

doi:10.3799/dqkx.2017.139

长春东南劝农山地区早二叠世范家屯组 岩石变形组构及流变学特征

梁琛岳^{1,2}, 刘永江^{1,2*}, 朱建江³, 李伟民^{1,2}, 常瑞虹¹, 张丽⁴

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实验室, 吉林长春 130061

3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

4. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁沈阳 110034

摘要: 劝农山地区位于长春市东南部, 处于佳一伊断裂和西拉木伦河缝合带交汇处。详细野外调查发现, 该区曾遭受强烈韧性剪切变形, 剪切带内岩石普遍糜棱岩化, 主要由下二叠统范家屯组($P_1 f$)钙质糜棱岩与侵入其中的燕山期花岗质糜棱岩组成, 变形程度处于初糜棱岩至糜棱岩之间, 多具有糜棱结构。岩石应变类型主要为压扁型应变, 偏一般压缩, 为 $L=S$ 型构造岩, 指示其形成于挤压型剪切带的构造环境。多种宏微观韧性剪切变形标志, 指示明显的左行剪切运动。电子探针方解石—白云石地质温度计、方解石和石英 EBSD 组构特征、方解石 e 双晶形态以及石英长石变形行为等均显示岩石具有低温塑性流变特点, 变形环境不超过绿片岩相。剪切带内应变速率偏高, 应变集中带应变速率最大, 在 $10^{-6.95} \sim 10^{-8.89}$ 之间, 远离强变形带应变速率在 $10^{-9.25} \sim 10^{-12.17}$ 之间, 糜棱岩化作用过程中差异应力下限应大致为 51.27~65.46 MPa, 代表剪切带糜棱岩化作用为低温中等强度应变, 在稍快的应变速率条件下形成。压溶扩散和双晶滑移为劝农山韧性剪切带变形初期的主要变形机制, 随着递进变形, 逐渐以双晶滑移和晶内滑移为主, 递进变形晚期, 局部强变形域内发生了粒间滑移。劝农山韧性剪切带形成与早白垩世中晚期伊泽纳崎板块 NNW 向高斜度斜向俯冲于欧亚大陆之下有关, 是佳一伊断裂带左旋走滑事件的局部表现。

关键词: 构造变形; EBSD; 变形温度; 差异应力; 应变速率; 佳一伊断裂带; 构造。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2017)12-2174-19

收稿日期: 2017-03-15

Deformation Fabrics and Rheological Features of Early Permian Fanjiatun Formation from Quannongshan Area, Southeastern Changchun

Liang Chenyue^{1,2}, Liu Yongjiang^{1,2*}, Zhu Jianjiang³, Li Weimin^{1,2}, Chang Ruihong¹, Zhang Li⁴

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Land and Resources, Jilin University, Changchun 130061, China

3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

4. Shenyang Geological Survey Center, China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The Quannongshan area is located in the southeastern part of Changchun, at the junction of the Jiamusi-Yilan fault belt and Xar Moron suture zone. Detailed field observations indicate strong ductile deformation event which developed in these mylonites: Lower Permian Fanjiatun Formation ($P_1 f$) calc-mylonites and the intrusive Yanshanian granitic mylonites. Most rocks were deformed to protomylonites and mylonites macroscopically in a gneissic-like structure. The major strain type is plan-strain and marked by much compression, which is general compression. And the deformed rocks are characterized by $L=S$ type tectonites demonstrating a strong tectonic condition of a compressive ductile shear zone. A variety of macro/micro-ductile deformation kinematic marks indicate a significant sinistral shearing. Based on detailed macro/microstructural analysis, quartz c-

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 41230206, 41602211)。

作者简介: 梁琛岳(1986—), 男, 讲师, 主要从事构造地质学与岩石流变学研究。ORCID: 0000-0002-4269-5010. E-mail: chenyueliang@jlu.edu.cn

* 通讯作者: 刘永江, ORCID: 0000-0002-9409-3425. E-mail: yongjiang@jlu.edu.cn

引用格式: 梁琛岳, 刘永江, 朱建江, 等, 2017. 长春东南劝农山地区早二叠世范家屯组岩石变形组构及流变学特征. 地球科学, 42(12): 2174—2192.

axis EBSD fabrics, calcite-dolomite geothermometer from electron probe, calcite $<\text{e}>$ twin morphology and quartz/feldspar deformation behaviors, a low-temperature plastic flow characteristics and greenschist metamorphic environment were estimated. The ductile shear zone has a relatively high strain rate, which is between $10^{-6.95}$ and $10^{-8.89}$ in a highly strained zone and $10^{-9.25} - 10^{-12.17}$ away from the strong deformation zone. The lower limit of the differential stress during the mylonitization process should be approximately 51.27–65.46 MPa, which represents that the mylonitization formed at a slightly faster strain rate with low deformation temperature and moderate strain strength. In the initial deformation period, the pressolution diffusion and the twin gliding are the main deformation mechanisms, then in the middle of the deformation they are dominated by the twin gliding and the grain boundary slip. In the late stage of the progressive deformation, the grain boundary sliding occurred in parts of strong stain zone. The formation of this ductile shear zone might be related to the Izanagi plate obliquely NNW subducting under the Eurasia plate during the middle and late Early Cretaceous, which is a local performance of the sinistral strike-slip Jia-Yi fault.

Key words: structural deformation; EBSD; deformation temperature; paleo-stress; strain rate; Jia-Yi fault; tectonics.

0 引言

韧性剪切带作为地壳深部广泛发育的具有塑性流变特征的面状应变带,对研究深部地壳变形行为和演化具有重要意义(郑亚东和常志忠,1985)。一直以来韧性剪切带变形过程中的变形作用、特征矿物组合,以及对地壳深层次变形特征的揭示,是构造地质学者研究热点之一(刘俊来,2004;杨晓勇,2005;许志琴等,2008;李小兵等,2014;魏博等,2015;梁琛岳等,2015,2016),成为研究地壳层次变形规律和岩石圈变形行为的热点内容(刘俊来,2004;杨晓勇,2005;许志琴等,2008;Wang *et al.*, 2011; Liang *et al.*, 2015)。通过对韧性剪切带内变形岩石及其两侧岩石内的矿物组合和变形特征的分析,对恢复岩石韧性剪切变形历史,认识韧性剪切带形成演化历史和成因机制,提供科学依据(杨钟堂等,1985;郑亚东和常志忠,1985;杨晓勇,2005)。

长春市东南劝农山地区,处于佳—伊断裂和西拉木伦河缝合带交汇处。详细野外调查发现,该区曾遭受强烈韧性剪切变形,二叠纪的范家屯组及侵入其中的燕山期花岗岩变形强烈,发育大量 NE 向左行韧性剪切变形特征,为进一步查明其变形样式,本文集中对发育于韧性变形带内,强变形的二叠纪范家屯组钙质糜棱岩和燕山期花岗质糜棱岩进行综合研究,通过宏观与微观构造特征识别,应力与应变测量,岩组分析(EBSD 等方法),流变学参数估算,方解石 e 双晶及电子探针分析等,综合查明韧性变形时的应力—应变状态和构造应力场,系统分析该剪切带的构造变形特征,厘清劝农山韧性剪切带的发育特点及演化历程,从而讨论其变形形成环境,为进一步认识中上部岩石圈地壳变形行为,揭示韧性剪切带内变形岩石的变形规律和演化特征提供依据,

同时为探究西拉木伦河断裂带和佳—伊断裂带在区域上的演化历程提供一定参考。

1 区域地质背景

劝农山地区位于长春市东南部,处于佳木斯—伊通断裂带(佳—伊断裂带,佳—伊地堑)西缘,西拉木伦河缝合带北部(图 1a)。西拉木伦河缝合带(西拉木伦河—长春—延吉缝合带)是华北板块与西伯利亚板块的拼合带(李锦轶,1986;王玉净和樊志勇,1997;周建波等,2009;刘永江等,2010;韩国卿等,2011;张克信等,2015),中部延伸经长春南一带,闭合时间为晚二叠世—早三叠世(孙德有等,2004;Liu *et al.*, 2017)。佳—伊断裂带大致呈 NE45° 方向展布,与敦—密断裂带一起组成了郯—庐断裂带的北段分支(万天丰等,1996;万天丰和朱鸿,1996;孙晓猛等,2006,2008,2010;王书琴等,2012)。前人对郯—庐断裂带的构造属性与演化历史研究较多,普遍认为早白垩世中期,由于伊泽那崎板块 NNW 斜向俯冲于欧亚大陆之下,使东北地区乃至整个中国东部呈现左旋压扭性活动大陆边缘环境,形成一系列 NE(NNE) 向左行韧性剪切断裂带,并伴随同期的岩浆活动(陈丕基,1988;徐嘉炜和马国锋,1992;窦立荣等,1996;朱光等,2004a,2004b,2006;孙晓猛等,2008,2010;孟婧瑶等,2013;梁琛岳等,2015)。

佳—伊断裂带受后期构造运动及新生代沉积物的覆盖影响,典型变形区出露较少,目前仅在舒兰水曲柳地区见到花岗质糜棱岩的残余(孟婧瑶等,2013;梁琛岳等,2015),沿佳—伊断裂带向南追索,至劝农山地区出露近 500 m 宽的花岗质(钙质)糜棱岩带,但都因第四系覆盖而零星分布。

劝农山段韧性剪切带主要出露于劝农山镇东

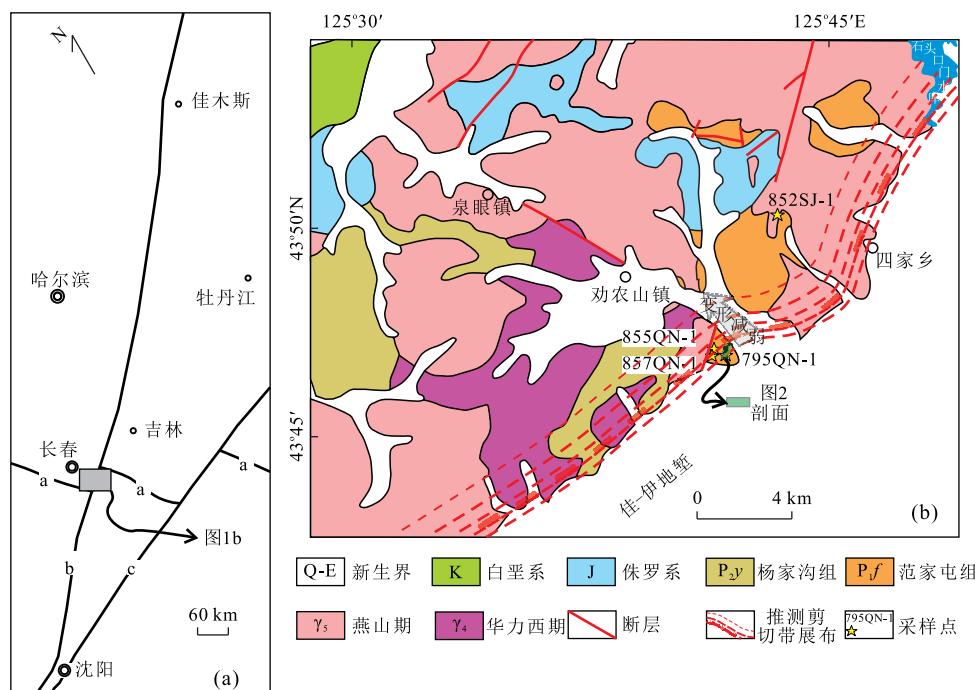


图 1 长春市劝农山地区地质简图(据 1 : 20 万长春幅地质图修改)与采样位置

Fig.1 Geological map of Quannongshan area with sample locations

a.研究区大体位置简图;b.研究区及周边地质简图;a.西拉木伦河断裂带;b.佳—伊断裂带;c.敦—密断裂带

南,区内出露的地层主要有二叠纪的范家屯组、一拉溪组、杨家沟组,侏罗纪的营城子组,白垩纪的泉头组和第四纪地层。范家屯组含有菊石、珊瑚、海百合茎、腕足类以及牙形刺化石,岩性为薄—中厚层状灰黑色、灰绿色砂岩、粉砂岩、凝灰质杂砂岩、灰色生物碎屑灰岩以及泥质灰岩,其组合时代为早二叠世(王成源等,2000,2014)与上覆地层杨家沟组为平行不整合接触,与下伏大河深组为整合接触。主体被燕山期花岗岩侵入。

剪切带(糜棱岩带)出露于长春至双阳公路旁,出露宽度约 500 m,呈 NE 向展布,剪切带内岩石普遍发生糜棱岩化,主要由下二叠统范家屯组(P_1f)钙质糜棱岩与燕山期花岗质糜棱岩组成(图 1b),受强构造影响局部地区可见糜棱面理与片理趋于一致化,并发育强烈膝折构造。前人对该地区的研究主要集中于古生物及地层方面的研究,构造变形等方面的研究鲜有报道。

2 宏观构造特征

韧性剪切带内主要变形岩石有花岗质糜棱岩和钙质糜棱岩(图 2、图 3a~3f),实测构造剖面沿长春至双阳公路展布,走向近 NS(4°),出露的岩性主要

为泥页岩、泥灰岩、(生物)碎屑灰岩等,泥页岩片理化,发育大量的紧闭褶皱,褶皱轴面面理 S_1 走向大致为北东方向(图 2)。剖面走向与剪切带走向夹角较小,但总体能够识别出明显走滑特征,变形带强弱分带现象明显(图 2),强变形带内泥灰岩、灰岩等强韧性变形,多为钙质糜棱岩,发育大量紧闭同斜褶皱,弱变形带剪切变形较弱,局部残余近 E-W 向面理构造(图 2)。剪切变形带内发育有糜棱面理、拉伸线理、构造透镜体、不对称褶皱、旋转碎斑岩系、书斜式构造、膝折等剪切指向标志,总体指示区域存在一期 NE 向韧性变形事件,具体特征如下。

糜棱面理在花岗质糜棱岩和强变形钙质糜棱岩中均有发育(图 2,图 3a),大量的面理统计及下半球等面积赤平投影分析(图 2),结果显示,面理优势产状明显分为两期,主期为 SE-NW 向挤压(NE-SW 向拉伸),在强变形钙质糜棱岩和花岗质糜棱岩内均有发育,倾角较陡,多集中在 $60^\circ \sim 85^\circ$ SW,可能反应走滑剪切事件。近 E-W 向展布的面理构造仅在弱变形带泥灰岩和灰岩中相对较为密集,花岗质糜棱岩内未出现,倾角分布于 $70^\circ \sim 88^\circ$ S(N),可能与近 E-W 向展布的西拉木伦河缝合带有关。强变形花岗质糜棱岩中发育的矿物拉伸线理多由长英质矿物集合体拉伸定向而成,线理倾伏角较大,主体 $40^\circ \sim 55^\circ$,

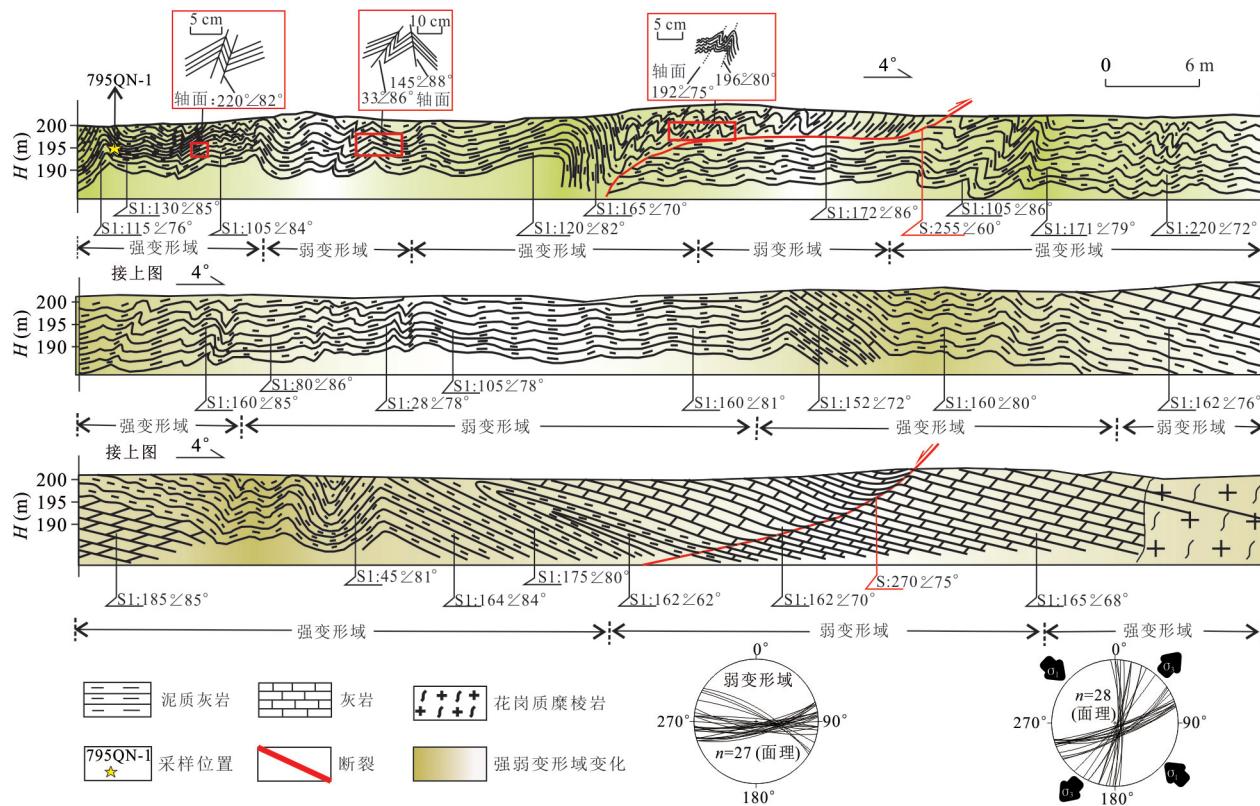


图 2 劝农山韧性剪切带构造剖面图

Fig.2 The structural cross-section of the Quannongshan ductile shear zone in southeastern Changchun

倾伏 SE, 反映一次强烈的 NE 向韧性走滑事件(图 3d). 弱变形泥灰岩中, 偶尔可见倾伏角较大的拉伸线理($65^{\circ} \sim 75^{\circ}$)、近南北向走向, 由泥质矿物定向排列形成, 可能反应早期西拉沐沦河缝合带拼合事件对原始层理的改造(图 2).

钙质糜棱岩中发育由书斜式构造(多米诺式构造; 图 3c), 多由原始(生物)碎屑灰岩内碎屑块体在剪切变形过程中发生旋转作用, 指示左旋剪切变形. 此外, 钙质糜棱岩中还发育由大量形态不一, 尺度不等, “Z”形无根钩状褶皱, 呈明显不对称褶皱特征, 平面显示 NE 向左行走滑剪切(图 3e). 钙质糜棱岩与花岗质糜棱岩中均可见到不对称旋转碎斑, 碎斑直径由几毫米至几厘米不等, 变形强烈, 旋转碎斑拖尾方向多显示 NE 向左行剪切(图 3d). 同时, 一系列近于平行排列, 产状近乎一致的紧密膝折带, 轴面产状近 NE-SW, 倾角多为 $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ (图 2, 3f).

3 微观组构特征

为获得更多的韧性变形信息, 对剪切带内强变形岩石显微构造特征进行细致分析(表 1, 图 4a~

4h), 岩石变形程度处于初糜棱岩至糜棱岩之间, 具有左旋剪切的特征(图 4a, 4b, 4c, 4f, 4g).

钙质糜棱岩发育有机械双晶, 强变形钙质糜棱岩内方解石多发育一组机械双晶和两组双晶纹较为常见, 晶纹较厚($1 \sim 3 \mu\text{m}$), 指示变形温度可能在 170°C 以上(Ferrill, 1991; Ferrill *et al.*, 2004; 图 4a, 4e~4f; 详见下文描述). 并且强变形域内方解石解理缝明显弯曲塑性变形.

花岗质糜棱岩中可大量见到石英的波状消光, 与其共生的长石多已细粒化(图 4b~4d), 大部分石英颗粒存在动态重结晶现象, 多数为膨凸式(BLG), 少量为亚颗粒旋转重结晶(SGR)(图 4b~4d). 强变形钙质糜棱岩中局部可见到动态重结晶的方解石细晶(Schmid *et al.*, 1980; 图 4g).

花岗质糜棱岩中长石以残斑形式存在, 与石英、云母等塑性变形矿物共同组成旋转残斑系, 根据其拖尾的不对称性可判断其为左行剪切特征(图 4b, 4d). 偶见于钙质糜棱岩的方解石残斑中的书斜式构造, 也指示主剪切为左行剪切(图 4f, 4g).

另外, 钙质糜棱岩中还存在特殊的应力指示构造, 缝合线(压溶面)构造, 由压溶作用产生. 根据压溶

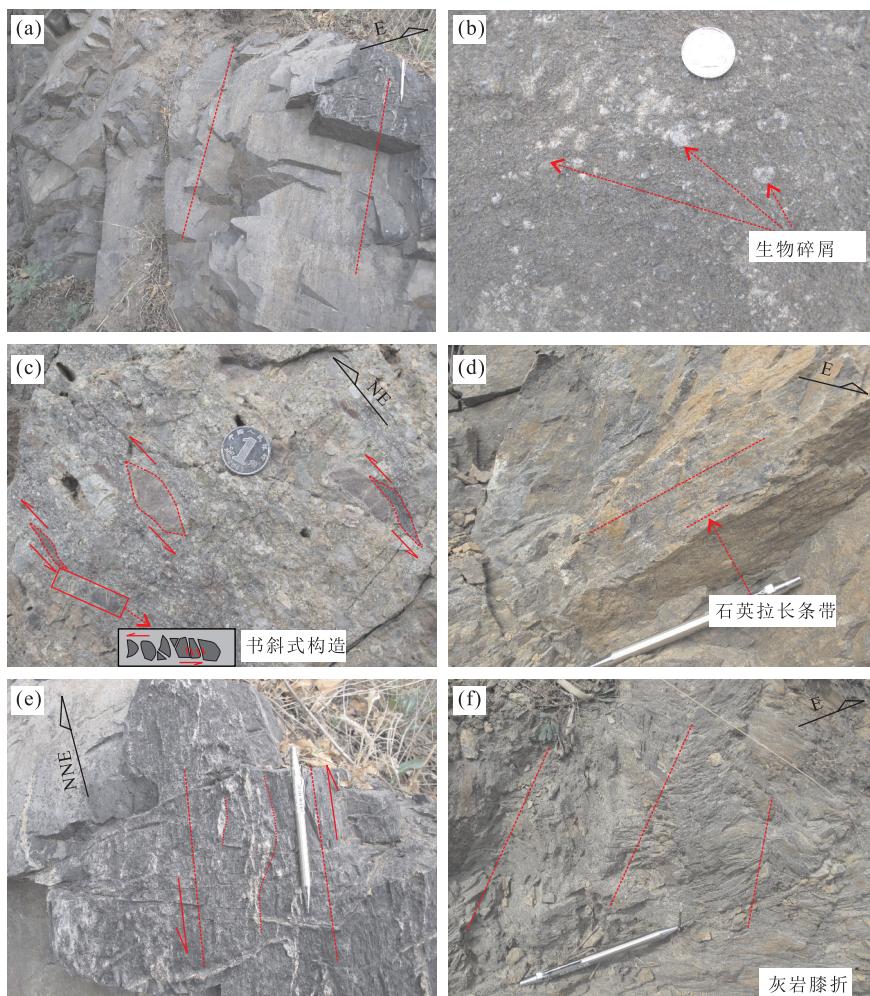


图 3 宏观构造变形特征

Fig.3 The representative meso-fabrics

a. 钙质麻棱岩中片麻理发育(795QN-1); b. 生物碎屑灰岩(弱变形; 855QN-1); c. 碎屑灰岩中发育的书斜式构造和眼球状构造, 指示 NE 向左旋剪切运动; d. 花岗质麻棱岩中的石英拉长条带(852SJ-1); e. 钙质麻棱岩中的不对称褶皱, 指示左旋剪切; f. 钙质麻棱岩(灰岩)中的膝折

表 1 韧性剪切带内典型样品显微构造特征

Table 1 Microtectonic features of oriented thin sections from Quannongshan ductile shear zone

样品号	岩性	采样位置	结构构造	微观变形特征
795QN-1	钙质麻棱岩	N:43°47'17.6" E:125°41'37.0"	鳞片变晶结构 片状构造	麻棱岩化, 方解石解理塑性弯曲变形, 机械双晶与旋转残斑发育, 多呈长眼球状, 显示左旋特征. 基质为细粒新晶方解石.
852SJ-1	花岗质麻棱岩	N:43°50'21.2" E:125°43'37.5"	麻棱结构 片状构造	长石残斑环状消光, 部分绢云母化, 长石旋转残斑显示左旋剪切特征; 细粒石英拉长成条带, 部分石英残斑拉长呈眼球状且细粒化, 发育膨凸式动态重结晶. 云母片状定向排列.
855QN-1	钙质麻棱岩	N:43°47'30.7" E:125°41'04.5"	鳞片变晶结构 片状构造	残斑方解石呈长眼球状, 机械双晶发育, 解理有扭折和弯曲现象, 部分边部产生亚颗粒式重结晶. 新晶多呈小椭球状, 无解理, 构成核幔结构. 部分方解石颗粒受剪切应力形成书斜式构造, 与旋转残斑一致, 都显示左旋剪切的特征.
857QN-1	钙质麻棱岩		鳞片变晶结构 片状构造	方解石残斑呈长眼球状, 旋转变形, 指示左旋变形. 残斑周边新晶方解石呈长条状或粒状, 多呈定向排列.

面上的锥状或柱状细齿方向可判断剪切带最大主压应力的方向为 SE-NW 向挤压(图 4h; 详见下文).

宏观构造特征指示剪切带内岩石主要经历 NE 向左行韧性剪切变形. 局部弱变形带内残余近

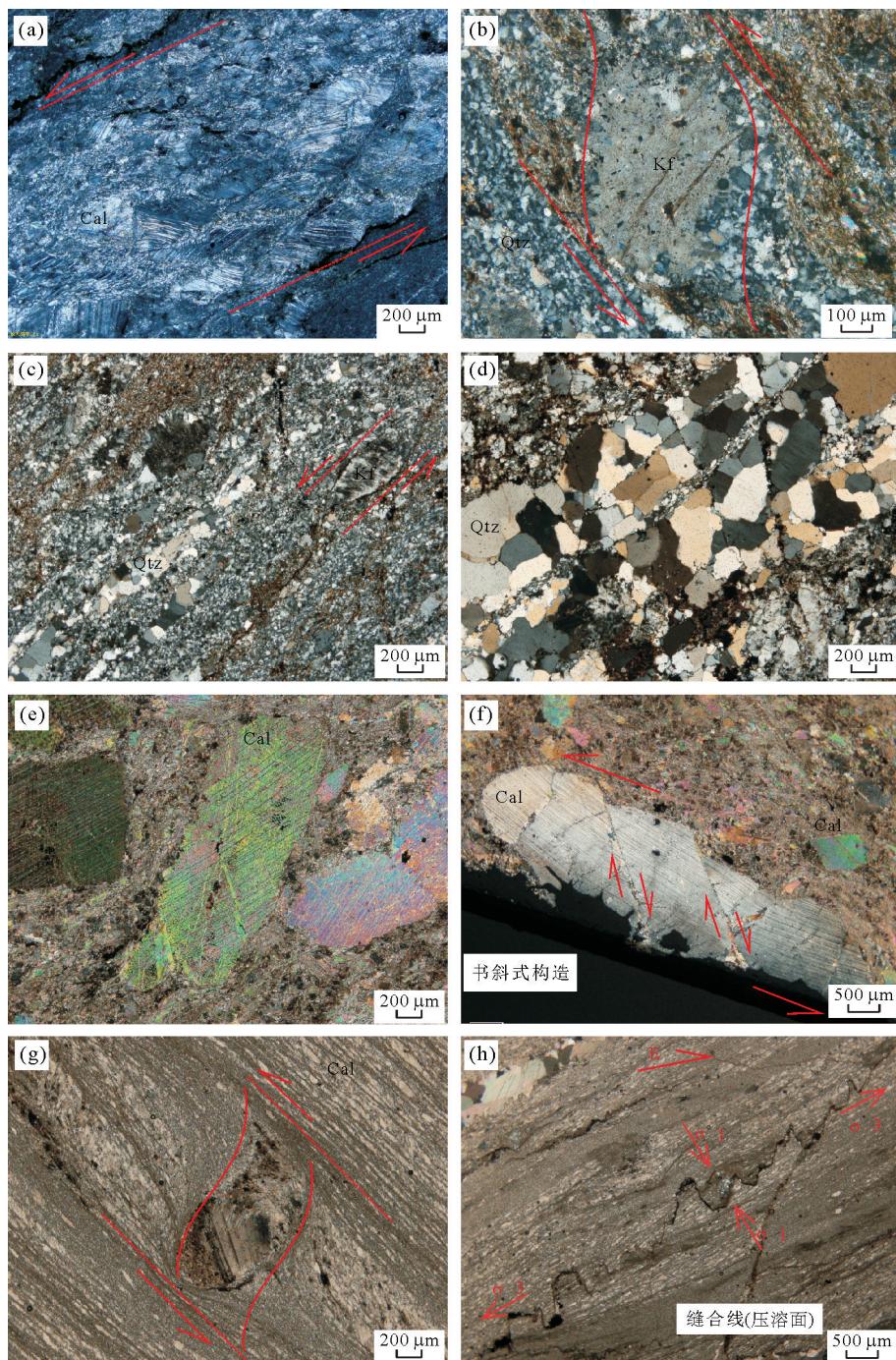


图 4 韧性剪切带典型显微构造变形特征

Fig.4 Typical microscopic deformation characteristics

- a.长眼球状方解石扭折变形,指示左行剪切变形(795QN-1);b.钾长石旋转残斑,边部细粒化,形成核幔结构,具有左行剪切特征(852SJ-1);c.钾长石旋转残斑指示左行剪切,石英波状消光,可见膨凸式动态重结晶(852SJ-1);d.石英颗粒发生膨凸式动态重结晶(852SJ-1);e.残斑方解石机械双晶发育,解理弯曲现象明显(855QN-1);f.方解石残斑书斜式构造具有左行剪切特征(855QN-1);g.方解石旋转残斑指示左行剪切(857QN-1);h.缝合线(压溶面)构造,指示应力方向,SE-NW 向挤压(857QN-1);Qtz.石英;Kf.钾长石;Cal.方解石

E-W 向展布面理构造,但遭受后期近 SE-NW 向挤压应力形成的 NE 向左行韧性剪切变形改造,形成轴面近 NE 的紧闭同斜褶皱,并伴随大量的左行不对称褶皱、书斜式构造、旋转碎斑系等。

4 应变类型分析

劝农山韧性剪切带内强变形岩石表现明显塑性变形特征,表现中低温、中浅层次地壳变形环

表 2 韧性剪切带内典型样品石英和方解石的有限应变测量分析数据

Table 2 Finite strain measurement analysis data of quartz and calcite in the typical mylonites

样品号	测试颗粒	颗粒	长短轴法				应变强度(γ)	
			X/Z	Y/Z	X/Y	菲林指数(k)		
852SJ-1	石英	石英	69	1.35	1.18	1.14	0.81	1.32
795QN-1	方解石	方解石残斑	75	1.79	1.44	1.24	0.60	1.68
855QN-1	方解石	变形鲕粒	35	1.77	1.39	1.27	0.73	1.66
855QN-1	方解石	方解石残斑	45	2.11	1.63	1.29	0.53	1.92
857QN-1	方解石	方解石残斑	39	1.98	1.56	1.27	0.54	1.83

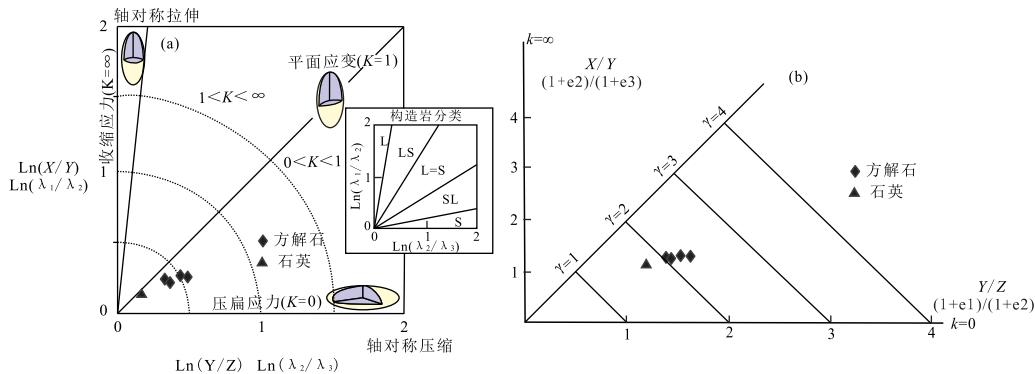


图 5 韧性剪切带内典型样品石英和方解石的有限应变 Flinn 参数图解

Fig.5 Flinn parameters diagram of finite strain of quartz and calcite in the typical mylonites

a. 岩石有限应变 Flinn 判别图解;b. 岩石变形强度 Flinn 图解;据郑亚东和常志忠(1985)

境,为限定剪切带应变条件,特进行应变类型分析.

4.1 构造应力场

缝合线(压溶面;图 4h)在碳酸盐岩层中发育较多.仔细观察,可以发现沉淀物往往在缝合线的波峰和波谷处较多.根据缝合线构造的形态,可归结为 3 种:V 型、H 型和斜 V 型,并分别反应不同的主应力方向(杨钟堂,1985;江富华,1988).劝农山地区范家屯组钙质糜棱岩中发育的缝合线构造(图 4h)以 V 型为主,结合定向标本野外产状,总体反应主压应力(σ_1)为 NW-SE, 主张应力(σ_3)为 NE-SW.

方解石为一轴晶矿物,其光轴平行于结晶轴 C 轴,构造应力作用下,其 C 轴应平行于最大主应力轴(宋鸿林,1982;杨钟堂,1985;卫宏和渠天祥,1994;宋传中等,1995).方解石光轴定向 EBSD 图解显示明显的斜方对称(图 6;详细分析见下文),光轴分布也比较集中,可能反应主变形期的主压应力(σ_1)为 NW-SE 向.

4.2 应力应变条件

为进一步了解岩石的变形状态,可在定向标本不同方向薄片中,通过对变形岩石中的某些应变标志体,如变形化石、变形鲕粒、变形矿物颗粒等,进行有限应变测量,可以求出变形的构造应变强度等信

息(Ramsay, 1980; 郑亚东和常志忠, 1985).

岩石有限应变测量方法较多,本文选用长短轴法进行有限应变测量.首先切割两个反应最大主应变面的薄片(平行拉伸面理和垂直糜棱面理作为 XZ 面和平行糜棱面理为 XY 面),然后分别在显微镜下合适放大倍数,选择测试矿物颗粒分布较为均匀的区域采集显微照片,之后在 CorelDRAW X7 软件中对整个视域中石英和方解石不同标志体的长短轴率 X/Z 和 Y/Z 进行统计,并求出了 Fillin 参数值 K 和应变强度 γ ,其中 $K = \ln(X/Y)/\ln(Y/Z)$; $\gamma = X/Y + Y/Z - 1$ (表 2 和图 5).具体方法参见郑亚东和常志忠(1985)、梁琛岳等(2015).

使用 Flinn 判别图解进行有限应变类型判别(郑亚东和常志忠,1985;图 5),3 个钙质糜棱岩样品投在压扁应变区域, K 值在 0.53~0.73 之间,为压扁型应变,偏一般压缩,表现为 L=S 型构造岩.花岗岩样品处于平面应变区, K 值为 0.81.方解石颗粒 K 值明显低于石英 K 值,反映不同矿物颗粒对应变反应不同,并且方解石颗粒在变形后期存在静态恢复导致.在 Flinn 图解基础上可进一步做出应变强度等值线(图 5b;郑亚东和常志忠,1985),结果表明岩石应变为压扁型,综合指示研究区糜棱岩均处于

挤压型剪切的构造环境。

由于在不同的变形阶段,控制矿物变形的机制有所不同,反映出的应变量也有差异(Ferrill, 1991; Ferrill *et al.*, 2004),所以利用方解石颗粒形态做应变分析,要考虑岩石处于哪个变形阶段。为避免这种情形,我们分别测量出不同域内的不同类型方解石颗粒轴率,以期反应其真实应变类型,总体结果较为统一,至少能够较真实反应应变类型。

5 岩石组构特征(EBSD 分析)

电子背散射(electron back scatter diffraction, EBSD)技术可通过分析晶体背散射衍射图像来确定晶轴方向,进而确定韧性剪切带中矿物晶格优选方位与滑移系(曹淑云等,2006;许志琴等,2009;夏浩然和刘俊来,2011),进而估算变形温度。本文 EBSD 组构分析所选样品为剪切带内典型花岗质糜棱岩及钙质糜棱岩,样品位置见图 1B,样品显微特征见表 1。糜棱岩样品沿垂直面理和平行线理的方向切割光学薄片(X/Z 面),厚度约为 $30 \mu\text{m}$ 。EBSD 分析在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行,测试样品要先经过高度机械抛光及贴导电胶条,然后将样品以 70° 左右倾斜置于 SEM 样品室进行测定,具体实验流程见文献(刘俊来等,2008)。选择 3 个强变形糜棱岩进行组构分析,测定矿物为石英、方解石,测试结果见图 6,表 3。

选取 2 件钙质糜棱岩样品(795QN-1、855QN-1;图 6a,6b),测量的区域大部分为方解石基质,极少部分为方解石残斑。方解石晶格优选极密分布在第二、四象限,显示简单的大圆环带,单斜对称,靠近 Z 轴出现极密,组构显示明显 e_1 双晶滑移($80\sim800^\circ\text{C}$)与 r_1

平移滑动($300\sim400^\circ\text{C}$),据此可以推断滑移温度为 $80\sim400^\circ\text{C}$ (郑伯让和金淑燕,1989;徐海军等,2007;闫淑玉等,2016)。极密环带明显地垂直于拉伸线理和叶理方向,组构对称性分别显示较清晰的左行剪切,这与石英晶格优选方位、野外露头及显微构造所得结论一致。同时,两个样品均存在若干次极密位于 Z 轴和 X 轴中部附近,可能代表有次一期中温变形叠加在低温变形之上,但也不排除存在后期热液的影响,但温度变化范围幅度极小,并不影响解释整个岩石中方解石的变形行为。

强变形花岗质糜棱岩样品 852SJ-1 的石英晶格优选方位多呈点极密型式,靠近 X 轴和 Z 轴有多个极密,以低温底面组构为主,中低温菱面组构次之,其组构研究表明剪切带中变形岩石经历了低温($<400^\circ\text{C}$)韧性变形过程,单斜对称组构指示明显的左行剪切滑移(图 6c)。石英晶格优选方位多呈点极密型式,指示其形成于一般压缩应变背景下。显微镜下石英颗粒的膨凸式动态重结晶(BLG)以及长石的旋转残斑等韧性变形特征也指示中低温环境,野外观察到的左行书斜构造、旋转残斑等也显示由 $\text{SW} \rightarrow \text{NE}$ 的左行剪切特征。

6 变形温度分析

判断韧性剪切带内岩石变形温度有多种方法(Brodie and Rutter, 1985;马胜利和马瑾,1987;胡玲等,2009;胡达等,2015),如,矿物共生组合关系、EBSD、方解石机械双晶密度与双晶宽度关系、方解石—白云石地质温度计等。

6.1 电子探针温度计

方解石中常含 Mn、Fe、Mg 等类质同像替代物,

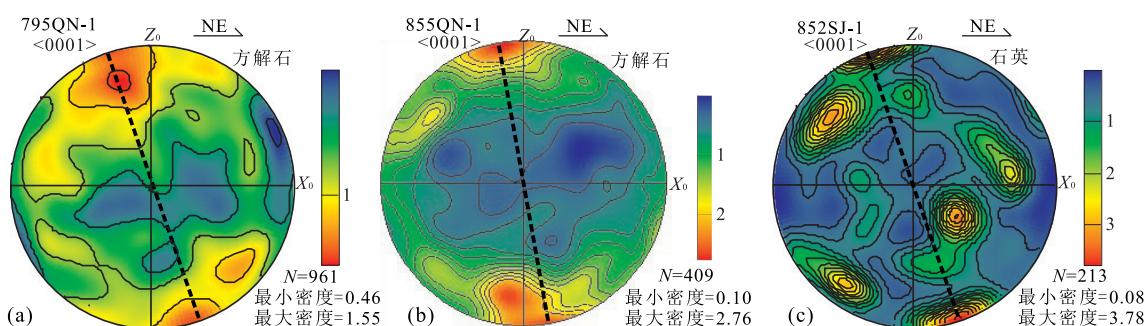


图 6 韧性剪切带矿物晶格优选定向

Fig.6 LPOs of minerals from the typical mylonites

为下半球等面积投影; X_0 .拉伸线理方向; Z_0 .面理法线; N.测量点数; 石英 C 轴组构指示左旋剪切运动类型

表 3 韧性剪切带内矿物晶格优选方位 EBSD 测试结果
Table 3 EBSD-measured results of the typical mylonites

样品号	岩性	测试矿物	EBSD 测点数量	组构类型	剪切指向	温度估算(℃)
795QN-1	钙质糜棱岩	方解石	961	e_1 双晶滑动(80~800 ℃), 与 r_1 平移滑动(300~400 ℃)	左旋剪切	80~400
855QN-1	钙质糜棱岩	方解石	409	e_1 双晶滑动(80~800 ℃), 与 r_1 平移滑动(300~400 ℃)	左旋剪切	80~400
852SJ-1	花岗质糜棱岩	石英	213	底面< a >滑移为主, 局部表现菱面< a >组构	主体<400, 局部 400~550	

表 4 韧性剪切带内钙质糜棱岩中方解石电子探针成分数据(%)及温度计算
Table 4 Electron probe composition (%) data and calculated temperature of calcite in calc-mylonites

样品号	测点	TiO ₂	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	Total	T(℃)
855QN-1	1	0	52.760	0	0.04	0.830	0.020	0	0.110	0.080	0.030	53.870	366
	2	0	57.050	0	0.03	0.660	0.110	0.290	0.400	0.260	0.010	58.810	312
	3	0	54.300	0.030	0.10	0.420	0.010	0.030	0.050	0.130	0.020	55.090	186
	4	0	57.250	0.030	0.03	0.360	0	0	0.190	0.070	0.020	57.950	118
	5	0.06	53.380	0.280	0.03	0.530	0	0	0.080	0.120	0	54.470	262
	6	0	53.450	0	0.01	0.460	0.030	0	0.260	0.210	0	54.420	235
	7	0	54.900	0.030	0.01	0.850	0	0	0.470	0.090	0	56.340	373
	8	0.032	55.844	0.008	0.016	0.567	0	0.013	0.206	0.249	0.006	56.941	275
	9	0	52.552	0.006	0	0.741	0.001	0	0.130	0.006	0.028	53.464	346
	10	0.014	56.951	0.023	0.049	0.465	0	0	0.109	0.058	0.038	57.707	209
	11	0	55.398	0.044	0.004	0.606	0.041	0	0.099	0.086	0	56.278	289
												平均温度(℃)	270
857QN-1	12	0	56.025	0.020	0.047	0.380	0.031	0.024	0.206	0.201	0	56.934	147
	13	0.005	55.453	0.020	0	0.308	0	0	0.031	0.018	0	55.835	44
	14	0	55.468	0.031	0.034	0.327	0.013	0	0.127	0.014	0.038	56.052	81
												平均温度(℃)	91

注: 电子探针实验是在吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实验室电子探针实验室完成, 实验仪器为日本电子公司 JXA 8230 型电子探针仪, 电子束流为 1×10^{-8} A, 加速电压 15 kV, 电子束斑为 2 μm , 修正方法为 ZAF 法。

类质同像组分值随着结晶温度的改变会发生很大的变化, 基于这一原理, 众多学者通过以共生的方解石和白云石之间的 Fe-Mg-Ca 分配的热力学关系设计了相关的地质温度计 (Sheppard and Schwarz, 1970; Rice, 1977; Anovitz and Essene, 1987). 本文利用 Anovitz and Essene (1987) 方解石—白云石地质温度计, 对劝农山地区范家屯组两个典型碳酸质糜棱岩中方解石进行了电子探针成分分析 (表 4, 图 7), 样品 855QN-1 方解石的变形温度为 118~366 ℃, 平均温度 270 ℃ (表 4), 并且对方解石残斑由幔至核部, 近等间距打点, 发现变质变形温度呈明显规律性, 由边部向核部递减 (图 7b). 值得注意的是部分生物碎屑化石海百合茎内方解石颗粒也有明显变形现象, 测算温度达 275 ℃ (图 3b, 7c). 样品 857QN-1 方解石残斑的变形温度为 147~44 ℃, 平均温度 91 ℃ (表 4), 也显示由边部向核部递减的规律, 总体反应变质变形强度由边部向核部加强。

6.2 方解石 e 双晶形态与温度关系

方解石 e 双晶纹形态与温度在低温(<400 ℃)

剪切变形过程中具有良好的相关性 (杨杰华等, 1988; 钟增球和郭保罗, 1991; Ferrill, 1991; Burkhard, 1993; Ferrill et al., 2004; 姚大全和翟洪涛, 2004; 向必伟等, 2007; Craddock et al., 2007), 并且方机械双晶纹的宽度与岩石变形温度和压力有关 (Kennedy and Loganb, 1988; Liu et al., 2002; Ferrill et al., 2004; Craddock et al., 2007). 随着温度的增加, 方解石双晶纹的变化从较窄的双晶纹(I型)→较宽的双晶纹(II型)→弯曲的双晶纹(III型)→动态重结晶的双晶纹(IV型), 据此, 根据大量数据统计, 可以通过投图进行温度估计 (向必伟等, 2007; Ferrill et al., 2004).

样品 855QN-1 中方解石的机械双晶主要为 II 型透镜状的厚双晶和 IV 型由于动态重结晶而形成的不规则双晶 (图 4f, 图 7c), 部分方解石残斑具有 I 型细薄双晶 (图 4e, 图 7a), 并伴随有双晶纹扭折现象. 通过对镜下大量方解石双晶的观测和统计, 发现其平均宽度 2.57 μm , 双晶密度平均为 32.9 条/mm, 根据方解石双晶纹密度、宽度与温度关系图

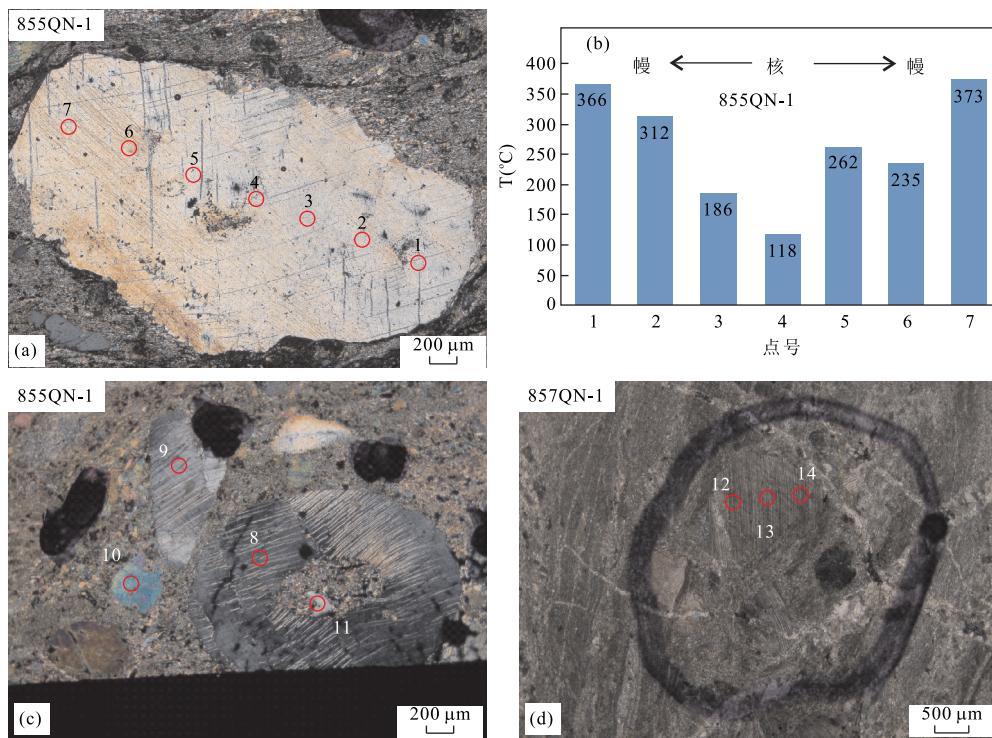


图 7 韧性剪切带内钙质糜棱岩方解石电子探针分析位置

Fig.7 The positions of electron probe analysis of calcite in calc-mylonites

图 b 中 1~7 点号是图 a 方解石颗粒

表 5 韧性剪切带内钙质糜棱岩中方解石双晶统计

Table 5 Electron probe composition (%) data and calculated temperature of calcite in calc-mylonites

样品号	颗粒数	平均双晶宽度(μm)	平均双晶密度(条/mm)	I型	II型	III型	IV型	估算 T_{\max} (℃)
795QN-1	37	1.43	51.6	16	21	0	0	170~200
855QN-1	57	2.57	32.9	18	23	15	1	>250
857QN-1	22	1.11	54.5	16	6	0	0	170~200

(图 8),岩石的变形温度应大于 200 ℃.局部方解石颗粒发生边界迁移式重结晶,侧面证明其变形温度局部高于 250 ℃ (Vernon, 1981).样品 795QN-1 和 857QN-1 方解石 e 双晶纹主要以 I 型和 II 型双晶纹为主(图 4a, 4g, 图 7d),边界宽而且直,平均双晶宽度小于 1.5 μm,平均双晶密度大于 50 条/mm,局部方解石晶纹扭折,主体显示 170~200 ℃ 的粗、细双晶纹共存,但 857QN-1 温度相对偏小,接近 170 ℃.钙质糜棱岩中方解石以残斑和基质形式出现,残斑眼球状或卵状,基质为泥晶微晶的方解石,显示岩石低温塑性流动特点,说明变形环境不超过绿片岩相.

6.3 长石石英变形行为对变形温度的指示

花岗质糜棱岩 852SJ-1 多具有残斑(图 4b, 4c),残斑 60% 左右,主要为斜长石,少量石英,大多

残斑被拉长成透镜状排列.残斑石英不规则眼球状,多亚颗粒化,发育有应力纹,波状消光,边部产生 BLG 重结晶,偶见 SGR 重结晶(Stipp *et al.*, 2002),部分新生石英颗粒被改造成 S 面理指示左行剪切.斜长石显微破裂,局部呈现强烈细粒化特征,多蚀变为云母,边界为港湾状,以脆性破裂和碎裂流动为主.云母呈细长条带形,发生扭曲,定向排列,常围绕残斑分布.部分残斑呈压扁拉长状,局部由石英细晶、长石和云母微晶形成压力影构造.基质 40% 左右,重结晶现象明显,成带状,表现出塑性流动特征.矿物组合为:石英+斜长石+微斜长石+黑云母,总体代表绿片岩相变形环境(300~400 ℃).此外,EBSD 石英组构优选方位也显示出低温—中温组构演化特征,与上述所得结果基本一致.

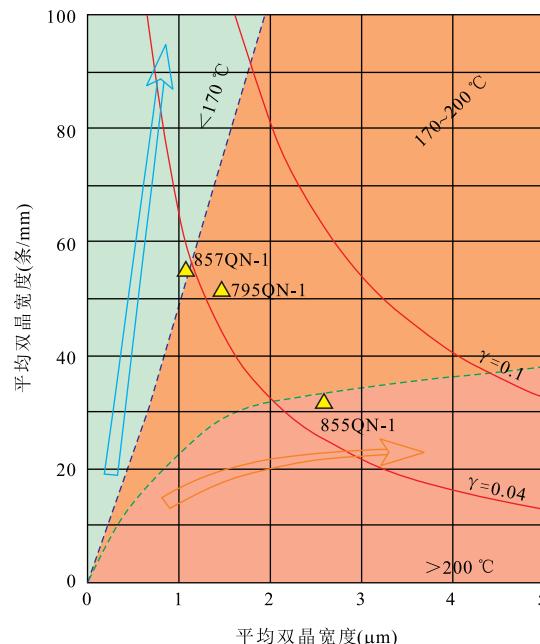


图 8 方解石双晶纹密度、宽度与温度关系

Fig.8 Relationship between density, width of calcite twin lamellae and temperature

据 Ferrill et al. (2004)

7 流变学参数估算

方解石是研究区的主要造岩矿物之一,它对构造应力比较敏感,是研究该地区韧性变形参数最直接、最重要的标志。

7.1 古差异应力值估算

大量岩石和矿物的流变实验,建立了岩石矿物各种显微构造特征与应力之间的函数关系,由此产生了相应的地质古应力计(Mercier et al., 1977; Twiss, 1977; Koch et al., 1989; Stipp et al., 2010),常用的方法有:重结晶颗粒大小法、亚颗粒大小法、方解石机械双晶法(Jamison and Spang, 1976; Mercier et al., 1977; Twiss, 1977; Poirier, 1985; Koch et al., 1989; Hacker et al., 1990)。

7.1.1 动态重结晶颗粒 实验研究表明,动态重结晶颗粒大小与应力大小有关,应力越大,晶粒越细。很多学者通过对石英、橄榄石等、方解石等矿物颗粒进行了大量的实验,从而确定了矿物重结晶颗粒大小与差异应力之间的关系式(Mercier et al., 1977; Twiss, 1977; Koch et al., 1989; Stipp et al., 2010):

$$\sigma = AD^{-m},$$

式中: D 为重结晶颗粒的粒径大小; A 、 m 均为常数,不同的矿物值不同。式中差异应力单位为 MPa,重结

晶颗粒直径单位为 μm 。

本文对钙质糜棱岩中重结晶细晶方解石颗粒进行古差异应力估算(Schmid et al., 1980),采用Twiss(1977)提出的适于方解石的参数 $m = 0.68$, $A = 750$ 。根据动态重结晶矿物晶颗粒粒径大小在显微镜照片中进行大量统计,获得劝农山地区糜棱岩形成时的差异应力应大致为 $51.27 \sim 65.46 \text{ MPa}$ (表 6),可能代表了剪切带糜棱岩化作用过程的差异应力下限(Hacker et al., 1990)。

7.1.2 方解石机械双晶法 方解石机械双晶是变形灰岩中常见的显微构造现象,根据方解石动力双晶化颗粒百分数可估算古应力大小(Spang and Lee, 1975; Jamison and Spang, 1976; 黄万夫, 1989; 范和平和谢明忠, 2006)。Jamison and Spang(1976)等在岩石变形试验基础上,建立了动力双晶化颗粒百分数与差异应力之间的函数关系:

$$\Delta\sigma = t_c / S_1,$$

其中: t_c 为临界剪应力,应变试验求得方解石的 t_c 值为 10 MPa , S_1 为分解应力系数与方解石颗粒的双晶化程度有关,可用曲线表示(Jamison and Spang, 1976)。在显微镜下统计出现的不同双晶组数,然后再求出每组双晶出现的百分率,查图得出 S_1 ,代入上式,便可迅速得到差异应力 σ 值(表 7)。

剪切带内钙质糜棱岩中不同程度地发育了方解石动力双晶,为估算区域构造应力值提供有利条件。样品应变强度中等,多发育一组双晶,两组双晶较少出现,基本不具有 3 组双晶。计算结果表明,本区古应力值在 $50.00 \sim 76.92 \text{ MPa}$ 之间(表 7),这一数值属于中等水平,结合宏观变形分析结果表明,本区构造变形强度中等。

7.2 应变速率估算

在中低温、中压条件下,岩石只有经受长期的应力作用,才能形成如此规模的韧性变形。可以用应变速率来衡量岩石受应力作用发生的应变速率(Poirier, 1985; Hacker et al., 1990; Boutonnet et al., 2013)。岩石流变实验研究表明,在稳态变形条件下,应变速率(ϵ)与温度(T)及差异应力(σ)的关系将遵循幂次定律:

$$\epsilon = A\sigma^n \exp[-Q/RT],$$

其中: ϵ 为应变速率(单位: s^{-1}); A 为实验参数(单位: $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); σ 为差异应力(单位: MPa); Q 为活化能(单位: $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$); T 为温度(单位: K);理想气体常数 $R = 8.314 \text{ JK}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。式中的 A 、 Q 、 n 等值,不同的矿物,其值不同,这些值代表了大量的

表 6 韧性剪切带内糜棱岩方解石古差应力及应变速率估算

Table 6 Estimation of Paleo-stress and strain rates

样品号	变形温度(℃)	统计颗粒数	动态重结晶颗粒平均粒度 粒径 $D(\mu\text{m})$	应力计(MPa) Twiss(1977) $\sigma = 750D^{-0.68}$	应变速率(s^{-1}) Heard and Raleich(1972)
795QN-1	80	40	40.3	60.74	$10^{-11.56}$
	200	40	40.3	60.74	$10^{-9.25}$
855QN-1	200	45	36.1	65.46	$10^{-8.98}$
	400	45	36.1	65.46	$10^{-6.95}$
857QN-1	80	40	51.7	51.27	$10^{-12.17}$
	200	40	51.7	51.27	$10^{-9.86}$

表 7 利用方解石 e 双晶发育程度估算古差异应力值

Table 7 Differential stress inferred by use of calcite e-twin lamellae

样品号	具有双晶颗粒的数目				双晶化颗粒百分数(%)		分解剪切应力系数 S_1		古差异应力值 σ (MPa)	
	一组双晶	两组双晶	不具双晶	颗粒总数	一组双晶	两组双晶	一组双晶	两组双晶	一组双晶	两组双晶
795QN-1	28	6	4	38	73.68	15.79	0.13	0.16	76.92	62.50
855QN-1	33	8	9	50	66.00	16.00	0.19	0.16	52.63	62.50
857QN-1	15	3	5	23	65.22	13.04	0.20	0.18	50.00	55.56

化学和晶体结构的变化因素(Mercier *et al.*, 1977)。根据实验资料,参考本区的温度、压力和差异应力值以及微观构造发育特征,我们取 $A = 6 \times 10^{-18}$ 、 $Q = 62000$ 、 $n = 8.3$ (Heard and Raleich, 1972),不同样品温度综合考虑,取可能的温度上下限,差异应力 σ 取 Twiss(1977)参数计算所得。考虑到在剪切带不同岩石部位差异应力值变化较大,我们选取 3 个代表性的差异应力值来计算应变速率。结果表明(表 6),在剪切作用过程中,各处的流动速率是不同的。强变形带,应变集中带样品 855QN-1 应变速率最大在 $10^{-6.95} \sim 10^{-8.89}$ 之间,远离强变形带样品 795QN-1 和 857QN-1 应变速率在 $10^{-9.25} \sim 10^{-12.17}$ 之间。考虑到方解石重结晶细晶颗粒在变形过程中颗粒粒径会增大,造成计算过程中流变应力低估和利用流变率公式估算应变速率普遍偏低现象(Twiss, 1977; Hacker, 1990)。自然变形是长期且缓慢的过程,一般自然界缓慢的地质作用的应变速率在 $10^{-10} \sim 10^{-18}$ 之间(Pfiffner and Ramsay, 1982)。综合考虑,劝农山地区韧性剪切带的应变速率偏高,可能为低温中等强度应变,在稍快的应变速率条件下形成的。

8 讨论

8.1 变形特征与流变学参数

剪切带内发育多种宏观韧性剪切变形标志,指示该区经历过强烈的左旋韧性剪切变形,岩石变形程度处于初糜棱岩至糜棱岩之间。方解石显示清

晰的细线型方解石 e 双晶,指示其变形温度为低温型,温度在 170 ℃左右。但局部钙质糜棱岩中可见透镜状的宽条带方解石 e 双晶,指示灰岩中局部变形温度可达到 200 ℃以上。战乃臣等(2016)对范家屯组剖面内泥岩、泥质粉砂岩 XRD 分析表明,该区泥质岩石变质温度可能为 200 ℃±,地层经历了成岩—低级变质作用,变质压力属于中低压,与本文研究结果基本一致。

方解石与石英 EBSD 组构图解,指示剪切带中变形岩石经历了低温(<400 ℃)韧性变形过程,组构对称性均指示明显的左行剪切特征。电子探针方解石—白云石地质温度计、方解石 e 双晶形态以及石英长石变形行为等均显示岩石低温塑性流动特点,变形环境不超过绿片岩相。

劝农山地区糜棱岩形成时的差异应力下限大致为 50.00~76.92 MPa。在剪切作用过程中,应变集中带应变速率最大,在 $10^{-6.95} \sim 10^{-8.89}$ 之间,远离强变形带应变速率在 $10^{-9.25} \sim 10^{-12.17}$ 之间。综合考虑,劝农山地区韧性剪切带的应变速率偏高,可能为低温中等强度应变,在稍快的应变速率条件下形成的。

8.2 变形机制

在范家屯组碳酸盐岩变形过程中,形成了压溶缝合线构造,表明发生了溶解扩散作用。强变形钙质糜棱岩中方解石颗粒多具有双晶,弱变形域内多发育一组双晶,应变积累和变形强度的增加,在强变形域内(如 855QN-1),可见二组细窄双晶纹,边界清晰,解理缝弯曲扭折,三组双晶较为少见。总体可能

指示一种中低温构造变形环境,双晶滑移是其主要形成机制。随着剪切带递进变形,应变累积,强应变形域局部方解石发育晶格位错、产生滑移,甚至少数颗粒边部形成亚颗粒,花岗质糜棱岩(如 852SJ-1)的石英出现波状消光和动态重结晶亚颗粒,少部分方解石颗粒周缘的细小重结晶方解石细晶,均是晶内滑移的表现。随着变形温度的升高(250~400 °C),递进变形过程中,方解石颗粒周缘部分被动态重结晶化,这些细粒的新生方解石颗粒在递进变形中以粒间滑移为主(Friedman and Higgs, 1981)。

综上所述,在劝农山剪切带变形不同阶段,复杂的变形组构是多种变形机制共同作用的结果。压溶扩散和双晶滑移是变形初期的主要变形机制,随着递进变形,逐渐以双晶滑移和晶内滑移为主,递进变形晚期,局部强变形域内发生了粒间滑移。

8.3 动力学背景

晚古生代末(P_3-T_1),华北板块与西伯利亚板块沿西拉木伦一线闭合(王玉净和樊志勇,1997;孙德有等,2004;周建波等,2009;刘永江等,2010;韩国卿等,2011;Liu *et al.*, 2017),产生区域上南北向挤压的应力场,劝农山地区残余的近 E-W 向面理构造,可能为这一构造事件的远程响应,但由于变形程度较弱,多数被后期 NE 向构造改造殆尽,仅残余部分 EW 向构造要素。古生物学者对范家屯组中的牙形刺进行了系统研究,发现了一些新的类别,认为其时代为 Wordian 或 Wordian 至 Capitanian 早期,为中二叠中晚期,时代与哲斯组相同,这一动物群处于二叠纪北温带,较温凉水域,处于西伯利亚板块与华北板块对接带之北(王成源等,2000,2014),也印证了这一结论。

中二叠范家屯组灰岩与侵入其中的燕山期花岗岩都遭受明显的 NE 向韧性剪切变形,指示主期变形晚于燕山期花岗岩侵位时间(早白垩世早期)。郯庐断裂带北段活动时间的年代学限定较少,但多数学者研究认为早白垩世早期应该存在一期韧性剪切变形事件(朱光等,2004a;孙晓猛等,2008),我们认为劝农山韧性剪切带变形带与舒兰韧性剪切带一样,应统一形成于一致的大地构造学背景之下(孟婧瑶等,2013;梁琛岳等,2015)。

西太平洋板块域向欧亚板块的俯冲对中国东部地区中生代的构造起着至关重要的作用。在早白垩世中期,伊泽纳崎板块依旧高斜度 NNW 斜向俯冲于欧亚大陆之下(Maruyama and Send, 1986; 刘金龙等,2015),使中国东部地区呈现左旋压扭及活动

大陆边缘环境,形成以郯庐断裂为主的一系列的 NNE 向走滑断裂带及同期的岩浆活动。结合众多学者相关研究成果(陈丕基,1988;朱光等,2004a, 2004b, 2006; 孙晓猛等, 2006, 2008, 2010; 孟婧瑶等, 2013),认为在早白垩世中晚期劝农山地区经历了左行韧性剪切活动,与早白垩世中晚期西太平洋—伊泽纳崎板块 NNW 向高斜度斜向俯冲于欧亚大陆之下有关,是佳—伊断裂带左旋走滑事件的局部表现。

9 结论

(1)周家窑地区韧性剪切带具有多种宏微观韧性剪切变形标志,岩石变形程度处于初糜棱岩至糜棱岩之间,具有左行剪切的特征。

(2)糜棱岩石应变类型主要为压扁型应变,偏一般压缩,为 L=S 型构造岩,形成于挤压型剪切带的构造环境。

(3)电子探针方解石—白云石地质温度计、方解石和石英 EBSD 组构特征、方解石 e 双晶形态以及石英长石变形行为等均显示岩石低温塑性流变特点,变形环境不超过绿片岩相。

(4)劝农山韧性剪切带的应变速率偏高,应变集中带应变速率最大在 $10^{-6.95} \sim 10^{-8.89}$ 之间,远离强变形带应变速率在 $10^{-9.25} \sim 10^{-12.17}$ 之间,糜棱岩化作用过程中差异应力下限应大致为 51.27~65.46 MPa,可能代表剪切带糜棱岩化作用为低温中等强度应变,在稍快的应变速率条件下形成的。

(5)压溶扩散和双晶滑移为劝农山韧性剪切带变形初期的主要变形机制,随着递进变形,逐渐以双晶滑移和晶内滑移为主,在递进变形晚期,局部强变形域内发生了粒间滑移。

(6)劝农山韧性剪切带形成与早白垩世中晚期西太平洋—伊泽纳崎板块 NNW 向高斜度斜向俯冲于欧亚大陆之下有关,是佳—伊断裂带左旋走滑事件的局部表现。

致谢:感谢中国地质大学(北京)刘俊来教授在 EBSD 岩组分析测试方面给予的帮助,感谢研究生周泉在电子探针测试方面的帮助,感谢两位匿名审稿人对稿件的审阅。

References

- Anovitz, L. M., Essene, E. J., 1987. Phase Equilibria in the System $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3\text{-FeCO}_3$. *Journal of Petrology*,

- 28(2):389—415.doi:10.1093/petrology/28.2.389
- Bestmann, M., Prior, D.J., Grasemann, B., 2006. Characterisation of Deformation and Flow Mechanics around Porphyroclasts in a Calcite Marble Ultramylonite by Means of EBSD Analysis. *Tectonophysics*, 413(3—4): 185—200.doi:10.1016/j.tecto.2005.10.044
- Boutonnet, E., Leloup, P. H., Sassier, C., et al., 2013. Ductile Strain Rate Measurements Document Long-Term Strain Localization in the Continental Crust. *Geology*, 41(8): 819—822.doi:10.1130/g33723.1
- Brodie, K. H., Rutter, E. H., 1985. On the Relationship between Deformation and Metamorphism, with Special Reference to the Behavior of Basic Rocks. *Advances in Physical Geochemistry*, 8: 138—179.doi:10.1007/978-1-4612-5066-1_6
- Burkhard, M., 1993. Calcite Twins, Their Geometry, Appearance and Significance as Stress-Strain Markers and Indicators of Tectonic Regime: A Review. *Journal of Structural Geology*, 15(3—5): 351—368.doi:10.1016/0191-8141(93)90132-t
- Cao, S.Y., Liu, J.L., 2006. Modern Techniques for the Analysis of Rock Microstructure: EBSD and Its Application. *Advances in Earth Science*, 21(10): 1091—1096 (in Chinese with English abstract).
- Chen, P.J., 1988. Age and Pattern of Huge Parallel Move of the Tancheng-Lujiang Fault Zone. *Chinese Science Bulletin*, 33(4): 289—293 (in Chinese).
- Craddock, J.P., McKiernan, A. W., de Wit, M. J. D., 2007. Calcite Twin Analysis in Syntectonic Calcite, Cape Fold Belt, South Africa: Implications for Fold and Cleavage Formation within a Shallow Thrust Front. *Journal of Structural Geology*, 29(7): 1100—1113.doi:10.1016/j.jsg.2007.03.013
- Dou, L. R., Song, J. G., Wang, Y., 1996. Chronology of the Formation of the Northern Tan-Lu Fault Zone and Its Implications. *Geological Review*, 42(6): 508—512 (in Chinese with English abstract).
- Fan, H.P., Xie, M.Z., 2006. An Analysis of Microstructures in Handan-Fengfeng Mining Area. *Coal Geology of China*, 18(4): 15—17, 65 (in Chinese with English abstract).
- Ferrill, D. A., 1991. Calcite Twin Widths and Intensities as Metamorphic Indicators in Natural Low-Temperature Deformation of Limestone. *Journal of Structural Geology*, 13(6): 667—675.doi:10.1016/0191—8141(91)90029-i
- Ferrill, D.A., Morris, A.P., Evans, M.A., et al., 2004. Calcite Twin Morphology: A Low-Temperature Deformation Geothermometer. *Journal of Structural Geology*, 26(8): 1521—1529.doi:10.1016/j.jsg.2003.11.028
- Friedman, M., Higgs, N.G., 1981. Calcite Fabrics in Experimental Shear Zones, in Mechanical Behavior of Crustal Rocks: The Handin Volume. American Geophysical Union, Washington, D. C., 11—27. doi: 10.1029/GM024p0011
- Hacker, B.R., Yin, A., Christie, J.M., et al., 1990. Differential Stress, Strain Rate, and Temperatures of Mylonitization in the Ruby Mountains, Nevada: Implications for the Rate and Duration of Uplift. *Journal of Geophysical Research*, 95(B6): 8569.doi:10.1029/jb095ib06p08569
- Han, G.Q., Liu, Y.J., Wen, Q.B., et al., 2011. LA-ICP-MS U-Pb Dating of Detrital Zircons from the Permian Sandstones in North Side of Xar Moron River Suture Belt and Its Tectonic Implications. *Earth Science*, 36(4): 687—702 (in Chinese with English abstract).
- Heard, H.C., Raleigh, C.B., 1972. Steady-State Flow in Marble at 500 °C to 800 °C. *Geological Society of America Bulletin*, 83(4): 935.doi: 10.1130/0016-7606(1972)83[935:sfimat]2.0.co;2
- Hu, D., Ren, S. L., Song, C. Z., et al., 2015. The Analysis on Metamorphic and Deformation Characteristics and Formation Environment of Carbonate Mylonite of Taowan Group in East Qinling. *Geological Review*, 61(5): 1079—1088 (in Chinese with English abstract).
- Hu, L., Liu, J. L., Ji, M., et al., 2009. Deformation of Microscopic Structure Identification Manual. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Huang, W.F., 1989. An Investigation on the Microstructures within Flow Carbonates in West-Hills, Beijing. *Geoscience*, 3(2): 223—234 (in Chinese with English abstract).
- Jamison, W. R., Spang, J. H., 1976. Use of Calcite Twin Lamellae to Infer Differential Stress. *Geological Society of America Bulletin*, 87(6): 868.doi:10.1130/0016—7606(1976)87<868:uoctlt>2.0.co;2
- Jiang, F. H., 1988. A Discussion on Principal Stress Orientation of Xiaoguan Thrust by Using of {0112} Twin Lamellae and Host-Crystal Optic Axes of Calcite. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 15(2): 48—56, 99 (in Chinese with English abstract).
- Kennedy, L.A., Logan, J. M., 1998. Microstructures of Cataclasites in a Limestone-on-Shale Thrust Fault: Implications for Low-Temperature Recrystallization of Calcite. *Tectonophysics*, 295(1—2): 167—186.doi: 10.1016/s0040-1951(98)00119-x

- Koch, P.S., Christie, J.M., Ord, A., et al., 1989. Effect of Water on the Rheology of Experimentally Deformed Quartzite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94 (B10): 13975–13996. doi: 10.1029/jb094ib10p13975
- Li, J. Y., 1986. A Preliminary Study on the Ancient Suture Zone between the North China Plate and the Siberia Plate in the East of Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 31 (14): 1093–1096 (in Chinese).
- Li, X.B., Pei, X.Z., Liu, C.J., et al., 2014. Ductile Shearing in the Eastern Segment of Central Kunlun Tectonic Belt and Its Geological Significance. *Geology in China*, 41 (2): 419–436 (in Chinese with English abstract).
- Liang, C.Y., Liu, Y.J., Li, W.M., et al., 2016. Ductile Deformation and Rock Rheological Characteristics from Southern Yiwulüshan Metamorphic Core Complex. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2656–2676 (in Chinese with English abstract).
- Liang, C. Y., Liu, Y. J., Meng, J. Y., et al., 2015. Strain and Fractal Analysis of Dynamically Recrystallized Quartz Grains and Rheological Parameter Estimation of Shulan Ductile Shear Zone. *Earth Science*, 40(1): 115–129 (in Chinese with English abstract).
- Liang, C., Liu, Y., Neubauer, F., et al., 2015. Structures, Kinematic Analysis, Rheological Parameters and Temperature-Pressure Estimate of the Mesozoic Xingcheng-Taili Ductile Shear Zone in the North China Craton. *Journal of Structural Geology*, 78: 27–51. doi: 10.1016/j.jsg.2015.06.007
- Liu, J.L., 2004. Flow and Microstructural Evolution of Rocks in the Upper Crust: Evidence from Naturally and Experimentally Deformed Rocks. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 503–509 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J.L., Cao, S.Y., Zou, Y.X., et al., 2008. EBSD Analysis of Rock Fabrics and Its Application. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1638–1645 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Sun, F. Y., Lin, B. L., et al., 2015. Geochronology, Geochemistry and Zircon Hf Isotope of Miantian Granodiorite Intrusion in Yanbian Region, Southern Jinlin Province and its Geological Significance. *Earth Science*, 40(1): 49–60 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Walter, J. M., Weber, K., 2002. Fluid-Enhanced Low-Temperature Plasticity of Calcite Marble: Microstructures and Mechanisms. *Geology*, 30(9): 787. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0787:feltpo>2.0.co;2
- Liu, Y.J., Li, W.M., Feng, Z.Q., et al., 2017. A Review of the Paleozoic Tectonics in the Eastern Part of Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 43: 123–148. doi: 10.1016/j.gr.2016.03.013
- Liu, Y. J., Zhang, X. Z., Jin, W., et al., 2010. Late Paleozoic Tectonics Evolution in Northeast China. *Geology in China*, 37(4): 943–951 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S.L., Ma, J., 1987. Experience of Quartz and Calcite on Deformation Fabric of Share Zone. *Seismology and Geology*, 9(4): 1–12 (in Chinese).
- Maruyama, S., Send, T., 1986. Orogeny and Relative Plate Motions: Example of the Japanese Islands. *Tectonophysics*, 127(3–4): 305–329. doi: 10.1016/0040-1951(86)90067-3
- Meng, J.Y., Liu, Y.J., Liang, C.Y., et al., 2013. Characteristics of Ductile Deformation of Jiamusi-Yitong Fault. *Global Geology*, 32(4): 800–807 (in Chinese with English abstract).
- Mercier, J.C.C., Anderson, D.A., Carter, N.L., 1977. Stress in the Lithosphere: Inferences from Steady State Flow of Rocks. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 115 (1–2): 199–226. doi: 10.1007/bf01637104
- Pfiffner, O.A., Ramsay, J.G., 1982. Constraints on Geological Strain Rates: Arguments from Finite Strain States of Naturally Deformed Rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87(B1): 311–321. doi: 10.1029/jb087ib01p00311
- Poirier, J.P., 1985. Creep of Crystals: High-Temperature Deformation Processes in Metals, Ceramics and Minerals. Cambridge University Press, New York.
- Ramsay, J.G., 1980. Shear Zone Geometry: A Review. *Journal of Structural Geology*, 2(1–2): 83–99. doi: 10.1016/0191-8141(80)90038-3
- Rice, J.M., 1977. Progressive Metamorphism of Impure Dolomitic Limestone in the Marysville Aureole, Montana. *American Journal of Science*, 277(1): 1–24. doi: 10.2475/ajs.277.1.1
- Schmid, S.M., Paterson, M.S., Boland, J.N., 1980. High Temperature Flow and Dynamic Recrystallization in Carrara Marble. *Tectonophysics*, 65(3–4): 245–280. doi: 10.1016/0040-1951(80)90077-3
- Sheppard, S. M. F., Schwarcz, H. P., 1970. Fractionation of Carbon and Oxygen Isotopes and Magnesium between Coexisting Metamorphic Calcite and Dolomite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 26(3): 161–198. doi: 10.1007/bf00373200
- Song, C.Z., Chai, N.X., Qian, D.L., 1995. The Regulation of Progressive Deformation on Calcite Fabric in Stretch State. *Northwest Geoscience*, (2): 23–28 (in Chinese with English abstract).
- Song, H.L., 1982. A Graphic Method for Calculating the Di-

- rection of the Principal Compressive Stress from E-Twinning in Calcite. *Earth Science*, 18(3):179—187, 341 (in Chinese with English abstract).
- Spang, J. H., van der Lee, J. V. D., 1975. Numerical Dynamic Analysis of Quartz Deformation Lamellae and Calcite and Dolomite Twin Lamellae. *Geological Society of America Bulletin*, 86 (9): 1266. doi: 10.1130/0016-7606(1975)86<1266:ndaoqd>2.0.co;2
- Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., et al., 2002. The Eastern Tonale Fault Zone: A “Natural Laboratory” for Crystal Plastic Deformation of Quartz over a Temperature Range from 250 to 700 °C. *Journal of Structural Geology*, 24(12):1861—1884.
- Stipp, M., Tullis, J., Scherwath, M., et al., 2010. A New Perspective on Paleopiezometry: Dynamically Recrystallized Grain Size Distributions Indicate Mechanism Changes. *Geology*, 38(8):759—762. doi:10.1130/g31162.1
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Zhang, Y. B., et al., 2004. The Final Closing Time of the West Lamulun River-Changchun-Yanji Plate Suture Zone—Evidence from the Dayushan Granitic Pluton, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34 (2): 174—181 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. M., Liu, Y. J., Sun, Q. C., et al., 2008.⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology Evidence of Strike-Slip Movement in Dunhua-Mishan Fault Zone. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38 (6): 965—972 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. M., Long, S. X., Zhang, M. S., et al., 2006. Discovery and Timing of Major Thrustbelt in Jiamusi-Yitong Fault Zone. *Oil & Gas Geology*, 27 (5): 637—643 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. M., Wang, S. Q., Wang, Y. D., et al., 2010. The Structural Feature and Evolutionary Series in the Northern Segment of Tancheng-Lujiang Fault Zone. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1):165—176 (in Chinese with English abstract).
- Twiss, R. J., 1977. Theory and Applicability of a Recrystallized Grain Size Paleopiezometer. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 115 (1—2): 227—244. doi: 10.1007/bf01637105
- Vernon, R. H., 1981. Optical Microstructure of Partly Recrystallized Calcite in Some Naturally Deformed Marbles. *Tectonophysics*, 78(1—4): 601—612. doi: 10.1016/0040-1951(81)90031-7
- Vitale, S., Mazzoli, S., 2010. Strain Analysis of Heterogeneous Ductile Shear Zones Based on the Attitudes of Planar Markers. *Journal of Structural Geology*, 32(3):321—329. doi:10.1016/j.jsg.2010.01.002
- Wan, T. F., Zhu, H., 1996. The Maximum Sinistral Strike-Slip and Its Forming Age of Tancheng-Lujiang Fault Zone. *Geological Journal of Universities*, 2 (1): 14—27 (in Chinese with English abstract).
- Wan, T. F., Zhu, H., Zhao, L., et al., 1996. Formation and Evolution of Tancheng-Lujiang Fault Zone: A Review. *Geoscience—Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 10 (2): 159—168 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Lang, J. B., Zhou, X. D., et al., 2014. Progress and Problems in the Study of Conodont Biostratigraphy in Jilin Province. *Journal of Stratigraphy*, 38(3):299—304 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Zheng, C. Z., Peng, Y. J., et al., 2000. A Conodont Fauna of Permian Northern Temperate Zone from the Fanjiatun Formation at Lijiayao, Jilin. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 17 (4): 430—442 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. Q., Sun, X. M., Du, J. Y., et al., 2012. Analysis of Structural Styles in Northern Segment of Tancheng-Lujiang Fault Zone. *Geological Review*, 58 (3): 414—425 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, Z. Y., 1997. Discovery of Permian Radiolarians in Ophiolite Belt on Northern Side of Xar Moron River, Nei Monggol and Its Geological Significance. *Acta Palaeontologica Sinica*, 36(1):60—71 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. S., Xiang, B. W., Zhu, G., et al., 2011. Structural and Geochronological Evidence for Early Cretaceous Orogen-Parallel Extension of the Ductile Lithosphere in the Northern Dabie Orogenic Belt, East China. *Journal of Structural Geology*, 33(3):362—380. doi:10.1016/j.jsg.2010.09.002
- Wei, B., Pei, X. Z., Liu, C. J., et al., 2015. Structural Deformation of Xinyang-Yuanlong Ductile Shear Zone in Tian-shui Area, Western Qinling Mountains, and Its Geological Significance. *Geology in China*, 42(1):51—70 (in Chinese with English abstract).
- Wei, H., Qu, T. X., 1994. A Discussion Some Problems about Paleostress Analysis with e-Twin of Calcite. *Shanxi Mining Institute Learned Journal*, 12(4):329—334 (in Chinese with English abstract).
- Xia, H. R., Liu, J. L., 2011. The Crystallographic Preferred Orientation of Quartz and Its Applications. *Geological Bulletin of China*, 30(1):58—70 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, B. W., Zhu, G., Wang, Y. S., et al., 2007. Mineral De-

- formation Thermometer for Mylonitization. *Advances in Earth Science*, 22(2): 126—135 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. J., Jin, S. Y., Zheng, B. R., 2007. New Technique of Petrofabric: Electron Backscatter Diffraction (EBSD). *Geoscience*, 21(2): 213—225 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. W., Ma, G. F., 2012. Review of Ten Years (1981—1991) of Research on the Tancheng-Lujiang Fault Zone. *Geological Review*, 38(4): 316—324 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Cai, Z. H., Zhang, Z. M., et al., 2008. Tectonics and Fabric Kinematics of the Namche Barwa Terrane, Eastern Himalayan Syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1463—1476 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Wang, Q., Liang, F. H., et al., 2009. Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Technique and Its Application to Study of Continental Dynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1721—1736 (in Chinese with English abstract).
- Yan, S. Y., Zhang, B., Zhang, J. J., et al., 2016. Calcite Twins as a Tool for the Estimation of Paleostress Orientation on the Basis of Electron Backscatter Diffraction (EBSD) Technique. *Geological Science and Technology Information*, 35(4): 50—54 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Li, J. S., Zhang, P., 1988. The Characteristics of the Deformation of Calcite from Central Nanling Mt. and Its Geological Significance. *Bull. Yichang Inst. Geol. Mineral Resources*, CAGS, 13: 81—92 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. Y., 2005. On the Studies of Ductile Shear Zones: Their Geological Significance. *Advances in Earth Science*, 20(7): 765—771 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.T., 1985. The Microstructures of the Deformed Minerals and Their Research Methods. *Northwestern Geology*, 6: 28—42 (in Chinese with English abstract).
- Yao, D. Q., Zhai, H. T., 2004. Experimental Research of Microcosmic Indicator of Temperature Reversion Zero of Calcite's Deformation and Discussion of Correlation Problem. *Earthquake Research in China*, 20(3): 269—275 (in Chinese with English abstract).
- Zhan, N.C., Hu, D.Q., Sun, G.S., et al., 2016. The Genetic Criteria of Clay Minerals in the Middle Permian Fanjiatun Formation, Eastern Changchun. 2016 National Symposium on Mineral Science and Engineering, 56 (in Chinese).
- Zhang, K.X., Pan, G.T., He, W.H., et al., 2015. New Division of Tectonic-Strata Superregion in China. *Earth Science*, 40(2): 206—233 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, B.R., Jin, S.Y., 1989. *Petrotectonics: Preferred Orientation in Deformed Rocks*. China University of Geosciences Press, Wuhan, 98—180 (in Chinese).
- Zheng, Y. D., Chang, Z. Z., 1995. *Finite Strain Measurement and Ductile Shear Zones*. Geological Publishing House, Beijing, 103—174 (in Chinese).
- Zhong, Z.Q., Guo, B.L., 1991. *Tectonite and Microstructure*. China University of Geosciences Press, Wnhan, 95—102 (in Chinese).
- Zhou, J. B., Zhang, X. Z., Ma, Z. H., et al., 2009. Tectonic Framework and Basin Evolution in Northeast China. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 530—538 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Liu, G.S., Dunlap, W.J., et al., 2004a. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronological Constraints on Syn-Orogenic Strike-Slip Movement of Tan-Lu Fault Zone. *Chinese Science Bulletin*, 49(5): 499—508. doi: 10.1007/bf02900972
- Zhu, G., Wang, D.X., Liu, G.S., et al., 2004b. Evolution of the Tan-Lu Fault Zone and Its Responses to Plate Movements in West Pacific Basin. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 36—49 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Xu, Y.D., Liu, G.S., et al., 2006. Structural and Deformational Characteristics of Strike-Slippings along the Middle-Southern Sector of the Tan-Lu Fault Zone. *Chinese Journal of Geology*, 41(2): 226—241, 255 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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(10): 1091—1096.
- 陈丕基, 1988. 郯庐断裂巨大平移的时代与格局. 科学通报, 33(4): 289—293.
- 窦立荣, 宋建国, 王瑜, 1996. 郯庐断裂带北段形成的年代学及其意义. 地质论评, 42(6): 508—512.
- 范和平, 谢明忠, 2006. 邯郸一峰峰矿区显微构造分析. 中国煤田地质, 18(4): 15—17, 65.
- 韩国卿, 刘永江, 温泉波, 等, 2011. 西拉木伦河缝合带北侧二叠纪砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义. 地球科学, 36(4): 687—702.
- 胡达, 任升莲, 宋传中, 等, 2015. 东秦岭陶湾岩群碳酸盐质糜棱岩的变质—变形特征及形成环境分析. 地质论评, 61(5): 1079—1088.
- 胡玲, 刘俊来, 纪沫, 等, 2009. 变形显微构造识别手册. 北京: 地质出版社, 1—83.
- 黄万夫, 1989. 北京西山流动变形碳酸盐岩的微构造分析. 现代地质, 3(2): 223—234.

- 江富华,1988.从断层岩中方解石的{0112}双晶及主晶光轴探讨小关冲断层的主应力方位.成都地质学院学报,15(2):48—56,99.
- 李锦轶,1986.内蒙古东部中朝板块与西伯利亚板块之间古缝合带的初步研究.科学通报,31(14):1093—1096.
- 李小兵,裴先治,刘成军,等,2014.东昆仑东段东昆中构造带韧性剪切作用及其地质意义.中国地质,41(2):419—436.
- 梁琛岳,刘永江,李伟民,等,2016.医巫闾山变质核杂岩南段韧性变形与流变特征.岩石学报,32(9):2656—2676.
- 梁琛岳,刘永江,孟婧瑶,等,2015.舒兰韧性剪切带应变分析及石英动态重结晶颗粒分形特征与流变参数估算.地球科学,40(1):115—129.
- 刘俊来,2004.上部地壳岩石流动与显微构造演化——天然与实验岩石变形证据.地学前缘,11(4):503—509.
- 刘俊来,曹淑云,邹运鑫,等,2008.岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用.地质通报,27(10):1638—1645.
- 刘金龙,孙丰月,林博磊,等,2015.吉林延边地区棉田岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素.地球科学,40(1):49—60.
- 刘永江,张兴洲,金巍,等,2010.东北地区晚古生代区域构造演化.中国地质,37(4):943—951.
- 马胜利,马瑾,1987.石英和方解石剪切带变形组构的实验研究.地震地质,9(4):1—12.
- 孟婧瑶,刘永江,梁琛岳,等,2013.佳—伊断裂带韧性变形特征.世界地质,32(4):800—807.
- 宋传中,柴乃序,钱德玲,1995.拉张状态下方解石组构的递进变形规律.西北地质科学,(2):23—28.
- 宋鸿林,1982.利用方解石的 E 双晶定主压应力轴方向的图解法.地球科学,18(3):179—187,341.
- 孙德有,吴福元,张艳斌,等,2004.西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据.吉林大学学报:地球科学版,34(2):174—181.
- 孙晓猛,刘永江,孙庆春,等,2008.敦密断裂带走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学证据.吉林大学学报:地球科学版,38(6):965—972.
- 孙晓猛,龙胜祥,张梅生,等,2006.佳木斯—伊通断裂带大型逆冲构造带的发现及形成时代.石油与天然气地质,27(5):637—643.
- 孙晓猛,王书琴,王英德,等,2010.郯庐断裂带北段构造特征及构造演化序列.岩石学报,26(1):165—176.
- 万天丰,朱鸿,1996.郯庐断裂带的最大左行走滑断距及其形成时期.高校地质学报,2(1):14—27.
- 万天丰,朱鸿,赵磊,等,1996.郯庐断裂带的形成与演化:综述.现代地质,10(2):159—168.
- 王成源,郎嘉彬,周晓东,等,2014.吉林省牙形刺生物地层研究的进展与问题.地层学杂志,38(3):299—304.
- 王成源,郑春子,彭玉鲸,等,2000.吉林李家窑范家屯组中的二叠纪北温带牙形刺动物群.微体古生物学报,17(4):430—442.
- 王书琴,孙晓猛,杜继宇,等,2012.郯庐断裂带北段构造样式解析.地质论评,58(3):414—425.
- 王玉净,樊志勇,1997.内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义.古生物学报,36(1):60—71.
- 魏博,裴先治,刘成军,等,2015.西秦岭天水地区新阳—元龙韧性剪切带构造变形特征及其地质意义.中国地质,42(1):51—70.
- 卫宏,渠天祥,1994.方解石 e 双晶法求解古应力若干问题探讨.山西矿业学院学报,12(4):329—334.
- 夏浩然,刘俊来,2011.石英结晶学优选与应用.地质通报,30(1):58—70.
- 向必伟,朱光,王勇生,等,2007.糜棱岩化过程中矿物变形温度计.地球科学进展,22(2):126—135.
- 徐海军,金淑燕,郑伯让,2007.岩石组构学研究的最新技术——电子背散射衍射(EBSD).现代地质,21(2):213—225.
- 徐嘉炜,马国锋,1992.郯庐断裂带研究的十年回顾.地质论评,38(4):316—324.
- 许志琴,蔡志慧,张泽明,等,2008.喜马拉雅东构造结——南迦巴瓦构造及组构运动学.岩石学报,24(7):1463—1476.
- 许志琴,王勤,梁凤华,等,2009.电子背散射衍射(EBSD)技术在大陆动力学研究中的应用.岩石学报,25(7):1721—1736.
- 闫淑玉,张波,张进江,等,2016.基于 EBSD 技术利用方解石双晶恢复古应力方向的研究.地质科技情报,35(4):50—54.
- 杨杰华,李劲松,张萍,1988.南岭中段方解石的变形特征及其意义.中国地质科学院宜昌地质矿产研究所刊,13:81—92.
- 杨晓勇,2005.论韧性剪切带研究及其地质意义.地球科学进展,20(7):765—771.
- 杨钟堂,1985.变形矿物的显微构造及其研究方法.西北地质,18(6):28—42.
- 姚大全,翟洪涛,2004.方解石变形温度回零微观标志的实验研究和相关问题讨论.中国地震,20(3):269—275.
- 战乃臣,胡大千,孙国胜,等,2016.长春东部中二叠统范家屯组黏土矿物成因标志.2016 年全国矿物科学与工程学术研讨会,56.
- 张克信,潘桂棠,何卫红,等,2015.中国构造—地层大区划分新方案.地球科学,40(2):206—233.
- 郑伯让,金淑燕,1989.构造岩组学:变形岩石的优选方位.武汉:中国地质大学出版社,98—180.

郑亚东,常志忠,1985.岩石有限应变测量及韧性剪切带.北京:地质出版社,103—174.

钟增球,郭保罗,1991.构造岩与显微构造.武汉:中国地质大学出版社,95—102.

周建波,张兴洲,马志红,等,2009.中国东北地区的构造格局与盆地演化.石油与天然气地质,30(5):530—538.

朱光,刘国生,W.J.Dunlap,等,2004a.郯庐断裂带同造山走

滑运动的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学证据.科学通报,49(2):190—198.

朱光,王道轩,刘国生,等,2004b.郯庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应.地质科学,39(1):36—49.

朱光,徐佑德,刘国生,等,2006.郯庐断裂带中—南段走滑构造特征与变形规律.地质科学,41(2):226—241,255.

* * * * *

《地球科学》两期刊入选年度“国际影响力品牌期刊”

在目前举行的“2017 中国学术期刊未来论坛”上,《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、中国学术文献国际评价研究中心和清华大学图书馆发布了最新一期“《中国学术期刊国际引证年报》”,由我校主办的《地球科学》和《Journal of Earth Science》均进入 2017 年“中国国际影响力品牌期刊(自然科学与工程技术)”的前 10%,入选“国际影响力品牌期刊”;其中《Journal of Earth Science》进入前 5%,入选“中国最具国际影响力学术期刊”。

《中国学术期刊国际引证年报》以 2016 年出版的国际主流学术期刊文献为统计源,包括 Web of Science 收录的 SCI 期刊、SSCI 和 A & HCI 期刊,ESCI 期刊,增补期刊,共计 20 192 种。中国出版的有 6 210 种学术期刊,将其分为自然科学与工程技术、人文社科两个类别,分别计算“期刊影响力指数(CI)”,综合期刊国际他引影响因子(IF)、国际他引总被引频次(TC)、期刊量效指数(JMI)等进行评定,按照 CI 排序,遴选出 TOP10% 以内的期刊为“国际影响力品牌期刊”。该年报连续 6 年的统计数据表明,“国际影响力品牌期刊”不仅国内影响力表现优秀,国际影响力也在不断提升,且各项评价指标均值远高于其他期刊。