

doi:10.3799/dqkx.2017.140

# 辽吉裂谷带北缘连山关韧性剪切带的构造属性和运动学分析

常瑞虹<sup>1</sup>, 李伟民<sup>1,2</sup>, 刘永江<sup>1,2,3\*</sup>, 梁琛岳<sup>1,2</sup>, 李婧<sup>1</sup>, 张丽<sup>5</sup>, 刘昕悦<sup>1</sup>, 范文亮<sup>4</sup>

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 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. 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 吉林长春 130061

4. 长春黄金研究院, 吉林长春 130012

5. 沈阳地质调查中心, 辽宁沈阳 110034

**摘要:** 韧性剪切带在岩石圈地壳中广泛存在, 蕴含应力、应变和温压等环境参数, 是构造解析、流变学和成因机制研究的重要对象。辽吉裂谷带位于辽宁东部—吉林南部, 是华北克拉通重要的古元古代活动带之一。连山关岩体地处辽吉裂谷带北缘, 经历复杂变质变形作用, 岩体南缘发育 NWW 向右行走滑韧性剪切带。糜棱岩显微结构观测分析揭示, 剪切带内糜棱岩以 S、SL 构造岩为主, 总体呈压扁型应变。运动学涡度值为 0.91~0.97, 均大于 0.75, 指示简单剪切为主的变形特征。糜棱岩中云母显示塑性拉长, 石英动态重结晶明显, 以膨凸重结晶作用为主。EBSD 分析结果表明, 石英发育中低温菱面组构, 对应变形温度 450~550 °C, 暗示糜棱岩形成于低绿片岩相—低角闪岩相。结合前人研究成果, 我们认为连山关韧性剪切带可能起源于早元古代晚期。连山关岩体先后经历早期隆起造成的伸展—滑脱作用和晚期与上覆辽河群共同经历的南北向挤压, 从而在岩体南缘形成陡倾的右行韧性剪切带。

**关键词:** 连山关岩体; 韧性剪切带; 有限应变分析; 组构分析; 运动学; 辽吉裂谷带; 构造。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2017)12-2193-15

收稿日期: 2017-03-08

## Structural Properties and Kinematic Analysis of Lianshanguan Ductile Shear Zone in Northern Liao-Ji Rift Zone, Northeastern North China Craton

Chang Ruihong<sup>1</sup>, Li Weimin<sup>1,2</sup>, Liu Yongjiang<sup>1,2,3\*</sup>, Liang Chenyue<sup>1,2</sup>, Li Jing<sup>1</sup>, Zhang Li<sup>5</sup>, Liu Xinyue<sup>1</sup>, Fan Wenliang<sup>4</sup>

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, Changchun 130061, China

3. Key laboratory for Evolution of Past Life and Environment in Northeast Asia, Ministry of Education, Changchun 130026, China

4. Changchun Gold Research Institute, Changchun 130012, China

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

**Abstract:** The ductile shear zone is widely discovered in the lithospheric crust, and it contains abundance environmental parameters such as stress, strain temperature and pressure, hence it is an important object for the study of structural analysis, rheology and genetic mechanism. The Liao-Ji rift zone is one of the ancient primitive activities of the North China craton, located in the east of Liaoning Province and North of Jilin Province. The Lianshanguan granitic body, exposed in the Northern margin of Liao-Ji rift zone, experienced complex metamorphic deformation. The mylonitic in the ductile shear zone have obvious dextral strike-slip characteristics with an NWW strike. The observation and analysis of the microstructure of mylonitic reveals that the taconite developed in shear zone is S-SL type, representing a flattening strain. Kinematics vorticity of 0.91—0.97, which are greater than 0.75, indicates that the shearing is formed in the general shear dominated simple shear. In addition, The quartz dynamic recrystallization is obvious, while the mica shows plastic elongation. The quartz c-axis EBSD analysis shows that the quartz fabric is characterized by the middle to low temperature rhomb slip

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(No.41230206); 国家重点研发计划项目(No.2016YFC0600108-02); 国家自然科学基金资助项目(No.41672185)。  
**作者简介:** 常瑞虹(1992—), 女, 硕士, 构造地质学, ORCID: 0000-0002-1326-3622. E-mail: 1901386894@qq.com

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

**引用格式:** 常瑞虹, 李伟民, 刘永江, 等, 2017. 辽吉裂谷带北缘连山关韧性剪切带的构造属性和运动学分析. 地球科学, 42(12): 2193—2207.

system, corresponding deformation temperature of 450—550 °C, consistent with a greenschist-low amphibolite facies condition. Based on the previous studies, the forming age of the ductile shear deformation is considered to be the late Early Proterozoic. In conclusion, the Lianshanguan granitic body suffered an initial uplift stage, resulting extension-stretching-decollement within the Liaohe Formation surrounding the granitic body. Subsequently, the studied area was suffered a S-N direct compression, and led to the dextral strike-slip ductile shearing.

**Key words:** Lianshanguan granitic body; ductile shear zone; finite strain analysis; fabric analysis; kinematic; Liao-Ji rift zone; tectonics.

## 0 引言

韧性剪切带作为地壳内部普遍存在的具强烈塑性流变的高应变带,是重建构造变形温压环境、变形几何学、运动学及动力学研究的重要对象,对研究地壳岩石变形具有重要意义(Mancktelow, 2006; Cai *et al.*, 2008)。目前韧性剪切带作为大陆上研究最全面、最深入的构造带,已经成为探索地壳运动规律及大陆造山带岩石圈变形构造动力学的重要内容(Segall and Simpson, 1986; Guernani and Pennacchioni, 1998; Wang *et al.*, 2004; Pennacchioni, 2005),而应变方式、变形温度、剪切类型是研究韧性剪切带形成机制的有效途径和方法(郑亚东和王涛, 2005)。近年来,国内外学者对于韧性剪切带的研究大多数基于其应变方式和剪切类型而进行的细化研究(Mancktelow, 2006; Pennacchioni and Mancktelow, 2007),本文研究内容主要是在区域构造和岩石变形的基础上对韧性剪切带内岩石的宏观和微观特征进行详细解析,对其形成机制进行综合探讨。

辽宁东部—吉林南部裂谷带(简称辽吉裂谷带),是胶—辽—吉裂谷带的一部分,也是华北克拉通之上 3 条重要的古元古代活动带之一(赵国春, 2009; Zhao and Zhai, 2013)。前人曾应用多种研究方法与手段,对辽吉裂谷及其邻近的古老地质块体(龙岗地块和狼林地块)进行了大量的研究,大多基于构造(刘永江等, 1997a, 1997b)、变质变形(贺高品和叶慧文, 1998; 李三忠等, 1997b, 1998)、地球化学(Guo *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2013, 2014)、地质年代学(Guo *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2014)等方法,并确定了裂谷带中存在着大量遭受绿片岩相至角闪岩相变质的双峰式火山岩(张秋生等, 1988),确定了裂谷带在古元古代时期经历了强烈的变质变形作用改造(Li *et al.*, 2005, 2012)。

连山关地区位于辽吉裂谷带北缘,该区经受了一系列区域变质和多幕变形作用,众多学者对该区复杂的构造格局及演化等进行了详细研究(杨振升和俞保祥, 1984; 刘俊来, 1991; 刘永江等, 1996),通

过对连山关岩体及其上部辽河群的年代学研究以及构造背景分析,确定了该地区辽河群底部与太古宙花岗岩之间大型韧性滑脱带的存在(刘永江等, 1997a)。目前对于直接记载韧性剪切变形露头尺度上较为系统的应力分析研究相对薄弱。连山关岩体周缘均发育有不同变形强度的韧性剪切带,本文选取其中露头较好,岩石应变特征较明显的连山关岩体南缘韧性剪切带作为研究对象,对其变质变形特征、运动学性质及其形成机制进行详细的剖析。

## 1 区域地质背景

华北克拉通是我国最大的克拉通陆块,整体上被分为 3 个太古宙微陆块(东部陆块、阴山陆块和鄂尔多斯陆块)和 3 个活动带(孔兹岩带、中央碰撞造山带和胶—辽—吉裂谷带)(Zhao *et al.*, 2001, 2005; 赵国春, 2009; Zhao and Zhai, 2013)。华北克拉通东部陆块太古宙基底主要以新太古代的花岗质岩石为主,局部出露少量的古太古代与中太古代的岩石(Wu *et al.*, 2005),东部陆块是由北侧的太古宙龙岗陆块(辽北—吉南陆块)与南侧的太古宙狼林陆块(辽南陆块),以及二者之间的古元古代胶—辽—吉活动带组成(张秋生等, 1988)(图 1b),北东向展布的古元古代辽—吉活动带由约 1.9 Ga 变质变形的绿片—角闪岩相的火山—沉积建造和花岗岩—基性岩侵入体组成(陈斌等, 2016),这种火山—沉积建造在辽东地区被称为辽河群(张秋生等, 1988),辽东地区古元古代在华北克拉通演化阶段扮演着非常重要的角色。

辽—吉古元古代裂谷带初萌于 2.3 Ga,其形成构造背景是叠加在陆核发展阶段形成的初始克拉通化太古宙陆壳聚合带。古元古代晚期(1.9~1.7 Ga)裂谷带收缩褶皱造山,至此华北陆块克拉通化基本结束,进入稳定盖层的陆缘发展阶段(邴志波, 2006),因此辽—吉裂谷带是我国古元古代构造带保存相对完整的地区(Zhao *et al.*, 2001, 2005; Wan *et al.*, 2006)。前人在研究过程中将辽河群分为南辽河群和北辽河群(Li *et al.*, 2011, 2012),鞍本地区位

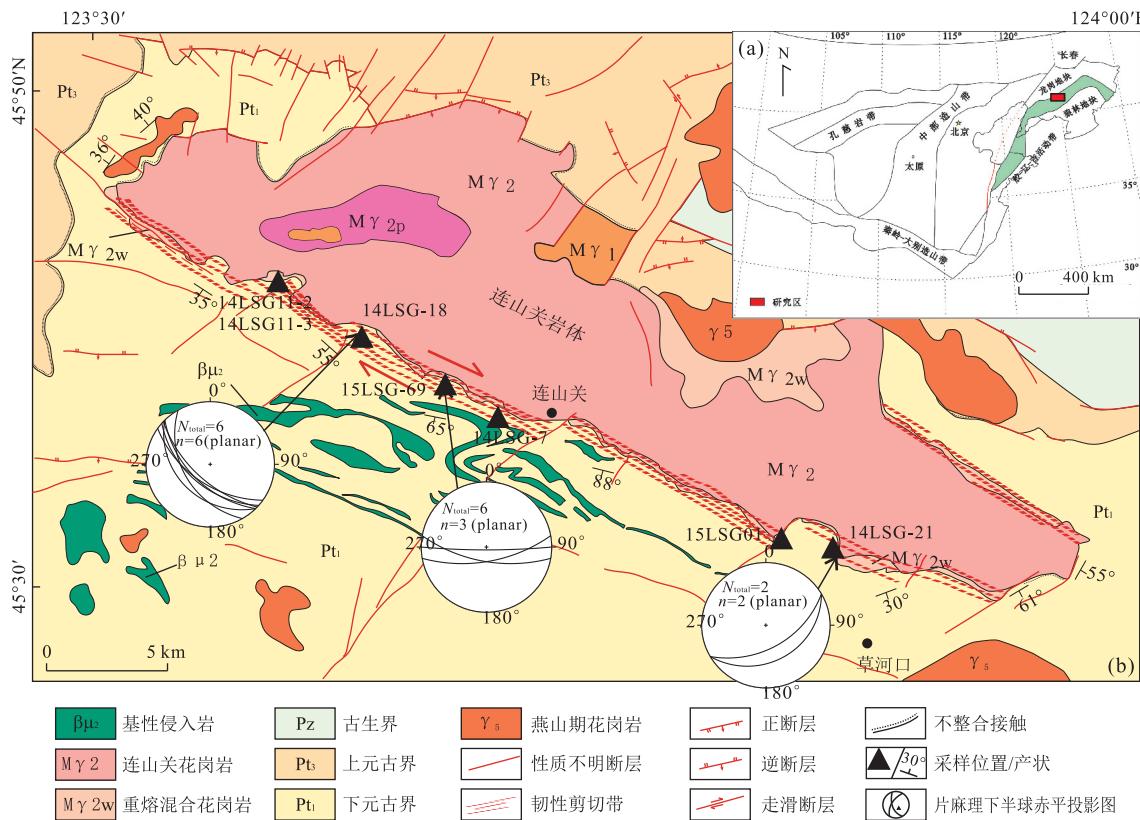


图 1 辽东连山关地区地质简图

Fig.1 Regional geological map of The Lianshanguan area in East Liaoning with sample locations  
角图根据 Zhao et al.(2001,2005)修改

于辽吉裂谷东北缘,基底为太古宙花岗绿岩带及由鞍山群组成的变质表壳岩(刘晓东,2012;朱凯,2016),上覆沉积上元古界北辽河群浅变质岩系(刘晓东,2012),主要沉积地层由下至上为浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组、盖县组(张秋生等,1988),区内保存了3.8~2.5 Ga的地质记录,是研究华北克拉通太古宙地壳演化的理想区域。本次研究区域位于鞍本地区的中部,区内出露有大面积的辽河群和古元古代基性岩墙群。

连山关地区位于辽吉裂谷北缘西段(张秋生,1984),连山关短轴穹状复式背斜的南翼西段,该复式背斜轴向NW,核部为新太古代连山关钾质混合花岗杂岩体和呈包体产出的鞍山群组成结晶基底(吴迪等,2013),周边被辽河群、震旦系地层覆盖,主要出露岩层为上元古界辽河群沉积变质岩系(图1)。

连山关花岗岩呈NW向展布的岩基状产出,岩石主要类型为片麻状二长花岗岩,U-Pb一致线年龄 $2563\pm3$  Ma,其次发育红色钾质花岗岩、片麻状黑云母花岗岩、白色花岗岩,岩体内常见分布有太古宙鞍山群变质岩呈包体形式出现。伴随区域SN向

的挤压变形连山关背斜穹窿的形成,同时在岩体周缘发生较大规模的右旋剪切走滑作用,形成糜棱岩化的岩石,其中南缘特征最为显著。早期变形期间,辽东裂谷中部基底隆起,该区辽河群与基底之间形成了大型的北西向滑脱的顺层韧性剪切滑脱带(刘永江等,1996;李三忠和杨振升,1996)。由于岩体之上的辽河群浪子山组二段地层能干性弱,所以韧性剪切作用尚未切穿地层,韧性剪切带附近岩石发生动态局部重熔,从而形成了连山关地区特有的重熔混合岩(陈荣度,1990;李三忠和杨振升,1996;吴迪等,2013),古风化壳被破坏。

## 2 韧性剪切带变形特征

### 2.1 宏观构造特征

连山关周缘均发育不同程度的韧性剪切带,岩体东、西两端构造变形相对较弱,南缘剪切变形发育,北侧则被新元古界地层覆盖(图2)。岩体东缘片麻理产状 $150^\circ\sim175^\circ/47^\circ\sim61^\circ$ ,矿物拉伸线理产状 $105^\circ/45^\circ$ 。在局部相对刚性的块体内仍保留了花

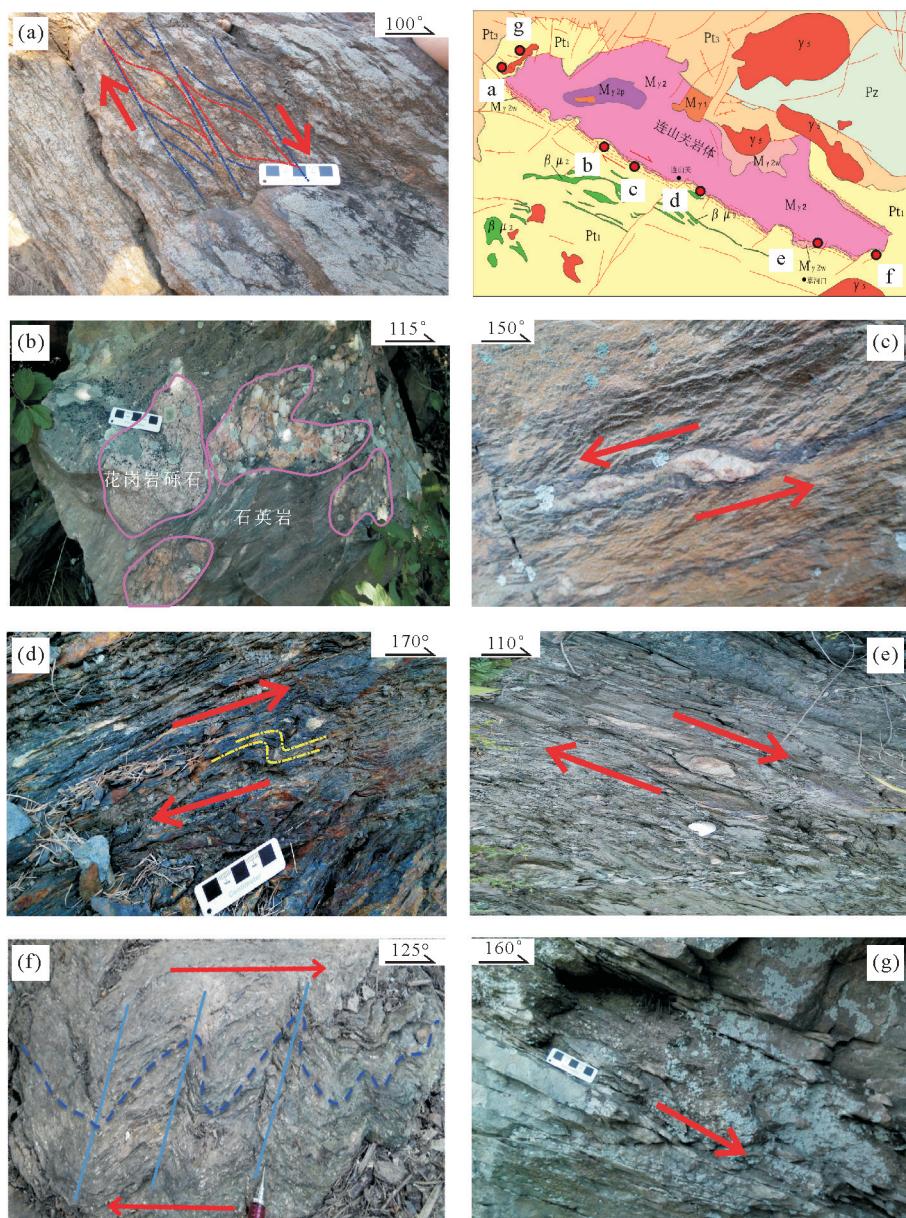


图 2 连山关地区野外宏观构造特征

Fig.2 Macroscopic structure characteristics of Lianshanguan area

a.浪子山组底部石英岩中含有基底太古代花岗岩砾石(平面图);b.岩体西端向 NW 方向的滑脱构造(剖面图);c.剪切带内岩石片麻理较为发育,暗色矿物和浅色矿物分异明显(平面图);d.岩体南缘中部产状较陡,透镜体显示强烈的右行剪切滑动构造(平面图);e.浪子山组片岩中形成的向 NE 歪斜的小型褶皱(平面图);f.连山关岩体南缘东段产状变缓(剖面图);g.岩体东端花岗质透镜体旋转拉长,指示 SE 向滑脱构造(剖面图)

岗质团块的透镜体,透镜体受剪切变形旋转拉长,显示 SE 向的正滑构造(图 2a).连山关岩体西缘保留有很好的原生构造,在岩体的西北角可见浪子山组底部石英岩与下伏连山关岩体之间为沉积不整合接触关系,石英岩中可见花岗岩砾石(图 2b).接触界线保留完好,没有遭受后期的构造改造,说明下伏连山关花岗岩为辽河群的沉积基底,后期的构造变形主要发育在不整合接触带之上的浪子山组片岩中,

在浪子山组片岩中发育有顺层剪切变形,剪切面倾角一般为  $45^{\circ} \sim 55^{\circ}$ ,根据挤压透镜体和眼球构造的排列形式,可以确定其剪切滑动方向指向 NW(图 2c),上覆浪子山组地层向 NW 一侧滑脱.整体反映早期连山关岩体隆升,在岩体的两端发育向外侧滑脱的构造行迹(图 6a,图 2a,2g).

连山关岩体南缘韧性剪切带呈 NWW 向展布,长 37 km,宽 1.5 km,总体表现为强弱不同的变形特

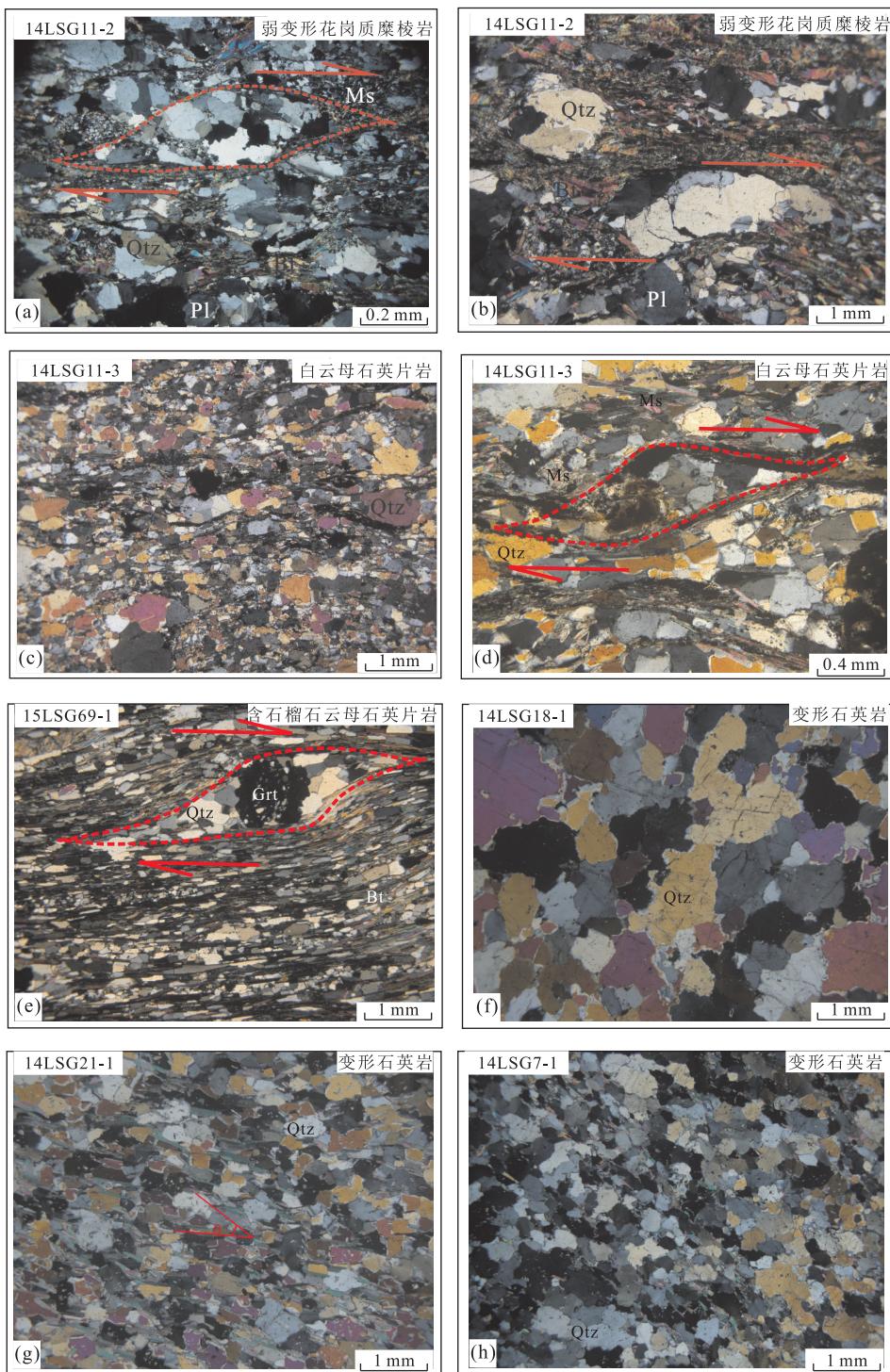


图 3 连山关岩体南缘韧性剪切带内岩石变形特征

Fig.3 Microphotographs of rocks of the ductile shear zone of Southern Lianshanguan granitic body

图 e、c、d、g 切面为 XZ 面, a、b、f、h 切面为 YZ 面, 图 g 中  $\theta$  为下文的计算参数; 显微构造描述参见表 1

征(表 1),既有挤压褶皱又发育有右行走滑剪切变形。岩体南缘从西到东与辽河群浪子山组地层的接触关系都为构造接触,原始的沉积不整合接触关系已被改造消失,取而代之的是强烈的韧性剪切变形带,接触带内片麻理较为发育(图 1),主要为暗色矿

物或矿物集合体连续定向排列,在中部变形较强的糜棱岩中,暗色矿物和浅色矿物分异明显,露头尺度中可见右行剪切变形特征(图 2d)。

从接触带产状上看韧性剪切带的西段产状相对较缓,为 $200^{\circ}\sim225^{\circ}$  $\angle 50^{\circ}\sim55^{\circ}$ ,至中段产状变陡,

表 1 韧性剪切带变形岩石测试样品宏观、显微构造变形特征

Table 1 Structure characteristics of samples of deformed rocks for test from the ductile shear zone

样品号	岩石类型	变形强度 <sup>①</sup>	产状	矿物组成	宏观变形特征	显微变形特征
14LSG11-2	花岗质 糜棱岩	弱	200°∠30°	残斑 20%~25%; 主要成分为中细粒石英集合体; 基质 75%~80%; 主要成分为细粒云母和长石	残斑呈透镜体产出, S-C 组构发育, 基质弱定向排列	石英集合体呈透镜状产出, 石英颗粒波状消光, 动态重结晶现象明显, 长石绢云母化严重(图 3a,3b)
14LSG11-3	白云母 石英片岩	较弱	202°∠35°	石英 60%, 中细粒; 白云母 30%, 细粒; 长石 10%, 细粒	片理发育, 矿物颗粒定向排列明显, S-C 组构发育	石英颗粒波状消光, 动态重结晶主要方式为膨凸重结晶, 部分发生细粒化现象(图 3c,3d)
14LSG7-1	变形石英岩	强	190°∠88°	石英 90%, 细粒; 云母 5%, 细粒	片麻理发育, 石英颗粒分带明显	石英颗粒大部分被定向拉长, 带状分布明显, 动态重结晶以亚颗粒重结晶为主, 云母定向排列(图 3h)
14LSG18-1	变形石英岩	较弱	225°∠55°	石英 95%, 中细粒	片麻理发育, 石英颗粒存在较弱的粒度分带, 原始层理可见	石英颗粒部分被定向拉长, 动态重结晶以亚颗粒重结晶为主(图 3f)
14LSG21-1	变形石英岩	较强	150°∠30°	石英 85%, 细粒; 云母约 10%, 细粒	片麻理发育, 原始层理可见	石英颗粒定向排列, 云母颗粒定向排列, 整体带状分布明显(图 3g)
15LSG69-1	含石榴石 云母片岩	强	190°∠65°	云母 70%, 细粒; 石英约 15%, 中细粒; 石榴子石约 15%, 中粒	石榴石及其周围石英颗粒和云母颗粒组成 S-C 组构	主要成分为石英, 细小的石英颗粒定向排列, 石榴子石生长线理与外界剪切线理斜交, 具压力影构造, 阴影部分为石英颗粒(图 3e)

注:①变形强度是相对的, 主要依据宏观、显微变形强弱特征以及有限应变测量结果综合判断。

为 162°~190°∠79°~88°, 东段产状又相对变缓, 约为 150°~158°∠30°~50°(表 1), 产状特征表明韧性剪切带东、西两端与中部相比变形相对较弱。通过对连山关岩体周缘, 尤其是南缘接触带产状倾角大小的分析可以看出, 南缘中部产状很陡, 表明剪切带中部遭受的来自南部的挤压应力相对较强, 使接触带和上覆辽河群地层都发生褶皱变形, 剪切带中部产状近直立, 同时伴有强烈的右行走滑剪切变形(图 2e), 总体上表现为右行斜滑移, 以右行走滑分量为主, 同时表现出一定的逆冲分量, 浪子山组片岩中常常形成轴向与南缘剪切带斜交的向 NE 歪斜的小型“裙边”褶皱(图 2f)。但在韧性剪切带东段和西段, 接触带产状很缓, 走滑剪切变形特征不明显(图 2g)。

## 2.2 显微构造特征

该地区变形岩石主要为浪子山组底部的石英岩和剪切带中形成的糜棱化云母石英片岩及接触带附近花岗质糜棱岩, 接触带附近的重熔花岗岩主要出露在西缘, 由于南缘后期遭受由南向北的应力挤压, 较厚部位出现“吞食”现象, 导致重熔花岗岩出露不明显。石英岩主要矿物为石英, 含少量长石, 显微构造主要表现为颗粒定向拉长, 颗粒动态重结晶现象

明显, 呈带状分布(图 3a,3f,3g,3h)。云母石英片岩中矿物颗粒定向明显, 多数被塑性拉长, 岩石呈片状构造, 石榴云母石英片岩中的石榴石中含有包体, 主要成分为石英, 细小的石英颗粒定向排列, 生长线理与外界剪切线理斜交, 说明石榴石为早期存在的, 该残斑与外界剪切线理组成眼球状构造, 指示为右行剪切, 并具有压力影结构, 阴影部分为石英颗粒集合体(图 3e)。花岗质糜棱岩由残斑和基质组成, 显微构造主要表现为旋转残斑亚颗粒重结晶, 残斑大多数由石英颗粒集合体构成, 呈透镜状定向排列, 大小不均匀。基质为细粒的长英质矿物及细小的鳞片状黑云母、绢云母等新生矿物, 石英具拉长和动态重结晶现象, 呈透镜状或带状定向分布, 云母塑性拉长(图 3e,3d), 云母类矿物多呈不规则条带状定向分布, 或绕石英残斑分布。多数石英呈现波状消光现象(图 3a,3b), 动态重结晶方式主要有膨凸重结晶(图 3b, 3h)和亚颗粒重结晶(图 3a,3f), 局部发生细粒化现象(图 3c), 新生重结晶颗粒为轻微压扁拉长状, 无波状消光, 而变形主晶具有显著的波状消光特征(图 3a,3e), S-C 组构发育(图 3a,3d,3e), 有压力影构造存在, 其核部为石榴石, 阴影部分为石英(图

3e),上述显微组构特点均指示岩石样品经历了右行剪切作用.

### 3 有限应变测量

岩石的有限应变测量是根据变形地质体中具有一定标志特征变形体的测量来确定有限主应变的大小和方向.在有限应变测量过程中,规定坐标轴是:最大缩短方向为Z轴,最大拉伸方向为X轴,XZ平面的法线方向为Y轴.即X、Y和Z轴分别平行于应变椭球体的 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 和 $\lambda_3$ 轴.在XY面上矿物拉伸线理方向平行X轴,该面上与拉伸线理垂直方向为Y轴.板劈理、片理及砾石、颗粒压扁面的法线方向为Z轴.

岩石有限应变研究是建立在平面二维分析基础上的,岩石有限应变测量的精度取决于二维分析的精度,在一定条件下(体积不变),两个主平面上的应变分析可以直接确立岩石的三维应变(郑亚东等,1985).

#### 3.1 样品采集及分析方法

岩石有限应变测量的方法较多,主要有几何作图法、莫尔圆制图法、长短轴法、Rf/ $\varphi$ 法、 $\theta$ 曲线法、Elliott 法、心对心法、惯量椭圆法、Fry 法以及双晶应变分析法等(具体见郑亚东和常志忠内部文献;王云斌等,2004).对于不同的测试对象,选择的测试方法有所不同,本文选用 Fry 法和惯量椭圆法进行有限应变测量.

根据 Fry 法原理,首先对连山关地区变形岩石根据样品拉伸线理和面理两个主应变面切制定向探针薄片(平行矿物拉伸线理和垂直糜棱面理为 XZ 面和垂直矿物拉伸线理和糜棱面理为 YZ 面),然后选取两个薄片分别进行有限应变测量.应变测量过程中,由于研究区变形岩石中长石残斑粒径普遍较少不利于镜下测量统计,而石英含量高,粒径分布较均匀,故选择岩石样品中普遍塑性拉长的石英或者

石英集合体作为应变标志体(黄建军,1994a,1994b;梁琛岳等,2011).

为确定连山关岩体南缘韧性剪切带的构造变形特征,本次研究选取了剪切带内不同部位,具代表性的辽河群底界浪子山组变形石英岩作为研究对象,所选样品变形程度不同(图 3),其中强变形岩石中石英具有明显定向拉长现象(图 3g).

对于每一个定向样品两个应变面(XZ 面和 YZ 面)上分别测量基质内石英标志体数目为 40~60 个,在显微镜下采集照片,选择石英颗粒分布较为均匀的部位进行统计.在 CorelDRAW X7 软件中对整个视域中的石英颗粒进行统计.选择照片视域中心标定为原点,按上述方法标定其余长石残斑的中心,往复标定至覆盖全部残斑中心.每个薄片测量数量约为 50 个.

依据惯量椭圆的相关原理,首先对定向采集的岩石样品进行切片处理后,在定向切片上观察变形较好的石英颗粒的种类及特征,并拍照采集相关图像资料;然后在有限应变自动分析软件 Straindesk 的操作平台上进行测量(梁琛岳,2015).首先通过薄片显微照片提取变形石英颗粒边界;然后由 Straindesk 软件对任意形状石英颗粒边界进行模拟得到每个颗粒的应变椭圆和其有限应变值,最后,统计分析已提取的所有石英颗粒,综合后得到该岩石的有限应变值.

#### 3.2 测量结果

本次研究中对 14LSG7-1、14LSG18-1、14LSG21-1、15LSG69-1 这 4 个岩石样品开展了 Fry 法和等效惯量椭圆法的有限应变测量,测量过程增大石英颗粒的统计量,每组薄片中都尽可能的选择 50 个石英颗粒以上,以增加实现结果的精确性,下面仅针对部分岩石样品的测量分析结果进行展示.

不同测量方法经不同计算方法后,可得出以下测量数据(X/Y 值通过换算可得),效果较为理想(表 2).Fry 法和惯量椭圆法测量结果都比较集中,

表 2 连山关地区样品有限应变测量数据

Table 2 Finite-strain measurement data of the sample from the Lianshanguan area

样品号	惯量椭圆法						Fry 法					
	X/Z	Y/Z	X/Y	ln(X/Y)	ln(Y/Z)	K	X/Z	Y/Z	X/Y	ln(X/Y)	ln(Y/Z)	K
14LSG7-1	1.49	1.28	1.16	0.15	0.25	0.62	1.56	1.30	1.20	0.18	0.26	0.69
14LSG18-1	1.43	1.25	1.15	0.14	0.22	0.60	1.82	1.45	1.26	0.23	0.37	0.61
14LSG21-1	1.53	1.46	1.05	0.05	0.38	0.12	2.00	1.70	1.18	0.16	0.53	0.31
15LSG69-1	2.31	1.96	1.18	0.16	0.67	0.24	1.75	1.60	1.09	0.09	0.47	0.19

注:K=ln(X/Y)/ln(Y/Z).

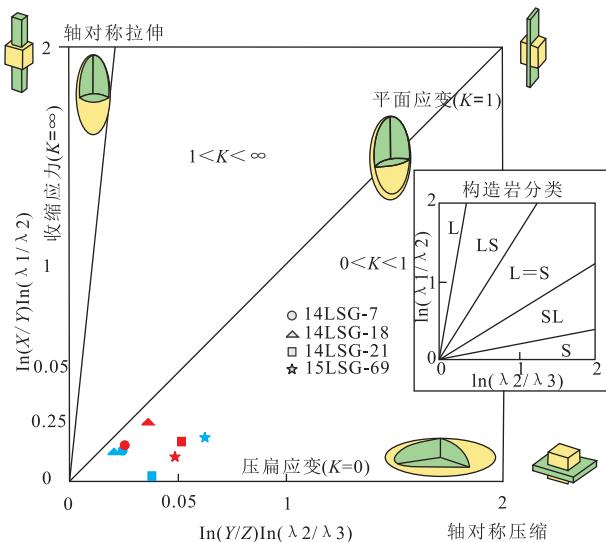


图 4 Flinn 有限应变判别图

Fig.4 Flinn finite strain discrimination diagram

图中红色为 Fry 法测量数据投点, 蓝色为惯量椭圆法测量数据投点

较为一致, 比较接近真实应变水平.

### 3.3 Flinn 判别图解

Flinn 判别图解是有限应变类型的判别最常用的方法, 根据 Flinn 参数  $K$  值的大小, 将图解分成几个不同的变形类别(具体分类见郑亚东和常志忠内部文献). 对连山关南缘韧性剪切带有限应变测量结果进行对数 Flinn 图解判别, 四个糜棱岩样品均投在压扁应变区域(图 4),  $K$  值在  $0.19\sim0.69$  之间, 显示岩石应变类型主要为压扁应变, 属于一般压缩一平面应变范围, 岩石类型表现为 S-SL 型构造岩, 且根据取样位置具有随着产状由陡到缓, 变形石英岩中  $K$  值递减. 结合区域右行剪切背景, 可以认为在后期挤压—剪切作用下导致韧性剪切带内岩石矿物经历了变形, 发生定向压扁.

## 4 石英 EBSD 组构分析

EBSD 组构分析是通过晶体背散射衍射图像来确定晶体取向方向, 进而确定统计测量岩石中矿物的结晶学优选方位(刘俊来等, 2008; 韩国卿等, 2009; 许志琴等, 2009). 石英是自然界中最主要的造岩矿物之一, 在 EBSD 组构分析中石英的组构分析也是在近年来传统文献中讨论最多的(韩国卿等, 2009; 李刚等, 2013; 梁琛岳等, 2015; 李婧等, 2016). 石英作为地壳构造变形的主要载体, 具有很多滑移系, 在不同的温压条件下, 石英具有不同的主控滑移系, 而不同的滑移系在剪切作用下会产生不同的石

英晶格优选方位, 导致不同的石英光轴定向排列. 因此通过石英 C[0001] 轴组构的分析我们可以实现对岩石变形温度的估计和对岩石运动学性质的判断. 一方面, 随着温度由低到高, 主控滑移系依次为  $\{0001\}<110>$ ,  $\{101\}<110>$ ,  $\{100\}<110>$  和  $\{100\}<0001>$ , 依次简称为底面  $<\mathbf{a}>$ 、菱面  $<\mathbf{a}>$ 、柱面  $<\mathbf{a}>$  和柱面  $<\mathbf{c}>$  滑移系(Mainprice *et al.*, 1986; Kruhl, 1996; Passchier and Trouw, 2005; 许志琴等, 2009; 夏浩然和刘俊来, 2011; 孟静瑶等, 2013); 另一方面, 根据石英组构形式是否关于某平面对称可判断矿物的变形类型, 同时根据单环带极点的倾斜以及交叉环带与次环带关系还可以判别剪切方向(郑伯让和金淑艳, 1989; Passchier and Trouw, 2005 夏浩然和刘俊来, 2011; 梁琛岳, 2015).

本次 EBSD 石英 C 轴组构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, 测试样品为研究区 5 件变形强弱不同的岩石, 根据手标本的拉伸线理、面理定向选取 XZ 面进行定向光学切片, 对切割完成的定向光片进行机械剖光, 此次测试选择导电胶导电, 测试过程中采用人机交互的模式手动选取测试颗粒, 对个别石英含量较多的样品进行机械扫面处理(14LSG7-1、14LSG21-1)(具体测试原理及流程参见徐海军等, 2007; 刘俊来等, 2008).

分析结果如图 5 所示, 组构图解中 X 轴平行于矿物的拉伸线理方向, XY 面平行于面理, Z 轴平行于岩石面理的法线方向, Y 轴为在面理内垂直线理方向. 研究区岩石样品石英 C 轴组构图解中多出现环带和点极密, 样品 15LSG69-1 的石英 C 轴组构图在 Y 轴处有最大极密值点, 在第四象限有较弱的点极密, 各个点极密相互连接, 形成以 Y 轴为中心的交叉环带, 表明主要发生柱面  $<\mathbf{a}>$  滑移, 还有少量的菱面  $<\mathbf{a}>$  滑移、柱面  $<\mathbf{c}>$  滑移组分; 样品 14LSG7-1 的石英 C 轴组构图在第二、第四象限出现与 X 轴约  $50^\circ$  方向有最大极密点值, 在 X 轴有弱的点极密, 表明石英主要发生菱面  $<\mathbf{a}>$  滑移, 局部发生柱面  $<\mathbf{c}>$  滑移; 14LSG11-2 的石英 C 轴组构图在第四象限出现和靠近 Z 轴出现点极密, 表明石英主要发生菱面  $<\mathbf{a}>$  滑移和底面  $<\mathbf{a}>$  滑移; 样品 14LSG21-1 的 Y 轴以及 X 轴附近发育较好的点极密, 表明石英主要发生柱面  $<\mathbf{a}>$  滑移, 柱面  $<\mathbf{c}>$  滑移, 在第三象限与 Z 轴约  $30^\circ$  方向有弱的点极密, 可能在变形时石英局部出现菱面  $<\mathbf{a}>$  滑移, 点极密见相互连接形成以 Y 轴为中心的交叉环带; 样品

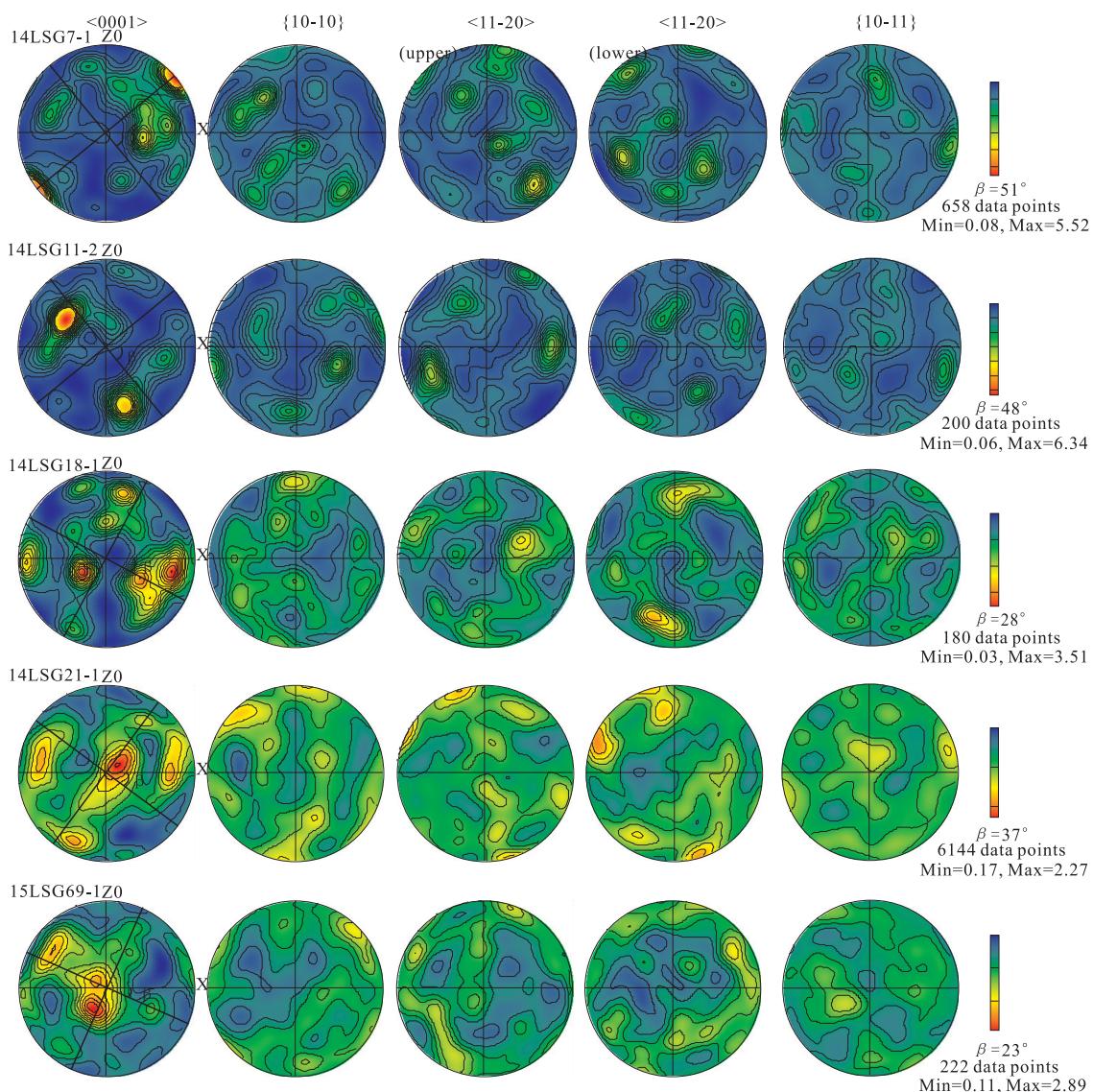


图 5 连山关地区样品石英组构图

Fig.5 C-axis fabric stereograms of quartz from the sample in the Lianshanguan area

 $\beta$  用于下文运动学涡度计算

14LSG18-1 的石英 C 轴组构图的石英出现靠近 X 轴和 Z 轴的点极密, 表明石英主要发生柱面  $<c>$  滑移、菱面  $<a>$  滑移, 局部出现底面  $<a>$  滑移, 可能是由于多期变形的结果。

EBSD 组构分析显示研究区岩石变形情况较为复杂, 岩石中石英的变形温度为中低温菱面组构和高温柱面组构两种结果, 根据前文中显微组构观察, 笔者认为高温变形应属于早期太古宙地壳的产物, 随着连山关岩体的隆升将其拖至地表, 而连山关岩体南缘韧性剪切带主体变形温度主要为 450~550 °C, 部分组构中点极密表现为底面  $<a>$  滑移, 可能代表变形晚期低温组构的叠加或改造。

## 5 运动学涡度分析

运动学涡度 ( $W_k$ ) 是反映递进变形中非共轴性的参数, 并且可以准确度量共轴剪切和非共轴剪切的比例 (Means *et al.*, 1980)。运动学涡度是一个无纲量的纯数值, 且为非线性比率,  $W_k = 0$  时, 为纯剪切;  $W_k = 1$  时, 为简单剪切;  $W_k = 0.71 \sim 0.75$  时, 纯剪切和简单剪切组分各占一半 (Simpson and De Paor, 1993; Zhang *et al.*, 2006; 郑亚东等, 2008)。目前已经报道的运动学涡度值的估算方法有很多, 为确保计算结果的可信度, 本文主要采用两种方法对运动学涡度值进行估算, 石英 C 轴组构法 (Passchier, 1988; Wallis, 1992, 1995) 和石英条带斜交面理

法(Passchier, 1988).

石英 C 轴组构法是 Wallis 提出用 C 轴组构与主应变轴比 ( $R_s$ )。估算平均运动学涡度的方法 (Passchier, 1988), 即利用石英 C 轴组构中心环带与流变面(剪切面)相垂直, 流变面与有限应变平面的夹角为  $\beta$ , 这样  $\beta$ 、 $R_s$  和  $W_k$  三者之间存在这样的关系表达式  $W_k = \sin\{\tan^{-1}[\sin(2\beta)/[(R_{xz}+1)/(R_{xz}-1)] - \cos(2\beta)]\} \times (R_{xz}+1)/(R_{xz}-1)$ .

本次研究中结合前文石英 C 轴 EBSD 组构分析得出  $\beta$ (图 5), 利用惯量椭圆法有限应变测量中 X/Z 作为  $R_s$  统一作为计算标准(表 2), 得出平均运动学涡度值为 0.94(表 3)指示剪切带形成于以简单剪切为主的一般剪切变形中.

石英条带斜交面理法主要是通过显微镜下测量的重结晶颗粒或者旋转残斑的长轴(S 面理)与剪切方向(C 面理)之间最大夹角  $\theta$  来计算(图 3g). 利用公式  $W_k = \sin \theta$ , 得出剪切带岩石样品的运动学涡度平均值为 0.95(表 3), 与石英 C 轴组构法得出的结果较为一致, 两种方法皆指示剪切带的剪切变形以简单剪切为主.

**表 3** 连山关岩体南缘韧性剪切带变形岩石运动学涡度

Table 3 Kinematic vorticity of the sample from the ductile shear zone in southern Lianshanguan rock

样品号	石英 C 轴组构法		斜交面理法		
	$R_{xz}$	$\beta$	$W_k$	$\theta$	$W_k$
14LSG7-1	1.49	51	0.92	54	0.95
14LSG18-1	1.43	28	0.91	37	0.96
14LSG21-1	1.53	37	0.99	38	0.97
15LSG69-1	2.31	23	0.92	33	0.91
平均值	—	—	0.94	—	0.95

## 6 讨论

### 6.1 韧性变形特征

连山关岩体南缘韧性剪切带的出露有大量的构造形迹, 通过野外观测得出早期连山关地区处于区域伸展构造背景下, 后期又遭受近 SN 向应力挤压. 因此, 连山关岩体经历了早期隆起顺层滑脱和晚期南北向应力挤压改造, 总体上不同部位的岩石变形强弱不同, 具有中部变形较强, 两端变形较弱的特点. 显微镜下石英颗粒边界迁移重结晶作用十分普遍, 云母表现为塑性拉长, S-C 组构发育, 旋转残斑等组构特征、石英 C 轴组构特征均表明岩石经历了右行剪切作用.

通过对剪切带内变形岩石进行有限应变测量分析, 结果显示岩石变形为平面应变, 岩石类型为 S-SL 型构造岩, 对数 Flinn 图解中的投影与野外实际观察相对应, 随着产状由陡到缓, 同一岩性  $K$  值递减, 表明测量结果较接近野外观测结果. 此外, 本文对该区变形岩石进行了运动学涡度的测量, 由于岩石变形为平面应变, 体积不变, 且计算所得运动学涡度值均大于 0.75, 表明其形成于以简单剪切为主的一般剪切变形中(Zhang et al., 2006; 郑亚东等, 2008).

### 6.2 韧性剪切带温压条件

石英 C 轴组构分析结果表明岩石以中低温菱面组构为主, 还有部分高温柱面组构及少量低温菱面组构, 结合岩石显微变形行为, 认为连山关南缘韧性剪切带岩石变形温度为 450~550 °C, 磨棱岩化作用发生于低绿片岩相—低角闪岩相条件下, 与前人研究结果相当(吴春林, 1991), 属于中低温变形, 按平均地热增温率 33 °C/km, 地压梯度 25 MPa/km 计算, 该剪切带应形成于 13~17 km 的深度范围内, 围压为 325~425 MPa, 属于中部地壳层次, 这与前人根据区域变质作用特征推断早期花岗岩侵位与中(深)部地壳相当(李三忠和杨振升, 1996). 而对于高温变形的浪子山组底部石英岩, 本文认为其形成于深部地壳高温应变中, 联系其大地构造背景, 应为早期太古宙地壳产物. 虽然辽东地区区域构造格架争议有很多, 但对于区内岩石构造变形与变质作用的如下构造岩石学事实却趋于有一致的认识: 变质作用经历了升温升压—降温降压的热动力学过程, 变质作用峰时达到中亚高角闪岩相, 该韧性剪切带应形成于后期降温降压过程中.

### 6.3 形成时代和机制

关于连山关岩体南缘韧性剪切变形时间的研究, 根据前人成果, 辽河群变质岩层中记录了三幕构造变形( $D_1$ : 2 500~1 900 Ma;  $D_2$ : 1 900~1 750 Ma;  $D_3$ : 1 750~1 600 Ma), 其中第二变形幕( $D_2$ )的构造线走向为 NE-NEE, 相应地其主压应力方向应为 NW-NNW(李三忠等, 1998), 与本次研究的应力场方向基本一致. 吴迪(2013)等也认为连山关岩体南缘韧性剪切带明显系第二幕变形( $D_2$ )作用结果, 且该时期(1.7~1.9 Ga)与连山关铀矿床的成矿年龄(±1.8 Ga)基本一致. 而本文根据显微镜下石榴云母石英片岩中的石榴石变斑晶含有包体, 主要成分为石英, 细小的石英颗粒定向排列, 内环生长线理与外界剪切线理斜交(图 3e), 推断其形成于( $D_1$ )变形幕之后, 而外环带与折劈理( $S_2$ )具同构造生长现象, 表

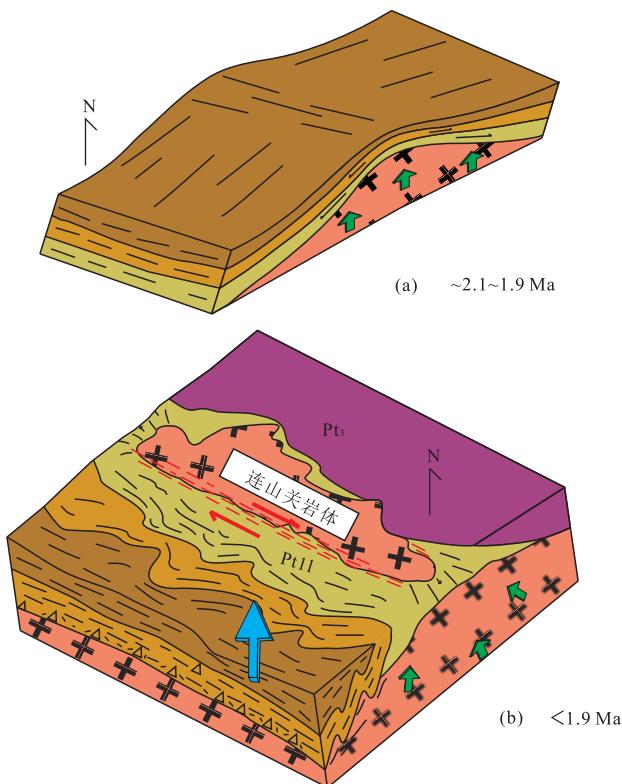


图 6 韧性剪切带形成机制模式图

Fig.6 Formation mechanism pattern of ductile shear zone

明其外环形成于( $D_2$ )变形幕,与韧性剪切作用同期伴随浪子山组地层的变质作用。

另外,由于重熔花岗岩沿韧性剪切带呈带状分布,故认为其为韧性剪切带的产物,而且在剪切带中的重熔花岗岩中的锆石普遍发生强烈的溶蚀作用,U-Pb 同位素测定都发生过大量的 Pb 丢失,无法获得可靠的同位素年龄,但是可以说明其形成一定是 25 Ga 连山关花岗岩的熔融的产物,但剪切作用只是造成了岩体的局部重熔,并没有伴随相关的岩浆活动(吴迪等,2013),故此推断剪切带应该形成于早元古代晚期。对于辽东地区古元古代演化及深部过程的探讨,李三忠等(2003)曾对其做过全面总结,他认为辽东地区古元古代早期第一幕变形中存在两期岩浆底侵作用,最终在连山关地区发生上文中提到的滑脱—伸展构造(图 6a)。第二幕变形为近 SN 向压扭性应力的挤压,在辽河群与连山关岩体接触带产生右行剪切的韧性剪切带(图 6b)。根据连山关地区样品进行有限应变测量得出, $K$  值为 0.19~0.69,用 Flinn 图解进行判别(图 4),样品均投在压扁应变区域,显示岩石应变类型主要为压扁应变,属于一般压缩—平面应变范围,岩石类型表现为 S-SL 型构造岩,且根据取样位置具有随着产状由陡到缓,变形

石英岩中  $K$  值递减的规律,由于南北压扭性应力存在(李三忠等,2003),变形早期阶段,连山关岩体和上覆辽河群同时卷入变形,发生褶皱和进一步隆起,使岩体东西两端的上覆辽河群向外侧顺层滑脱,但在南缘接触带中部形成压扁应变,致使岩石在挤压作用下发生右行剪切作用变形,在连山关岩体南缘形成陡倾的韧性剪切带(图 6)。

## 7 结论

(1) 连山关岩体南缘经历了 NWW 向右行剪切作用,剪切带沿连山关岩体南缘展布,东西两端产状较缓,中部产状较陡,指示受南部应力挤压较强,S-C 组构、透镜体等构造形迹发育,指示了韧性剪切带内岩石变形程度为初糜棱岩—糜棱岩。

(2) 石英有限应变 Flinn 图解判别岩石为 S-SL 型构造岩,应变类型为压扁平面应变,运动学涡度均值为 0.947,表明剪切带形成于以简单剪切为主的一般剪切中。

(3) 石英动态重结晶方式以膨凸重结晶为主,局部可见亚颗粒重结晶作用,云母表现为塑型拉长,石英 C 轴组构分析结果表明岩石以中低温菱面组构为主,岩石变形温度为 450~550 °C,处于低绿片岩相—低角闪岩相条件下,由于测试结果中存在早期高温的产物,故此笔者认为连山关岩体南缘韧性剪切带内岩石经历了早期继太古宙地壳升温升压后的降温降压热动力学过程。

(4) 连山关岩体南缘韧性剪切带应起源于早元古代晚期,在区域构造挤压背景下,连山关岩体和上覆辽河群一起卷入变形,发生褶皱和隆起,沿岩体南缘接触带岩石发生陡倾右行韧性剪切作用。

致谢:感谢中国地质大学(北京)刘俊来教授在 EBSD 组构分析测试方面给予的帮助,同时对匿名审稿专家给予的宝贵修改意见表示感谢。

## References

- Cai, X.L., Cao, J.M., Zhu, J.S., et al., 2008. System of Crust-Mantle Ductile Shear Zone in the Continental Lithosphere in China. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 36—54. doi:10.1016/s1872-5791(08)60061-5
- Chen, B., Li, Z., Wang, J.L., et al., 2016. Liaodong Peninsula —2.2 Ga Magmatic event and Its Geological Significance. *Journal of Jilin University (Earth Science edition)*, 46(2): 303—320.

- Chen, R.D., 1990. The Tectonic Evolution of the Liaodong Rift. *Regional Geology of China*, (4): 306—315, 333 (in Chinese with English abstract).
- Guermani, A., Pennacchioni, G., 1998. Brittle Precursors of Plastic Deformation in a Granite: An Example from the Mont Blanc Massif (Helvetic, Western Alps). *Journal of Structural Geology*, 20(2—3): 135—148. doi: 10.1016/s0191-8141(97)00080-1
- Guo, J. H., Peng, P., Chen, Y., et al., 2012. UHT Sapphirine Granulite Metamorphism at 1.93—1.92 Ga Caused by Gabbronorite Intrusions: Implications for Tectonic Evolution of the Northern Margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 222—223: 124—142. doi: 10.1016/j.precamres.2011.07.020
- Guo, J. H., Sun, M., Chen, F. K., et al., 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of High-Pressure Granulites in the Sanggan Area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic Continental Collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 629—642. doi: 10.1016/j.jseaes.2004.01.017
- Guo, Z.T., 1982. Geological Characteristics and Genesis Model of Lianshangun Uranium Deposit in Eastern Liaoning Province, China. *Journal of Changchun University of Earth Science*, (S1): 84—95, 168 (in Chinese with English abstract).
- Han, G.Q., Liu, Y.J., Wen, Q.B., et al., 2009. The Characteristics of Structural Deformation for the Lingxia Ductile Shear Zone of Nenjing-Balihan Fault Belt in Northeastern China. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(3): 397—405 (in Chinese with English abstract).
- He, G.P., Ye, H.W., 1998. Two Types of Early Proterozoic Metamorphism and Its Tectonic Significance in Eastern Liaoning and Southern Jilin Areas. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 152—162 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J.J., 1994. On some Viewpoints on Studies of Mylonite and their Applications. *Geology of Chemical Minerals*, 16(2): 117—122 (in Chinese with English abstract).
- Kruhl, J. H., 2003. Prism- and Basal-Plane Parallel Subgrain Boundaries in Quartz: A Microstructural Geothermobarometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(5): 581—589. doi: 10.1046/j.1525-1314.1996.00413.x
- Li, G., Xu, Z.Y., Liu, Z.H., et al., 2013. Early Cretaceous Extension of the Yiwulushan Metamorphic Core Complex. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 938—952 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Liu, Y.J., Li, W.M., et al., 2016. Structural Deformation and Rheology of Granitic Gneiss from the North China Craton Basement—An Example from the Sierbao Area in Western Liaoning Province. *Geotectonica et Metallogenesis*, 40(5): 891—907 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Han, Z.S., Liu, Y.J., et al., 2001. Regional Metamorphism Characteristics and Its Continental Dynamics Significance of Liaohe Group. *Geological Review*, 47(1): 9—18 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Hao, D.F., Han, Z.Z., et al., 2003. Paleoproterozoic Deep Processes and Tectono-Thermal Evolution in Jiao-Liao Massif. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 328—340 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Hao, D.F., Zhao, G.C., et al., 2004. Geochemical Features and Origin of Dandong Granite. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1417—1423 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Liu, Y.J., 2012. Continental Dynamics and Regional Metamorphism of the Liaohe Group. *Geological Review*, 47(1): 9—18 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Liu, Y.J., Yang, Z.S., et al., 1998. Relations between Deformation and Metamorphic Recrystallization in Metaperlite of Liaohe Group. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 351—365 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Yang, Z.S., Liu, Y.J., 1996. Uplift Bedding-Delamination Structure Analysis of Orogenic Belt in Early Proterozoic of East Liaoning Province. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 26(3): 305—309 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Yang, Z.S., Liu, Y.J., 1997a. The Stratification and Its Causes of the Liaohe Group Metamorphism. *Chinese Science Bulletin*, 42(24): 2631—2636 (in Chinese).
- Li, S.Z., Yang, Z.S., Liu, Y.J., et al., 1997b. Emplacement Model of Palaeoproterozoic Early-Granite in Jiao-Liao-Ji Area and Its Relation to the Uplift Bedding Delamination Structural Series. *Acta Petrologica Sinica*, 13(2): 64—77 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Zhao, G.C., Sun, M., et al., 2005. Nd Isotopic Characteristics of the South and North Liaohe Groups and Tectonic Implications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 863—863.
- Li, S.Z., Zhao, G.C., Santosh, M., et al., 2011. Palaeoproterozoic Tectonothermal Evolution and Deep Crustal Processes in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: A Review. *Geological Journal*, 46(6): 525—543. doi: 10.1002/gj.1282
- Li, S.Z., Zhao, G.C., Santosh, M., et al., 2012. Paleoproterozoic Structural Evolution of the Southern Segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 200—203: 59—73. doi: 10.1016/j.precamres.2012.01.007
- Liang, C.Y., Liu, Y.J., Li, W., et al., 2011. Characteristics of Extensional Structure of Keluo Complex in Nenjiang

- Area, Heilongjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 30(2):291—299(in Chinese with English abstract).
- Liu, J.H., Liu, F.L., Ding, Z.J., et al., 2013. U-Pb Dating and Hf Isotope Study of Detrital Zircons from the Zhifu Group, Jiaobei Terrane, North China Craton: Provenance and Implications for Precambrian Crustal Growth and Recycling. *Precambrian Research*, 230:230—250.
- Liu, X.D., 2012. The Relationship between the Tectonic Alteration and Uranium Deposit in Lianshan Area. Proceedings of the National Symposium on the Construction of Uranium Mines.
- Liu, F.L., Liu, P. H., Wang, F., et al., 2014. U-Pb Dating of Zircons from Granitic Leucosomes in Migmatites of the Jiaobei Terrane, Southwestern Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Constraints on the Timing and Nature of Partial Melting. *Precambrian Research*, 245: 80—99. doi:10.1016/j.precamres.2014.01.001
- Liu, J. L., 1991. Deformation Structures and Deformation Mechanism in Bedding-Parallel Tectonic Schist in the Inner Zone of the Liaoji Paleorift. *Jilin Geology*, 10(4):1—9 (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, Y.J., Li, S.Z., Bai, L.X., 1996. Structural Evolution of Ductile Decollement Zone Occurred between Archaean Gneiss Complexes and Proterozoic Liaohe Group in Haicheng Area, Eastern Liaoning. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 26(2):166—171 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. J., Li, S. Z., Yang, Z. S., 1997a. Early Proterozoic Uplift-Slide Structural Model on the Eastern Margin of the Northern China Platform. *Geological Review*, 43(6):569—576 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.J., Yang, Z.S., Li, S.Z., et al., 1997b. Extensional Tectonic Model of Palaeoproterozoic—An Example from Northern Shandong Peninsula, Eastern Liaoning and Southern Jilin Areas. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 27(2):141—146 (in Chinese with English abstract).
- Mainprice, D., Bouchez, J. L., Blumenfeld, P., et al., 1986. Dominant c Slip in Naturally Deformed Quartz: Implications for Dramatic Plastic Softening at High Temperature. *Geology*, 14(10): 819. doi: 10.1130/0091—7613(1986)14<819:dcslid>2.0.co;2
- Mancktelow, N. S., 2006. How Ductile are Ductile Shear Zones? *Geology*, 34(5):345.doi:10.1130/g22260.1
- Mancktelow, N. S., Pennacchioni, G., 2005. The Control of Precursor Brittle Fracture and Fluid-Rock Interaction on the Development of Single and Paired Ductile Shear Zones. *Journal of Structural Geology*, 27(4): 645—661.doi:10.1016/j.jsg.2004.12.001
- Means, W.D., Hobbs, B.E., Lister, G.S., et al., 1980. Vorticity and Non-Coaxiality in Progressive Deformations. *Journal of Structural Geology*, 2(3): 371—378. doi: 10.1016/0191-8141(80)90024-3
- 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).
- Passchier, C. W., Trouw, R. A. J., 2005. Micro Tectonics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1—366.
- Passchier, C.W., 1988. The Use of Mohr Circles to Describe Non-Coaxial Progressive Deformation. *Tectonophysics*, 149(3—4): 323—338. doi: 10.1016/0040-1951(88)90181-3
- Passchier, C.W., Urai, J.L., 1988. Vorticity and Strain Analysis Using Mohr Diagrams. *Journal of Structural Geology*, 10(7): 755—763. doi: 10.1016/0191-8141(88)90082-x
- Pennacchioni, G., Mancktelow, N.S., 2007. Nucleation and Initial Growth of a Shear Zone Network within Compositionally and Structurally Heterogeneous Granitoids under Amphibolite Facies Conditions. *Journal of Structural Geology*, 29(11): 1757—1780. doi: 10.1016/j.jsg.2007.06.002
- Qin, Y., Chen, D.D., Liang, Y. H., et al., 2014. Geochronology of Jian Group in Tong Hua Area, Southern Jilin Province. *Earth Science*, 38(11): 1487—1499 (in Chinese with English abstract).
- Segall, P., Simpson, C., 1986. Nucleation of Ductile Shear Zones on Dilatant Fractures. *Geology*, 14(1): 56. doi: 10.1130/0091-7613(1986)14<56:nodszo>2.0.co;2
- Simpson, C., De Paor, D.G., 1993. Strain and Kinematic Analysis in General Shear Zones. *Journal of Structural Geology*, 15(1):1—20. doi:10.1016/0191-8141(93)90075-L
- Sun, M., Armstrong, R.L., Lambert, R.S., et al., 1993. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd Isotopic Geochemistry of the Paleoproterozoic Kuandian Complex, the Eastern Liaoning Province, China. *Precambrian Research*, (1—2):171—190.doi:10.1016/0191-8141(93)90075-L
- Wallis, S., 1995. Vorticity Analysis and Recognition of Ductile Extension in the Sanbagawa Belt, SW Japan. *Journal of Structural Geology*, 17(8): 1077—1093. doi: 10.1016/0191-8141(95)00005-x
- Wallis, S.R., 1992. Vorticity Analysis in a Metachert from the Sanbagawa Belt, SW Japan. *Journal of Structural Geology*, 14

- (3):271—280.doi:10.1016/0191-8141(92)90085-b
- Wan, Y.S., Song, B., Liu, D.Y., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of Palaeoproterozoic Metasedimentary Rocks in the North China Craton: Evidence for a Major Late Palaeoproterozoic Tectonothermal Event. *Precambrian Research*, 149 (3—4): 249—271. doi: 10.1016/j.precamres.2006.06.006
- Wang, Y.B., Liang, M.H., Huo, Q.Z., et al., 2004. The Study of the Limit Deformation Measurement with Deformation Feldspar in Granite Areas. *Northwestern Geology*, 37 (2): 19—24 (in Chinese with English abstract).
- Weijermars, R., 1991. The Role of Stress in Ductile Deformation. *Journal of Structural Geology*, 13 (9): 1061—1078. doi: 10.1016/0191-8141(91)90057-p
- Weijermars, R., 1998. Taylor-Mill Analogues for Patterns of Flow and Deformation in Rocks. *Journal of Structural Geology*, 20 (1): 77—92. doi: 10.1016/s0191-8141(97)00051-5
- Wu, F., Zhao, G., Wilde, S.A., et al., 2005. Nd Isotopic Constraints on Crustal Formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (5): 523—545.
- Wu, C.L., 1991. Metamorphic Temperature-Pressure Conditions of Liaohe Group at Liaodong Peninsula. *Liaoning geology*, (4): 342—348 (in Chinese with English abstract).
- Wu, D., Zhuang, T.X., Liu, X.D., et al., 2013. Petrological and Geochemical Characteristics of Remelting Chorismite in Lianshanguan Area of East Liaoning. *World Nuclear Geoscience*, 30 (4): 210—216 (in Chinese with English abstract).
- Xia, H.R., Liu, J.H., 2011. The Crystallographic Preferred Orientation of Quartz and Its Applications. *Geological Bulletin of China*, 30 (1): 58—70 (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, 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).
- Yang, Z.S., Yu, B.X., 1984. Palaeotectonics and its Evolution of the Late Precambrian in East China. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, (2): 1—20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., Zhang, J.J., Guo, L., 2006. Fractal Analysis of Dynamically Recrystallized Quartz Grains and Estimation of Mainly Rheological Parameters of the Rumba Ductile Shear Zone, Northern Himalayan Dome Belt. *Geological Sciences*, 41 (1): 158—169.
- Zhang, Q.S., 1984. Early Cambrian Geological and Mineralization in China. Jilin People's Press, Changchun, 218—450 (in Chinese).
- Zhang, Q.S., Yang, Z.S., Liu, L.D., 1988. The Early Crust Evolution and Minerals in the Liaodong Peninsula. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, J., Zheng, Y., 1997. Polar Mohr Constructions for Strain Analysis in General Shear Zones. *Journal of Structural Geology*, 19 (5): 745—748. doi: 10.1016/s0191-8141(96)00119-8
- Zhao, G.C., 2009. Metamorphic Evolution of Major Tectonic Units in the Basement of the North China Craton: Key Issues and Discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (8): 1772—1792 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G.C., Sun, M., Wilde, S.A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136 (2): 177—202. doi: 10.1016/j.precamres.2004.10.002
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Cawood, P.A., et al., 2001. Archean Blocks and Their Boundaries in the North China Craton: Lithological, Geochemical, Structural and P-T Path Constraints and Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 107 (1—2): 45—73. doi: 10.1016/s0301-9268(00)00154-6
- Zhao, G.C., Zhai, M.G., 2013. Lithotectonic Elements of Precambrian Basement in the North China Craton: Review and Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 23 (4): 1207—1240. doi: 10.1016/j.gr.2012.08.016
- Zheng, B.R., Jin, S.Y., 1989. Tectonic Lithography. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zheng, Y.D., 2005. Kinematics and Dynamics of the Mesozoic Orogeny and Late-Orogenic Extensional Collapse in the Sino-Mongolian Border Areas. *Science in China (Series D)*, 48 (7): 849. doi: 10.1360/03yd0552
- Zheng, Y.D., Wang, T., 2005. Kinematics and Dynamics of the Mesozoic Orogeny and Late-Orogenic Extensional Collapse in the Sino Mongolian Border Areas. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 35 (4): 291—303 (in Chinese).
- Zheng, Y.D., Wang, T., Zhang, J.J., 2008. Theory and Practice of Kinematic Vorticity ( $W_k$ ). *Earth Science Frontiers*, 15 (3): 209—220 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, K., 2016. The Formation and Evolution of the Archean Greenstone belt in the Anshan-Benxi Area (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

陈斌, 李壮, 王家林, 等, 2016. 辽东半岛 ~2.2Ga 岩浆事件及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 46 (2):

- 303—320.
- 陈荣度,1990.辽东裂谷的地质构造演化.中国区域地质,(4):306—315,333.
- 郭智添,1982.辽东连山关早前寒武纪铀矿床地质特征及成矿模式.长春地质学院学报,(S1):84—95,168.
- 韩国卿,刘永江,温泉波,等,2009.嫩江一八里罕断裂带岭下韧性剪切带变形特征.吉林大学学报:地球科学版,39(3):397—405.
- 核工业 241 大队,1989.辽宁省本溪县连山关铀矿床勘探报告.吉林大学学报(地球科学版).
- 贺高品,叶慧文,1998b.辽东—吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义.岩石学报,14(2):152—162.
- 黄建军,1994.糜棱岩研究的若干理论与应用初评.化工矿产地质,16(2):117—122.
- 李刚,徐仲元,刘正宏,等,2013.医巫闾山变质核杂岩早白垩世伸展变形.岩石学报,29(3):938—952.
- 李婧,刘永江,李伟民,等,2016.华北克拉通基底花岗质片麻岩变形和流变学研究——以辽西寺儿堡地区为例.大地构造与成矿学,40(5):891—907.
- 李三忠,刘永江,2012.辽河群区域变质特征及其大陆动力学意义.地质论评,47(1):9—18.
- 李三忠,郝德峰,韩宗珠,等,2003.胶辽地块古元古代构造—热演化与深部过程.地质学报,77(3):328—340.
- 李三忠,郝德峰,赵国春,等,2004.丹东花岗岩的地球化学特征及其成因.岩石学报,20(6):1417—1423.
- 李三忠,刘永江,杨振升,等,1998.辽河群变质泥质岩中变质重结晶作用和形作用的关系.岩石学报,14(3):351—365.
- 李三忠,杨振升,1996.辽东早元古代造山带隆滑构造解析.长春地质学院学报,26(3):305—309.
- 李三忠,杨振升,刘永江,1997a.辽河群变质带垂向分层性及其起因.科学通报,42(24):2631—2636.
- 李三忠,杨振升,刘永江,等,1997b.胶辽吉地区古元古代早期花岗岩的侵位模式及其与隆滑构造的关系.岩石学报,13(2):64—77.
- 梁琛岳,刘永江,李伟,等,2011.黑龙江嫩江地区科洛杂岩伸展构造特征.地质通报,30(2):291—299.
- 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(1):115—129.
- 刘俊来,1991.辽吉裂谷内带顺层构造片岩的变形构造与变形机制.吉林地质,10(4):1—9.
- 刘俊来,曹淑云,邹运鑫,等,2008.岩石电子背散射衍射(EBSD)结构分析及应用.地质通报,27(10):1638—1645.
- 刘晓东,2012.连山关地区构造蚀变与铀矿化的关系//全国铀矿大基地建设学术研讨会论文集(上).
- 刘永江,李三忠,白立新,1996.辽宁海城地区辽河群底部大型韧性滑脱带的构造演化.长春地质学院学报,26(2):166—171.
- 刘永江,李三忠,杨振升,1997a.华北地台东缘早元古代隆—滑构造模式.地质论评,43(6):569—576.
- 刘永江,杨振升,李三忠,等,1997b.古元古代拉伸构造模式——以胶北、辽东和吉南地区为例.长春地质学院学报,27(2):141—146.
- 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.
- 王云斌,梁明宏,霍勤知,等,2004.利用变形花岗岩体中的长石矿物进行有限应变测量初探.西北地质,37(2):19—24.
- 吴春林,1991.辽东半岛辽河群变质岩温压条件.辽宁地质, (4):342—348.
- 吴迪,庄廷新,刘晓东,等,2013.辽东连山关地区重熔混合岩岩石地球化学特征.世界核地质科学,30(4):210—216.
- 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.
- 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.
- 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.
- 杨振升,俞保祥,1984.中国东部晚期寒武纪构造及其演化.长春地质学院学报,(2):1—20.
- 张秋生,1984.中国早前寒武纪地质及成矿作用.长春:吉林人民出版社.
- 张秋生,杨振升,刘连登,1988.辽东半岛早期地壳演化与矿产.北京:地质出版社:218—450.
- 赵国春,2009.华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论.岩石学报,25(8):1772—1792.
- 郑伯让,金淑燕,1989.构造岩组学.武汉:中国地质大学出版社.
- 郑亚东,王涛,2005.中蒙边界区中生代推覆构造与伸展垮塌作用的运动学和动力学分析.中国科学 D 辑,35(4):291—303.
- 郑亚东,王涛,张进江,2008.运动学涡度的理论与实践.地学前缘,15(3):209—220.
- 朱凯,2016.鞍山—本溪地区太古宙绿岩带的形成及演化(博士学位论文).吉林:吉林大学.