

doi: 10.12029/gc20200207

孙岳, 潘家永, 肖振华, 刘颖, 潘春蓉, 钟福军, 赖静. 2020. 诸广山中部鹿井铀矿田构造解析与找矿远景探讨[J]. 中国地质, 47(2): 362–374.
Sun Yue, Pan Jiayong, Xiao Zhenhua, Liu Ying, Pan Chunrong, Zhong Fujun, Lai Jing. 2020. Structural analysis and ore-prospecting prediction of the Lujing uranium orefield in middle Zhuguangshan, South China[J]. Geology in China, 47(2): 362–374(in Chinese with English abstract).

诸广山中部鹿井铀矿田构造解析与找矿远景探讨

孙岳^{1,2}, 潘家永^{1,2}, 肖振华³, 刘颖^{1,2}, 潘春蓉^{1,2}, 钟福军¹, 赖静¹

(1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;

2. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3. 湖南省核工业地质局 302 大队, 湖南 郴州 423003)

摘要: 诸广山中部是华南主要产铀地区之一, 以鹿井矿田为研究对象, 开展构造变形特征和构造控矿规律的研究, 旨在揭示矿体产出规律, 为找矿预测提供依据。本文基于野外详细观测和显微构造变形分析, 揭示 NE 向断裂是鹿井地区主要控矿和含矿断裂, 属浅层次构造变形, 具有多期构造–热液活动特征: 经历了早期(晚侏罗世–早白垩世)的压性、中期(早白垩世–古近纪)的张–张扭性和晚期(新近纪)的右行压扭性变形过程。铀矿(化)体主要发育在 NE 向断裂破碎带中, 结合铀成矿时代, 主成矿期断裂力学性质表现为张性、张扭性, 后期 NE 向断裂右行压扭变形派生出近 EW 向、NW 向和 NS(NNE) 向的剪裂隙, 一方面对先成铀矿体具有改造作用, 另一方面富集部分铀矿体。根据构造组合特征及其控矿规律, 认为 NE 向断裂破碎带中, 沿走向存在不连续的脉状、透镜状富铀矿体, 而在其他方位的断裂带中可能存在部分铀矿体。

关键词: 鹿井铀矿田; 构造解析; 找矿预测; 矿产勘查工程; 诸广山中部

中图分类号: P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2020)02–0362–13

Structural analysis and ore–prospecting prediction of the Lujing uranium orefield in middle Zhuguangshan, South China

SUN Yue^{1,2}, PAN Jiayong^{1,2}, Xiao Zhenhua³, LIU Ying^{1,2}, PAN Chunrong^{1,2}, ZHONG Fujun¹, LAI Jing¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi,

China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;

3. No. 302 Geological Party of Hunan Nuclear Geology, Chenzhou 423003, Hunan, China)

Abstract: The middle Zhuguangshan area is one of the main uranium–producing areas in South China. The characteristics of structural deformations and ore–controlling structural regularity were studied in order to identify the features of uranium deposits and provide scientific guidance for ore–prospecting in blind ore deposits, with Lujing uranium orefield in middle Zhuguangshan as the study objects. The authors revealed that NE–trending faults are ore–controlling and ore–hosting faults in Lujing area, as shown by field detailed observation and microscopic structure analyses. NE–trending faults have characteristics of multi–stage tectonic

收稿日期: 2018–05–06; 改回日期: 2018–09–12

基金项目: 国家自然科学基金(41702076、41772066)、国家科技支撑计划项目(2015BAB05B04)、中国地质调查局项目(121201104000150014)和东华理工大学博士启动基金(DHBK2015324)联合资助。

作者简介: 孙岳, 男, 1986 年生, 讲师, 主要从事构造地质学教学与科研; E-mail: sy0136@163.com。

and hydrothermal activities belonging to shallow surface tectonic deformation. Geological phenomena show that NE-trending faults had at least three stages of tectonic events: compression deformation at the early stage (Late Jurassic–Early Cretaceous), tensional and torsion at the late stage (Early Cretaceous–Paleogene), and the faults changed into compress–shear faults at the late stage (Neogene). The uranium orebodies were developed in the NE-trending fracture zone, and the mechanical properties of NE-trending faults were tensional and transtensional during the major ore-forming stage. The near EW, NW and NS (NEE) trending faults were induced from the NE-trending main faults in the later right twisting deformation in Neogene period. The earlier uranium orebodies were reformed by the later tectonic deformation. On the other hand, some parts of the uranium orebodies were concentrated in the later faults. According to the characteristics of structure combination and ore-controlling regularity, the authors hold that the blind uranium orebodies which occurred as veins and lenses existent in the NE-trending fracture zone, and the secondary enrichment of uranium may exist in other direction faults.

Key words: Lujing uranium orefield; structural analysis; ore-finding and prediction; mineral exploration engineering; middle Zhuaguangshan area

About the first author: SUN Yue, male, born in 1986, doctor, lecturer, mainly engages in the structural geology teaching and research; E-mail: sy0136@163.com.

Fund support: Supported by Natural Science Foundation of China (No.41702076, No.41772066); National Science and Technology support program (No. 2015BAB05B04); China Geological Survey Program (No. 121201104000150014) and Initial Foundation of East China University of Technology (No. DHBK2015324).

1 引言

构造的形成和演化对各类矿床和矿体的分布、形态、产状、规模及后期的改造都起着主导作用,不仅为含矿流体的运移提供能量和动力,而且为矿质的沉淀提供必要的空间(翟裕生和林新多,1993; Bierlein et al., 2002; 陈宣华等,2009)。因而厘清构造演化规律,特别是构造的变形期次与矿床的时空关系,对实际勘查找矿有非常重要的意义。分析和解释变形地质体内部结构和构造规律,进而查明控矿构造特征、力学性质及其组合关系是进行成矿预测、找矿指导的重要前提和基础(吴淦国,1998; 陈正乐等,2013)。

早期学者根据赋矿地质体的岩性将华南地区铀矿分为花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型和砂岩型(张万良,2011a; 王正庆等,2013)。现有的研究表明不同类型铀矿床虽然赋矿岩性、成岩时代存在差异,但成矿时代、矿体特征等具有相似性,显示出不同类型铀矿床具有一定的联系,即构造在成矿过程中的控制作用(胡瑞忠等,2004)。诸广山中部鹿井铀矿田位于湘赣边界,是华南主要产铀基地之一(张万良等,2011b; 费天伟等,2013),已发现大中小型矿床几十个,显示了研究区具有良好的铀矿成矿潜力。对于鹿井地区铀矿床的研究,已有岩石学(吴俊奇等,1998; 张术根等,2014)、地球化学(Shen

et al., 1988; 马铁球等,2006)、年代学(李献华,1990; Deng et al., 2012; 郭爱民等,2017)、矿床成因(费天伟等,2013)等方面,前人也探讨了华南地区(特别是中生代以来)的构造-岩浆活动(Shen et al., 2000; Li and Li, 2007; Shu et al., 2009; 张岳桥等, 2012; Zhang et al., 2013; Zhao et al., 2013; 毛建仁等,2014)及其与铀成矿关系(李紫金等,1998; 李建威等,2000; Li et al., 2002; 胡瑞忠等,2004,2007; 谢焱石等,2015),虽然强调了构造活动对铀成矿的重要性,但关于构造的具体形态特征、构造岩类型、变形期次和力学性质以及构造对成矿的控制作用等缺少论述。

本文以诸广山中部鹿井铀矿田为研究区,通过详细的矿田构造解析,从研究区典型矿床地质特征入手,依托详细的野外和显微构造特征观测,分析了鹿井铀矿田羊角脑、庙背垅、沙坝子等地NE向断裂和其他方位断裂的构造形迹,结合华南大地构造演化和铀成矿时代,确定含矿构造变形期次和力学性质,探讨构造控矿规律,为下一步勘探找矿提供依据。

2 研究区概况

研究区位于粤、湘、赣三省交界处,主体位于湖南境内,处于扬子板块与华夏板块之间的南华活动带中的闽赣后加里东褶皱带西缘(图1)。该区主要

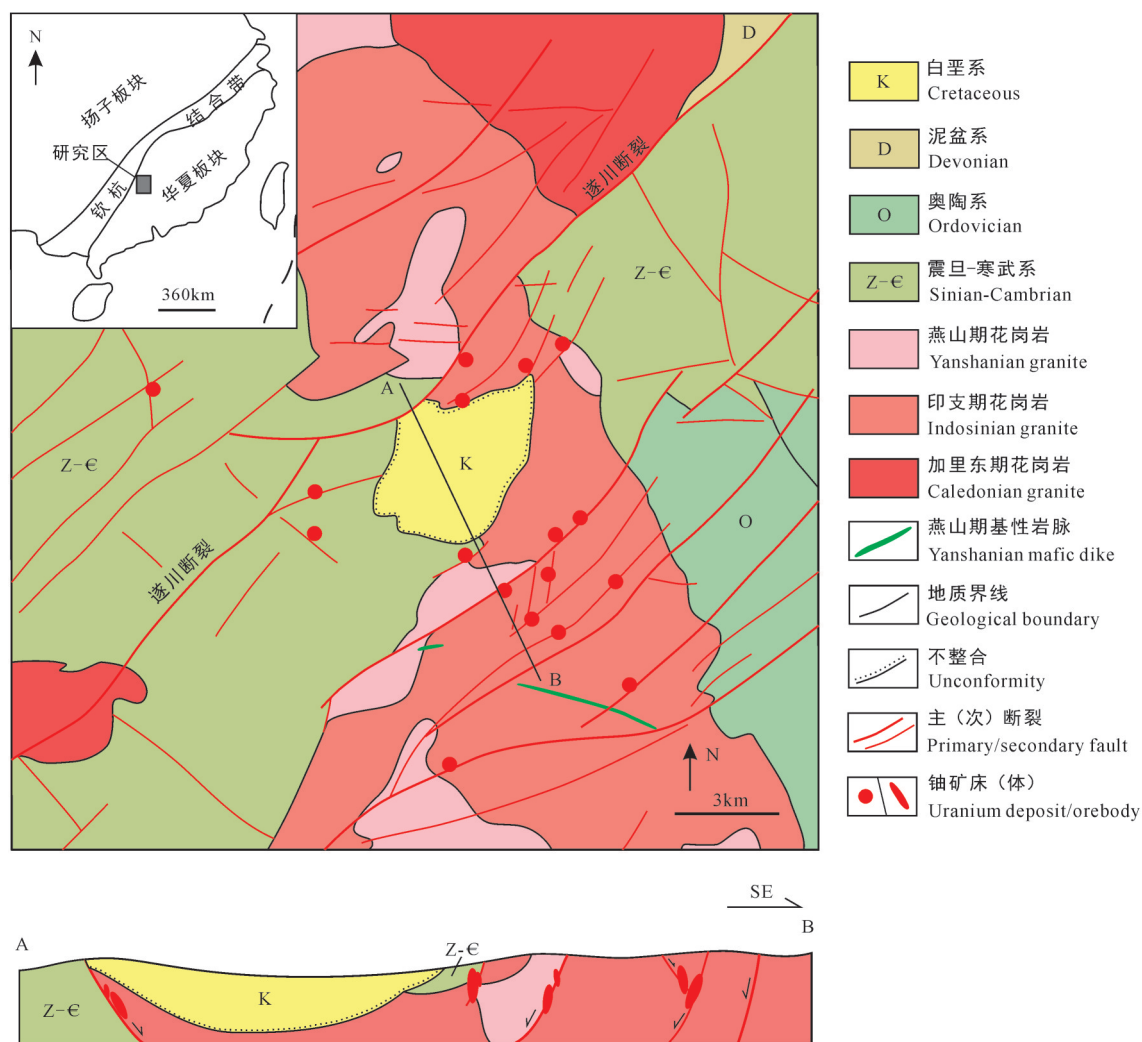


图1 诸广山中部鹿井铀矿田地质构造图(据张万良等,2011b)

Fig. 1 Geological structure of the Lujing uranium orefield in middle Zhuguangshan area (after Zhang Wanliang et al., 2011b)

出露震旦系、寒武系,少量奥陶系、泥盆系和白垩系。震旦—寒武系为本区出露的古老基底层,岩石普遍发生浅变质作用,形成板状、千枚状、斑点状构造,含绢云母、绿泥石、堇青石、红柱石等变质矿物,原岩为海相碎屑岩建造夹炭质板岩、页岩。奥陶系、泥盆系为粉砂质、泥质板岩和碳酸盐岩,白垩系为断陷盆地的红色陆相河湖相沉积,以粗碎屑岩、砂砾岩为主,主要分布在丰州盆地。区内岩浆活动频繁,出露面积占研究区一半以上,从加里东期至燕山晚期均有岩浆侵位,以中酸性岩类为主,具多期多阶段特点,岩性主要为粗、中、细粒(斑状)黑(二)云母二长花岗岩,局部出露燕山期基性岩脉(张万良等,2011b)。

鹿井铀矿田主要存在NE向和近EW向、NW向及NS(NNE)向的构造,主构造线呈NE向,不同方向线性构造组成网状交织形态。研究区铀矿床主要分布在NE向断裂带及旁侧次级裂隙构造中,矿体的位置、形态、规模均取决于断裂产状,呈脉状、透镜状,受断裂控制明显,且富矿段集中在断裂带内(图1)。围岩以印支期中粗粒似斑状黑云母花岗岩和燕山期中细粒少斑黑云母花岗岩为主,部分矿体赋存在震旦—寒武系浅变质岩中。以鹿井矿床铀矿石样品分析,其矿物组成以铀石为主,含少量沥青铀矿、钍铀矿和铀钍石,矿石矿物组合有铀石—金属硫化物(胶状、脉状黄铁矿为主)、铀石—紫黑色萤石和钍铀矿—绿泥石—金红石。研究区与铀相关

蚀变主要有硅化、赤铁矿化、水云母化、绿泥石化、萤石化、钾化和黄铁矿化,具中低温热液蚀变类型特点(胡瑞忠等,2004)。

3 NE向断裂

3.1 产出特征

NE向断裂带为鹿井铀矿田主控矿构造(邵飞等,2010),呈相似间距近平行产出(图1),在羊角脑、牛尾岭、庙背垅、沙坝子等矿区均有出露,地表出露宽度为数十米至百十米,沿走向延伸较远,可达十几千米。断裂带岩石破碎,带内多发育有钾化、赤铁矿化、水云母化、绿泥石化、黄铁矿化等矿化蚀变,伽马异常强烈。此外,肉眼可见铀的原生矿物和次生矿物。

羊角脑矿区,NE向断裂表现为数条产状相近的主破碎带和次级断裂,发育于印支期及燕山期花岗岩中。主断裂带宽度数十米至百米,走向 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$,倾向南东或北西,倾角陡立。断裂带主要由断层角砾岩和断层泥组成,角砾成分主要为花岗岩和硅质,具一定的磨圆。在断裂带内可见绿泥石、赤铁矿等蚀变以及铀次生矿物铜铀云母和钙铀云母(图2a、b)。

丰州盆地北缘牛尾岭矿区,NE向断裂地表出露宽约数十米,产状 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}/SE \angle 50^{\circ} \sim 70^{\circ}$,断裂带内硅化、赤铁矿化强烈,发育有网脉状萤石-铀石,脉宽多为十几厘米。断裂带两侧为印支期中粗粒黑云母二长花岗岩,岩石多发生破碎和黏土化蚀变,并有呈错断关系的紫黑色含铀萤石细脉(图2c),显示铀成矿期的多期热液活动。

庙背垅矿区,地表印支期花岗岩中出露规模相差悬殊的数条NE向断裂,产状 $130^{\circ} \sim 140^{\circ} \angle 35^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。断裂带内均充填有石英,多数宽约数米、几十米,其中集溪河旁NE向断裂带最宽处可达百米,带内发育放射状石英(图2d),以及多组方向的石英脉。在断裂带边部内侧可见断层角砾岩的磨圆和弱定向,角砾长轴方向与断层倾向近平行(图2e),边部外侧岩石出现压扁现象,发育挤压叶理(图2f)。依据断裂切穿的岩体和地层,两侧构造岩特征和放射状石英,推测NE向断裂三叠纪之后至少经历了早期的挤压变形和后期的拉张环境。横坑附近,NE向断裂带内,产状 $317^{\circ} \angle 82^{\circ}$ 的断裂面上发育

有 $39^{\circ} \sim 44^{\circ} \angle 20^{\circ}$ 的一组具左行正断性质(图2g),产状 $330^{\circ} \sim 337^{\circ} \angle 87^{\circ}$ 的断裂面上可见一组产状为 $8^{\circ} \sim 20^{\circ} \angle 16^{\circ} \sim 24^{\circ}$ 的右行压扭擦痕(图2h)。两组擦痕虽然切割关系不明显,但右行擦痕发育较为明显且出露位置较多,推断为较晚期构造形迹。说明NE向断裂拉张之后又经历了右行走滑过程。

沙坝子矿区地表出露以寒武系泥质板岩、硅质板岩和石英砂岩为主,NE向断裂表现为硅化破碎带,裂隙发育,岩石发生脆性变形,以不规则断层角砾岩和少量断层泥胶结,宽约数米,总体走向约 50° ,倾向南东,倾角较陡。在断裂带内可见硅质角砾发育,并有脉状石英胶结其中,显示NE向断裂在拉张环境下伴随热液活动。

研究区北侧五里凹地区,在燕山期中粗粒斑状黑云母二长花岗岩中发育有宽约几米的断裂破碎带,产状 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}/NW \angle 85^{\circ} \sim 87^{\circ}$,断裂破碎带主要由断层角砾岩和断层泥组成,在断层面上发育有明显的2组擦痕,产状分别为 $52^{\circ} \angle 30^{\circ}$ 和 $26^{\circ} \angle 7^{\circ}$ 。根据擦痕的穿切关系和所指示断裂的运动特征判断,水平擦痕呈右行晚于左行倾斜擦痕(图2i),表明NE向断裂形成之后又经历了2期的构造变形。

3.2 构造岩类型和结构特征

地表露头、钻孔及显微构造中,NE向破碎带内发育的构造岩主要由构造角砾岩、碎裂岩和断层泥组成。破碎带及两侧往往发育多组裂隙,且有穿切错断现象,叠加有铀矿化蚀变作用。

印支期花岗岩体出露的羊角脑矿区,揭示NE向断裂特征的钻孔(ZK2703、ZK2705、ZK5102)中均可见断裂带从中心至两侧构造岩,依次可分为石英、碎裂岩(断层角砾岩)、碎裂花岗岩和未变形花岗岩。钻孔中破碎带位置可见有硅质和岩体成分的构造角砾以及多期呈切割、错断关系的微裂隙,并充填有石英、方解石及原生铀矿物等(图3a~d)。此外,钻孔碎裂岩中发育有纤维状、放射状钙铀云母和鳞片状铜铀云母,以及赤铁矿、水云母等矿化蚀变现象,显示NE向断裂的脆性变形和多期构造-热液活动特征(图3e)。同样,在震旦-寒武系浅变质岩出露区,NE向断裂带岩石破碎,裂隙发育。如苦竹垄矿区钻孔ZK2701中,断裂带中岩石碎裂,脆性变形特征明显,裂隙发育,多充填石英、黄铁矿,且晚期石英脉切穿早期黄铁矿脉(图3f)。

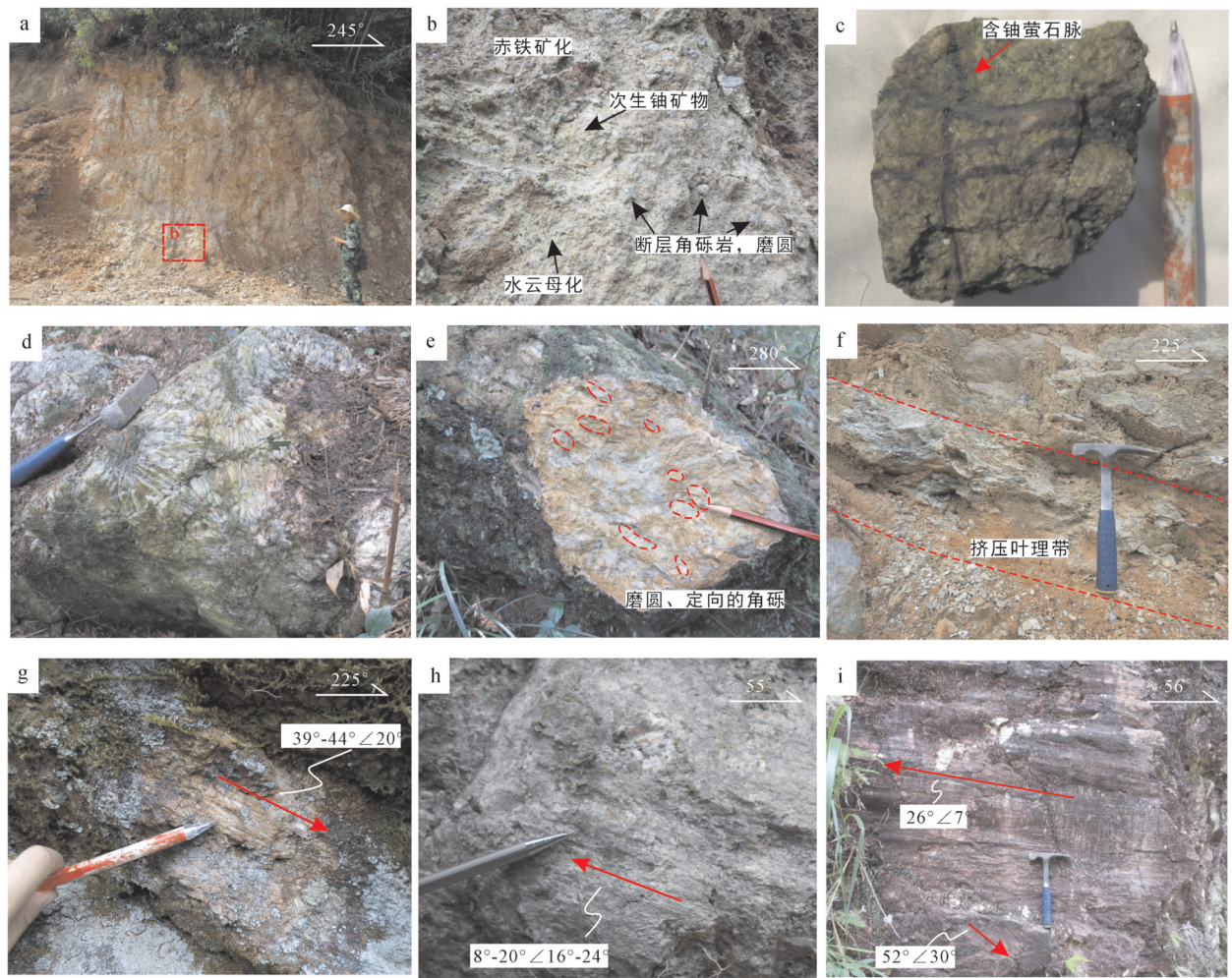


图2 研究区NE向断裂产出特征

a—羊角脑矿区NE向断裂破碎带特征;b—图a的局部放大,可见磨圆的构造角砾(既有岩体角砾,又有硅质角砾),赤铁矿化、水云母化及次生铀矿物;c—牛尾岭地区NE向断裂旁侧岩体中发现2期含铀萤石脉的穿插;d—庙背垅矿区集溪河旁NE向断裂带内部发育放射状石英;e—庙背垅集溪河旁NE向断裂带边部内侧构造角砾的磨圆和定向;f—庙背垅集溪河旁NE向断裂带边部外侧发育的岩石碎屑压扁现象;g,h—横坑NE向断裂带内部发育的左行正断擦痕和右行压扭擦痕;i—五里凹地区NE向断层面上发育的2期擦痕

Fig.2 The characteristics of NE-trending fault in the study area

a- Characteristics of NE-trending fault in Yangjiaobao ore district; b- Partial enlargement of Fig. a, development of breccias (including granite and siliceous breccias), hematitization, hydromicazation and secondary uranium mineral; c- Two-phase of uranium-bearing fluorite veins developed in granite mass near the NE-trending fault, Niuweiling area; d- Radial quartz developed within the NE-trending fault zone in Miaobeilong area; e- Breccias with roundness and orientation developed within the NE-trending fault, Miaobeilong; f- Rock fragments flattened on the side of the NE-trending fault, Miaobeilong; g and h- Sinistral and dextral slickensides developed on the NE-trending fault plane, Hengkeng; i- Two-phase of slickensides developed on the NE-trending fault in Wuliao area

通过显微构造特征分析,鹿井地区NE向断裂带内构造岩显示脆性破裂,石英、长石等都表现为机械破碎。镜下构造岩表现为碎裂组构和碎斑组构,碎斑为长石和石英,裂隙中多充填了含铀的石英脉,部分薄片可见多组方向、多期次具穿切关系的石英脉(图3g~i)。

结合地表NE向破碎带的产出特征,带内出露

的构造岩包括构造角砾岩、碎裂岩和断层泥,构造角砾岩、碎裂岩往往形成挤压透镜体或磨圆较好的角砾,破碎带内热液蚀变作用强烈并叠加有铀矿化作用,显示出NE向断裂破碎带属浅地表的脆性破裂。从破碎带的内部结构分析:构造角砾岩多具有一定的磨圆性,成分既有岩体角砾、又含硅质角砾;带内发育有多组方向、多期次微裂隙或细脉,

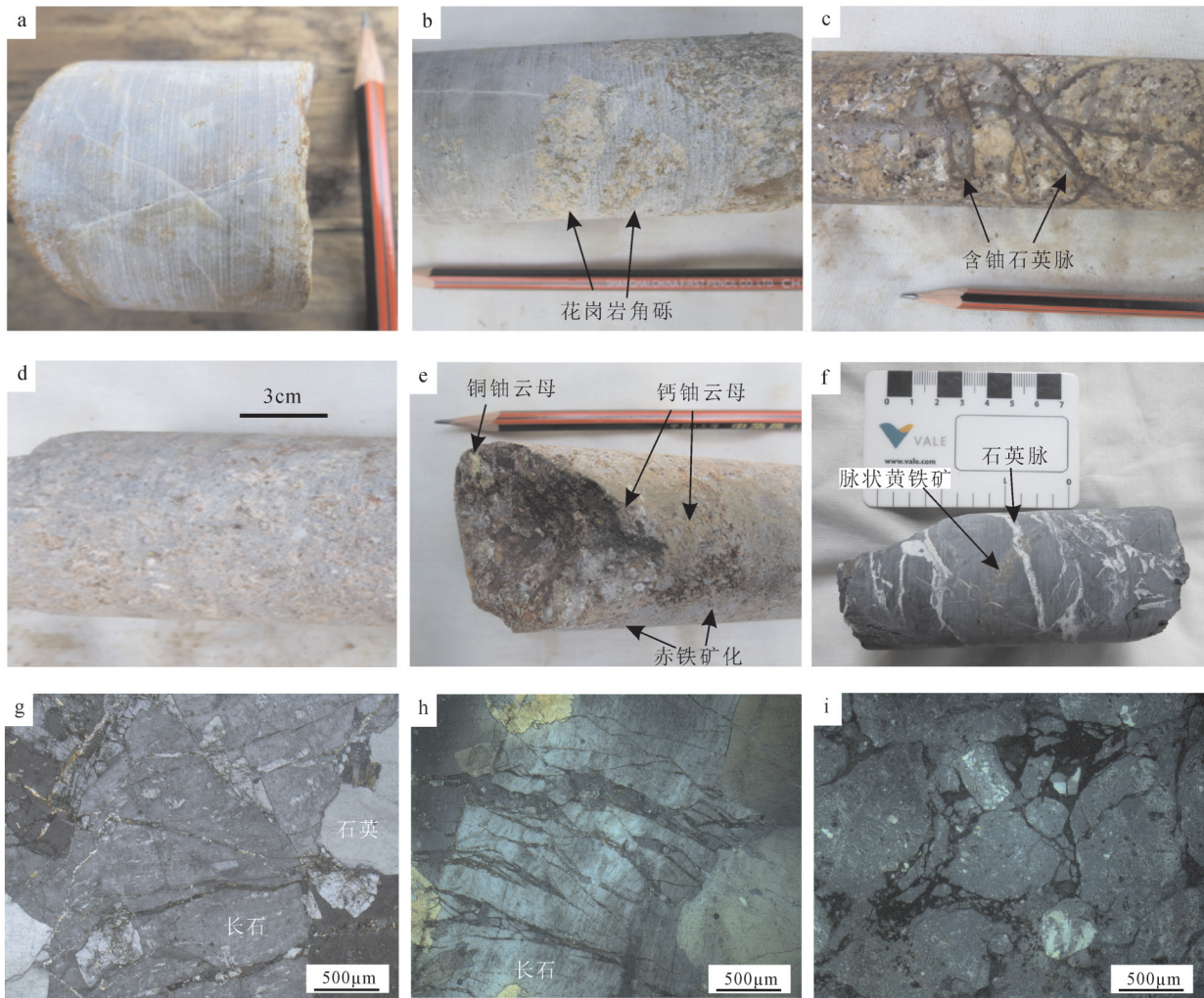


图3 NE向断裂构造岩钻孔岩芯及显微变形特征

a-d—羊角脑揭露NE向断裂的钻孔岩芯(ZK2705):依次为石英、花岗碎裂岩、碎裂花岗岩和未变形花岗岩;e—钻孔ZK2705,316 m处破碎带中发育的次生铀矿物和赤铁矿化;f—苦竹垅ZK2701,134.2 m处寒武系浅变质岩中发育的2期裂隙,晚期充填的石英切断早期充填的黄铁矿;g-h—分别为庙背垅构造岩微观变形特征,碎裂组构,裂纹中充填黄铁矿、含铀石英和萤石,均为正交偏光;i—横坑花岗岩碎斑组构,正交偏光

Fig. 3 Drilling cores and microstructure deformation characteristics of tectonic rock in NE-trending fault

a-d—Characteristics of drilling cores (ZK2705) in Yangjiaobao area, which are quartz, granitic cataclasite, cataclastic granite, undeformed granite, respectively; e—Secondary uranium minerals and hematitization in ZK2705, 316 m; f—The later stage of quartz-veins cutting across early pyrite-veins in Cambrian metamorphic rock, 134.2 m, K2701;g-h—The micro-deformation of tectonite in Miaobeilong area: cataclastic fabric, with the fractures fillings being pyrite, uranium quartz and fluorite (crossed nicols); i—Porphyroclastic texture of granite in Hengkeng area, crossed nicols

微裂隙切穿了岩体中的石英、长石斑晶,其内充填有石英、方解石等,细脉之间错切关系明显;在断裂带内部可见不同方向的擦痕等,这些迹象表明NE向破碎带具有多期构造-热液活动特征。

3.3 力学性质和变形期次

NE向断裂带在区域上多呈舒缓波状延伸,在羊角脑、庙背垅、沙坝子等矿区露头尺度上,断裂面相对平直,两侧岩石出现压扁定向,断裂带内角砾

磨圆较好(图2g),表现出压(扭)性断裂的特征。在断裂带内部以石英为主,发育有不同方位的裂隙,裂隙中充填有石英(含放射状、梳状)、萤石、方解石等,穿切关系明显,部分裂隙面因后期的构造运动发育一系列擦痕,说明NE向断裂形成后力学性质发生了张性和张扭性变化。如沙坝子北部新修公路旁,产状陡立的NE向断裂及断裂北侧寒武系砂质板岩中发育一组产状为 $325^{\circ} \sim 335^{\circ} \angle 66^{\circ} \sim 73^{\circ}$ 的

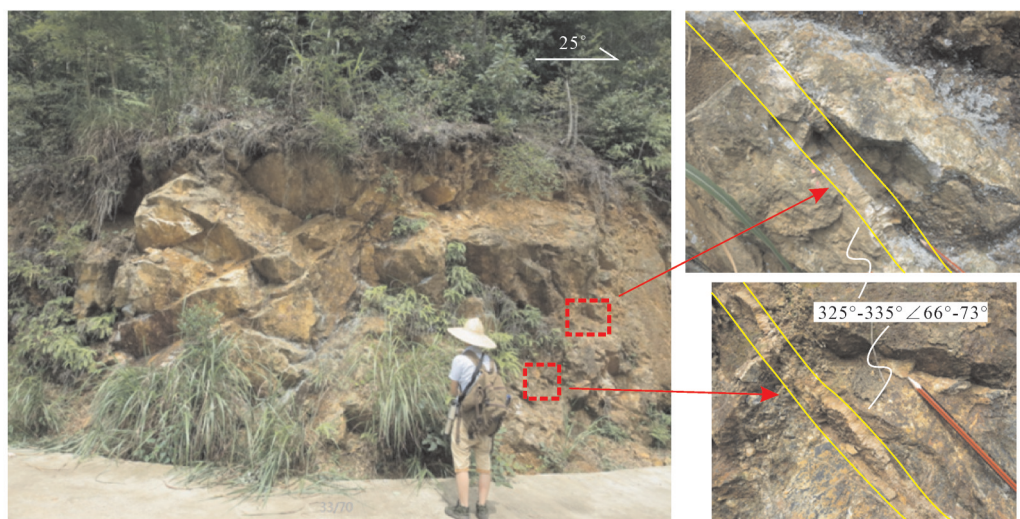


图4 沙坝子矿区NE向断裂内部及旁侧寒武系砂质板岩中发育的梳状石英脉

Fig.4 Comb structure quartz veinlets formed in NE-trending fault zone and Cambrian silty slates, the Shabazi U ore district

多条梳状石英脉(图4),指示NE向断裂后期经历了NW-SE向的拉张作用。

在庙背垅地区NE向断裂面上可以观测到2组擦痕,根据阶步、擦痕形态特征和指示的运动学规律,揭示NE向断裂具有早期左行正断和晚期右行逆冲的性质(图2h,i),表明NE向断裂带受挤压形成后又经历了张-张扭和晚期的压扭性作用。同时,在主断裂附近的中粗粒斑状黑云母花岗岩NE向裂隙面上,也普遍发育右行压扭性质的擦痕,表明断裂带曾经历过一期压扭性的构造变形。

由于研究区缺乏新生的同构造变形矿物,难以用同位素测年技术进行精确定年,变形期次关系主要通过区域构造演化和构造接触关系(如断裂、擦痕的穿插、错切、限制关系等)判别推测。NE向断

裂中放射状石英及梳状石英脉,表明断裂拉张变形发生挤压变形之后,在拉张过程中,断层面上留下左行正断性质的擦痕,后期又被右行逆冲性质的擦痕错断。根据野外测量的断层面产状及擦痕产状要素,利用Win_Tensor软件进行构造应力状态的反演(表1)。结果表明,NE向断裂经历了早期NW-SE向挤压变形,形成一系列挤压叶理;中期主要受NW-SE向拉张变形,形成放射状石英及左行正断擦痕;晚期主要受NWW-SEE向挤压变形,形成右行压扭的擦痕。

地质特征表明,鹿井地区NE向主断层切穿白垩纪之前的地层和印支期及燕山期花岗岩,燕山期花岗岩Rb-Sr等时线年龄为(155.2±5.45) Ma(吴俊奇等,1998),与诸广山地区燕山期岩体锆石U-Pb

表1 基于断层要素恢复NE向断裂古应力场演化特征

Table1 Parameters of paleo-stress field about NE-trending fault based on fault element recovery

期次	依据	观测位置	断层产状	擦痕产状	最大主应力方向
早期	断裂带两侧发育有挤压叶理	庙背垅 羊角脑	130°~140°∠35°~60° 走向NE,倾角陡立		NW-SE向挤压
中期	放射状石英,梳状英脉、左行正断性质的擦痕	沙坝子	走向50°,倾角陡立,梳状石英脉 325°~335°∠66°~73°		NW-SE向拉张
		横坑	317°∠82°	39°~44°∠20°	
		五里凹	320°~330°∠85°~87°	52°∠30°	
晚期	右行逆冲性质擦痕切穿正断性质的擦痕	横坑	330°~337°∠87°	8°~20°∠16°~24°	NWW-SEE向挤压
		五里凹	320°~330°∠85°~87°	26°∠7°	

年龄一致(Deng et al., 2012)。在中晚侏罗世—早白垩世期间,由于太平洋板块向华南大陆低角度俯冲,华南处于NW-SE向挤压背景下,形成一系列褶皱和断裂(Dong et al., 2008; 张岳桥等, 2009; Li et al., 2014)。由此推测,NE向断层的形成时间应为晚侏罗世至早白垩世之间,断裂性质表现为压性,发育挤压叶理和定向磨圆角砾(图2e、f)。断裂带内放射状、梳状石英以及指示正断的擦痕(图2d、g,图4)说明断裂形成之后经历了张—张扭性变形,推测为华南白垩纪—古近纪伸展作用结果(胡瑞忠等, 2004; 张岳桥等, 2012)。张万良和邹茂卿(2013)统计分析了包括诸广山地区在内的华南130个铀矿床(点)成矿年龄,发现华南铀成矿作用主要发生在145.5 Ma以来,约占全部年龄的97%,其中,约90.7%的年龄集中在白垩纪和古近纪,6.1%的年龄分布新近纪以来。说明白垩纪—古近纪伸展背景下伴随着一系列岩浆—流体—铀成矿作用和断陷盆地。庙背垅地区断裂面上普遍发育的右行擦痕及五里凹地区观测的2期擦痕(图2h、i),说明NE向断裂晚期又经历了右行压扭变形,判断为新近纪以来中国东南部受到强烈挤压应力作用,在诸广山中部地区造成了右行压扭效应(李建威和李先福, 1999; 许志琴和张国伟, 2013; 王东升和张宏远, 2014)。根据野外构造岩特征、断裂力学性质、擦痕切割关系及运动剪切指向分析,诸广山中部鹿井地区NE向断裂带至少存在3个主要期次活动:早期(晚侏罗世—早白垩世)的压性变形,中期(早白垩世—古近纪)的张—张扭性和晚期(新近纪)的右行压扭变形。

4 其他方位断裂

30 m空间分辨率DEM影像及野外调查发现,鹿井地区除NE向规模大、出露明显的断裂外,另外发育近EW向、NW向及NS(NNE)向3组方向的断裂,规模相对较小,呈相互切割,组成网脉状、棋盘状的构造格局,且多被NE向断裂限制(图5a)。

近EW向断裂主要分布在丰州盆地以北,图5a中可见大致展布特征,野外植被覆盖较为严重,未观测到明显露头及产状数据。沙坝子矿区,寒武系浅变质岩系中多发育一组走向为NW 325° ~ 330° 的密集裂隙面,倾向NE或SW,倾角陡立,断裂多表现压性性质,构造带内岩石发生脆性破裂为主。该处

NW向断裂破碎带宽数米,最宽处十多米,野外延伸长度不清。在庙背垅地区燕山期花岗岩中发育的NE向断裂面上可见具右行特征的一组擦痕,产状 305° ~ 320° ∠ 35° ~ 50° (图5b),说明该区NE向断裂之后发生过右行压扭活动。横坑附近,印支期花岗岩中发育有一组产状为 15° /NW∠ 85° 的断裂和派生的一组次级剪裂隙,指示NNE向断裂的右行剪切运动(图5c)。

通过野外观测,近EW向、NW向和NS(NNE)向的断裂均具脆性变形特点,属研究区的次级构造。依据3组方位断裂的空间位置及运动特点,判断3组断裂为NE向断裂晚期发生的右行压扭变形的派生构造。

5 断裂控矿特征分析

5.1 断裂对矿体形态、规模的控制

诸广山中部地区铀矿床多产于NE向断裂带中,如羊角脑矿床、高昔矿床、鹿井矿床、牛尾岭矿床等。野外调研发现,铀矿体均赋存断裂破碎带中,矿体产状与断裂产状一致,倾角较陡,以NE向断裂带和旁侧次级裂隙为主,既含有原生富铀矿体,又含自形程度高的次生铀矿物,并伴生有赤铁矿化、黄铁矿化、绿泥石化、水云母化、钾化等矿化蚀变现象。少量以次生铀矿或矿化蚀变形式发育在其他方向的断裂中,伴有一些赤铁矿化、水云母化等以及伽马异常。

研究区铀矿床控矿构造表现为局部舒缓,整体平直的线性断裂,因而矿体和矿化蚀变的形态范围也表现为舒缓波状延伸,呈脉状展布,受断裂构造控制明显。如鹿井矿区325 m中段,NE向断裂带中充填有脉状富铀矿体以及硅化、赤铁矿化等蚀变(图6a、b)。羊角脑矿区,铀矿体及与硅化、水云母化等蚀变沿NE向断裂破碎带发育(图6c),ZK2705和ZK5102揭示的NE向断裂破碎带位置发育鳞片状、纤维状钙铀云母(图6d)和铜铀云母(图6e),单个晶形可达数毫米,说明NE向断裂带控制了铀矿(化)体的发育。

所有矿区均伴随不同程度的矿化蚀变现象,自围岩至矿体大致可分为绿泥石化、水云母化、钾化、赤铁矿化和硅化,这些蚀变具有围绕断裂破碎带渐变发育特征。铀矿体产状和空间分布特征表明,研

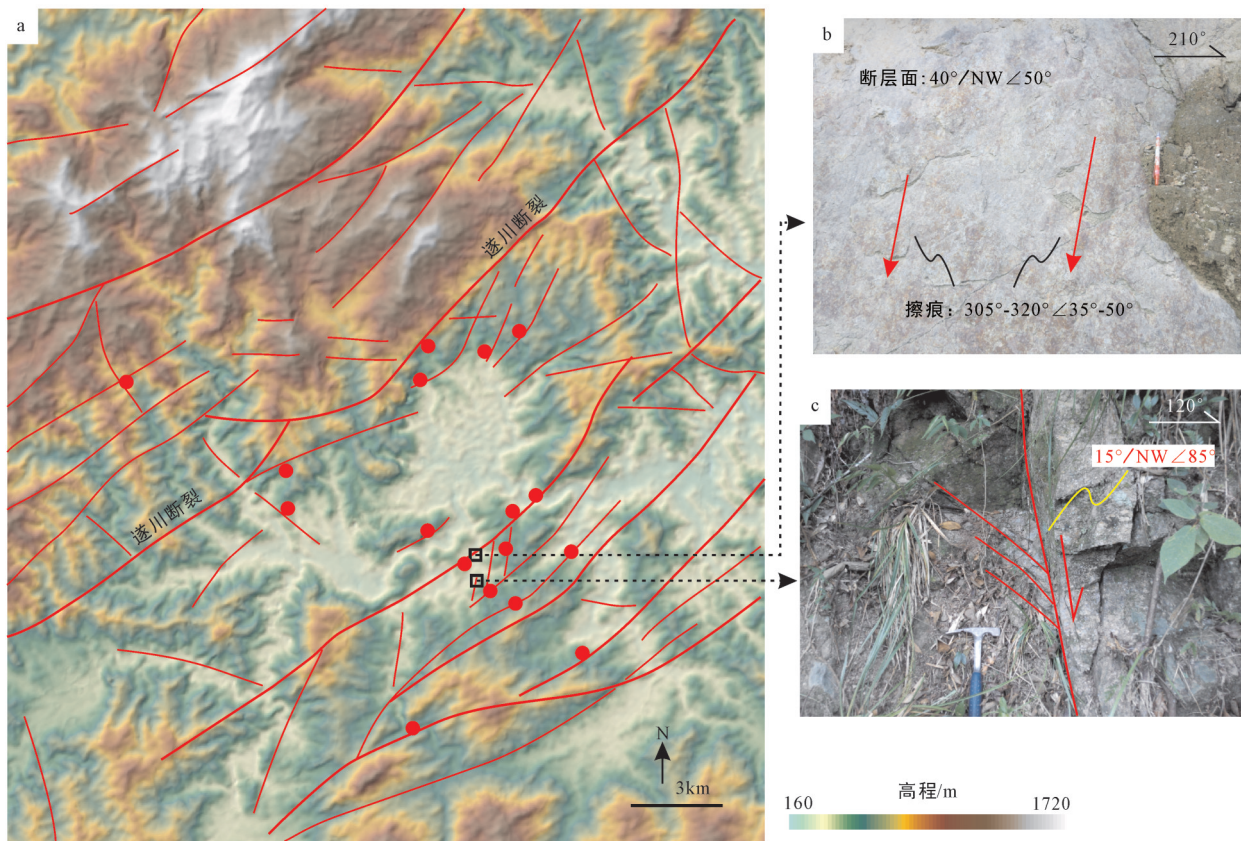


图5 研究区DEM及断裂特征

a—研究区不同方位断裂;b—庙背垅集溪河旁NE向断层面上发育的擦痕;c—横坑处NNE向断裂运动特征及次级裂隙

Fig. 5 DEM and fault characteristics in the study area

a—The faults in different directions; b—The striations on the NE-trending fault in Miaobeilong; c—The motion characteristics and secondary fractures of NNE-trending fault in Hengkeng

究区铀矿(化)体主要受NE向断裂控制。

5.2 断裂特征与铀成矿关系

诸广山中部鹿井地区,铀矿体赋存于不同岩性的地质体(不同期次花岗岩、震旦—寒武系浅变质岩等)中,多数铀矿发育于燕山期中细粒斑状二云母花岗岩中,少量发育在其他岩体及震旦—寒武纪地层中,如羊角脑矿床发育于燕山期花岗岩,鹿井矿床发育于震旦—寒武纪地层,部分铀矿体发育于印支—燕山期花岗岩。野外观测发现,铀矿体的产出与断裂在不同地质体中的发育程度密切相关,铀矿(化)体均发育在构造破碎带附近(图6)。据前人研究,鹿井地区铀成矿时间为燕山晚期至喜山早期(白垩纪和古近纪),存在多期成矿的特点,且不受赋矿围岩的岩性和侵入时代控制(胡瑞忠等,2004;张万良等,2011b;费天伟等,2013;张万良和邹茂卿,2013)。与此同时,华南处于伸展构造背景,形

成很多张性空间,为铀成矿物质的沉淀提供了十分有利的构造环境,铀矿体定位于断裂带内,可见该区断裂对铀矿的主导控制作用。

前已述及,NE向断裂经历了早期(晚侏罗世—早白垩世)的压性变形和晚期(早白垩世—古近纪)的张扭性变形,使得早期的压性空间转化为张性的开放性空间,易于成矿热液的运移并在有利的构造位置沉淀,即主断裂转折、拐弯及与分支断裂交汇部位成矿。此外,在断裂带内部和周边发育多组裂隙,充填有石英、萤石、方解石等,各细脉之间呈网脉状,且具有相互穿插错断现象,显示多期的构造应力作用和热液活动,对应该区多个铀成矿年龄,而多期的热液活动也有助于形成富铀矿体(张鸿,2008)。新近纪以来,即主成矿期后发生的右行压扭变形及派生的其他方位次级构造对矿体存在改造作用,一方面使得先成铀矿体错移破坏,产生一

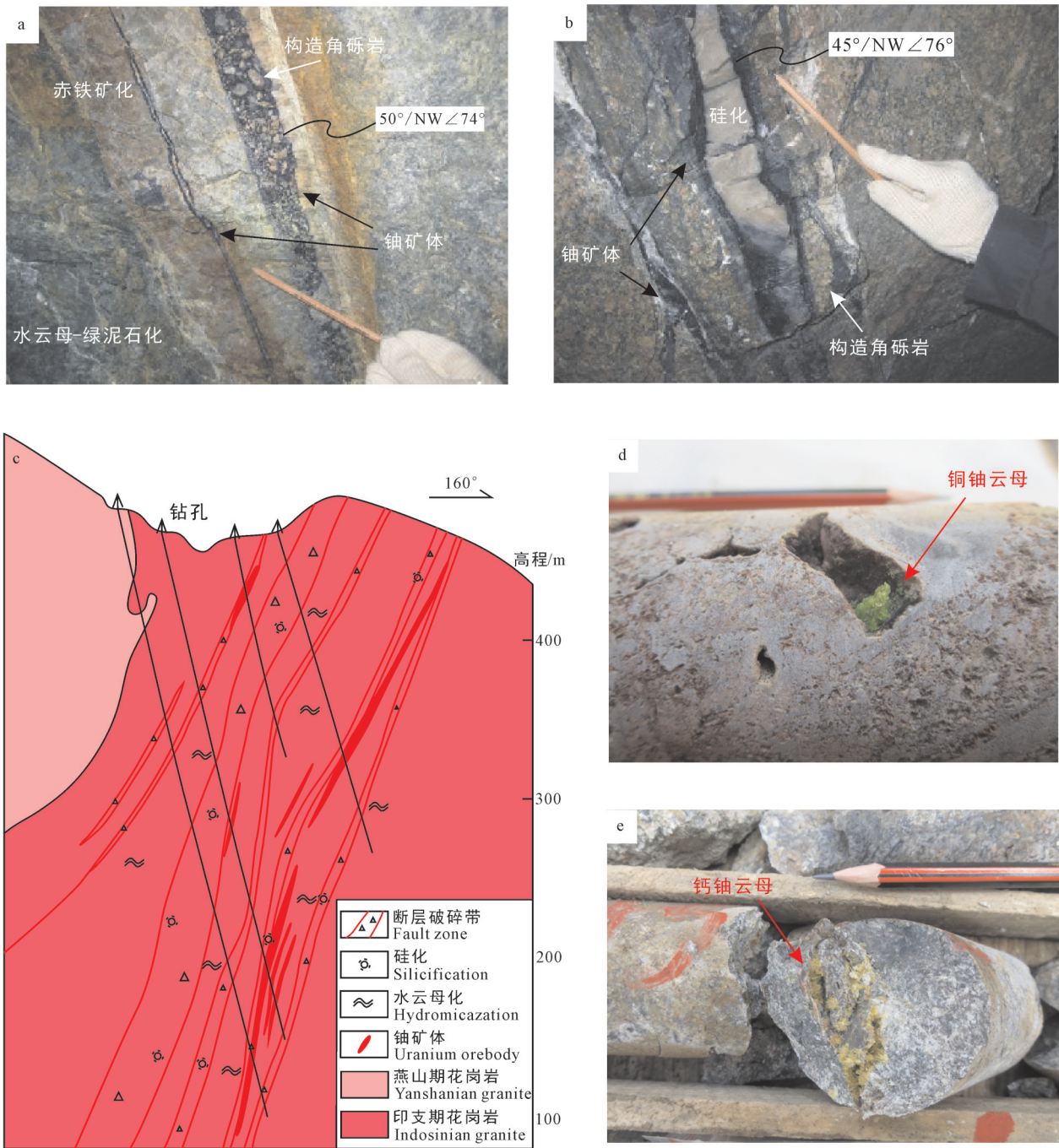


图6 研究区铀矿体、矿化特征

a, b—鹿井铀矿床 325 m 中段铀矿体沿构造破碎带发育; c—羊角脑矿区 3 号勘探线剖面图; d—羊角脑矿区 ZK2705 岩心 309 m 处片状铜铀云母发育在构造孔洞中; e—羊角脑 ZK5102 岩心 347 m 处构造裂隙中发育放射状钙铀云母

Fig.6 The features of uranium orebody and mineralization in the study area

a, b—Uranium orebodies developed in the structural fracture zone, 325 m, the Lujing uranium deposit; c—Geological section along No. 3 exploration line in the Yangjiaonao deposit; d—Chalcolites developed in structural holes, 309 m, ZK2705, the Yangjiaonao deposit; e—Radial calcocuranites developed in structural fractures, 347 m, ZK5102, the Yangjiaonao deposit

些次生铀矿物,一方面也可作为赋矿空间为新近纪以来的含铀热液提供沉淀场所,特别是与NE向断裂的交汇部位,形成部分矿体或矿化蚀变现象,如沙坝子铀矿体赋存在NW向次级断裂中。

5.3 断裂演化与找矿启示

根据研究区地质背景,断裂、擦痕相互穿切关系以及铀矿体产出特征,结合铀成矿时代,认为鹿井铀矿成矿早期(晚侏罗世—早白垩世)为NW-SE向挤压,形成NE向断裂,可见绿泥石、水云母等矿化蚀变发育在挤压叶带内;主成矿期(早白垩世—古近纪)为NW-SE向伸展,即燕山晚期至喜山早期,导致NE向断裂力学性质变为张性、张扭性,有利于成矿物质的迁移富集,与铀矿体密切相关的矿化蚀变为硅化、赤铁矿化、黄铁矿化和水云母化;主成矿期后(新近纪以来)发生右行剪切作用,形成一系列近EW向、NW向和NS(NNE)向次级断裂,改造先成铀矿体。可见,构造对成矿的控制主要体现在构造对含矿热液迁移和分布以及矿体改造的控制,最终形成构造—铀矿体—蚀变为一体的表现形式。

分析鹿井地区不同方位的断裂特征和控矿规律,认为NE向断裂是良好的导矿和容矿构造,在断裂扩张时期正好是铀成矿集中时间,因此在断裂转折、弯曲等部位会存在品位较好、厚度较大的原生铀矿体。在断裂破碎带中发育的硅化、赤铁矿化、黄铁矿化、水云母化、绿泥石化等矿化蚀变可能指示铀矿体的存在。由于NE向断裂活动时间长,力学性质发生改变,赋存的矿体和矿化现象整体上不均匀或不连续。新近纪以来该区发生的右行压扭变形改造先成铀矿体,同时在次级断裂中可形成更晚期(新近纪以来)铀矿(化)体,特别是与NE向断裂的交汇部位。

6 结 论

(1) 诸广山中部鹿井铀矿田主构造为NE向断裂,构造岩特征揭示本区属浅层次构造变形,至少经历了早期(晚侏罗世—早白垩世)的压性、中期(早白垩世—古近纪)的张—张扭性和晚期(新近纪)的右行压扭变形。晚期的右行压扭作用派生出近EW向、NW向和NS(NNE)向次级断裂。

(2) 鹿井地区铀矿(化)体及围岩蚀变主要受NE向脆性断裂破碎带控制。在铀主要成矿期(白

垩纪—古近纪),断裂形成的一系列张性空间主导了矿体定位,根据NE向断裂演化特点,沿断裂带走向和倾向方向均存在富铀矿体,但矿化不连续。新近纪以来的右行压扭变形破坏先成矿体的同时,在其他方位次级断裂中也会出现部分铀矿体。

致谢:在野外工作过程中,得到湘核302大队同仁们的大力支持和帮助;成文过程中,编辑部老师提出了诸多好的意见和建议。在此一并表示衷心感谢。

References

- Bierlein F P, Gray D R, Foster D A. 2002. Metallogenic relationships to tectonic evolution: the Lachlan Orogen, Australia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 202(1): 1–13.
- Chen Xuanhua, Chen Zhengle, Yang Nong. 2009. Study on regional mineralizations and ore-field structures: building of mineralizing tectonic systems[J]. *Journal of Geomechanics*, 15(1): 1–19(in Chinese with English abstract).
- Chen Zhengle, Wang Pingan, Wang Yong, Shao Fei, Tang Xiangsheng, Xu Jinshan, Yu Jianfa, Han Fengbin, Sun Yue. 2013. Ore-controlling tectonic analysis and ore-prospecting in Shannan mining area of Xiangshan uranium ore-field, Jiangxi[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 35(2): 8–18(in Chinese with English abstract).
- Deng P, Ren J S, Ling H F, Shen W Z, Sun L Q, Zhu B, Tan Z Z. 2012. SHRIMP zircon U–Pb ages and tectonic implications for Indosinian granitoids of southern Zhuguangshan granitic composite, South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(13): 1542–1552.
- Dong S W, Zhang Y Q, Long C X, Yang Z Y, Ji Q, Wang T, Hu J M, Chen X H. 2008. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the “Yanshan Movement” [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 334–347.
- Fei Tianwei, Luo Yi, Sun Xiang. 2013. Ore-forming fluid features and metallogenic model of uranium deposits in Zhuguangshan ore field[J]. *World Nuclear Geoscience*, 30(2): 63–69(in Chinese with English abstract).
- Guo Aimin, Chen Bihe, Chen Jianfeng, Zhou Chao, Si Chengshan, Zheng Zhengfu. 2017. Zircon SHRIMP U–Pb geochronology of granitoids from northern Zhuguangshan granitic composite batholith, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 44(4): 781–792 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, Liu Shen, Zhong Hong, Zhao Junhong, Jiang Guohao. 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic–Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. *Mineral Deposits*, 26(2): 139–152(in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Su Wenchao, Peng Jiantang, Li Chaoyang.

2004. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous – Tertiary in South China[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 153–160(in Chinese with English abstract).
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Johnston S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis[J]. *Earth–Science Reviews*, 134: 98–136.
- Li J W, Zhou M F, Li X F, Fu Z R, Li Z J. 2002. Structural control on uranium mineralization in South China: Implications for fluid flow in continental strike–slip faults[J]. *Science in China(Series D): Earth Sciences*, 45(9): 851–867.
- Li Jianwei, Li Xianfu, Li Zijin, Fu Zhaoren. 2000. The Mesozoic–Cenozoic in tracontinental strike–slip fault system and the associated hydrothermal uranium mineralization in the border area of eastern Hunan and western Jiangxi Provinces[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 15(2): 166–173(in Chinese with English abstract).
- Li Jianwei, Li Xianfu. 1999. Interaction between fluid and rock of Mesozoic–Cenozoic NNE–trending strike–slip fault zone, border region between eastern Hunan and western Jiangxi Provinces, China[J]. *Earth Sciences—Journal of University of Geosciences*, 24(5): 480–483(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua. 1990. The age of granitic magmatism and crustal movement in Wanyang–Zhuguang Mountain[J]. *Science in China (B)*, 7: 747–755(in Chinese).
- 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 Zijin, Fu Zhaoren, Li Jianwei. 1998. Dynamic system analysis of metallogenesis of NEE–trending strike–slip fault–fluid–uranium mineralization in Hunan–Jiangxi border region[J]. *Geoscience*, 12(4): 522–531(in Chinese with English abstract).
- Ma Tieqiu, Kuang Jun, Bai Daoyuan, Wang Xianhui. 2006. Geochemical characteristics and tectonic setting of the early Yanshanian South Zhuguangshan granite in the central segment of the Nanling Mountains[J]. *Geology in China*, 33(1): 119–131(in Chinese with English abstract).
- Mao Jianren, Li Zilong, Ye Haimin. 2014. Mesozoic tectono–magmatic activities in South China: Retrospect and prospect[J]. *Science China: Earth Science*, 44(12): 2593–2617(in Chinese).
- Shao Fei, Zhu Yonggang, Guo Husheng, He Xiaomei, Shao Shang. 2010. Analysis on geological characteristics of uranium metallization and prospecting potential in Lujing orefield[J]. *Uranium Geology*, 26(5): 295–300(in Chinese with English abstract).
- Shen W Z, Ling H F, Li W X, Wang D Z. 2000. Crust evolution in Southeast China: Evidence from Nd model ages of granitoids[J]. *Science in China. (Series D)Earth Sciences*, 43(1):36–49.
- Shen W Z, Zhang Z H, Zheng B T. 1988. Isotope geological studies of granite–type uranium deposits in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1(3): 291–305.
- Shu L S, Zhou X M, Deng P, Wang B, Jiang S Y, Yu J H, Zhao X X. 2009. Mesozoic tectonic evolution of the Southeast China Block: New insights from basin analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 376–391.
- Wang Dongsheng, Zhang Hongyuan. 2014. Discussion on faults, tungsten–tin, anomaly and ore–controlling factors of Chaling area, Southeastern China[J]. *Geoscience*, 28(6): 1225–1233(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhengqing, Guan Taiyang, Lin Ziyu, Feng Zhigang, Xie Yanshi, Chen Liang. 2013. Driving mechanism of structure–magmatic activity and uranium mineralization of Mesozoic and Cenozoic, South China[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 36(4): 349–356(in Chinese with English abstract).
- Wu Ganguo. 1998. Ore field tectonic and metallogenic prediction[J]. *Journal of Geomechanics*, 4(2): 1–4(in Chinese).
- Wu Junqi, Min Maozhong, Zhai Jiangping, Luo Xingzhang, Lai Yitang, Wei Yuanben. 1998. Alkali metasomatic alteration of the granite in middle Chuguang Mountain, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 90–98(in Chinese with English abstract).
- Xie Yanshi, Yin Jianwen, Tan Kaixuan, Tang Zhenping, Duan Xianzhe, Hu Yang, Wang Zhengqing, Li Chunguang, Wang Zhaozhao, Feng Zhigang. 2015. Tectono–magmatic activation and fractal dynamics of hydrothermal uranium ore formation in South China[J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 39(3): 510–519 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqing, Zhang Guowei. 2013. Progress in tectonics and dynamics of China (East Asia)—Forum on frontiers of science & technology: tectonics and dynamics of China (East Asia) [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 43(10): 1527–1538(in Chinese).
- Zhai Yusheng, Lin Xinduo. 1993. *Ore Field Tectonics*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, Li S Z, Dong Y P, Liu S F, He D F, Cheng S Y, Lu R K, Yao A P. 2013. Tectonics of South China Continent and its implications[J]. *Science China: Earth Sciences*, 11: 1804–1828.
- Zhang Hong. 2008. Discussion on relationship between uranium metallogenesis and multiperiodic hydrothermal activities in Hengjian–Gangshangying deposit[J]. *World Nuclear Geoscience*, 25(2): 68–73(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shugen, Yuan Ying, Yao Cuixia. 2014. Petrology and ore–control of Zhuguangshan composite granitic pluton in middle section of Nanling region[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 24(6): 1585–1593(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang. 2011a. Uranium deposit type, characteristics and its spatial distribution in South China[J]. *Mineral Resources and Geology*, 25(4): 265–272(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang, He Xiaomei, Lü Chuan, Wei Jinwen. 2011b. Analysis

- on the metallogenic feature and ore-controlling factors in Lujing uranium orefield[J]. *Uranium Geology*, 27(2): 81–87(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang, Zou Maoqing. 2013. Statistical analysis of the uranium metallogenic ages in South China[J]. *Mineral Resources and Geology*, 27(4): 270–275 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, Cui Jianjun, Shi Wei, Su Jinbao, Li Yong. 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).
- Zhang Yueqiao, Xu Xianbing, Jia Dong, Shu Liangshu. 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234–247(in Chinese with English abstract).
- Zhao K D, Jiang S Y, Chen W F, Chen P R, Ling H F. 2013. Zircon U–Pb chronology and elemental and Sr–Nd–Hf isotope geochemistry of two Triassic A-type granites in South China: Implication for petrogenesis and Indosinian transtensional tectonism[J]. *Lithos*, 160/161: 292–306.
- ### 附中文参考文献
- 陈宣华, 陈正乐, 杨农. 2009. 区域成矿与矿田构造研究——构建成矿构造体系[J]. *地质力学学报*, 15(1): 1–19.
- 陈正乐, 王平安, 王永, 邵飞, 唐湘生, 徐金山, 喻建发, 韩凤彬, 孙岳. 2013. 江西相山铀矿田山南矿区控矿构造解析与找矿预测[J]. *地球科学与环境学报*, 35(2): 8–18.
- 费天伟, 罗毅, 孙祥. 2013. 诸广山成矿区铀矿床成矿流体地球化学特征与成矿模式[J]. *世界核地质科学*, 30(2): 63–69.
- 郭爱民, 陈必河, 陈剑锋, 周超, 司程山, 郑正福. 2017. 南岭诸广山北体复式花岗岩锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及多期岩浆活动[J]. *中国地质*, 44(4): 781–792.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘燊, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题[J]. *矿床地质*, 26(2): 139–152.
- 胡瑞忠, 毕献武, 苏文超, 彭建堂, 李朝阳. 2004. 华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J]. *地学前缘*, 11(1): 153–160.
- 李建威, 李先福, 李紫金, 傅昭仁. 2000. 湘赣边区中生代走滑断裂系统及对热液铀成矿作用的控制[J]. *地质找矿论丛*, 15(2): 166–173.
- 李建威, 李先福. 1999. 湘赣边中生代走滑断裂带的流体–岩石相互作用[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 24(5): 480–483.
- 李献华. 1990. 万洋山—诸广山花岗岩复式岩基的岩浆活动时代与地壳运动[J]. *中国科学(B辑)*, 7: 747–755.
- 李紫金, 傅昭仁, 李建威. 1998. 湘赣边区 NNE 向走滑断裂–流体–铀成矿动力学分析[J]. *现代地质*, 12(4): 522–531.
- 马铁球, 邝军, 柏道远, 王先辉. 2006. 南岭中段诸广山南体燕山早期花岗岩地球化学特征及其形成的构造环境分析[J]. *中国地质*, 33(1): 119–131.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造–岩浆活动研究: 现状与前景[J]. *中国科学(地球科学)*, 44(12): 2593–2617.
- 邵飞, 朱永刚, 郭湖生, 何晓梅, 邵上. 2010. 鹿井矿田铀成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. *铀矿地质*, 26(5): 295–300.
- 王东升, 张宏远. 2014. 湘东南茶陵地区地质体断层、钨锡异常与控矿因素探讨[J]. *现代地质*, 28(6): 1225–1233.
- 王正庆, 管太阳, 林子瑜, 冯志刚, 谢焱石, 陈亮. 2013. 华南中生代构造–岩浆活动驱动机制与铀成矿研究进展[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 36(4): 349–356.
- 吴淦国. 1998. 矿田构造与成矿预测[J]. *地质力学学报*, 4(2): 1–4.
- 吴俊奇, 闵茂中, 翟建平, 罗兴章, 赖贻堂, 魏元泵. 1998. 华南诸广山复式岩体中段花岗岩的碱交代蚀变[J]. *岩石学报*, 14(1): 90–98.
- 谢焱石, 尹建文, 谭凯旋, 唐振平, 段先哲, 胡杨, 王正庆, 李春光, 王昭昭, 冯志刚. 2015. 华南地区构造–岩浆活化与热液铀成矿的分形动力学[J]. *大地构造与成矿学*, 39(3): 510–519.
- 许志琴, 张国伟. 2013. 中国(东亚)大陆构造与动力学——科学与技术前沿论坛“中国(东亚)大陆构造与动力学”专题进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 43(10): 1527–1538.
- 翟裕生, 林新多. 1993. 矿田构造学[M]. 北京: 地质出版社.
- 张鸿. 2008. 横河一岗上英矿床多期热液活动与铀成矿关系的探讨[J]. *世界核地质科学*, 25(2): 68–73.
- 张术根, 袁莹, 姚翠霞. 2014. 南岭中段诸广山复式花岗岩岩石学及其控矿作用[J]. *中国有色金属学报*, 24(6): 1585–1593.
- 张万良, 何晓梅, 吕川, 韦金文. 2011b. 鹿井矿田成矿地质特征及控矿因素[J]. *铀矿地质*, 27(2): 81–87.
- 张万良. 2011a. 华南铀矿类型、特点及其空间分布[J]. *矿产与地质*, 25(4): 265–272.
- 张万良, 邹茂卿. 2013. 华南铀矿成矿年龄统计分析[J]. *矿产与地质*, 27(4): 270–275.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. *地球学报*, 33(3): 257–279.
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 舒良树. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的变形记录[J]. *地学前缘*, 16(1): 234–247.