https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.353



桂北地区三门韧性剪切带的厘定及其构造意义

秦 亚1,冯佐海1,黄靖哲1,白玉明1,吴 杰1,张桂林1,万 磊2

1.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 541004
 2.湖南宏禹工程集团有限公司,湖南长沙 410011

摘 要:通过野外地质调查、室内显微组构分析和磁组构测量,在桂北三门地区厘定出一条大型韧性剪切带;并利用热液锆石U-Pb定年约束其变形时代.三门韧性剪切带发育密集的透入性片理、旋转碎斑系、拉伸线理、眼球构造、书斜构造、A型褶皱、波状消光、机械双晶、核幔构造和S-C组构等宏观和微观韧性变形特征.磁各向异性度(P值)显示其走向呈NNE向,倾向呈NWW向.运动学指向显示早期具有左旋逆冲剪切,晚期具有右旋正滑剪切的运动学性质.磁化率椭球体扁率(E值)显示岩石变形以压扁型应变为主,暗示运动学方向以左旋逆冲剪切为主.镁铁质糜棱岩的热液锆石U-Pb定年结果为441±2 Ma,代表三门韧性剪切带的变形时代.在磁组构、运动学和年代学研究的基础上,结合区域地质资料,认为该韧性剪切带是华南加里东期华夏陆块由SE向NW逆冲到扬子陆块受阻后反冲作用的产物.这一认识揭示了扬子陆块和华夏陆块碰撞拼合的方式和时代,为深化华南加里东构造运动的认识提供了新的资料. 关键词:磁组构;热液锆石;变形时代;韧性剪切带;桂北三门地区;构造地质.

中图分类号: P542 **文章编号:** 1000-2383(2021)11-4017-16 **收稿日期:** 2020-11-05

Discovery of Sanmen Ductile Shear Zone in North Guangxi and Its Tectonic Significances

Qin Ya¹, Feng Zuohai¹, Huang Jingzhe¹, Bai Yuming¹, Wu Jie¹, Zhang Guilin¹, Wan Lei²

1. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. Hunan Hongyu Engineering Group Co. Ltd., Changsha 410011, China

Abstract: Based on the field geological investigation, microstructural observation and magnetic fabric of tectonites, it recognized a large ductile shear zone in Sanmen area of North Guangxi, also defined the deformation age of Sanmen ductile shear zone by hydrothermal zircon U-Pb dating. The ductile shear zone has typical macroscopic and microstructural characteristics of mylonite series, such as penetrating schistosity, rotational porphyroclast systems, stretching lineation, eyeball structures, domino structures, A-type fold, wavy extinction, deformation twins, core and mantle textures and S-C fabric. Anisotropy of magnetic susceptibility (P values) shows Sanmen ductile shear zone trending in NNE and inclination of NWW. Kinematics orientation research shows that the Sanmen ductile shear zone has left-lateral thrust shear in the early stage and right-lateral normal slip shear in the late stage, magnetic susceptibility ellipsoid (E values) indicates that the rock deformation in Sanmen ductile shear zone is mainly flattened strain, suggesting that its kinematic direction is mainly left-lateral thrust shear. The hydrothermal zircon U-Pb dating result of mafic mylonite is 441 ± 2 Ma, which represents the deformation age of Sanmen ductile shear zone. Based on the

引用格式:秦亚,冯佐海,黄靖哲,等,2021.桂北地区三门韧性剪切带的厘定及其构造意义.地球科学,46(11):4017-4032.

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 42072259, 42162018); 广西自然科学基金项目(Nos. 2017GXNSFBA198166, 2018GXNS-FAA281248, 2019GXNSFDA245009).

作者简介:秦亚(1986-),男,副教授,博士,从事区域构造演化、花岗岩与构造环境的研究及相关教学工作.ORCID:0000-0002-8281-8732. E-mail:qinya2013017@glut.edu.cn

study of magnetic fabric, kinematics and tectonic chronology of Sanmen ductile shear zone, combined with regional geological data, it is considered that Sanmen ductile shear zone is the product of the recoil of the Caledonian Cathaysian block in South China from SE to NW to the Yangtze block. The discovery of the Sanmen ductile shear zone reveals the way and age of collision of Yangtze and Cathaysian blocks, and deepens the understanding of Caledonian tectonic evolution of the South China.

Key words: magnetic fabric; hydrothermal zircon; deformation age; ductile shear zone; Sanmen area of North Guangxi; tectonics.

0 引言

扬子陆块和华夏陆块的早古生代汇聚拼合造 就了现今统一的华南大陆(张国伟等,2013;舒良 树等,2020),该事件也是华南大陆早古生代构造 演化研究的热点(张桂林,2004;周继斌,2006;王 孝磊等,2017;贺强和郑永飞,2019;张少兵等, 2019).桂北地区位于华南大陆的西南部,处于扬 子陆块和华夏陆块结合部位的西段,发育一系列 近 NNE 向的韧性剪切带(广西壮族自治区地质 局,1985;张桂林,2004;汤世凯等,2014;张雪锋, 2015; 黄靖哲, 2018; 陈锋等, 2019; Li et al., 2020). 韧性剪切带是大陆变形过程中形成于地壳 较深层次的构造形迹,也是碰撞造山作用或陆内 变形的主要表现形式之一,常出现在活动板块或 地块的边界上及其附近(朱光等,2004).因此,对 韧性剪切带的研究是揭示其所在陆块汇聚过程和 地球动力学演变的重要途径(蔡志慧等,2012).

因所处特殊的构造部位,桂北地区长期以来都 是研究华南构造演化过程的重要窗口(葛文春等, 2001;张桂林,2004;周继斌,2006;王孝磊等, 2017).前人从沉积学(崔晓庄等,2016)、同位素年 代学和岩石地球化学(葛文春等,2001;高林志等, 2013; Wang et al., 2012a, 2012b) 等多个角度对桂 北地区新元古代地层和岩浆岩进行了深入研究,讨 论华南新元古代构造演化过程,并取得丰硕的研究 成果.然而对桂北地区广泛分布于新元古代地层 和岩浆岩中的韧性剪切带的研究则相对较弱,仅有 零星的报道(张桂林,2004;张雪锋,2015).作者在 桂北三门地区的野外地质调查中,发现地层中广 泛发育透入性片理、拉伸线理和A型褶皱,镁铁 质岩石中发育强烈的透入性片理和S-C组构,识 别出韧性剪切构造.在此基础上,本文对桂北地 区三门韧性剪切带的宏观构造特征、显微构造特 征、岩石磁组构特征和运动方式进行了研究,同 时利用热液锆石 U-Pb 年龄约束变形时代,并探 讨该韧性剪切带的成因及其反映的构造意义.

1 地质背景

扬子和华夏陆块新元古代的碰撞拼贴事件被称为四堡运动(或晋宁运动),碰撞拼贴带被称为 江南造山带.四堡运动的结果造就了统一的古华 南大陆(Zhao *et al.*, 2011;张国伟等, 2013;王孝磊 等, 2017).其后,随着全球Rodinia超大陆的解体, 统一的古华南大陆开始裂解(李献华等, 2012; 舒良树, 2012).加里东期陆内造山事件使得裂 解后的华南大陆再次汇聚拼合,形成现今统一 的构造格局(张国伟等, 2013;舒良树等, 2020).

研究区位于江南造山带西段的桂北地区(图 1),出露的最老地层是新元古代四堡群,其上不整 合覆盖具有裂谷充填性质的新元古代丹洲群(图 1).四堡群自下而上分为九小组、文通组和鱼西 组,而丹州群自下而上分为白竹组、合洞组和拱洞 组.丹洲群之上为南华纪冰期沉积,南华系自下 而上分为长安组、富禄组和黎家坡组(图1).南华 系之上为震旦系及下古生界,桂北地区下古生 界主体为寒武系,部分为奥陶系,缺失志留系 (图1).上古生界泥盆系出露广泛,与下古生界 呈角度不整合接触;泥盆系之上的石炭系、二叠 系在桂北地区分布局限(图1).中生界在桂北地 区分布较少,仅零星出露白垩系(图1).

桂北地区岩浆活动强烈,既有花岗质岩浆活动,也有镁铁质-超镁铁质岩浆活动(图1).花岗质 岩石主体侵位于新元古代早期地层,包括黑云母花 岗闪长岩和黑云母花岗岩,以摩天岭花岗岩和元宝 山花岗岩最为典型(李献华,1999;葛文春等,2000). 而镁铁质-超镁铁质岩石主体为桂北摩天岭、元宝 山一带四堡群中的基性-超基性岩,以及桂北龙胜、 三门一带丹洲群中的基性-超基性岩(葛文春等, 2001;Liu et al., 2021).前人研究表明,桂北地区镁 铁质-超镁铁质岩主要形成于860~820 Ma和800~ 750 Ma的新元古代(周继斌,2006; Wang et al.,



图 1 性北地区地顶间图
 Fig.1 Sketch map of North Guangxi
 ①摩天岭断裂;②四堡断裂;③元宝山断裂;④三江断裂;⑤三门断裂;⑥龙胜断裂)

2012a; Lin et al., 2016).

由于多期次构造运动的叠加影响,桂北地区 构造形迹复杂多样,褶皱、断裂构造均广泛发育 (图1).区域构造线总体呈 NNE向,前泥盆系及 一系列的断裂均呈 NNE向展布(图1).在摩天 岭、元宝山一带,四堡期褶皱以近 EW 向紧闭褶 皱为主,而丹洲期则以宽缓褶皱为主.在三门、龙 胜一带,自西向东依次分布有三门(或瓢里)背 斜、龙胜背斜和马海背斜,这些褶皱核部地层为 丹洲群,翼部地层为南华系、震旦系及寒武系.多 期次的断裂活动是桂北地区典型地质特征之一, 以 NNE向断裂为主,自西向东依次展布有①摩 天岭断裂,②四堡断裂,③元宝山断裂,④三江断 裂,⑤三门断裂和⑥龙胜断裂(图1).

2 宏观构造特征

三门断裂发育于桂北龙胜县三门-乐江一带, 向北延伸进入湘西,为区域性寿城-瓢里大断裂的 一部分.其由数条呈雁列式产出的次级断裂组成, 发育于三门背斜的轴部,其走向与褶皱轴向一致 (图1).主体分布于上元古界丹洲群、南华系、震旦 系和下古生界寒武系,以及新元古代镁铁质-超镁 铁质岩石中;上古生界泥盆系未卷入变形.三门断 裂具有一般韧性剪切带的宏观构造特征,发育有密 集的透入性片理、旋转碎斑系、拉伸线理、眼球状构 造、A型褶皱、宏观S-C组构等韧性变形产物.

2.1 片理

前泥盆系韧性变形特征主要表现为强烈的片理 化,新生片理强烈的构造置换,以致原始层理难以识 别.特别在强变形带中,片理细密并产生Z型褶曲(图 2a).变形带内同构造石英脉沿新生片理展布;先存石 英脉体多被剪切拉伸形成石香肠或不对称的眼球 体.不对称的石英眼球体多沿新生片理展布,但也 常与新生片理呈小角度相交,组成似S-C组构(图 2b).不对称石英眼球体运动学特征指示三门韧性剪 切带具有逆冲剪切性质(图 2b).新元古代镁铁质--超镁铁质岩石亦发生强烈的片理化(图 2c),主要表 现在岩体与围岩的接触部位.在龙胜上朗地区片 理化镁铁质岩中测得片理产状为 270°/31°.



Fig.2 Field macro-characteristics and kinematics discrimination marks of Sanmen ductile shear zone a.丹洲群板岩强烈片理化并产生Z型褶曲,指示逆冲剪切性质(剖面,龙胜瓢里);b.丹洲群片理化岩石中石英脉体的香肠构造,指示逆冲剪切 (剖面,龙胜三门);c.变辉绿岩中透入性片理(剖面,龙胜吊竹山);d.拉伸线理及阶步,显示走滑的特征(剖面,龙胜三门);e.硅化大理岩旋转椭 球体,指示逆冲剪切(剖面,龙胜三门);f.大理岩化灰岩中S-C组构,指示逆冲剪切(剖面,龙胜三门);g.变镁铁质糜棱岩中的眼球状构造,指示 左旋剪切(平面,龙胜上朗);h.硅化大理岩书斜构造,指示右旋剪切;同时其中的"σ"残斑,指示左旋剪切(平面,龙胜上朗);i.硅化大理岩旋转 碎斑,指示正滑剪切(剖面,龙胜上朗).

2.2 A型褶皱

A型褶皱是指褶皱轴与拉伸线理平行的褶皱,常 发育于强烈韧性剪切带中.三门韧性剪切带A型褶皱 发育,主要出露于瓢里镇孟化一带以及三门至花桥一 带的强变形地带.一般规模为数米,多为不甚紧密的 等厚褶皱.在孟化一带,卷入褶皱变形的岩石主要为 丹洲群合桐组千枚岩和板岩,地层变形强烈.

2.3 拉伸线理

野外地质调查发现,在A型褶皱发育地段,平 行褶皱轴向的拉伸线理非常发育,且产状稳定,密 集分布.此外,在镁铁质糜棱岩中,拉伸线理亦十 分发育,主要为方解石、绿泥石等矿物定向排列和 拉伸而成.在龙胜上朗镁铁质糜棱岩的面理(234° ∠36°)上测得拉伸线理向NW侧伏,侧伏角为27° (图 2d).拉伸线理的倾伏向与磁组构圈定的韧性 剪切带总体走向间存在明显的夹角,显示三门韧性 剪切带具有明显的走滑构造特征.

2.4 旋转碎斑系

在韧性剪切变形作用下,碎斑及其周缘较弱的 动态重结晶集合体或细碎粒发生旋转,并改变其形 状,形成不对称的楔形尾部的碎斑系.旋转碎斑系 在三门韧性剪切带中主要发育在新元古代镁铁质-超镁铁质岩石中,而沉积地层中主要表现为先存石 英脉体被剪切拉伸变形而形成的眼球状旋转碎斑. 镁铁质-超镁铁质岩中的旋转碎斑除方解石外,还 有大理岩、大理岩化灰岩、硅质岩和镁铁质-超镁铁 质岩石的碎斑,上述碎斑粒径大小不一,小者几厘 米,大者数米,其岩性、规模和形态特征表明其为镁 铁质-超镁铁质岩石侵位过程中捕获的围岩物质 (图 2e),这些被捕获的围岩物质在后期韧性剪切变 形过程中被剪切拉伸、旋转研磨,甚至发生动力 分异作用,形成旋转碎斑系(图 2e, 2f, 2g, 2h, 2i). 碎斑的长轴优选方位与新生面理呈小角度相 交,构成S-C组构.镁铁质-超镁铁质岩中的硅化 大理岩显示书斜构造,指示右旋剪切(图2h);同 时其上的"σ"残斑指示左旋剪切(图 2h).在"σ"残 斑的拖尾部位具有开裂,指示该残斑形成后又遭 受了右旋剪切,该特征暗示两期韧性变形,早期 为左旋剪切,后期为右旋剪切(图 2h).

旋转碎斑和 S-C 组构的运动学指向表明,三 门韧性剪切带既有左旋走滑逆冲剪切(图 2g, 2h),也具有右旋正滑性质(图 2h).即该韧性剪 切带可能至少存在两期次的构造活动.

2.5 宏观 S-C 组构

三门韧性剪切带宏观S-C组构十分发育,主要 表现如下方面:①先存石英脉体被剪切拉伸呈不对 称的眼球体,不对称眼球体与糜棱面理呈小角度相 交构成S-C组构(图2b);②镁铁质糜棱岩中,镁铁 质岩石残斑的长轴优选方向与糜棱面理构成S-C组 构(图2g);③镁铁质糜棱岩中,硅化大理岩残斑的 长轴优选方向与糜棱面理呈小角度相交构成S-C组 构(图2h);④镁铁质糜棱岩中,动力分异作用形成 方解石脉体,构成剪切面理Ss,与糜棱面理Sc构成 S-C组构.S-C组构的运动学指向显示三门韧性剪切 带既有逆冲剪切的特征,也具正滑剪切的性质.

2.6 糜棱岩

糜棱岩是识别韧性剪切带存在的最重要宏 观构造标志,多产出于韧性变形较强部位.三门 韧性剪切带多见镁铁质糜棱岩,区域浅变质岩系 的糜棱岩化作用则相对较弱.镁铁质糜棱岩主要 表现为绿泥石化的辉石发生塑性变形,与细粒化 的长石构成旋转残斑、S-C组构和书斜构造等.

综上所述,宏观构造特征的运动学指向标志, 包括S-C组构、旋转碎斑、拉伸线理等,指示三门韧 性剪切带早期具有左旋逆冲剪切的性质,后期具有 右旋正滑剪切的性质,显示多期构造变形的特征.

3 微观构造特征

三门韧性剪切带的韧性变形微观构造标志 十分发育且典型,主要包括旋转碎斑、波状消光、 变形带、机械双晶、核幔构造和显微 S-C 组构.

3.1 旋转碎斑

三门韧性剪切带的旋转碎斑在镁铁质糜棱岩 中最为发育.碎斑主要为钠长石、方解石、次为透 闪石和阳起石;基质主要为绿泥石、绿帘石,少量 纤维状的阳起石、透闪石、方解石和石英.钠长石 碎斑在破碎初期具有可拼性,进一步发展会发生 较大的位移和旋转,同时棱角由于旋转和压溶作 用而逐渐圆化,形成眼球状或透镜状(图 3a).眼球 状或透镜状碎斑边缘被绿泥石等片状基质矿物所 环绕,碎斑与基质呈小角度相交,构成显微 S-C组 构(图 3b),显示塑性变形的特征.同时,碎斑两侧 沿片理方向常见纤维状绿泥石、细粒石英和方解 石等构成的拖尾,此外还可见应力砂钟现象(图 3c).方解石碎斑因韧性剪切变形而呈定向排列的 粒状集合体,残斑的含量、粒径等也随变形强度的 增加而减少、变小.钠长石和方解石旋转碎斑指示 三门韧性剪切带具有左旋逆冲剪切性质.

3.2 波状消光

波状消光是由于矿物晶体位错而引起晶格 呈扇状或不规则状畸变而引起的消光现象.在 三门韧性剪切带中,石英普遍发育波状消光(图 3d).石英晶体被塑性拉伸变形,边部具有弱的 动态重结晶现象,消光影呈连续的消光变化.

3.3 机械双晶

机械双晶是指晶体在外力作用下,部分晶格沿 面网一定方向发生滑移但不破裂,从而形成"双晶" 的特征.在三门韧性剪切带中,方解石机械双晶发 育.方解石残斑被揉皱定向排列,晶体内部形成显 微破裂面,解理和消光位发生错动(图 3e,3f).

3.4 核幔构造

核幔构造是指相对较大的应变矿物颗粒 (核)被其周缘的细粒化亚颗粒或重结晶颗粒 (幔)所环绕的一种显微构造.在三门韧性剪切带 中,核部矿物多为眼球状的石英残斑,幔部矿物 为重结晶的石英小晶粒(图3f).

3.5 显微 S-C 组构

显微 S-C组构是韧性剪切带中常见的一种微观 变形构造.三门韧性剪切带显微 S-C组构十分发育, 主要表现为:①钠长石残斑的长轴优选方位(Ss 面理) 与定向排列的绿泥石基质(Sc 面理)构成 S-C组构(图 3b);②方解石残斑或其集合体的长轴优选方位(Ss 面 理)与定向排列的基质(Sc 面理)构成 S-C组构(图 3g, 3h);③镁铁质糜棱岩中,绿泥石塑性拉长变形,定向 排列构成 Sc 面理;长石碎斑的长轴优选方位构成 Ss 面理;Sc 面理和 Ss 面理呈小角度相交构成 S-C组构 (图 3i).显微 S-C 组构亦指示三门韧性剪切带既具 有左旋逆冲剪切的性质,又具有正滑剪切的性质.

综上所述,三门韧性剪切带既具有左旋逆冲剪 切,又具有正滑剪切的运动学性质.

此外,在三门韧性剪切带的石英构造片岩



图3 三门韧性剪切带显微构造变形特征

Fig.3 Microstructure deformation characteristics of Sanmen ductile shear zone

a. 镁铁质糜棱岩中钠长石残斑脆性破碎现象(龙胜三门)(+);b. 镁铁质糜棱岩 S-C 组构指示逆冲剪切(龙胜三门)(+);c. 镁铁质糜棱 岩中钠长石碎斑应力砂钟现象(龙胜三门)(+);d. 石英的塑性拉长及波状消光和变形带(龙胜三门)(+);e. 方解石的机械双晶(龙胜 上朗)(+);f. 方解石的机械双晶及石英的核幔构造(龙胜三门)(+);g. 方解石残斑与定向排列的基质构成显微 S-C 组构,指示正滑剪 切(龙胜瓢里)(+);h. 方解石集合体长轴优选方位与定向排列的基质组成 S-C 组构,指示左旋剪切(龙胜三门)(+);i. 镁铁质糜棱岩中 长石碎斑与塑性变形的绿泥石构成 S-C 组构,指示逆冲剪切(龙胜吊竹山)(+).Q. 石英; Cal. 方解石; Pl. 斜长石; Chl. 绿泥石; Sc. 糜棱 面理; Ss. 剪切面理. 其中 a, b, c引自张桂林(2004)

中,石英集合体残斑内的石英重结晶颗粒随残斑的旋转,重结晶颗粒大小、形状变的越来越不规则、颗粒边界呈缝合线式接触,石英重结晶型式属于SGR-GBM的过渡型式,推测其变形温度在480~520℃(Stipp *et al.*, 2002).

4 岩石磁组构特征

本次研究共实测 6条横切区域构造线方向的 磁组构剖面,分别为北部的乐江剖面(A-A'剖 面)、孟化剖面(B-B'剖面),中部的瓢里剖面(C-C'剖面)、三门-花桥剖面(D-D'剖面),南部的吊 竹山剖面(E-E'剖面)和上朗剖面(F-F'剖面).每 条剖面按一定的间隔距离进行磁组构连续采样, 共采集经 GPS 定位的磁组构定向样品 52件,其中 乐江剖面 5件,孟化剖面 6件,瓢里剖面 11件,三 门-花桥剖面 8件,吊竹山剖面 10件,上朗剖面 12 件(图 4).52件定向标本在实验室内切割为立方体 样品(2 cm×2 cm×2 cm),磁组构样品的分析测 试在桂林理工大学广西隐伏金属矿床勘查重点实 验室使用 MFK1-A/CS-4 型卡帕桥旋转型单频磁 化率仪完成.测量场为 300 A/m,工作频率为 875 Hz,环境温度为 20℃,灵敏度为 2×10⁻⁸ SI, 精度为 0.1%.磁组构分析测试结果见表 1.

研究表明,磁各向异性度P值是衡量岩石韧 性变形行为的重要量化指标,P<1.05暗示岩石未 发生韧性变形;1.10>P≥1.05表明岩石发生了弱 韧性变形;P≥1.10表明岩石发生了强韧性变形 (马天林等,2003;张雪锋,2015).根据研究区各个 剖面磁组构测量结果,将各个采样点的P值置于 平面图,由1.05<P圈出三门韧性剪切带的分布位 置(图4).并根据各个剖面P值大小绘制磁各向异 性度剖面曲线图(图4),由P≥1.10和1.10>P≥ 1.05 在剖面图中圈定出强、弱变形带的分布 (图4).结果显示,三门韧性剪切带总体呈NNE走 向,宽数百米到8km,区内延伸约40km,沿走向 向邻区继续延伸,具体延伸情况本次研究尚未控 制,有待进一步的研究.根据磁各向异性度P值圈 定的韧性变形带主要分布于丹洲群合桐组和拱洞 组、南华系及下古生界寒武系,以及新元古代镁铁 质-超镁铁质岩石.三门韧性剪切带强变形域集 中于剪切带中部,常与镁铁质-超镁铁质岩石伴 生.遗憾的是本次研究除A-A'剖面外,其余剖面 均未能较好地控制韧性剪切带的宽度(图4).

宏观构造面理与磁面理的夹角关系可以用来 判断运动方向,相对于宏观构造面理,磁面理位于 锐角顺时针方向,说明构造变形过程为左旋剪切, 反之为右旋剪切(陈柏林等,1997).三门韧性剪切带 的25组野外糜棱面理(Sc)(表2)赤平投影显示,其 总体走向呈 NNE向,倾向为 NWW,倾向优选方位 为 255°~340°, 倾角为 23°~85°, 极密点产状为 269° _ 59°(图 5a). 对磁各向异性度 P值大于 1.05 的 38 组磁面理数据进行赤平投影,显示三门韧性剪切 带总体走向呈 NNW向,倾向为 NWW,倾角为 33°~ 89°, 极密点产状为 277° _ 66°(图 5b), 与野外糜棱面 理(Sc)的产状基本一致,但绝大多数测量点上的磁 面理位于宏观糜棱岩面理(Sc)锐角顺时针方向, 表明该糜棱岩带构造变形过程为左旋剪切,这与 根据该韧性剪切带宏观 S-C 面理和不对称眼球状 构造判别所得的左旋剪切性质的结论相一致.

研究表明磁化率椭球体扁率E值能够反映岩石 的应变类型,E>1时,表现为压扁型应变;E=1时, 为平面应变;E<1时,则为拉长型应变.三门韧性剪 切带的38组磁各向异性度P值大于1.05的磁组构 数据中,30组数据的磁化率椭球体扁率E值大于1, 占比78.9%;8组数据的磁化率椭球体扁率E值小 于1,占比21.1%(图6).磁化率椭球体扁率E值表 明,三门韧性剪切带的应变类型以压扁型应变为主.

र्चेत स्ट	174 D D	V	V	K_{\min}	$K_{ m max}$		$K_{\rm int}$		$K_{ m min}$		T		D	
前囬	性鱼亏	$K_{\rm max}$	K _{int}		$D_{\rm g}$	$I_{\rm g}$	$D_{\rm g}$	$I_{\rm g}$	$D_{\rm g}$	$I_{\rm g}$	L	F	P	E
<i>A-A</i> '	17089	1.022	0.998	0.980	11.9	7.9	102.3	3.0	213.1	81.5	1.024	1.018	1.043	0.994
	17090	1.042	0.994	0.964	268.7	75.0	6.3	2.0	96.8	14.9	1.048	1.031	1.081	0.984
	17091	1.071	0.979	0.950	177.3	36.5	50.5	39.0	292.6	30.0	1.094	1.031	1.127	0.942
	17092	1.033	1.007	0.960	4.6	4.2	264.6	67.3	96.3	22.3	1.026	1.049	1.076	1.022
	17093	1.022	0.992	0.986	236.6	50.4	68.9	38.9	334.0	6.1	1.030	1.006	1.037	0.977
В-В'	17082	1.047	1.003	0.950	238.8	68.6	23.0	17.7	116.8	11.8	1.044	1.056	1.102	1.011
	17083	1.045	1.015	0.940	279.4	65.3	30.3	9.3	124.2	22.7	1.030	1.080	1.112	1.049
	17084	1.017	1.007	0.975	53.6	64.2	175.8	14.5	271.5	20.9	1.010	1.033	1.043	1.023
	17085	1.071	0.977	0.952	203.9	17.1	93.2	48.8	306.9	36.0	1.096	1.026	1.125	0.936
	17086	1.350	1.018	0.633	226.6	45.3	356.1	32.2	105.2	27.4	1.326	1.608	2.133	1.213
	17087	1.047	0.999	0.955	338.5	46.5	221.8	23.1	114.8	34.5	1.048	1.046	1.096	0.998
	17070	1.075	1.001	0.923	108.1	76.9	244.4	9.5	335.9	8.9	1.074	1.085	1.165	1.010
	17069	1.048	1.014	0.938	314.6	59.5	211.9	7.4	117.7	29.4	1.034	1.081	1.117	1.045
	17068	1.042	1.023	0.935	262.9	57.3	13.3	12.6	110.6	29.6	1.019	1.094	1.114	1.074
	17066	1.029	1.023	0.949	210.6	46.6	347.1	34.5	94.0	22.9	1.006	1.078	1.084	1.072
	17065	1.053	1.010	0.938	219.9	50.8	11.2	35.6	111.7	14.3	1.043	1.077	1.123	1.033
C- C '	17063	1.037	1.005	0.958	223.5	82.5	49.8	7.5	319.7	0.8	1.032	1.049	1.082	1.016
	18016-5	1.038	1.019	0.943	209.5	60.4	33.5	29.5	302.5	1.7	1.019	1.081	1.101	1.061
	18016-4	1.033	1.007	0.960	129.9	75.6	30.9	2.3	300.4	14.2	1.026	1.049	1.076	1.022
	18016-2	1.068	1.009	0.923	194.4	60.3	12.3	29.6	102.8	0.9	1.058	1.093	1.157	1.033
	18016-3	1.103	1.007	0.890	194.0	55.2	28.1	34.0	293.6	6.6	1.095	1.131	1.239	1.033
	18016-1	1.277	0.986	0.736	201.3	28.7	304.1	22.0	65.8	52.5	1.295	1.340	1.735	1.035
D.D.'	17072	1.347	1.086	0.567	286.0	58.3	188.4	4.7	95.6	31.3	1.240	1.915	2.376	1.544
D- D'	17081	1.046	1.026	0.927	213.7	78.8	11.3	10.3	102.0	4.2	1.019	1.107	1.128	1.086

表1 桂北三门地区岩石磁组构参数及参数计算结果

Table 1 Measurements and calculation of the rock magnetic fabric elements along Sanmen area of North Guangxi

徳主1

रंग नन	+¥ D D	$K_{\rm max}$	V	K_{\min}	K _{max}		K _{int}		K _{min}		T			
刣 囬	杆品号		$K_{\rm int}$		$D_{\rm g}$	Ig	$D_{\rm g}$	Ig	$D_{\rm g}$	Ig	L	F	P	E
	17080	1.035	1.010	0.955	203.2	68.2	2.4	20.5	95.0	7.1	1.025	1.058	1.084	1.032
	17079	1.091	0.991	0.918	185.1	34.9	313.3	41.6	72.6	28.8	1.101	1.080	1.188	0.981
	17078	1.042	1.002	0.956	217.8	52.8	21.2	36.1	117.1	8.0	1.040	1.048	1.090	1.008
	17077	1.039	0.996	0.965	219.9	28.9	328.5	29.9	95.1	46.0	1.043	1.032	1.077	0.989
	17076	1.022	1.004	0.974	78.5	16.1	347.2	4.6	241.7	73.2	1.018	1.031	1.049	1.013
	17074	1.021	1.007	0.973	11.6	33.6	204.7	55.7	105.7	6.1	1.014	1.035	1.049	1.021
	18014-10	1.011	0.999	0.989	197.1	62.4	0.5	26.6	93.9	6.8	1.012	1.010	1.022	0.998
	18014-8	1.014	0.996	0.990	287.7	35.5	38.3	26.2	155.8	43.1	1.018	1.006	1.024	0.988
	18014-7	1.025	0.996	0.978	270.5	65.1	60.2	21.8	154.8	11.4	1.029	1.018	1.048	0.989
	18014-9	1.093	0.994	0.913	39.8	67.8	277.7	12.2	183.7	18.2	1.100	1.089	1.197	0.990
P P '	18014-6	1.044	1.007	0.949	327.7	50.6	92.3	25.0	196.8	28.3	1.037	1.061	1.100	1.023
E-E	18014-1	1.029	1.000	0.971	227.8	53.2	77.9	32.9	338.2	14.6	1.029	1.030	1.060	1.001
	18014-5	1.025	0.993	0.982	7.3	65.1	273.4	1.8	182.6	24.8	1.032	1.011	1.044	0.980
	18014-4	1.015	1.000	0.985	37.2	75.0	162.2	8.7	254.1	12.1	1.015	1.015	1.030	1.000
	18014-3	1.016	1.004	0.980	355.0	57.4	86.5	0.9	177.1	32.6	1.012	1.024	1.037	1.012
	18014-2	1.025	0.996	0.978	214.4	63.9	35.8	26.1	305.5	0.5	1.029	1.018	1.048	0.989
	16139	1.039	1.002	0.959	324.6	42.2	204.1	29.2	92.1	33.8	1.037	1.045	1.083	1.008
	16140	1.052	1.003	0.944	309.9	44.5	197.3	21.3	89.6	37.8	1.049	1.063	1.114	1.013
	16141	1.129	0.957	0.914	124.1	31.3	350.8	48.5	230.1	24.3	1.180	1.047	1.235	0.887
	16146	1.072	1.020	0.908	334.8	47.2	176.6	40.7	76.9	11.0	1.051	1.123	1.181	1.069
	16142	1.045	1.001	0.954	334.8	47.1	183.1	39.2	81.0	14.5	1.044	1.049	1.095	1.005
EE'	16143	1.027	1.010	0.963	286.5	58.3	175.7	12.4	78.8	28.7	1.017	1.049	1.066	1.031
Γ-Γ	16144	1.019	1.005	0.976	290.3	58.8	157.0	22.5	58.1	20.4	1.014	1.030	1.044	1.016
	16145	1.035	1.022	0.943	324.9	43.5	201.8	30.0	90.9	31.8	1.013	1.084	1.098	1.070
	18015-1	1.030	1.000	0.970	190.2	3.0	282.1	32.4	95.4	57.4	1.030	1.031	1.062	1.001
	18015-2	1.038	1.004	0.959	187.7	12.3	307.3	66.2	93.1	20.0	1.034	1.047	1.082	1.013
	18015-3	1.036	1.002	0.962	213.3	23.2	320.6	34.7	96.8	46.1	1.034	1.042	1.077	1.008
	18015-4	1.026	0.996	0.978	208.2	35.7	342.0	44.0	98.7	24.9	1.030	1.018	1.049	0.988

注: K_{\max} 、 K_{int} 、 K_{\min} 分别是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10⁴SI;P(磁化率各向异性度)= K_{\max}/K_{\min} ;F(磁面 理)= K_{int}/K_{\min} ;L(磁线理)= K_{\max}/K_{int} ;E(磁化率椭球体扁率)=F/L; D_g 为磁偏角(°); I_g 为磁倾角(°).

5 变形时代

本文对采于三门韧性剪切带南段吊竹山镁铁 质糜棱岩中的锆石进行U-Pb定年,利用热液锆石U -Pb年龄来约束三门韧性剪切带的变形时代.采样 坐标为109°50′09″E,25°40′14″N.锆石的单矿物分 选、制靶、照相委托北京锆年领航科技有限公司完 成,而锆石的LA-ICP-MS年龄测试在桂林理工大 学广西隐伏金属矿床勘查重点实验室完成.共对样 品测试分析了17粒单颗粒锆石,其U-Pb年龄数据 见Qin et al.(2018),而稀土微量元素数据见表3.

锆石呈短柱状、长柱状及不规则状的形态特征,粒径大小为70~130 μm,长宽比为1:1~1:4(图7),锆石内部环带呈孔洞状、海绵状及无环带的特

征(图7),具有较暗的CL图像(图7)和较高的Th、 U含量,分别为3231.70×10⁻⁶~56152.90×10⁻⁶和 642.86×10⁻⁶~14075.10×10⁻⁶.

在锆石 U-Pb 年龄谐和图解中,17 粒单颗粒锆 石的 U-Pb 年龄均位于谐和线上及其附近(图 8a). 所测锆石中,14 粒锆石的 U-Pb 年龄相对集中, 其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加 权 平 均 年 龄 为 441.0±2.0 Ma (MSWD=0.45);另外 3粒锆石的 U-Pb 年龄分别为 539±4 Ma、540±4 Ma和 636±6 Ma.

17粒锆石具有较高的总稀土元素含量(ΣREE : 3 390.41×10⁻⁶~16 942.47×10⁻⁶)和相对较高的轻 稀 土 元 素 含 量 (LREE: 188.56×10⁻⁶~724.98× 10⁻⁶).总体呈左倾型的稀土配分模式图(图 8b),轻 稀 土 呈较平坦的配分曲线,微弱的铈异常(δ_{ce} :





Fig.4 Distribution and geological section of the Sanmen ductile shear zone

1. 泥盆系; 2. 寒武系; 3. 震旦系; 4. 南华系; 5. 丹洲群拱洞组; 6. 丹洲群合桐组; 7. 镁铁质-超镁铁质岩; 8. 弱韧性变形带; 9. 强韧性变形带; 10. 粉砂岩; 11. 砂岩; 12. 灰岩; 13. 大理岩; 14. 浅变质砂岩; 15. 千枚岩; 16. 板岩; 17. 镁铁质-超镁铁质岩石; 18. 断层; 19. 角度不整合界线; 20. 地质界线; 21. 韧性剪切变形带; 22. 剖面线方位; 23. 磁组构 P值; 24.1.10的 P值界线; 25.1.05的 P值界线; 26. 年龄样品采样位置; 27. 磁组构样品采样位置及编号; 28. 剖面位置; 29. 标注线; 30. 地名







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

0.90~1.37)和中等到弱的负铕异常(δ_{Eu} : 0.37~ 0.98).锆石具有较高的La含量(w(La): 11.83× 10⁻⁶~106.27×10⁻⁶),相对较低的Sm含量 (w(Sm): 32.05×10⁻⁶~90.68×10⁻⁶)和[w(Sm)/ w(La)]_N值(1.32~7.17),在w(La)-[w(Sm)/ w(La)]_N图解(图8c)和[w(Sm)/w(La)]_N- δ_{Ce} 图 解(图8d)中,17粒锆石均位于热液锆石区域.

过去几十年来的研究表明,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 金石英脉中均有利用热液锆石年龄来限定变形时 代或成矿时代的报道(Hoskin, 2005;李长民等, 2012).根据三门韧性剪切带中石英重结晶颗粒的特 征,推测其变形温度为480~520℃.此变形温度下, 加上热液流体的作用,具有形成热液锆石的良好条件.本文对三门韧性剪切带南段的吊竹山镁铁质糜 棱岩开展锆石U-Pb年代学研究,所测锆石的形态 和内部环带特征、明亮程度,以及稀土元素配分曲 线和微量元素特征值等均表明样品所测锆石具有 热液锆石的特征.因此所获得的热液锆石U-Pb年 龄应代表构造热事件的年龄,而非镁铁质糜棱岩的 成岩年龄(Qin et al., 2018).此外,三门韧性剪切带 主体展布于新元古界丹洲群、南华系、震旦系和早 古生界寒武系,而上古生界泥盆系未卷入变形,表 明韧性变形主体发生于泥盆纪之前.结合镁铁质糜 棱岩的锆石U-Pb定年结果,表明桂北三门韧性剪 切带的变形时代为~441 Ma的加里东期.

区域上,施实(1976)采用K-Ar法对摩天岭韧 性剪切带中花岗质糜棱岩的黑云母、长石开展定 年,获得377~411 Ma的变形年龄;张桂林(2004)、 汤世凯等(2014)和马筱(2018)等对摩天岭韧性剪 切带中新生白云母、绢云母和黑云母进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年,获得403~430 Ma的变形时代,进一步表明 摩天岭韧性剪切带的变形时代为加里东期.

张雪锋(2015)在桂北宝坛地区四堡期基性 岩中获得453±9 Ma的SHRIMP锆石U-Pb年龄, 将其解释为基性岩被糜棱岩化的时间,即四堡韧 性剪切带的变形时代.同时,张雪锋(2015)对四 堡韧性剪切带中的构造片岩开展伊利石 的⁴⁰Ar/³⁹Ar定年,获得390~420 Ma的坪年龄,也 表明四堡韧性剪切变形的时代为加里东期.

近年来,作者及其团队对元宝山、三江韧性

Table 2 Foliation occurrence of Sanmen ductile shear zone													
野	外实测糜棱 C 面 3	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(°)					
1	127	74	1	274	83	27	277	44					
2	274	60	2	336	47	28	279	65					
3	285	58	3	335	79	29	140	89					
4	313	44	4	4	71	30	274	67					
5	256	55	5	17	62	31	291	60					
6	297	85	6	158	75	32	298	61					
7	255	61	7	3	65	33	156	81					
8	292	50	8	74	78	34	276	59					
9	340	49	9	357	57	35	286	84					
10	264	59	10	126	89	36	62	17					
11	278	33	11	123	88	37	275	44					
12	274	61	12	120	76	38	297	82					
13	267	39	13	283	89	39	253	61					
14	267	77	14	114	83	40	275	83					
15	270	30	15	246	38	41	282	86					
16	274	61	16	292	76	42	297	78					
17	276	30	17	272	56	43	304	67					
18	265	54	18	270	52	44	91	69					
19	285	58	19	50	66	45	127	54					
20	313	44	20	257	79	46	285	63					
21	292	50	21	261	76	47	295	56					
22	264	59	22	259	61	48	33	8					
23	278	33	23	238	70	49	277	75					
24	276	47	24	271	58	50	113	60					
25	260	23	25	275	33	51	276	68					
			26	273	70	52	154	84					

表 2 三门韧性剪切带面理产状

表3 镁铁质糜棱岩锆石微量元素含量

Table 3 Trace element contents of zircon in mafic mylonite

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Но	Er	Τm	Yb	Lu	ΣREE	LREE å	$\delta_{\rm Eu} \delta_{\rm Ce}$	Sm _N /
1	01.01	40.00	7.20	71.99	49.01	10.47	02.00	25.00	516.49	107 10	650.70	105 01 1	1 000 00	000 00	2 200 41	004 75 0	50.0.00	La _N
1	21.31	49.33	7.30	/1.33	43.01	12.47	93.20	35.29	516.43	197.19	650.78	165.81	1 290.68	236.28	3 390.41	204.750	59 0.97	3.13
2	11.83	38.70	6.24	61.61	51.30	18.88	289.65	165.90	1 800.90	646.75	2 586.18	506.12	4 291.60	635.84	11 111.50	188.56 0	37 1.09	6.72
3	106.27	284.25	42.58	173.83	90.68	27.37	258.40	126.40	1 111.68	381.59	2 090.89	473.13	5 803.91	901.92	11 872.90	724.980	51 1.04	1.32
4	32.89	107.76	13.62	105.07	62.77	32.34	393.11	237.13	2 058.42	863.25	3 094.88	607.18	4 243.15	713.70	12 565.27	354.450	48 1.25	2.96
5	28.40	94.18	10.84	103.61	65.95	31.92	463.75	337.84	3 063.22	1094.74	4 660.95	735.83	5 390.51	860.73	16 942.47	334.90 0	41 1.32	3.60
6	12.81	51.49	8.47	67.31	59.27	16.28	152.96	49.14	577.99	237.57	1 589.61	380.05 4	4 085.38	750.00	8 038.33	215.630	50 1.17	7.17
7	21.75	55.69	9.69	81.56	40.73	14.71	134.92	42.99	493.79	219.10	1 595.55	393.794	4 071.47	706.63	7 882.37	224.130	55 0.94	2.90
8	25.71	58.34	9.45	68.00	43.40	14.20	123.37	37.82	369.06	126.54	954.51	245.62	3 435.17	507.69	6 018.88	219.100	55 0.92	2.61
9	21.44	47.73	7.47	74.90	35.80	12.96	141.09	45.03	504.27	199.03	1 436.06	348.55	3 774.66	674.07	7 323.06	200.30 0	49 0.92	2.59
10	17.48	52.26	8.63	67.16	32.05	19.97	234.52	73.54	515.00	158.89	967.76	217.82	2 310.45	423.95	5 099.48	197.550	51 1.04	2.84
11	33.38	80.24	13.12	40.44	37.79	23.11	311.64	89.31	951.84	308.48	1 482.27	298.30	2 811.07	448.54	6 929.53	228.080	45 0.94	1.75
12	20.35	41.55	6.19	71.16	43.26	15.70	183.90	42.48	433.97	161.83	535.53	133.54	1 481.69	311.61	3 482.76	198.210	46 0.90	3.29
13	33.34	99.93	17.12	87.03	59.73	44.32	428.92	247.68	2 826.47	945.87	3 796.55	636.25	4 938.85	661.62	14 823.68	341.47 0	62 1.02	2.78
14	54.20	167.93	22.93	124.66	49.14	33.90	178.02	76.91	608.96	234.27	1 564.52	381.64	4 049.94	732.41	8 279.43	452.76 0	98 1.17	1.40
15	20.77	49.05	7.35	66.27	42.76	24.74	203.60	67.29	480.11	238.67	1 070.49	269.35	2 901.66	523.61	5 965.72	210.94 0	67 0.97	3.19
16	27.27	56.87	8.47	82.12	42.02	22.42	206.50	68.52	482.02	230.76	1 034.77	285.59	3 473.41	679.99	6 700.73	239.17 0	60 0.91	2.39
17	22.45	79.56	9.05	62.81	61.24	27.64	322.85	175.07	1 925.57	637.42	2 596.69	464.07	3 994.08	562.54	10 941.04	262.750	48 1.37	4.23



图 7 锆石阴极发光图像 Fig.7 CL image of zircon 据 Qin et al.(2018)

剪切带开展新生云母类矿物的⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年以及热液锆石 U-Pb 定年,也获得400~440 Ma的

变形时代(作者待发表数据).

桂北地区一系列 NNE 向断裂具有相似的展 布方位、变形特征,同时,K-Ar、⁴⁰Ar/³⁹Ar 和热液 锆石 U-Pb 定年的结果相似,暗示其具有相似的 成因,为加里东期构造变形的产物.区域断裂的 变形时代与本文所测热液锆石的 U-Pb 年龄一 致,进一步表明~441 Ma 的热液锆石年龄应代 表三门韧性剪切带的变形时代.

6 成因探讨及构造意义

大型韧性剪切带是大陆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 主要表现方式之一,常是陆块碰撞拼贴带及地体增 生拼合的重要组成部分,多出现在活动板块或地块 的边界上及其附近(朱光等,2004).桂北地区分布一 系列近NNE向的韧性剪切带,且多是前人建议过的



图8 锆石U-Pb年龄谐和图解(a)、球粒陨石标准化稀土元素配分图(b)及锆石成因判别图解(c,d)

Fig.8 Zircon U-Pb age concordance diagram (a), chondrite-normalized REE partition diagram (b) and zircon genetic discrimination diagrams (c, d)

a.据Qin et al.(2018); c, d.据Hoskin(2005)

早古生代扬子和华夏两陆块的西南段边界断裂(程裕淇,1994;洪大卫等,2002;陈懋弘等,2006). 目前已有的年代学研究显示桂北地区NNE向韧性剪切带的变形时代集中在320~450 Ma(张桂林,2004;金宠,2010;汤世凯等,2014;张雪锋,2015;马筱,2018;张成龙等,2020).因此,对桂北地区韧性剪切带的识别和研究有助于揭示华南加里东期扬子和华夏陆块的汇聚过程和汇聚时限.

研究表明中晚奧陶世扬子和华夏陆块开始 汇聚,构造应力转变为挤压,并发生碰撞拼贴 事件(尹福光等,2001;张雪锋,2015).

热液锆石年龄显示三门韧性剪切带的变形 时间为~440 Ma,与区域上摩天岭韧性剪切带 和四堡韧性剪切带的变形时代一致(张雪锋, 2015;马筱,2018),进一步约束扬子和华夏陆块 的汇聚时限为~440 Ma的加里东期.

运动性质上,三门韧性剪切带总体表现为 左旋逆冲剪切的特征,表现为逆冲挤压的构造 背景.在应力状态上,磁化率椭球体扁率E值 表明三门韧性剪切带的应变类型以压扁型应 变为主,总体压应力方向为 NWW-SEE,与加 里东期近EW 向的挤压剪切作用相协调.

空间方位上,三门韧性剪切带总体走向为NNE 向,倾向为NWW向.与区域上摩天岭韧性剪切带、 元宝山韧性剪切带、三江韧性剪切带一致(郭阿龙, 2017),也与区域加里东期构造形迹的方向一致.

动力背景上,金宠(2010)在研究雪峰陆内构 造系统时认为扬子和华夏陆块的加里东期汇聚 作用造就了湘赣、雪峰-苗岭等地NE向加里东 期构造.来自SE侧的挤压力由于受到黔中隆起 的影响,在古老的靖县-溆浦断裂附近产生强大 的反向逆冲.向东的反冲作用在黔阳、溆浦一带 的前泥盆系地层中的褶皱轴面普遍东倒西倾中 也可以得到体现.本文所厘定的三门韧性剪切带 向西倾,其应形成于华夏陆块自南东向扬子陆块 挤压受阻后而产生反冲作用的构造背景下.

区域上,张雪锋(2015)研究认为桂北地区 四堡韧性剪切带呈 NE30°走向,倾向为 SE,指 示四堡韧性剪切带是华南加里东晚期华夏地 块由 SE 向 NW 作低角度斜冲到扬子地块的产 物.因此,桂北地区既有倾向 SE,又有倾向 NW 的韧性剪切带,他们共同构成了桂北地区 加里东期 NNE 向延伸的韧性剪切构造. 桂北地区一系列 SE 倾向的逆冲断层和 NW 倾向的反冲断层在变形时代、空间方位、 运动性质及动力背景上具有相似性,其形成均 与扬子和华夏陆块碰撞拼贴事件相关.三门韧 性剪切带的厘定及其变形时代的确定揭示了 扬子和华夏陆块碰撞拼合的方式和时限,为深 化华南大地构造演化提供了新的资料.

7 结论

(1)野外宏观地质特征、显微组构分析及磁组 构测量结果表明,桂北三门地区存在一条大型韧性 剪切带;总体走向呈NNE向,倾向呈NWW向.

(2)宏观构造、显微组构和磁组构研究表明 三门韧性剪切带的运动学性质既有左旋逆冲剪 切,也有正滑剪切的性质;而磁化率椭球体扁 率 E 值显示岩石以压扁型应变为主,暗示三门 韧性剪切带以左旋逆冲剪切为主.

(3)镁铁质糜棱岩的热液锆石 U-Pb 年龄表明三门韧性剪切带的变形时代为~440 Ma的晚奥陶世.

(4)三门韧性剪切带形成于华南加里东期 华夏陆块自南东向扬子陆块挤压受阻后而产 生反冲作用的构造背景下.

致谢:桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重 点实验室在磁组构测试和热液锆石U-Pb年龄测试 过程中提供了帮助,在此表示感谢!

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region, 1985. Regional Geological of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Geological Publishing House, Beijing, 1-853 (in Chinese).
- Cai, Z.H., Xu, Z.Q., He, B.Z., et al., 2012. Age and Tectonic Evolution of Ductile Shear Zones in the Eastern Tianshan-Beishan Orogenic Belt. Acta Petrologica Sinica, 28(6): 1875–1895 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B.L., Li, Z.J., Xie, Y.X., 1997. Analyses of the Rock Magnetic Fabric, Deformation and Kinematics in the Qifengcha-Liulimiao Area, Huairou County, Beijing. Acta Geoscientia Sinica, 18(2): 134-141 (in Chinese with English abstract).
- Chen, F., Yan, D.P., Qiu, L., et al., 2019. The Brittle-Ductile Shearing and Uranium Metallogenesis of the Motianling Dome in the Southwestern Jiangnan Orogenic

Belt. Acta Petrologica Sinica, 45(9): 3119-3160 (in Chinese with English abstract).

- Chen, M.H., Liang, J.C., Zhang, G.L., et al., 2006. Lithofacies Paleogeographic Constraints of Southwestern Boundary between Yangtze and Cathaysian Plates in Caledonian. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 111-122 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Y.Q., 1994. Regional Geology in China. Geological Publishing House, Beijing, 448-476 (in Chinese).
- Cui, X.Z., Jiang, X.S., Deng, Q., et al., 2016. Zircon U-Pb Geochronological Results of the Danzhou Group in Northern Guangxi and Their Implications for the Neoproterozoic Rifting Stages in South China. *Geotectoni*ca et Metallogenia, 40(5): 1049-1063 (in Chinese with English abstract).
- Gao, L.Z., Lu, J.P., Ding, X.Z., et al., 2013. Zircon U-Pb Dating of Neoproterozoic Tuff in South Guangxi and Its Implications for Stratigraphic Correlation. *Geology in China*, 40(5): 1443–1452 (in Chinese with English abstract).
- Ge, W.C., Li, X.H., Li, Z.X., et al., 2000. Geochemical Studies on Two Types of Neoproterozoic Peraluminous Granitoids in Northern Guangxi. *Geochimica*, 30(1): 24-34 (in Chinese with English abstract).
- Ge, W.C., Li, X.H., Li, Z.X., et al., 2001. Mafic Intrusions in Longsheng Area: Age and Its Geological Implications. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 112-118 (in Chinese with English abstract).
- Guo, A.L., 2017. Tectonic Characteristics and Rheological Parameter Estimation of Yuanbaoshan Ductile Shear Zone (Dissertation). Guilin University of Technology, Guilin (in Chinese with English abstract).
- He, Q., Zheng, Y. F., 2019. High-Temperature/Low-Pressure Metamorhism in a Continental Rift in the Northern Margin of the South China Block. *Earth Science*, 44(12): 4186-4194 (in Chinese with English abstract).
- Hong, D.W., Xie, X.L., Zhang, J.S., 2002. Geological Significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan Highε_{Nd} Granite Belt. *Geological Bulletin of China*, 21(6): 348-354 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin, P.W.Q., 2005. Trace Element Composition of Hydrothermal Zircon and the Alteration of Hadean Zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637-648.
- Huang, J.Z., 2018. Deformation Characteristics and Tectonic Significance of Sanmen Ductile Shear Zone in the Area of Northern Guangxi (Dissertation). Guilin University of Technology, Guilin (in Chinese with English abstract).
- Jin, C., 2010. Thrust and Decollement System of the Xue-

feng Intracontinental Tectonic System (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao (in Chinese with English abstract).

- Li, C.M., 2009. A Review on the Minerageny and Situ Microanalytical Dating Techniques of Zircons. *Geological Survey and Research*, 33(3): 161-174 (in Chinese with English abstract).
- Li, C.M., Li, T., Deng, J.F., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of the Brittle-Ductile Shear Zones in Hougou Gold Orefield, Northwestern Hebei Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(2): 157-167 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.S., Feng, Z.H., Qin, Y., et al., 2020. The Relationship between Ductile Shear Zone and Mineralization in the Jiufeng Sn Deposit, Northern Guangxi, South China: Evidence from Structural Analysis and Cassiterite U-Pb Dating. Ore Geology Reviews, 124: 1–13.
- Li, X.H., 1999. U-Pb Zircon Ages of Granites from Northern Guangxi and Their Tectonic Significance. *Geochimica*, 28(1): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Li, W.X., He, B., 2012. Building of the South China Block and Its Relevance to Assembly and Breakup of Rodinia Supercontinent: Observations, Interpretations and Tests. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(6): 543-559 (in Chinese with English abstract).
- Lin, M.S., Peng, S.B., Jiang, X.F., et al., 2016. Geochemistry, Petrogenesis and Tectonic Setting of Neoproterozoic Mafic-Ultramafic Rocks from the Western Jiangnan Orogen, South China. Gondwana Research, 35: 338-356.
- Liu, Y.Z., Qin, Y., Feng, Z.H., et al., 2021. New Geochronology and Geochemical Data of the Longsheng Mafic - Ultramafic Suite in Northern Guangxi, China, and Their Implications in Rodinia Breakup. Arabian Journal of Geosciences, 14(2): 1-18.
- Ma, T.L., Wang, L.Q., Sun, L.Q., et al., 2003. Application of Magnetic Fabric Analysis to the Ductile Deformation Belt in the Tuwu Copper Deposit, East Tianshan, Xinjiang. Acta Geoscientica Sinica, 24(5): 449-452 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X., 2018. The Early Paleozoic Structural Deformation Mechanism and Evolution Process in East Guizhou and Its Neighbor Area (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Feng, Z.H., Hu, R.G., et al., 2018. Timing of the Early Paleozoic Yangtze and Cathaysian Convergence: Constraint from U-Pb Geochronology of Hydrothermal Zircons from Mafic Mylonite within the Shoucheng -

Piaoli Ductile Shear Zone, Northern Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 2030-2031.

- Shi, S., 1976. A Discussion on the Isotopic Geochronology of the Motianling Massif. *Geochimica*, (4): 297-308 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., 2012. An Analysis of Principal Features of Tectonic Evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035-1053 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., Chen, X.Y., Lou, F.S., 2020. Pre-Jurassic Tectonics of the South China. Acta Geologica Sinica, 94(2): 333-360 (in Chinese with English abstract).
- Stipp, M., Stunitz, H., Heilbronner, R., 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.
- Tang, S.K., Ma, X., Yang, K.G., et al., 2014. Characteristics and Genesis of Two Tyeps of Tectonic Deformation during Caledonian in Eastern Guizhou and Northern Guangxi. *Geoscience*, 28(1): 109-118 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Zhou, M. F., Yan, D. P., 2012a. Depositonal Age, Provenance, and Tectonic Setting of the Neoproterozoic Sibao Group, South-Eastern Yangtze Block, South China. *Precambrian Research*, (192–195): 107–124.
- Wang, X.L., Shu, L.S., Xing, G.F., et al., 2012b. Post-Orogenic Extension in the Eastern Part of the Jiangnan Orogen: Evidence from ca. 800-760 Ma Volcanic Rocks. *Precambrian Research*, 222: 404-423.
- Wang, X.L., Zhou, J.C., Chen, X., et al., 2017. Formation and Evolution of the Jiangnan Orogen. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36(5): 714-735 (in Chinese with English abstract).
- Yin, F.G., Xu, X.S., Wan, F., et al., 2001. The Sedimentary Response to the Evolutionary Process of Caledonian Foreland Basin System in South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 22(5): 425-428 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.H., Zhou, M.F., Yan, D.P., et al., 2011. Reappraisal of the Ages of Neoproterozoic Strata in South China: No Connection with the Grenvillian Orogeny. *Ge*ology, 39: 299-302.
- Zhang, C.L., Qin, Y., Feng, Z.H., et al., 2020. Chronological Characterisitics and Significance of Diaozhushan Diabase in Longsheng, Northern Guangxi. *Journal of Guilin University of Technology*, 40(1): 1-14 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, G.L., 2004. Kinematics and Dynamics of Pre-Devonian Tectonic Evolution at South Margin of Yangtze Block in North Guangxi (Dissertation). Central South University, Changsha (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.W., Guo, A.L., Wang, Y.J., et al., 2013. Tectonics of South China Continent and Its Implications. *Science China: Earth Sciences*, 43(10): 1553-1582 (in Chinese).
- Zhang, S.B., Wu, P., Zheng, Y.F., 2019. Mafic Magmatic Records of Rodinia Amalgamation in the Northern Margin of the South China Block. *Earth Science*, 44(12): 4157-4166 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. F., 2015. Research on the Sibao Ductile Shear Zone, Northern Guangxi (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J.B., 2006. Age and Origin of Neoproterozoic Mafic Magmatism in Northern Guangxi-Western Hunan: In Response to the Break-up of Rodinia (Dissertation). Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Wang, Y.S., Niu, M.L., et al., 2004. Synorogenic Movement of the Tan-Lu Fault Zone. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 169-182 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 广西壮族自治区地质局,1985. 广西壮族自治区区域地质 志. 北京:地质出版社,1-853.
- 蔡志慧,许志琴,何碧竹,等,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.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-琉璃庙地 区岩石磁组构特征及其构造意义.地球学报,18(2): 134-141.
- 陈锋,颜丹平,邱亮,等,2019. 江南造山带西南段摩天岭穹
 隆脆韧性剪切与铀成矿作用. 岩石学报,45(9): 3119-3160.
- 陈懋弘,梁金城,张桂林,等,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. 高校地质学 报,12(1):111-122.
- 程裕祺,1994. 中国区域地质概论. 北京:地质出版社, 448-476.
- 崔晓庄,江新胜,邓奇,等,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. 大地 构造与成矿学,40(5):1049-1063.
- 高林志,陆济璞,丁孝忠,等,2013. 桂北地区新元古代地层 凝灰岩锆石U-Pb年龄及地质意义. 中国地质,40(5): 1443-1452.

- 葛文春,李献华,李正祥,等,2000. 桂北新元古代两类过铝 花岗岩的地球化学研究. 地球化学,30(1):24-34.
- 葛文春,李献华,李正祥,等,2001. 龙胜地区镁铁质侵入体: 年龄及其地质意义. 地质科学,36(1):112-118.
- 郭阿龙,2017. 桂北元宝山韧性剪切带构造特征及流变参数 估算(硕士学位论文). 桂林:桂林理工大学.
- 贺强,郑永飞,2019. 华南陆块北缘大陆裂断带高温低压变 质作用.地球科学,44(12):4186-4194.
- 洪大卫,谢锡林,张季生,2002. 试析杭州-诸广山-花山高 _{€_{Nd}}值花岗岩带的地质意义. 地质通报,21(6): 348-354.
- 黄靖哲,2018. 桂北三门韧性剪切带的特征及构造意义(硕 士学位论文). 桂林:桂林理工大学.
- 金宠,2010. 雪峰陆内构造系统逆冲推滑体系(博士学位论 文). 青岛:中国海洋大学.
- 李长民,2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质 调查与研究,33(3):161-174.
- 李长民,李拓,邓晋福,等,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. 大地构造与成矿学,36(2):157-167.
- 李献华,1999. 广西北部新元古代花岗岩锆石U-Pb年代学 及其构造意义. 地球化学,28(1):1-9.
- 李献华,李武显,何斌,2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超 大陆聚合-裂解——观察、解释与检验. 矿物岩石地球 化学通报,31(6):543-559.
- 马天林,王连庆,孙立倩,等,2003. 磁组构分析在韧性变形 带研究中的应用. 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(博士学位论文). 武汉:中国地质大学.
- 施实,1976. 前寒武摩天岭岩体同位素地质年龄讨论. 地球 化学,(4):297-308.

- 舒良树,2012. 华南构造演化的基本特征. 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. 地质学 报,94(2):333-360.
- 汤世凯,马筱,杨坤光,等,2014. 黔东桂北加里东期两类构 造变形特征与成因机制探讨.现代地质,28(1): 109-118.
- 王孝磊,周金城,陈昕,等,2017. 江南造山带的形成与演化. 矿物岩石地球化学通报,36(5):714-735.
- 尹福光,许效松,万方,等,2001. 华南地区加里东期前陆盆 地演化过程中的沉积响应. 地球学报,22(5): 425-428.
- 张成龙,秦亚,冯佐海,等,2020. 桂北龙胜吊竹山辉绿岩年 代学及其地质意义. 桂林理工大学学报,40(1): 1-14.
- 张桂林,2004. 扬子陆块南缘(桂北地区)前泥盆纪构 造演化的运动学和动力学研究(博士学位论文). 长沙:中南大学.
- 张国伟,郭安林,王岳军,等,2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学:地球科学,43(10):1553-1582.
- 张少兵,吴鹏,郑永飞,2019.罗迪尼亚超大陆聚合在华南陆 块北缘的镁铁质岩浆岩记录.地球科学,44(12): 4157-4166.
- 张雪锋,2015. 桂北四堡韧性剪切带研究(博士学位论文). 北京:中国地质大学.
- 周继彬,2006. 桂北-湘西新元古代镁铁质岩的形成时代和 成因——对 Rodinia 超大陆裂解的响应(博士学位论 文). 广州:中国科学院广州地球化学研究所.
- 朱光,王勇生,牛漫兰,等,2004. 郯庐断裂带的同造山运动. 地学前缘,11(3):169-182.