Shan-Red River shear zone and its geological implications. *Acta Geol Sin*, 84: 1474-1487
- Cao S, Liu J, Leiss B. 2010b. Orientation-related deformation mechanisms of naturally deformed amphibole in amphibolite mylonites from the Diancang Shan, SW Yunnan, China. *J Struct*

- Geol*, 32: 606–622
- Cao S, Liu J, Leiss B, Neubauer F, Genser J, Zhao C. 2011a. 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. *Gondwana Res*, 19: 975–993
- Cao S, Neubauer F, Liu J, Genser J, Leiss B. 2011b. 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 Asian Earth Sci*, 42: 525–550
- Cao S, Liu J, Leiss B, Vollbrecht A, Genser J, Neubauer F, Zhao C. 2012. Initiation of left-lateral deformation along the Ailao Shan–Red River shear zone: new microstructural, textural, and geochronological constraints from the Diancang Shan metamorphic massif, SW Yunnan, China. *Int Geol Rev*, 54: 348–367
- Cao S, Neubauer F. 2016. Deep crustal expressions of exhumed strike-slip fault systems: Shear zone initiation on rheological boundaries. *Earth-Sci Rev*, 162: 155–176
- Cao S, Neubauer F, Bernroider M, Genser J, Liu J, Friedl G. 2017. Low-grade retrogression of a high-temperature metamorphic core complex: Naxos, Cyclades, Greece. *Geol Soc Am Bull*, 129: 93–117
- Chen X Y, Liu J L, Weng S T. 2016. Deformation characteristics and cenozoic exhumation of the Yao Shan complex evidenced by apatite fission track thermochronology. *Acta Petrol Sin*, 32: 2303–2316
- Chung S L, Lo C H, Lee T Y, Zhang Y, Xie Y, Li X, Wang K L, Wang P L. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. *Nature*, 394: 769–773
- England P, Molnar P. 1990. Right-lateral shear and rotation as the explanation for strike-slip faulting in eastern Tibet. *Nature*, 344: 140–142
- Faghih A, Soleimani M. 2015. Quartz c-axis fabric development associated with shear deformation along an extensional detachment shear zone: Chapedony Metamorphic Core Complex, Central-East Iranian Microcontinent. *J Struct Geol*, 70: 1–11
- Gilley L D, Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, Lovera O M, Wang J H. 2003. Direct dating of left-lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam. *J Geophys Res*, 108: 2127
- Handy M R. 1989. Deformation regimes and the rheological evolution of fault zones in the lithosphere: The effects of pressure, temperature, grain size and time. *Tectonophysics*, 163: 119–152
- Handy M R., Hirth G, Bürgmann R. 2007. Continental fault structure and rheology from the frictional to viscous transition downward. In: Handy M R, Hirth G, Hovius N, eds. *Tectonic Faults: Agents of Change on a Dynamic Earth*. Cambridge: MIT Press. 139–182
- Harrison T M, Wenji C, Leloup P H, Ryerson F J, Tapponnier P. 1992. An early Miocene transition in deformation regime within the Red River Fault zone, Yunnan, and its significance for Indo-Asian tectonics. *J Geophys Res*, 97: 7159–7182
- Harrison T M, Leloup P H, Ryerson F J, Tapponnier P, Lacassin R, Chen W J. 1996. Diachronous initiation of transtension along the Ailao Shan–Red River shear zone, Yunnan and Vietnam. In: Yin A, Harrison T M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press. 208–225
- Harrison T M, Ryerson F J, Le Fort P, Yin A, Lovera O M, Catlos E J. 1997. A late Miocene–Pliocene origin for the central Himalayan inverted metamorphism. *Earth Planet Sci Lett*, 146: E1–E7
- Law R D. 2014. Deformation thermometry based on quartz c-axis fabrics and recrystallization microstructures: A review. *J Struct Geol*, 66: 129–161
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong D, Liu X, Zhang L, Ji S, Trinh P T. 1995. The Ailao Shan–Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3–84
- 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, Tapponnier P, Lacassin R, Searle M P. 2007. Discussion on the role of the Red River shear zone, Yunnan and Vietnam. *J Geol Soc*, 164: 1253–1260
- Liu J L, Song Z J, Cao S Y, Zhai Y F, Wang A J, Gao L, Xiu Q Y, Cao D H. 2006. 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 Petrol Sin*, 22: 775–786
- Liu J, Cao S, Zhai Y, Song Z, Wang A, Xiu Q, Cao D, Gao L, Guan Y. 2007. Rotation of crustal blocks as an Explanation of Oligo-Miocene Extension in Southeastern Tibet—Evidenced by the Diancangshan and Nearby metamorphic core complexes (in Chinese). *Earth Sci Front*, 14: 40–48
- Liu J, Tang Y, Tran M D, Cao S, Zhao L, Zhang Z, Zhao Z, 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
- Maluski H, Lepvrier C, Jolivet L, Carter A, Roques D, Beyssac O, Tang T T, Thang N D, Avigad D. 2001. Ar–Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam. *J Asian Earth Sci*, 19: 233–248
- Nam T N, Toriumi M, Itaya T. 1998. *P–T* paths and post-metamorphic exhumation of the Day Nui Con Voi shear zone in Vietnam. *Tectonophysics*, 290: 299–318

- Passchier C W, Trouw R A J. 2005. Microtectonics. Berlin-Heidelberg: Springer. 105–109
- Ralser S, Hobbs B E. 1985. Experimental deformation of quartz mylonites. *J Struct Geol*, 7: 497
- Ralser S, Hobbs B E, Ord A. 1991. Experimental deformation of a quartz mylonite. *J Struct Geol*, 13: 837–850
- Ralser . 2000. Microstructural constraints on the timing of Proterozoic deformation in Central New Mexico. *J Metamorph Geol*, 18: 457–466
- Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, Schmid S M. 2002. The eastern Tonale fault zone: A ‘natural laboratory’ for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C. *J Struct Geol*, 24: 1861–1884
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Schärer U, Dalai Z, Haiwei W, Xiaohan L, Shaocheng J, Lianshang Z, Jiayou Z. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China. *Nature*, 343: 431–437
- Tapponnier P, Molnar P. 1977. Active faulting and tectonics in China. *J Geophys Res*, 82: 2905–2930
- Tapponnier P, Ryerson F J, Woerd J V D, Mériaux A S, Lasserre C. 2001. Long-term slip rates and characteristic slip: Keys to active fault behaviour and earthquake hazard. *Earth Planet Sci*, 333: 483–494
- Toy V G, Prior D J, Norris R J. 2008. Quartz fabrics in the Alpine Fault mylonites: Influence of pre-existing preferred orientations on fabric development during progressive uplift. *J Struct Geol*, 30: 602–621
- 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 P L, Lo C H, Lee T Y, Chung S L, Lan C Y, Yem N T. 1998. Thermochronological evidence for the movement of the Ailao Shan-Red River shear zone: A perspective from Vietnam. *Geology*, 26: 887
- Wang P L, Lo C H, Chung S L, Lee T Y, Lan C Y, Van Thang T. 2000. 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 Asian Earth Sci*, 18: 281–292
- Wang Y J, Fan W M, Guo F, Li X. 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic granodioritic intrusions in southeast Hunan Province, China. *Acta Petrol Sin*, 17: 169–175
- Wang Y, Fan W, Sun M, Liang X, Zhang Y, Peng T. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. *Lithos*, 96: 475–502
- Wintsch R P, Yeh M W. 2013. Oscillating brittle and viscous behavior through the earthquake cycle in the Red River Shear Zone: Monitoring flips between reaction and textural softening and hardening. *Tectonophysics*, 587: 46–62
- Yardley B W D, Baumgartner L P. 2007. Fluid processes in deep crustal fault zones. In: Handy M R, Hirth G, Hovius N, eds. *Tectonic Faults: Agents of Change on a Dynamic Earth*. Cambridge: MIT Press. 295–318
- Zhang B, Yin C Y, Zhang J J, Wang J M, Zhong D L, Wang Y, Lai Q Z, Yue Y H, Zhou Q Y. 2017. Midcrustal shearing and doming in a Cenozoic compressive setting along the Ailao Shan-Red River shear zone. *Geochem Geophys Geosyst*, 18: 400–433

(责任编辑: 丁林)