

doi:10.3799/dqkx.2017.137

辽东鞍山齐大山韧性剪切带运动学解析及形成机制

刘昕悦^{1,2}, 李婧^{1,2}, 刘永江^{1,2*}, 李伟民^{1,2}, 温泉波^{1,2}, 梁琛岳^{1,2}, 常瑞虹^{1,2}

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

摘要: 关于太古宙早期地壳演化构造机制的争论已经持续了数十年, 其焦点主要集中于水平构造还是垂向构造两大经典构造模式的探讨。对于早期地壳构造演化方面的研究, 将会有助于我们更好地理解早前寒武纪的地球动力学机制。本文对华北克拉通东北部鞍山地区花岗—绿岩带内齐大山韧性剪切带的构造变形特征进行了详细的解析, 揭示了该区新太古代垂向构造作用样式。研究表明, 齐大山韧性剪切带内花岗质岩石长英质矿物塑性拉长特征明显, 条带状构造发育, 面理向 NWW 方向陡倾, 不对称组构特征和矿物拉伸线理产状指示向 NWW 的陡倾正滑移剪切作用。变形岩石中的长英质矿物均发育中低温显微变形特征, 石英 C 轴电子背散射衍射 (EBSD) 组构分析揭示石英以菱面 $\langle a \rangle$ 和底面 $\langle a \rangle$ 滑移系为主, 岩石经历了中低温非共轴变形。根据矿物的变形行为以及石英的结晶优选方位推测变形温度约为 400~500 °C, 岩石变形特征以位错蠕变为主。有限应变分析结果表明, 靠近铁矿带方向, 构造岩类型由 L=S 构造岩过渡为 LS 构造岩, 岩石应变强度呈明显增强趋势。运动学角度测量结果显示齐大山韧性剪切带内大多数岩石样品的 W_k 值大于 0.75, 岩石形成于以简单剪切作用为主的一般剪切作用。对比花岗—绿岩带西侧的白家坟韧性剪切带, 显示二者均具有相向的陡倾正滑移运动学特征, 表明新太古代时期鞍山地区地壳构造演化模式以垂向构造作用为主。

关键词: 韧性剪切带; 太古宙片麻岩; 组构分析; 拗沉作用; 垂向构造作用; 华北克拉通; 构造。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2017)12-2129-17

收稿日期: 2017-03-15

Kinematics Analysis and Formation Mechanism of Qidashan Ductile Shear Zone, Eastern Anshan, Liaoning Province, NE China

Liu Xinyue^{1,2}, Li Jing^{1,2}, Liu Yongjiang^{1,2*}, Li Weimin^{1,2}, Wen Quanbo^{1,2}, Liang Chenyue^{1,2}, Chang Ruihong^{1,2}

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

Abstract: The controversy over the Archean tectonic regimes has lasted several decades focused on the horizontal and vertical tectonics, the two classical tectonic models for Archean. Thus, more studies of the early crustal tectonic evolution are requisite for better understanding geodynamic regimes in the early Precambrian. In this study, detailed structural analysis of Qidashan down-slip ductile shear zones which developed in the eastern Anshan area was carried out and an example for revealing Neo-archean vertical tectonics is provided. The ribbon structures formed by intensely elongated felsic minerals are widespread in the deformed gneisses. The quartz C-axis fabric patterns obtained by electron backscatter diffraction technique imply low to middle temperature non-coaxial deformation with active rhomb $\langle a \rangle$ slip and basal $\langle a \rangle$ slip. Deformation behaviors of minerals and quartz crystallographic preferred orientations demonstrate that the rocks underwent mylonitization at a temperature of 400–500 °C under greenschist facies metamorphic conditions. Dislocation creep is the main rock deformation mechanism within the shear zones. Finite strain measurement results suggest that toward the iron ore belt, the tectonites change from L=S- to LS-type and the strain intensity exhibits an enhanced trend across the shear zones. Kinematic vorticity values (>0.75) indicate that the deformed rocks in ductile shear

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: 刘昕悦 (1990—), 男, 博士研究生, 构造地质学专业。ORCID: 0000-0002-0407-5152. E-mail: 1525023015@qq.com

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

引用格式: 刘昕悦, 李婧, 刘永江, 等, 2017. 辽东鞍山齐大山韧性剪切带运动学解析及形成机制. 地球科学, 42(12): 2129–2145.

zones were produced by steady-state simple-shear dominated general shear. Compared to the Baijiafen ductile shear zone to the west, the Qidashan and Baijiafen ductile shear zones both have mutually down-slip kinematic characteristics, indicating that the Neoproterozoic crust growth and tectonic evolution in Anshan area is dominated by vertical tectonics.

Key words: ductile shear zone; Archean gneiss; fabric analysis; sag duction; vertical tectonic; North China craton; tectonics.

众所周知,大陆岩石圈的变形主要受控于其流变学行为(Chardon *et al.*, 2009; Gapais *et al.*, 2009; Cagnard *et al.*, 2011),物质组成及其热状态极大程度地影响并决定着早前寒武纪岩石圈演化的动力学机制.太古宙地壳热流值高、极软,呈高塑性的缓慢流动状态,太古宙构造样式也表现出独特的、不同于现代板块构造(李三忠等, 2015a, 2015b, 2015c).垂向构造和水平构造是基于太古宙变形以及地壳生长提出的两大具有显著性差异的构造模型.垂向构造主要以地幔柱、地幔对流方式为主.许多太古宙花岗—绿岩带内发育的穹脊构造(dome and keel structure)也是太古宙垂向构造的典型代表之一(McGregor, 1951; Anhaeusser *et al.*, 1969; Mareschal and West, 1980; Ramberg, 1981; Dixon and Summers, 1983; Collins, 1989; Hippertt and Davis, 2000; Zhao *et al.*, 2001; Van Kranendonk *et al.*, 2004; Lin, 2005; Moyen *et al.*, 2006; Parmenter *et al.*, 2006; Lin *et al.*, 2007; 赵国春, 2009; Van Kranendonk, 2011; Lin and Beakhouse, 2013).水平构造则与现代板块构造作用相似,是一种均变过程,主要表现为俯冲、碰撞、岛弧岩浆作用等地质特征(Kröner, 1981; de Wit, 1998; Kusky and Polat, 1999; Calvert and Luden, 1999; Zhai *et al.*, 2003; Zhao *et al.*, 2001).

围绕垂向和水平构造两大模式,有关太古宙构造机制的争论已经持续了数十年.加拿大 Superior 克拉通绿岩带构造演化的最新研究成果显示,太古宙时期水平与垂向构造运动在区域范围内是同时存在的;其中,新太古代可能代表了由早期的垂向构造作用向晚期的水平构造转换的过渡时期(Lin, 2005; Parmenter *et al.*, 2006; Lin *et al.*, 2007; Lin and Beakhouse, 2013).但是总体来说,太古宙构造机制尚且处于探讨之中,与此相关的一些重要的科学问题也有待解决,还需要更多的关于早期地壳生长和构造演化等方面的研究,来进一步帮助我们查明早前寒武纪的地球动力学机制.

鞍山地区位于华北克拉通东北部(图 1),保存了较为完整的太古宙地质记录,是世界上为数不多的 3.8 Ga 古老岩石的出露地之一,也是我国太古宙

地壳演化及早期构造机制研究的绝佳场所(Zhao *et al.*, 1998, 1999, 2000, 2001, 2005; 赵国春, 2009; 吴福元等, 2008; 翟明国, 2008).通过详细地野外观察我们发现:鞍山东部齐大山—西大背 BIF 型铁矿带两侧发育两条 NNW 向的韧性剪切带,按其空间地理位置分别命名为:白家坟韧性剪切带(Li *et al.*, 2017)和齐大山韧性剪切带(图 1).韧性剪切带内太古宙 TTG 岩石,以及具有绿岩带性质的鞍山群变质层状岩系均具有明显的韧性剪切及流变学特征.两条韧性剪切带表现出相向的陡倾滑运动学特征,推测二者的形成可能与绿岩带内条带状磁铁建造(BIF)的向下拗沉作用相关,反映了太古宙的垂向构造运动.为了进一步查明韧性剪切带形成与绿岩带垂向构造作用之间的相互关系,需对剪切带内岩石的构造变形、运动学特征以及变形机制等问题进行详细的解析与研究.

基于以上问题,本文选择鞍山东部花岗—绿岩带内,与铁矿相关的齐大山韧性剪切带为研究对象,开展韧性剪切带变形岩石的宏观变形、显微组构以及运动学特征分析,及对剪切带内的岩石应变和运动学涡度特征进行了系统的测量、统计与分析.综合以上研究成果,查明韧性剪切带内克拉通早期组成物质的运动学性质、岩石变形温度以及变形机制等问题,初步探讨鞍山东部花岗—绿岩带的构造样式.

1 区域地质概况

鞍山地区位于华北克拉通东北部(图 1),属辽东和吉南太古宙杂岩出露区的一部分,是我国重要的铁矿基地,也是前寒武纪地质演化研究的重要窗口.研究区内 80% 的面积被太古宙花岗质岩石占据,根据前人获得的精确年代学证据,鞍山地区的太古宙花岗质岩石可划分为 4 个岩石单元:(1)始太古代花岗质岩石(3.80~3.65 Ga),主要包括了白家坟奥长花岗片麻岩(Liu *et al.*, 1992, 2008)、东山条带状奥长花岗岩(Song *et al.*, 1996)和变质石英闪长岩(Wan *et al.*, 2005)、深沟寺条带状奥长花岗岩(Wan *et al.*, 2012)以及锅底山奥长花岗岩(Wang *et al.*, 2015);(2)古太古代片麻岩杂岩和陈台沟糜

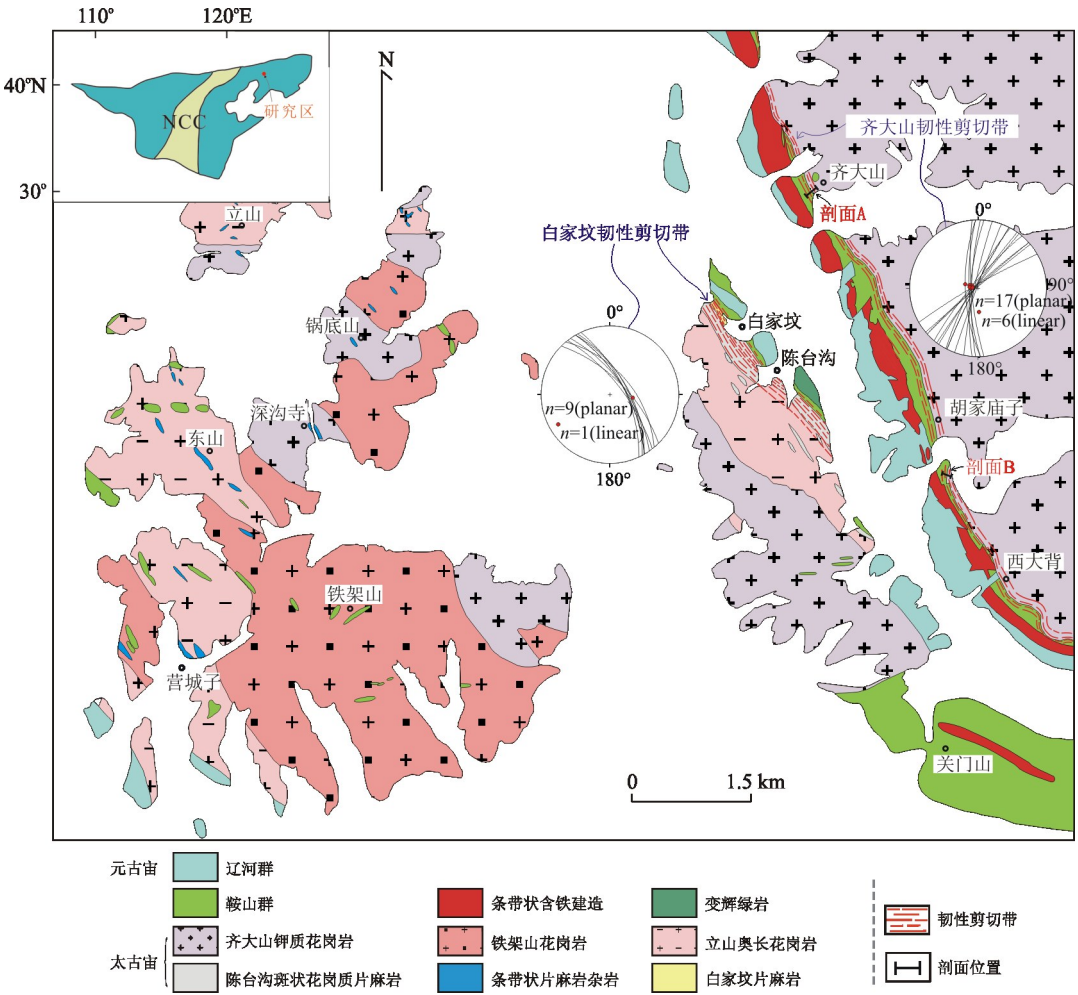


图 1 鞍山东部区域地质及韧性剪切带分布图

Fig.1 Regional geological map showing the ductile shear zone in the Anshan east

据 Li *et al.* (2017)

棱岩化花岗岩(3.35~3.30 Ga);(3)中太古代立山花岗岩和铁架山花岗岩;(4)新太古代齐大山花岗岩(~2.47 Ga),这些古老基底岩石通常呈卵形穹隆形态产出,周围被新太古界鞍山群以及早元古界辽河群绿片岩相变质沉积岩系覆盖,构造了鞍一本地区典型的花岗—绿岩穹隆构造(Liu *et al.*, 1987).研究区内著名的鞍山式 BIF 铁矿主要产于新太古界鞍山群樱桃园组地层中,沿齐大山到西大背,空间展布与绿岩带分布一致(张连昌等, 2012, 2014),构成了区内近南北向的铁矿带,本文称之为“齐大山—西大背 BIF 铁矿带”.鞍山地区 BIF 铁矿多为 Algoma 型含铁建造,与大规模的海底火山活动密切相关,前人对齐大山—西大背 BIF 铁矿带内相关岩系的定年结果显示研究区 BIF 铁矿应形成于 2 551~2 530 Ma(王守伦和张瑞华, 1995;杨秀清, 2013;代堰培等, 2013;崔培龙, 2014),且经历了 2 469 Ma 左

右的变质事件改造(代堰培等, 2013).

徐仲元(1991)指出鞍山地区的铁矿主要处于 3 条巨大的韧性变形带中,并经历了早期的塑性变形和晚期的脆性变形共同作用.同时,在构造置换、剪切分异和流体参与等因素的影响下,磁铁矿石岩中条带的矿物组分重新迁移和分配.范正国等(2013)对鞍山地区进行了重磁剖面反演,反演结果表明,鞍山区域上总体表现为以铁架山花岗岩穹隆为中心,东鞍山以及齐大山向斜构造环绕在穹隆顶部,控制区内 BIF 铁矿体的分布.其中东鞍山向斜向南倒卧,齐大山向斜向北东倒卧.

近年来,笔者通过详细的野外考查,发现花岗—绿岩带东西两侧,即花岗质岩石与上覆变质—沉积岩系接触部位,岩石遭受了强烈地韧性变形改造,矿物组构定向明显,且均具有向下的陡倾滑运动学特征,两条韧性剪切带在空间分布、岩石变形组构特征

等方面具有很强的相似性和可对比性,综合反映了区域上花岗—绿岩带内的垂向构造运动特征. Li *et al.* (2017)通过宏/微观构造—岩石组构分析、有限应变测量及运动学涡度等研究方法,探讨了铁矿带西侧白家坟韧性剪切带的形成机制和过程. 为进一步提供早期地壳垂向生长的构造样式的证据,本文选择了铁矿带东侧的齐大山韧性剪切带进行详细的构造解析.

2 宏观构造特征及运动学分析

齐大山韧性剪切带位于齐大山—西大背 BIF 铁矿带的东侧,为一走向 NNW 的狭窄剪切带,沿鞍山群与齐大山花岗岩的接触界面连续分布,沿走向可延伸近 5 km. 野外观察发现:铁矿带东侧花岗—绿岩接触界面附近的齐大山花岗岩与鞍山群均发生了强烈的韧性变形,矿物定向拉长明显,片麻理、矿物拉伸线理构造发育. 韧性剪切变形只局限于花岗—绿岩接触面内,向东方向远离铁矿带,齐大山花岗岩变形程度逐渐减弱,过渡为块状构造,无韧性变形特征. 本文对齐大山剪切带内鞍山群和齐大山花岗质片麻岩的构造变形及运动学特征进行了详细的分析,在齐大山铁矿区齐欣选矿厂(剖面 A)、胡家庙子铁矿区(剖面 B)构造变形强烈部位分别进行了实测构造剖面及定向样品采集等工作(图 2).

在齐大山剖面 A 上可见矿体发育平直条带状构造,暗色铁质条带与浅色硅质条带相间排列. 贫、富铁 BIF 层以及鞍山群变质沉积岩系为断层接触关系,断层产状与 BIF 矿体条带产状一致,产状为 $250^{\circ}\sim 260^{\circ}/\angle 73^{\circ}\sim 88^{\circ}$,线理产状为 $240^{\circ}\sim 263^{\circ}/\angle 71^{\circ}\sim 85^{\circ}$,倾伏角较陡,反映了近 W 方向的正滑移特征(图 3a).

矿体围岩樱桃园组云母片岩、云母石英片岩主要由石英、白云母、绿泥石等矿物组成,受韧性剪切作用,白云母等片状矿物定向排列,石英颗粒塑性拉长明显,片理近于直立,沿花岗—绿岩接触面走向方向产状变化很小,基本保持一致,集中在 $265^{\circ}\sim 330^{\circ}/\angle 69^{\circ}\sim 88^{\circ}$,片理面上矿物拉伸线理产状竖直($270^{\circ}\sim 296^{\circ}/\angle 64^{\circ}\sim 81^{\circ}$),部分云母片岩、云母石英片岩中发育不对称褶皱,反映了近 W 方向向下的剪切滑脱作用(图 3b、3c). 鞍山群向东逐渐过渡为齐大山花岗质片麻岩,其原岩为中粗粒白云母花岗岩,主要由斜长石、碱性长石、石英、白云母、黑云母等矿物组成. 胡家庙子剖面 B 上可见齐大山花岗质片麻岩发育规则平整的面理,面理由塑性拉长的石英条带和长石集合体构成,局部可见颗粒较大的碱性长石残碎斑晶沿面理展布方向两端尖灭,呈透镜状产出(图 3d). 岩石面理与鞍山群以及铁矿接触面的产状较为一致,优势产状为 $290^{\circ}/\angle 88^{\circ}$.

沿剖面走向观察,齐大山韧性剪切带内岩石具

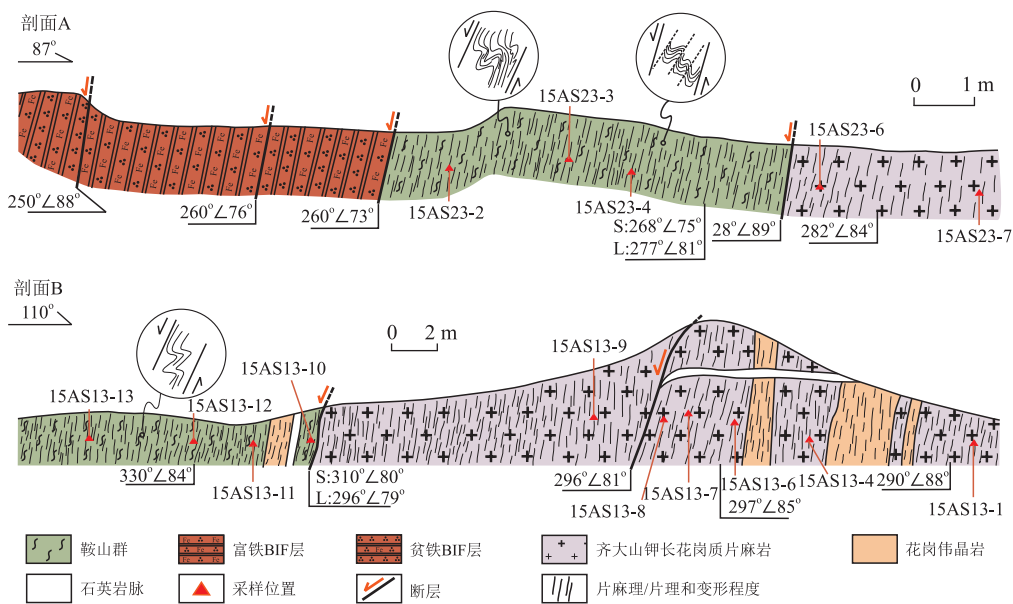


图 2 齐大山韧性剪切带野外实测构造剖面图及采样位置

Fig.2 Field survey and sample location of the ductile Shear zone in the Qidashan area
剖面 A 测量于齐大山铁矿区齐欣选矿厂;剖面 B 测量于胡家庙子铁矿区;具体位置见图 1

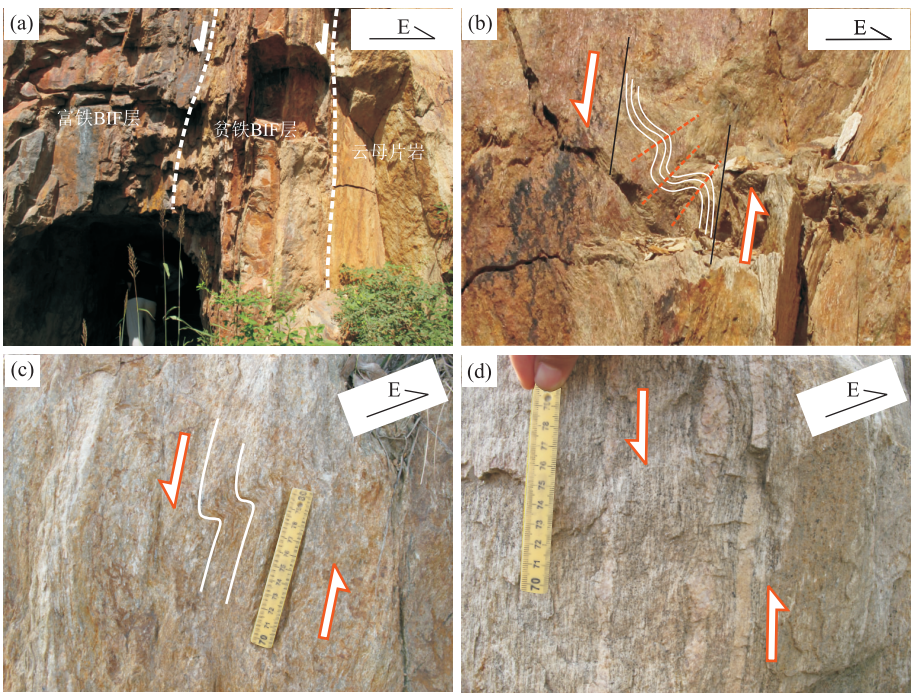


图 3 齐大山韧性剪切带宏观构造变形特征

Fig.3 Deformation characteristics of the Qidashan ductile shear zone

所有照片均垂直于水平面,朝向 S、SSW 方向;a.BIFs 与云母片岩呈正断层接触关系;b,c.云母片岩、云母石英片岩发育陡倾面理,不对称褶皱指示近 W 方向的向下剪切作用;d.齐大山花岗质片麻岩发育规则的陡倾片麻理,矿物定向拉长明显,不对称残斑指示近 W 方向的向下剪切作用

有细粒化特征逐渐减弱、矿物颗粒粒度逐渐增大的趋势.向东方向逐渐远离接触带观察,约 300 m 处可见块状构造的齐大山花岗岩,岩石未遭受韧性剪切作用改造,保留完好的中粗粒花岗结构.故推测,齐大山韧性剪切带内岩石变形强弱与距离铁矿带的远近密切相关;越靠近铁矿带,岩石变形程度越强,面理化特征越明显,线理发育越好;反之,越弱.

3 显微构造特征

鞍山群樱桃园组中云母石英片岩的主要组成矿物为石英(60%~75%)和白云母(20%~30%),还有少量的绿泥石(~5%)、绢云母(3%~5%)、黑云母(<2%).云母石英片岩中石英颗粒塑性拉长明显,粒度集中在 0.3~0.5 mm,石英具有波状消光特征,呈条带状分布(图 4a).白云母多呈较宽的片状,粒径为 0.5~2.0 mm,石英条带边界较平直,多被定向排列的白云母晶体间隔,单个石英颗粒多为不规则状,局部具有膨凸式重结晶和亚颗粒旋转重结晶共存的特征.越靠近铁矿带,岩石中白云母含量明显增加,平直的石英条带逐渐向透镜状过渡,长轴平行于片理方向,矿物颗粒细粒化程度增加(图 4b).局

部可见石英压力影,阴影部分由细粒石英及少量白云母组成,核部石英边界或微裂隙内发育膨凸式重结晶特征(图 4c),运动学特征指示左行滑脱剪切.

齐大山花岗质片麻岩原岩为中粗粒白云母花岗岩,主要由斜长石(30%~35%)、碱性长石(~25%)、石英(~30%)、白云母(8%~10%)、绿帘石(3%~5%)、绢云母(3%~5%)及黑云母(~2%)组成.显微镜下,胡家庙子剖面 A 上变形强烈的齐大山花岗质片麻岩主要表现为较平直的多晶石英条带与长石聚集带相间排列(图 4e),构成面理.岩石中斜长石颗粒多发生了强烈绢云母化蚀变,表面浑浊,边界模糊,但仍可见塑性拉长特征,多聚成条带状分布(图 4d).岩石中的碱性长石以微斜长石为主,格子双晶发育,局部可见双晶弯曲、机械双晶等特征(图 4e).较宽的片状白云母多沿面理方向定向分布(图 4e).越靠近铁矿带齐大山花岗质片麻岩的变形程度越强,矿物拉长以及细粒化特征越显著(图 4e).齐大山剖面 B 上齐大山花岗质片麻岩基质矿物多由细小的绢云母以及石英颗粒组成,白云母定向排列,与鞍山群石英云母片岩的显微组构特征相似,可见大的斜长石、微斜长石斑晶,推测是在构造应力的作用下,靠近接触带的齐大山花岗岩中长石矿物发生了强烈的绢云母化蚀变,导致岩石中长石含量减

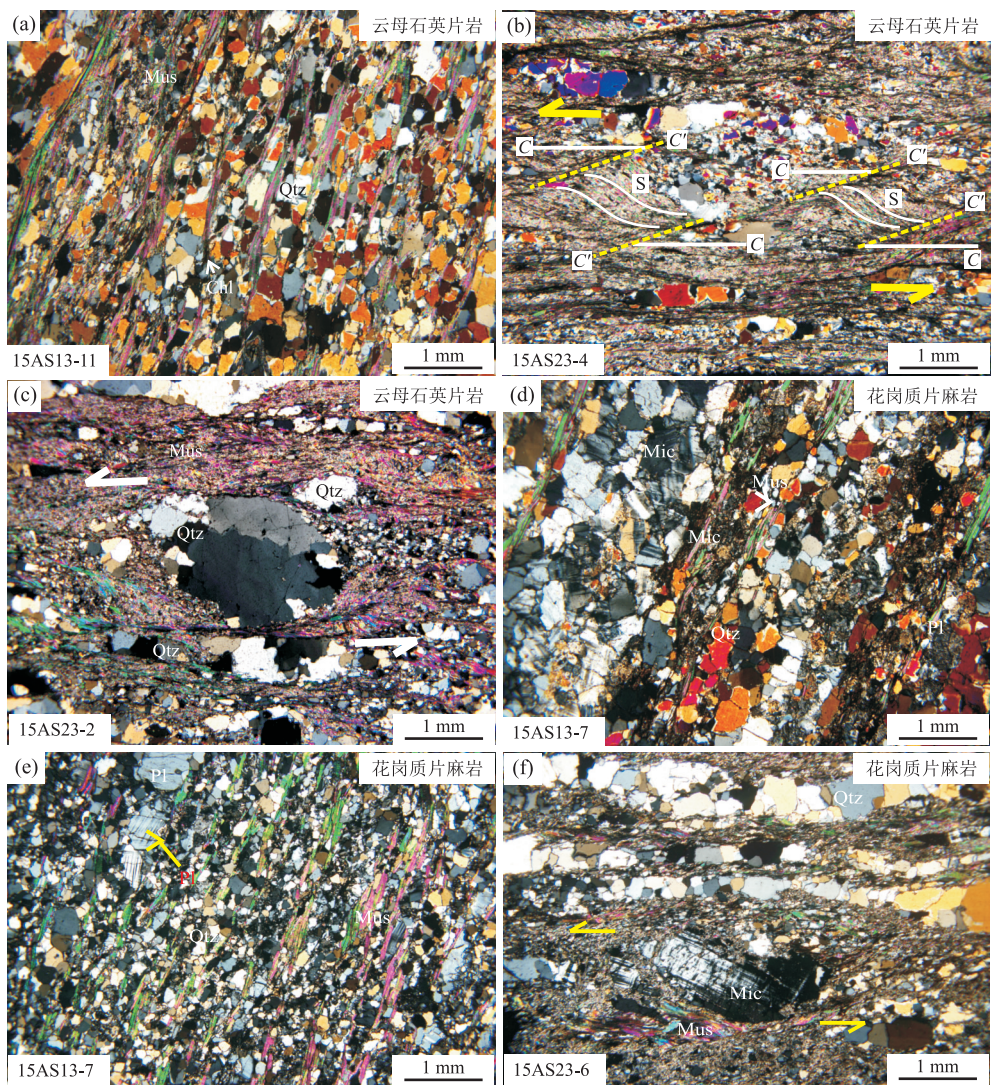


图 4 铁围岩鞍山群樱桃园组、齐大山花岗质片麻岩显微构造特征

Fig.4 Microstructure characteristics of Qidashan granitic gneiss from the Yingtaoyuan Formation

a.平直的多晶石英条带;b.白云母 S-C 结构及晚期伸展褶皱理;c.扁豆状石英集合体,石英波状消光、亚颗粒,局部可见压力影;d.微斜长石机械双晶;e.矿物塑性拉长、细粒化特征明显,斜长石机械双晶;f.石英条带环绕不对称的微斜长石残斑分布,箭头方向代表其运动学方向

少,云母含量增多,多晶石英条带多表现出沿面理方向环绕长石残斑弯曲、透镜状产出特征(图 4f)。不对称的微斜长石旋转残斑(图 4f)指示岩石经历了左行剪切作用。

定向标本显微尺度观察的左行剪切作用与野外宏观构造变形特征所反映的近 W 方向的倾滑剪切作用方向上是一致的。

自然界一般韧性剪切带内的岩石和矿物,通常是在一定的温度、压力和应变速率范围内,通过位错蠕变等机制发生变形的。当差异应力、应变速率等物理参数环境一定的前提下,温压条件便成为影响岩石和矿物变形行为的主导因素(Hirth and Tullis, 1992)。不同的温压条件下,矿物受不同的变形机制

主导,发育不同的变形行为。因此,韧性剪切带内岩石矿物变形行为的详细研究是约束岩石的变形环境的一种有效方法。利用石英重结晶类型 Stipp *et al.* (2002)以及矿物的变形行为(Passchier and Trouw, 2005;向必伟等,2007),齐大山韧性剪切带内变形岩石中均发育中低温(400~500 ℃)变形组构特征(表 1),属于绿片岩相变质环境。

4 有限应变测量与运动学涡度分析

本次岩石有限应变测量的岩石样品包括齐大山韧性剪切带内的齐大山花岗质片麻岩(6 件),云母石英片岩(4 件)。样品采样位置如(图 2)所示,并采

表 1 胡家庙子剖面 B 内测试样品显微组构特征

Table 1 Microstructure characteristics of analyzed samples in the Hujiamiaozi section B

岩性	样品号	矿物组合	显微变形特征	变形强度 ^①	变形温度(℃) ^②
齐大山花岗质片麻岩	15AS13-1	Pl+Mic+Qtz+Mus+Bi+Ser+Epi	石英:较平直的石英条带,塑性拉长,波状消光,BLG+SGR;斜长石:显微破裂,塑性拉长,条带状分布	弱	400~500
	15AS13-4	Pl+Mic+Qtz+Mus+Bi+Ser+Epi	石英:较平直的石英条带,塑性拉长,波状消光,变形纹,BLG+SGR;斜长石:显微破裂,塑性拉长,条带状分布	弱	400~500
	15AS13-6	Pl+Mic+Qtz+Mus+Bi+Ser+Epi	石英:较平直的石英条带,塑性拉长,波状消光,变形带,BLG+SGR;斜长石:显微破裂,塑性拉长,条带状分布	弱	400~500
	15AS13-7	Pl+Mic+Qtz+Mus+Bi+Ser+Epi	石英:较平直的石英条带,塑性拉长,波状消光,变形带,BLG+SGR;长石:条带状分布,斜长石显微破裂,塑性拉长,微斜长石发育机械双晶	中等	400~500
	15AS13-8	Pl+Mic+Qtz+Mus+Bi+Ser+Epi	石英:较平直的石英条带,塑性拉长,波状消光,变形带,BLG+SGR;斜长石:显微破裂,塑性拉长,条带状分布	中等	400~500
	15AS13-9	Pl+Mic+Qtz+Mus+Bi+Ser+Epi	石英:石英条带,塑性拉长,波状消光,变形带,SGR;斜长石:显微破裂,塑性拉长,机械双晶	中等	420~500
云母石英片岩	15AS13-10	Qtz+Mus+Chl+Ser+Bi	石英:石英条带,强烈塑性拉长,波状消光,BLG+SGR	强	400~500
	15AS13-11	Qtz+Mus+Chl+Ser+Bi	石英:石英条带,强烈塑性拉长,波状消光,BLG+SGR	强	400~500
	15AS13-12	Qtz+Mus+Chl+Ser+Bi	石英:石英条带逐渐透镜化,颗粒强烈塑性拉长,波状消光,BLG+SGR	强	400~500
	15AS13-13	Qtz+Mus+Chl+Ser+Bi	石英:石英条带,透镜化且矿物细粒化特征明显,颗粒强烈塑性拉长,波状消光,变形纹,BLG+SGR	强	400~500

注:Qtz.石英;Pl.斜长石;Mic.微斜长石;Bi.黑云母;Mus.白云母;Chl.绿泥石;Ser.绢云母;Epi.绿帘石;BLG.膨凸;SGR.亚颗粒旋转;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;②变形温度是根据长石-石英的变形行为(Stipp *et al.*, 2002)以及石英 EBSD 组构特征综合判断的结果。

表 2 研究区韧性剪切带内岩石 Fry 法有限应变测量结果

Table 2 Finite element strain measurement of rocks in the Qidashan ductile shear zone using Fry method

样品号	R_{XZ}	R_{YZ}	X	Y	Z	$\ln(X/Y)$	$\ln(Y/Z)$	k	γ	ν	E_s
15AS13-1	1.51	1.17	1.25	0.97	0.83	0.26	0.16	1.62	1.46	-0.24	0.29
15AS13-4	1.24	1.10	1.12	0.99	0.90	0.12	0.10	1.26	1.23	-0.11	0.15
15AS13-6	1.27	1.10	1.14	0.98	0.89	0.14	0.10	1.51	1.25	-0.20	0.17
15AS13-7	1.78	1.26	1.36	0.96	0.76	0.35	0.23	1.49	1.67	-0.20	0.41
15AS13-8	1.90	1.29	1.41	0.96	0.74	0.39	0.25	1.52	1.76	-0.21	0.46
15AS13-9	1.96	1.30	1.44	0.95	0.73	0.41	0.26	1.56	1.81	-0.22	0.48
15AS13-10	2.05	1.20	1.52	0.89	0.74	0.54	0.18	2.94	1.91	-0.49	0.53
15AS13-11	2.16	1.19	1.58	0.87	0.73	0.60	0.17	3.43	2.01	-0.55	0.57
15AS13-12	2.38	1.14	1.71	0.82	0.72	0.74	0.13	5.62	2.23	-0.70	0.66
15AS13-13	2.32	1.17	1.66	0.84	0.72	0.68	0.16	4.36	2.15	-0.63	0.63

注: $k=\ln(X/Y)/\ln(Y/Z)$; $\gamma=X/Y+Y/Z-1$; $\nu=(2\epsilon_2-\epsilon_1-\epsilon_3)/(\epsilon_1-\epsilon_3)$; $E_s=\{[(\epsilon_1-\epsilon_2)^2+(\epsilon_2-\epsilon_3)^2+(\epsilon_3-\epsilon_1)^2]/3\}^{1/2}$ 。

用 Fry 法(Fry, 1979; 郑亚东和常志忠,1985)对剖面内的岩石样品进行有限应变测量,结果见表 2。

测量结果表明,齐大山韧性剪切带内,剖面 B 东侧齐大山花岗质片麻岩 k 值为 1.26~1.62,在 Flinn 图解中以平面一拉伸应变和 L=S 构造岩特征为主;西侧靠近铁矿带的鞍山群云母石英片岩 k 值范围为 2.94~5.62,均显著大于 1,以一般拉伸应

变和 LS 构造岩为典型特征.可见靠近铁矿带方向,东西两侧剪切带内的岩石类型呈现出由 L=S 构造岩向 LS 构造岩逐渐过渡的变化趋势。

Hossack 图解中,随着应变强度(E_s)的增加,罗德参数(ν)也逐渐加大(图 5b),根据量化的应变强度数据做韧性剪切带的应变剖面图,从图中可以看出,齐大山韧性剪切带内齐大山花岗质片麻岩显

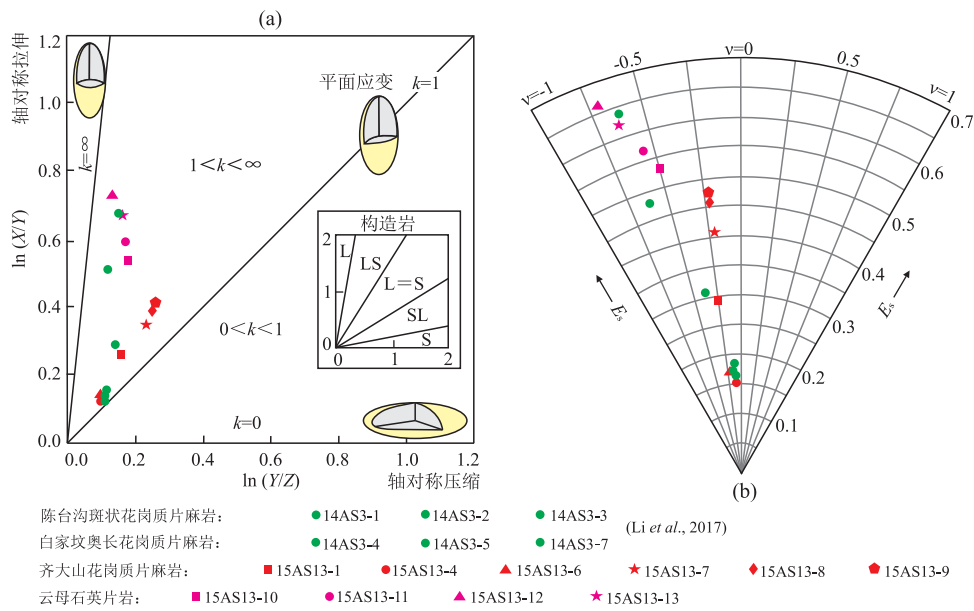


图 5 Flinn 有限应变判别图解(a)和 Hossack 图解(b)

Fig.5 Flinn finite strain discrimination diagram (a) and Hossack diagram (b)

表 3 研究区韧性剪切带内岩石的运动学涡度值

Table 3 Kinematic vorticity values of analyzed rocks in the Qidashan ductile shear zone

样品号	极摩尔圆法				石英条带斜交面理法	
	R_{XZ}	β	α	W_k	θ	W_k
15AS13-1	1.51	27	26	0.899	35	0.940
15AS13-4	1.24	26	32	0.848	31	0.883
15AS13-6	1.27	32	21	0.934	34	0.927
15AS13-7	1.78	23	31	0.857	32	0.899
15AS13-8	1.90	24	25	0.906	33	0.914
15AS13-9	1.96	27	19	0.946	36	0.951
15AS13-10	2.05	25	21	0.934	33	0.914
15AS13-11	2.16	24	23	0.921	35	0.940
15AS13-12	2.38	22	25	0.906	34	0.927
15AS13-13	2.32	24	20	0.940	37	0.961

示出中等—较弱程度的应变强度(0.15~0.48)特征,向西方向,鞍山群云母石英片岩的应变强度(0.53~0.66)明显增强(图 5a)。

运动学涡度(W_k)是检验应力作用类型的重要参数(Xypolias and Koukouvelas, 2001; Roy *et al.*, 2016),该值介于 0~1 之间,0.75 作为界线, $W_k<0.75$ 以共轴的纯剪作用为主,而 >0.75 则简单剪切作用占主导地位(Simpson and De Paor, 1993; Tikoff and Teyssier, 1994).笔者采用极摩尔圆法(张进江和郑亚东,1995)和石英条带斜交面理法($W_k=\sin(2\theta)$;Passchier, 1987)对韧性剪切带内变形岩石中石英变形时的运动学涡度进行估算.两种方法获得的运动学涡度结果基本一致(表 3),极摩尔圆法所获得的运动学涡度值介于 0.848~0.946,

平均值为 0.909;石英条带斜交面理法所获得的运动学涡度值介于 0.883~0.961,平均值为 0.925.获得的 W_k 值大于 0.75,表明剪切带内岩石形成于以简单剪切作用为主的一般剪切作用中.并且显示横穿各韧性剪切带不同岩石样品的运动学涡度值变化幅度很小(图 6a),韧性变形应发生于较稳态的剪切作用过程中.对比白家坟韧性剪切带(Li *et al.*, 2017),铁矿带东侧齐大山韧性剪切带剪切作用中的简单剪切组分明显增多。

综上所述,韧性剪切带内变形岩石的岩石类型和应变强度均表现出空间对称分布的变化规律,且越靠近铁矿带,岩石最大延伸方向的应变量逐渐增大,宏观上表现为矿物拉伸线理等线状构造的发育,同时岩石整体的应变强度也显示出逐渐增大的趋势,与微观尺度上观察到的靠近铁矿带方向,变形岩石中矿物塑性拉长和细粒化特征逐渐增强的变化规律是一致的(图 6b)。

5 石英 C 轴 EBSD 组构分析

本次石英 C 轴组构 EBSD 测试分析是在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成的.详细的测试分析仪器参数及操作方法参见 Liu *et al.*(2012).选择胡家庙子剖面 II 上具有代表性的定向岩石样品进行测试分析,测试样品的采样位置及岩相学特征见图 2 及表 1.EBSD 测试分析

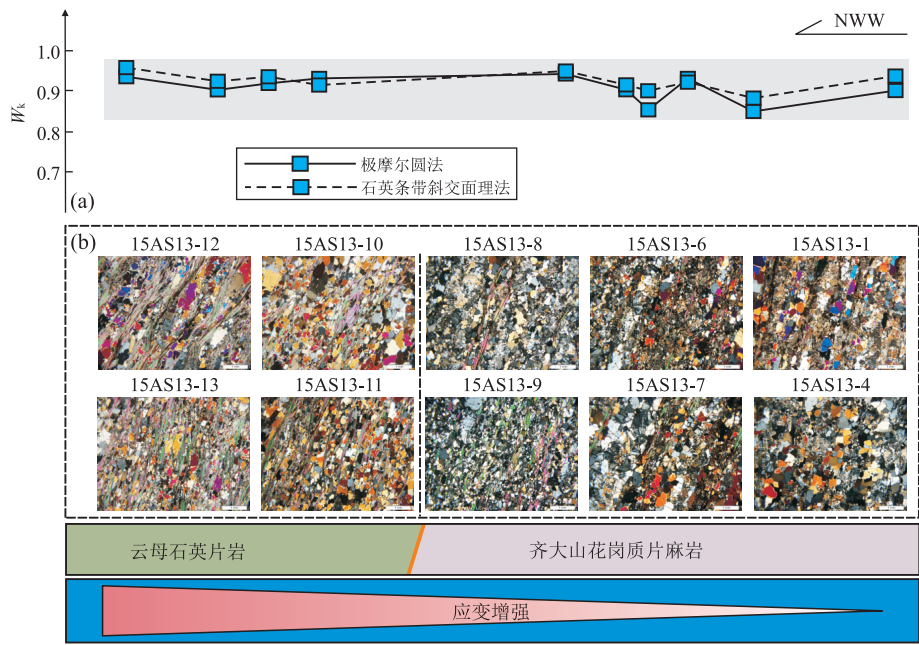


图 6 运动学涡度(a)剖面图、同一比例尺下显微组构特征(b)
Fig.6 Kinematic vorticity (a) Sectional view, microstructure characteristics under the same scale (b)

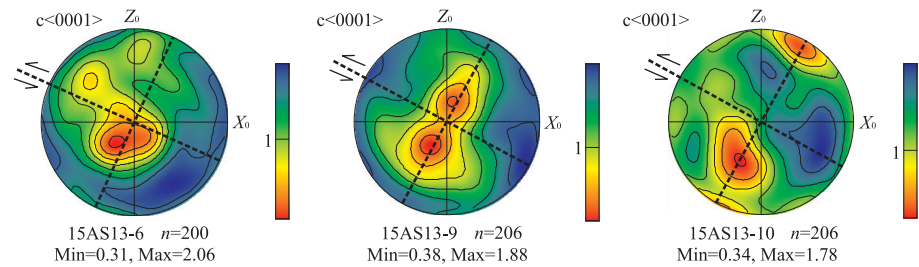


图 7 研究区韧性剪切带内测试样品石英 C 轴组构图
Fig.7 Lower-hemisphere projection of C-axis fabric of quartz grains measured by EBSD from the Qidashan ductile shear zone

均在运动学方向上的 XZ 面上进行.测试对象为不同样品中的石英条带或者集合体,石英颗粒多表现出不均匀消光的变形特征.测试结果如(图 7)所示,其中组构图中的 XY 面代表了糜棱岩的叶理面,组构图中的 X 轴方向则代表了矿物拉伸线理方向.

齐大山韧性剪切带测试样品中,样品 15AS13-6 和 15AS13-9 均为齐大山花岗质片麻岩,样品 15AS13-10 为云母石英片岩.齐大山花岗质片麻岩石英组构图中多表现为位于 Y 轴附近的点极密,样品 15AS13-6 在 XZ 大圆内 X 轴与 Z 轴之间发育弱点极密,表明石英以中温柱面 $\langle a \rangle$ 滑移系启动为主,含有少量的菱面 $\langle a \rangle$ 滑移组分.云母石英片岩 15AS13-10 石英组构图发育两个点极密,一个点极密位于 XZ 大圆上靠近 Z 轴边缘,另一点极密靠近 Y 轴分布,反映了底面 $\langle a \rangle$ 和菱面 $\langle a \rangle$ 滑移系共同作用的特征,指示了齐大山韧性剪切带岩石中低

温变形特征,岩石变形温度应在 400~500 ℃左右,与长石—石英矿物变形温度计分析结果基本一致.韧性剪切带内石英矿物以非共轴变形为主,石英 C 轴组构的不对称性表明,齐大山韧性剪切带内变形岩石则以左行剪切作用为主,石英组构所反映的岩石变形运动学特征与宏观、显微构造分析结果一致.

6 讨论

6.1 齐大山韧性剪切带构造变形特征

对比分析前人的研究成果可知(表 4),鞍山东部南北向齐大山—西大背 BIF 铁矿带两侧发育两条狭窄的陡倾滑韧性剪切带:白家坟韧性剪切带和齐大山韧性剪切带.虽然目前没有精确的同位素年龄数据表明白家坟、齐大山韧性剪切带的形成时间是否一致,但根据韧性剪切带内岩石相似的宏观、显

表 4 铁矿带东西两侧韧性剪切带对比

Table 4 Comparison of ductile shear zones on both sides of the Qidashan iron ore belt

剪切带名称	白家坟韧性剪切带 (Li <i>et al.</i> , 2017)	齐大山韧性剪切带
空间位置	花岗绿岩带西侧(花岗—绿岩接触带内)	花岗绿岩带东侧(花岗—绿岩接触带内)
岩性	斑状花岗质片麻岩、奥长花岗质片麻岩	齐大山花岗质片麻岩、鞍山群云母片岩及云母石英片岩
宏观变形	条带状构造发育,陡倾面理、线理	条带状构造发育,陡倾面理、线理
显微构造	石英波状消光, BLG+SGR 重结晶等	石英波状消光, BLG+SGR 重结晶等
应变类型	平面—拉伸应变	平面—拉伸应变
剪切类型	一般剪切	一般剪切
变形温度	400~500 ℃	400~500 ℃
运动学特征	SEE 方向倾滑剪切	近 W 方向高角度倾滑剪切
应变特征	靠近铁矿带方向,岩石变形和应变强度越大,岩石类型从 L=S 型过渡为 LS 型构造岩	

微构造变形特征以及对称的运动学和空间应变分布特征推测二者应为同一构造机制作用下的产物。白家坟和齐大山韧性剪切带内变形岩石均发生了以拉伸应变为主的韧性变形,变形的花岗质岩石广泛发育由长英质矿物组成的条带状构造,矿物塑性拉长特征明显。石英波状消光、变形带、膨凸式和亚颗粒旋转重结晶,长石塑性拉长、细粒化等一系列中低温显微变形组构特征以及石英 C 轴组构特征表明铁矿带两侧韧性剪切带应形成于较为一致的温压环境中,变形温度应为 400~500 ℃。

最新的重磁交互反演结果显示鞍山地区具有典型的穹脊构造特征,以铁架山穹隆(背斜)为中心,北东、南西侧分别为齐大山、东鞍山向斜构造,发育含铁建造的绿岩体均分布在这些向斜构造内,且控制了铁矿体的分布及产状,研究区内 SW 方向倒卧的齐大山向斜构造北东翼矿体产状近于直立,南西翼矿体向 NE 方向倾斜,倾角(约 45°~65°)中等(范正国等,2013; Fan *et al.*, 2014)。根据前人研究资料及空间分布关系可知,出露于地表的齐大山、胡家庙子以及西大背铁矿应位于向斜构造的北东翼一侧,而隐伏于地下的陈台沟铁矿(代堰镭等,2013)应分布于南西翼一侧(图 8a)。

平面上观察,齐大山和白家坟韧性剪切带沿齐大山—西大背 BIF 铁矿带东西两侧线性对称分布,纵向剖面上,二者应位于绿岩带向斜构造的两翼与花岗岩接触部位(图 8a),其中白家坟韧性剪切带内岩石面理构造倾向为 NEE 方向,倾角中等,与绿岩

带向斜构造南西翼产状较为一致,矿物拉伸线理向 SEE 方向倾伏,倾伏角中等偏大,指示了向斜南西翼一侧 SEE 方向的陡倾滑剪切作用;齐大山韧性剪切带内变形岩石发育 NWW 方向陡倾(~90°)的面理构造,与向斜构造北东翼矿体的产状一致,矿物拉伸线理产状反映了向斜北东翼一侧近 W 方向的陡倾滑剪切作用,东西两侧相向的陡倾滑运动学特征与绿岩带向形的几何学特征相吻合。综合韧性剪切带内岩石的变形、运动学特征以及空间应变分布规律,推测绿岩带两侧岩石强烈剪切变形很可能与花岗—绿岩带垂向穹脊构造的形成作用相关,岩石变形的运动学特征与垂直构造模式所涉及的底辟作用和拗沉作用相一致,反映了向形绿岩带内的垂向构造作用,韧性剪切作用应发生于花岗—绿岩带垂向穹脊构造的形成过程中,主要表现为密度较轻的花岗质岩石与上覆密度较重的富铁建造之间存在一定程度的重力不均衡,尤其是在~2.5 Ga 齐大山花岗岩侵位的过程中会促使 BIF 沉积基底(铁架山花岗岩)的部分熔融,使得基底在物性上变软,最终在区域性地质运动与岩浆作用的驱动下,发生了花岗质岩石向上的底辟作用和含铁建造向下的拗沉作用(Collins, 1989; Van Kranendonk *et al.*, 2004; Lin, 2005; Moyen *et al.*, 2006; Parmenter *et al.*, 2006; Lin *et al.*, 2007; Van Kranendonk, 2011; Lin and Beakhouse, 2013),该垂直运动为花岗—绿岩体接触界面的花岗质岩石和铁矿体围岩提供了向下运动的有利条件(Hippertt and Davis, 2000),在接触界面附近的岩石发生了向下的陡倾滑拉伸变形作用,形成规则的且平行于矿体分布的面理构造(图 8a)。由于韧性剪切带主要驱动力来源于重密度铁矿体的向下拗沉作用,故在韧性剪切带内部,越靠近铁矿带,岩石的变形程度越强,矿物塑性拉长特征也越显著,宏观上岩石的线理构造越发育,岩石类型逐渐由 L=S 构造岩过渡为以线理构造为主的 LS 构造岩,岩石应变特征也逐渐增强(图 8b, 8c)。此外,按几何形态可知,岩石递进变形过程中剪切作用面越陡,平行于剪切作用面的简单剪切组分分量越多,垂直于剪切作用面的纯剪切组分分量越少,绿岩带向斜构造中白家坟韧性剪切带所处的南西翼一侧剪切作用面倾角中等偏大,而齐大山韧性剪切带所处的北东翼一侧倾角较陡,剪切作用面近于直立,故相同的构造应力作用下,北东翼齐大山韧性剪切带的简单剪切分量应多于南西翼白家坟韧性剪切带(Li *et al.*, 2017)的简单剪切分量,进一步验证了本文运动

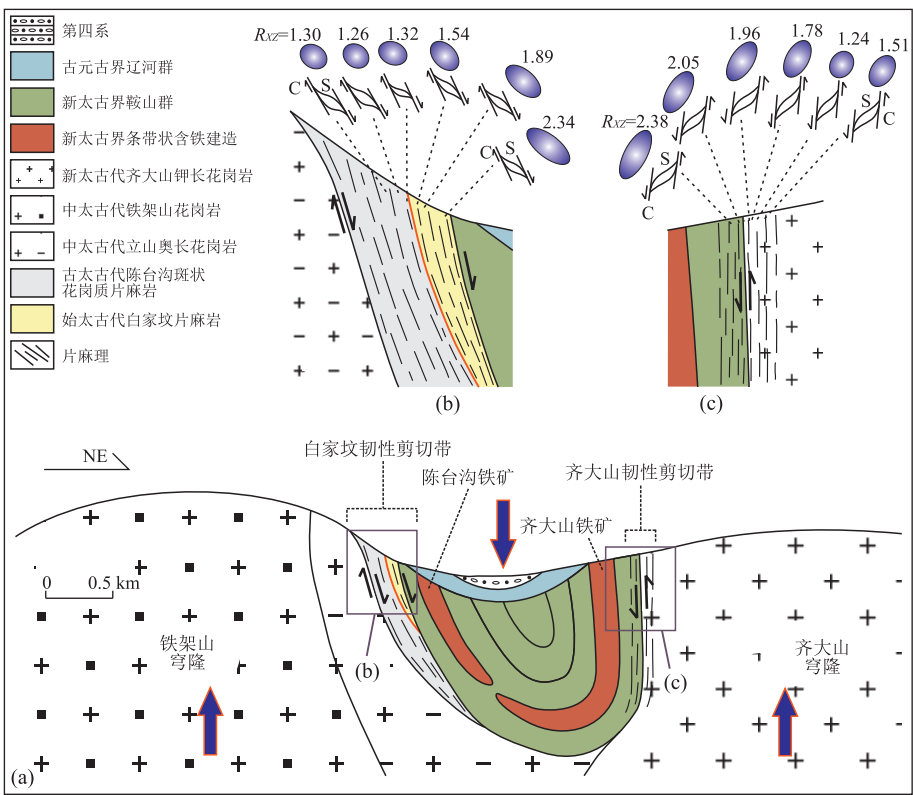


图 8 鞍山东部花岗—绿岩带垂向构造模式及区域韧性剪切带分布(a)、白家坟韧性剪切带 XZ 有限应变椭圆分布(b)和齐大山韧性剪切带 XZ 有限应变椭圆分布(c)

Fig.8 Vertical tectonic model for the evolution of granite-greenstone domain and regional ductile shear zones in eastern Anshan area (a), Baijiadu ductile shear zone XZ finite strain elliptic distribution (b) and Qidashan ductile shear zone XZ finite strain elliptic distribution (c)

图 b 据 Li et al.(2017)

学涡度测量的准确性。

6.2 鞍山花岗—绿岩带的垂向构造

鞍山花岗—绿岩带早前寒武纪构造演化过程复杂,经历了多期次、强度不同的变质变形及构造热事件的改造.根据前人研究成果及野外地质特征来看,研究区花岗—绿岩带基底样式的形成在太古宙期间已基本完成,早元古代(吕梁运动)及其后的构造运动对花岗—绿岩带基底样式的形成贡献并不大,区域上早元古界辽河群与新太古界鞍山群呈角度不整合覆盖关系,太古宙花岗质岩石与鞍山群的接触面,鞍山群与辽河群的接触面应是两个形成时代不同、强度和性质不一的独立构造活动带,前者主要表现为垂向构造运动机制下的强烈韧性剪切作用,后者主要表现为发育程度不同的剪切滑动带,滑动带的产状特征明显受绿岩带基底的形态所控制,且从白家坟、齐大山韧性剪切带各横截剖面上岩石的变形特征来看,早元古代变形作用对鞍山群(包括含铁建造)的影响也是极其微弱的,原因可能有两个方面,

一是早元古代时期,鞍山群包括含铁建造已基本固结,二是由于应力到达鞍山群和辽河群的接触面,在剪切滑动过程中得到了释放.此外,显生宙构造运动多表现为脆性构造的发育,局部破坏了区域地质体的连续性,在本文韧性剪切带横截剖面上也可见大量断层和节理构造的发育。

总体来说,鞍山东部花岗—绿岩带基底构造样式的形成和演化与带内垂向构造运动密切相关.在垂向构造机制作用下,花岗岩体底辟隆升,铁矿及其围岩向下拗沉重重新就位,逐步形成花岗—绿岩带穹脊构造样式,且在花岗—绿岩体接触面表现出强烈的陡倾滑韧性剪切作用.这一认识与 Lin and Beakhouse(2013)关于加拿大 Superior 克拉通上 Hemlo 金矿的“钱口袋”模型一致.含铁建造作为绿岩带中的强干岩层,其产出形态及构造现象的辨识对于认识研究区太古宙时期花岗—绿岩带基底样式的形成及构造演化过程具有重要的指示意义.南北向绿岩带内的 BIF 铁矿体中富铁矿体多为致密的块状构

造,富铁矿体两侧的贫铁矿体则广泛发育由暗色的铁质条带和浅色的硅质条带相间排列而成条带状构造,条带状构造的产状较陡或近于直立,与绿岩带向斜构造两翼的产状一致,形态吻合(图 8a)。花岗—绿岩体接触面陡倾滑韧性剪切带横截剖面显示靠近铁矿体方向,岩石变形程度和应变强度逐渐增强(图 8b、8c)。基于鞍山东部花岗—绿岩带的穹脊构造样式,我们推断穹脊构造样式的形成过程中,绿岩带内的条带状铁矿体一定发生过向下的垂向运动,进而引起花岗—绿岩体接触界面这些构造活动带的向下陡倾滑韧性剪切作用,向斜构造内陡倾的条带状铁矿体产状分布并不代表其原始沉积的初始状态,而是在垂向构造机制作用下原始含铁建造发生了方位变化,含铁建造原始水平产状逐渐向直立过渡转变,同时伴随一系列的变质变形作用的发生。

这一期以垂向运动为主且伴随强烈韧性剪切作用的构造热事件对研究区花岗—绿岩带的古构造格架形成具有至关重要的作用,其可能控制现今花岗—绿岩带的基底样式。鞍山花岗—绿岩带早期基底穹脊构造样式的形成表明新太古代时期鞍山地区的地壳构造演化模式以垂向构造运动为主,局部可能伴随小规模的水平剪切作用。花岗—绿岩带整体的基本特征、形态分布及构造变化规律与世界上其他花岗—绿岩带地体是可以类比的,如澳大利亚西部 Pilbara 克拉通(Collins, 1989; Van Kranendonk *et al.*, 2004)、印度南部 Dharwar 克拉通(Bouhallier *et al.*, 1995; Chardon *et al.*, 1996)、加拿大 Superior 克拉通(Lin, 2005; Parmenter *et al.*, 2006; Lin and Beakhouse, 2013)等。此外,垂向构造机制下含铁建造绿岩体向下拗沉过程中伴随的矿体富集特征以及绿岩带向斜构造的形成演化过程可能会为今后沉积变质型铁矿向斜控矿模式的研究以及鞍山地区 BIF 铁矿带深部找矿等工作提供一定的理论依据。

7 结论

(1) 齐大山韧性剪切带内花岗质岩石中长英质矿物塑性拉长特征明显,条带状构造发育,发育陡倾面理、线理构造,指示了向西的陡倾正滑移运动学特征。

(2) 变形岩石中长石、石英矿物显微变形特征以及石英 C 轴组构特征显示齐大山韧性剪切带形成于较为一致的中低温变形环境中,变形温度大致为

400~500 °C,位错蠕变是剪切带内岩石变形的主要机制。有限应变测量结果表明剪切带中岩石变形以平面一拉伸应变为主,靠近铁矿带方向,构造石类型由 L=S 构造岩过渡为 LS 构造岩,矿物拉伸线理等线状构造越发育,岩石应变强度呈明显增强趋势。

(3) 运动学测度测量结果显示齐大山韧性剪切带内大多数岩石样品的 W_k 值大于 0.75,岩石形成于以简单剪切作用为主的一般剪切作用。

(4) 鞍山东部花岗—绿岩带穹脊构造样式的形成以及白家坟、齐大山陡倾滑韧性剪切带的发育与含铁建造向下拗沉以及同时期花岗岩底辟隆升作用密切相关,是早期地壳垂向构造运动机制下产物。

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,对两位匿名审稿人提出的宝贵的意见和建议表示衷心的感谢!

References

- Anhaeusser, R., Mason, R., Viljoen, M. J., et al., 1969. A Reappraisal of Some Aspects of Precambrian Shield Geology. *Geological Society of America Bulletin*, 80 (11): 2175. doi: 10.1130/0016-7606(1969)80[175:arosao].0.co;2
- Bell, T. H., Etheridge, M. A., 1976. The Deformation and Recrystallization of Quartz in a Mylonite Zone, Central Australia. *Tectonophysics*, 32 (3-4): 235-267. doi: 10.1016/0040-1951(76)90064-0
- Bouhallier, H., Chardon, D., Choukroune, P., 1995. Strain Patterns in Archaean Dome- and Basin Structures: The Dharwar Craton (Karnataka, South India). *Earth and Planetary Science Letters*, 135 (1-4): 57-75. doi: 10.1016/0012-821x(95)00144-2
- Bowring, S. A., Williams, I. S., 1999. Priscoan (4.00-4.03 Ga) Orthogneisses from Northwestern Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134 (1): 3-16. doi: 10.1007/s004100050465
- Bowring, S. A., Williams, I. S., Compston, W., 1989. 3.96 Ga Gneisses from the Slave Province, Northwest Territories, Canada. *Geology*, 17 (11): 971. doi: 10.1130/0091-7613(1989)017<0971:ggfisp>2.3.co;2
- Cagnard, F., Barbey, P., Gapais, D., 2011. Transition between "Archaean-Type" and "Modern-Type" Tectonics: Insights from the Finnish Lapland Granulite Belt. *Precambrian Research*, 187 (1): 127-142.
- Calvert, A. J., Ludden, J. N., 1999. Archean Continental Assembly in the Southeastern Superior Province of Canada. *Tectonics*, 18 (3): 412-429. doi: 10.1029/1999tc900006
- Chardon, D., Choukroune, P., Jayananda, M., 1996. Strain

- Patterns, Décollement and Incipient Sagducted Greenstone Terrains in the Archaean Dharwar Craton (South India). *Journal of Structural Geology*, 18 (8): 991 — 1004. doi: 10.1016/0191-8141(96)00031-4
- Chardon, D., Gapais, D., Cagnard, F., 2009. Flow of Ultra-Hot Orogens: A View from the Precambrian, Clues for the Phanerozoic. *Tectonophysics*, 477 (3—4): 105 — 118. doi: 10.1016/j.tecto.2009.03.008
- Collins, W. J., 1989. Polydiapirism of the Archean Mount Edgar Batholith, Pilbara Block, Western Australia. *Precambrian Research*, 43 (1—2): 41 — 62. doi: 10.1016/0301-9268(89)90004-1
- Dai, Y. P., Zhang, L. C., Zhu, M. T., et al., 2013. Chentaigou BIF-Type Iron Deposit, Anshan Area Associated with Archean Crustal Growth: Constraints from Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (7): 2537 — 2550 (in Chinese with English abstract).
- de Wit, M. J. D., 1998. On Archean Granites, Greenstones, Cratons and Tectonics: Does the Evidence Demand a Verdict? *Precambrian Research*, 91 (1—2): 181 — 226. doi: 10.1016/s0301-9268(98)00043-6
- Dixon, J. M., Summers, J. M., 1983. Patterns of Total and Incremental Strain in Subsiding Troughs: Experimental Centrifuged Models of Inter-Diapir Synclines. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20 (12): 1843 — 1861. doi: 10.1139/e83-175
- Ernst, W. G., 2009. Archean Plate Tectonics, Rise of Proterozoic Supercontinentality and Onset of Regional, Episodic Stagnant-Lid Behavior. *Gondwana Research*, 15 (3—4): 243 — 253. doi: 10.1016/j.gr.2008.06.010
- Fan, Z. G., Huang, X. Z., Tan, L., et al., 2013. Geological Structure and Deep Iron Deposits in the Anshan Area. *Geology and Exploration*, 49 (6): 1153 — 1163 (in Chinese with English abstract).
- Fan, Z. G., Huang, X. Z., Tan, L., et al., 2014. A Study of Iron Deposits in the Anshan Area, China Based on Interactive Inversion Technique of Gravity and Magnetic Anomalies. *Ore Geology Reviews*, 57: 618 — 627. doi: 10.1016/j.oregeorev.2013.09.017
- Flinn, D., 1962. On Folding during Three-Dimensional Progressive Deformation. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 118 (1—4): 385 — 428. doi: 10.1144/gsjgs.118.1.0385
- Gapais, D., Cagnard, F., Gueydan, F., et al., 2009. Mountain Building and Exhumation Processes through Time: Inferences from Nature and Models. *Terra Nova*, 21 (3): 188 — 194. doi: 10.1111/j.1365-3121.2009.00873.x
- Guillope, M., Poirier, J. P., 1979. Dynamic Recrystallization during Creep of Single-Crystalline Halite: An Experimental Study. *Journal of Geophysical Research*, 84 (B10): 5557. doi: 10.1029/jb084ib10p05557
- Hamilton, W. B., 1998. Archean Magmatism and Deformation were not Products of Plate Tectonics. *Precambrian Research*, 91 (1—2): 143 — 179. doi: 10.1016/s0301-9268(98)00042-4
- Hamilton, W. B., 2003. An Alternative Earth. *GSA Today*, 13 (11): 4. doi: 10.1130/1052 — 5173 (2003) 013 < 0004: aae > 2.0.co;2
- Hamilton, W. B., 2007. Earth's First Two Billion Years—The Era of Internally Mobile Crust. *Geological Society of America Memoirs*, 50: 233 — 296. doi: 10.1130/2007.1200(13)
- Hippertt, J., Davis, B., 2000. Dome Emplacement and Formation of Kilometre-Scale Synclines in a Granite-Greenstone Terrain (Quadrilátero Ferrífero, Southeastern Brazil). *Precambrian Research*, 102 (1—2): 99 — 121. doi: 10.1016/s0301-9268(00)00061-9
- Hirth, G., Tullis, J., 1992. Dislocation Creep Regimes in Quartz Aggregates. *Journal of Structural Geology*, 14 (2): 145 — 159. doi: 10.1016/0191-8141(92)90053-y
- Hossack, J. R., 1968. Pebble Deformation and Thrusting in the Bygdin Area (Southern Norway). *Tectonophysics*, 5 (4): 315 — 339. doi: 10.1016/0040-1951(68)90035-8
- Kröner, A., 1981. Chapter 3 Precambrian Plate Tectonics. *Developments in Precambrian Geology*, 57 — 90. doi: 10.1016/s0166-2635(08)70008-2
- Kröner, A., Wilde, S. A., Li, J. H., et al., 2005. Age and Evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic Upper to Lower Crustal Section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping Terrain of Northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (5): 577 — 595. doi: 10.1016/j.jseas.2004.01.001
- 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
- Kusky, T. M., Polat, A., 1999. Growth of Granite-Greenstone Terranes at Convergent Margins, and Stabilization of Archean Cratons. *Tectonophysics*, 305 (1—3): 43 — 73. doi: 10.1016/s0040-1951(99)00014-1
- Law, R. D., Searle, M. P., Simpson, R. L., 2004. Strain, Deformation Temperatures and Vorticity of Flow at the Top of the Greater Himalayan Slab, Everest Massif, Tibet. *Journal of the Geological Society*, 161 (2): 305 — 320. doi: 10.1144/0016-764903-047
- 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 Metallogenia*, 40(5):891—907 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Zhang, Z., Sun, W. J., et al., 2015a. Precambrian Geodynamics (I): From Universal Environment to Proto-Earth. *Earth Sci. Front.*, 22(6):1—9 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Xu, L. Q., Zhang, Z., et al., 2015b. Precambrian Geodynamics (II): Early Earth. *Earth Sci. Front.*, 22(6):10—26 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. Z., Dai, L. M., Zhang, Z., et al., 2015c. Precambrian Geodynamics (III): General Features of Precambrian Geology. *Earth Sci. Front.*, 22(6):27—45 (in Chinese with English abstract).
- Liang, C. Y., Liu, Y. J., Meng, J. Y., et al., 2015a. Strain and Fractal Analysis of Dynamically Recrystallized Quartz Grains and Rheological Parameter Estimation of Sulan Ductile Shear Zone. *Earth Science*, 40(1):116—129 (in Chinese with English abstract).
- Liang, C. Y., Liu, Y. J., Neubauer, F., et al., 2015b. Structural Characteristics and LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology of the Deformed Granitic Rocks from the Mesozoic Xingcheng-Taili Ductile Shear Zone in the North China Craton. *Tectonophysics*, 650:80—103. doi: 10.1016/j.tecto.2014.05.010
- Liang, C. Y., Liu, Y. J., Neubauer, F., et al., 2015c. 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
- Lin, S., 2005. Synchronous Vertical and Horizontal Tectonism in the Neoproterozoic: Kinematic Evidence from a Synclinal Keel in the Northwestern Superior Craton, Canada. *Precambrian Research*, 139(3—4):181—194. doi: 10.1016/j.precamres.2005.07.001
- Lin, S. F., Beakhouse, G. P., 2013. Synchronous Vertical and Horizontal Tectonism at Late Stages of Archean Cratonization and Genesis of Hemlo Gold Deposit, Superior Craton, Ontario, Canada. *Geology*, 41(3):359—362. doi: 10.1130/g33887.1
- Lin, S. F., Jiang, D. Z., Williams, P. F., 2007. Importance of Differentiating Ductile Slickenside Striations from Stretching Lineations and Variation of Shear Direction across a High-Strain Zone. *Journal of Structural Geology*, 29(5):850—862. doi: 10.1016/j.jsg.2006.12.006
- Liu, D. Y., Nutman, A. P., Compston, W., et al., 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma Crust in the Chinese Part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 20(4):339. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0339:romcit>2.3.co;2
- Liu, D. Y., Wan, Y. S., Wu, J. S., et al., 2007. Archean Crustal Evolution and the Oldest Rocks in the North China Craton. *Geological Bulletin of China*, 26(9):1131—1138 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D., Wilde, S. A., Wan, Y., et al., 2008a. New U-Pb and Hf Isotopic Data Confirm Anshan as the Oldest Preserved Segment of the North China Craton. *American Journal of Science*, 308(3):200—231. doi: 10.2475/03.2008.02
- Liu, J. L., Cao, S. Y., Zou, Y. X., et al., 2008b. EBSD Analysis of Rock Fabrics and Its Application. *Geological Bulletin of China*, 27(10):1638—1645 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Tang, Y., Tran, M. D., et al., 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47:231—251. doi: 10.1016/j.jseas.2011.10.020
- Luo, Y., Sun, M., Zhao, G. C., et al., 2004. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the Evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt. *Precambrian Research*, 134(3—4):349—371. doi: 10.1016/j.precamres.2004.07.002
- Mareschal, J. C., West, G. F., 1980. A Model for Archean Tectonism. Part 2. Numerical Models of Vertical Tectonism in Greenstone Belts. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 17(1):60—71. doi: 10.1139/e80-006
- McGregor, A. M., 1951. Some Milestones in the Precambrian of South Rhodesia. Parts 1-3. *Transactions, Geological Society of South Africa*, 54:27—71.
- 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
- Moyen, J. F., Stevens, G., Kisters, A., 2006. Record of Mid-Archean Subduction from Metamorphism in the Barberton Terrain, South Africa. *Nature*, 442(7102):559—562. doi: 10.1038/nature04972
- Nutman, A. P., Friend, C. R. L., Bennett, V. C., 2001a. Review of the Oldest (4400—3600 Ma) Geological and Mineralogical Record: Glimpses of the Beginning. *Episodes*, 24:93—101.
- Nutman, A. P., McGregor, V. R., Bennett, V. C., et al., 2001b. Age Significance of U-Th-Pb Zircon Data from Early Archean Rocks of West Greenland—A Reassessment

- Based on Combined Ion-Microprobe and Imaging Studies—Comment, *Chemical Geology*, 175 (3—4): 191—199. doi:10.1016/s0009-2541(00)00297-7
- Nutman, A. P., Wan, Y. S., Liu, D. Y., 2009. Integrated Field Geological and Zircon Morphology Evidence for ca. 3.8 Ga Rocks at Anshan; Comment on “Zircon U-Pb and Hf Isotopic Constraints on the Early Archean Crustal Evolution in Anshan of the North China Craton” by Wu et al. [*Precambrian Res.* 167 (2008) 339—362]. *Precambrian Research*, 172(3): 357—360.
- Parmenter, A. C., Lin, S. F., Corkery, M. T., 2006. Structural Evolution of the Cross Lake Greenstone Belt in the Northwestern Superior Province, Manitoba; Implications for Relationship between Vertical and Horizontal Tectonism. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 43 (7): 767—787. doi:10.1139/e06-006
- Passchier, C. W., 1987. Stable Positions of Rigid Objects in Non-Coaxial Flow—A Study in Vorticity Analysis. *Journal of Structural Geology*, 9 (5—6): 679—690. doi:10.1016/0191-8141(87)90152-0
- Passchier, C. W., Trouw, R. A. J., 2005. *Microtectonics*. 2nd ed. Springer Verlag, Berlin.
- Prior, D. J., 1996. Orientation Contrast Imaging of Microstructures in Rocks Using Forescatter Detectors in the Scanning Electron Microscope. *Mineralogical Magazine*, 60 (403): 859—869. doi:10.1180/minmag.1996.060.403.01
- Prior, D. J., Boyle, A. P., Brenker, F., et al., 1999. The Application of Electron Backscatter Diffraction and Orientation Contrast Imaging in the SEM to Textural Problems in Rocks. *American Mineralogist*, 84 (11—12): 1741—1759. doi:10.2138/am-1999-11-1204
- Ramberg, H., 1981. Gravity, Deformation, and the Earth's Crust; In Theory, Experiments, and Geological Application. Academic Press, Australia.
- Ramsay, J. G., 1967. *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, New York.
- Roy, P., Jain, A. K., Singh, S., 2016. Kinematic Vorticity Analysis along the Karakoram Shear Zone, Pangong Mountains, Karakoram; Implications for the India-Asia Tectonics. *Journal of the Geological Society of India*, 87(3): 249—260. doi:10.1007/s12594-016-0392-y
- Schmid, S. M., Casey, M., 1986. Complete Fabric Analysis of Some Commonly Observed Quartz c-Axis Patterns. *Geophysical Monograph Series*, 24: 263—286. doi:10.1029/gm036p0263
- Schmidt, N. H., Olesen, N. Ø., 1989. Computer-Aided Determination of Crystal-Lattice Orientation from Electron Channeling Patterns in the SEM. *The Canadian Mineralogist*, 27: 15—22.
- Simpson, C., de Paor, D. G. D., 1993. Strain and Kinematic Analysis in General Shear Zones. *Journal of Structural Geology*, 15 (1): 1—20. doi:10.1016/0191-8141(93)90075-1
- Song, B., Nutman, A. P., Liu, D. Y., et al., 1996. 3 800 to 2 500 Ma Crustal Evolution in the Anshan Area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Research*, 78 (1—3): 79—94. doi:10.1016/0301-9268(95)00070-4
- Stern, R. J., 2007. When and How did Plate Tectonics Begin? Theoretical and Empirical Considerations. *Chinese Science Bulletin*, 52 (5): 578—591. doi:10.1007/s11434-007-0073-8
- 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.
- Tikoff, B., Teyssier, C., 1994. Strain Modeling of Displacement-Field Partitioning in Transpressional Orogens. *Journal of Structural Geology*, 16 (11): 1575—1588. doi:10.1016/0191-8141(94)90034-5
- 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. *Journal of Structural Geology*, 30 (5): 602—621. doi:10.1016/j.jsg.2008.01.001
- van Kranendonk, M. J. V., 2011. Cool Greenstone Drips and the Role of Partial Convective Overturn in Barberton Greenstone Belt Evolution. *Journal of African Earth Sciences*, 60 (5): 346—352. doi:10.1016/j.jafrearsci.2011.03.012
- van Kranendonk, M. J. V., Collins, W. J., Hickman, A., et al., 2004. Critical Tests of Vertical vs. Horizontal Tectonic Models for the Archaean East Pilbara Granite-Greenstone Terrane, Pilbara Craton, Western Australia. *Precambrian Research*, 131 (3—4): 173—211. doi:10.1016/j.precamres.2003.12.015
- Wan, Y. S., Dong, C. Y., Xie, H. Q., et al., 2012. Formation Ages of Early Precambrian BIFs in the North China Craton: SHRIMP Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 86 (9): 1447—1478 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Nutman, A., et al., 2012. Multiple 3.8—3.1 Ga Tectono-Magmatic Events in a Newly Discovered Area of Ancient Rocks (the Shengousi Complex), Anshan, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54—55: 18—30. doi:10.1016/j.jseae.2012.03.007

- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Song, B., et al., 2005. Geochemical and Nd Isotopic Compositions of 3.8 Ga Meta-Quartz Dioritic and Trondhjemitic Rocks from the Anshan Area and Their Geological Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 563–575. doi: 10.1016/j.jseas.2004.02.009
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., Yin, X. Y., et al., 2007. SHRIMP Geochronology and Hf Isotope Composition of Zircons from the Tiejiashan Granite and Supracrustal Rocks in the Anshan Area, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 241–252 (in Chinese with English abstract).
- 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
- Wan, Y. S., Song, B., Liu, D. Y., et al., 2001. Geochronology and Geochemistry of 3.8–2.5 Ga Ancient Rock Belt in the Dongshan Scenic Park, Anshan Area. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 363–370 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. L., Zhang, R. H., 1995. U-Pb Isotope Age of Individual Zircon from Biotite Leptynite in the Qidashan Iron Deposit and Its Significance. *Mineral Deposits*, 14(3): 216–219 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. F., Li, X. H., Jin, W., et al., 2015. Eoarchean Ultra-Depleted Mantle Domains Inferred from ca. 3.81 Ga Anshan Trondhjemitic Gneisses, North China Craton. *Precambrian Research*, 263: 88–107. doi: 10.1016/j.precamres.2015.03.005
- Wu, F. Y., Xu, Y. G., Gao, S., et al., 2008. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1145–1174 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Zhang, Y. B., Yang, J. H., et al., 2008. Zircon U-Pb and Hf Isotopic Constraints on the Early Archean Crustal Evolution in Anshan of the North China Craton. *Precambrian Research*, 167(3–4): 339–362. doi: 10.1016/j.precamres.2008.10.002
- Wu, F. Y., Zhang, Y. B., Yang, J. H., et al., 2009. Are There any 3.8 Ga Rock at Anshan in the North China Craton? Reply to Comments on Zircon U-Pb and Hf Isotopic Constraints on the Early Archean Crustal Evolution in Anshan of the North China Craton by Nutman et al. *Precambrian Research*, 172: 361–363.
- 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).
- 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).
- Xypolias, P., Koukouvelas, I. K., 2001. Kinematic Vorticity and Strain Rate Patterns Associated with Ductile Extrusion in the Chelmos Shear Zone (External Hellenides, Greece). *Tectonophysics*, 338(1): 59–77. doi: 10.1016/s0040-1951(01)00125-1
- Zhai, M. G., Guo, J. H., Li, Y. G., et al., 2003. Two Linear Granite Belts in the Central-Western North China Craton and Their Implication for Late Neoproterozoic Palaeoproterozoic Continental Evolution. *Precambrian Research*, 127(1–3): 267–283. doi: 10.1016/s0301-9268(03)00191-8
- Zhang, J. J., Zheng, Y. D., 1995. Kinematic Vorticity, Polar Mohr Circle and Their Application in Quantitative Analysis of General Shear Zones. *Journal of Geomechanics*, 1(3): 55–64 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Dai, Y. P., Wang, C. L., et al., 2014. Age, Material Sources and Formation Setting of Precambrian BIFs Iron Deposits in Anshan-Benxi Area. *J. Earth Sci. Environ.*, 36(4): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Zhai, M. G., Wan, Y. S., et al., 2012. Study of the Precambrian BIF-Iron Deposits in the North China Craton: Progresses and Questions. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3431–3445 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Zhai, M. G., Zhang, X. J., et al., 2012. Formation Age and Tectonic Setting of the Shirengou Neoproterozoic Banded Iron Deposit in Eastern Hebei Province: Constraints from Geochemistry and SIMS Zircon U-Pb Dating. *Precambrian Research*, 222–223: 325–338. doi: 10.1016/j.precamres.2011.09.007
- 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., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of Basement Rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic Tectonic Evolution. *Precambrian Research*, 103(1–2): 55–88. doi: 10.1016/s0301-9268(00)00076-0
- 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., 1998. Thermal Evolution of Archean Basement Rocks from the Eastern Part of the North China Craton and Its Bearing on Tectonic Setting. *International Geology Review*, 40 (8): 706—721. doi:10.1080/00206819809465233
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Cawood, P.A., et al., 1999. Thermal Evolution of Two Textural Types of Mafic Granulites in the North China Craton: Evidence for Both Mantle Plume and Collisional Tectonics. *Geological Magazine*, 136(3): 223—240. doi:10.1017/s001675689900254x
- 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
- Zhou, H.Y., Liu, D.Y., Wan, Y.S., et al., 2007. 3.3 Ga Magmatic Events in the Anshan Area: New SHRIMP Age and Geochemical Constraints. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 26 (2): 123—129 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H.Y., Liu, D.Y., Wan, Y.S., et al., 2008. 3.3—3.1 Ga Magmatism in the Dongshan Complex, Anshan Area, Liaoning, China: Evidence from Zircon SHRIMP U-Pb Dating. *Geological Bulletin of China*, 27 (12): 2122—2126 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 崔培龙, 2014. 鞍山一本溪地区铁建造型铁矿成矿构造环境与成矿、找矿模式研究(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 代堰铭, 张连昌, 朱明田, 等, 2013. 鞍山陈台沟 BIF 铁矿与太古代地壳增生: 锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素约束. 岩石学报, 29(7): 2537—2550.
- 徐仲元, 1991. 鞍山地区太古宙铁矿中条带状构造的成因与演化. 长春地质学院学报, 21(4): 389—396.
- 范正国, 黄旭钊, 谭林, 等, 2013. 鞍山地区地质构造及深部铁矿. 地质与勘探, 49(6): 1153—1163.
- 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, 张臻, 孙文军, 等, 2015a. 前寒武纪地球动力学(I): 从宇宙环境到原始地球. 地学前缘, 22(6): 1—9.
- 李三忠, 许立青, 张臻, 2015b. 前寒武纪地球动力学(II): 早期地球. 地学前缘, 22(6): 10—26.
- 李三忠, 戴黎明, 张臻, 2015c. 前寒武纪地球动力学(III): 前寒武纪地质基本特征. 地学前缘, 22(6): 27—45.
- 梁琛岳, 刘永江, 孟婧瑶, 等, 2015a. 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): 116—129.
- 刘敦一, 万渝生, 伍家善, 等, 2007. 华北克拉通太古宙地壳演化和最古老的岩石. 地质通报, 26(9): 1131—1138.
- 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.
- 万渝生, 董春艳, 颜炳强, 等, 2012. 华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代——SHRIMP 锆石 U-Pb 定年. 地质学报, 86(9): 1447—1478.
- 万渝生, 刘敦一, 殷小艳, 等, 2007. 鞍山地区铁架山花岗岩及表壳岩的锆石 SHRIMP 年代学和 Hf 同位素组成. 岩石学报, 23(2): 241—252.
- 万渝生, 宋彪, 刘敦一, 等, 2001. 鞍山东山风景区 3.8—2.5 Ga 古老岩带的同位素地质年代学和地球化学. 地质学报, 75(3): 363—370.
- 王守伦, 张瑞华, 1995. 齐大山铁矿黑云变粒岩单锆石年龄及意义. 矿床地质, 14(3): 216—219.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等, 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24(6): 1145—1174.
- 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.
- 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.
- 杨秀清, 2013. 辽宁鞍山一本溪变质岩区铁成矿过程研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 张进江, 郑亚东, 1995. 运动学涡度、极摩尔圆及其在一般剪切带定量分析中的应用. 地质力学学报, 1(3): 55—64.
- 张连昌, 代堰铭, 王长乐, 等, 2014. 鞍山一本溪地区前寒武纪条带状铁建造铁矿时代, 物质来源与形成环境. 地球科学与环境学报, 36(4): 1—15.
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等, 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题. 岩石学报, 28(11): 3431—3445.
- 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.
- 周红英, 刘敦一, 万渝生, 等, 2007. 鞍山地区 3.3 Ga 岩浆热事件——SHRIMP 年代学和地球化学新证据. 岩石矿物学杂志, 26(2): 123—129.
- 周红英, 刘敦一, 万渝生, 等, 2008. 辽宁鞍山地区东山杂岩带 3.3~3.1 Ga 期间的岩浆作用——锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地质通报, 27(12): 2122—2126.