滇东南老君山片麻岩穹窿变形构造与剥露过程

刘忠, 曹淑云*, 董彦龙, 李维, 程雪梅, 王浩博, 吕美霞

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

* 通讯作者, E-mail: shuyun.cao@cug.edu.cn

收稿日期: 2021-02-04; 收修改稿日期: 2021-05-08; 接受日期: 2021-06-15; 网络版发表日期: 2021-08-23

国家重点研发计划项目(编号: SQ2017YFSF040030)和国家自然科学基金项目(批准号: 41972220、41722207)资助

摘要 变质核杂岩或片麻岩穹窿中广泛出露大陆中-下地壳乃至地幔岩石, 是研究深部地壳岩石剥露过程和流变学的理想场所, 也是研究造山带折返或区域伸展过程的重要窗口. 滇东南老君山地区位于华夏地块、扬子地块和印支陆块所夹持的特殊大地构造位置, 其出露一套不同程度的变质-变形岩系和花岗质侵入岩体, 且发育丰富的锡钨等多金属矿床, 具有重要研究意义. 通过对老君山地区宏观和显微构造、应力场分布和变形条件的深入分析, 发现该区域总体呈现出穹窿状构造形态特征, 同时发育典型的变质核杂岩构造单元, 即强烈变形-变质的片麻岩核部(下盘)、拆离断层系及弱变质到未变质-变形的沉积盖层(上盘). 下盘属于强烈的塑性变形域, 并伴随有不同期次岩体侵入. 片麻岩面理和线理产状分别具有弧形和放射状特征, 整体为近南北向, 倾向由下盘指向上盘, 糜棱岩化随着远离拆离断层到下盘核部逐渐减弱并过渡为正常片麻岩. 下盘和上盘之间是呈弧形展布的低角度拆离断层. 靠近拆离断层的上盘变形岩石中保留了部分糜棱岩组构特征, 主要由叠加变形的绿泥石化片岩、断层角砾岩、碎裂岩和断层泥组成. 拆离断层附近和上盘发育有大量正断层, 其应力场围绕核部呈弧形、放射状展布. 获得下盘核部斜长角闪岩和片麻岩中的岩浆锆石U-Pb年龄集中在445~420Ma, 为加里东期岩浆侵位年龄, 也是老君山地区核部片麻岩岩石单元的主形成时期. 锆石变质边的U-Pb年龄范围为241~230Ma, 为印支期碰撞阶段的高级变质与高温缩短变形时限. 在这个时期, 该区域地壳经历了挤压收缩变形以及叠加拆离伸展剥露, 并在晚期阶段伴随强烈的流体活动和热液成矿作用.

关键词 片麻岩穹窿, 应力场反演, 变形EBSD组构, 锆石U-Pb年代学, 华南加里东期构造运动

1 引言

在造山带和大陆伸展区常发育变质核杂岩和/或片麻岩穹窿, 其广泛出露大陆中下地壳岩石, 为研究深部地壳剥露过程和流变学提供了理想的场所. 大量研究表明, 变质核杂岩或片麻岩穹窿出露的下盘/核部是

来自于深部地壳且发生变质-变形的岩石, 与上盘/盖层浅(未)变质的浅部地壳岩石通过脆性断层和韧性剪切带在水平面上并置出现(Davis, 1977; 朱志澄, 1994; Cao等, 2013; Whitney等, 2013; 张进江和黄天立, 2019). 变质核杂岩和片麻岩穹窿的形成和剥露过程是地壳物质运动(垂向和侧向)的重要形式, 也是地壳深

中文引用格式: 刘忠, 曹淑云, 董彦龙, 李维, 程雪梅, 王浩博, 吕美霞. 2022. 滇东南老君山片麻岩穹窿变形构造与剥露过程. 中国科学: 地球科学, 52(1): 53–80, doi: 10.1360/SSTe-2021-0029

英文引用格式: Liu Z, Cao S, Dong Y, Li W, Cheng X, Wang H, Lyu M. 2021. Deformation structure and exhumation process of the Laojunshan gneiss dome in southeastern Yunnan of China. Science China Earth Sciences, 64(12): 2190–2216, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9804-0>

部到浅部普遍存在的一种物质-热交换方式(Whitney等, 2004; 张程等, 2019). 其中片麻岩穹窿这一概念最先由Eskola(1948)提出, 随后国内外学者从不同角度开展了相关研究, 并对其内部结构、特征、类型划分以及成因进行了探讨(Collins等, 1998; Teyssier和Whitney, 2002; Chen等, 2017). 片麻岩穹窿是中、下地壳热动力学过程与岩浆作用(或混合岩化作用)密切相关的穹窿状构造(许志琴和马绪宣, 2015), 其在折返造山带和伸展构造域中扮演重要的角色(Lister and Davis, 1989; Lee等, 2000; Liu等, 2006, 2007, 2013; 张进江, 2007; 刘俊来等, 2011; Zhang等, 2012). 同时值得注意的是, 片麻岩穹窿与同构造花岗岩、含矿伟晶岩脉以及大型滑脱带在时空和成矿成因上相互关联, 为片麻岩穹窿提供了找矿前景(许志琴等, 2016; Cao和Neubauer, 2016). 然而, 由于片麻岩穹窿内部结构在不同地区的剥露过程及机制具有多样性和复杂性, 其构造形态和内部几何学特征等往往是多期伸展变形叠加的产物, 因此片麻岩穹窿的构造-热演化和成因过程仍然是具有争议的前沿课题(Burg等, 1984; Duncan, 1984; Lister and Davis, 1989; Buck, 1991; Vanderhaeghe等, 1999; Crowley等, 2001; 王岳军等, 2003; Fletcher和Hallet, 2004; 张进江等, 2011; 许志琴等, 2019).

中国云南省东南部老君山地区属于特提斯与环太平洋构造域的交接部位, 位于华南陆块与印支陆块的结合地带(马文璞, 1998; 钟大赉等, 1998; Zheng等, 2013). 由于该区域的形成背景、深部地壳的构造-热演化及剥露过程与华南-印支陆块运动演化密切相关, 因此该区域是研究特提斯构造域时空发展和华南-印支陆块(特别是印支期以来)相互作用的关键区域之一(Leloup等, 1995; Chung等, 1997; Lacassin等, 1997; Lepvrier等, 1997; 董云鹏和朱炳泉, 1999; 吴根耀, 2001; 郭利果, 2006; Viola和Anczkiewicz, 2008; Guo等, 2009; Zheng和Chen, 2017). 早期云南省地质局通过1:20万区域地质调查(1972)认为该地区受北西-南东向文山-麻栗坡断裂构造控制, 导致区域变质杂岩体发生逆时针扭转运动, 形成区域环形构造、片麻岩及相应的成矿作用(薛玺会等, 1989). 20世纪80年代中后期变质核杂岩的概念引入中国, 有学者提出该区域具备典型变质核杂岩特征, 将其称为南温河变质核杂岩(张世涛等, 1998)或老君山变质核杂岩(Li和Deng, 1996; 李东旭和许顺山, 2000; 刘玉平等, 2007b). 老君山地区与

向南延伸到越南境内的Song Chay(斋江)地区具有基本一致的地质特征(李东旭和许顺山, 2000; Yan等, 2006; Chen等, 2014; 颜丹平等, 2005; Zhou等, 2017), 因此统称为老君山-Song Chay变质核杂岩(刘玉平等, 2006; Liu等, 2003; Guo等, 2009), 越南东北部斋江地区称为斋江片麻岩穹窿(Roger等, 2000; Nam等, 2003)、斋江地块(Maluski等, 2001; Chen等, 2014)或都龙-斋江变质穹窿体(杨世瑜, 1987, 1988; 颜丹平等, 2005; Yan等, 2006). 老君山地区蕴藏着丰富的矿产资源, 已发现超大型矿床一处(都龙-锡锌多金属矿)(刘玉平等, 2007a; 李进文等, 2013; 李宝龙和赵磊, 2014; 王小娟等, 2014)、大型矿床两处(新寨-钨锡多金属矿、南秧田-钨锡多金属矿)(曾志刚等, 1999; 冯佳睿, 2011; 冯佳睿等, 2011a, 2011b; 石洪召等, 2011, 2013; 阙朝阳等, 2014; 阙朝阳, 2016), 并在大丫口发现了中国大型的祖母绿宝石矿床(张世涛等, 1999; 冯明刚等, 2000; 胡荣荣, 2008; 黄文清, 2014; 黄文清等, 2017). 前人对该地区成矿方面已经开展了大量研究工作, 但对于该区域的结构特征、变形构造和穹窿形成过程等问题的研究还相对薄弱, 制约了我们对老君山地区构造演化、剥露过程及区域成矿成因的全面了解.

本文以滇东南老君山片麻岩穹窿为研究对象, 通过详细的野外构造解析, 结合室内显微构造观测、构造应力场模拟、矿物阴极发光(CL)、电子背散射衍射(electron backscattered diffraction, EBSD)和LA-ICP-MS锆石U-Pb测年等手段, 并利用前人的相关地球化学数据, 厘定出该区域宏观和显微构造特征、应力场方位及分布规律、岩石矿物变形组构特征与分布规律以及相关的岩浆侵入和变质时限, 探讨并揭示老君山地区深部地壳岩石剥露机制和动力学演化过程, 也为区域成矿成因过程提供构造依据.

2 区域地质背景

华南陆块具有复杂的区域构造演化历史, 自元古代以来经历了多期构造事件. 在新元古代早期(>900Ma), 华夏洋壳俯冲到扬子克拉通之下形成增生型江南造山带; 在新元古代中期(830~740Ma), 华南内部沿扬子微陆块周边(包括江南造山带)发生构造拉张形成伸展型造山带(舒良树, 2012; 张国伟等, 2013; Zheng等, 2013). 在早古生代, 华夏与扬子之间的古缝

合带再次发生构造拉伸形成张裂造山带, 华南陆块在加里东期发生构造隆升; 在中生代时期, 华南陆块整体受古太平洋板块西向俯冲影响, 在新生代发生东南向的陆块逃逸(任纪舜, 1990; Roger等, 2000; Faure等, 2009, 2016; 舒良树, 2012; 张国伟等, 2013; Zheng等, 2013). 老君山-斋江变质杂岩就位于华南与印支陆块的结合地带(图1a).

老君山-斋江变质杂岩整体呈口袋状或半月状的平面形态特征, 南北长约70km, 东西宽约50km, 北至麻栗坡县的跌大坡, 南至越南境内的安平, 其区域的西南部与北东部分别被北西-南东向的红河-哀牢山和文山-麻栗坡断裂带所围限(图1b). 老君山地区位于老君山-斋江深变质杂岩的北部, 东西与南北向延伸约25km, 整体呈穹窿状产出(图2a), 其东北侧和西南侧分别发育有北西-南东向延伸的文山-麻栗坡断裂、南温河断裂和马关-保良街断裂(图2a), 其中钨、锡多金属成矿带主要位于这三条断裂之间. 老君山深变质杂岩由猛洞岩群、新寨岩组、南捞及南温河花岗片麻岩和老君山花岗岩组成. 猛洞岩群由新元古代南秧田岩组、洒西岩组构成, 以云母片岩和变粒岩、片麻岩和角闪岩为主. 新寨岩组以片岩夹中细晶大理岩为主. 其中, 元古代深变质岩与花岗片麻岩以封闭状的逆冲断层相接触(张世涛等, 1998; 云南省地质矿产勘察开发局, 1999; 林伟等, 2011; 毕珉烽, 2015). 深变质杂岩体周围为浅变质变形或未变质变形的上盘, 出露灰岩、白云岩及部分板岩、千枚岩和大理岩.

老君山深变质杂岩具有元古代结晶基底, 属于越北古陆的一部分, 经历多期构造-岩浆活动并最终剥露至地表(Li和Deng, 1996; 李东旭和许顺山, 2000; 郭利果, 2006; 刘玉平等, 2006; Yan等, 2006). 获得新元古代片麻岩中锆石核部U-Pb年龄为(799±10)Ma(Yan等, 2006), 被认为是裂谷成因的岩浆侵入年龄(Zheng等, 2013). 中-晚志留世(436~402Ma)强烈的岩浆活动和就位是该区域经历了加里东构造运动最直接的体现(任纪舜, 1990; Roger等, 2000; Maluski等, 2001; Carter和Clift, 2008; 王丹丹等, 2015). 燕山期花岗岩体(95~80Ma)主要出现在老君山西北部(图2)(安保华, 1990; 刘艳宾等, 2014; 方烨, 2018). 通过对老君山深变质杂岩中角闪石和云母进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和K/Ar年代学分析, 分别获得237~144Ma和110~75Ma的宽泛冷却年龄, 此阶段对应着区域的整体剥露(Roger等, 2000; Malus-

ki等, 2001; 颜丹平等, 2005). 近年来, 通过对老君山区构造变形和年代学分析, 认为中生代以来至少存在两期变形和区域性伸展作用: 穹窿隆升和剥露阶段(237~228Ma), 代表印支期造山作用前的伸展构造; 叠加和改造阶段(176~146Ma或86~78Ma), 致使穹窿进一步隆升和剥露. 新生代时期, 受红河-哀牢山左行走滑断裂带的影响, 整个区域叠加出现左旋活动的演化特征(颜丹平等, 2005; Yan等, 2006). 最近, 有学者通过构造解析划分出四期变形, 即老君山-斋江地区依次经历了三叠纪北西向逆冲断层作用(挤压)、穹窿体剥露与低角度正断层作用(伸展)、盖层形成高角度正断层以及受新生代红河-哀牢山左旋和右旋走滑断裂改造(Xie和Wang, 2019).

3 研究方法

3.1 应力场反演

本文采用Win_tensor软件对区域内发育的断层及擦痕产状进行分析, 反演出相应区域内古应力场分布情况. 该软件引用“World Stress Map”项目的质量等级体系(Delvaux和Sperner, 2003), 质量等级评估参数包括用于应力分析的断层数据的数量(n)、利用数据与总数据比例(n/nt)、断层滑移方向判断的可信度或断裂类型的可信度、断层类型(正断层、逆断层、走滑断层). 采用人机交互的数据处理方式, 使用“右二面体”绘图法测定最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 可能方向的范围, 再用“旋转优化法”和功能键模拟出应力场方位(Delvaux等, 1997; Delvaux和Sperner, 2003), 最后结合测量数据点位反演出整个区域的应力场方位.

3.2 显微阴极发光和EBSD变形组构分析

显微阴极荧光是进行岩石和矿物相分析非常有效的手段. 通过不同矿物的阴极荧光发光性有效鉴别矿物相、矿物内杂质元素的分布, 以及区分形成不同世代的产物和胶结次序等, 可进一步恢复岩石和矿物的结构和构造特征以及成因联系(徐惠芬和陈涛, 1987; 董彦龙等, 2019). 显微阴极发光成分分析使用中国地质大学(武汉)地质实验中心的由BEACON INNOVATION INTL公司生产的新型阴极发光仪CLF-1. 仪器使用环境温度<30℃、湿度<60%, 工作电源为220V,

图1 (网络版彩图)老君山-斋江片麻岩穹窿地质背景

(a) 华南陆块(由扬子和华夏陆微板块组成)与印支陆块的大地构造简图(据孙涛, 2006; Usuki等, 2009; Zhao和Cawood, 2012; Zhou等, 2017; Cawood等, 2018修改); (b) 老君山-斋江片麻岩穹窿地质简图(据Roger等, 2000修改)

观察窗工作距离为15 mm, 真空度最高极限为0.0025mbar, 电子枪电压达30kV, 通常在1~25kV调节, 阴极电压0~30kV, 工作电流1.2mA、连续可测, 最大束流到2mA.

EBSD技术是应用高分辨扫描电子显微镜获取矿物晶体结构和矿物优选定向的一种快速有效的手段(Prior等, 1999; Heidelbach等, 2000; Stipp等, 2002; 曹淑云, 2007; 刘俊来等, 2008). 测试仪器为中国地质大学(武汉)地学实验中心新建的加载牛津Symmetry EBSD探测器的Sigma 300VP超高分辨率场发射扫描电镜.

所有测试样品均为定向薄片, 即平行线理并垂直面理. 测试前需要对定向薄片进行高精度抛光. 将抛光后的薄片倾斜70°放于扫描电镜腔内, 薄片矿物线理的方向常常平行于扫描电镜的X轴方向. 在低真空、加速电压为20kV、探头距离为193mm、工作距离为18~20mm条件下采集电子背散射衍射图和数据(EBSP), 并通过面扫模式进行数据获取. 一般至少检测到8~10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. 最后使用AZtec CHANNEL 5软件包对采集到的数据进行分析 and 处理(董彦龙等,

图 2 (网络版彩图)滇东南老君山地区构造简图

(a) 老君山变质杂岩地质构造图, 外围为下盘花岗岩片麻岩与片岩面理-线理产状数据的等面积下半球赤平投影图, 其中黑线为面理、红点为拉伸线理, 无箭头灰色虚线一端指示数据测量点位置; (b) 都龙-毛草坪地质剖面图A-A'; (c) 南捞-洒西地质剖面图B-B'; (d) 上盘与南捞片麻岩接触关系图((a)西北角); (e) 都龙东南侧南温河花岗岩片麻岩与新寨变质岩组接触关系图. (a)、(b) 据1:20万马关幅地质图修改; (c) 据阙朝阳等(2014)修改; (d)、(e) 据1:5万马关县幅地质图说明书修改

2019; 吕美霞等, 2020).

3.3 LA-ICP-MS锆石U-Pb测年分析

LA-ICP-MS锆石U-Pb测年采用德国Neptune Plus多接收杯等离子体质谱仪, 并利用Geolas HD激光剥蚀系统进行测试. 以He为剥蚀物质的载气, 采用单点剥蚀模式. 束斑直径固定为32 μ m, 剥蚀频率10Hz, 剥蚀时间30s. 测试过程中以标准锆石91500(^{206}Pb - ^{238}U 年龄为(1065.4 $\pm$ 0.6)Ma, Wiedenbeck等, 1995)为外标校正元素分馏, 以标准锆石Plešovice(Sláma等, 2008)作为盲样监控数据质量. NISTsRM作为信号漂移校正, 以标准锆石91500作为外标, 以Si为内标测定主量和微量元素含量. 测试数据经过ICPMSDataCal 12.2软件离线处理, 利用Isoplot 4.15插件进行谐和年龄成图(Ludwig, 2003). 普通铅校正使用Andersen(2002)给出的程序计算. 分析数据及锆石U-Pb谐和图给出误差为1 σ .

4 老君山片麻岩穹窿的变形构造特征

4.1 片麻岩核(下盘): 高温塑性变形构造特征

老君山变质杂岩整体上呈现出一个类似“蘑菇状”的构造形态(图2), 主体由下盘、拆离断层系和沉积盖层/上盘所组成, 且这三个组成部分的岩石单元发生了不同程度的变形-变质作用. 其下盘核部为花岗岩和深熔混合岩, 并被花岗片麻岩所围绕, 岩性主要包括(南温河和南捞)花岗片麻岩、石榴矽线片麻岩、斜长角闪岩、片岩和大理岩, 其中花岗片麻岩出露面积最大(图2, 图3). 这些花岗片麻岩和片岩的面理产状呈放射状倾向四周盖层, 倾角8°~80°(图2b, 2c). 元古代变质岩组逆冲于(南温河与南捞)花岗片麻岩之上, 以中低角度的逆冲断层为主, 断层面向南东(图2c). 片麻岩核西北侧出露的花岗岩体为燕山中晚期多期岩浆侵入的复式岩体, 近南北向延伸(冯佳睿等, 2010; 马慧慧, 2013; 刘艳宾等, 2014)(图3a). 岩性为二云二长花岗岩, 矿物成分以斜长石、石英、白云母、钾长石、黑云母为主, 整体未变形. 靠近老君山花岗岩体的片麻岩面理发育褶皱(图2b), 褶皱枢纽与线理发育方向一致. 靠近拆离断层发育石英云母片岩, 片理化程度高, 片理倾向指向盖层方向, 倾角30°~50°(图2e). 斜长角闪岩呈似层状或透镜状产于花

岗片麻岩中(图2, 图3b).

老君山变质杂岩的下盘岩石单元包括花岗质片麻岩、斜长角闪岩、石榴-黑云母片岩、大理岩, 这些岩石普遍遭受强烈的剪切变形, 形成了不同变形-变质程度的糜棱质构造岩. 这些糜棱质岩石发育糜棱叶理和矿物拉伸线理, 整体呈现出明显的塑性流动构造特征(图3c~3e). 其中糜棱叶理主要是由压扁拉长的长石、角闪石、石榴石等相对刚性矿物和细粒化的矿物集合体(如长英质集合体条带、片状矿物集合体, 如矽线石、黑云母、白云母等)平行定向排列构成(图3f~3h). 根据野外产状测量并投图, 糜棱面理和片麻理倾向呈放射状指向盖层, 倾角8°~80°. 矿物拉伸线理倾伏向也呈放射状分布, 但主体倾伏向以南北向为主. 低倾伏角多出现在靠近拆离断层及附近的上盘, 高倾伏角多出现在下盘(图2a). 矿物拉伸线理由拖尾状的石榴子石、长石和角闪石旋转残斑、层状矿物集合体(如二云母和矽线石)以及长英质矿物集合体定向拉长排列构成(图3f~3h). 在这些糜棱岩中, 常常见到呈透镜状的长英质脉、S-C组构、不对称旋转残斑, 如“ σ ”或“ δ ”型的长石、石榴子石或角闪石等矿物, 它们的剪切运动学特征标志指示该区域岩石遭受了强烈的简单剪切作用, 且运动学指示该区域上盘围绕下盘核部呈弧形向东、北、西向的剪切运动.

下盘岩石呈现明显的高温剪切变形显微构造特征. 在石榴子石矽线云母片岩或片麻岩中, 石榴子石和矽线石是典型的高级变质矿物组合. 矽线石发育残斑和基质, 其中残斑呈现出定向拉长和“ σ ”型旋转组构, 指示高温左行剪切的特点; 基质中的矽线石主体呈纤维状拉长定向, 常常与云母共生. 矽线石呈现出细粒化动态重结晶(塑性)变形特征(图4a). 同构造剪切旋转变形的石榴子石和长石残斑、矽线石、云母集合体以及石英多晶条带等共同构成矿物拉伸线理(图4c, 4d). 斜长角闪岩中的角闪石残斑压扁拉长定向(图4b). 在富云母层中, 云母围绕长石残斑, 边缘具有明显的细粒化特征(图4e). 云母片岩和花岗片麻岩中的长石颗粒均呈现出高温晶质塑性变形特征, 长石残斑在垂直面理方向上被压扁, 长轴平行矿物拉伸线理方向. 钾长石残斑呈现波状和不均匀消光等特征. 细小的长石颗粒组成的基质环绕长石残斑, 与石英颗粒等一起构成旋转拖尾(图4e, 4f). 部分长石残斑形成“ σ ”和“ δ ”型旋转残斑, 与露头宏观构造特征相一致, 指示左旋剪

图 3 (网络版彩图)老君山下盘高温塑性变形特征

(a) 混合岩中可见由长英质成分构成的浅色体和镁铁质成分构成的暗色体; (b) 似层状斜长角闪岩, 露头上宽度约3m; (c)、(d) 花岗片麻岩呈现出显著的塑性变形, 眼球状长英质残斑指示逆时针(左行)剪切运动方向; (e) 花岗质糜棱岩, 长英质残斑及拖尾均指示逆时针(左行)韧性剪切运动方向; (f) 花岗质超糜棱岩, 强烈的剪切变形使得内部矿物强烈拉伸, 形成矿物拉伸线理; (g) 花岗质超糜棱岩, 发育矿物拉伸线理, 晚期形成节理裂隙中充填电气石脉; (h) 片岩中片理发育, 片理面上可见矿物拉伸线理

切运动方向.

花岗片麻岩由斜长石、钾长石、石英、云母组

成, 含有少量的磷灰石和矽线石. 斜长石及其内部石英颗粒因受剪切而呈现出拉长变形, 其拉长方向与

图 4 (网络版彩图)老君山下盘岩石的高温变形的显微构造特征

(a) 两种形态的矽线石(残斑和基质)与团块状黄铁矿; (b) 中粗粒斜长角闪岩, 角闪石与斜长石颗粒粗大, 呈条带状分布, 角闪石沿长轴定向; (c) 石榴子石旋转残斑与黑云母鱼分布在以云母、石英成分为主的基质中, 指示逆时针(左行)剪切运动方向; 石榴子石残斑可见 S_1 面理, 基质成分定向形成 S_2 面理; (d) 花岗片麻岩中斜长石斑晶受左行剪切作用发生高温塑性变形(S_2), 内部石英颗粒伴随斜长石塑性变形而发生定向拉长(S_1); (e) 可见云母、石英颗粒以及蠕英石, 蠕英石位于颗粒边界附近的斜长石一侧; (f) 阴极发光照片显示花岗片麻岩中蠕英石位于钾长石颗粒周围; (g) 石英发生动态重结晶, 产生波状消光、亚颗粒旋转及多晶集合体条带现象, 石英颗粒间隙充填电气石颗粒; (h) 花岗片麻岩中强烈细粒化的长英质基质与定向显著呈长条状分布的白云母集合体。Amp, 角闪石; Bt, 黑云母; Fsp, 长石; Grt, 石榴子石; Kfs, 钾长石; Mc, 云母; Mus, 白云母; My, 蠕英石; Sil, 矽线石; Tur, 电气石; Py, 黄铁矿; Pl, 斜长石; Qtz, 石英

叶理的锐夹角指示左行剪切(图4d). 石英在阴极下呈现暗色, 一些钾长石残斑(发蓝色阴极光)边缘为锯齿状或不规则状, 其周围普遍发育暗色阴极荧光的蠕英石以及绿色阴极光的斜长石取代钾长石反应残余, 明显呈现出残斑向基质转变过程. 相对富钠的斜长石交代钾长石, 并与蠕虫状的石英构成蠕英结构, 多出现在钾长石残斑边缘, 基质由发生细粒化并富钠的斜长石构成(图4e, 4f)(董彦龙等, 2019). 石英表现出塑性变形、波状消光、亚颗粒旋转等特征, 形成单晶和多晶集合体条带(图4g). 石英除呈矩形或多晶集合体条带状产出外, 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. 长英质矿物发生细粒化, 具有定向性(图4h). 糜棱岩化片岩中(图3h), 黑云母常常围绕一些残斑矿物如长石、角闪石或石榴子石等呈条带状产出. 一些白云母发育典型的云母鱼构造, 与旋转状的石榴子石残斑均显示逆时针(左行)剪切方向(图4c). 大理岩零星分布于上盘附近, 受中高温变质作用形成. 叠加低温变形的岩石中, 高温石英矩形条带或多晶集合体普遍遭受了进一步叠加变形, 即强力的细粒化. 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、绿泥石等层状硅酸盐矿物一起构成明显的微剪切条带, 即高应变局部化带(图4c).

4.2 拆离断层带的变形构造特征

下盘与上盘之间发育低角度断层, 即拆离断层, 整体呈弧形分布(图2a). 拆离断层带中断裂构造发育, 指示主拆离断层上、下盘的运动方向为下盘指向上盘. 花岗质糜棱岩、断层角砾岩、碎裂岩、断层泥构成较完整的拆离断层构造岩序列. 在下盘靠近拆离断层叠加有明显的低温脆-韧性转换的变形-变质作用. 断层面的断层擦痕或热擦痕线理是其中的典型代表(图5a, 5b). 由于断层两盘快速滑动摩擦生热, 断层面上未完全结晶的新生纤维状矿物(如绿泥石、云母等)常常形成断层擦痕. 在拆离断层附近发育的石英云母片岩片理化程度高, 片理倾向呈放射状, 指向上盘方向, 倾角 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$. 老君山东侧低角度正断层发育, 其断裂面倾向北北东至南东, 倾角 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ (图5a, 5d). 穹窿体西侧及西南侧的拆离断层带中, 部分发生糜棱岩化和片理化的灰岩中方解石透镜体指示上盘往西和北西方向滑动(图5c). 拆离断层带内靠近下盘发育

糜棱岩, 其糜棱面理也呈放射状倾向盖层方向, 倾角 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ (图2a).

老君山东部交址城附近靠近拆离断层下盘的糜棱岩表现出强烈的塑性变形特征, 长英质眼球状残斑发生旋转并产生拖尾(图5e), 指示上盘向东滑动的运动学方向. 在主拆离断层带发育有构造角砾岩, 碎裂组构造改造了先成岩石组构(图5f). 局部可见拆离断层面上发育的断层泥, 厚度较小. 断层带附近的矿化石英脉中发育绿柱石(图5g)和其他如锡、毒砂、黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿以及锡石等丰富的金属矿物. 在显微镜下可观测到糜棱岩中电气石和石英脉斜切糜棱面理, 长英质矿物、电气石和绿帘石等出现显著细粒化, 形成微剪切条带(图5h). 一些长石裂隙被细粒化的石英充填(图5k). 靠近盖层出露糜棱岩化灰岩, 组成矿物方解石(橘黄色阴极光)发生显著变形, 细粒化程度高且显著定向, 方解石残斑发生剪切变形后呈矿物鱼状(图5i). 半脆性到脆性的细粒化长英组分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(图5j, 5k). 新生成的退变质矿物, 如绿泥石和白云母等, 常常形成矿物集合体且定向分布在基质中和长石残斑周围, 共同构成旋转长石拖尾, 形成“ σ ”和“ δ ”型旋转残斑或S-C等剪切运动学组构(图5l), 指示区域东侧的上盘向北东或北东东方向运动.

4.3 盖层中的变形构造特征

片麻岩核周围的上盘以早古生代的寒武系与奥陶系地层为主, 部分为中生代沉积地层. 岩性为灰岩、泥灰岩、白云质灰岩、白云岩等. 层理发育, 内部多裂隙, 发育方解石脉体或透镜体(图6a).

上盘靠近下盘或拆离断层带而表现出由未变形向变形过渡的特征. 远离核部的灰岩层理发育, 未变形或发生弱变形. 靠近下盘发育顺层褶皱构造, 其轴面倾向下盘(图6b, 6c). 一些部位受挤压后节理发育, 岩石破碎. 在北、西侧可见岩层褶皱且破碎程度较高(图6c). 在西侧围绕下盘地带发育一系列中高角度正断层. 多数正断层面上发育热擦痕(图6d~6h), 灰岩中方解石自形程度高, 双晶纹发育, 未发生显著塑性变形(图6i), 而靠近断层镜面上的颗粒粒度极细, 定向较好(图6j). 部分断面上可见呈角砾状的方解石颗粒, 粒径大小不等(图6k). 穹窿体西侧断层倾向以北西、西及南西为主,

图5 (网络版彩图)老君山片麻岩穹窿拆离断层带中变形特征与晚期低温叠加变形-变质特征

(a) 北东侧上盘中发育的正断层系; (b) 北侧灰岩沿断裂面滑动形成近水平的方解石热擦痕; (c) 北侧盖层灰岩中发育的方解石透镜体, 指示逆时针(左行)剪切运动方向, 剪切方向为北东-南西向; (d) 东侧低角度拆离断层, 断层面上、下两盘分别为灰岩与糜棱岩、花岗片麻岩; (e) 拆离断层带靠近下盘出露花岗质糜棱岩, 其中的长英质旋转残斑指示逆时针剪切运动方向; (f) 断层角砾岩, 角砾成分为灰岩, 胶结物为方解石; (g) 南秧田钨矿区内与石英脉伴生的绿柱石; (h) 裂隙中充填电气石集合体, 细粒化长英质成分形成微剪切条带; (i) 灰岩碎裂岩阴极发光照片, 可见方解石的基质与残斑, 残斑中可见双晶纹, 基质粒度较细; (j) 花岗片麻岩中细粒化长英质集合体, 长石成分以钾长石为主, 斜长石次之, 存在少量电气石; (k) 阴极发光照片, 可见钾长石、斜长石和石英, 副矿物磷灰石; (l) 绿泥石化花岗片麻岩中长英质集合体定向并发生旋转, 白云母和绿泥石等新生矿物构成长英质残斑的拖尾。Ap, 磷灰石; Cal, 方解石; Chl, 绿泥石; Ep, 绿帘石; Kfs, 钾长石; Fsp, 长石; Mus, 白云母; Pl, 斜长石; Tur, 电气石; Qtz, 石英

少数倾向北东(图6c, 6d)。部分断裂面上可见热擦痕叠加现象(图6d), 按热擦痕产状可分为两组: 一组是倾伏角为低角度近水平的热擦痕(图6e), 另一组是与断裂

面产状相近的高角度热擦痕(图6f)。两组擦痕在露头上均有出露, 近水平产出的热擦痕明显比高角度热擦痕显著。

图 6 (网络版彩图)老君山片麻岩穹窿盖层变形构造特征

(a) 东侧盖层弱变形灰岩; (b) 北侧灰岩发育顺层褶皱; (c) 南西侧灰岩受挤压形成褶皱, 轴面倾向上盘方向, 岩石破碎; (d) 灰岩中出露的中高角度正断层滑动面, 断面上发育有两组擦痕线理; (e) 断裂面上发育的一组近水平的热擦痕; (f) 断裂面上发育的一组高角度热擦痕; (g) 中高角度断层, 发育擦痕线理; (h) 高角度断层, 在断层面上形成一组低角度至近水平的方解石热擦痕; (i) 盖层灰岩中方解石矿物粒度中等, 变形较弱; (j) 断层镜面上极其细粒的方解石颗粒; (k) 断层面上发育的碎裂结构, 方解石破碎并呈棱角状。Cal, 方解石

5 区域古应力场特征

构造应力场能够直接反映地质体所受外力作用的状态, 进而可以分析构造应力的方向及来源。现阶段主要是利用断层面及面上擦痕产状来反演应力场的应力状态(Delvaux等, 1997; Delvaux和Sperner, 2003; 袁芳

等, 2020)。老君山变质杂岩靠近拆离断层和上盘中发育大量的断层及面上擦痕, 我们主要对上盘、拆离断层与部分下盘出露的断层及擦痕产状进行了详细的测量与统计(图7, 网络版附表1, <http://earthcn.scichina.com>)。在盖层中发育的断层及擦痕具有几个显著特点。首先, 主体发育正断层, 且在同一个测量点上又发育产

状不同的断层, 倾向与倾角差异显著. 第二, 在不同测量点上发育产状相似的断层, 断裂面上擦痕产状也大体一致. 第三, 断层擦痕叠加作用显著, 即一个断裂面发育有两组或者两组以上的擦痕. 每组擦痕的发育程度不同, 考虑到后期的擦痕会不同程度地掩盖早期擦痕, 我们认为断裂面上最显著的一组擦痕应为最晚期形成. 将分组的产状数据(网络版附表1)输入Win_Tensor软件, 优化后将应力场图输出, 得到老君山片麻岩穹窿的应力场分布图(图7). 它反映出最大、中间及最小主压应力轴方位(σ_1 、 σ_2 、 σ_3)、应力性质和应力场方向(网络版附表2).

在老君山片麻岩穹窿东侧文山-麻栗坡断裂带的应力场方位中, 文-麻断裂带在南、北两侧具有不同的应力场方位. 北部形成近南北向挤压应力场(NE-1), 中南部形成NE-SW向挤压应力场(NE-2). 上盘西侧的断层及擦痕指示NE-SW向挤压(W-1、W-4)和NE-SW与NWW-SEE向伸展应力场(W-2、W-3), 相对断层分别倾向SW和SE. 擦痕产状存在近水平和高角度的两组倾伏角, 低角度倾伏角的擦痕线理较显著. 在西南侧出现近南北向的挤压应力场(SW-8), 后期发生偏转(SW-4). 除上述这些挤压应力场外, 整个盖层是以伸展应力场为主. 盖层北侧正断层及擦痕指示NNE-SSW向的伸展应力场方位(N-1). 西北侧的应力场方位由东向西发生转变, 由NW-SE向逐渐转变为近东西向伸展应力场方位(NW-1、NW-3、NW-4、NW-2). 西南侧的伸展应力场方位由西向东按顺时针方向逐渐从NW-SE向转变为近东西向(SW-1、SW-2、SW-3、SW-6、SW-7、SW-5).

因此, 本文根据老君山片麻岩穹窿的上盘及部分靠近拆离断层的断层及擦痕产状反演出了该区域的应力场方位. 主体是以近南北向伸展应力场为主, 并存在先存的挤压应力场. 整体应力场方向呈现出由下盘的穹窿核部向四周放射或旋转性分布特征.

6 区域变形条件分析: 变形矿物EBSD晶格优选定向(LPO)

为了获得区域岩石变形环境, 本文分别选取了斜长角闪岩、花岗质糜棱岩和大理岩样品(图8), 对其中发生变形的矿物(角闪石、方解石和石英)进行EBSD组构测试, 确定矿物晶格优选方位和变形程度, 并获得

其变形条件.

6.1 角闪石晶格优选定向

分别选取了三件斜长角闪岩样品进行角闪石EBSD组构分析. 样品a(LJ1731-7)为中细粒斜长角闪岩, 角闪石呈细粒条带状, 解理少见且长轴定向. 样品b、c(LJ1737-2、LJ1767-1)中角闪石与斜长石呈相对粗粒条带状分布, 角闪石沿长轴强烈定向, 具有不同解理和形态, 可见有机双晶(图4b). 角闪石EBSD组构分析结果见图9a-9c. LJ1731-7中的角闪石<001>轴在X轴(平行线理)方向形成主极密, 在XY面上形成次级小圆环带; (100)和(110)分别在Z轴附近形成主极密, 在YZ面上形成次级小圆环带, 其中(100)极密强度高于(110); (010)在Y轴附近形成主极密, 在YZ面呈拉长状(图9a). 样品LJ1737-2中的角闪石组构极密与LJ1731-7非常相似, 即<001>轴在靠近X轴(平行线理)方向形成主极密, 在XY面上形成次级小圆环带; (100)和(110)分别在靠近Z轴附近形成主极密, 指示左行运动学方向, 在YZ面上形成次级小圆环带, 其中(100)极密强度高于(110); (010)在Y轴附近形成主极密, 在靠近YZ面呈拉长状(图9b). 样品LJ1767-1中的角闪石<001>轴在XY面(平行线理)方向形成明显的极密环带; (100)和(110)分别在靠近Z轴附近形成主极密, 其中(100)极密强度高于(110); (010)在靠近YZ面形成几个次级极密(图9c). 三个样品的角闪石颗粒EBSD反极图均出现了相似的组构模式特征, 在X0//001, Y0//010, Z0//100都表现出显著的组构强度, 反极密图的组构特征与极密图组构特征相一致. 这三个样品中的角闪石发育主滑移系为(100)<001>, 次级滑移系为(010)和(110)<001>, 指示高温(即角闪岩相)塑性变形环境(曹淑云等, 2007; Cao等, 2010).

6.2 方解石晶格优选定向

本文选取靠近拆离断层附近两件变形程度不一的灰岩样品进行方解石EBSD组构测试. 第一类方解石变形相对较弱(图5i); 另一类方解石发生显著变形, 细粒化的集合体定向性显著(图6i). EBSD组构测试结果见图9d和9e. 样品LJ1703-1中方解石c-<0001>在Z轴形成极密, r(10-14)与e(01-18)在YZ面出现较弱极密; 反极密图显示在Z轴出现极密, 与极密图结果一致. 样品LJ1754-1的方解石变形程度较强, 其中方解石c-<0001>在Z轴和X轴上形成极密, 显示平行叶理面(XY

图7 (网络版彩图)老君山片麻岩穹隆拆离断层附近和上盘断层的应力场分布图

采用等面积下半球赤平投影。白色、红色以及绿色箭头指示主压应力方位。黑色实心圆点代表实际测量点, 粉色实心圆点及箭头代表模拟位置及方向; 红色圆圈、三角形和方框及其中心的实心圆分别代表应力轴 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 的投影方位。彩色字体及圆点为测量点所在位置

面)的简单大圆环带, a(11–20)形成较弱的极密, r(10–14)与f(01–12)形成小圆环带, e(01–18)形成大圆环带; 反极密图显示在Z轴形成主极密, X轴形成次级极密。

6.3 石英晶格优选定向

本文选取下盘和拆离断层带的14件花岗片麻岩和花岗质糜棱岩样品进行显微构造观察和EBSD组构测

试分析。其中, 样品f~i和样品m~q都来自下盘, 样品j~l靠近拆离断层系(图8)。对石英进行晶格优选定向分析的结果见图10。

样品f和g为发生糜棱岩化的细粒化花岗片麻岩, 其中石英因动态重结晶产生颗粒边界迁移, 细粒化程度高, 具有强烈的定向性。石英c- $\langle 0001 \rangle$ 在X轴附近(即平行线理方向)形成主极密, m(10–10)、a(11–20)以及r

图 8 (网络版彩图)石英、角闪石、方解石EBSD组构分析结果位置图

蓝色实心圆点代表采样地点. 外围为EBSD组构图, (a)~(q)分别是角闪石<001>轴((a)~(c))以及方解石c<0001>轴((d)~(e))和石英c<0001>轴((f)~(q))的极密图

(10-11)形成较弱极密; 反极密图中在X轴形成极密, 其主导滑移系为柱面<c>滑移. 石英组构环带张开角分别为70°和78°, 显示明显的高温变形(图10f, 10g).

样品i~l为二云母花岗质糜棱岩, 石英、云母等矿物发生塑性变形和定向排列, 部分云母退变质形成绿泥石, 长石中出现蠕英结构, 石英出现多晶集合体条

带. 石英c<0001>在靠近Y轴形成主极密, 在Z轴与Y轴之间形成较弱次级极密, m(10-10)和a(11-20)形成弱极密, r(10-11)形成大圆环带极密; 反极密图在X轴形成主极密. 该类岩石中的石英以柱面<a>为主导滑移系, 菱面<a>与底面<a>为次级滑移系, 张开角为66°, 表明其经历高温变形后叠加中低温变形(图10). 此外, 石英

图9 (网络版彩图)角闪石与方解石EBSD组构极密图与反极密图

采用下半球等面积赤平投影。X0Y0, 面理; X0, 线理; Min和Max分别是密度最小值和最大值; 反极密图分别为角闪石和方解石在X0、Y0、Z0三个轴的晶体取向分布。角闪石: (a) LJ1731-7, (b) LJ1737-2, (c) LJ1767-1。方解石: (d) LJ1703-1, (e) LJ1745-1

还出现显著的塑性变形、波状消光以及多晶集合体条带和颗粒边界迁移重结晶。石英c-<0001>在Y轴形成主极密, m(10-10)、a(11-20)形成大圆环带, r(10-11)形成较弱极密; 反极密图显示在Y轴形成主极密。主导滑移系为柱面<a>滑移, 其中i和l的张开角分别为64°和57°, 显示中高温变形(图10i~10l)。

在拆离断层带内的花岗质糜棱岩中, 部分长石发生显著蚀变, 出现旋转残斑并产生细粒化, 云母多定向分布, 石英出现多晶集合体条带。石英c-<0001>在Y

轴和Y轴与Z轴之间形成主极密, m(10-10)、a(11-20)形成大圆环带, r(10-11)形成较弱极密; 反极密图显示在Y轴形成主极密。主导滑移系为柱面<a>滑移, 同时具有菱面<a>滑移特征, 显示中高温变形(图9m~9n)。同时, 石英出现多晶集合体条带, 长石出现显著细粒化, 部分云母蚀变成绿泥石。石英c-<0001>在Z轴和Z轴与Y轴之间形成主极密, m(10-10)、a(11-20)和r(10-11)均形成弱极密; 反极密图显示在Z轴形成主极密, 主导滑移系为菱面<a>滑移叠加底面<a>滑移, 其张开角

图 10 (网络版彩图)石英EBSD组构的极密图与反极密图

采用下半球等面积赤平投影。X0Y0, 面理; X0, 线理; Min和Max分别是密度最小值和最大值。反极密图分别为石英在X0、Z0、Y0三个轴的晶体取向分布。(f) LJ1928-10, (g) LJ1713-1, 细粒化花岗片麻岩。(h) LJ1780-2, (i) LJ1733-11, (j) LJ17103-1, (k) LJ1761-1, (l) LJ1760-1, 二云母花岗质糜棱岩。(m) LJ1816-2, (n) LJ1806-2, (o) LJ1806-7, 花岗质糜棱岩。(p) LJ1823-2, (q) LJ1828-6, 花岗片麻岩

为 46° , 指示中高温变形叠加明显的低温变形(图9o)。

在南温河断裂附近的花岗片麻岩中, 石英和云母矿物产生显著的塑性变形与波状消光, 定向显著, 长石则以机械破裂为主。石英 $c\text{-}\langle 0001 \rangle$ 在Z轴附近(向左旋转的不对称组构)形成主极密, $m(10\text{-}10)$ 、 $a(11\text{-}20)$ 形成小圆环带, $r(10\text{-}11)$ 形成弱极密; 主导滑移系为底面 $\langle a \rangle$ 滑移, 其张开角为 39° , 显示低温变形(图9p)。部分花岗片麻岩晚期发育大量的电气石矿物与脉体, 斜切糜棱面理, 石英则出现显著的波状消光与细粒化, 可见膨凸成核与亚颗粒旋转动态重结晶。石英 $c\text{-}\langle 0001 \rangle$ 在Z轴附近形成主极密, $m(10\text{-}10)$ 、 $a(11\text{-}20)$ 和 $r(10\text{-}11)$ 形成较弱极密; 反极密图显示在Z轴上形成主极密。主导滑移系为底面 $\langle a \rangle$ 滑移, 显示明显的低温变形(图10q)。

综上所述, 测试样品中石英EBSD组构特征与其对应的显微构造现象相吻合, 表明研究区的下盘岩石经历了从高温到低温的变形。依据变形温度的高低可大致区分出早期高温变形(图10f~10g)、中期中高温变形(图10i~10l)、稍晚期中低温变形(图10m~10n)和晚期低温变形(图10h, 10p~10q)。高温变形样品集中在下盘核部, 中高温变形样品集中在下盘及拆离断层附近, 中低温变形样品集中在拆离断层带附近的上盘, 低温变形主要叠加在中高温变形之上(图8, 图10)。

7 LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学初步研究

7.1 测年样品特征

本文选取下盘出露的四个样品进行LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学测试(图2a)(网络版附表3), 分别为斜长角闪岩(LJ1773-9A)和三个花岗片麻岩(LJ1778-2、LJ1829-1A、LJ1829-2A)。其中, 样品LJ1773-9A采样位置靠近老君山花岗岩体南侧, 在露头上呈灰绿色, 呈似层状或透镜状与花岗片麻岩相接触, 出露厚度约3m, 产状为 $335^\circ \angle 38^\circ$ (图3b)。显微构造观察显示其具有显著的定向变形特征(图4b)。样品LJ1778-2采样位置位于南温河沿岸, 呈灰黑色, 片麻理与矿物拉伸线理发育, 片麻理产状为 $15^\circ \angle 21^\circ$ 。后期大量的电气石和长英质脉体侵入其中(图3g), 可见有绿泥石。样品LJ1829-1A和LJ1829-2A采样位置靠近洒西村。野外露头可见上部为条痕状花岗片麻岩, 下部为花岗片麻岩, 两者界线清晰(图3c), 片麻理产状为 $78^\circ \angle 40^\circ$, 显微构造显

示塑性变形特征。

7.2 锆石特征

锆石阴极发光图像显示, 大部分锆石晶形为自形的长柱状, 多数锆石长轴 $70\sim 200\mu\text{m}$, 短轴为 $30\sim 80\mu\text{m}$ 。样品中大多数为岩浆锆石, 环带与核边结构明显, Th/U范围 $0.05\sim 0.59$ (图11a, 11c~11e)。除多数的岩浆锆石外, 样品LJ1773-9A-2和LJ1829-2A中还存在典型的变质核和增生边, 锆石的Th/U范围变化较大, $0.01\sim 2.91$ (图11), 被认为与变质或深熔相关(Carson等, 2002; Kelly和Harley, 2005; 雷玮琰等, 2013; Yakymchuk等, 2018; Tong等, 2019; 李超等, 2020)。

7.3 测年结果

斜长角闪岩(LJ1773-9A)获得了两期锆石 $^{206}\text{Pb}\text{-}^{238}\text{U}$ 谐和年龄, 分别为 $(441.3\pm 2.2)\text{Ma}$ (LJ1773-9A-1)和 $(241.5\pm 1.4)\text{Ma}$ (LJ1773-9A-2, 具有明显的变质锆石边特征)。来自南温河附近的花岗片麻岩(LJ1778-2)获得锆石 $^{206}\text{Pb}\text{-}^{238}\text{U}$ 谐和年龄值为 $(445.1\pm 2.4)\text{Ma}$; 花岗片麻岩(LJ1829-1A)与条痕状花岗片麻岩(LJ1829-2A)获得锆石 $^{206}\text{Pb}\text{-}^{238}\text{U}$ 谐和年龄值分别为 $(420.7\pm 1.0)\text{Ma}$ 和 $(427.0\pm 1.2)\text{Ma}$ (图11d, 11e)(网络版附表3)。从测年结果看, 斜长角闪岩中获得 $(441.3\pm 2.2)\text{Ma}$ 年龄数据的锆石均为岩浆型特征的锆石, 其代表斜长角闪岩原岩的形成时代。

因此, 下盘核部出露的斜长角闪岩与花岗片麻岩主体形成时代为 $(445.1\pm 2.4)\sim (420.7\pm 1.0)\text{Ma}$, 两者为同一时期形成, 这一阶段是老君山地区斜长角闪岩和花岗片麻岩原岩的主形成期。在斜长角闪岩中获得的 $(241.5\pm 1.4)\text{Ma}$ 年龄为变质锆石年龄, 代表斜长角闪岩发生变质的年龄。结合花岗片麻岩(LJ1829-2A)中存在的单个锆石年龄为 $(232.8\pm 1.8)\text{Ma}$, 两者的变质年龄范围为 $(241.5\pm 1.4)\sim (232.8\pm 1.8)\text{Ma}$ 。同时在样品LJ1778-2和LJ1829-2A中分别存在 $(821.4\pm 8.1)\text{Ma}$ 和 $(729.4\pm 14.8)\text{Ma}$ 的锆石核部年龄, 表明研究区域内存在早新元古代的岩浆活动。

8 讨论

8.1 区域片麻岩穹窿构造和应力特征

滇东南老君山在地貌形态上呈现近似浑圆状, 表

图 11 (网络版彩图)老君山片麻岩穹窿中斜长角闪岩与花岗片麻岩锆石阴极图像、打点位置及测年结果
 (a)~(b)为斜长角闪岩; (c)~(e)为花岗片麻岩

明其具有穹窿状的形态. 它由三个主要的构造单元组成, 分别是以深变质花岗片麻岩(包括混合岩)及侵入花岗岩为主体的核部/下盘, 以发育脆-韧性转换变形的拆离断层系和变形较弱至未变形的沉积盖层/上盘, 并呈现出变质核杂岩构造特征. 深变质岩石矿物组合主要为矽线石+石榴子石+角闪石+斜长石+黑云母, 且岩石的糜棱面理和线理发育, 呈现出明显的流动构造特征. 在下盘核部出露的花岗质糜棱岩、片麻岩和云母片岩均呈现出高温晶质塑性变形的构造特征. 下盘核部发育有近直立的面理, 而低倾角面理多分布在上盘边部(图2). 无论是花岗片麻岩还是片岩的面理、线理产状主体均呈现出由下盘向上盘(呈弧形状向四周盖层)倾斜的分布规律, 倾角 $8^{\circ}\sim 80^{\circ}$. 拆离断层带发育指向上盘的剪切运动学标志, 即盖层主体呈近南北向运动, 说明该区域经历了一次明显的以南北向为主的简单剪切变形; 但又呈现出围绕下盘呈弧形状向北东、北、北西及西向运动, 呈现出左行旋扭的运动特征. 此外, 花岗片麻岩中的断层还发育有非透入性且近水平的擦痕, 说明下盘岩石单元叠加了一次水平走滑运动.

我们对盖层及靠近拆离断层的断层面及面上热擦痕反演出的应力场方位进行分析, 认为具有以下三个方面的特征. 第一个明显特征体现在老君山地区存在挤压与伸展应力为主的两种不同性质的应力场. 在挤压应力为主的应力场中, 最大主应力轴 σ_1 的倾伏角为中低角度($<30^{\circ}$); 在伸展应力为主的应力场中, 最大主应力轴 σ_1 的倾伏角为中高角度($>30^{\circ}$). 第二个明显特征是形成不同性质应力场的动力来源和方向不同. 由于受穹窿构造剥露的影响, 穹窿东侧的文山-麻栗坡断裂带在南北两侧分别呈现出近南北向和NE-SW向挤压的应力场. 西侧的应力场方位明显存在两组断层及擦痕, 推测这两组断层先经历NE-SW向挤压, 后发生近NNW-SSE向伸展. 西南侧近南北向和发生偏转后近东西向的挤压应力场可能与区域内近N-S至NE-SW向的挤压作用相关(Yan等, 2006; 林伟等, 2011). 而伸展构造应力场则可能与研究区域内晚期伸展作用和左行旋扭作用相关(李东旭和许顺山, 2000; Roger等, 2000; 郭利果, 2006; 刘玉平等, 2007b). 野外露头上也发现, 北、西侧上盘内多数正断层面上发育有两组近垂直的断层热擦痕, 其中一组擦痕近水平, 这与下盘花岗片麻岩中发育的近水平擦痕具有相似的成因. 这些现象反

映老君山片麻岩穹窿晚期剥露阶段的应力场方位. 第三个主要特征是应力场围绕区域的下盘分别在E、NE、N、NW、W和SW方向出现规律性方位变化. 从上盘东南沿逆时针方向, 伸展应力场方向由东侧近东西向逐渐过渡到西南侧的近东西向, 均是由下盘指向盖层, 呈现放射状形态, 反映老君山片麻岩穹窿形成和剥露的最终构造形态特征.

所有这些变形特征和运动学分析结果都表明, 老君山变质杂岩经历了区域深变质与高温变形, 也是该地区片麻岩和穹窿状结构形成的主要原因, 并导致区域内呈现出明显的透入性变形与变质作用. 区域后期叠加伸展拆离和左行旋扭作用导致下盘岩石单元的整体伸展和剥露.

8.2 早期高温变形构造与叠加低温脆-韧性转换

野外宏观、显微构造及变形组构特征均表明, 老君山片麻岩穹窿经历了明显的高温晶质塑性变形以及低温叠加脆-韧性转换变形过程. 这些片麻岩和糜棱岩中保留有典型的高温矿物组合和塑性变形构造特征. 其中岩石中的矿物如长石、角闪石、石英以及云母等经历了动态重结晶, 即高温晶质塑性变形. 糜棱岩中发育矿物拉伸线理, 并形成典型的L型和S-L型组构. 细粒化、拉长定向的长石和角闪石、石英的单晶及多晶集合体条带及云母的强烈细粒化表明, 这些矿物经历了高温塑性变形. 前人关于老君山地区的变形矿物(角闪石、石英、方解石)鲜有报道. 变质岩中的变形矿物的 c 轴组构可以揭示出多期变形的矿物晶体优选取向. 其中, 角闪石EBSD组构出现的(100) $<001>$ 滑移系常见于中、下地壳角闪质岩石(Kitamura, 2006; 曹淑云等, 2007; Tatham等, 2008; McNamara等, 2012; Ji等, 2013; Getsinger和Hirth, 2014). 角闪石出现(100) $<001>$ 和(110) $<001>$ 滑移系代表显著的高温变形条件(Cao等, 2010; Ko和Jung, 2015), 是角闪石颗粒粒度从粗粒向细粒转变的重要机制之一(曹淑云等, 2009; Cao等, 2010; 刘建华等, 2019). 多数研究表明石英 c 轴存在四种主要的变形滑移系, 分别是以位错蠕变为主的底面 $<a>$ 滑移系, $\{0001\}<110>$; 菱面 $<a>$ 滑移系, $\{101\}<110>$; 柱面 $<a>$ 滑移系, $\{100\}<110>$; 柱面 $<c>$ 滑移系, $\{100\}<0001>$ (Stipp等, 2002; 夏浩然和刘俊来, 2011). 已有大量的研究表明, 石英矿物的滑移系发育对温度敏感, 且 $c<0001>$ 轴取向与温度高低存在有直接成因关系

(Toy等, 2008; Cao等, 2011a; Faghih和Soleimani, 2015; Chen等, 2017). 柱面<a>滑移系常见于高级变质岩类矿物中, 底面<a>滑移系则多出现在低级变质岩或叠加低级变质岩中(Stipp等, 2002; Toy等, 2008; Cao等, 2010, 2011a, 2011b). 老君山变质杂岩中的糜棱岩化片麻岩及花岗质岩石中的EBSD组构结果表明, 石英c轴组构以柱面<c>和柱面<a>滑移系为主(图10f, 10g), 变形温度为700~600℃(Stipp等, 2002; Cao等, 2013). 在上盘与下盘之间发育的拆离断层带内的糜棱岩中的石英出现柱面<a>为主和菱面<a>的中高温滑移系(图10i~10l). 这与颜丹平等(2005)认为老君山-斋江变质杂岩的上、下盘发育韧性剪切带和糜棱岩代表了一期区域伸展相一致.

老君山变质杂岩体的下盘岩石不仅经历高温变形作用, 伴随穹窿构造不断剥露还叠加了脆-韧性转换构造. 此阶段下盘出露的花岗片麻岩和糜棱岩中发育大量断层和断层面的热擦痕线理. 这些新生长的矿物包括石英、方解石、白云母和绿泥石等, 它们或充填长石裂隙, 或围绕残斑周围, 或构成残斑拖尾, 形成典型的“σ”和“δ”型旋转斑. 绿泥石集合体沿长石残斑边缘或裂隙发生旋转、拉长, 呈现出细粒化的绿泥石具有塑性流动特征. 绿泥石与强烈塑性变形的石英和云母共存, 表明区域经历了韧-脆性转换下的叠加退变质-变形(图5j, 5k). 在区域变质杂岩剥露过程中, 流体作用强烈, 其中在变形过程中, 常常可见到钾长石被钠长石置换. 不规整的钠长石颗粒边界总是凸向钾长石, 形成似被吞噬的呈港湾状的钾长石颗粒边界, 并伴随弱相新生矿物如绿泥石、白云母、石英等的出现(程雪梅等, 2018). 上述这些现象都是热液流体作用的直接证据. 因此, 从下盘岩石单元的角闪石、石英和方解石EBSD组构可以看出老君山片麻岩穹窿经历显著的由高温向低温变形的特征(图8~10). 例如石英叠加出现相对低温晶质塑性变形特征, 如波状消光、不均匀消光、膨凸成核以及亚颗粒旋转重结晶等(图4g), 石英c轴组构出现柱面<a>和菱面<a>滑移系叠加低温(450~350℃)底面<a>滑移系(图10h)(Takashita, 1996; Toy等, 2008; 夏浩然和刘俊来, 2011). 在拆离断层带附近的灰岩和大理岩中, 方解石c轴组构显示出以(0001)<11-20>滑移系为代表的高温变形和双晶中(-1018)<11-20>滑移系为代表的低温变形, 但因为(0001)极密大于(-1018), (0001)<11-20>滑移系是强应

变剪切动态重结晶的主要变形机制. 本文中方解石c轴组构为(0001)<11-20>, 同时叠加低温组构(-1018)<11-20>, 这可以解释为在剥露过程中形成的组构(Cao等, 2013). 上述这些结果表明, 老君山变质杂岩在剥露过程中经历了显著的低温叠加变形-变质作用, 同时流体活动强烈.

8.3 片麻岩穹窿的形成演化及剥露过程

前人的测年数据和我们最新的年龄数据表明, 滇东南老君山地区经历了从元古代到新生代漫长的构造演化阶段(Zheng等, 2013). 已有数据显示, 猛硐岩群中石英角闪斜长片麻岩获得一部分约1.83Ga的残留锆石年龄, 表明该区域存在古元古代结晶基底, 可能代表华夏地块形成的最老时限(刘玉平等, 2006; 郭利果, 2006). 同时还存在829~761Ma的锆石U-Pb年龄, 指示研究区存在新元古代岩浆活动, 可能与新元古代罗迪尼亚超大陆裂解过程中的岩浆活动相关. 有学者认为, 该时间段大致对应新元古代康滇裂谷盆地开启的时间, 此时研究区可能位于南华裂谷与康滇裂谷交接部位(刘玉平等, 2006; 卓皆文等, 2013; 江新胜等, 2020). 本文样品LJ1829-2A中(729.4±14.8)Ma和LJ1778-2中(821.4±8.1)Ma的锆石U-Pb年龄可能为伸展背景下岩浆活动的产物(图11c, 11e). 随着裂谷发育, 在寒武纪沉积一套泥质条带灰岩、白云岩和粉砂质泥岩(郭利果, 2006)(图2a, 2b).

老君山-斋江片麻岩穹窿中广泛分布的花岗片麻岩原岩为加里东期花岗岩, 其主体形成年代为440~420Ma(图12a, 12b)(Roger等, 2000; Yan等, 2003, 2006; Maluski等, 2001; 郭利果, 2006; Carter和Clift, 2008; 王丹丹等, 2015; Zhou等, 2017). 此阶段扬子与华夏微陆块之间的古缝合带发生构造伸展形成张裂造山带(Zheng等, 2013; Zheng和Chen, 2017), 老君山地区可能代表华南早古生代伸展造山带的最西端(Roger等, 2000; 刘玉平等, 2006; Yan等, 2006; 黄孔文, 2013). 本文获得的花岗片麻岩的岩浆锆石U-Pb年龄集中在440~420Ma(图11), 也有研究认为老君山地区存在两期(王丹丹等, 2015)或持续性加里东期岩浆侵入活动, 即西北岩体侵入较早, 东南较晚. 我们认为445~420Ma应该为老君山片麻岩穹窿核部岩石单元(南捞片麻岩和南温河片麻岩)的主形成期(图13a). 由于扬子与华夏微陆块之间的古缝合带在加里东期发生大陆张裂再活

图 12 (网络版彩图)老君山-斋江片麻岩穹窿形成演化过程

(a) 年代学统计分布图, 包括 U-Pb(Zr), K/Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Mus, Bt, Kfs), Rb/Sr, Sm/Nd 同位素和 U/Th/He 裂变径迹(FT)的年代学数据(Ren, 1996; 冯明刚等, 2000; 王学焜, 1994; 1:5 万麻栗坡、都龙幅区域地质调查报告, 1999; 曾志刚等, 1999; Roger 等, 2000; Carter 和 Clift, 2008; Maluski 等, 2001; Gilley 等, 2003; 颜丹平等, 2005; Yan 等, 2006; 刘玉平等, 2006, 2007a, 2007b; 郭利果, 2006; 王丹丹等, 2015; 韦海波, 2015; Zhou 等, 2017); (b) 年代学统计柱状图; (c) 温度-时间(T-t)曲线图, 据 Roger 等(2000)修改

化, 在约410Ma, 区域内存在一次沉积间断(图12c)(Roger等, 2000). 加里东期构造运动之后, 老君山地区沉积泥盆系和石炭系的一套碳酸盐岩台地的地层. 在研究区东北方向发现的八布蛇绿岩的Sm/Nd等时线年龄为(328.3±9.34)Ma, 约束这套地层的形成时代早于石炭纪晚期, 此阶段主要以接受沉积为主(吴根耀, 2001).

约230Ma, 华南与印支陆块发生近南北向的相互碰撞(吴根耀, 2001; Gilley等, 2003; Yan等, 2006;

Carter和Clift, 2008). 结合下盘斜长角闪岩中角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果(237±5)Ma(颜丹平等, 2005)(图12), 变质锆石U-Pb年龄(220±1)Ma(韦海波, 2015), 本文对斜长角闪岩中变质锆石的U-Pb测年结果(241.5±1.4)Ma, 以及本文中花岗片麻岩LJ1829-2A中出现的(232.8±1.8)Ma的锆石变质边年龄, 可将印支期构造高温变质与高温缩短变形的时限约束在241~220Ma. 利用下盘出露的斜长角闪岩中斜长石-角闪石矿物, 获得

图 13 (网络版彩图)老君山片麻岩穹窿形成与剥露模式图

(a) 在NE-SW向伸展作用下, 加里东期岩体侵位; (b) 在NE-SW向挤压作用下, 新元古代变质岩组向北东向逆冲, 老君山片麻岩形成, 沉积盖层受挤压形成褶皱; (c) 在NE-SW向伸展作用下, 拆离断层开始形成, 沉积盖层中发育阶梯状正断层; (d) 持续的伸展作用导致燕山期花岗岩体侵位; (e) 受红河-哀牢山走滑断裂控制, 产生左行旋扭作用, 形成弧形状拆离断层, 老君山片麻岩穹窿剥露至地表

变质温压范围为685~596℃、0.98~0.80GPa(谭洪旗和刘玉平, 2017), 或709~624℃、0.72~0.63GPa(刘忠等, 2018), 表明老君山片麻岩穹窿的下盘岩石至少经历了角闪岩相也许到麻粒岩相的变质作用(Zheng和Chen, 2017)(图12c). 因此, 在印支期(241~220Ma), 滇东南老君山地区经历了一次十分显著的构造运动, 即由碰撞作用导致区域内形成透入性高级变质与高温缩短变形(图9a~9c、图10f~10g、图13b), 之后叠加伸展拆离剥露(图13c).

Yan等(2006)认为印支期至燕山早期(237~144Ma), 由NE-SW向挤压作用形成老君山主体的花岗片麻岩, 并叠加发育S₂面理. 燕山中晚期(144~80Ma), 在太平洋板块与欧亚板块的相互作用下发生板内俯冲, 导致中下地壳部分熔融, 后经岩浆结晶分异上涌形成老君山燕山期的侵入岩体(刘玉平等, 2007a; 冯佳睿等, 2010), 岩体的侵入可进一步促进穹窿剥露(图13d). 燕山期岩浆带来丰富的成矿热液是稀有多金属、绿柱石等矿产形成的重要物质来源. 燕山中晚期的岩浆活动时间为95~80Ma. 新生代早期, 欧亚板块与印度洋板块相互挤压碰撞, 造成青藏高原东南缘红河-哀牢山走滑断裂带持续运动(曹淑云等, 2009; Cao等, 2011b; Liu等, 2012, 2019). 研究区域盖层内发育有两期擦痕, 且水平擦痕较显著, 表明该区域可能受左行近水平的旋扭作用影响而持续剥露(图13e). 其中, 斋江片麻岩中锆石和磷灰石裂变径迹(FT)年龄分别为77.5和33.6Ma(Roger等, 2000), 表明该区域经历了缓慢的剥露过程. 相邻样品中磷灰石裂变径迹年龄约为21Ma, 说明片麻岩穹窿此时剥露至地表(Maluski等, 2001).

9 结论

(1) 滇东南老君山地区具有片麻岩穹窿状形态特征, 并发育变质核杂岩的三个主要构造单元, 即以深变质-变形岩石(花岗片麻岩、混合岩为主)及侵入花岗岩为主体的下盘/核部, 弧形状的拆离断层系和上盘/沉积盖层.

(2) 老君山穹窿核部片麻岩岩石单元的主形成期为445~420Ma, 为加里东期扬子与华夏微陆块之间的古缝合带发生大陆张裂形成. 在斜长角闪岩和片麻岩中获得(241.5±1.4)~(232.8±1.8)Ma的锆石变质年龄, 代表该地区印支期至少达到高角闪岩乃至麻粒岩相变质

峰期时限.

(3) 老君山片麻岩穹窿经历了明显的高温晶质塑性变形以及低温叠加脆-韧性转换变形, 并伴随强烈的流体作用. 构造应力场反演表明, 老君山存在以挤压与伸展应力为主的两种应力场, 表明印支期碰撞挤压导致区域内的核部岩石发生透入性高级变质与高温缩短变形, 并经历了晚期叠加伸展拆离过程.

致谢 感谢执行主编郑永飞教授和两位匿名审稿人的宝贵意见.

参考文献

- 安保华. 1990. 老君山岩体特征、成因及其找矿意义探讨. 西南矿产地质, 4: 30~35
- 毕珉烽. 2015. 滇东南麻栗坡一带中生代构造变形及其地质意义. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1~122
- 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(北京). 1~104
- 曹淑云, 刘俊来, 胡玲. 2007. 角闪石高温脆-韧性转变变形的显微与亚微构造证据——以滇西点苍山深变质剪切糜棱岩为例. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 1004~1013
- 曹淑云, 刘俊来, Leiss B, Vollbrecht A, 邹运鑫, 赵春强. 2009. 哀牢山-红河剪切带左行走滑作用起始时间约束——点苍山高温糜棱岩的显微构造与热年代学证据. 地质学报, 83: 1388~1400
- 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
- 董云鹏, 朱炳泉. 1999. 滇东南建水岛弧型枕状熔岩及其对华南古特提斯的制约. 科学通报, 44: 2323~2328
- 董彦龙, 曹淑云, 程雪梅, 刘俊来, 曹汉琛. 2019. 高黎贡剪切带变形花岗质岩石中的长石细粒化和岩石流动特性. 中国科学: 地球科学, 49: 1372~1393
- 方烨. 2018. 滇东南麻栗坡老君山晚白垩世岩体的隆升剥露历史及其意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1~69
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 周振华, 杨宗喜. 2010. 云南瓦渣钨矿区老君山花岗岩体的SHRIMP锆石U-Pb定年、地球化学特征及成因探讨. 岩石学报, 26: 845~857
- 冯佳睿. 2011. 云南麻栗坡南秧田钨矿成矿流体特征及成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院. 1~133
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 李超. 2011a. 滇东南老君山地区印支期成矿事件初探——以新寨锡矿床和南秧田钨矿床为例. 矿床地质, 30: 57~73
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 李超. 2011b. 滇东南老君山南秧田钨矿床的成矿流体和成矿作用. 矿床地质, 30: 404~419

- 冯明刚, 张世涛, 吕伟. 2000. 中国祖母绿矿床特征及其找矿方向. 云南地质, 19: 37–42
- 郭利果. 2006. 滇东南老君山变质核杂岩地球化学和年代学初步研究. 硕士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所. 1–120
- 胡荣荣. 2008. 云南麻栗坡祖母绿矿床成矿地质背景及成矿模式研究. 硕士学位论文. 昆明: 昆明理工大学. 1–82
- 黄孔文. 2013. 滇东南老君山地区南捞片麻岩地球化学和年代学及其构造意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1–64
- 黄文清. 2014. 云南麻栗坡祖母绿矿床的矿物学与流体包裹体研究. 硕士学位论文. 南京: 南京大学. 1–78
- 黄文清, 水汀, 倪培. 2017. 云南麻栗坡祖母绿的流体包裹体研究. 矿物学报, 37: 75–83
- 江新胜, 崔晓庄, 卓皆文, 江卓斐. 2020. 华南扬子陆块西缘新元古代康滇裂谷盆地开启时间新证据. 沉积与特提斯地质, 40: 31–37
- 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展. 地学前缘, 20: 273–284
- 李宝龙, 赵磊. 2014. 滇东南老君山锡钨多金属矿区变质岩系锆石U-Pb年代学及其地质意义. 矿床地质(增刊), 33: 213–214
- 李超, 全来喜, 黄小龙, 刘兆, 仲正. 2020. 粤西云开地块高州钙硅酸盐麻粒岩的变质P-T历史及其构造意义. 大地构造与成矿学, 44: 1172–1189
- 李东旭, 许顺山. 2000. 变质核杂岩的旋扭成因——滇东南老君山变质核杂岩的构造解析. 地质论评, 46: 113–120
- 李进文, 裴荣富, 王永磊, 余宏全, 丰成友, 郭志军, 王浩琳, 徐可. 2013. 云南都龙锡锌矿区同位素年代学研究. 矿床地质, 32: 768–782
- 林伟, Faure M, Lepvrier C, 陈泽超, 褚杨, 王清晨, Vuong N V, Tich V V. 2011. 华南板块南缘早中生代的逆冲推覆构造及其相关的动力学背景. 地质科学, 46: 134–145
- 刘建华, 曹淑云, 周丁奎, 李俊瑜, 程雪梅. 2019. 红河-哀牢山剪切带角闪石中角闪石变形特征及地震波各向异性. 地球科学, 44: 1716–1733
- 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
- 刘俊来, 纪沫, 申亮, 关会梅, Davis G A. 2011. 辽东半岛早白垩世伸展构造组合、形成时代及区域构造内涵. 中国科学: 地球科学, 41: 618–637
- 刘艳宾, 莫宣学, 张达, 阙朝阳, 狄永军, 蒲兴明, 程国顺, 马慧慧. 2014. 滇东南老君山地区晚白垩世花岗岩的成因. 岩石学报, 30: 3271–3286
- 刘玉平, 叶霖, 李朝阳, 宋彪, 李铁胜, 郭利果, 皮道会. 2006. 滇东南发现新元古代岩浆岩: SHRIMP锆石U-Pb年代学和岩石地球化学证据. 岩石学报, 22: 916–926
- 刘玉平, 李正祥, 李慧民, 郭利果, 徐伟, 叶霖, 李朝阳, 皮道会. 2007a. 都龙锡锌矿床锡石和锆石U-Pb年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩-成矿事件. 岩石学报, 23: 967–976
- 刘玉平, 徐伟, 廖震, 叶霖, 郭利果, 李朝阳. 2007b. 老君山变质核杂岩隆升的热历史解析与动力学机制探讨. 矿物岩石地球化学通报, (z1): 87–88
- 刘忠, 曹淑云, 李维. 2018. 滇东南老君山变质核杂岩变形-变质作用及对剥露过程的约束. 北京: 中国地球科学联合学术年会. 138
- 吕美霞, 曹淑云, 李俊瑜, 程雪梅. 2020. 滇西哀牢山变质杂岩中含石墨岩石的变形-变质温度、构造特征及流变弱化意义. 地质学报, 94: 491–510
- 马慧慧. 2013. 滇东南老君山花岗岩岩石学与地球化学特征及其构造意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1–54
- 马文璞. 1998. 八布蛇绿岩突厥型造山带. 科学通报, 43: 1363–1364
- 阙朝阳, 张达, 狄永军, 毕珉烽, 黄孔文, 徐建珍, 刘艳宾, 李晓宗, 祖世元, 范正哲, 王森. 2014. 麻栗坡南温河-酒西一带钨矿控矿要素及深部找矿突破. 地学前缘, 21: 286–300
- 阙朝阳. 2016. 云南麻栗坡南温河——酒西一带钨成矿系统及找矿方向研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1–220
- 任纪舜. 1990. 论中国南部的大地构造. 地质学报, 4: 275–288
- 石洪召, 张林奎, 任光明, 刘书生, 张彬, 戴婕, 陈敏华. 2011. 云南麻栗坡南秧田白钨矿床层控似矽卡岩成因探讨. 中国地质, 38: 673–680
- 石洪召, 张林奎, 林方成, 刘书生, 戴婕, 陈敏华. 2013. 云南麻栗坡南秧田白钨矿床流体包裹体、稳定同位素特征及其成矿意义. 沉积与特提斯地质, 33: 95–102
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31: 1035–1053
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. 地质通报, 25: 332–335
- 谭洪旗, 刘玉平. 2017. 滇东南猛洞群斜长角闪岩成因及其构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 47: 1763–1783
- 王丹丹, 李宝龙, 朱德全, 张承功, 张学成. 2015. 滇东南老君山地区变质锆石U-Pb年代学及其构造意义. 地质学报, 89: 1718–1734
- 王小娟, 刘玉平, 缪应理, 鲍谈, 叶霖, 张乾. 2014. 都龙锡锌多金属矿床LA-MC-ICPMS锡石U-Pb测年及其意义. 岩石学报, 30: 867–886
- 王学焜. 1994. 麻栗坡新寨锡矿床地质地球化学特征. 云南地质, 13: 1–16
- 王岳军, 范蔚茗, 郭峰, 彭头平, 李超文. 2003. 赞皇变质穹窿黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究及其对构造热事件的约束. 岩石学报, 19: 131–140
- 吴根耀. 2001. 滇桂交界区印支期前陆褶皱冲断带. 地质科学, 36: 64–71
- 韦海波. 2015. 云南麻栗坡印支期斜长角闪岩的发现及其地质意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1–51
- 夏浩然, 刘俊来. 2011. 石英结晶学优选与应用. 地质通报, 30: 58–70
- 徐惠芬, 陈涛. 1987. 阴极发光仪在变质岩和花岗岩类岩石中的应用. 岩石矿物学杂志, 6: 279–285
- 许志琴, 马绪宣. 2015. 中国大陆显生宙俯冲型、碰撞型和复合型片

- 麻岩穹窿(群). 岩石学报, 31: 3509–3523
- 许志琴, 付小方, 马绪宣, 戚学祥, 吴婵, 侯立伟, 赵中宝. 2016. 青藏高原片麻岩穹窿与找矿前景. 地质学报, 90: 2971–2981
- 许志琴, 付小方, 赵中宝, 李广伟, 郑艺龙, 马泽良. 2019. 片麻岩穹窿与伟晶岩型锂矿的成矿规律探讨. 地球科学, 44: 1452–1463
- 薛玺会, 熊家铺, 蔡麟孙, 胡英, 陈鼎昌, 黄铭卿. 1989. 云南变质杂岩 (1:200万云南省变质地质图说明书). 云南科技出版社. 1–98
- 颜丹平, 周美夫, 王焰, 汪昌亮, 赵太平. 2005. 都龙-Song Chay变质穹窿体变形与构造年代——南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据. 地球科学——中国地质大学学报, 30: 402–412
- 杨世瑜. 1987. 试论云南锡矿床控矿构造类型. 云南地质, 6: 227–240
- 杨世瑜. 1988. 滇东南环块构造、隆起构造与锡矿构造. 地质与勘探, 24: 5–12
- 袁芳, 宋传中, Lin S F, 石永红, 李加好, 李振伟, 王微, 王阳阳. 2020. 郛庐断裂带肥东北部文集地区构造岩类型与构造变形分析. 岩石学报, 36: 0601–0620
- 云南省地质局. 1976. 中华人民共和国1:20万马关幅地质图、区域地质调查报告
- 云南省地质矿产勘察开发局. 1999. 中华人民共和国1:5万都龙幅、麻栗坡幅地质图、地质图说明书
- 曾志刚, 李朝阳, 刘玉平, 涂光炽. 1999. 老君山成矿区变质成因夕卡岩的地质地球化学特征. 矿物学报, 19: 48–55
- 张程, 杨洪祥, 冯嘉, 刘俊来. 2019. 辽东古元古代造山带花岗岩片麻岩穹窿: 热造山带典型构造样式. 岩石学报, 35: 2926–2942
- 张进江. 2007. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述. 地质通报, 26: 639–649
- 张进江, 黄天立. 2019. 大陆伸展构造综述. 地球科学, 44: 1705–1715
- 张进江, 杨雄英, 戚国伟, 王德朝. 2011. 馬拉山穹窿的活动时限及其在藏南拆离系-北喜马拉雅片麻岩穹窿形成机制的应用. 岩石学报, 27: 3535–3544
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺友, 鲁如魁, 姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学: 地球科学, 43: 1553–1582
- 张世涛, 冯明刚, 吕伟. 1998. 滇东南南温河变质核杂岩解析. 中国区域地质, 17: 390–397
- 张世涛, 冯明刚, 王厚强, 吕伟, 杨明. 1999. 云南省麻栗坡县祖母绿矿区的地质特征及成因初探. 地质科技情报, 18: 50–54
- 钟大赉, 吴根耀, 季建清, 张旗, 丁林. 1998. 滇东南发现蛇绿岩. 科学通报, 43: 1365–1370
- 朱志澄. 1994. 变质核杂岩和伸展构造研究述评. 地质科技情报, 13: 1–9
- 卓皆文, 江新胜, 王剑, 崔晓庄, 熊国庆, 陆俊泽, 刘建辉, 马铭珠. 2013. 华南扬子古大陆西缘新元古代康滇裂谷盆地的开启时间与充填样式. 中国科学: 地球科学, 43: 1952–1963
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 192: 59–79
- Buck W R. 1991. Modes of continental lithospheric extension. *J Geophys Res*, 96: 20161–20178
- Burg J P, Guiraud M, Chen G M, Li G C. 1984. Himalayan metamorphism and deformations in the North Himalayan Belt (southern Tibet, China). *Earth Planet Sci Lett*, 69: 391–400
- Carter A, Clift P D. 2008. Was the Indosinian orogeny a Triassic mountain building or a thermotectonic reactivation event? *C R Geosci*, 340: 83–93
- Cao S Y, Liu J L, Leiss B. 2010. 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 Y, Neubauer F, Liu J L, Genser J, Leiss B. 2011a. 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 Y, Liu J L, Leiss B, Neubauer F, Genser J, Zhao C Q. 2011b. 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 Y, Neubauer F, Bernroider M, Liu J L, Genser J. 2013. Structures, microfabrics and textures of the Cordilleran-type Rechnitz metamorphic core complex, Eastern Alps. *Tectonophysics*, 608: 1201–1225
- Cao S Y, Neubauer F. 2016. Deep crustal expressions of exhumed strike-slip fault systems: Shear zone initiation on rheological boundaries. *Earth-Sci Rev*, 162: 155–176
- Carson C J, Ague J J, Coath C D. 2002. U-Pb geochronology from Tonagh Island, East Antarctica: Implications for the timing of ultra-high temperature metamorphism of the Napier Complex. *Precambrian Res*, 116: 237–263
- Cawood P A, Zhao G C, Yao J L, Wang W, Xu Y J, Wang Y J. 2018. Reconstructing South China in Phanerozoic and Precambrian supercontinents. *Earth-Sci Rev*, 186: 173–194
- Chen X Y, Liu J L, Qi Y C, Fan W K, Wang K, Zhang Y, Chen W. 2017. Miocene structural evolution and exhumation of the Ximeng dome in Yunnan, southeastern Tibet: Implications for intraplate deformation during extrusion of the Sundaland block. *J Asian Earth Sci*, 141: 194–212
- Chen Z C, Lin W, Faure M, Lepvrier C, Vong N V, Tich V V. 2014. Geochronology and isotope analysis of the Late Paleozoic to Mesozoic granitoids from northeastern Vietnam and implications for the evolution of the South China block. *J Asian Earth Sci*, 86: 131–150
- Chung S L, Lee T Y, Lo C H, Wang P L, Chen C Y, Yem N T, Hoa T T,

- Wu G Y. 1997. Intraplate extension prior to continental extrusion along the Ailao Shan-Red River shear zone. *Geology*, 25: 311–314
- Collins W J, Van Kranendonk M J, Teyssier C. 1998. Partial convective overturn of Archaean crust in the east Pilbara Craton, Western Australia: Driving mechanisms and tectonic implications. *J Struct Geol*, 20: 1405–1424
- Crowley J L, Brown R L, Parrish R R. 2001. Diachronous deformation and a strain gradient beneath the Selkirk Allochthon, northern Monashee complex, southeastern Canadian Cordillera. *J Struct Geol*, 23: 1103–1121
- Davis G H. 1977. Characteristics of metamorphic core complex, Southern Arizona. *Geol Soc Am Bull*, 9: 944
- Delvaux D, Moeys R, Stapel G, Petit C, Levi K, Miroshnichenko A, Ruzhich V, San'kov V. 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282: 1–38
- Delvaux D, Sperner B. 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 212: 75–100
- Duncan I J. 1984. Structural evolution of the Thor-Odin gneiss dome. *Tectonophysics*, 101: 87–130
- Eskola P E. 1948. The problem of mantled gneiss domes. *Q J Geol Soc*, 104: 461–476
- 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
- Faure M, Shu L S, Wang B, Charvet J, Choulet F, Monie P. 2009. Intracontinental subduction: A possible mechanism for the Early Palaeozoic orogen of SE China. *Terra Nova*, 21: 360–368
- Faure M, Lin W, Chu Y, Lepvrier C. 2016. Triassic tectonics of the southern margin of the South China Block. *C R Geosci*, 348: 5–14
- Fletcher R C, Hallet B. 2004. Initiation of gneiss domes by necking, density instability, and erosion. *Geol Soc Am Spec Pap*, 380: 79–95
- Getsinger A J, Hirth G. 2014. Amphibole fabric formation during diffusion creep and the rheology of shear zones. *Geology*, 42: 535–538
- 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
- Guo L G, Liu Y P, Li C Y, Xu W, Ye L. 2009. SHRIMP zircon U-Pb geochronology and lithochemistry of Caledonian Granites from the Laojunshan area, southeastern Yunnan province, China: Implications for the collision between the Yangtze and Cathaysia blocks. *Geochem J*, 43: 101–122
- Heidelberg F, Kunze K, Wenk H R. 2000. Texture analysis of a recrystallized quartzite using electron diffraction in the scanning electron microscope. *J Struct Geol*, 22: 91–104
- Ji S C, Shao T B, Michibayashi K, Long C X, Wang Q, Kondo Y, Zhao W H, Wang H C, Salisbury M H. 2013. A new calibration of seismic velocities, anisotropy, fabrics, and elastic moduli of amphibole-rich rocks. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 4699–4728
- Kelly N M, Harley S L. 2005. An integrated microtextural and chemical approach to zircon geochronology: Refining the Archaean history of the Napier Complex, east Antarctica. *Contrib Mineral Petrol*, 149: 57–84
- Kitamura K. 2006. Constraint of lattice-preferred orientation (LPO) on V_p anisotropy of amphibole-rich rocks. *Geophys J Int*, 165: 1058–1065
- Ko B, Jung H. 2015. Crystal preferred orientation of an amphibole experimentally deformed by simple shear. *Nat Commun*, 6: 6586
- Lacassin R, Maluski H, Leloup P H, Tapponnier P, Hinthong C, Siribhakdi K, Chuaviroj S, Charoenravat A. 1997. Tertiary diachronic extrusion and deformation of western Indochina: Structural and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence from NW Thailand. *J Geophys Res*, 102: 10013–10037
- Lee J, Hacker B R, Dinklage W S, Wang Y, Gans P, Calvert A, Wan J L, Chen W J, Blythe A E, McClelland W. 2000. Evolution of the Kangmar Dome, southern Tibet: Structural, petrologic, and thermochronologic constraints. *Tectonics*, 19: 872–895
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, Schärer U, Zhong D L, Liu X H, Zhang L S, Ji S C, Phan T T. 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251: 3–84
- Lepvrier C, Maluski H, Van Vuong N, Roques D, Axente V, Rangin C. 1997. Indosinian NW-trending shear zones within the Truong Son belt (Vietnam) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Triassic ages and Cretaceous to Cenozoic overprints. *Tectonophysics*, 283: 105–127
- Li D X, Deng J. 1996. Metamorphic core complex and vortex structure in Laojunshan, Southeastern Yunnan province. *Sci Geol Sin*, 5: 1–9
- Lister G S, Davis G A. 1989. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, U.S.A. *J Struct Geol*, 11: 65–94
- Liu J L, Guan H M, Ji M, Hu L. 2006. Late Mesozoic metamorphic core complexes: New constraints on lithosphere thinning in North China. *Prog Nat Sci*, 16: 633–638
- Liu J L, Cao S Y, Zhai Y F, Song Z J, Wang A J, Xiu Q Y, Cao D H, 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. *Earth Sci Front*, 14: 40–48

- 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
- Liu J L, Shen L, Ji M, Guan H M, Zhang Z C, Zhao Z D. 2013. The Liaonan/Wanfu metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Two stages of exhumation and constraints on the destruction of the North China Craton. *Tectonics*, 32: 1121–1141
- Liu J L, Chen X Y, Tang Y, Song Z J, Wang W. 2019. The Ailao Shan-Red River shear zone revisited: Timing and tectonic implications. *Geol Soc Am Bull*, 132: 1165–1182
- Liu Y P, Ye L, Li C Y, Hu R Z. 2003. Laojunshan-Song Chay metamorphic core complex and its tectonic significance. *Geochim Cosmochim Acta*, (S1): A259
- Ludwig K R. 2003. *ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. California, Berkeley: Berkeley Geochronology Center. 55–67
- 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
- McNamara D D, Wheeler J, Pearce M, Prior D J. 2012. Fabrics produced mimetically during static metamorphism in retrogressed eclogites from the Zermatt-Saas zone, Western Italian Alps. *J Struct Geol*, 44: 167–178
- Nam T N, Toriumi M, Sano Y, Terada K, Thang T T. 2003. 2.9, 2.36, and 1.96 Ga zircons in orthogneiss south of the Red River shear zone in Viet Nam: Evidence from SHRIMP U-Pb dating and tectonothermal implications. *J Asian Earth Sci*, 21: 743–753
- Prior D J, Boyle A P, Brenker F, Cheadle M C, Day A, Lopez G, Peruzzi L, Potts G, Reddy S, Spiess R, Timms N E, Trimby P, Wheeler J, Zetterstrom L. 1999. The application of electron backscatter diffraction and orientation contrast imaging in the SEM to textural problems in rocks. *Am Miner*, 84: 1741–1759
- Ren J S. 1996. The continental tectonics of China. *J Southeast Asian Earth Sci*, 13: 197–204
- Roger F, Leloup P H, Jolivet M, Lacassin R, Trinh P T, Brunel M, Seward D. 2000. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology. *Tectonophysics*, 321: 449–466
- Sláma J, Košler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hanchar J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N, Whitehouse M J. 2008. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem Geol*, 249: 1–35
- 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
- Takashita T. 1996. Dynamic evolution of deformation microstructures in rocks. Physical conditions for deformation. Estimate of the physical conditions for deformation based on *c*-axis fabric transitions in naturally deformed quartzite. *Jour Geol Soc Jpn*, 102: 211–222
- Tatham D J, Lloyd G E, Butler R W H, Casey M. 2008. Amphibole and lower crustal seismic properties. *Earth Planet Sci Lett*, 267: 118–128
- Teyssier C, Whitney D L. 2002. Gneiss domes and orogeny. *Geology*, 30: 1139–1142
- Tong L X, Liu Z, Li Z X, Liu X H, Zhou X. 2019. Poly-phase metamorphism of garnet-bearing mafic granulite from the Larsemann Hills, East Antarctica: *P-T* path, U-Pb ages and tectonic implications. *Precambrian Res*, 326: 385–398
- 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
- Usuki T, Lan C Y, Yui T F, Iizuka Y, Van Vu T, Tran T A, Okamoto K, Wooden J L, Liou J G. 2009. Early Paleozoic medium-pressure metamorphism in central Vietnam: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon ages. *Geosci J*, 13: 245–256
- Vanderhaeghe O, Teyssier C, Wyszczanski R. 1999. Structural and geochronological constraints on the role of partial melting during the formation of the Shuswap metamorphic core complex at the latitude of the Thor-Odin Dome, British Columbia. *Can J Earth Sci*, 36: 917–943
- Viola G, Anczkiewicz R. 2008. Exhumation history of the Red River shear zone in northern Vietnam: New insights from zircon and apatite fission-track analysis. *J Asian Earth Sci*, 33: 78–90
- Whitney D L, Teyssier C, Vanderhaeghe O. 2004. Gneiss domes and crustal flow. *Geol Soc Am Spec Pap*, 380: 1–19
- Whitney D L, Teyssier C, Rey P, Buck W R. 2013. Continental and oceanic core complexes. *Geol Soc Am Bull*, 125: 237–298
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Quadt A V, Roddick J C, Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand Geoanal Res*, 19: 1–23
- Xie Y, Wang Y. 2019. Structural doming tectonics: Intracontinental deformation of the SW margin of the Yangtze Block, China. *Int J Earth Sci-Geol Rundsch*, 108: 1643–1661
- Yakymchuk C, Kirkland C L, Clark C. 2018. Th/U ratios in metamorphic zircon. *J Metamorph Geol*, 36: 715–737
- Yan D P, Zhou M F, Song H L, Wang X W, Malpas J. 2003. Origin and

- tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361: 239–254
- Yan D P, Zhou M F, Wang C Y, Xia B. 2006. Structural and geochronological constraints on the tectonic evolution of the Dulong-Song Chay tectonic dome in Yunnan province, SW China. *J Asian Earth Sci*, 28: 332–353
- Zhang J J, Santosh M, Wang X X, Guo L, Yang X Y, Zhang B. 2012. Tectonics of the northern Himalaya since the India-Asia collision. *Gondwana Res*, 21: 939–960
- Zhao G C, Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Res*, 222–223: 13–54
- Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G C. 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Res*, 23: 1189–1206
- Zheng Y F, Chen R X. 2017. Regional metamorphism at extreme conditions: Implications for orogeny at convergent plate margins. *J Asian Earth Sci*, 145: 46–73
- Zhou X Y, Yu J H, O'Reilly S Y, Griffin W L, Wang X L, Sun T. 2017. Sources of the Nanwenhe-Song Chay granitic complex (SW China-NE Vietnam) and its tectonic significance. *Lithos*, 290–291: 76–93

(责任编辑: 郑永飞)