



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：云开地块西北缘十里韧性剪切带变形特征

及⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄

作者：郭尚宇，吴祥珂，赵兵，黎丹

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025052

投稿时间：2025-05-16

录用时间：2026-01-30

预出版时间：2026-07-22

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

云开地块西北缘十里韧性剪切带变形特征及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄

郭尚宇¹, 吴祥珂¹, 赵兵¹, 黎丹²

GUO Shangyu¹, WU Xiangke¹, ZHAO Bing¹, LI Dan²

1. 广西壮族自治区矿产资源储量评审中心, 广西 南宁 530028

2. 广西壮族自治区三一〇核地质大队, 广西 桂林 541000

1. The Mineral Resources and Reserves Evaluation Center of Guangxi, Nanning 530028 Guangxi, China

2. Nuclear Geologic Party No. 310 of Guangxi, Guilin 541000 Guangxi, China

Deformation characteristics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Shili ductile shear zone at the northwestern margin of the Yunkai Block

Abstract: [Objective] The Yunkai Massif of the South China Block, is one of the Precambrian metamorphic crystalline basements of the southern margin of the South China Block. To understand the Indosinian deformation characteristics in the Yunkai area, the Shili ductile shear zone at the northwestern margin of the Yunkai Massif was selected for this study. [Methods] The research included field investigation, finite strain measurement, kinematic vorticity analysis, and ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. [Results] The Shili ductile shear zone has a general WNW-ESE trend with NNE-directed thrusting. It has undergone four phases of deformation. Among which, the D2 to D4 deformations all indicate movement from SSW to NNE. D2 to D4 formed under a unified tectonic stress field, reflecting an evolution from ductile shear through brittle-ductile deformation to folding during the Late Triassic. Mylonites formed synchronously with the ductile shear deformation yield a muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age of 232 ± 2.3 Ma (MSWD = 3.65). The Flinn index (K) is 0.06~0.77, the Lode parameter (ν) is 0.13~0.89, the Effective strain (E_s) is 0.41~0.51, and the kinematic vorticity value (W_k) is 0.70~0.78. These parameters indicate a plane-strain, flattening-type strain dominated by general shear with comparable contributions of pure shear and simple shear. The dynamic recrystallization of minerals suggests that the deformation environment reached the upper greenschist facies. [Conclusion] This study indicates that the mylonitization, crenulation cleavage development, and folding within the Shili ductile shear zone were dynamically driven by the propagation of far-field stress resulting from the NE-SW collision between South China and Indochina. [Significance] This study provides important data for the study of the Indosinian tectono-thermal event and its dynamic background in South China.

Key words: South China Block; Yunkai Block; ductile shear zone; finite strain; kinematic vorticity; ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology

摘要: 云开地块属华南板块前寒武变质结晶基底之一, 为了解云开地区印支期构造变形特征, 选取位于云开地块西北缘的十里韧性剪切带, 通过野外调查、有限应变测量、运动学涡度分析及同位素年代学研究, 表明其为一总体呈北西西—南东东走向、北北东向逆冲性质的剪切带, 表现为韧性剪切变形、脆-韧性变形到褶皱变形的变形演化过程。韧性剪切变形同期形成的糜棱岩中, 白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 232 ± 2.3

基金项目: 深地国家科技重大专项 (2024ZD10017700); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160035)

This research is financially supported by National Science and Technology Major project on Deep-Earth (Grant No. 2024ZD10017700), and the China Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant No. DD20160035)

第一作者: 郭尚宇 (1990—), 男, 高级工程师, 从事基础地质矿产调查工作。Email: 513735922@qq.com

通讯作者: 吴祥珂 (1986—), 男, 正高级工程师, 从事矿产地质勘查工作。Email: 405950925@qq.com

Ma (MSWD=3.65), 付林指数 K 0.06~0.77, 罗德参数 ν 0.13~0.89, 变形强度 E_s 0.41~0.51, 运动学涡度值 W_k 0.70~0.78, 表明其为平面压扁型应变, 其受到纯剪切与简单剪切相当的一般剪切作用。研究表明十里韧性剪切带形成于印支陆块与华南陆块北东—南西向拼合碰撞的远程效应。

关键词: 华南板块; 云开地块; 韧性剪切带; 有限应变; 运动学涡度; ^{40}Ar - ^{39}Ar

中图分类号: P313; P542 **文献标识码:** A

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025052

0 引言

印支运动奠定了华南地区主要构造形迹与格架, 不同学者以不同角度对其进行研究, 并取得丰富成果, 提出了不同的动力学机制观点, 随着更多野外证据及高精度年代学数据的积累, 各类观点不断被否定、补充、更新 (Lin et al., 2008; Zhang and Cai, 2009; Lin et al., 2018; 王岳军等, 2022; 肖庆辉等, 2025)。Hsü et al. (1990) 基于中生代板溪群构造杂岩研究, 提出了扬子板块与华夏地块在中生代发生阿尔卑斯型陆陆碰撞; Li and Li (2007) 通过分析华南地区花岗岩类型和年龄, 认为自晚二叠世末期开始, 古太平洋板块长距离俯冲于华南陆块之下; 张国伟等 (2013) 通过以构造为主的多学科综合调研, 提出陆内不同地块的非均衡差异性主导华南陆内构造; 王岳军等 (2022) 通过综合研究华南地区野外构造解析及热年代学等成果, 认为是多板块围限下的陆内远程效应。鉴于华南中生代构造演化的复杂性, 需要更多资料予以证实。

云开地块地处广西南部与广东西部的交界地区, 位于华南板块南缘, 长期以来被认为是华南板块前寒武变质结晶基底之一, 是华南地区印支运动的研究焦点, 其边界受岑溪—博白断裂带、吴川—四会韧性剪切带、罗定—广宁断裂带所限定 (王岳军等, 2022)。Wang et al. (2007) 通过系统的几何学、运动学、年代学研究, 表明云开地区印支期变形主要分为中三叠世 (~248~220 Ma) 右旋斜向逆冲和晚三叠世 (~220~200 Ma) 左旋走滑, 其中三叠世变形在区域上由雪峰山、云开大山、武夷山等构造带组成大型正花状构造。Wang et al. (2021) 进一步讨论了这两期变形, 认为其形成于华南陆块向华北陆块深俯冲过程中, 由于受古太平洋板块阻挡而侧向挤出导致古特提斯洋顺时针剪刀式闭合。岑溪—博白断裂带是云开地块北西侧边界断裂, 长度超 330 km, 宽 5~25 km, 总体呈北西倾向, 具有分支多, 活动期次多的特征 (广西壮族自治区区域地质调查研究院, 2022)。Wang et al. (2007) 在博白、容县等地获得的博白—岑溪断裂带花岗质糜棱岩、糜棱岩中的黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为 219 Ma 和 211 Ma, 其变形特征指示左行走滑运动特征。郭尚宇等 (2020) 在藤县三堡获得的韧性剪切带中绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 232 Ma, 具右行走滑—逆冲性质, 除此之外鲜有其他研究数据被报道。

十里韧性剪切带夹持于北东向三堡韧性剪切带与县容断层之间, 是岑溪—博白断裂带于印支运动早期形成的一条北西西—南东东走向韧性剪切带, 其受后期脆性变形叠加较弱, 完整保留了云开地块印支运动早期韧性变形证据。文章通过野外调查、有限应变测量、运动学涡度分析及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究, 定量查明了该韧性剪切带特征, 揭示了云开地块在印支期造山运动中, 由韧性剪切变形、脆—韧性变形到褶皱变形的递进变形过程, 结合区域地质资料, 表明其形成于自晚三叠世以来, 印支板块与华南板块陆内碰撞挤压环境, 此次研究是对云开地块构造变形研究的重要补充, 为揭示印支造山期构造变形作用与过程提供了新证据。

1 地质概况

云开地区是华夏地块重要组成部分, 紧邻扬子地块东南缘 (图 1a), 出露最古老的地层为变质程度较深的高州岩群/天堂山岩群, 浅变质的云开岩群被认为年龄稍晚, 一同被当作前寒武变质结晶基底, 时代归属为古元古代、中—新元古代。随着古生代华南海盆持续收缩, 奥陶纪、志留纪陆续沉积一套浅海陆棚相陆源碎屑复理石建造, 加里东运动结束后, 沿云开地块北缘的北东向残余海盆陆续沉积滨岸—浅海陆源碎屑类复理石、

复理石沉积，以及台盆硅质岩、泥质岩沉积。晚二叠世—晚三叠世，印支运动强烈挤压造山作用导致云开地区海相沉积历史结束，发育博白—岑溪断裂带、吴川—四会韧性剪切带、罗定—广宁断裂带等一系列北东东—北东走向逆冲断裂、推覆构造，大量同碰撞—后碰撞由地壳加厚深熔而成的堇青石花岗岩沿云开地块周缘侵入，至中晚侏罗世，钾玄岩—高钾钙碱性花岗岩岩北东向构造线断续侵入，陆内拉分、断陷盆地发育（广西壮族自治区区域地质调查研究院，2022）。随着高精度测年方法的应用，一度被认为属古老变质结晶基底的高州岩群/天堂山岩群和浅变质的云开岩群的原岩物质被认为具有相似的年龄组成特征，其形成时代被归属为新元古代—早古生代，并在早古生代和早中生代遭受了强烈的构造—岩浆作用，发生了强烈的角闪岩相—麻粒岩相变质作用和中深层次韧性变形（Wang et al., 2007; 周岱等，2017）。

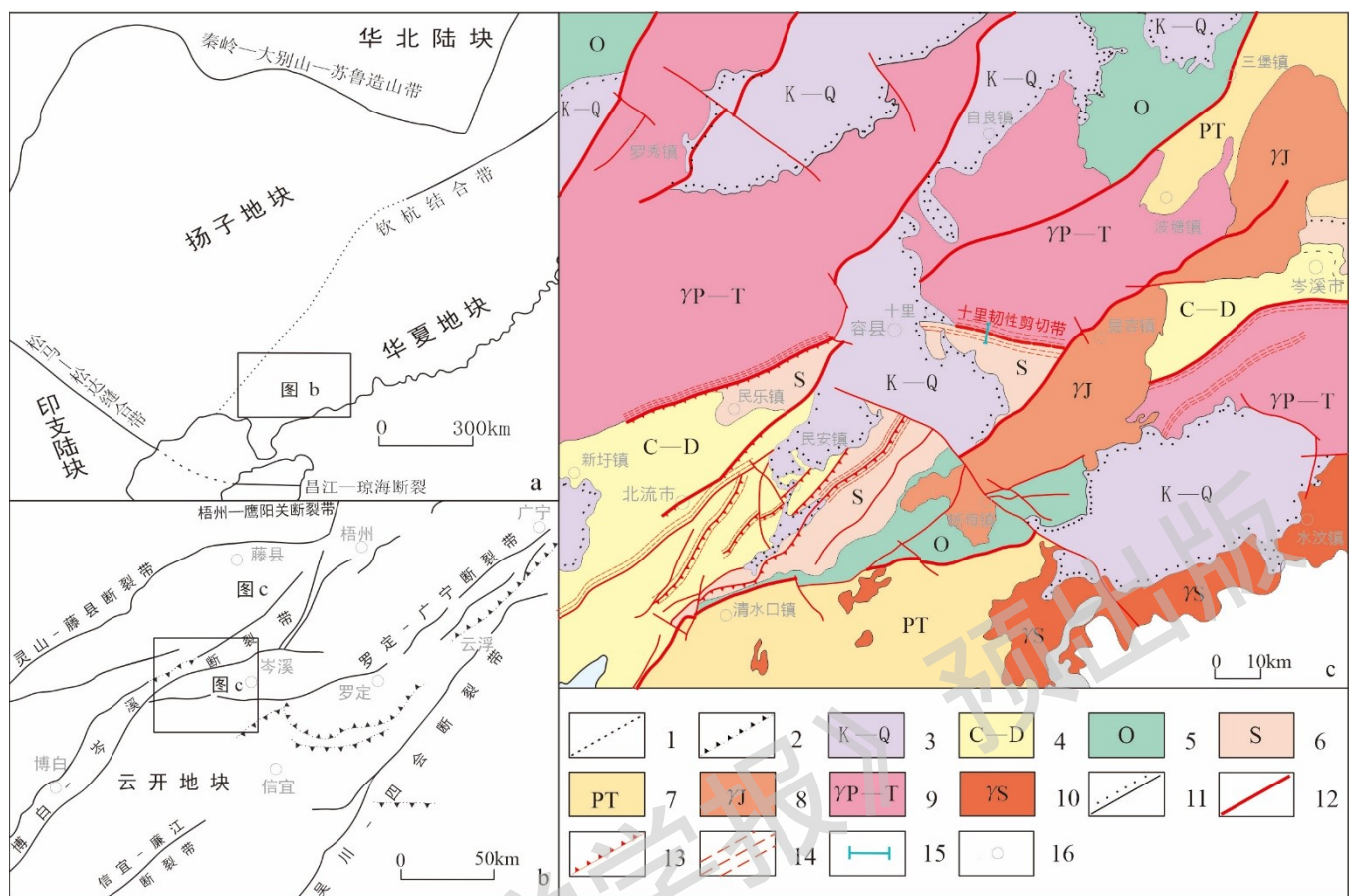
博白—岑溪断裂带属云开地块北西侧边界断裂（图 1b），起于北部湾，经合浦、博白、岑溪，延伸至广东省，全长大于 330 km，宽 5~25 km，由不同时期、不同规模、不同性质的多组断裂组成，其走向总体呈 65°方向延伸，次级断层以北东—南西走向为主，其次为北东东—南西走向。断层切割元古界、古生界及中生界、新生界、四堡—加里东期岩体、海西—印支期岩体及燕山期岩体，动力变质作用发育（广西壮族自治区区域地质调查研究院，2022）。此外，区域其他主干断裂带如灵山—藤县断裂带、吴川—四会断裂带在印支期均表现为强烈的左行压扭性变形（广西壮族自治区区域地质志，2022；张献河等，2024）。

2 剪切带及其变形特征

2.1 剪切带基本特征

十里韧性剪切带位于博白—岑溪断裂带中段容县县城东侧，走向约 102°，出露长度约 14 km，宽度 1~4 km，为志留系合浦组与早三叠世岩体接触界线，东端终止于县容断层，西端被白垩纪—古近纪地层掩盖（图 1c）。碎屑岩及花岗岩发育不同的韧性变形特征，碎屑岩（合浦组）中由岩体接触边界往剪切带外侧，依次分布云英质糜棱岩—糜棱片岩—千糜岩，分带性不明显，顺层褶皱发育，线理以皱纹线理为主，少见矿物拉伸线理；花岗岩中面理发育较弱，矿物拉伸线理发育，主要为花岗质初糜棱岩与花岗质糜棱岩相间分布，偶见宽约 10 cm 左右的花岗质超糜棱岩，其原岩可能为含长石较少的细晶岩脉，夹透镜状、脉状的花岗质脉及碎屑岩，剪切带北侧见花岗质变晶糜棱岩、糜棱岩化花岗岩（图 2）。剪切带中剪切面理与各岩性界面产状协调一致，原岩性界线已被剪切面理置换。

韧性剪切活动伴随有岩浆—热液活动，剪切带中见顺层产出的花岗质脉，石英及白云母半定向排列，但长石呈半自形板状—它形粒状，为剪切后期热液充填脉体。韧性剪切活动结束后仍有热液活动，合浦组地层剪切带中常见有黑色自形柱状电气石，剪切带北部出露的花岗质变晶糜棱岩中石英具静态重结晶特征，长石碎斑经热液蚀变为白云母、石英等矿物集合体，表明韧性剪切活动结束后，剪切带局部遭受了热重置。



1—推测界线；2—逆冲推覆带；3—白垩系—第四系；4—石炭系—泥盆系；5—奥陶系；6—志留系；7—元古界；8—燕山期花岗岩；9—印支期花岗岩；10—加里东期花岗岩；11—不整合界线；12—断层(裂)；13—逆冲推覆断层；14—韧性剪切带；15—剖面位置；16—城镇位置

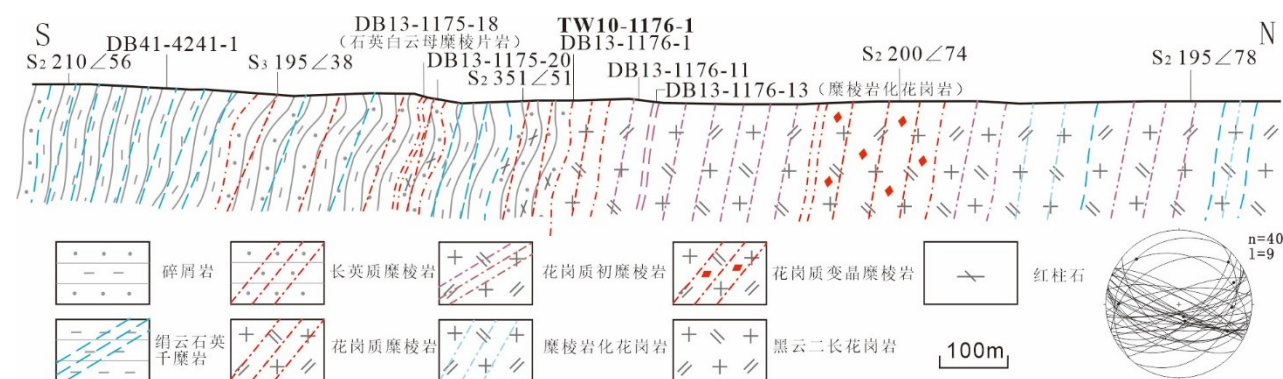
a—华南大地构造简图；b—云开地区大地构造简图；c—容县区域地质简图

图 1 十里韧性剪切带大地构造位置及地质简图

Fig. 1 Tectonic site and geological sketch map of the Shili ductile shear zone

(a) Simplified tectonic map of South China; (b) Simplified tectonic map of the Yunkai area; (c) Simplified regional geological map of Rongxian County

1—Inferred boundary; 2—Thrust nappe belt; 3—Cretaceous–Quaternary; 4—Carboniferous–Devonian; 5—Ordovician; 6—Silurian; 7—Proterozoic; 8—Yanshanian granite; 9—Indosinian granite; 10—Caledonian granite; 11—Unconformity; 12—Fault; 13—Thrust fault; 14—Ductile shear zone; 15—Location of cross section; 16—Town



S_2 —D2 期变形剪切面理; S_3 —D3 期变形剪切面理; n —面理数量; l —线理数量; DF/TW—样品编号

图 2 十里韧性剪切带实测剖面图

Fig. 2 Cross section of the Shili ductile shear zone

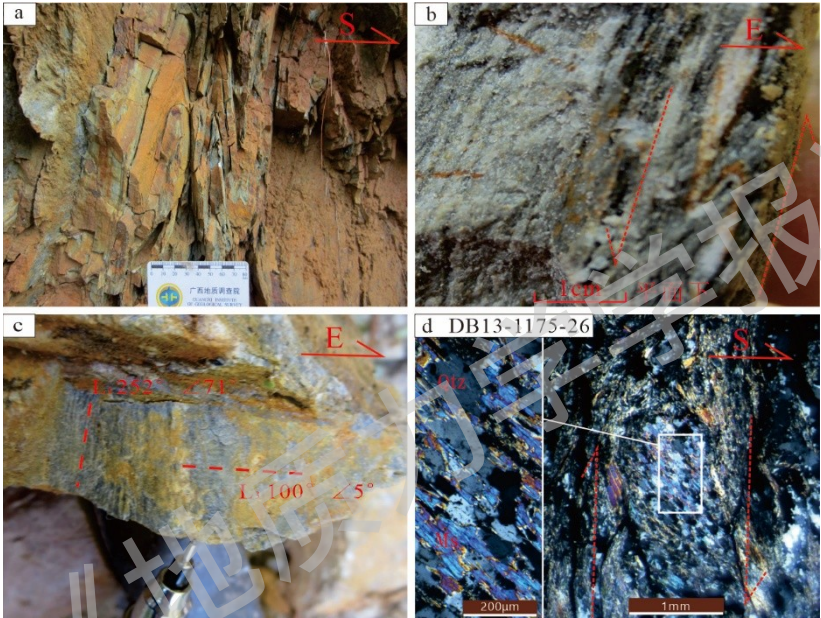
S_2 —Shear foliation of D2 deformation; S_3 —Shear foliation of D3 deformation; n —Number of foliations; l —Number of lineations

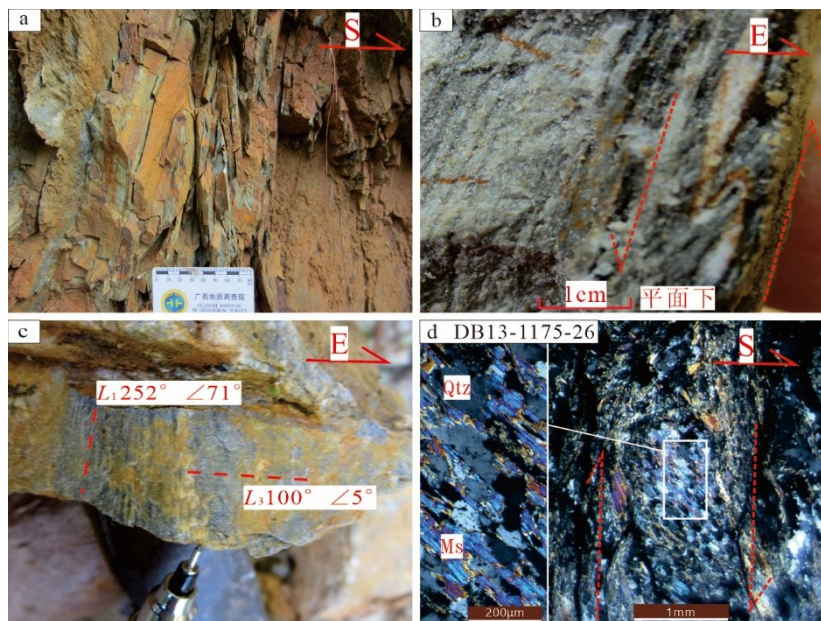
1.2 剪切带变形特征

剪切带变形主要分为 4 期，D1 期以强烈褶皱变形为主，D2 期为韧性剪切变形，强烈改造 D1 期变形形成 S-C 面理、糜棱岩，D3 期为脆-韧性变形，将 D2 期变形形成的糜棱面理改造为密集不对称膝状褶皱，D4 期为中小尺度褶皱变形，各变形期变形特征如下：

2.2.1 D1 期变形特征

D1 期变形由于受后期变形改造，露头上仅在剪切带边部的合浦组碎屑岩中可见，多表现为尖棱褶皱（图 3a）、不对称褶皱石英脉（图 3b）及褶劈理，在剪切带南侧的绢云石英千糜岩中发育两组近垂直相交的皱纹线理（图 3c），其中近直立的一组皱纹线理（B 型线理）为 D1 期变形形成（ L_1 ），产状 $252^\circ \angle 71^\circ$ （倾伏向/倾伏角），结合不对称褶皱石英脉，指示右行走滑运动性质。在镜下，剪切带中段云英质糜棱岩薄片可见旋转碎斑保存有 D1 期变形形成的糜棱面理（图 3d），上述残存的变形信息及变形特征均表明 D1 期变形的存在。





L_1 —D1 期线理； L_3 —D3 期线理；Qtz—石英；Ms—白云母

a—D1 期变形形成的的尖棱褶皱；b—D1 期变形形成的石英脉呈不对称褶皱，指示右行走滑剪切；c—多期皱纹线理；d—保留 D1 期糜棱面理的旋转碎斑

图 3 十里韧性剪切带中残存的 D1 期变形信息及特征

Fig. 3 Relic information and features of D1 deformation in the Shili ductile shear zone

(a) D1 chevron folds; (b) D1 asymmetric folds, indicating dextral strike-slip shear; (c) Polyphase crenulation lineation; (d) Rotated porphyroclasts preserving D1 mylonitic foliation

L_1 —D1 lineation; L_3 —D3 lineation; Qtz—Quartz; Ms—Muscovite

2.2.2 D2 期变形特征

(1) 宏观变形特征

D2 期变形为韧性变形，剪切带岩性有白云母长英质糜棱岩（图 4a）、千糜岩、糜棱片岩、糜棱岩化花岗岩、花岗质初糜棱岩（图 4b）、花岗质糜棱岩（图 4c）、花岗质超糜棱岩、花岗质变晶糜棱岩。糜棱面理总体产状 $170^\circ\sim 210^\circ/\angle 50^\circ\sim 85^\circ$ ，矿物拉伸线理产状 $0^\circ\sim 30^\circ/\angle 50^\circ\sim 80^\circ$ （倾伏向/倾伏角），局部受后期变形叠加，使 D2 期糜棱面理发生重褶。依据花岗质糜棱岩中长石、石英的旋转碎斑、不对称拖尾及石英 S 形透镜状排列等变形现象综合判定 D2 韧性剪切变形机制为总体呈北北东极性的逆冲。发育在花岗岩和碎屑岩中的韧性剪切带，因二者岩性的不同表现出不同的变形特征。

碎屑岩中 S 面理不发育，C 面理主要由片状绢云母、白云母及透镜状石英、长石定向排列构成，仅局部见有细小石英脉中保留有 S 面理，C 面理一般在千糜岩及糜棱片岩中发育更密集，微劈石 1~2 mm，云英质糜棱岩中较稀疏，微劈石 2~4 mm，C 面理主要呈北北东倾向。

花岗岩中 S-C 组构发育，C 面理多由白云母、黑云母定向排列组成，花岗质变晶糜棱岩中密集细小的石英条带组成 C 面理，S 面理多为拉长的石英及长石、电气石旋转碎斑系组成。花岗岩韧性剪切带中常发育矿物拉伸线理，主要由石英颗粒塑性拉长构成。

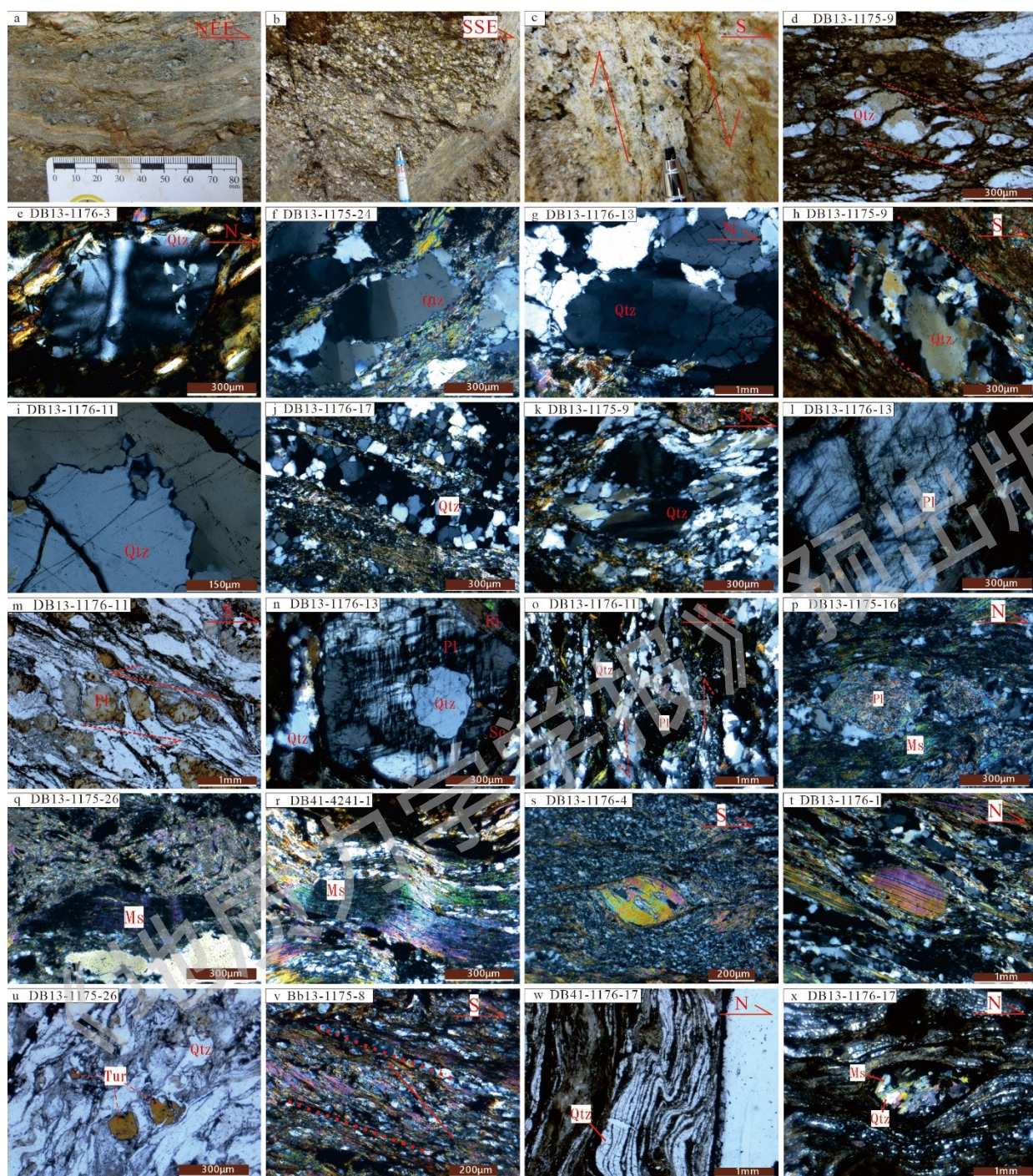
(2) 显微变形特征

剪切带各构造岩类岩石成分主要为石英、长石、绢云母、白云母、黑云母及少量红柱石、电气石。石英表现为书斜式构造（图 4d）、波状消光（图 4e）、带状消光（图 4f）、亚晶粒化（图 4g）、动态重结晶（图 4h、4i）、静态恢复重结晶（图 4j）、旋转碎斑（图 4k）、多晶石英条带（图 4j）、核幔构造（图 4k）等，

石英的塑性变形在样品中十分常见，其动态重结晶机制以亚颗粒旋转动态重结晶（图 4h）为主，亦见少量膨凸重结晶（图 4i）。长石多为刚性块体，主要见晶内裂隙（图 4l）、书斜式构造（图 4m）、机械双晶（图 4n）、旋转碎斑（图 4o）、核幔构造（图 4p）及压力影构造。云母多表现为波状消光（图 4q）、扭折带（图 4r）、云母鱼（图 4s）、旋转碎斑、核幔构造、压力影（图 4t）。电气石部分为旋转碎斑（图 4u），亦见有自形晶。镜下各类岩石 S-C 组构（图 4v）均十分发育，显微分层（图 4j）现象明显主要见于花岗岩剪切带，石英条带及绢云母集合体密集相间分布，并绕过长石、云母残斑，花岗质变晶糜棱岩中亦可见“Z”字型不对称石英条带褶皱（图 4w）。各类构造岩定向标本显微变形特征指示的运动方向及特征与宏观变形运动方向及特征一致，反映了剪切带总体北北东向逆冲的运动性质。

在花岗质变晶糜棱岩中见石英矩形条带（图 4j），石英晶粒多呈现多边形，交会处形成三结点，且石英基本不见不均匀消光，长石碎斑可见退变质为白云母及石英集合体（图 4x），表明其受后期静态恢复重结晶及热变质作用较强。

《地质力学学报》预出版



Qtz—石英；Ms—白云母；Bi—黑云母；Se—绢云母；Pl—长石；Tur—电气石；DB13-1176-3 等为样品编号

a—碎屑岩中白云母长英质糜棱岩；b—花岗质初糜棱岩；c—花岗质糜棱岩中电气石碎斑；d—石英书斜式构造；e—石英晶粒多向波状消光；f—石英晶粒带状消光；g—棋盘格式石英亚晶粒；h—石英亚晶粒旋转重结晶；i—石英膨凸重结晶；j—石英静态恢复重结晶及矩形条带；k—石英核幔构造（核部带状消光）；l—斜长石晶内裂隙；m—长石书斜式构造；n—斜长石双向机械双晶及核幔构造；o—斜长石σ型碎斑；p—长石核幔构造及石香肠构造；q—长英质糜棱岩中白云母鱼及波状消光；r—白云母扭折带；s—花岗质超糜棱岩中白云母鱼；t—白云母压力影构造；u—自形电气石及晶内裂隙；v—S-C 组构；w—不对称石英褶皱条带；x—花岗质变晶糜棱岩中长石碎斑退变质

图 4 十里韧性剪切带中发育的 D2 期变形信息及特征

Fig. 4 Information and features of D2 deformation in the Shili ductile shear zone

(a) Muscovite-bearing felsic mylonite derived from clastic rocks; (b) Granitic protomylonite; (c) Tourmaline porphyroclasts in granitic

mylonite; (d) Bookshelf structure in quartz; (e) Multidirectional undulose extinction in quartz grains; (f) Banded extinction in quartz grains; (g) Chessboard subgrains in quartz; (h) Subgrain rotation recrystallization in quartz; (i) Bulging recrystallization in quartz; (j) Static recovery recrystallization and rectangular ribbons in quartz; (k) Core-mantle structure in quartz (core showing banded extinction); (l) Intracrystalline fractures in plagioclase; (m) Bookshelf structure in feldspar; (n) Bilateral mechanical twinning and core-mantle structure in plagioclase; (o) σ -type porphyroclasts in plagioclase; (p) Core-mantle structure and boudinage in feldspar; (q) Mica fish and undulose extinction in muscovite within felsic mylonite; (r) Kink bands in muscovite; (s) Mica fish in granitic ultramylonite; (t) Pressure shadows around muscovite; (u) Euhedral tourmaline with intracrystalline fractures; (v) S-C fabric; (w) Asymmetric folded quartz ribbons; (x) Retrograde alteration of feldspar porphyroclasts in granitic blastomylonite;

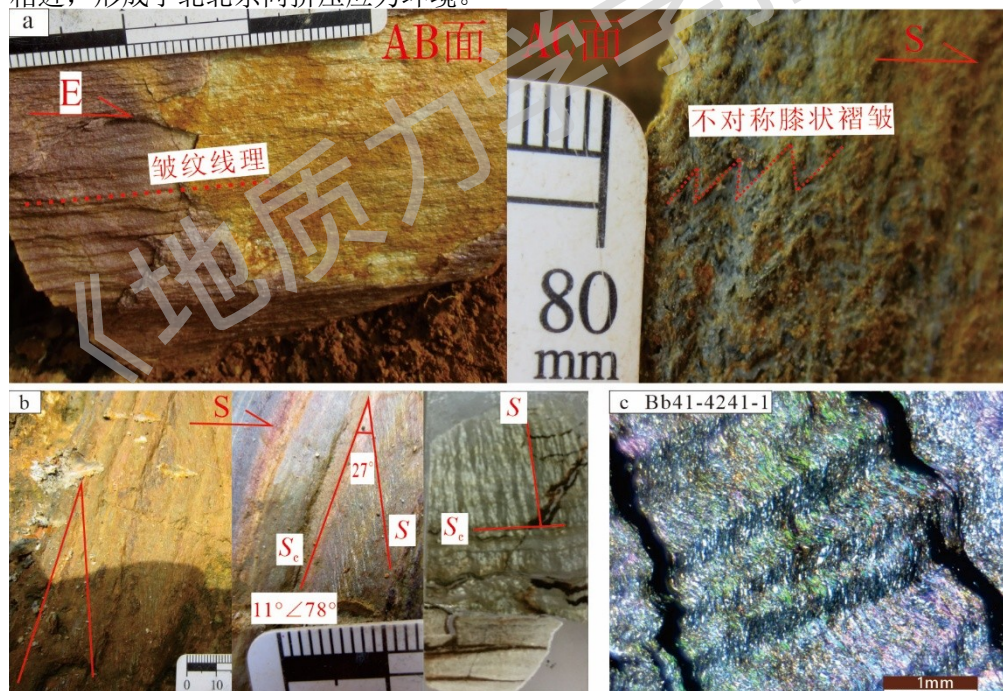
Qtz—Quartz; Ms—Muscovite; Bi—Biotite; Se—Sericite; Pl—Feldspar; Tur—Tourmaline; DB13-1176-3, etc—sample numbers

(3) D3 期变形特征

D3 期变形为脆-韧性变形，因岩石能干性差异，仅见于合浦组碎屑岩中，一般将 D2 期碎屑岩糜棱面理改造为密集不对称膝状褶皱，褶皱枢纽平行排列形成皱纹线理（图 5a），是典型的 B 型线理，其在 C 面理上呈北西—南东水平走向，结合不对称膝状褶皱锐角方向，指示 D3 期变形与 D2 期韧性变形一致的北北东向逆冲运动性质。密集规则的不对称膝状褶皱两翼与任一平直的面理相交呈现交面线理（图 5b）。D3 期变形镜下主要呈微褶皱，由绢云母、白云母及石英透镜体定向形成的 D2 期糜棱面理被挤压呈膝折带（图 5c）。

(4) D4 期变形特征

D4 期变形为褶皱变形，表现为普遍发育的中小尺度褶皱，广泛分布于剪切带内，受岩石能干性影响，花岗岩中褶皱波长长，碎屑岩中褶皱波长小并多见次级褶皱（图 6a、6b），褶皱两翼夹角多为 $45^\circ \sim 90^\circ$ ，手标本尺度见窗棂构造，常出现于不同能干层岩性之间，强岩层呈一系列宽而圆滑的弧形突向弱岩层一侧（图 6c）。褶皱变形导致 D2 期糜棱面理及 D3 期膝折带局部往北倾，褶皱北翼的糜棱面理（ S_2 ）、线理（ L_3 ），指示的运动性质由原来北北东向逆冲变化为北北东向伸展滑脱（图 2，图 6a、6d），褶皱轴面与剪切带总体产状相近，形成于北北东向挤压应力环境。



S_c —剪切面理； S —膝状褶皱两翼形成的面理

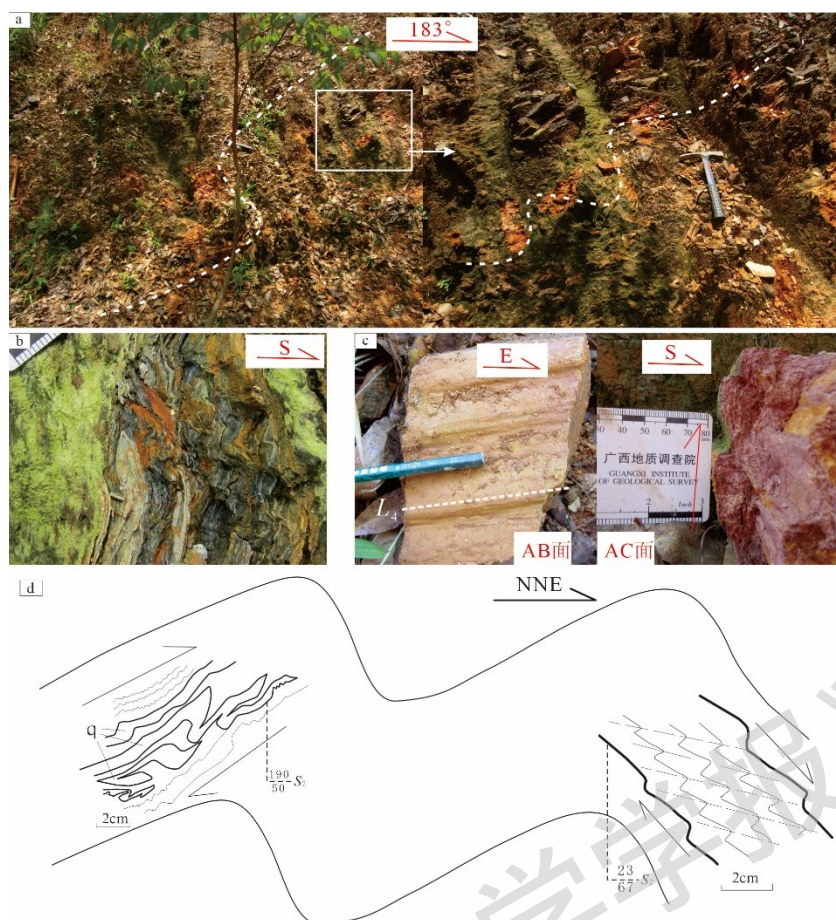
a—千糜岩中的皱纹线理及不对称膝状褶皱；b—千糜岩中交面线理；c—镜下连续膝状褶皱

图 5 十里韧性剪切带中保存的 D3 期变形信息及特征

Fig. 5 Information and features of D3 deformation in the Shili ductile shear zone

(a) Crenulation lineation and asymmetric kink folds in phyllonite; (b) Intersection lineation in phyllonite; (c) Continuous kink folds under the microscope

S_c —Shear foliation; S —Foliation developed on the limbs of kink folds



L_4 —D4 期线理；q—石英脉； S_2 —D2 期剪切面理
a—合浦组发育的顺层褶皱；b—千糜岩中的褶皱变形；c—千糜岩中的窗棂构造；d—D4 期变形导致早期面理褶皱变形
图 6 十里韧性剪切带中保存的 D4 期变形信息及特征

Fig. 6 Information and features of D4 deformation in the Shili ductile shear zone

(a) Bedding-parallel folds developed in the Hepu Formation; (b) Fold deformation in phyllonite; (c) Mullion structure in phyllonite; (d) Folding of earlier foliation caused by D4 deformation

L_4 —D4 lineation; q— Quartz veins; S_2 —D2 shear foliation

3 有限应变测量及运动学涡度分析

此次有限应变测量及运动学涡度分析对象主要为剪切带内糜棱岩类岩石，测量分析结果反映了 D2 期韧性剪切变形的运动学特征。

3.1 有限应变测量

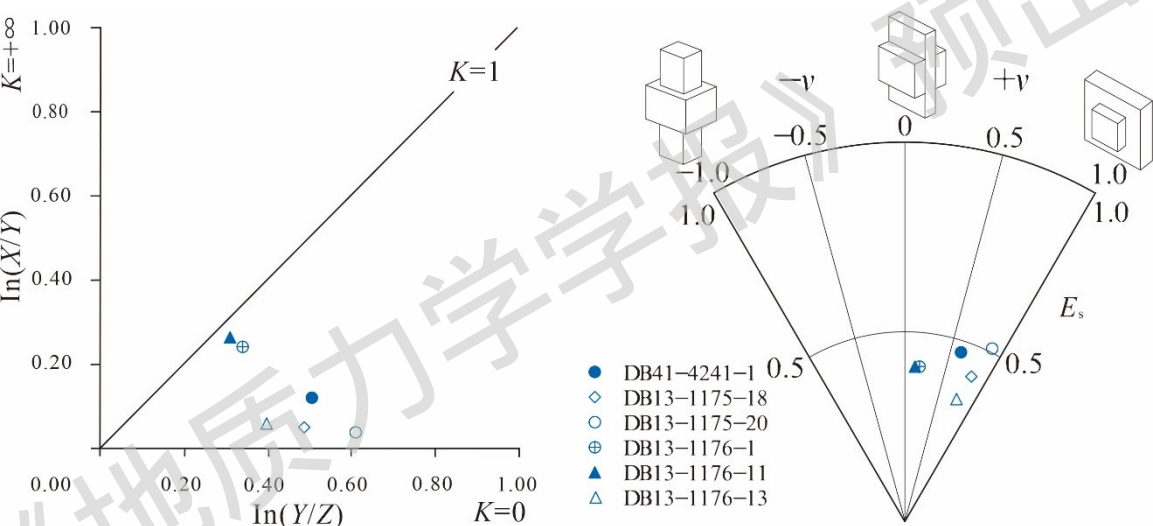
剪切带内主要糜棱岩类岩石共 8 种，其中花岗质超糜棱岩镜下矿物呈细糜状，不适用于有限应变测量。花岗质变晶糜棱岩虽然受后期热变质作用，其石英颗粒已静态恢复重结晶，但从其碎斑含量推断其剪切变形大致相当于花岗质糜棱岩。因此此次工作分别针对绢云石英千糜岩、石英白云母糜棱片岩、白云母长英质糜棱岩、花岗质糜棱岩、花岗质初糜棱岩及糜棱岩化中细粒黑云二长花岗岩这 6 种岩性采集定向标本并进行有限应变测量，采样位置见图 2。

有限应变测量方法已有均有较成熟的总结（郑亚东和常志忠，1985；余珂成等，2025；Banerjee et

al., 2026), 文章选用最常用的长短轴法, 切制每件样品的 XZ、YZ 面薄片, 测量其变形石英颗粒的相关参数 (见表 1)。通过相关参数的计算, 剪切带内糜棱岩类岩石付林指数 K 为 0.06~0.77, 罗德参数 ν 为 0.13~0.89, 变形强度 E_s 为 0.41~0.51。将计算数据投入付林图解及霍塞克图解 (图 7) 可见, 剪切带为平面压扁型应变。

表 1 十里韧性剪切带三维有限应变测量参数
Table 1 Three-dimensional finite strain values of the Shili ductile shear zone

样品编号	岩石定名	长短轴轴比值			应变主轴相对长短			付林指数	主应变			罗德参数	变形强度
		R_{XY}	R_{XZ}	R_{YZ}	X	Y	Z		ε_1	ε_2	ε_3		
DB41-4241-1	绢云石英千糜岩	1.13	1.87	1.66	1.28	1.14	0.69	0.24	0.25	0.13	-0.38	0.61	0.47
DB13-1175-18	石英白云母糜棱片岩	1.05	1.71	1.63	1.22	1.16	0.71	0.10	0.19	0.15	-0.34	0.82	0.42
DB13-1175-20	白云母长英质糜棱岩	1.04	1.91	1.84	1.25	1.21	0.66	0.06	0.23	0.19	-0.42	0.89	0.51
DB13-1176-1	花岗质糜棱岩	1.27	1.78	1.41	1.31	1.04	0.74	0.69	0.27	0.03	-0.31	0.18	0.41
DB13-1176-11	花岗质初糜棱岩	1.29	1.78	1.38	1.32	1.02	0.74	0.77	0.28	0.02	-0.30	0.13	0.41
DB13-1176-13	糜棱岩化中细粒黑云二长花岗岩	1.06	1.58	1.49	1.19	1.12	0.75	0.14	0.17	0.11	-0.28	0.76	0.35



$\ln(X/Y)$ —XY 两个主轴长度比的对数值; $\ln(Y/Z)$ —YZ 两个主轴长度比的对数值; K —付林指数; ν —罗德参数; E_s —变形强度

图 7 十里韧性剪切带付林图解与霍塞克图解

Fig. 7 Flinn diagram and Hossack diagram of the Shili ductile shear zone

$\ln(X/Y)$ —Natural logarithm of the axial ratio of the principal strain axes X and Y ; $\ln(Y/Z)$ —Natural logarithm of the axial ratio of the principal strain axes Y and Z ; K —Flinn index; ν —Lode parameter; E_s —Effective strain

3.2 运动学涡度

运动学涡度 (W_k) 是岩石递进变形中非共轴性的一种量度, 是确定韧性剪切带中纯剪切与简单剪切组分相对占比的重要方法 (李泽宇和刘俊来, 2026)。一般剪切带的运动学涡度变化为 0~1, 纯剪切为零, 简单剪切为 1。此次选用的极摩尔圆法是目前计算运动学涡度最精确的方法, 通过绘制极莫尔圆确定有限应变椭圆的长轴与剪切面之间的夹角 (α) 及主变形面两个特征向量的夹角 (ν), 进而求取运动学涡度值, 具体方法见郑亚东等 (2008)。该剪切带运动学涡度值 (图 8) 为 0.70~0.78 (表 2), 表明为一般剪切作用。

表 2 十里韧性剪切带独州断层运动学涡度
Table 2 Kinematic vorticity of the Shili ductile shear zone

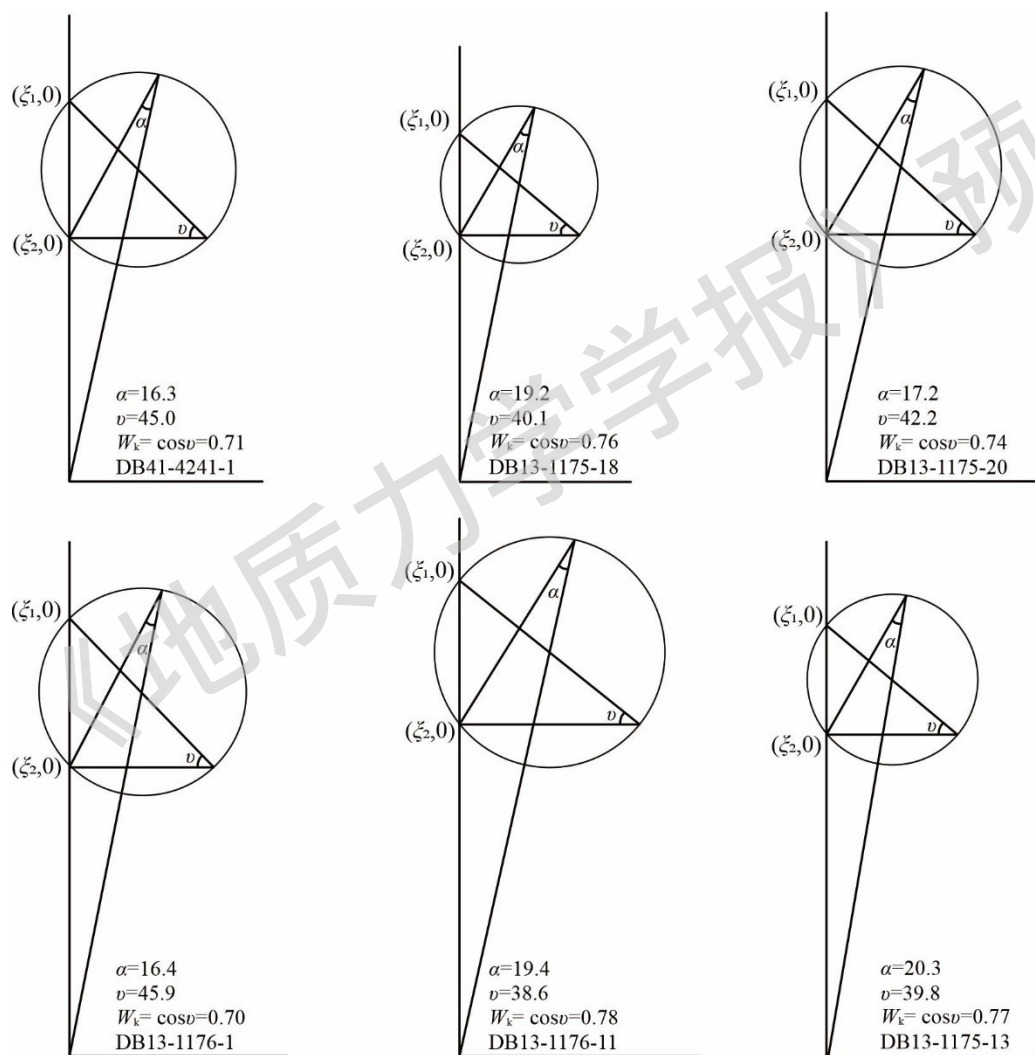
样品编号	测量颗粒数	α	ν	W_k
DB41-4241-1	46	16.3	45.0	0.71

DB13-1175-18	58	19.2	40.1	0.76
DB13-1175-20	56	17.2	42.2	0.74
DB13-1176-1	58	16.4	45.9	0.70
DB13-1176-11	54	19.4	38.6	0.78
DB13-1176-13	31	20.3	39.8	0.77

注： α 为有限应变椭圆的长轴与剪切面之间的夹角； v 为主变形面两个特征向量的夹角； W_k 为运动学涡度。

3.3 剪切带形成的温度

剪切带内糜棱岩类岩石主要矿物成分为石英、黑云母、白云母、绢云母及长石，其中以石英最为常见，云母矿物多细小，长石多为假晶。Passchier and Trouw（2005）研究表明，膨凸（BLG）、亚晶粒旋转（SGR）和颗粒边界迁移（GBM）重结晶等3种矿物动态重结晶机制形成温度逐渐增高。据镜下观察，长石普遍发育双晶纹，石英不规则边界多晶条带发育，石英重结晶颗粒多为定向拉长状，形成机制以亚颗粒旋转动态重结晶为主，表明剪切带形成温度约400~500°C，对应高绿片岩相温度条件。



$(\xi_1, 0)$ 表示平行剪切带边界的特征向量； $(\xi_2, 0)$ 表示与剪切带边界斜交的特征向量； α 、 v 、 W_k 含义见表 2

图 8 十里韧性剪切带求解运动学涡度的极摩尔圆

Fig. 8 Kinematic vorticities estimated with polar Mohr diagrams for the Shili ductile shear zone

$(\xi_1, 0)$ represents the eigenvector parallel to the shear zone boundary; $(\xi_2, 0)$ represents the eigenvector oblique to the shear zone boundary; α , v , and W_k are explained in Table 2.

4 白云母 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素定年

4.1 样品特征

此次工作在剪切带中段采集花岗质糜棱岩样品（TW10-1176-1）中碎斑多为长石及石英，含量约25%~45%，基质主要为定向S形排列的石英及云母类矿物，见S-C组构及碎斑系。石英不规则多晶条带发育，见少量矩形多晶石英条带，见波状消光、带状消光、亚晶粒化及压力影构造，石英重结晶方式以亚晶粒旋转重结晶为主，该样品中石英未见后期静态重结晶；白云母多与黑云母、石英定向排列，呈云母鱼、波状消光、扭折带、θ型碎斑、核幔构造或组成压力影构造的阴影区，可见白云母为同构造期形成，样品未受后期热蚀变影响。主要矿物成分：电气石+黑云母+白云母+长石+石英。

4.2 分析方法

将花岗质糜棱岩样品破碎后挑选纯度大于99%的白云母，用超声波清洗后与ZBH-25黑云母标样（年龄132.7±1.2 Ma，钾含量7.6%，照射参数J值0.003258）一起送中国原子能科学研究院的“游泳池堆”接受中子照射，照射工作使用B4孔道，中子流密度约为2.65×10¹³ n·cm⁻²·S⁻¹，照射总时间为1440 min，积分中子通量为2.29×10¹⁸ n·cm⁻²。

样品测定在中国地质科学院地质研究所氩-氩实验室多接收稀有气体质谱仪Helix MC上完成，使用石墨炉进行样品阶段升温加热，每一个阶段加热10 min，净化20 min，每个峰值均采集20组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。通过分析中子照射过的K₂SO₄和CaF₂获得的干扰同位素校正系数值为： $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=0.0002398$ ， $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}}=0.004782$ ， $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=0.000806$ 。³⁷Ar经过放射性衰变校正；⁴⁰K衰变常数 $\lambda=5.543\times10^{-10}\text{ a}^{-1}$ 。具体实验流程及数据处理见陈文等（2006）和张彦等（2006），样品分析测试结果见表3。

4.3 分析结果

样品在800~1300℃的12个温度阶段组成的坪年龄为232±2.3 Ma（MSWD=3.65），对应了97.12%的³⁹Ar释放量（图9a），相应的等时线年龄为231±2.3 Ma（MSWD=3.71），⁴⁰Ar/³⁶Ar初始值为297±4.6；反等时线年龄为231±2.3 Ma（MSWD=3.66），⁴⁰Ar/³⁶Ar初始值为298±4.5（图9b）。样品的反等时年龄、等时线年龄和坪年龄相近，且⁴⁰Ar/³⁶Ar初始值和现代大气氩值（295.5）在误差范围内一致，说明所测试的样品中不存在过剩氩，也无显著的氩丢失，其坪年龄可代表样品中白云母的结晶年龄，即D2期韧性剪切变形年龄。

表3 十里韧性剪切带白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar阶段升温测年数据

Table 3 ⁴⁰Ar-³⁹Ar isotopic analyses for incremental heating experiments on sericite from mylonite in the Shili ductile shear zone

阶段	T/℃	³⁶ Ar/a	³⁷ Ar _{Ca}	³⁸ Ar _{Cl}	³⁹ Ar _K	⁴⁰ Ar _r	年龄/ Ma	误差 2σ/ Ma	⁴⁰ Ar /%	³⁹ Ar /%
样品编号：TW10-1176-1 白云母 样品重量=15.46mg 照射参数J=0.00398010±0.00001990										
1	700℃	0.09299	0.0000000	0.634577	57.2790	2195.35	253.1	2.52	98.74	1.44
2	800℃	2.11811	0.0000000	3.576786	265.7169	9811.06	232.5	0.95	93.61	6.67
3	840℃	3.03193	0.0000000	5.549519	393.6615	14451.25	231.7	0.82	93.79	9.88
4	880℃	4.32288	0.0000000	7.345234	520.7819	19190.96	231.5	0.77	93.33	13.07
5	920℃	6.04426	0.0000000	8.656524	590.5360	22129.62	231.8	0.80	91.92	14.82
6	960℃	7.29988	0.0000000	8.563680	558.6715	21376.94	231.5	0.83	89.90	14.02
7	1000℃	9.25240	0.0000000	8.013721	483.8499	19319.83	230.7	0.90	85.84	12.15
8	1040℃	12.05228	0.0000000	6.643168	348.8783	15441.45	229.3	1.16	76.92	8.76
9	1080℃	7.74461	0.0000000	4.361738	236.6086	10431.43	231.6	1.50	78.05	5.94
10	1120℃	12.65653	0.0000000	4.313819	160.1427	9314.91	234.1	2.21	59.84	4.02
11	1160℃	10.99917	0.0000000	3.447678	122.2442	7534.32	235.6	2.77	56.85	3.07
12	1200℃	13.67260	0.0000000	3.928635	108.3149	7816.15	234.4	3.38	48.30	2.72
13	1300℃	15.33798	0.0000000	3.804958	79.7868	7291.23	232.6	5.11	37.83	2.00

14	1400°C	12.10923	0.0000000	2.680966	57.3454	5479.13	223.6	5.72	34.69	1.44
坪年龄=232±2.3Ma (MSWD=3.65) ; 反等时线年龄=231±2.3Ma										

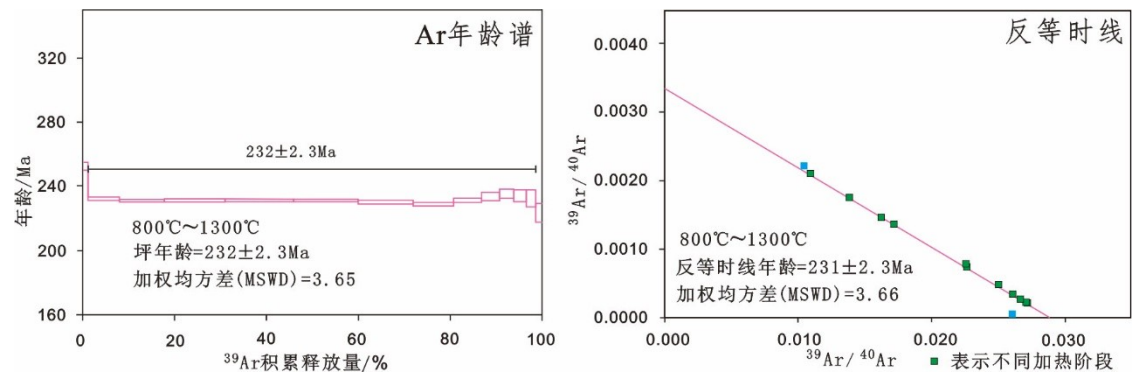


图 9 十里韧性剪切带白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄谱及反等时线图
Fig. 9 ⁴⁰A-³⁹Ar plateau age and inverse isochron age for sericite from mylonite in the Shili ductile shear zone

5 讨论

5.1 变形时代

华南印支—燕山期广泛的造山运动奠定了现今华南构造基本格架。在扬子陆块北缘，华南与华北陆块发生强烈的陆内深俯冲和碰撞，大别山、苏鲁造山带出露的超高压变质带约 240 Ma 的变质年龄峰值（Peng et al., 2024; Zhu et al., 2024）。华南陆块西南缘，沿松马—松达缝合带与印支地块拼合碰撞，导致越南北部 Song Chay 等地块内部形成一系列高压变质带（林伟等，2025; Hau et al., 2026）。在海南地区，昌江—琼海断裂被认为是扬子陆块与印支地块的分界线，东古特提斯主洋盆的关闭时间被认为约 237 Ma（Wang et al., 2018）。琼西南发育两条近北东向展布的戈枕和冲卒岭韧性剪切带，具左行走滑—逆冲特征，在戈枕韧性剪切带及冲卒岭韧性剪切带糜棱岩中分别获得黑云母及白云母单矿物 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 227.4±0.2 Ma、229.6±0.3 Ma（陈新跃等，2006a）。在海南岛西部的北西向公爱韧性剪切带，具右行走滑特征，其糜棱岩中的白云母获得了 249.7±1.0 Ma 和 247.6±1.0 Ma 的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄（陈新跃等，2006b）。在浙西南，已有研究获得了交塘糜棱岩中多硅白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 237.6±1.3 Ma，小查田糜棱岩中钾长石等时线年龄为 221±10Ma（朱炳泉等，1997）。在福建武平县，Xu et al. (2011) 在具有右行走滑运动性质的北东向武夷山松溪—长汀剪切带中，获得其糜棱岩中同构造黑云母及白云母的坪年龄分别为 235.3±2.8 Ma 和 238.5±2.8 Ma。Yan et al.（2003，2009）获得右江—南盘江断裂带片岩中同构造期白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 变形年龄和变质锆石 U-Pb 年龄为 248~223 Ma。

云开地区及周缘，已有研究取得了大量剪切带的年代学数据，邵建国等（1995）在云开地块北缘及东缘获得罗定推覆构造、分界南推覆构造、西山岭推覆构造中同构造白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 等时线年龄分别为 249.72±2.61 Ma、255.33±3.03 Ma、229.35±2.50 Ma。Wang et al.（2021）在阳西地区获得北西西向或近东—西向剪切带中同构造黑云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄 229~225 Ma；在梅州地区糜棱岩中获得同构造黑云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄 224~222 Ma，相关浅色岩体锆石 U-Pb 年龄为 249±7 Ma 和 241±9 Ma。在云开地块腹地，Wang et al.（2007）在信宜—高州地区获得 222-230 Ma 的同构造黑云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄。在云开地块西侧的十万大山地区，发育一系列总体南西—北东走向的叠瓦式逆冲构造、紧闭褶皱及韧性剪切带，其指示北西—南东的古构造应力场方向，其中获得了 253~245 Ma 的韧性剪切带年龄（王文宝，2017；丁汝鑫等，2018）。同时期，大容山—十万大山董青石花岗岩和片麻状花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 250~230 Ma，研究表明其形成于地壳加厚深熔（Wang et al., 2007）。十万大山地区晚三叠世平垌组沉积不整合于中三叠统板八组火山岩之上。柯贤忠等（2018）获得云开地区前寒

武变质基底和花岗岩脉中锆石变质增生边中 U-Pb 同位素年龄在 231~229 Ma, 王祥东等(2020)获得高州-信宜一带花岗质片麻岩中后期叠加改造产生的独居石、磷灰石等副矿物的结晶年龄分别为 236 Ma 和 230 Ma, 表明云开地区印支期的变质-深熔作用年龄在 240~230 Ma。陈国楷等(2026)在粤西阳江地区识别出反映了近南-北向的挤压作用的褶皱理叠加于早期变形组构之上, 并获得变质锆石年龄(245~225 Ma)。以上资料均表明晚三叠世印支期构造-热事件的广泛存在。

此次工作获得十里韧性剪切带花岗质糜棱岩中同构造白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 232 ± 2.25 Ma, 代表其 D2 期韧性剪切变形年龄, 往北东向约 30 km, 在同属岑溪-博白断裂带的三堡韧性剪切带中获得同构造绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄 231.9 ± 2.2 Ma (郭尚宇等, 2020), 同时, 十里韧性剪切带受燕山期盆地掩盖及北东向断裂截断, 剪切带主变形活动年龄被限定为印支期晚期, 剪切带中 D1 期变形因被后期变形强烈改造, 仅剪切带边部及残留的旋转碎斑记录了该期变形, 其形成时代无从判别, 但 D2~D4 期变形均指示了自南南西至北北东向的运动方向, 形成于统一的构造应力场, 反映了晚三叠世由韧性剪切变形、脆-韧性变形到褶皱变形的变形演化过程。

5.2 动力学背景

与云开地区及周缘整体呈北西-南东挤压, 以北东-南西向为主的构造形迹不同, 十里韧性剪切带主变形期(D2~D4)形成糜棱岩化、褶皱理、褶皱变形的几何学、运动学特征协调, 形成于统一应力场, 表现为北北东向逆冲特征。云开大山西侧的十万大山推覆构造被认为是南东向北西逆冲(广西壮族自治区区域地质调查研究院, 2022), 云开大山东侧的罗定推覆构造、分界南推覆构造、西山岭推覆构造属北西向南东逆冲, 夹持其中的印支期韧性剪切带被分为左旋逆冲(248~220 Ma)及左旋走滑(220~200 Ma)两期变形(Wang et al., 2007)。Wang et al. (2021)在云开及粤中地区识别出 248~220 Ma 北西西向或近东-西向右行压扭性逆冲性质脆韧性变形, 并提出其主要受华南南缘哀牢山-马江古特提斯支洋闭合控制。

华南印支期构造的动力学模型长期以来都存在争议, Li and Li (2007)提出古太平洋板块自二叠纪(约 265 Ma)开始北西向低角度俯冲于华南之下, 形成华南大陆中生代 1300 km 宽的陆内褶皱冲断带、岩浆演化及变质作用具有自南东 向北西 逐渐扩展的规律, 古太平洋板块俯冲模式从应力场角度较好解释了云开乃至华南东南部北东-南西向构造形迹, 但该动力学模型缺乏蛇绿岩套及岛弧型弧火山岩作为证据支撑(Wang et al., 2013; 张国伟等, 2013), 与古太平洋俯冲方向垂直的近东西向或北西-南东向剪切带也无法用古太平洋板块俯冲模式解释(Chu et al., 2012)。早一中三叠世开始, 印支陆块与华南陆块拼合碰撞, 东特提斯洋闭合形成松马-松达缝合带, 其褶皱-冲断带内发育北东-南西向矿物拉伸线理和指向北东的剪切变形(王岳军等, 2022), 缝合带往北东的南盘江地区前陆褶皱-逆冲带深部主要表现为一系列指向北东-北北东的逆冲断层(杨文心, 2021), 至云开地区, 印支早期北西向构造已发育较弱并受后期北东向构造改造强烈, 但仍能识别出近东西向/北西-北西西向脆韧性变形(Lin et al., 2008; Wang et al., 2021), 总体上从华南陆块南缘往北东向变形逐渐减弱(王岳军等, 2022)。因此, 十里韧性剪切带内糜棱岩化、褶皱理、褶皱变形动力来源于印支陆块与华南陆块北东-南西向拼合碰撞, 属板缘作用的远程效应, 其变形环境最高可达高绿片岩相, 在中地壳上部层次一般剪切作用下遭受平面压扁型应变。

6 结论

(1) 十里韧性剪切带为一总体呈北西西-南东东走向、北北东向逆冲性质的韧性剪切带, 表现为韧性剪切变形、脆-韧性变形到褶皱变形的变形演化过程, 其韧性剪切变形同期形成的白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 232 ± 2.3 Ma (MSWD=3.65), 表明其活动时代为晚三叠世。

(2) 有限应变测量及运动学涡度分析表明十里韧性剪切带内韧性剪切变形形成的各糜棱岩类岩石付林指数 K 为 0.06~0.77, 罗德参数 ν 为 0.13~0.89, 变形强度 E_s 为 0.41~0.51, 运动学涡度值为 0.70~0.78。表明其为平面压扁型应变, 受一般剪切作用。

(3) 十里韧性剪切带形成于印支陆块与华南陆块北东-南西向拼合碰撞的远程效应。

作者贡献声明：郭尚宇负责全文数据处理、撰写、修改；吴祥珂负责指导研究思路、数据处理、研究意义；赵兵负责数据收集、整理，撰写地质概况部分；黎丹负责图件收集、整理、编制。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author' s Contributions: Guo Shangyu was responsible for data processing, writing, and revision of the full manuscript; Wu Xiangke guided the research design, data processing, and the scientific significance of the study; Zhao Bing collected and organized the data and wrote the geological setting section; Li Dan collected, organized, and prepared the figures. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests : All authors declare no conflict of interests.

References

- BANERJEE S, MAITY S, RAWAT A, et al., 2026. Quantifying finite strain in the poly-deformed Lansdowne Klippe, Garhwal Himalaya, India: an appraisal of popular strain estimation techniques[J]. *Journal of Structural Geology*, 204: 105585.
- CHEN G K, ZHANG J, ZHAO C, et al., 2026. Polyphase deformation in the southernmost Cathaysia Block: an overprinting record from the Caledonian to Indosinian tectonothermal events[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 42(7): 2431-2448. (in Chinese with English abstract)
- CHEN W, ZHANG Y, ZHANG Y Q, et al., 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan Plateau-evidence from Ar-Ar thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867-872. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X Y, WANG Y J, FAN W M, et al., 2006a. Microstructure characteristics of NE trend ductile shear zones of southwestern Hainan: constraints from ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology[J]. *Geochimica*, 35(5): 479-488. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X Y, WANG Y J, WEI M, et al., 2006b. Microstructural characteristics of the NW-trending shear zones of Gong'ai region in Hainan island and its ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronological constraints[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(3): 312-319. (in Chinese with English abstract)
- CHU Y, FAURE M, LIN W, et al., 2012. Tectonics of the Middle Triassic intracontinental Xuefengshan Belt, South China: New insights from structural and chronological constraints on the basal décollement zone[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 101(8): 2125-2150.
- DING R X, YU P P, HU G M, et al., 2018. Thermochronology of Pangxidong fault zone in southern section of Qin-Hang metallogenic belt[J]. *Earth Science*, 43(6): 1830-1838. (in Chinese with English abstract)
- FENG P, DENG H, ZHANG Y, et al., 2024. Pressure-temperature-time path of ultrahigh-pressure metamorphic terranes constrained by zircon petrochronology: a case study of orthogneisses from the northern Sulu belt, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 259: 105877.
- Guangxi Institute of Regional Geological Survey, 2022. Regional geology of China, Guangxi Zhuang Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 12. (in Chinese)
- GUO S Y, HUANG X Q, NONG J N, et al., 2020. Deformation characteristics and ^{40}Ar - ^{39}Ar age of the Sanbao ductile shear zone on the northwestern margin of Yunkai block, South China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(3): 357-366. (in Chinese with English abstract)
- HAU B V, KIM Y, JEONG Y J, et al., 2026. Metamorphic evolution and tectonic implications of high-pressure metapelites from the Song Ma suture zone, between the South China and Indochina cratons[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 295: 106827.
- HSÜ K J, LI J L, CHEN H H, et al., 1990. Tectonics of South China: key to understanding west pacific geology[J]. *Tectonophysics*, 183(1-4): 9-39.

- KE X Z, ZHOU D, LONG W G, et al., 2018. Indosinian metamorphism and anatexis in Yunkai massif: evidences from zircon geochronology and Hf isotopes of migmatites and gneisses[J]. *Earth Science*, 43(7): 2249-2275. (in Chinese with English abstract)
- LI Z X, LI X H, 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179-182.
- LI Z Y, LIU J L, 2026. Further discussion of kinematic vorticity analysis in ductile shear zone[J/OL]. *Geological Review*. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2026.02.001>. (in Chinese with English abstract)
- LIN S F, XING G F, DAVIS D W, et al., 2018. Appalachian-style multi-terrane Wilson cycle model for the assembly of South China[J]. *Geology*, 46(4): 319-322.
- LIN W, WANG Q C, CHEN K, 2008. Phanerozoic tectonics of South China block: new insights from the polyphase deformation in the Yunkai massif[J]. *Tectonics*, 27(6): TC6004.
- LIN W, WANG Y, LIU F, et al., 2025. Indochina orogenic belt and related geodynamics[J]. *Science China Earth Sciences*, 68(6): 1691-1715.
- PASSCHIER C W, TROUW R A J, 2005. *Microtectonics*[M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer: 1-366.
- SHAO J G, PENG S M, PENG S B, 1995. $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ isochron dating for peripheral faults of Yunkai massif[J]. *Guangdong Geology*, 10(2): 34-40. (in Chinese with English abstract)
- WANG W B, 2017. Tectono-magmatic evolution of the Shiwandashan structural belt: implications for understanding the Indosinian orogeny in South China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- WANG X D, XU D M, WANG L, et al., 2020. Reworking of indosinian tectono-thermal events in the Yunkai massif: gneissic multi-mineral U-Pb geochronological evidence[J]. *Earth Science*, 45(5): 1653-1675. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y J, FAN W M, CAWOOD P A, et al., 2007. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, South China: kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints[J]. *Tectonics*, 26(6): TC6008.
- WANG Y J, FAN W M, ZHANG G W, et al., 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: key observations and controversies[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1273-1305.
- WANG Y J, QIAN X, CAWOOD P A, et al., 2018. Closure of the East Paleotethyan Ocean and amalgamation of the Eastern Cimmerian and Southeast Asia continental fragments[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 195-230.
- WANG Y J, WANG Y, ZHANG Y Z, et al., 2021. Triassic two-stage intra-continental orogenesis of the South China Block, driven by Paleotethyan closure and interactions with adjoining blocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 206: 104648.
- WANG Y J, WANG Y, ZHANG Y Z, et al., 2022. Indosinian deformation in the South China Block and interaction with the adjoining blocks[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(3): 399-415. (in Chinese with English abstract)
- XIAO Q H, LIU Y, LI T D, et al., 2025. Tracing the deep geological processes of the Mesozoic-Cenozoic oceanic plate on the continental margin of the East Asian continent in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 32(6): 9-28. (in Chinese with English abstract)
- XU X B, ZHANG Y Q, SHU L S, et al., 2011. La-ICP-MS U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the sheared metamorphic rocks in the Wuyishan: constraints on the timing of Early Paleozoic and Early Mesozoic tectono-thermal events in SE China[J]. *Tectonophysics*, 501(1-4): 71-86.
- YAN D P, ZHOU M F, SONG H L, et al., 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China)[J]. *Tectonophysics*, 361(3-4): 239-254.
- YAN D P, ZHANG B, ZHOU M F, et al., 2009. Constraints on the depth, geometry and kinematics of blind detachment faults provided by fault-propagation folds: an example from the Mesozoic fold belt of South China[J]. *Journal of*

Structural Geology, 31(2): 150-162.

- YANG W X, 2021. Formation and Propagation of the Nanpanjiang Indosinian Foreland Fold-Thrust Belt and Foreland Basin in South China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- YU K C, SUN S S, DONG Y P, et al., 2025. Structural deformation and geochronology of the ductile shear zone along the southern margin of the Foping dome, South Qinling[J]. Journal of Geomechanics, 31(3): 386-410. (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[J]. Science China Earth Sciences, 56(11): 1804-1828.
- ZHANG K J, CAI J X, 2009. NE-SW-trending Hepu-Hetai dextral shear zone in southern China: penetration of the Yunkai Promontory of South China into Indochina[J]. Journal of Structural Geology, 31(7): 737-748.
- ZHANG X H, HUANG J H, ZHANG B, et al., 2024. Sensitive corresponding to tectonic transform of South China Block during Mesozoic: a case study on the Wuchuan-Sihui strike-slip fault zone. Acta Petrologica Sinica, 40(12): 3923-3948. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, CHEN W, CHEN K L, et al., 2006. Study on the Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ^{39}Ar recoil loss: examples from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province[J]. Geological Review, 52(4): 556-561. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, DONG S W, LI J H, et al., 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(3): 257-279. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG Y D, CHANG Z Z, 1985. Finite strain measurement & ductile shear zones[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-185. (in Chinese)
- ZHENG Y D, WANG T, ZHANG J J, 2008. Theory and practice of kinematic vorticity (W_k)[J]. Earth Science Frontiers, 15(3): 209-220. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU D, LONG W G, KE X Z, et al., 2017. Petrogenesis of the tectonic Mélange on the northern margin of the Yunkai Terrane, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(3): 810-830. (in Chinese with English abstract)
- ZHU B Q, WANG Y X, WANG H F, et al., 1997. Huangshan-Wenzhou geochemical section and its corridor area of lithosphere in Southeast China[J]. Geochimica, 26(2): 6-18. (in Chinese with English abstract)
- ZHU H Z, TIAN Z H, LIU P H, et al., 2024. Metamorphic P-T-t path of Triassic eclogite from the Rongcheng region, eastern China: implications for the tectonic evolution of Sulu orogenic belt[J]. International Geology Review, 66(14): 2598-2620.

附中文参考文献

- 陈国楷, 张健, 赵辰, 等, 2026. 华夏地块南缘多期变形记录: 对加里东—印支运动的叠加响应[J]. 岩石学报, 42 (7) : 2431-2448.
- 陈文, 张彦, 张岳桥, 等, 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. 岩石学报, 22 (4) : 867-872.
- 陈新跃, 王岳军, 范蔚茗, 等, 2006a. 琼西南 NE 向韧性剪切带构造特征及其 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学约束[J]. 地球化学, 35 (5) : 479-488.
- 陈新跃, 王岳军, 韦牧, 等, 2006b. 海南公爱 NW 向韧性剪切带构造特征及其 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学约束[J]. 大地构造与成矿学, 30 (3) : 312-319.
- 丁汝鑫, 虞鹏鹏, 胡光明, 等, 2018. 钦-杭成矿带南段庞西垌断裂带热年代学证据[J]. 地球科学, 43 (6) : 1830-1838.
- 广西壮族自治区区域地质调查研究院, 2022. 中国区域地质志: 广西志[M]. 北京: 地质出版社, 12.
- 郭尚宇, 黄锡强, 农军年, 等, 2020. 云开地块西北缘三堡韧性剪切带变形特征及 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学研究[J]. 大地构造与成矿学, 44 (3) : 357-366.

- 柯贤忠, 周岱, 龙文国, 等, 2018. 云开地块印支期变质-深熔作用: 混合岩、片麻岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. 地球科学, 43 (7) : 2249-2275.
- 李泽宇, 刘俊来, 2026. 再论韧性剪切带运动学涡度分析 [J/OL]. 地质论评 [2026-07-10]. <https://doi.org/10.16509/j.georeview.2026.02.001>.
- 林伟, 王印, 刘飞, 等, 2025. 印支造山带及其地球动力学[J]. 中国科学: 地球科学, 55 (6) : 1737-1765.
- 邵建国, 彭少梅, 彭松柏, 1995. 云开地块周边断裂带 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等时线定年[J]. 广东地质, 10 (2) : 34-40.
- 王文宝, 2017. 十万大山构造带变形—岩浆演化过程: 对华南大陆印支运动的限定[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王祥东, 徐德明, 王磊, 等, 2020. 云开地块印支期构造热事件叠加改造: 来自片麻岩中多矿物 U-Pb 年代学的证据[J]. 地球科学, 45 (5) : 1653-1675.
- 王岳军, 王洋, 张玉芝, 等, 2022. 华南印支期变形格局及多陆块围限模型[J]. 大地构造与成矿学, 46 (3) : 399-415.
- 肖庆辉, 刘勇, 李廷栋, 等, 2025. 中国东部陆缘中、新生代洋板块深地质作用追踪[J]. 地学前缘, 32 (6) : 9-28.
- 杨文心, 2021. 华南南盘江印支期前陆褶皱—逆冲带和前陆盆地的形成与扩展[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 余珂成, 孙圣思, 董云鹏, 等, 2025. 南秦岭佛坪穹隆南缘韧性剪切带构造变形及其年代学研究[J]. 地质力学学报, 31 (3) : 386-410.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等, 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.
- 张献河, 黄建桦, 张波, 等, 2024. 华南板块中生代构造体制转换的最直接响应: 吴川-四会走滑断裂带宏-微观构造解析[J]. 岩石学报, 40 (12) : 3923-3948.
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 等, 2006. 成岩混层 (I/S) Ar-Ar 年龄谱型及 ^{39}Ar 核反冲丢失机理研究: 以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. 地质论评, 52 (4) : 556-561.
- 郑亚东, 常志忠, 1985. 岩石有限应变测量及韧性剪切带[M]. 北京: 地质出版社: 1-185.
- 郑亚东, 王涛, 张进江, 2008. 运动学涡度的理论与实践[J]. 地学前缘, 15 (3) : 209-220.
- 周岱, 龙文国, 柯贤忠, 等, 2017. 云开地块北缘构造混杂岩的岩石成因探讨[J]. 岩石学报, 33 (3) : 810-830.
- 朱炳泉, 王一先, 王慧芬, 等, 1997. 黄山-温州地球化学剖面及廊区解析[J]. 地球化学, 26 (2) : 6-18.