

桂东北地区鹰扬关韧性剪切带的厘定及其构造意义

秦 亚^{1, 2)}, 冯佐海^{1, 2)*}, 吴 杰^{1, 2)}, 薛云峰³⁾,
胡乔帆⁴⁾, 白玉明^{1, 2)}, 周鹏程^{1, 2)}

1) 桂林理工大学有色隐伏金属矿产勘查与资源高效利用省部共建协同创新中心, 广西桂林 541006;

2) 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西桂林 541006;

3) 中化地质矿山总局河南地质局, 河南郑州 450000;

4) 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西桂林 541006

摘 要: 论文通过宏-微观构造、磁组构、热液锆石和石英 EBSD 组构等, 厘定鹰扬关韧性剪切带并讨论其构造意义。鹰扬关韧性剪切带具有宏-微观韧性变形组构, 发育糜棱岩、拉伸线理、S-C 组构、旋转碎斑系、书斜构造、压力影和石英的动态重结晶等。磁组构和宏-微观构造表明, 鹰扬关韧性剪切带呈 NNE 向延伸超过 40 km, 宽 2.5~8 km。糜棱 C 面理的极密点产状 $127^\circ \angle 50^\circ$; 磁面理的极密点产状 $107^\circ \angle 83^\circ$ 。宏-微观构造研究表明, 鹰扬关韧性剪切带具有早期左旋逆冲剪切, 晚期右旋正滑剪切的运动学性质。石英 EBSD 组构表明, 鹰扬关韧性剪切带具有晚期中低温变形(400~550 °C)叠加于早期中高温变形(550~650 °C)的特征。年代学研究表明, 鹰扬关韧性剪切带早期左旋逆冲剪切的时代为(441.1±2.3) Ma, 晚期右旋正滑剪切的时代应晚于 420 Ma, 区域构造应力由挤压转为伸展的时限为 420 Ma。在磁组构、石英 EBSD 组构和热液锆石定年的基础上, 结合区域地质资料, 认为鹰扬关韧性剪切带形成于华夏陆块自 SE 向扬子陆块造山挤压的构造背景。早期造山挤压, 产生压扁型应变和中高温左旋逆冲剪切; 晚期造山后伸展, 产生拉伸型应变和中低温右旋正滑剪切。鹰扬关韧性剪切带的上述认识暗示其形成与早古生代扬子和华夏陆块的造山作用有关, 而非构造混杂作用的产物。

关键词: 磁组构; 石英 EBSD 组构; 热液锆石; 韧性剪切带; 桂东北鹰扬关地区

中图分类号: P542 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.021701

Discovery of Yingyangguan Ductile Shear Zone in Northeastern Guangxi and Its Tectonic Significances

QIN Ya^{1, 2)}, FENG Zuo-hai^{1, 2)*}, WU Jie^{1, 2)}, XUE Yun-feng³⁾,
HU Qiao-fan⁴⁾, BAI Yu-ming^{1, 2)}, ZHOU Peng-cheng^{1, 2)}

1) Collaborative Innovation Center for Exploration of Nonferrous Metal Deposits and Efficient Utilization of Resources by the Province and Ministry, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006;

2) Guangxi Key Laboratory of Exploration for Hidden Metallic Ore Deposits, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006;

3) Henan Geological Bureau of China Chemical Geology and Mine Bureau, Zhengzhou, Henan 450000;

4) China Nonferrous Metals (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin, Guangxi 541006

Abstract: Based on macro-micro structure, magnetic fabric, hydrothermal zircon and quartz EBSD fabric, the Yingyangguan ductile shear zone was determined and its tectonic significance is discussed. The Yingyangguan ductile shear zone has typical macro-micro structural characteristics, such as mylonite, stretching lineation, S-C fabric, rotating porphyry system, domino structures, pressure shadow structure and dynamic recrystallization of

本文由国家自然科学基金项目(编号: 42072259; 42162018)和广西自然科学基金项目(编号: 2022GXNSFAA035570; 2019GXNSFDA245009)联合资助。

收稿日期: 2022-10-15; 改回日期: 2023-02-15; 网络首发日期: 2023-02-20。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 秦亚, 男, 1986 年生。博士, 副教授。主要从事区域构造演化、花岗岩与成矿研究。E-mail: qinya2013017@glut.edu.cn。

*通讯作者: 冯佐海, 男, 1960 年生。博士, 教授。主要从事构造地质学的教学和研究工作。E-mail: fengzuohai@163.com。

quartz. Magnetic fabric measurement and field geological survey showed that the Yingyangguan ductile shear zone extends over 40 km in NNE direction and is 2.5–8 km wide. The extremely dense point occurrence of the C foliation of the mylonite is $127^{\circ} \angle 50^{\circ}$, and the occurrence of extremely dense points of magnetic foliation is $107^{\circ} \angle 83^{\circ}$. Analysis of the macro-micro structure showed that the Yingyangguan ductile shear zone has kinematic properties of early sinistral thrust shear and late dextral normal slip shear. Quartz EBSD fabric analysis revealed that the Yingyangguan ductile shear zone is characterized by late mid-low temperature deformation (400–550 °C) superimposed on early mid-high temperature deformation (550–650 °C). The geochronology showed that the age of the early sinistral thrust shear is (441.1 ± 2.3) Ma, and the age of late dextral normal slip shear is later than 420 Ma. The time limit of regional tectonic stress from compression to extension is 420 Ma. Analysis of the magnetic fabric, quartz EBSD fabric, and hydrothermal zircon dating, combined with regional geological data, revealed that the Yingyangguan ductile shear zone formed in the tectonic background of the collision of the Cathaysia block from the SE to the Yangtze block. In the early stage of extrusion and collision, flattening strain was generated and mid-high temperature sinistral thrust shear was formed. After the late orogenic extension, tensile strain was generated, and dextral normal slip shear was formed at mid-low temperature. The strain characteristics, deformation temperature, deformation age, and dynamic setting of the Yingyangguan ductile shear zone provide new data that improve the understanding of Caledonian tectonic movement in South China. The above understanding of the Yingyangguan ductile shear zone may be related to the orogeny of the Yangtze and Cathaysian blocks in the Early Paleozoic, rather than being the product of tectonic mélange.

Key words: magnetic fabric; quartz EBSD fabric; hydrothermal zircon; ductile shear zone; Yingyangguan area of northeastern Guangxi

扬子和华夏陆块聚合成统一的华南大陆(舒良树, 2012; 张国伟等, 2013; 赵军红等, 2015; 王孝磊等, 2017)。由于被晚古生代以来的地层覆盖和多期次的构造叠加影响, 早古生代扬子和华夏陆块的造山事件长期存在不同的认识(任纪舜等, 1980; 王鸿祯等, 1986; 刘宝珺等, 1993; 程裕淇, 1994; 洪大卫等, 2002; 陈凌云和张忠伟, 2003; 陈懋弘等, 2006; 王鹏鸣等, 2012, 2013; 王令占等, 2019a, 2020; Tian et al., 2020; Qi et al., 2021)。位于湘粤桂交界地带的桂东北鹰扬关地区处于厘定早古生代扬子和华夏陆块造山事件的关键地区, 其系统的研究对深化华南大陆大地构造演化过程的认识具有重要意义。前人对鹰扬关地区的研究主要集中在沉积地层、花岗岩和鹰扬关组火山岩(朱金初等, 2006; 鲁学悟等, 2008; 程顺波等, 2009; 覃小锋等, 2015; 田洋等, 2015; 郭丽爽等, 2017; 刘雷等, 2020; 王令占等, 2019a, b, 2020; Qi et al., 2021; 李响等, 2021a, b; 秦亚等, 2022), 而对展布于鹰扬关地区的变形构造则存在不同的认识。早期的研究主要存在如下两种观点: 一是鹰扬关地区处于构造混杂岩带, 其间发育多期变形带(殷鸿福等, 1999; 覃小锋等, 2015; 张克信等, 2017; 王令占等, 2020); 二是区域构造作用的结果, 与扬子和华夏陆块的造山作用有关(舒良树等, 2020; 徐先兵等, 2021; 夏元等, 2022)。

鹰扬关地区构造变形作用强烈, 先后遭受多期次的构造叠加, 王令占等(2020)和夏元等(2022)先后在鹰扬关地区识别出新元古代、早古生代、印支期和燕山期等多期构造变形。桂东北鹰扬关地区早

古生代韧性剪切构造发育。韧性剪切构造是地壳中-深部的构造形迹, 也是碰撞造山作用或陆内变形的表现形式之一(张进江, 1999)。目前, 韧性剪切构造的研究已成为认识地壳运动规律, 探讨造山作用过程及造山作用机制的重要内容和关键环节(李海兵等, 1997; 杨晓勇, 2005)。近年来, 作者及其团队成员在桂东北地区开展野外地质调查, 识别出鹰扬关韧性剪切带; 并通过宏-微观构造、磁组构、电子背散射衍射(EBSD, Electron Backscattered Diffraction)和热液锆石 U-Pb 定年等方法, 讨论其应变特征、变形时代、变形温度和成因机制, 为深化华南大陆构造演化过程提供新的证据和资料。

1 区域地质背景

华南大陆由扬子和华夏陆块于新元古代初期碰撞拼贴而成, 碰撞拼贴带被称为江南造山带(图 1a; 郭令智等, 1996; Wang et al., 2007; Zhao et al., 2011; 张国伟等, 2013)。其后, 随着全球 Rodinia 超大陆的裂解, 聚合的扬子和华夏陆块开始裂解, 并演化出一系列的裂谷盆地(李江海和穆剑, 1999; 李献华等, 2008; Wang et al., 2011; 崔晓庄等, 2016)。裂解后的扬子和华夏陆块于早古生代再次造山形成现今的构造格局(舒良树等, 2020)。扬子和华夏陆块的拼合边界在华南大陆东段较为明晰, 为江山—绍兴断裂(舒良树, 2012), 但该边界向西延伸进入湘黔粤桂地区则存在较大的争议(Wang et al., 2003; Guo et al., 2009; 舒良树等, 2020)。江山—绍兴断裂可能经郴州—临武断裂向南与岑溪—博白断裂相连

(Yang et al., 2022)。桂东北鹰扬关地区位于扬子和华夏陆块拼贴带西南段的湘粤桂交界地区,其北侧为 NE 向延伸的郴州—临武断裂带,其南端为岑溪—博白断裂带。

研究区出露的最老地层为上元古界鹰扬关组和下龙组,为一套浅变质的火山-碎屑岩系(图 1b),主体岩性为安山岩和玄武岩(周汉文等, 2002; Tian et al., 2020)、765~753 Ma 的双峰式火山岩(Tian et al., 2020; Qi et al., 2021)、碳酸盐岩、片岩、板岩与变质泥砂岩等(夏元等, 2022)。鹰扬关组和下龙组可与桂北地区丹洲群进行对比,蕴含着丰富的扬子和华夏陆块新元古代碰撞拼贴及后期裂解过程等构造信息(覃小锋等, 2015; Tian et al., 2020; Qi et al., 2021; 秦亚等, 2022)。下龙组之上沉积有南华系和震旦系培地组,下古生界寒武系和上古生界泥盆系,以及分布局限的中生界白垩系(图 1b)。南华系为冰期沉积,自下而上出露有天子地组和正圆岭组。天子地组为一套青灰色含砾岩屑砂岩,而正圆岭组为一套灰绿色细砂岩、粉砂岩。培地组和寒武系分布局限,为一套碎屑岩系。

桂东北鹰扬关地区岩浆活动强烈,分布有多期岩浆岩(图 1b)。研究区出露最老的岩浆岩为鹰扬关

组中的镁铁-超镁铁侵入岩和火山岩(覃小锋等, 2015; Tian et al., 2020; Qi et al., 2021; 秦亚等, 2022)。早古生代岩浆岩主要为花岗岩,如大宁和永和岩体(图 1b)。近年来,研究区还有早古生代 MORB 型火山岩的报道(覃小锋等, 2015)。印支期和燕山期岩浆岩主要为花岗岩(图 1b)。

研究区构造线主体呈 NE, 叠加有 NW、近 EW 和近 SN 构造(图 1b)。NE 构造主要表现为上元古界鹰扬关组和下龙组呈 NE 延伸,下龙组分布于鹰扬关组两侧构成 NE 复式背斜,以及一系列 NE 断裂(图 1b)。NW 构造在桂东北鹰扬关地区亦十分发育,主要体现在永和和大宁岩体呈 NW 线状展布,上元古界呈 NW 倾伏的复式褶皱,以及一系列 NW 断裂(图 1b)。近 EW 和近 SN 构造则相对较弱(图 1b)。

2 宏-微观构造特征

桂东北鹰扬关地区经历了多期构造变形的叠加改造,具有复杂的构造形迹。论文在众多构造形迹中,讨论其韧性剪切构造的宏-微观特征。

2.1 宏观构造特征

鹰扬关韧性剪切带具有典型的宏观韧性变形构造,主要包括糜棱岩、拉伸线理、A 型褶皱、宏观

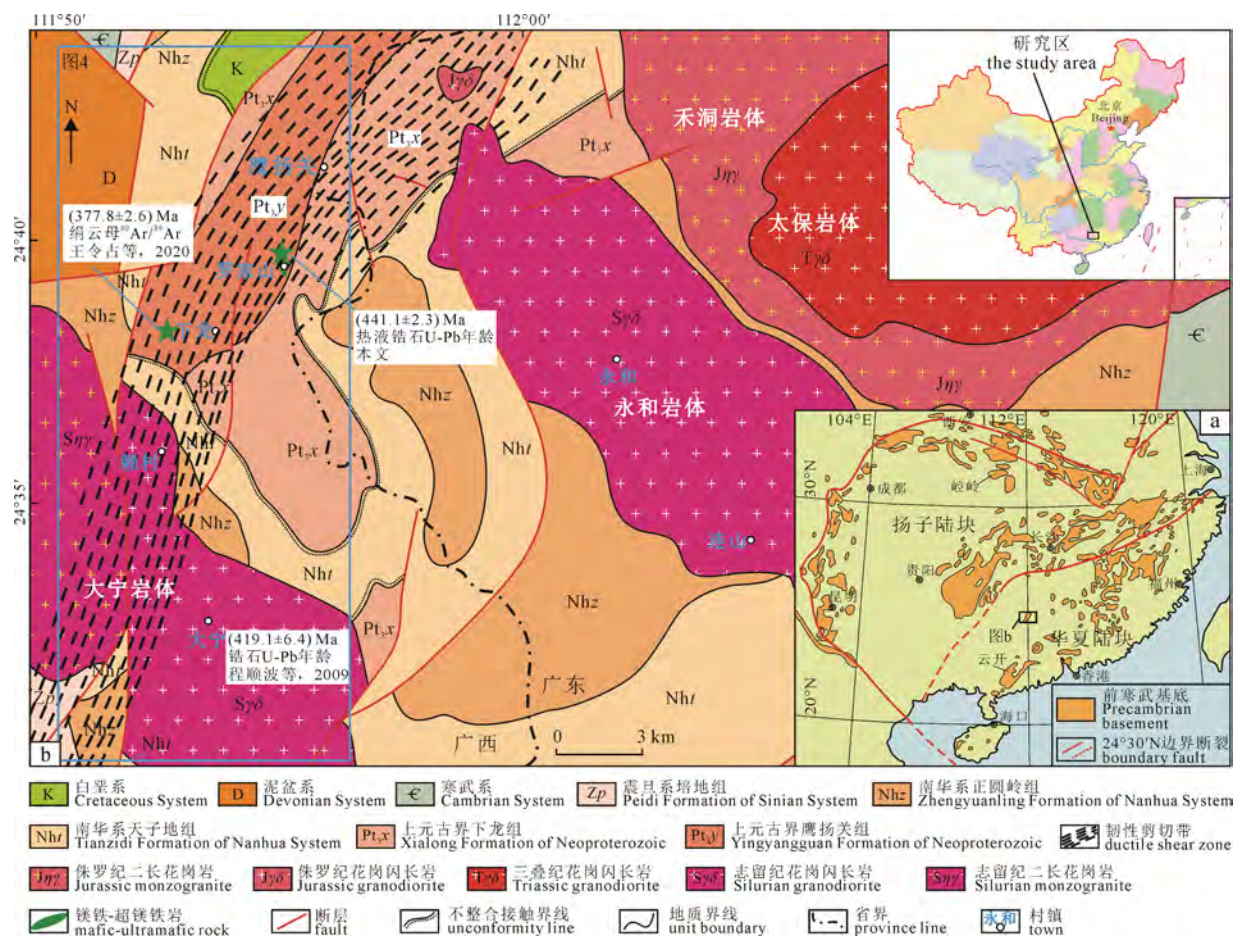


图 1 研究区大地构造位置图(a)和鹰扬关地区地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic location map of the research area (a) and geological sketch map of Yingyangguan area (b)

S-C 组构、旋转碎斑系、透入性片理和书斜构造等。

糜棱岩: 鹰扬关韧性剪切带发育镁铁质糜棱岩(图 2a)和花岗质糜棱岩(图 2b)。镁铁质糜棱岩主要出露于鹰扬关组中的镁铁-超镁铁岩。岩石蚀变较强, 具有绿泥石化、碳酸盐化和阳起石化等。残斑矿物主要为长石, 含量约 15%, 常呈眼球状或透镜体状; 基质矿物主要为鳞片状的绿泥石等(图 2a)。花岗质糜棱岩主要展布于大宁岩体, 残斑矿物主要为石英和长石, 含量约 25%, 常呈眼球状; 基质矿物为细粒化或重结晶的石英(图 2b)。

透入性片理: 研究区前泥盆系发育强烈的透入性片理(图 2c, d)。在芦冲口至底垌村一带, 鹰扬关组绿泥绢云片岩发育大量密集的透入性片理, 片理较为细密并发生 Z 型褶曲。剪切带内新生同构造脉体与地层中新片理协调展布(图 2c)。鹰扬关组中的镁铁-超镁铁岩边缘亦发育强烈的透入性片理, 如罗家山辉长岩体边缘的镁铁质糜棱岩化带(秦亚等, 2022)。

A 型褶皱: A 型褶皱主要展布在贺州市芦冲口至鹰扬关隧道一带及底垌村附近的强韧性变形带。A 型褶皱规模较小, 一般为数米(图 2e)。

拉伸线理: 卷入韧性变形的各类地质体均发育有拉伸线理, 主要体现为变形岩石中的方解石、绿泥石和绢云母等矿物定向拉伸变形。鹰扬关附近的下龙组绿泥绢云片岩的剪切面理($127^{\circ} \angle 65^{\circ}$)中, 拉伸线理向 SW 侧伏, 侧伏角 3° , 指示左旋逆冲剪切(图 2f)。

旋转碎斑系: 主要发育在研究区北部的鹰扬关组、下龙组和志留纪大宁花岗岩体。前泥盆系主要体现为先存石英脉体被剪切拉伸而成旋转碎斑, 指示逆冲剪切(图 2g)。花岗质糜棱岩中的旋转碎斑主要为石英残斑及少量的长石残斑, 指示正滑剪切。

书斜构造: 片理化岩石中, 先存石英脉体被剪切拉伸形成透镜体或眼球体, 石英眼球体与剪切面理斜交而形成书斜构造(图 2d)。花岗质糜棱岩中, 石英和长石眼球体与剪切面理斜交而构成书斜构造(图 2h)。书斜构造指示正滑剪切的运动学特征。

宏观 S-C 组构: 宏观 S-C 组构在鹰扬关韧性剪切带十分发育。主要体现在: ①片理化岩石中, 先存石英脉体被剪切拉伸形成透镜体或眼球体, 其长轴优选方位与剪切面理斜交构成 S-C 组构(图 2c, d)。在贺州市底垌村, 糜棱面理产状为 $121^{\circ} \angle 50^{\circ}$, 剪切带内面理产状为 $122^{\circ} \angle 78^{\circ}$, 指示左旋剪切; ②花岗质糜棱岩中, 石英或长石残斑的长轴优选方向与剪切面理构成 S-C 组构, 指示右旋剪切; ③镁铁质糜棱岩中, 长石等残斑呈透镜状或不对称的眼

球状, 其长轴优选方位与剪切面理斜交而构成 S-C 组构。

不对称褶皱: 卷入韧性变形的前泥盆系岩石及其中的先存石英脉体受剪切作用的影响而弯曲形成不对称的褶皱, 指示逆冲剪切(图 2i)。

2.2 微观构造特征

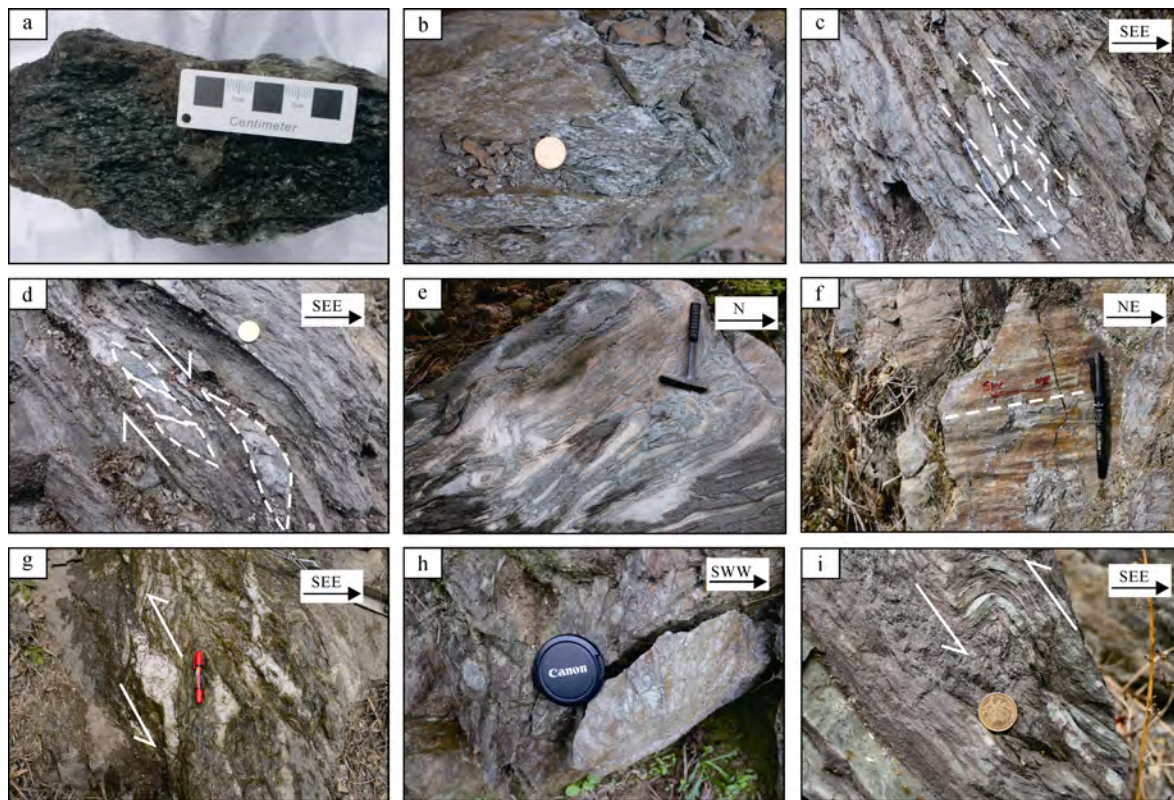
鹰扬关韧性剪切带具有典型的微观韧性变形构造, 包括石英动态重结晶、旋转碎斑系、不对称压力影构造、显微 S-C 组构和书斜构造等。

石英动态重结晶: 石英动态重结晶是糜棱岩中广泛存在的显微构造样式之一, 且其变形型式受变形温度的控制(Lister et al., 1978; Stipp et al., 2002; 向必伟等, 2007)。石英在鹰扬关韧性剪切带呈现两种存在形式, 一是残斑矿物, 二是动态重结晶石英颗粒。鹰扬关韧性剪切带的石英动态重结晶型式多样, 包括膨凸式重结晶(BLG), 亚颗粒旋转重结晶(SGR), 以及亚颗粒旋转重结晶(SGR)与颗粒边界迁移重结晶(GBM)的过渡型式, 指示变形温度介于 $300 \sim 550^{\circ}\text{C}$ 之间(Stipp et al., 2002)。

旋转碎斑系: 残斑矿物及周缘的动态重结晶结合体或细碎粒发生旋转, 并改变其形状, 形成不对称楔形尾部的碎斑系。鹰扬关韧性剪切带的旋转碎斑系十分发育, 具体表现为: ①石英的“ σ ”型旋转碎斑指示右旋剪切(图 3a); ②细粒化的石英颗粒围绕石英残斑分布, 形成不对称的眼球体, 眼球体的长轴优选方向与剪切面理斜交构成 S-C 组构, 指示左旋剪切(图 3b); ③石英残斑具有裂纹和波状消光, 塑性变形或细粒化的石英颗粒与残斑构成碎斑系。旋转碎斑系表明鹰扬关韧性剪切带具有多期变形, 呈现出不同的运动学性质, 可见右旋剪切(图 3c)和左旋剪切(图 3d)。

书斜构造: 书斜构造在鹰扬关韧性剪切带中十分发育, 主要体现为: ①镁铁质糜棱岩中, 长石残斑受剪切滑动而构成书斜构造, 指示左旋剪切(图 3e); ②前泥盆系片理化岩石中, 重结晶或细粒化的石英集合体构成书斜构造, 指示左旋剪切(图 3f); ③石英残斑因韧性剪切滑动发生塑性变形而构成书斜构造, 指示左旋剪切(图 3g)。

不对称压力影构造: 不对称压力影构造在鹰扬关韧性剪切带中十分发育(图 3h, g)。压力影构造中的刚性矿物主要为石英和黄铁矿, 刚性矿物两侧的压力影中分布着重结晶或细粒化的石英和绢云母。石英残斑构成的压力影中, 石英残斑自形程度较好, 与重结晶或细粒化的石英和绢云母构成不对称压力影构造, 指示早期左旋剪切; 石英残斑沿剪切方向发生一定程度的旋转, 指示晚期右旋剪切(图 3g)。



a—镁铁质糜棱岩(贺州市罗家山); b—花岗质糜棱岩(贺州市大宁镇 323 国道边); c—片理化岩石及 S-C 组构, 指示逆冲剪切(贺州市底洞村); d—片理化岩石及书斜构造, 指示正滑剪切(贺州市底洞村); e—A 型褶皱(贺州市芦冲口); f—拉伸线理(贺州市鹰扬关 323 国道边); g—旋转碎斑系, 指示逆冲剪切(贺州市鹰扬关 323 国道边); h—花岗质糜棱岩中的 S-C 组构及书斜构造, 指示正滑剪切(贺州市旱龙村); i—不对称褶皱, 指示逆冲剪切(贺州市东管坪)。

a—mafic mylonite (Luojiashan, Hezhou); b—granitic mylonite (Daning, Hezhou); c—schistosity and S-C fabric, indicating thrust shear (Didong, Hezhou); d—schistosity and domino structure, indicating normal slip shear (Didong, Hezhou); e—A-type fold (Luchongkou, Hezhou); f—stretching lineation (Yingyangguan, Hezhou); g—rotating porphyry system, indicating thrust shear (Yingyangguan, Hezhou); h—the S-C fabric and domino structure in granitic mylonite, indicating normal slip shear (Hanlong, Hezhou); i—asymmetric fold, indicating thrust shear (Dongguanping, Hezhou).

图 2 鹰扬关韧性剪切带宏观构造特征

Fig. 2 Macro-structural characteristics of the Yingyangguan ductile shear zone

黄铁矿构成的压力影中, 黄铁矿自形程度较好, 颗粒边缘光滑平直, 两侧的影中矿物沿片理不对称分布, 指示左旋剪切(图 3h)。

显微 S-C 组构: 鹰扬关韧性剪切带中显微 S-C 组构十分发育, 主要体现为: ①前泥盆系片理化岩石中, 细粒化石英或重结晶石英集合体的长轴优选方向与剪切面理斜交而构成显微 S-C 组构(图 3a, f), 显示多期变形而呈现不同的运动学性质, 包括右旋剪切(图 3a)和左旋剪切(图 3f); ②塑性变形石英的长轴优选方位与剪切面理方向斜交而构成显微 S-C 组构(图 3g), 显示左旋剪切; ③镁铁质糜棱岩中, 辉石等矿物的蚀变产物(绢云母、绿泥石等)因剪切拉伸变形而形成剪切带面理, 长石残斑的长轴优选方向构成剪切带内面理, 构成显微 S-C 组构, 指示右旋剪切(图 3i)。

综合宏-微观构造, 鹰扬关韧性剪切带具有多期韧性变形的宏-微观构造, 总体呈现早期左旋逆冲剪切, 晚期右旋正滑剪切的运动学性质。

3 磁组构特征

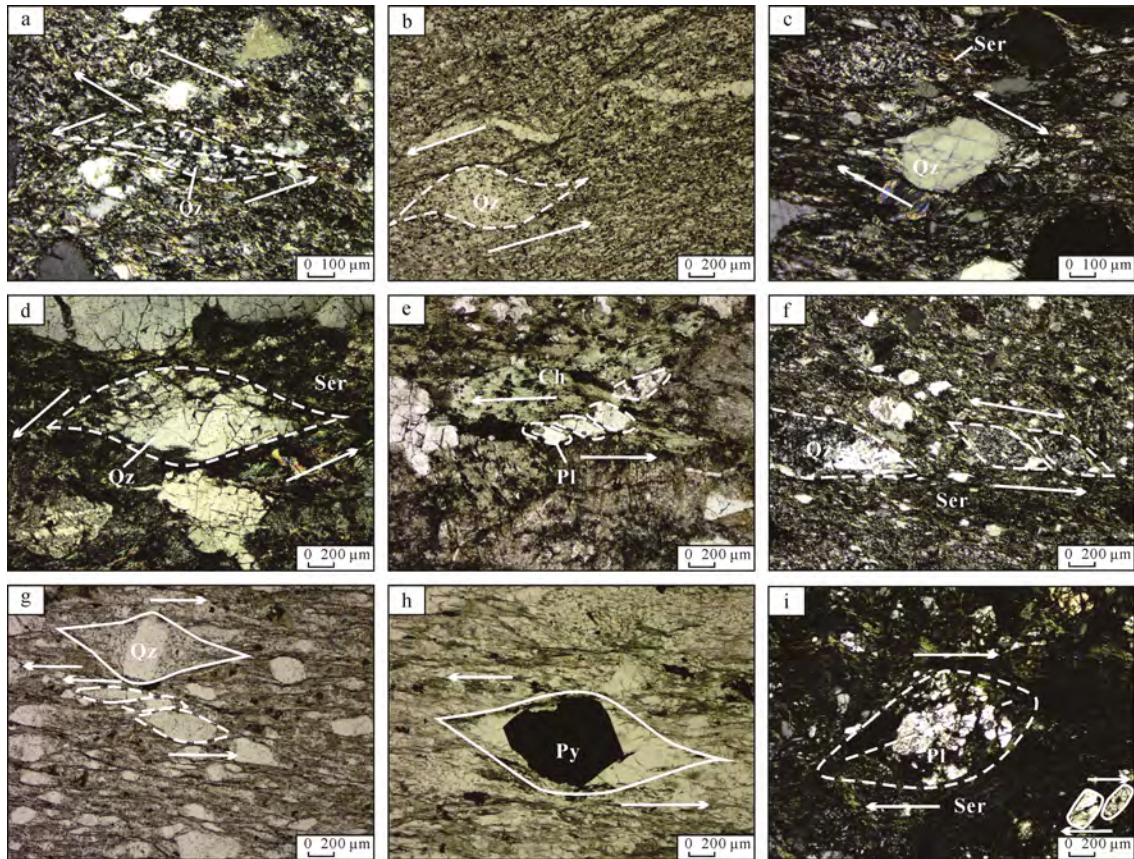
因鹰扬关韧性剪切带缺乏明显的宏观应变标志体, 论文采用磁椭球体来代替应变椭球体, 利用磁组构特征来分析和讨论岩石的应变特征。首先野外采集未风化、新鲜的定向样品; 然后在实验室将定向样品切割成立方体样品(2 cm×2 cm×2 cm); 最后开展磁组构测量。磁组构样品的分析测试工作在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室使用 MFK1-A/CS-4 型卡帕桥旋转型单频磁化率仪完成。测量场 300 A/m, 工作频率 875 Hz, 环境温度 20 °C, 灵敏度 2×10^{-8} SI, 精度 0.1%(秦亚等, 2021; 胡乔帆, 2022)。通过测量定向岩芯的 15 个不同方向的磁化率大小, 求得单个岩芯样品的 3 个磁化率主轴 $K_{\max}$ 、 K_{int} 、 $K_{\min}$ 大小和方位, 同时利用 Anisoft 软件将多个岩芯样品的分析数据拟合出该采样点的磁化率椭球体的形态和方位, 并求出样品的磁组构参数, 如磁化率各向异性度(P 值)、磁面理(F 值)、

磁线理(L 值)和磁化率椭球体扁率(E 值)等。

论文在野外地质调查的基础上, 实测与区域构造线呈大角度相交的 4 条磁组构剖面(图 4a)。由 N 向 S 依次为芦冲口剖面(A-A')、下龙剖面(B-B')、东管坪剖面(C-C')和掏金坪剖面(D-D')(图 4)。论文共采集磁组构样品 40 件, 其中芦冲口剖面 15 件(图 4b), 下龙剖面 8 件(图 4c), 东管坪剖面 5 件(图 4d), 以及掏金坪剖面 12 件(图 4e)。磁组构分析结果见表 1。

众多磁组构参数中, 磁化率各向异性度(P 值)可衡量岩石的变形程度和成因(余钦范和郑敏,

1992)。当 $P < 1.05$ 时, 岩石为非构造成因的变形; 当 $1.05 \leq P < 1.10$ 时, 岩石为构造成因的弱韧性变形; 当 $P \geq 1.10$ 时, 岩石为构造成因的强韧性变形(马天林等, 2003; 张雪锋, 2015; 秦亚等, 2021)。首先, 将带有 GPS 坐标的采样点置于平面地质图, 然后根据各个采样点的磁组构测量结果, 利用 $P \geq 1.05$ 的采样点圈出鹰扬关韧性剪切带的分布位置和方位(图 4); 并根据各个剖面 P 值大小绘制磁各向异性度折线图(图 4); 同时结合地质剖面图, 由 $P \geq 1.10$ 和 $1.10 > P \geq 1.05$ 的采样点圈出强、弱变形带的分布(图 4)。



a—石英旋转碎斑指示右旋剪切, 重结晶石英集合体长轴优选方位与剪切面理构成 S-C 组构, 指示左旋剪切(+)(贺州市下龙村); b—XY 面上的先存石英细脉被剪切拉断以及重结晶石英集合体长轴优选方位与面理构成 S-C 组构, 指示左旋剪切(-)(贺州市底洞村); c—石英旋转碎斑系, 指示右旋剪切(+)(贺州市下龙村); d—石英旋转碎斑, 指示左旋剪切(+)(贺州市 323 国道); e—镁铁质糜棱岩中 XY 面上长石残斑构成书斜构造, 指示左旋剪切(+)(贺州市罗家山); f—重结晶石英集合体构成书斜构造, 指示左旋剪切(+)(贺州市下龙村); g—XY 面上的石英残斑构成不对称压力影构造和书斜构造, 指示早期左旋剪切, 晚期右旋剪切(-)(贺州市掏金坪); h—XZ 面上的黄铁矿压力影构造, 指示左旋剪切(-)(贺州市溜马滩村); i—镁铁质糜棱岩中长石残斑长轴方向与剪切面理构成 S-C 组构, 指示右旋剪切(+)(贺州市罗家山)。Qz—石英; Ser—绢云母; Pl—长石; Ch—绿泥石; Py—黄铁矿; (+)—正交偏光; (-)—单偏光。

a—quartz rotating porphyry system, indicating dextral shear. The preferred orientation of the long axis of the recrystallized quartz aggregate and shear foliation form S-C fabric, indicating sinistral shear (+) (Xialong, Hezhou); b—pre-existing quartz veinlet on XY plane are sheared and broken, and the preferred orientation and foliation of the long axis of the recrystallized quartz aggregate form S-C fabric, indicating sinistral shear (-) (Didong, Hezhou); c—quartz rotating porphyry system, indicating dextral shear (+) (Xialong, Hezhou); d—quartz rotating porphyry system, indicating dextral shear (+) (323 national highway, Hezhou); e—feldspar porphyry on the XY plane of mafic mylonite form domino structure, indicating sinistral shear (+) (Luojiashan, Hezhou); f—the recrystallized quartz aggregate form the domino structure, indicating sinistral shear (+) (Xialong, Hezhou); g—quartz porphyry on the XY plane form the asymmetric pressure shadow structure and domino structure, indicating early sinistral shear and late dextral shear (-) (Taojinping, Hezhou); h—pyrite pressure shadow structure on XZ plane, indicating sinistral shear (-) (Liumatan, Hezhou); i—long axis direction of feldspar porphyry and shear foliation in mafic mylonite form S-C fabric, indicating dextral shear (+) (Luojiashan, Hezhou). Qz—quartz; Ser—sericite; Pl—plagioclase; Ch—chlorite; Py—pyrite; (+)—crossed polars; (-)—unipolar.

图 3 鹰扬关韧性剪切带显微构造特征

Fig. 3 Micro-structure characteristics of the Yingyangguan ductile shear zone

表 1 鹰扬关韧性剪切带的岩石磁组构参数
Table 1 Magnetic fabric elements along the Yingyangguan ductile shear zone

样品号	$K_{\max}$			K_{int}	$K_{\min}$	K_{int}			$K_{\min}$			L	F	P	E	剖面
	D_g	I_g	$K_{\max}$			D_g	I_g	K_{int}	D_g	I_g	$K_{\min}$					
19045	1.181	0.789	1.148	0.789	1.148	336.80	28.50	231.00	231.00	26.60	49.10	1.150	1.309	1.029	1.138	芦冲口 剖面 (A-A')
19046	1.043	1.001	0.955	1.001	0.955	356.70	23.80	256.00	256.00	22.80	56.00	1.039	1.055	1.092	1.015	
19047	1.162	0.969	0.869	0.969	0.869	352.00	29.20	246.80	246.80	25.10	49.70	1.193	1.133	1.337	0.950	
19048	1.191	0.969	0.839	0.969	0.839	344.80	31.00	78.30	78.30	5.90	58.40	1.230	1.160	1.420	0.943	
19107	1.034	1.008	0.958	1.008	0.958	345.70	17.50	225.90	225.90	57.50	26.40	1.026	1.053	1.079	1.026	
19058	1.077	0.997	0.926	0.997	0.926	324.40	43.80	188.80	188.80	36.70	23.90	1.106	1.099	1.163	0.994	
19059	1.063	1.027	0.911	1.027	0.911	18.00	71.10	207.20	207.20	18.70	2.80	1.044	1.144	1.167	1.096	
19060	1.265	0.983	0.752	0.983	0.752	25.40	64.20	197.00	197.00	25.50	3.30	1.283	1.230	1.682	0.959	
19063	1.065	1.014	0.921	1.014	0.921	13.10	29.60	224.40	224.40	56.40	14.40	1.064	1.104	1.156	1.038	
19064	1.066	1.036	0.898	1.036	0.898	26.50	18.90	195.80	195.80	70.80	295.40	1.033	1.155	1.187	1.118	
19066	1.055	1.003	0.942	1.003	0.942	12.20	32.40	199.90	199.90	57.30	3.50	1.052	1.067	1.120	1.014	下龙 剖面 (B-B')
19067	1.030	1.016	0.954	1.016	0.954	19.70	64.70	217.10	217.10	24.30	6.70	1.015	1.066	1.080	1.050	
19069	1.052	0.982	0.966	0.982	0.966	22.30	39.40	176.70	176.70	47.70	13.00	1.058	1.047	1.089	0.990	
19070	1.031	0.999	0.971	0.999	0.971	243.10	32.00	335.60	335.60	4.00	57.70	1.029	1.044	1.062	1.015	
19071	1.016	1.003	0.981	1.003	0.981	146.20	18.50	56.00	56.00	0.60	71.50	1.014	1.023	1.036	1.009	
19109	1.027	0.950	1.004	0.950	1.004	255.40	50.10	1.90	1.90	13.40	36.80	1.010	1.074	1.023	1.063	
19110	1.025	1.011	0.965	1.011	0.965	241.00	49.30	359.10	359.10	22.00	32.20	1.028	1.054	1.062	1.025	
19112	1.054	1.020	0.925	1.020	0.925	334.20	20.40	87.60	87.60	46.90	36.00	1.053	1.128	1.139	1.071	
19030	1.101	1.015	0.884	1.015	0.884	88.30	53.90	353.50	353.50	3.50	261.00	1.088	1.157	1.245	1.063	
19031	1.093	1.020	0.888	1.020	0.888	22.10	42.10	187.90	187.90	47.00	7.10	1.078	1.163	1.231	1.079	
19033	1.076	1.030	0.894	1.030	0.894	357.40	45.00	243.20	243.20	22.20	36.70	1.046	1.161	1.204	1.110	东管坪 剖面 (C-C')
19035	1.049	1.011	0.940	1.011	0.940	353.90	27.90	244.30	244.30	32.30	44.70	1.033	1.098	1.116	1.063	
19036	1.017	1.002	0.980	1.002	0.980	11.70	69.30	279.30	279.30	0.90	20.70	1.033	1.019	1.038	0.986	
19093	1.017	1.002	0.980	1.002	0.980	11.70	69.30	279.30	279.30	0.90	20.70	1.033	1.019	1.038	0.986	
19097	1.037	1.001	0.962	1.001	0.962	95.60	47.70	301.30	301.30	39.30	13.10	1.035	1.048	1.078	1.013	
19098	1.037	1.026	0.938	1.026	0.938	6.60	7.70	271.00	271.00	35.90	53.00	1.018	1.100	1.106	1.081	
19099	1.034	1.023	0.943	1.023	0.943	344.60	6.00	251.80	251.80	24.60	64.60	1.020	1.085	1.097	1.064	
19101	1.014	1.007	0.980	1.007	0.980	347.90	22.70	253.00	253.00	11.50	64.30	1.017	1.030	1.035	1.013	
19124	1.008	1.003	0.989	1.003	0.989	111.90	26.90	223.60	223.60	36.10	42.00	1.008	1.016	1.019	1.008	
19126	1.012	1.009	0.979	1.009	0.979	170.60	26.60	271.30	271.30	20.50	55.40	1.006	1.030	1.034	1.024	掏金坪 剖面 (D-D')
19127	1.015	1.003	0.982	1.003	0.982	251.80	58.40	140.10	140.10	12.80	28.30	1.012	1.021	1.034	1.009	
19129	1.016	0.998	0.986	0.998	0.986	256.40	15.50	54.00	54.00	73.30	6.10	1.029	1.033	1.030	1.004	
19143	1.015	1.003	0.981	1.003	0.981	252.90	63.70	8.60	8.60	12.10	23.00	1.014	1.024	1.035	1.010	
19144	1.011	1.001	0.988	1.001	0.988	27.60	25.30	135.30	135.30	32.80	46.40	1.011	1.013	1.023	1.002	
19145	1.043	1.001	0.955	1.001	0.955	331.10	77.50	189.30	189.30	9.90	7.60	1.043	1.048	1.092	1.005	
19146	1.017	0.999	0.984	0.999	0.984	75.30	31.40	196.00	196.00	39.90	34.30	1.018	1.015	1.034	0.997	
19147	1.010	0.999	0.991	0.999	0.991	195.10	21.80	310.20	310.20	46.70	35.20	1.013	1.009	1.019	0.996	
19148	1.017	1.008	0.976	1.008	0.976	139.90	39.90	233.70	233.70	4.50	49.70	1.009	1.034	1.042	1.025	
19149	1.044	0.995	0.961	0.995	0.961	167.30	34.00	267.20	267.20	14.30	52.20	1.050	1.035	1.086	0.986	
19150	1.018	1.007	0.975	1.007	0.975	157.00	59.60	48.00	48.00	10.80	28.00	1.019	1.029	1.044	1.010	

注: $K_{\max}$ 、 K_{int} 、 $K_{\min}$ 分别代表磁化率椭球体中最大、中间和最小主轴的磁化率大小, 单位为 10^{-4} SI; P (磁化率各向异性度)= $K_{\max}/K_{\min}$; L (磁线理)= $K_{\text{int}}/K_{\min}$; E (磁化率椭球体扁率)= F/L ; D_g 为磁偏角, 单位为 $^{\circ}$; I_g 为磁倾角, 单位为 $^{\circ}$ 。

芦冲口剖面(A-A'): 该剖面西起广西贺州市芦冲口, 沿 113° 延伸至广东清远市上草镇。该剖面主要穿切上元古界鹰扬关组、下龙组 and 南华系, 以及永和岩体。该剖面的 15 件磁组构样品中, $P \geq 1.10$ 的样品有 8 件, 平均 P 值 1.279; $1.10 > P \geq 1.05$ 的样品有 5 件, 平均 P 值 1.085; 其余 2 件样品的 P 值 < 1.05 。该剖面所控制的强、弱韧性变形带宽度 8 km, 且呈现西强东弱的变形特点(图 4b)。

下龙剖面(B-B'): 该剖面西起贺州市松木龙, 沿 90° 延伸至贺州市下龙冲。该剖面主要穿切上元古界鹰扬关组、下龙组 and 南华系。该剖面的 8 件磁组构样品中, $P \geq 1.10$ 的样品有 5 件, 平均 P 值 1.187; $1.10 > P \geq 1.05$ 的样品有 1 件, P 值 1.062; 其余 2 件样品的 P 值 < 1.05 。该剖面所控制的强、弱变形带宽度 4.5 km, 且具有中间强两侧弱的变形特征(图 4c)。

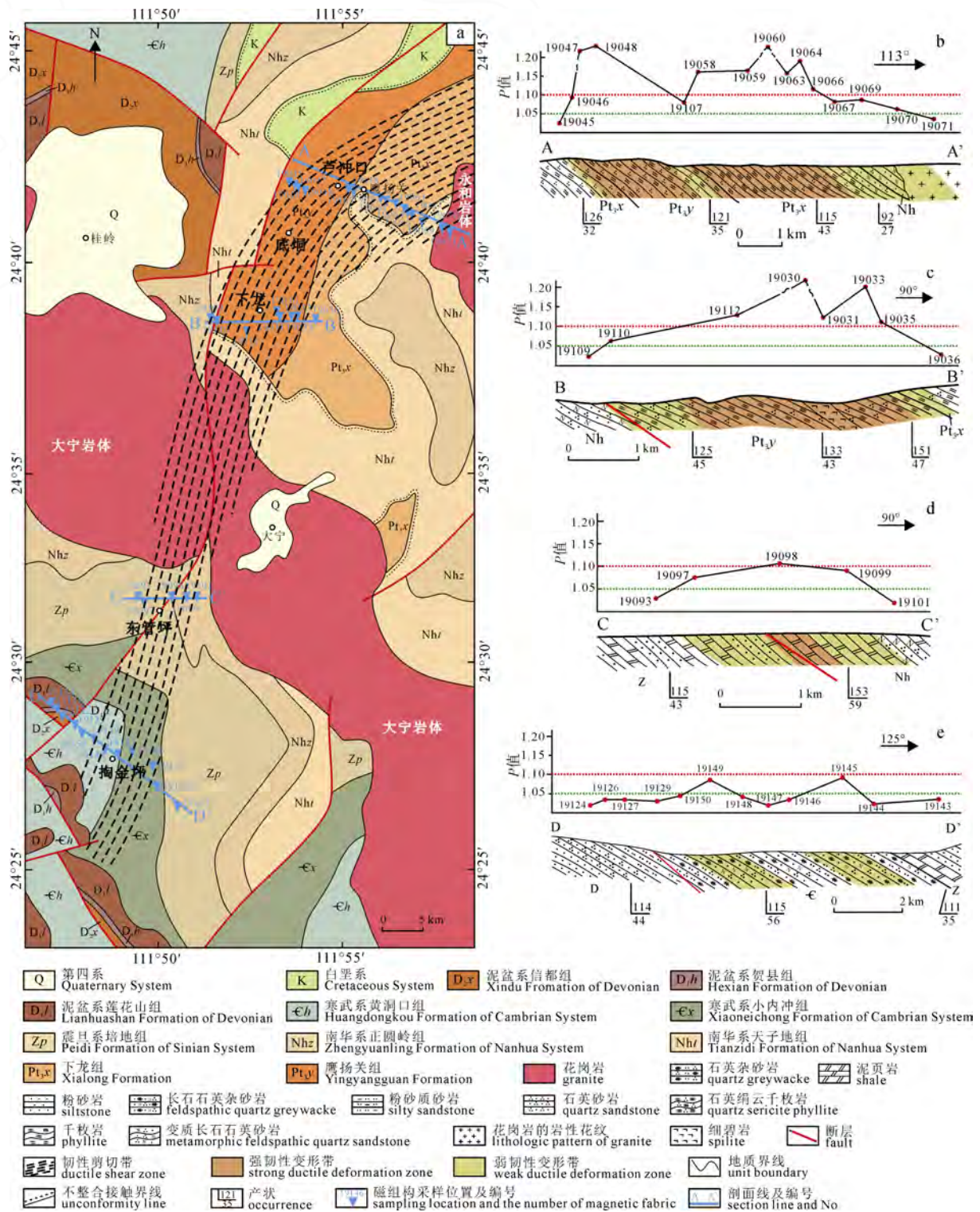


图 4 鹰扬关韧性剪切带地质图及剖面图

Fig. 4 Distribution map and magnetic fabric profile of the Yingyangguan ductile shear zone

东管坪剖面(C-C'): 该剖面西起贺州市沙滩寨, 沿 90° 延伸至贺州市凤塘寨。该剖面主要穿切上元古界南华系和震旦系培地组。该剖面的 5 件磁组构样品中, $P \geq 1.10$ 的样品有 1 件, P 值 1.106; $1.10 > P \geq 1.05$ 的样品有 2 件, 平均 P 值 1.086; 其余 2 件样品的 P 值 < 1.05 。该剖面所控制的强、弱变形带宽度约 2.5 km, 强弱分带明显, 且具中间强两侧弱的变形特征(图 4d)。

掏金坪剖面(D-D'): 该剖面西起贺州市榜山寨, 沿 125° 延伸至贺州市都江村。该剖面主要切穿震旦系培地组、寒武系和泥盆系, 泥盆系未发生变形。该剖面的 12 件磁组构样品中, 无 $P \geq 1.10$ 的样品; $1.10 > P \geq 1.05$ 的样品有 2 件, 平均 P 值 1.089; 其余 10 件样品的 P 值 < 1.05 。该剖面所控制的强弱变形带宽度约 3 km, 以弱韧性变形为主, 且具有弱变形与未变形带相间排列的特点(图 4e)。

磁组构测量结果显示, 鹰扬关韧性剪切带呈 NNE 向延伸超过 40 km、宽 2.5~8 km。鹰扬关韧性剪切带主体展布于桂东北贺州市黄洞至鹰扬关一线, 卷入韧性变形的地质体包括上元古界鹰扬关组、下龙组、南华系、震旦系培地组和下古生界寒武系, 以及鹰扬关组中的镁铁质-超镁铁质岩和志留纪花岗岩(图 4)。实测 39 组糜棱 C 面理(表 2)的极射赤平投影显示, 鹰扬关韧性剪切带倾向 70°~165°, 倾角 27°~86°, 极密点产状 127°∠50°(图 5a, b)。 $P \geq 1.05$ 的 24 组磁面理(表 2)的极射赤平投影显示, 鹰扬关韧性剪切带的极密点产状 107°∠83°(图 5c, d)。

因磁椭球体与应变椭球体之间存在对应关系, 故常用磁组构参数来评价岩石的应变特征。磁化率椭球体扁率($E=F/L$)常用来衡量磁椭球体的应变特征, 当 $E=1$ 时, 代表平面应变; 当 $1 < E$ 时, 代表压扁

型应变; 当 $0 < E < 1$ 时, 代表拉伸型应变。

鹰扬关韧性剪切带 $P \geq 1.05$ 样品的磁面理(F 值)和磁线理(L 值)进行投图, 得到 $L-F$ 图解(图 6)。芦冲口剖面 $P \geq 1.05$ 的 13 件样品中, 8 件样品位于压扁型应变区(占 62%), 5 件样品位于拉伸型应变区(占 38%); 下龙剖面 6 件 $P \geq 1.05$ 的样品位于压扁型应变区(图 6); 东管坪剖面 3 件 $P \geq 1.05$ 的样品位于压扁型应变区(图 6); 掏金坪剖面 2 件 $P \geq 1.05$ 的样品, 各有 1 件样品落入压扁型应变区和拉伸型应变区(图 6)。上述 E 值表明, 鹰扬关韧性剪切带可能具有多期变形, 不同期次的变形体现出不同的应变特征。

4 变形温度

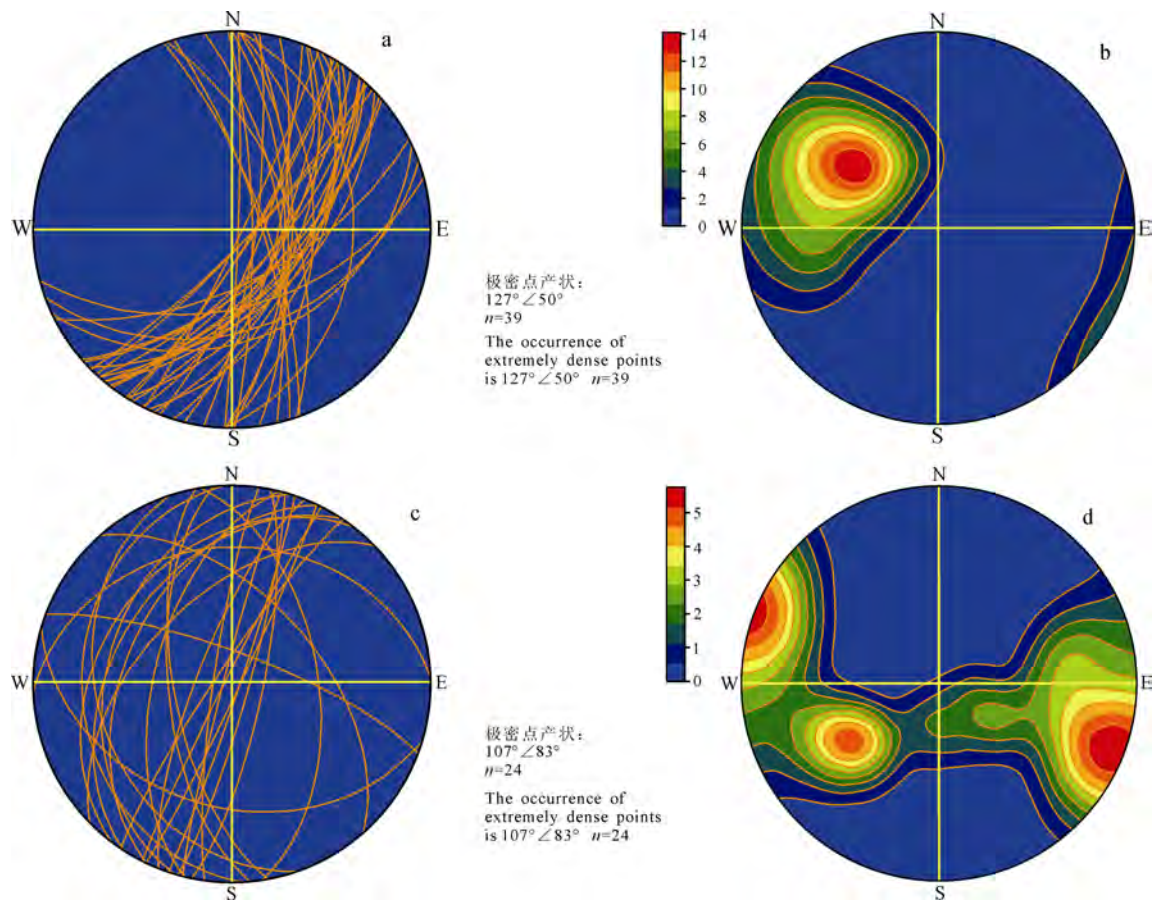
石英是韧性剪切带的主要变形矿物之一, 其在构造变形过程中的晶体滑移方式主要受变形温度控制(Okudaira et al., 1995; Takeshita, 1996; Kurz et al., 2002; 许志琴等, 2008)。在不同的温度下, 石英具有不同的主控滑移系, 呈现不同的晶格优选方位。当温度 < 400 °C 的低绿片岩相时, 表现出底面 $\langle a \rangle$ 滑移系; 温度介于 400~550 °C 的绿片岩相时, 表现出菱面 $\langle a \rangle$ 滑移系; 温度介于 550~650 °C 的角闪岩相时, 表现出柱面 $\langle a \rangle$ 滑移系; 温度 > 650 °C 的高角闪岩相时, 表现出柱面 $\langle c \rangle$ 滑移系(许志琴等, 2009; 黄学猛等, 2016)。石英的结晶学优选方位的分析可用来确定晶体内发育的活动滑移系, 进而估算矿物的变形温度(李刚等, 2012)。

目前, 电子背散射衍射(EBSD)技术被广泛应用于分析矿物组构优选方位(许志琴等, 2009; 黄学猛等, 2016), 论文利用石英 EBSD 组构分析来约束鹰扬关韧性剪切带的变形温度。石英 EBSD 组构分析在桂林理工大学广西隐伏金属矿床勘查重点实验

表 2 鹰扬关韧性剪切带实测糜棱 C 面理和磁面理产状
Table 2 C foliation and magnetic foliation occurrence of the Yingyangguan ductile shear zone

实测 C 面理产状									磁面理产状					
序号	倾向	倾角	序号	倾向	倾角	序号	倾向	倾角	点号	倾向	倾角	点号	倾向	倾角
1	116	84	14	130	54	27	130	50	19046	307.4	34.0	19070	251.9	251.9
2	127	65	15	92	86	28	115	43	19047	303.2	40.3	19110	18.5	18.5
3	111	73	16	155	32	29	153	59	19048	357.9	31.6	19112	282.2	282.2
4	132	65	17	120	61	30	71	56	19107	264.7	63.6	19030	53.2	53.2
5	165	47	18	70	71	31	138	59	19058	259.5	66.1	19031	283.9	283.9
6	92	45	19	89	78	32	130	58	19059	296.8	87.2	19033	57.8	57.8
7	132	52	20	98	76	33	160	36	19060	108.6	86.7	19035	48.5	48.5
8	92	56	21	90	60	34	73	73	19063	291.6	75.6	19097	54.1	54.1
9	113	53	22	133	80	35	136	47	19064	115.4	86.7	19098	105.6	105.6
10	122	50	23	121	79	36	104	64	19066	284.4	86.5	19099	82.9	82.9
11	121	78	24	135	80	37	114	70	19067	304.0	83.3	19145	61.7	61.7
12	82	62	25	92	27	38	130	51	19069	101.4	77.0	19149	67.0	67.0
13	121	35	26	139	59	39	120	45						

注: 倾向、倾角的单位均为°。



a, b—糜棱 C 面理的极射赤平投影和极点等密度图; c, d—磁面理的极射赤平投影和极点等密度图。

a, b—the polar stereographic projection and polar isodensity diagram of mylonite C-foliation;

c, d—the polar stereographic projection and polar isodensity diagram of magnetic foliation.

图 5 鹰扬关韧性剪切带面理产状的极射赤平投影(a, c)和极点等密度图(b, d)

Fig. 5 Stereographic projection (a, c) and polar isodensity map (b, d) of the foliation occurrence of the Yingyangguan ductile shear zone

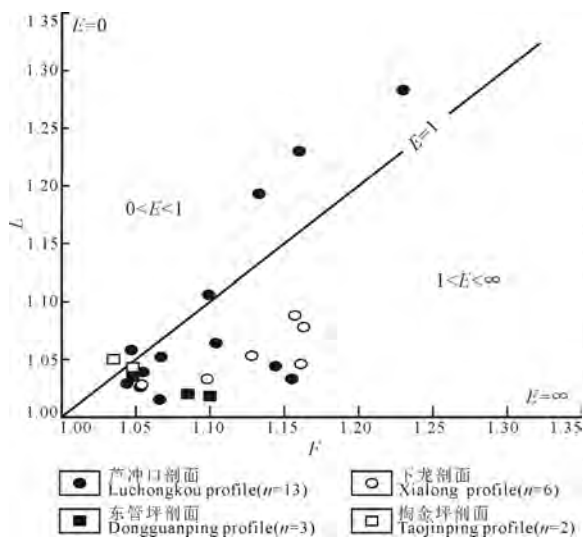


图 6 鹰扬关韧性剪切带 F-L 图解

Fig. 6 F-L diagram of the Yingyangguan ductile shear zone

室的场发射扫描电镜实验室完成。测试仪器使用的是日本电子公司(JEOL)制造的 JSM-56101v 型扫描电镜和丹麦 HKL 公司制造的 CHANNEL5 型号的 EBSD 仪器。首先将样品的 XZ 面定向光薄片经过

精细抛光、喷镀后置于 20 kV 的扫描电镜电子束电压下,接着使用 EBSD 系统确定石英矿物的电子背散射通道衍射花样,标明衍射点的指数,最后在光薄片范围内进行优选方位测定。论文共开展 4 件样品的石英 EBSD 组构分析,分别为样品 YY19020、YY19038、YY19039-1 和 YY19039-2 等。

样品 YY19020 的石英 EBSD 组构图显示多个极密中心,暗示其具有多期次构造变形。极密点主要位于第一、第四象限,显示菱面<a>滑移;次极密点则位于中心,呈现柱面<a>滑移(图 7)。样品 YY19038 的石英 EBSD 组构图显示多个极密中心,暗示岩石经历了多期构造变形。极密点位于第二和第四象限,主极密点位于第四象限,呈菱面<a>滑移;次极密点位于第二象限,显示柱面<a>滑移的特征(图 7)。样品 YY19039-1 的主极密点靠近中心,显示柱面<a>滑移;次极密点靠近 Z 轴,显示菱面<a>滑移的特征(图 7)。样品 YY19039-2 的极密点主要分布于第一和第三象限,主极密点靠近 X 轴,显示柱面<c>滑移的特点;次极密点总体显示菱面<a>滑移和底面<a>滑移的特点(图 7)。

4 件样品具有相似的石英 EBSD 组构图, 均显示多期构造变形的特征。石英 EBSD 组构显示柱面<c>滑移、柱面<a>滑移、菱面<a>滑移和底面<a>滑移。综上所述, 鹰扬关韧性剪切带总体呈现晚期中低温变形(400~550 °C)叠加于早期中高温变形(550~650 °C)的特征。

5 变形时代

论文利用热液锆石 U-Pb 年龄来约束鹰扬关韧性剪切带的变形时代。

5.1 锆石 U-Pb 测年

论文选择鹰扬关韧性剪切带中罗家山辉长岩体边缘的镁铁质糜棱岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 采样坐标为 111°55'25"E, 24°39'15"N(图 1)。罗家山辉长岩的地质特征、岩相学及锆石 U-Pb 测年方法等见秦亚等(2022)。论文对罗家山镁铁质糜棱岩样品(样品 YY20006)进行 21 粒单颗粒锆石的 U-Pb 年龄测试, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据见表 3。测年样品具有复杂的阴极发光图像(图 8a), 21 粒锆石均位于谐和线上及其附近(图 8b)。结合锆石阴极发光图像(CL)、U-Pb 年龄及锆石成因, 21 粒测年锆石可分为 3 组(图 8)。

A 组含 14 粒锆石, 呈短柱状、长柱状和不规则

状的形态, 粒径 70~215 μm 。CL 图像的明亮程度呈现多样性, 不同颗粒呈现不同的亮度, 即便同一颗粒的不同部位也呈现不同的亮度(图 8a)。部分颗粒可见内部环带, 但环带不清晰, 呈现明显的热扰动痕迹; 部分颗粒呈现孔洞状或无环带的内部结构, 均显示被后期热液改造的特征(图 8a)。Th、U 含量及 Th/U 值分别为 $(798.25\sim65\ 567.77)\times 10^{-6}$ 、 $(1\ 033.24\sim20\ 876.65)\times 10^{-6}$ 和 0.42~3.14。14 粒锆石给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (441.1 ± 2.3) Ma(图 8b)。

B 组含 1 粒锆石, 呈短柱状的形态, 粒径 ~45 μm 。CL 图像呈现清晰的岩浆振荡环带, 具有典型的基性岩锆石的内部环带特征。锆石颗粒边缘, 可见星点状的热液蚀变边(图 8a), 表明其可能受到后期构造热液的影响。该颗粒锆石的 Th、U 含量及 Th/U 值分别为 529.11×10^{-6} 、 338.66×10^{-6} 和 1.56。锆石的形态、内部环带和 Th/U 值等表明其为岩浆锆石, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (769 ± 6) Ma。

C 组含 6 粒锆石, 呈长柱状、椭圆状和不规则状的形态, 粒径 50~130 μm 。CL 图像明暗程度不一, 既有较亮的 CL 图像, 也有相对较暗的 CL 图像(图 8a)。内部环带清晰, 环带特征多样, 个别颗粒边缘可见明亮的增生边(图 8a), 暗示其可能受到后期

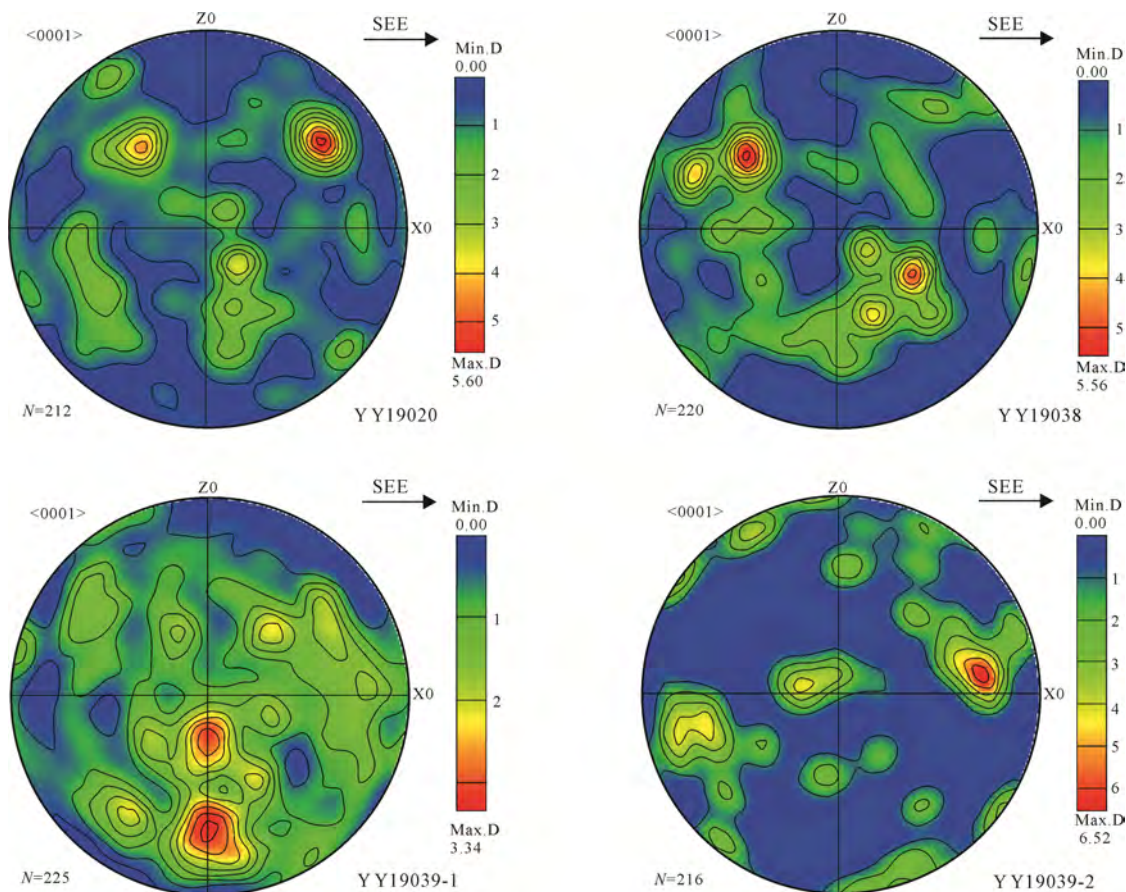


图 7 鹰扬关韧性剪切带石英 EBSD 组构图

Fig. 7 Quartz EBSD fabric diagrams of the Yingyanguan ductile shear zone

表 3 鹰扬关韧性剪切带 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试数据
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb age data of the Yingyangguan ductile shear zone

Spot No.	Th/ ($\times 10^{-6}$)	U/ ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				比值	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	比值	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$
YY20006-01	529.11	338.66	1.56	0.066 24	0.001 19	1.152 90	0.022 10	0.126 76	0.001 07	0.001 07	0.001 07	0.001 07	814	26	779	10	769	6			
YY20006-02	1 153.17	1 907.40	0.60	0.056 03	0.000 88	0.546 36	0.011 38	0.070 95	0.000 77	0.000 77	0.000 77	0.000 77	453	27	443	7	442	5			
YY20006-03	798.25	1 033.24	0.77	0.062 99	0.001 11	0.615 97	0.012 58	0.070 81	0.000 56	0.000 56	0.000 56	0.000 56	708	30	487	8	441	3			
YY20006-04	183.71	184.44	1.00	0.068 94	0.001 59	1.542 43	0.036 04	0.162 44	0.001 51	0.001 51	0.001 51	0.001 51	897	33	947	14	970	8			
YY20006-05	1 223.86	2 228.40	0.55	0.079 83	0.000 95	1.817 69	0.026 19	0.165 19	0.001 41	0.001 41	0.001 41	0.001 41	1 193	15	1 052	9	986	8			
YY20006-06	12 722.45	9 183.57	1.39	0.059 25	0.000 61	0.583 20	0.010 43	0.071 14	0.000 78	0.000 78	0.000 78	0.000 78	576	21	467	7	443	5			
YY20006-07	708.85	893.14	0.79	0.077 16	0.000 90	1.943 62	0.028 89	0.182 68	0.001 39	0.001 39	0.001 39	0.001 39	1 125	18	1 096	10	1 082	8			
YY20006-08	10 390.60	7 957.62	1.31	0.062 42	0.000 94	0.606 85	0.009 68	0.070 49	0.000 75	0.000 75	0.000 75	0.000 75	689	17	482	6	439	5			
YY20006-09	3 246.41	1 767.63	1.84	0.056 58	0.000 65	0.552 25	0.008 30	0.070 79	0.000 59	0.000 59	0.000 59	0.000 59	475	19	446	5	441	4			
YY20006-10	15 876.47	7 705.19	2.06	0.053 86	0.002 03	0.522 92	0.019 28	0.070 41	0.000 92	0.000 92	0.000 92	0.000 92	365	59	427	13	439	6			
YY20006-11	16 904.38	8 405.03	2.01	0.060 97	0.000 65	0.597 63	0.009 68	0.071 07	0.000 74	0.000 74	0.000 74	0.000 74	638	18	476	6	443	4			
YY20006-12	294.70	847.31	0.35	0.069 49	0.001 19	1.510 36	0.023 59	0.157 84	0.001 29	0.001 29	0.001 29	0.001 29	913	19	935	10	945	7			
YY20006-13	1 372.05	1 910.66	0.72	0.055 53	0.000 70	0.543 40	0.008 53	0.071 03	0.000 61	0.000 61	0.000 61	0.000 61	434	20	441	6	442	4			
YY20006-14	33 331.21	14 473.46	2.30	0.062 29	0.000 83	0.605 65	0.009 50	0.070 50	0.000 61	0.000 61	0.000 61	0.000 61	684	19	481	6	439	4			
YY20006-15	6 414.70	6 518.65	0.98	0.057 50	0.000 96	0.562 41	0.011 85	0.070 98	0.000 83	0.000 83	0.000 83	0.000 83	511	26	453	8	442	5			
YY20006-16	65 567.77	20 876.65	3.14	0.062 91	0.001 24	0.613 46	0.013 92	0.070 86	0.001 48	0.001 48	0.001 48	0.001 48	705	22	486	9	441	9			
YY20006-17	224.91	1 137.72	0.20	0.075 16	0.000 82	1.897 03	0.026 58	0.183 13	0.001 43	0.001 43	0.001 43	0.001 43	1 073	16	1 080	9	1 084	8			
YY20006-18	2 320.54	1 535.53	1.51	0.064 14	0.000 99	0.626 05	0.010 79	0.070 74	0.000 59	0.000 59	0.000 59	0.000 59	746	23	494	7	441	4			
YY20006-19	22 698.76	11 620.36	1.95	0.059 77	0.000 62	0.584 58	0.010 50	0.070 89	0.000 87	0.000 87	0.000 87	0.000 87	595	19	467	7	442	5			
YY20006-20	795.41	644.90	1.23	0.120 65	0.002 40	6.369 04	0.083 58	0.364 59	0.003 11	0.003 11	0.003 11	0.003 11	1 966	12	2 028	12	2 004	15			
YY20006-21	1 087.35	2 606.12	0.42	0.057 52	0.000 64	0.557 74	0.009 04	0.070 64	0.000 80	0.000 80	0.000 80	0.000 80	512	18	450	6	440	5			

表 4 桂东北地区鹰扬关韧性剪切带锆石微量元素数据/ 10^{-6}
Table 4 Trace elements data / 10^{-6} of the Yingyangguan ductile shear zone of northeastern Guangxi

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	δ Eu	δ Ce	(Sm/La) _N	L	H	L/H
20006-01	0.12	21.26	1.17	22.58	47.30	9.98	230.54	69.58	743.11	250.94	996.13	185.89	1 629.02	283.61	4 491.22	0.24	5.43	610.57	102.41	4 388.82	0.02
20006-02	1.77	54.41	0.66	7.43	7.51	2.35	47.76	18.67	229.27	88.96	424.93	92.44	941.32	188.80	2 106.28	0.29	12.36	6.57	74.13	2 032.15	0.04
20006-03	0.01	47.01	0.16	1.67	2.53	1.06	12.38	5.10	68.53	27.45	150.41	36.50	400.93	89.39	843.12	0.47	90.41	391.90	52.44	790.69	0.07
20006-04	0.03	65.96	0.40	6.00	10.24	2.81	47.09	13.78	156.91	55.46	251.71	52.84	525.78	105.46	1 294.48	0.33	49.29	528.73	85.44	1 209.03	0.07
20006-05	8.64	75.87	4.62	43.98	51.33	11.36	274.09	80.58	803.73	255.83	1 011.99	185.42	1 619.86	286.29	4 713.58	0.23	2.91	9.20	195.80	4 517.79	0.04
20006-06	39.17	748.30	18.58	99.60	66.76	16.26	220.53	71.18	864.83	349.02	1 675.82	368.00	3 711.08	718.63	8 967.77	0.37	6.78	2.64	988.67	7 979.09	0.12
20006-07	0.44	10.12	1.20	14.96	29.74	1.01	117.20	35.17	399.29	146.27	637.22	127.07	1 197.04	225.73	2 942.45	0.05	2.29	104.70	57.47	2 884.99	0.02
20006-08	36.52	496.90	26.24	138.77	62.44	18.72	178.60	56.77	665.15	245.10	1 162.17	248.12	2 370.38	463.27	6 169.15	0.51	3.77	2.65	779.59	5 389.56	0.14
20006-09	0.33	84.08	1.71	19.58	13.81	5.23	48.87	13.57	148.62	53.69	254.98	58.86	662.61	140.59	1 506.53	0.55	14.14	64.82	124.74	1 381.79	0.09
20006-10	14.24	295.88	10.99	70.94	51.76	14.31	182.06	58.46	678.95	249.73	1 173.81	248.61	2 486.82	479.89	6 016.44	0.40	5.50	5.63	458.12	5 558.33	0.08
20006-11	80.36	400.09	18.53	75.93	31.46	6.36	82.30	24.91	315.38	125.57	620.42	143.50	1 559.23	306.37	3 790.40	0.36	2.45	0.61	612.73	3 177.68	0.19
20006-12	1.15	11.23	0.81	7.97	13.06	0.39	77.76	28.32	366.59	138.78	639.98	128.30	1 175.04	210.49	2 799.90	0.03	2.74	17.59	34.61	2 765.26	0.01
20006-13	0.02	58.66	0.28	3.55	8.72	2.20	50.05	17.44	219.03	87.10	421.77	91.00	932.22	189.79	2 081.83	0.25	64.00	675.37	73.43	2 008.40	0.04
20006-14	23.13	810.60	19.66	122.34	75.48	19.15	156.21	44.95	487.47	165.58	729.60	152.69	1 528.61	286.86	4 622.32	0.53	8.70	5.05	1 070.36	3 551.97	0.30
20006-15	7.78	388.16	5.24	35.54	32.09	9.81	105.46	33.23	393.24	149.65	728.80	159.51	1 673.02	331.41	4 052.93	0.47	14.43	6.39	478.62	3 574.32	0.13
20006-16	45.94	1 387.93	27.33	151.57	99.85	19.16	313.31	97.95	1 150.04	424.11	1 916.34	397.69	3 781.57	694.36	10 507.15	0.30	9.42	3.37	1 731.78	8 775.37	0.20
20006-17	0.02	2.77	0.09	1.92	9.53	0.47	67.91	24.25	286.23	90.22	355.51	66.99	593.98	106.93	1 606.82	0.04	8.52	738.11	14.79	1 592.02	0.01
20006-18	6.02	81.21	4.92	22.47	10.47	2.58	21.52	6.00	72.73	28.83	141.39	34.50	374.57	79.78	887.00	0.51	3.44	2.69	127.67	759.32	0.17
20006-19	11.64	945.37	9.01	69.61	74.05	18.77	272.60	84.50	1 001.13	368.21	1 708.78	356.54	3 494.63	654.05	9 068.87	0.36	21.47	9.85	1 128.45	7 940.44	0.14
20006-20	0.23	145.09	1.17	21.51	30.97	8.34	124.77	35.41	388.25	140.35	601.78	119.17	1 089.74	202.11	2 908.89	0.36	35.70	208.58	207.32	2 701.58	0.08
20006-21	15.37	77.73	6.14	41.14	11.50	2.63	39.51	15.71	199.64	87.26	448.58	102.98	1 087.59	220.95	2 356.74	0.34	1.96	1.16	154.51	2 202.22	0.07

注: Σ REE 为总稀土含量; L 为轻稀土含量; H 为重稀土含量; L/H 为轻重稀土比值; δ Eu= $2\times(\text{Eu}_{\text{sp}}/\text{Eu}_{\text{pp}})/(\text{Sm}_{\text{sp}}/\text{Sm}_{\text{pp}})+(\text{Gd}_{\text{sp}}/\text{Gd}_{\text{pp}})$; δ Ce= $2\times(\text{Ce}_{\text{sp}}/\text{Ce}_{\text{pp}})/(\text{La}_{\text{sp}}/\text{La}_{\text{pp}})+(\text{Pr}_{\text{sp}}/\text{Pr}_{\text{pp}})$; (Sm/La)_N=(Sm_{sp}/La_{sp})₀

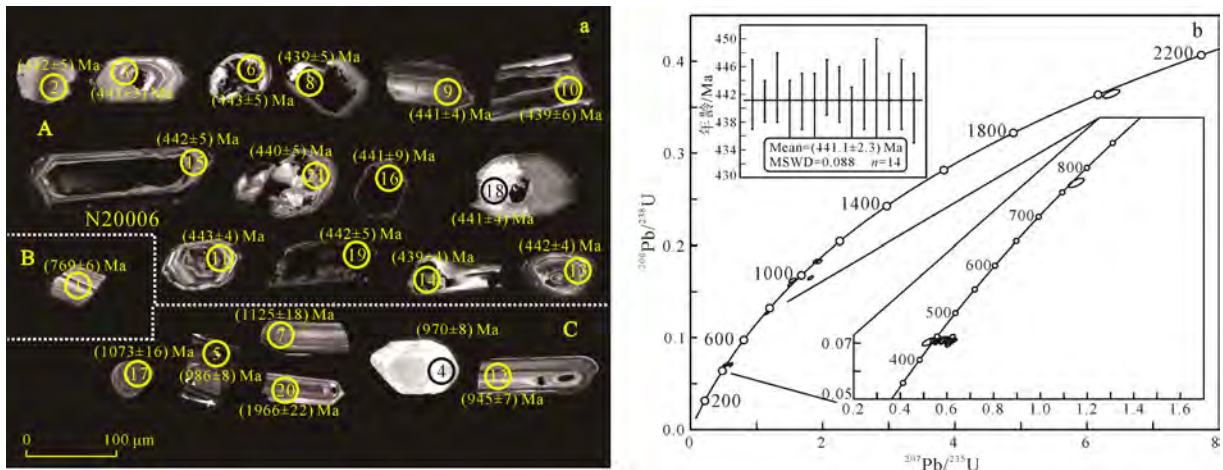


图 8 罗家山辉长岩的锆石阴极发光图像(a)和 U-Pb 年龄谐和图解(b)

Fig. 8 The CL images of zircon (a) and U-Pb concordant diagram (b) of Luojiashan gabbro

热液的影响。Th、U 含量及 Th/U 值分别为 $(183.71 \sim 1\ 223.68) \times 10^{-6}$ 、 $(184.44 \sim 2\ 228.40) \times 10^{-6}$ 和 $0.20 \sim 1.23$ 。锆石 U-Pb 年龄分布较分散, 介于 $945 \sim 1\ 966$ Ma 之间(图 8b)。

5.2 锆石成因类型

锆石成因具有复杂性, 同一样品不同的锆石颗粒可能具有不同的成因, 即便同一锆石颗粒的不同晶域也可能具有不同的成因类型(简平等, 2001; 李长民, 2009; 李长民等, 2010)。在前寒武纪花岗岩类和变质岩的年代学、金矿成矿时代和韧性剪切变形时代的研究中, 常常出现多种成因类型的锆石, 如热液锆石、变质锆石和深熔锆石等(简平等, 2001; 李长民, 2009)。锆石成因的复杂性表明, 正确识别锆石的成因类型对于合理解释锆石 U-Pb 年龄具有重要意义。

锆石成因类型的识别, 除锆石的外部形态、CL 图像及 Th/U 值外, 还需结合锆石的地球化学和微区特征进行综合判别。相较于岩浆锆石和变质锆石而言, 热液锆石更加复杂。热液锆石多以岩浆锆石的热液蚀变边的形式出现, 或呈孔洞状的形态(简平等, 2001; 李长民, 2009)。热液锆石相对于岩浆锆石或变质锆石而言, 具有富集 LREE、高的 La 含量、较低的 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ 值, 弱的 Ce 和 Eu 异常等地球化学特征(Hoskin and Ireland, 2000; Hoskin, 2005; Rubatto, 2002; 孟杰等, 2017)。此外, 热液锆石呈现相对平缓的轻稀土元素配分曲线, 而区别于岩浆锆石从 La 到 Lu 之间急剧变化的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(Rubatto, 2002; 李长民等, 2010)。

锆石形态上, A 组锆石呈现不规则状、椭圆状, 而 B 组和 C 组锆石呈现长柱状、短柱状的形态(图 8a)。内部环带上, A 组锆石呈孔洞状、不规则状的内部环带, 而 B 组和 C 组锆石则呈现典型的岩浆振荡环带。稀土元素特征上(表 4), A 组锆石具有相对较高

的总稀土元素含量(ΣREE)和轻稀土元素含量(LREE), ΣREE 值介于 $843.12 \times 10^{-6} \sim 10\ 507.15 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值 $4\ 498.32 \times 10^{-6}$; LREE 介于 $52.43 \times 10^{-6} \sim 1\ 731.78 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值 561.09×10^{-6} 。而 B 组和 C 组锆石具有相似的稀土元素特征, 其 ΣREE 和 LREE 相对较低(图 9a), ΣREE 值介于 $1\ 294.48 \times 10^{-6} \sim 4\ 713.58 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 $2\ 965.33 \times 10^{-6}$; LREE 介于 $14.79 \times 10^{-6} \sim 207.32 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值 99.69×10^{-6} 。相较而言, A 组锆石比 B 组和 C 组锆石更富集 LREE(图 9a)。

3 组锆石的 δEu 和 δCe 值也存在明显差异, A 组锆石表现为中等负铈异常和相对更高的铈异常(图 9a), 其 δEu 和 δCe 值分别为 $0.25 \sim 0.55$ (平均值 0.41) 和 $1.96 \sim 90.41$ (平均值 18.49); B 组和 C 组则表现为强烈的负铈异常和相对较低的铈异常(图 9a), 其锆石的 δEu 和 δCe 值分别为 $0.03 \sim 0.36$ (平均值 0.18) 和 $2.29 \sim 49.29$ (平均值 15.27)。

此外, 3 组锆石的 La 含量和 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ 值也存在明显差异。A 组锆石具有较高 La 含量和低 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ 值, 分别介于 $0.01 \times 10^{-6} \sim 80.36 \times 10^{-6}$ 之间和 $0.61 \sim 675.38$ 之间(平均值 84.19), 而 B 组和 C 组锆石则刚好相反, 具有较低的 La 含量和高的 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ 值, 分别介于 $0.02 \times 10^{-6} \sim 8.64 \times 10^{-6}$ 之间和 $9.20 \sim 738.11$ 之间(平均值 316.78)。在 $\omega(\text{La})$ - $[\omega(\text{Sm})/\omega(\text{La})]_{\text{N}}$ (图 9b)和 δCe - $[\omega(\text{Sm})/\omega(\text{La})]_{\text{N}}$ 图解(图 9c)上, A 组锆石落入热液锆石区域, 而 B 组和 C 组锆石则落在岩浆锆石区域。

锆石形态、CL 图像、稀土元素配分曲线和锆石成因类型判别图解均表明, A 组为热液锆石, B 组和 C 组为岩浆成因锆石。

5.3 变形时代

过去几十年的研究表明, 锆石可以直接从中低温热液流体中生长结晶, 形成具有“热液矿物”特征的锆石(李长民, 2009)。在韧性剪切带及中低温含

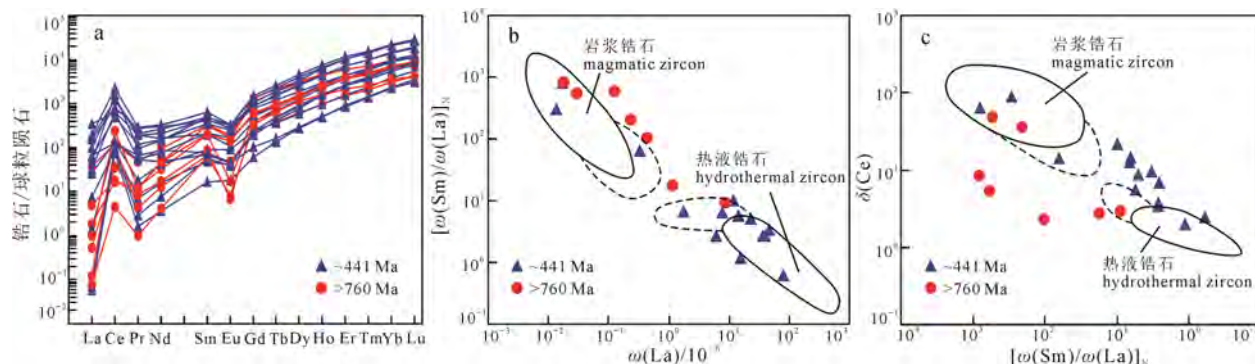


图9 罗家山辉长岩样品的锆石成因类型判别图解

Fig. 9 Zircon genetic types diagrams of Luojiashan gabbro samples

金石英脉中均有利用热液锆石来限定构造变形时代或成矿时代的报道(Hoskin, 2005; 李长民等, 2012)。鹰扬关韧性剪切带罗家山镁铁质糜棱岩的3组锆石中, A组热液锆石应代表成岩后构造热事件的时代; B组锆石为测年样品中最年轻的岩浆锆石, 应代表岩体的形成时代; C组岩浆锆石的年龄代表岩体侵位过程中捕获锆石的时代。

鹰扬关地区构造变形时代的研究相对较弱, 仅王令占等(2020)对鹰扬关地区变质沉积岩和变质火山碎屑岩开展云母类矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究, 获得 (377.8 ± 2.6) Ma、 (320.4 ± 2.1) Ma、 (287.6 ± 2.1) Ma、 (227.4 ± 1.5) Ma、 (223.5 ± 1.5) Ma的坪年龄和 (209 ± 10) Ma、 (172 ± 48) Ma的等时线年龄。桂东北地区鹰扬关韧性剪切带主要穿切上元古界鹰扬关组、下龙组、南华系、震旦系, 下古生界寒武系, 以及志留纪大宁花岗岩, 而上古生界泥盆系并未卷入韧性变形, 表明鹰扬关韧性剪切带形成于早古生代, 为扬子和华夏陆块早古生代造山事件的产物。

石英EBSD组构显示, 鹰扬关韧性剪切带具有晚期中低温变形($400\sim 550^\circ\text{C}$)叠加于早期中高温变形($550\sim 650^\circ\text{C}$)的特征。早期中高温变形的温度较高, 加上热液作用, 具有形成热液锆石的良好条件, 故 (441.1 ± 2.3) Ma的热液锆石U-Pb年龄应代表早期中高温左旋逆冲剪切的时限。晚期中低温变形的温度略高于云母类矿物的封闭温度, 故 (377.8 ± 2.6) Ma的时代应代表晚期右旋正滑剪切的时代。此外, 鹰扬关韧性剪切带切割志留纪大宁花岗岩(程顺波等, 2009; 郭丽爽等, 2017)及花岗质糜棱岩呈现右旋正滑剪切的特征, 暗示其右旋正滑剪切时代应晚于420 Ma。

综上所述, 鹰扬关韧性剪切带早期左旋逆冲剪切的变形时代为 (441.1 ± 2.3) Ma, 晚期右旋正滑剪切的变形时代应晚于420 Ma, 可能为 (377.8 ± 2.6) Ma, 区域应力场由挤压转为伸展的时限约为420 Ma。

6 讨论

6.1 韧性剪切带的厘定

鹰扬关韧性剪切带具有典型的宏-微观韧性变形组构, 发育糜棱岩、拉伸线理、S-C组构、旋转碎斑系、书斜构造、压力影构造和石英动态重结晶等(图2和图3)。综合宏-微观构造和磁组构测量结果, 桂东北鹰扬关韧性剪切带主体展布于贺州市黄洞乡至鹰扬关一线, 呈NNE向延伸超过40 km, 宽2.5~8 km。糜棱C面理(表2)的极密点产状 $127^\circ\angle 50^\circ$ (图5a, b), 磁面理(表2)的极密点产状 $107^\circ\angle 83^\circ$ (图5c, d)。

前人研究表明, 糜棱C面理与磁面理的夹角可以判断剪切带的运动学方向; 相对于糜棱C面理而言, 磁面理位于其锐角顺时针方向, 则表明发生了左旋剪切; 反之, 磁面理位于其锐角逆时针方向, 则表明发生了右旋剪切(陈柏林等, 1997)。鹰扬关韧性剪切带磁面理的极密点产状($107^\circ\angle 83^\circ$)相对于宏观糜棱C面理的极密点产状($127^\circ\angle 50^\circ$)发生了逆时针方向的旋转, 暗示鹰扬关韧性剪切带发生了右旋剪切。应变分析和石英EBSD组构等表明, 鹰扬关韧性剪切带具有多期变形的特征。结合宏-微观构造研究表明, 鹰扬关韧性剪切带具有多期变形, 呈现早期左旋逆冲剪切, 晚期右旋正滑剪切的运动学性质(图2, 图3)。

磁化率椭球体扁率(E 值)表明, 鹰扬关韧性剪切带呈现多期变形, 不同时期的变形呈现不同的应变类型。鹰扬关韧性剪切带变形岩石既保留有压扁型应变, 也保留有拉伸型应变。

前人甚少涉及桂东北地区构造变形的温度研究, 论文利用石英EBSD组构来约束韧性剪切带岩石的变形温度。鹰扬关韧性剪切带的石英EBSD组构呈现多个极密中心, 主体呈现柱面<c>滑移、柱面<a>滑移、菱面<a>滑移和底面<a>滑移, 总体呈现晚期中低温变形($400\sim 550^\circ\text{C}$)叠加于早期中高温变

形(550~650 °C)的特征。

前已述及, 桂东北地区罗家山糜棱岩化辉长岩的热液锆石 U-Pb 年龄为(441.1±2.3) Ma, 应代表鹰扬关韧性剪切带早期左旋逆冲剪切的时代。论文虽未获得右旋正滑剪切的精确时代, 但大宁岩体中花岗质糜棱岩呈现右旋正滑剪切的运动学性质以及前人测年结果, 均暗示鹰扬关韧性剪切带晚期右旋正滑剪切的变形时代晚于 420 Ma。

6.2 成因机制

大型韧性剪切带是大陆构造变形过程中地壳较深层次的构造形迹, 也是碰撞造山作用或陆内变形的表现形式之一, 多是陆块碰撞拼贴带及地体增生拼合带的重要组成部分, 常出现在活动板块或地块的边界及其附近(朱光等, 2004)。大型韧性剪切带常与造山过程密切相关, 逆冲型韧性剪切带一般在大洋俯冲增生及弧陆-陆陆碰撞造山过程的中下地壳收缩阶段; 伸展型韧性剪切带主要形成于地壳伸展减薄的后造山阶段; 而走滑型韧性剪切带常与地体之间的斜向汇聚和碰撞有关(许志琴等, 2007; 蔡志慧等, 2012)。

桂东北鹰扬关地区处于扬子和华夏陆块拼贴带的西南段, 其 NNE 向韧性剪切带的厘定有助于揭示华南大陆早古生代扬子和华夏陆块的造山作用过程。运动性质上, 鹰扬关韧性剪切带具有早期左旋逆冲剪切, 晚期右旋正滑剪切的运动学性质。应变状态上, 韧性变形岩石既保留有压扁型应变, 也保留有拉伸型应变。变形温度上, 鹰扬关韧性剪切带具有晚期中低温变形叠加于早期中高温变形的特征。上述特征表明, 鹰扬关韧性剪切带形成于扬子和华夏陆块早古生代造山作用过程; 早期挤压缩短阶段, 岩石产生压扁型应变和左旋逆冲剪切; 晚期造山后伸展阶段, 岩石产生拉伸型应变和右旋正滑剪切(相关的演化模式见作者待见刊论文)。

扬子和华夏陆块早古生代造山事件的动力来源长期存在不同的认识。薛云峰(2021)认为鹰扬关韧性剪切带形成于早古生代扬子和华夏陆块的造山挤压构造背景。区域上, 张雪锋(2015)认为桂北地区四堡韧性剪切带是华南早古生代华夏地块自 SE 向 NW 做低角度斜冲到扬子地块的产物。马筱(2018)研究表明, 扬子东南缘的前泥盆系构造变形具有自 SE 向 NW 逐渐变弱的趋势, 亦支持华南大陆早古生代构造事件的驱动力来自 SE 侧。鹰扬关韧性剪切带倾向 SE, 支持华南早古生代构造事件的动力来源于 SE 侧的认识, 即鹰扬关韧性剪切带与华南早古生代华夏陆块自 SE 向扬子陆块造山挤压事件有关。

6.3 构造意义

前已述及, 桂东北地区的变形构造存在两种不同的观点, 即构造混杂成因(殷鸿福等, 1999; 覃小锋等, 2015; 张克信等, 2017; 王令占等, 2020)和区域构造成因(舒良树等, 2020; 徐先兵等, 2021; 夏元等, 2022)。鹰扬关韧性剪切带的产状、展布、变形时代、运动性质、变形温度和应变状态等均支持形成于扬子和华夏陆块的早古生代造山作用, 为区域构造变形的结果。此外, 桂东北鹰扬关地区下龙组中的条带状磁铁矿层连续可追溯, 暗示其为有序沉积, 亦不支持构造混杂的观点。

此外, 华南大陆早古生代构造应力场由挤压向伸展转换的时限研究相对较弱。马筱(2018)认为区域应力由逆冲剪切向正滑剪切转换的时限为 426~419 Ma。鹰扬关韧性剪切带早期左旋逆冲剪切和压扁型应变的时限为(441.1±2.3) Ma, 右旋正滑剪切和拉伸型应变的时限晚于 420 Ma, 支持区域构造应力场发生转变的时限约 420 Ma。

7 结论

(1)宏-微观构造、磁组构和石英 EBSD 组构表明, 桂东北鹰扬关韧性剪切带呈 NNE 向延伸超 40 km, 宽 2.5~8 km。糜棱 C 面理的极密点产状 $127^\circ \angle 50^\circ$, 磁面理的极密点产状 $107^\circ \angle 83^\circ$ 。

(2)鹰扬关韧性剪切带形成于早古生代扬子和华夏陆块造山作用背景, 具有两期韧性变形。早期挤压造山阶段(441.1±2.3) Ma, 产生中高温(550~650 °C)左旋逆冲剪切和压扁型应变; 晚期造山后伸展阶段(<420 Ma), 产生中低温(400~550 °C)右旋正滑剪切和拉伸型应变。

(3)鹰扬关韧性剪切带变形时代的厘定不支持区域存在早古生代构造混杂作用, 同时表明区域构造应力场由挤压向伸展转换的时限约 420 Ma。

致谢: 非常感谢桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室在磁组构、石英 EBSD 组构和热液锆石 U-Pb 测试过程中提供的帮助。审稿人的审稿意见对论文的提高具有重要作用, 在此一并致谢。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 42072259 and 42162018), and Natural Science Foundation of Guangxi (Nos. 2022GXNSFAA035570 and 2019GXNSFDA245009).

参考文献:

蔡志慧, 许志琴, 何碧竹, 王瑞瑞. 2012. 东天山-北山造山带中大型韧性剪切带属性及形成演化时限与过程[J]. 岩石学报,

- 28(6): 1875-1895.
- 陈柏林, 李中坚, 谢艳霞. 1997. 北京怀柔崎峰茶一琉璃庙地区岩石磁组构特征及其构造意义[J]. 地球学报, 18(2): 134-141.
- 陈凌云, 张忠伟. 2003. 加里东期扬子板块与南华活动带在广西境内分界线的探讨[J]. 南方国土资源, 12: 18-19, 25.
- 陈懋弘, 梁金城, 张桂林, 李文杰, 潘罗忠, 李容森. 2006. 加里东期扬子板块与华夏板块西南段分界线的岩相古地理制约[J]. 高校地质学报, 12(1): 111-122.
- 程顺波, 付建明, 徐德明, 陈希清, 马丽艳, 王晓地, 庞迎春. 2009. 桂东北大宁岩体锆石 SHRIMP 年代学和地球化学研究[J]. 中国地质, 36(6): 1278-1288.
- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社.
- 崔晓庄, 江新胜, 邓奇, 王剑, 卓皆文, 任光明, 蔡娟娟, 伍皓, 江卓斐. 2016. 桂北地区丹洲群锆石 U-Pb 年代学及对华南新元古代裂谷作用期次的启示[J]. 大地构造与成矿学, 40(5): 1049-1063.
- 郭丽爽, 吕鑫, 王政华, 毛佐国, 张继林, 刘玉琳, 陈旭. 2017. 广西大宁岩体和初洞岩体锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 53(4): 667-682.
- 郭令智, 卢华复, 施央申, 马瑞士, 孙岩, 舒良树, 贾东, 张庆龙, CHARVET J, FAURE M. 1996. 江南中、新元古代岛弧的运动学和动力学[J]. 高校地质学报, 2(1): 1-13.
- 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 2002. 试析杭州—诸广山—花山高 ϵ_{Nd} 值花岗岩带的地质意义[J]. 地质通报, 21(6): 348-354.
- 胡乔帆. 2022. 桂北地区早古生代韧性剪切带的成因探讨及构造意义[D]. 桂林: 桂林理工大学.
- 黄学猛, 张进江, 许志琴. 2016. 电子背散射衍射(EBSD)技术在地壳构造变形研究中的应用[J]. 地质学报, 90(6): 1130-1145.
- 简平, 程裕淇, 刘敦一. 2001. 变质锆石成因的岩相学研究——高级变质岩 U-Pb 年龄解释的基本依据[J]. 地学前缘, 8(3): 183-191.
- 李刚, 刘正宏, 刘俊来, 李永飞, 徐仲元, 董晓杰. 2012. 医巫闾山伸展型韧性剪切带的形成过程及年代学证据[J]. 中国科学: 地球科学, 42(6): 879-892.
- 李海兵, 曾令森, 许志琴. 1997. 剪切带中变斑晶的生长及包裹体痕迹的演化[J]. 地质科学, 32(2): 181-192.
- 李江海, 穆剑. 1999. 我国境内格林威尔期造山带的存在及其对中元古代末期超大陆再造的制约[J]. 地质科学, 34(3): 259-272.
- 李献华, 王选策, 李武显, 李正祥. 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷[J]. 地球化学, 37(4): 382-398.
- 李响, 王令占, 涂兵, 田洋, 谢国刚, 张键钰, 张宗言. 2021a. 广东连山地区禾洞高分异花岗岩的锆石 U-Pb 年代学及岩石成因[J]. 地球科学, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211108.1746.006.html>.
- 李响, 王令占, 涂兵, 田洋, 谢国刚, 张键钰, 张宗言. 2021b. 粤西北印支期太保岩体的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及岩石成因[J]. 地球科学, 46(4): 1199-1216.
- 李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 32(3): 161-174.
- 李长民, 邓晋福, 苏尚国, 李惠民, 刘新秒. 2010. 河北省东坪金矿钾质蚀变岩中的两期锆石年代学研究及意义[J]. 地球学报, 31(6): 843-852.
- 李长民, 李拓, 邓晋福, 苏尚国, 刘新秒. 2012. 冀西北后沟金矿田脆韧性剪切带年代学新证据: 来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的发现[J]. 大地构造与成矿学, 36(2): 157-167.
- 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 黄慧琼, 徐强. 1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘雷, 刘风雷, 蔡永丰. 2020. 桂东北大宁岩体黑云母矿物学特征及其对成岩作用的指示[J]. 矿产与地质, 34(2): 294-301.
- 鲁学悟, 冯佐海, 郭俊刚, 杨锋. 2008. 南岭西段永和—太保花岗岩体的地球化学特征及其大地构造环境[J]. 世界地质, 27(2): 156-163.
- 马天林, 王连庆, 孙立倩, 舒斌. 2003. 磁组构分析在韧性变形带研究中的应用[J]. 地球学报, 24(5): 449-452.
- 马筱. 2018. 黔东及其邻区早古生代构造变形机制及其演化过程[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 孟杰, 刘晓旻, 梁一鸿, 秦亚, 句高, 李本仙. 2017. 吉林省塔东群锆石 U-Pb 定年、微量元素研究及其地质意义[J]. 地球科学, 42(4): 502-510.
- 秦亚, 冯佐海, 黄靖哲, 白玉明, 吴杰, 张桂林, 万磊. 2021. 桂北地区三门韧性剪切带的厘定及其构造意义[J]. 地球科学, 46(11): 4017-4032.
- 秦亚, 杨珺茹, 冯佐海, 朱家明, 倪战旭, 黄永高, 吴杰, 周云, 刘奕志, 白玉明. 2022. 桂东鹰扬关地区罗家山辉长岩的矿物化学特征及其构造意义[J]. 地球科学, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42/1874.P.20220409.1053.002.html>.
- 覃小锋, 王宗起, 王涛, 熊彬, 冯佐海, 杨文, 朱安汉, 宋炯, 黄杰. 2015. 桂东鹰扬关群火山岩时代和构造环境的重新厘定: 对钦杭结合带西南段构造格局的制约[J]. 地球学报, 36(3): 283-292.
- 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035-1053.
- 舒良树, 陈祥云, 楼法生. 2020. 华南前侏罗纪构造[J]. 地质学报, 94(2): 333-360.
- 田洋, 王令占, 李响, 谢国刚, 涂斌, 张键钰, 曾波夫. 2015. 广西鹰扬关组变质熔结凝灰岩的发现及年代特征[J]. 华南地质与矿产, 31(1): 110-111.
- 王鸿祯, 杨巍然, 刘本培. 1986. 华南地区古大陆边缘构造史[M]. 武汉: 武汉地质学院出版社.
- 王令占, 田洋, 李响, 涂兵, 谭娟娟, 谢国刚, 张宗言, 张键钰. 2019a. 桂东地区鹰扬关构造混杂岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 41(6): 631-643.
- 王令占, 涂兵, 田洋, 李响, 谢国刚, 张键钰, 张宗言, 曾波夫, 钟志标. 2019b. 桂东鹰扬关地区 1: 5 万区域地质矿产调查成果与主要进展[J]. 华南地质与矿产, 35(3): 283-292.
- 王令占, 田洋, 李响, 谢国刚, 涂兵, 张宗言, 张键钰, 曾波夫. 2020. 桂东鹰扬关构造混杂岩物质组成及变形特征[J]. 大

地构造与成矿学, 44(3): 340-356.

王鹏鸣, 于津海, 孙涛, 凌洪飞, 陈培荣, 赵葵东, 陈卫峰, 刘潜. 2012. 湘东新元古代沉积岩的地球化学和碎屑锆石年代学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 28(12): 3841-3857.

王鹏鸣, 于津海, 孙涛, 时毓, 陈培荣, 赵葵东, 陈卫峰, 刘潜. 2013. 湘桂震旦-寒武纪沉积岩组成的变化——对华南构造演化的指示[J]. 中国科学: 地球科学, 43(11): 1893-1906.

王孝磊, 周金城, 陈昕, 张凤凤, 孙梓铭. 2017. 江南造山带的形成与演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 714-735.

向必伟, 王勇生, 朱光, 石永红. 2007. 晓天—磨子潭断裂的构造演化对大别高压—超高压岩石折返过程的指示[J]. 自然科学进展, 17(12): 1639-1650.

夏元, 陈家驹, 徐先兵. 2022. 华南鹰扬关构造带的大地构造属性与构造演化过程: 基于构造解析的认识[J]. 地质论评, 68(6): 2005-2020.

许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 嵇少丞, 李海兵, 陈方远. 2007. 西昆仑康西瓦韧性走滑剪切带的两类剪切指向、形成时限及其构造意义[J]. 地质通报, 26(10): 1252-1261.

许志琴, 蔡志慧, 张泽明, 李化启, 陈方远, 唐泽民. 2008. 喜马拉雅东构造结——南迦巴瓦构造及组构运动学[J]. 岩石学报, 24(7): 1463-1476.

许志琴, 王勤, 梁风华, 陈方远, 许翠萍. 2009. 电子背散射衍射(EBSD)技术在大陆动力学研究中的应用[J]. 岩石学报, 25(7): 1721-1736.

徐先兵, 梁承华, 陈家驹, 徐亚东. 2021. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景[J]. 地球科学, 46(4): 1133-1150.

薛云峰. 2021. 桂东北鹰扬关韧性剪切带构造变形特征及年代学分析[D]. 桂林: 桂林理工大学.

杨晓勇. 2005. 论韧性剪切带研究及其地质意义[J]. 地球科学进展, 20(7): 765-771.

殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 彭元桥. 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. 地球科学, 24(1): 1-12.

余钦范, 郑敏. 1992. 岩石磁组构分析及其在地学中的应用[M]. 北京: 地质出版社.

张国伟, 郭安林, 王岳军, 李三忠, 董云鹏, 刘少峰, 何登发, 程顺有, 鲁如魁, 姚安平. 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1553-1582.

张进江. 1999. 大型走滑带内同构造花岗岩的判别标志[J]. 地质科技情报, 18(4): 23-26.

张克信, 何卫红, 徐亚东, 宋博文, 骆满生. 2017. 中国沉积岩建造与沉积大地构造[M]. 北京: 地质出版社.

张雪锋. 2015. 桂北四堡韧性剪切带研究[D]. 北京: 中国地质大学.

赵军红, 王伟, 刘航. 2015. 扬子东南缘新元古代地质演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(2): 227-233.

周汉文, 李献华, 王汉荣, 李江, 李惠民. 2002. 广西鹰扬关群基性火山岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 48(S1): 22-25, 31.

朱光, 王勇生, 牛漫兰, 刘国生, 谢成龙. 2004. 郧庐断裂带的同造山运动[J]. 地学前缘, 11(3): 169-182.

朱金初, 张佩华, 谢才富, 张辉, 杨策. 2006. 南岭西段花山-姑婆山侵入岩带锆石 U-Pb 年龄格架及其地质意义[J]. 岩石学

报, 22(9): 2270-2278.

References:

CAI Zhi-hui, XU Zhi-qin, HE Bi-zhu, WANG Rui-rui. 2012. Age and tectonic evolution of ductile shear zones in the eastern Tianshan-Beishan orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(6): 1875-1895(in Chinese with English abstract).

CHEN Bo-lin, LI Zhong-jian, XIE Yan-xia. 1997. Analyses of the rock magnetic fabric, deformation and kinematics in the Qifengcha-Liulimiao area, Huairou County, Beijing[J]. Acta Geoscientia Sinica, 18(2): 134-141(in Chinese with English abstract).

CHEN Ling-yun, ZHANG Zhong-wei. 2003. Discussion on the boundary between Caledonian Yangtze Plate and South China Active Zone in Guangxi[J]. Land and Resources of South China, 12: 18-19, 25(in Chinese).

CHEN Mao-hong, LIANG Jin-cheng, ZHANG Gui-lin, LI Wen-jie, PAN Luo-zhong, LI Rong-sen. 2006. Lithofacies paleogeographic constraints of southwestern boundary between Yangtze and Cathaysian Plates in Caledonian[J]. Geological Journal of China Universities, 12(1): 111-122(in Chinese with English abstract).

CHENG Shun-bo, FU Jian-ming, XU De-ming, CHEN Xi-qing, MA Li-yan, WANG Xiao-di, PANG Ying-chun. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of Daning batholith in northeast Guangxi[J]. Geology in China, 36(6): 1278-1288(in Chinese with English abstract).

CHENG Yu-qi. 1994. Introduction to regional geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).

CUI Xiao-zhuang, JIANG Xin-sheng, DENG Qi, WANG Jian, ZHUO Jie-wen, REN Guang-ming, CAI Juan-juan, WU Hao, JIANG Zhuo-fei. 2016. Zircon U-Pb geochronological results of the Danzhou Group in northern Guangxi and their implications for the Neoproterozoic rifting stages in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 40(5): 1049-1063(in Chinese with English abstract).

GUO Li-guo, LIU Yu-ping, LI Chao-yang, XU Wei, YE Lin. 2009. SHRIMP zircon U-Pb geochronology and litho-geochemistry of Caledonian granites from the Laojunshan area, southeastern Yunnan province, China: Implications for the collision between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. Geochemical Journal, 43(2): 101-122.

GUO Li-shuang, LÜ Xin, WANG Zheng-hua, MAO Zuo-guo, ZHANG Ji-lin, LIU Yu-lin, CHEN Xu. 2017. Zircon geochronology and Hf isotopes of Daning and Chudong intrusions, Guangxi Province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 53(4): 667-682(in Chinese with English abstract).

GUO Ling-zhi, LU Hua-fu, SHI Yang-shen, MA Rui-shi, SUN Yan, SHU Liang-shu, JIA Dong, ZHANG Qing-long, CHARVET J, FAURE M. 1996. On the Meso-Neoproterozoic Jiangnan island arc: Its kinematics and dynamics[J]. Geological Journal

- of Universities, 2(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- HOSKIN P W O, IRELAND T R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator[J]. *Geology*, 28(7): 627-630.
- HOSKIN P W O. 2005. Trace element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637-648.
- HONG Da-wei, XIE Xi-lin, ZHANG Ji-sheng. 2002. Geological significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan high- ϵ_{Nd} granite belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 348-354(in Chinese with English abstract).
- HU Qiao-fan. 2022. Genesis and tectonic significance of early Paleozoic ductile shear zone in northern Guangxi[D]. Guilin: Guilin University of Technology(in Chinese with English abstract).
- HUANG Xue-meng, ZHANG Jin-jiang, XU Zhi-qin. 2016. The application of EBSD in the study of crustal structural deformation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(6): 1130-1145(in Chinese with English abstract).
- JIAN Ping, CHENG Yu-qi, LIU Dun-yi. 2001. Petrographical study of metamorphic zircon: Basic roles in interpretation of U-Pb age of high grade metamorphic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 183-191(in Chinese with English abstract).
- KURZ W, FRITZ H, TENCTER V, UNZOG W. 2002. Tectono-metamorphic evolution of the Koralm Complex (Eastern Alps): constraints from microstructures and textures of the 'Plattengneis' shear zone[J]. *Journal of Structural Geology*, 24(12): 1957-1970.
- LI Chang-min. 2009. A review on the minerageny and situ-microanalytical dating techniques of zircons[J]. *Geological Survey and Research*, 32(3): 161-174(in Chinese with English abstract).
- LI Chang-min, DENG Jin-fu, SU Shang-guo, LI Hui-min, LIU Xin-miao. 2010. Two stage zircon U-Pb ages of the potash altered rock in the Dongping gold deposit, Hebei Province, and their geological implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(6): 843-852(in Chinese with English abstract).
- LI Chang-min, LI Tuo, DENG Jin-fu, SU Shang-guo, LIU Xin-miao. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the brittle-ductile shear zones in Hougou gold orefield, northwestern Hebei Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(2): 157-167(in Chinese with English abstract).
- LI Gang, LIU Zheng-hong, LIU Jun-lai, LI Yong-fei, XU Zhong-yuan, DONG Xiao-jie. 2012. Formation and timing of the extensional ductile shear zone in Yiwulv mountain area, western Liaoning province, North China[J]. *Science China: Earth Science*, 42(6): 879-892(in Chinese).
- LI Hai-bing, ZENG Ling-sen, XU Zhi-qin. 1997. Porphyroblast growth and evolution of the inclusion trail in ductile shear zones[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 32(2): 181-192(in Chinese with English abstract).
- LI Jiang-hai, MU Jian. 1999. Tectonic constraints from Chinese cratonic blocks for the reconstruction of Rodinia[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 34(3): 259-272(in Chinese with English abstract).
- LI Xian-hua, WANG Xuan-ce, LI Wu-xian, LI Zheng-xiang. 2008. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting[J]. *Geochimica*, 37(4): 382-398(in Chinese with English abstract).
- LI Xiang, WANG Ling-zhan, TU Bing, TIAN Yang, XIE Guo-gang, ZHANG Jian-yu, ZHANG Zong-yan. 2021a. Zircon geochronology and petrogenesis of the Hedong highly fractionated I-type granite in the Lianshan, Guangdong Province[J]. *Earth Science*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211108.1746.006.html>(in Chinese with English abstract).
- LI Xiang, WANG Ling-zhan, TU Bing, TIAN Yang, XIE Guo-gang, ZHANG Jian-yu, ZHANG Zong-yan. 2021b. Zircon geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Taibao pluton in Northwest Guangdong Province[J]. *Earth Science*, 46(4): 1199-1216(in Chinese with English abstract).
- LISTER G S, PATERSON M S, HOBBS B E. 1978. The simulation of fabric development in plastic deformation and its application to quartzite: The model[J]. *Tectonophysics*, 45(2-3): 107-158.
- LIU Bao-jun, XU Xiao-song, PAN Xing-nan, HUANG Hui-qiong, XU Qiang. 1993. Evolution of sedimentary crust and metallogenesis of the ancient continent in southern China[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- LIU Lei, LIU Feng-lei, CAI Yong-feng. 2020. Mineral feature of biotite in Da'ning rock mass in Northeast Guangxi and its indication of diagenesis[J]. *Mineral Resources and Geology*, 34(2): 294-301(in Chinese with English abstract).
- LU Xue-wu, FENG Zuo-hai, GUO Jun-gang, YANG Feng. 2008. Geochemical characteristics of Yonghe—Taibao granitic pluton in western Nanling and its tectonic setting[J]. *Global Geology*, 27(2): 156-163(in Chinese with English abstract).
- MA Xiao. 2018. The Early Paleozoic structural deformation mechanism and evolution process in East Guizhou and its neighbor area[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- MA Tian-lin, WANG Lian-qing, SUN Li-qian, SHU Bin. 2003. Application of magnetic fabric analysis to the ductile deformation belt in the Tuwu copper deposit, East Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 24(5): 449-452(in Chinese with English abstract).
- MENG Jie, LIU Xiao-yang, LIANG Yi-hong, QIN Ya, JU Gao, LI Ben-xian. 2017. U-Pb dating and trace elements composition of Tadong Group from Jilin Province and their geological implications[J]. *Earth Science*, 42(4): 502-510(in Chinese with English abstract).
- OKUDAIRA T, TAKESHITA T, HARA I, ANDO J. 1995. A new estimate of the conditions for transition from basal $\langle a \rangle$ to

- prism [c] slip in naturally deformed quartz[J]. *Tectonophysics*, 250(1-3): 31-46.
- QI Liang, XU Ya-jun, CAWOOD P A, ZHANG Hang-chuan, ZHANG Zu-kun, DU Yuan-sheng. 2021. Implications for supercontinent reconstructions of mid-late Neoproterozoic volcanic-sedimentary rocks from the Cathaysia Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 354: 106056.
- QIN Ya, FENG Zuo-hai, HUANG Jing-zhe, BAI Yu-ming, WU Jie, ZHANG Gui-lin, WAN Lei. 2021. Discovery of Sanmen ductile shear zone in North Guangxi and its tectonic significance[J]. *Earth Science*, 46(11): 4017-4032(in Chinese with English abstract).
- QIN Ya, YANG Jun-ru, FENG Zuo-hai, ZHU Jia-ming, NI Zhan-xu, HUANG Yong-gao, WU Jie, ZHOU Yun, LIU Yi-zhi, BAI Yu-ming. 2022. Mineralogy and mineral chemistry of the Luojiashan gabbro in the Yingyangguan area of northeastern Guangxi and its tectonic significance[J]. *Earth Science*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42/1874.P.20220409.1053.002.html>(in Chinese with English abstract).
- QIN Xiao-feng, WANG Zong-qi, WANG Tao, XIONG Bin, FENG Zuo-hai, YANG Wen, ZHU An-han, SONG Jiong, HUANG Jie. 2015. The reconfirmation of age and tectonic setting of the volcanic rocks of Yingyangguan Group in the eastern Guangxi: Constraints on the structural pattern of the southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(3): 283-292(in Chinese with English abstract).
- REN Ji-shun, JIANG Chun-fa, ZHANG Zheng-kun, QIN De-yu. 1980. *Geotectonic evolution of China*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- RUBATTO D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism[J]. *Chemical Geology*, 184(1-2): 123-138.
- SHU Liang-shu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035-1053(in Chinese with English abstract).
- SHU Liang-shu, CHEN Xiang-yun, LOU Fa-sheng. 2020. Pre-Jurassic tectonics of the South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(2): 333-360(in Chinese with English abstract).
- STIPP M, STÜNITZ H, HEIBRONNER R, SCHMID S M. 2002. The eastern Tonale fault zone: a 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C[J]. *Journal of Structural Geology*, 24(12): 1861-1884.
- TAKESHITA T. 1996. Estimate of the physical conditions for deformation based on *c*-axis fabric transitions in naturally deformed quartzite[J]. *Journal-Geological Society of Japan*, 102(3): 211-222.
- TIAN Yang, WANG Ling-zhan, LI Xiang, XIE Guo-gang, TU Bing, ZHANG Jian-yu, ZENG Bo-fu. 2015. Discovery and chronological characteristics of metamorphic fusion tuff of Yingyangguan formation in Guangxi[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 31(1): 110-111(in Chinese).
- TIAN Yang, WANG Wei, WANG Ling-zhan, LI Xiang, XIE Guo-gang, HUANG Si-fang. 2020. Age and petrogenesis of the Yingyangguan volcanic rocks: Implications on constraining the boundary between Yangtze and Cathaysia blocks, South China[J]. *Lithos*, 376-377: 105775.
- WANG Hong-zhen, YANG Wei-ran, LIU Ben-pei. 1986. *Tectonic history of the ancient continental margins of South China*[M]. Wuhan: Wuhan Institute of Geology Press(in Chinese).
- WANG Ling-zhan, TIAN Yang, LI Xiang, TU Bing, TAN Juan-juan, XIE Guo-gang, ZHANG Zong-yan, ZHANG Jian-yu. 2019a. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Yingyangguan tectonic melange in the eastern Guangxi, China and its tectonic implications[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(6): 631-643(in Chinese with English abstract).
- WANG Ling-zhan, TU Bing, TIAN Yang, LI Xiang, XIE Guo-gang, ZHANG Jian-yu, ZHANG Zong-yan, ZENG Bo-fu, ZHONG Zhi-biao. 2019b. New progress in 1: 50 000 regional geological and mineral survey in Yingyangguan area, eastern Guangxi[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 35(3): 283-292(in Chinese with English abstract).
- WANG Ling-zhan, TIAN Yang, LI Xiang, XIE Guo-gang, TU Bing, ZHANG Zong-yan, ZHANG Jian-yu, ZENG Bo-fu. 2020. Composition and deformation of the Yingyangguan tectonic mélange in eastern Guangxi[J]. *Geotectonica et Metamorphica*, 44(3): 340-3356(in Chinese with English abstract).
- WANG Peng-ming, YU Jin-hai, SUN Tao, LING Hong-fei, CHEN Pei-rong, ZHAO Kui-dong, CHEN Wei-feng, LIU Qian. 2012. Geochemistry and detrital zircon geochronology of Neoproterozoic sedimentary rocks in eastern Hunan Province and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3841-3857(in Chinese with English abstract).
- WANG Peng-ming, YU Jin-hai, SUN Tao, SHI Yu, CHEN Pei-rong, ZHAO Kui-dong, CHEN Wei-feng, LIU Qian. 2013. Composition variations of the Sinian-Cambrian sedimentary rocks in Hunan and Guangxi provinces and their tectonic significance[J]. *Science China: Earth Sciences*, 43(11): 1893-1906(in Chinese).
- WANG Xiao-lei, ZHOU Jin-cheng, GRIFFIN W L, WANG Ru-cheng, QIU Jian-sheng, O'REILLY S Y, XU Xi-sheng, LIU Xiao-ming, ZHANG Gui-lin. 2007. Detrital zircon geochronology of precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *Precambrian Research*, 159(1-2): 117-131.
- WANG Xiao-lei, ZHOU Jin-cheng, CHEN Xin, ZHANG Feng-feng, SUN Zi-ming. 2017. Formation and evolution of the Jiangnan orogen[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5): 714-735(in Chinese with English abstract).
- WANG Xuan-ce, LI Zheng-xiang, LI Xian-hua, LI Qiu-li, ZHANG Qi-rui. 2011. Geochemical and Hf-Nd isotope data of Nanhua rift sedimentary and volcanoclastic rocks indicate a Neoproterozoic continental flood basalt provenance[J]. *Lithos*,

- 127(3-4): 427-440.
- WANG Yue-jun, FAN Wei-ming, GUO Feng, PENG TOU-ping, LI CHAO-wen. 2003. Geochemistry of Mesozoic mafic rocks adjacent to the Chenzhou-Linwu fault, South China: Implications for the lithospheric boundary between the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. *International Geology Review*, 45(3): 263-286.
- XIANG Bi-wei, WANG Yong-sheng, ZHU Guang, SHI Yong-hong. 2007. The tectonic evolution of Xiaotian-Mozitan fault indicates the exhumation process of Dabie high-pressure ultra-high pressure rocks[J]. *Progress in Natural Science*, 17(12): 1639-1650(in Chinese).
- XIA Yuan, CHEN Jia-ju, XU Xian-bing. 2022. Tectonic nature and evolution of the Yingyangguan tectonic belt, South China: Constrains from structural analysis[J]. *Geological Review*, 68(6): 2005-2020(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, QI Xue-xiang, YANG Jing-sui, JI Shao-cheng, LI Hai-bing, CHEN Fang-yuan. 2007. Senses and timings of two kinds of shear in the Kangxiwar strike-slip shear zone, West Kunlun, and their tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1252-1261(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, CAI Zhi-hui, ZHANG Ze-ming, LI Hua-qi, CHEN Fang-yuan, TANG Ze-min. 2008. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, Eastern Himalayan Syntaxis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1463-1476(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, WANG Qin, LIANG Feng-hua, CHEN Fang-yuan, XU Cui-ping. 2009. Electron backscatter diffraction (EBSD) technique and its application to study of continental dynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1721-1736(in Chinese with English abstract).
- XU Xian-bing, LIANG Cheng-hua, CHEN Jia-ju, XU Ya-dong. 2021. Fundamental geological features and metallogenic geological backgrounds of Nanling tectonic belt[J]. *Earth Science*, 46(4): 1133-1150(in Chinese with English abstract).
- XUE Yun-feng. 2021. Tectonic deformation characteristics and chronological analysis of Yingyangguan ductile shear zone in northeastern Guangxi[D]. Guilin: Guilin University of Technology(in Chinese with English abstract).
- YANG Xiao-yong. 2005. On the studies of ductile shear zones: Their geological significance[J]. *Advances in Earth Science*, 20(7): 765-771(in Chinese with English abstract).
- YANG Xue, WANG Yue-jun, ZHANG Yu-zhi, GAN Cheng-shi, QIAN Xin. 2022. Early Neoproterozoic (~840 Ma) assemblage in South China and the southern extension of the Jiangshan-Shaoxing zone: Records from the Zhoutan and Shenshan igneous rocks in central Jiangxi[J]. *Precambrian Research*, 371: 106573.
- YIN Hong-fu, WU Shun-bao, DU Yuan-sheng, PENG Yuan-qiao. 1999. South China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system[J]. *Earth Science*, 24(1): 1-12(in Chinese with English abstract).
- YU Qin-fan, ZHENG Min. 1992. Analysis of rock magnetic fabric and its application in geosciences[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHAO Jun-hong, ZHOU Mei-fu, YAN Dan-ping, ZHENG Jian-ping, LI Jian-wei. 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny[J]. *Geology*, 39(4): 299-302.
- ZHAO Jun-hong, WANG Wei, LIU Hang. 2015. Geological evolution of the southeastern Yangtze block during the Neoproterozoic[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(2): 227-233(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-wei, GUO An-lin, WANG Yue-jun, LI San-zhong, DONG Yun-peng, LIU Shao-feng, HE Deng-fa, CHENG Shun-you, LU Ru-kui, YAO An-ping. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 43(10): 1553-1582(in Chinese).
- ZHANG Jin-jiang. 1999. Indicators for syntectonic granites in large scale strike slip zone[J]. *Geological Science and Technology in Formation*, 18(4): 23-26(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Ke-xin, HE Wei-hong, XU Ya-dong, SONG Bo-wen, LUO Man-sheng. 2017. Sedimentary rock construction and sedimentary geotectonics in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Xue-feng. 2015. Research on the Sibao ductile shear zone, northern Guangxi[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Han-wen, LI Xian-hua, WANG Han-rong, LI Jiang, LI Hui-min. 2002. U-Pb zircon geochronology of basic volcanic rocks of the Yingyangguan group in Hezhou, Guangxi and its tectonic implications[J]. *Geological Review*, 48(S1): 22-25, 31(in Chinese with English abstract).
- ZHU Guang, WANG Yong-sheng, NIU Man-lan, LIU Guo-sheng, XIE Cheng-long. 2004. Synorogenic movement of the Tan-Lu fault zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 169-182(in Chinese with English abstract).
- ZHU Jin-chu, ZHANG Pei-hua, XIE Cai-fu, ZHANG Hui, YANG Ce. 2006. Zircon U-Pb age framework of Huashan-Guposhan intrusive belt, western part of Nanling Range, and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2270-2278(in Chinese with English abstract).