郯庐断裂带西山驿岩体构造变形分析

李振伟[1)],宋传中[1)],李加好[1)],王微[2)],王阳阳[1)],任升莲[1)],李海龙[1)],袁芳[1)],韩旭[1)],兰瑞烜[1)]

1)合肥工业大学,资源与环境工程学院,合肥,230009;

2)东华理工大学,核资源与环境国防重点实验室,南昌,330013

内容提要:地处肥东岩群西侧的西山驿岩体,由于郯庐断裂带左行平移活动的影响而发生韧性变形。根据野外调查和室内研究,岩体的西侧边界由于受到郯庐断裂带次级剪切带的影响,导致变形强度比岩体内部强烈,岩性上可分为边界糜棱岩带和内部片麻岩带。本文对边界韧性剪切带进行了变形温度估算,剪切类型分析,应力场的方向、差应力大小、应变速率计算。结果显示剪切带糜棱岩的变形温度约为500~600℃,为低角闪岩相变质,内部片麻岩变形温度约为400~530℃,为高绿片岩相到低角闪岩相变质;糜棱岩样品中矿物变斑晶的涡度值介于0.86~0.94之间,剪切类型为简单剪切为主的一般剪切;古应力方向为164°~171°,最低差应力下限值为20.02~23.08MPa,应变速率为1.35×10^{-13}~$4.93\times10^{-13}s^{-1}$。在中、晚侏罗世到早白垩世期间,由于太平洋板块的斜向汇聚作用,郯庐断裂带发生构造活动,而通过上述西山驿岩体的构造变质变形分析结果,反演郯庐断裂带的变形规律,并且希望借此在以后的研究中归纳该时期中国东部的构造演化过程。

关键词:郯庐断裂带;西山驿岩体;韧性剪切带;糜棱岩;构造变形解析

郯庐断裂带作为中国东部的一条巨型剪切带,自发现以来,一直是国内外地质学家关注的热点(徐嘉炜,1980,1985;乔秀夫,1981;徐嘉炜等,1992;汤加富等,2002)。目前,人们普遍认为郯庐断裂带在中生代以来经历了多期次多阶段构造演化过程(徐嘉炜等,1995;陈宣华等,2000;侯明金等,2003,2006;朱光等,2004a,2016;张鹏等,2007;张岳桥等,2008;万桂梅,2009;王书琴等,2012;刘备等,2015),演化历史极为复杂,记录了大量中国东部构造演化的信息,这也使得郯庐断裂带成为研究中国东部构造活动演化及动力学背景的热点区域。

广义的郯庐断裂带起源于印支期华南、华北两大板块的碰撞过程中(Xu Jiawei et al.,1986;Yin An et al.,1993;徐树桐等,1992;李曙光等,1993;Li Zhengxiang,1994;万天丰等,1996;Zhang Kaijun,1997;董树文等,1998;Chung Sunlin,1999;王小凤,2000;肖文交等,2000;杨文采等,2001;汤加富等,2003;朱光等,2004b,2009;Zhu Guang et al.,2004;胡惟等,2014;赵田等,2014a,2014b,2016),并在中、晚侏罗世到早白垩世期间,由于太平洋板块的斜向汇聚产生压扭性构造应力背景下,使得郯庐断裂带发生过一次大规模的左行走滑剪切活动(Xu Jiawei et al.,1987;朱光等,1995,2002,2005;宋传中等,2003),在断裂带内产生了一系列的北东向或北北东向的构造格局。这为之后郯庐断裂带的活动演化建立了新的格架。所以,郯庐断裂带是中国东部中生代特提斯构造域与滨太平洋构造域的构造转换节点(宋传中等,2010a,2010b,2011,2014)。

韧性剪切带作为揭示断裂带变形变质特征的重要研究对象,分布于郯庐断裂带各个区段内。其中张八岭隆起南部肥东群内的韧性剪切带最具典型特征。有关郯庐断裂带变形变质温度以及变质级别的研究尚显不足。朱光等(2005)通过糜棱岩中变形矿物组合与矿物变形特征得到此地区属于中—高绿片岩相变质变形环境;王勇生等(2005)通过白云母—绿泥石温度计对本地区糜棱岩进行变形温度的分析得到350~480℃的变形温度。而王微等(2016a,2016b)通过对肥东桃源地区韧性剪切带内糜棱岩进行矿物组合、变形机制以及电子探针分析,得到550~650℃的变形温度,为角闪岩相变质环境。

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41272222)和安徽省公益性地质项目(编号:2016-g-4)的成果。

收稿日期:2018-02-26;改回日期:2019-02-20;责任编辑:章雨旭。Doi:10.16509/j.georeview.2019.02.004

作者简介:李振伟,男,1991年生,博士研究生,构造地质学专业,Email:wflqzhenwei@sina.com。通讯作者:宋传中,男,1954年生,教授,博士生导师,构造地质学专业,Email:czsong69@163.com。

西山驿岩体位于张八岭隆起南段的肥东岩群内。该岩体处于郯庐断裂带内部,区域上表现为左旋错动并且被牵引,整体呈 NE—SW 向展布(图 1、图 5),而顺应郯庐断裂带的构造活动特征,所以其构造变形特征明显受郯庐断裂带的影响。本文仅就该岩体的几何学形态,岩石的变质、变形特征,精细解析郯庐断裂带的运动学指向和应力特征,进一步揭示郯庐断裂带的构造过程。

1 西山驿岩体的地质特征

肥东西山驿岩体发育在郯庐断裂带西侧,东西两侧各发育一条郯庐断裂带的次级韧性剪切带,并且都表现为左旋平移特征;西山驿岩体的几何学形态与两侧剪切带的活动有密切关系(图 1、图 5),由

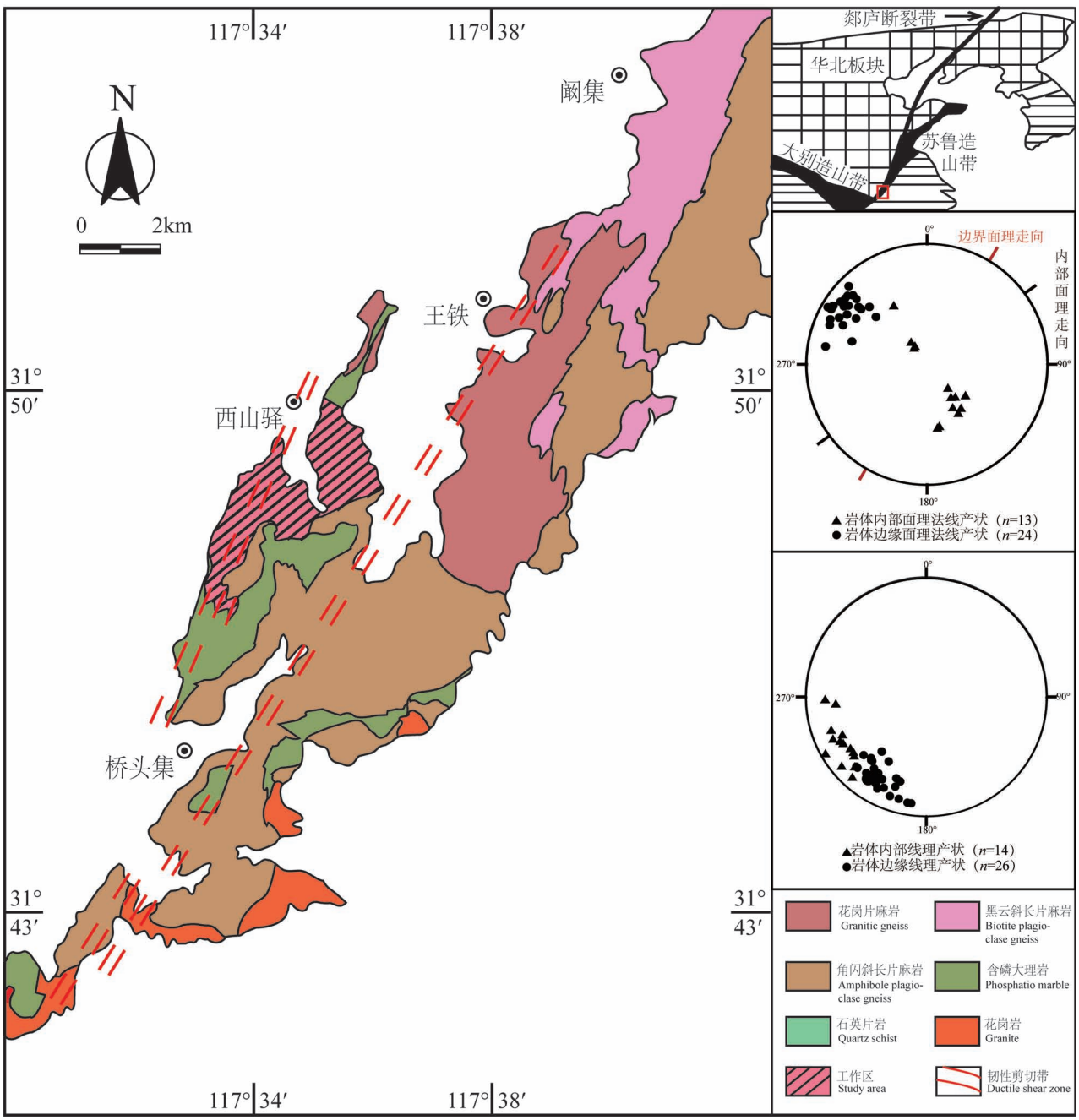


图 1 郯庐断裂带肥东段构造简图及西山驿岩体线面理投影图(据 1/50000 炯炀河幅地质图修改)

Fig. 1 Structural sketch map of the Feidong section of the Tanlu faultzone and lineation and foliation projection of the Xishanyi pluton

(Simplified from the 1/50000 Geological map of Dongyanghe area)

于受到两侧剪切带左行牵引作用,整体构成了区域上的“S—C”组构。但由于第四系覆盖,岩体只出露了西侧一半。

岩体原岩为二长花岗岩,由于两侧韧性剪切带的左行平移作用,岩体整体发生韧性变形,西侧边界剪切带位置最为强烈。所以,根据岩体的变形强度,将岩体分为西侧边界变形较强的长英质糜棱岩(以下简称“糜棱岩带”)和与其相关的岩体内部变形强度较弱的长英质片麻岩(以下简称“片麻岩带”),以此来完整地研究糜棱岩带与片麻岩带的变形差异。

1.1　岩体边界变形特征(“C”面理)

调查和研究发现,糜棱岩带与片麻岩变形特征与整体产状明显不同。首先,糜棱岩带由于遭受强烈的剪切变形,面理、线理发育,矿物颗粒定向排列,

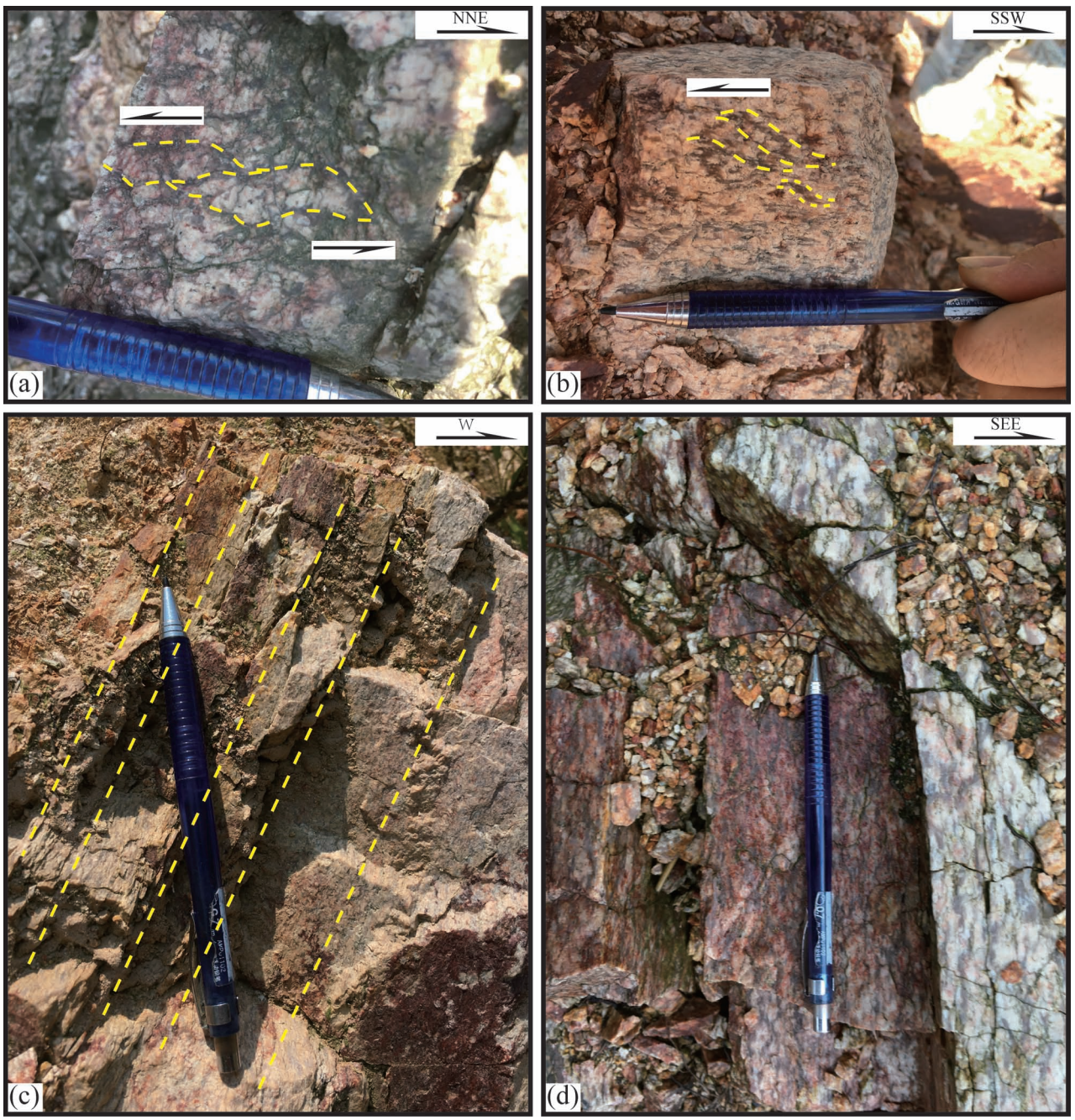


图 2 西山驿岩体构造变形特征

Fig. 2 Thestructural deformation feature of the Xishanyi pluton

(a),(b) S—C 组构指示左旋剪切;(c) 糜棱面理,倾向 SEE,倾角较大;(d) 弱变形片麻岩

(a),(b) S—C fabric indicating sinistral shear sense;(c) foliation of mylonite dipping SEE with high angle;(d) weak deform edgneiss

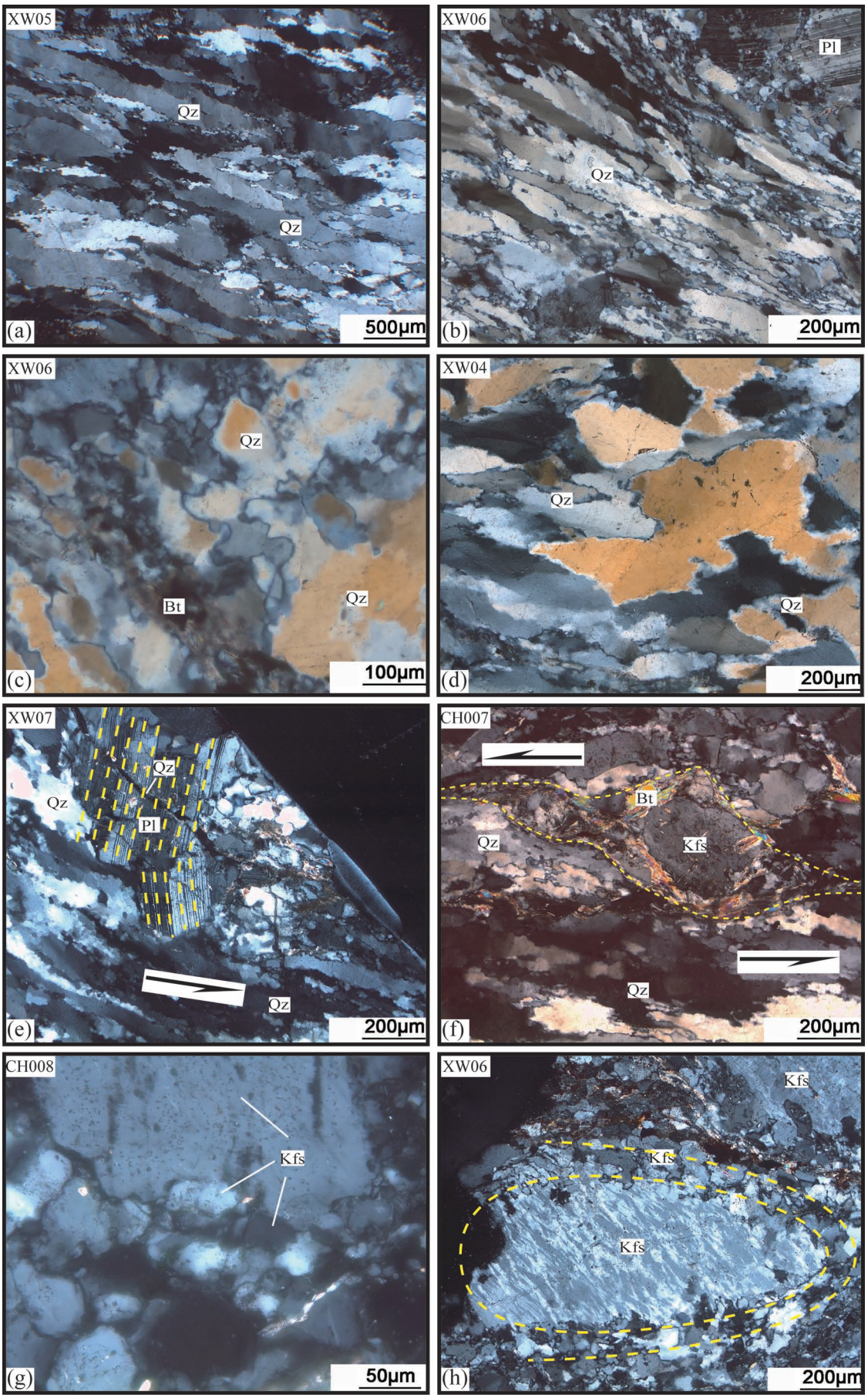

XW05
Qz
Qz
(a)
500μm
XW06
Pl
Qz
(b)
200μm
XW06
Qz
Bt
Qz
(c)
100μm
XW04
Qz
Qz
(d)
200μm
XW07
Qz
Qz
Pl
Qz
(e)
200μm
CH007
Bt
Qz
Kfs
Qz
(f)
200μm
CH008
Kfs
(g)
50μm
XW06
Kfs
Kfs
Kfs
(h)
200μm

图 3 边界糜棱岩显微构造特征

Fig. 3 Microstructural characteristics of mylonite at the boundary

(a)、(b) 拔丝状石英颗粒;(c)、(d) 石英的边界迁移式(GBM)重结晶;(e) 长石脆性破裂;(f) 残斑拖尾指示左旋剪切;(g) 钾长石残斑发生膨凸式(BLG)重结晶;(h) 钾长石的核幔构造

(a),(b) stripped quartz suggesting strong deformation;(c),(d) grain boundary migration of quartz;(e) brittle fracture of feldspar;(f) rotated feldspar porphyroblasts indicating the sinistral shear sense,and the strong plastic deformation of the biotite;(g) bulging type recrystallization of K-feldspar;(h) the core and mantle structure of the K-feldspar

有被明显拉长的现象。露头上 S—C 组构、旋斑等可指示运动学方向为左行剪切(图 2a、b)。糜棱面理平直、密集、稳定(图 2c),走向在 20°~45°,优势走向 30°左右,为 NNE—NE 向,倾向南东;倾角在 65°~85°,较陡。线理走向 20°~40°,优势走向 25°左右,倾伏角在 5°~25°,向 SSW 向缓倾伏。

1.2　岩体内部变形特征("S"面理)

片麻岩因远离剪切带,变形较边界糜棱岩带要弱,部分保留原岩的结构特征,矿物颗粒较大,具有较弱的定向,长石的含量相对变高,代表了岩体中心相变形特征(图 2d)。面理走向在 40°~70°,优势走向 50°左右,为 NE—NEE 向,面理倾向 NW 或 SE,成一定的褶皱形态,倾角在 20°~60°,相对较缓。线理倾伏向 40°~70°,优势方位为 50°左右,倾伏角 2°~16°,向 SSW 缓倾。

通过对比糜棱岩带和片麻岩带的野外地质特征,就变形程度来看,糜棱岩的变形程度要高于片麻岩。再对比两者的产状发现:边界的面理走向 NNE 向,向 SEE 陡倾;线理倾伏向 NNE,向 SSW 缓倾,这与郯庐断裂带肥东段其他韧性剪切带的产状一致,是郯庐断裂带左行走滑兼挤压逆冲的构造特征下的强韧性剪切作用的表现。内部面理走向 NE 向,倾角相对较小,倾向 NW 或 SE 向变动;线理向 NE 向倾伏,与边界线理倾伏角相近,整体表现为低角度的 NE 向滑动特征。

由此,可以看出西山驿岩体的几何学特征完全受郯庐断裂带活动所控制,在郯庐断裂带整体 NNE 向的左行走滑剪切活动时,次级断裂带穿过岩体东、西侧的边界,使岩体整体发生变形,从而在边界位置产生变形较强的糜棱岩,并且顺应区域构造产状;而岩体内部因远离剪切带,只是发生牵引,变形相对要弱,表现出线、面理走向与剪切带有小角度的交切关系。这使得西山驿岩体具有区域上的 S—C 组构特征,大尺度上表现出郯庐断裂带的左行平移特征。

2　显微变形特征

通过调查和研究发现,西山驿岩体为一原岩为二长花岗岩的变形岩体,根据岩体在郯庐断裂带活动中所发生的变形程度可以分为西侧的糜棱岩带和内部的片麻岩带。分别对两类不同的岩石在不同的地方进行采样,室内进行镜下的显微变形研究。(采样点如图 5 所示)

2.1　边界韧性剪切带的显微构造特征

边界韧性剪切带内主要发育糜棱岩,其岩石学特征为:斜长石(15%~20%)、钾长石(20%~30%)、石英(45%~55%)以及很少量的黑云母(<5%),残斑为长石、石英,基质为石英、少量长石以及极少量的黑云母。糜棱结构,片麻状构造。镜下观察矿物变形显著,石英出现波状消光,发生塑性变形,被强烈拉长,部分形成拔丝状构造,颗粒长宽比达 5∶1 左右,有的甚至在 10∶1 以上,具有强烈定向性(图 3a、b)。大部分颗粒边界成港湾状、锯齿状、镶嵌结构,说明发生颗粒边界迁移式(GBM)动态重结晶(图 3c、d),很少一部分为亚颗粒旋转式(SR)向颗粒边界迁移式(GBM)过渡。部分岩石出现膨凸式(BLG)重结晶作用,是叠加在 GBM 以及 SR—GBM 上的,应为后期的热事件所致,但是范围并未涉及岩体整体。

长石变形初期发生脆性变形,出现裂痕甚至是破碎,有的裂隙后期被石英条带充填(图 3e)。另外,部分长石残斑出现波状消光,说明发生塑性变形,有的成枣核状、眼球状,部分可见塑性拖尾,一定程度上指示了运动学方向(图 3f)。并且表面出现变形纹、火焰纹,原生的双晶纹在受力的作用下发生弯曲甚至使长石残斑折断(图 3e)。在裂隙以及边缘位置,出现光洁明亮的新晶,表明发生了膨凸式(BLG)动态重结晶(图 3g),部分出现核幔结构,开始向亚颗粒旋转式(SR)转化(图 3h)。黑云母含量极少,全部以基质的形式存在,顺糜棱面理展布,发生强烈的韧性变形,应为韧性剪切过程中的新生矿物。

2.2　内部片麻岩显微构造特征

片麻岩带岩石的矿物组成与糜棱岩基本一致,

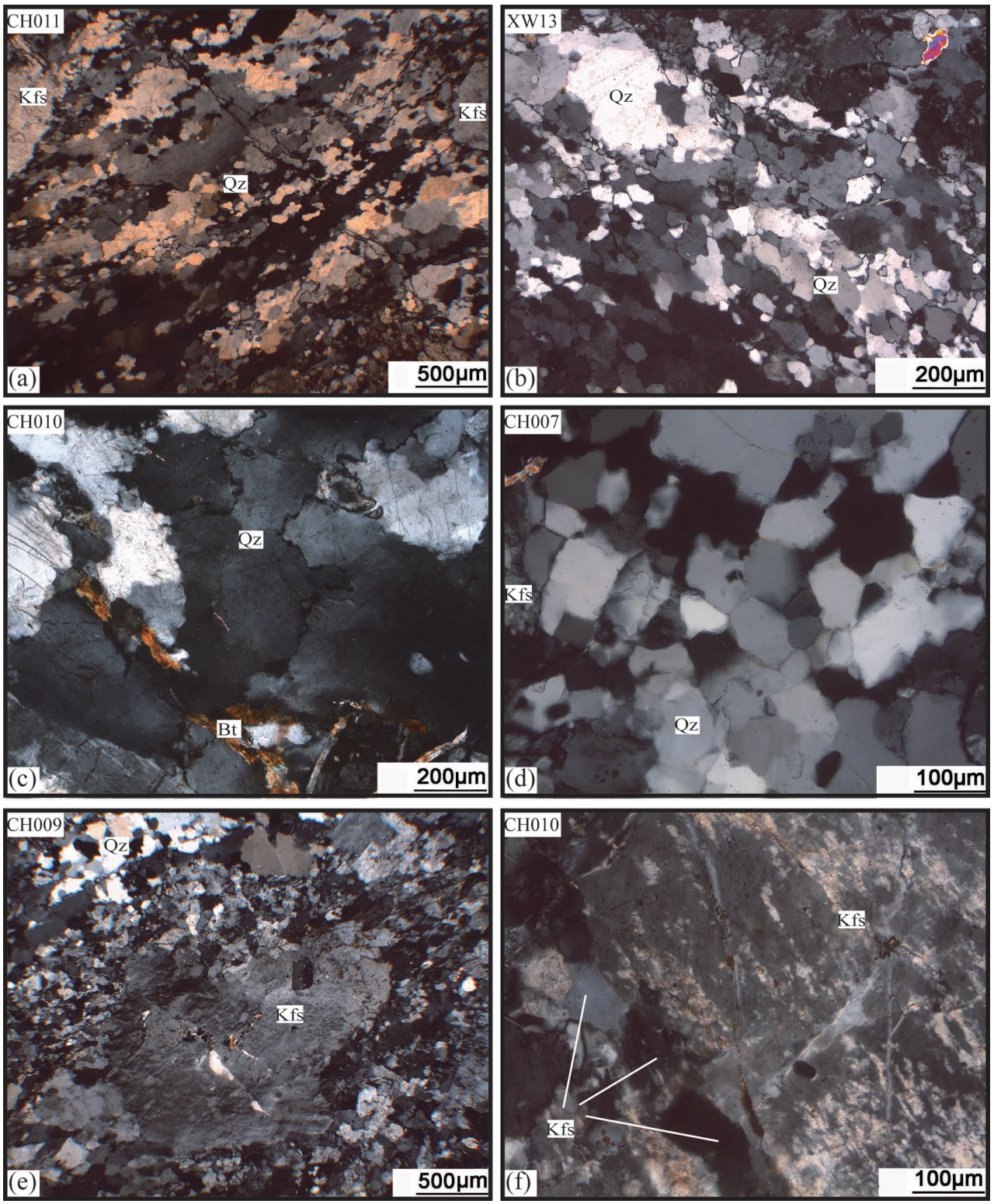


图 4 内部片麻岩显微构造特征

Fig. 4 Microstructural characteristics of gneiss within the pluton

(a) 石英的亚颗粒旋转式(SR)重结晶;(b) 石英核幔构造;(c) 石英亚颗粒旋转式(SR)重结晶向颗粒边界迁移式(GBM)重结晶过渡;(d) 石英的"三联点"结构;(e) 长石的塑性变形;(f) 钾长石的膨凸式(BLG)重结晶

(a) subgrain rotation of quartz;(b) the core and mantle structure of the quartz;(c) the transition from subgrain rotation to grain boundary migration of quartz;(d) the "triple point" structure of quartz;(e) plastic deformation of feldspar;(f) bulging type recrystallization of K- feldspar

主要是变形强度存在差异。岩石为粒状变晶结构,片麻状构造。石英具有波状消光,发生塑性变形,被拉长,但不强烈,具有弱的定向性,大部分亚颗粒边界相对平直,成椭球状,轻微拉长,有核幔结构(图 4a、b),部分亚颗粒边界为港湾状、锯齿状,动态重结晶作用较糜棱岩要弱,主要为亚颗粒旋转式(SR)动态重结晶,部分开始往颗粒边界迁移式(GBM)过渡(图 4c)。有很少一部分小的石英颗粒出现了矿物"三联点"结构(图 4d),说明在经历了韧性变形之后又产生静态恢复作用,是变形减弱的表现。

长石残斑变形初期发生机械破碎,部分出现波状消光,开始发生塑性变形,表面出现变形纹,有的成枣核状或眼球状(图 4e)。有的长石残斑开始在裂隙或边缘出现细粒化,形成光洁明亮的水滴状新晶,发生了膨凸式(BLG)动态重结晶(图 4f)。黑云母特点与糜棱岩带中类似,全部为基质,发生强烈的塑性变形,为新生的矿物。

2.3　变质—变形温度的厘定

变质—变形温度的确定是研究韧性剪切带过程中必不可少的条件。通过镜下观察发现,两类岩石中的石英和长石都发生了动态重结晶作用。但糜棱岩中矿物的动态重结晶程度整体要高于片麻岩。在天然条件下糜棱岩化过程中,对矿物变形变质影响最大的因素是温度。所以,通过研究韧性变形岩石中的矿物变形强度和动态重结晶程度,可以判断出岩石在发生变质变形时的温度条件。

根据 Passchier(1996)和 Stipp(2002)的研究可知,不同矿物在表现出不同的动态重结晶阶段的温度范围是不同的。随温度的升高,矿物的重结晶形式从膨凸式(BLG)动态重结晶—亚颗粒旋转式(SR)动态重结晶—颗粒边界迁移式(GBM)动态重结晶转化。石英的动态重结晶作用开始于 280℃左右,在 280~380℃时,表现为 BLG,围绕石英残斑分布,并形成水滴状新晶,光洁明亮;380~420℃,石英由 BLG 向 SR 过渡;420~480℃时,

以独立的 SR 存在,亚颗粒边界平直,为相似粒径的椭球状为特征,并且亚颗粒与残斑形成核幔结构;480~520℃时,为 SR 与 GBM 共存;520℃以上时,石英以独立的 GBM 存在,表现为重结晶颗粒的大小以及形状极不规则,颗粒边结为港湾状、锯齿状,镶嵌分布。长石的动态重结晶所表现出来的形状变化与石英的基本一致,只是各个重结晶阶段的温度有所差异,在 500~650℃时,为 BLG;650~700℃,为 BLG 与 SR 共存;700~800℃时为独立的 SR;800~850℃时,由 SR 向 GBM 转变;当温度在 850℃以上时,长石以独立的 GBM 存在。

根据近年来的矿物变形的分析研究可知,上述矿物变形温度计的误差一般在±50℃,而目前应用于区域变质岩中较为理想的矿物温度计误差一般也为±50℃(向必伟等,2007)。所以,本文运用矿物的动态重结晶程度对西山驿岩体西侧边界糜棱岩和内部片麻岩进行变形温度估计,具体如表 1 所示。

通过对比糜棱岩和片麻岩,首先都含有极少量新生的黑云母顺糜棱面理展布,说明韧性剪切的变形温度在 400℃以上(王勇生等,2004a);再对比两种类型岩石中长石和石英在变形过程中的动态重结

表 1 张八岭隆起西山驿岩体糜棱岩和片麻岩变形温度估计表

Table 1 The estimation of deformation temperature of mylonite and gneiss in the Xishanyi pluton, Zhangba uplift

标本编号	岩石类型	矿物组合	石英重结晶类型	长石重结晶类型	变形温度估计(℃)
CH007	糜棱岩	Kfs(35%)、Pl(20%)、Qz(40%)、Bt(5%)	GBM	BLG—SR	550~600
CH008	糜棱岩	Kfs(50%)、Pl(15%)、Qz(30%)、Bt(5%)	SR—GBM	BLG	480~550
XW04	糜棱岩	Kfs(40%)、Pl(25%)、Qz(30%)、Bt(5%)	GBM	BLG	530~580
XW05	糜棱岩	Kfs(10%)、Pl(10%)、Qz(75%)、Bt(5%)	GBM	BLG	500~550
XW06	糜棱岩	Kfs(35%)、Pl(20%)、Qz(40%)、Bt(5%)	GBM	BLG—SR	550~650
XW07	糜棱岩	Kfs(30%)、Pl(25%)、Qz(40%)、Bt(5%)	SR—GBM	BLG	480~530
XW08	糜棱岩	Kfs(35%)、Pl(20%)、Qz(40%)、Bt(5%)	GBM	BLG	500~550
XW11	糜棱岩	Kfs(40%)、Pl(20%)、Qz(35%)、Bt(5%)	GBM	BLG	500~550
CH009	片麻岩	Kfs(40%)、Pl(15%)、Qz(40%)、Bt(5%)	SR	塑性拉长、脆性破裂	400~450
CH010	片麻岩	Kfs(35%)、Pl(20%)、Qz(40%)、Bt(5%)	SR—GBM	BLG	480~530
CH011	片麻岩	Kfs(40%)、Pl(25%)、Qz(30%)、Bt(5%)	SR	BLG	450~500
XW13	片麻岩	Kfs(30%)、Pl(20%)、Qz(45%)、Bt(5%)	SR	BLG	450~500
XW14	片麻岩	Kfs(45%)、Pl(15%)、Qz(35%)、Bt(5%)	SR	塑性拉长、脆性破裂	400~450

注:Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qz—石英; Bt—黑云母。

晶程度可以看出,糜棱岩带的变形温度范围为 480~650℃,而片麻岩带的温度范围为 400~530℃。所以,同一期次的构造活动中,强变形带的变形温度要高于弱变形带的变形温度。

3 岩体边界应力场分析

区域应力场直接影响了构造活动的产生、发展和演化。所以,还原西山驿岩体西侧构造活动带的古应力场可以直观的表现出当时的构造应力状态,对于研究此地区构造活动的发展演化具有十分重要的意义。对于同一次构造运动而言,在区域应力的作用下,从地表竖直向下,由于深度的不同,岩石的变形表现也不同:浅层次的发生脆性变形,主要包括断层、擦痕;而深层次的会发生韧性变形,主要包括剪切面理、矿物拉伸线理等等。但两者在同一次构造活动中的构造活动机制是相同的。此次野外观察西山驿岩体西侧边界糜棱岩的产状发现,剪切面理为 NEE 向陡倾,矿物线理为 SSW 向缓倾伏,并且产状十分稳定,所以用剪切面理模拟断层面,矿物线理模拟擦痕,进行构造应力场的反演。

分别对 NO4、NO5 和 NO012 三个采样点的糜棱岩进行产状的测量,为保证数据的准确性,每个点的测量数据为 8 组(Orife et al.,2006),然后运用计算机对西山驿岩体在郯庐断裂带影响下活动时的古应力场进行反演,结果如表 2、图 5 所示。

通过结果可以看出,三点应力场的反演结果具

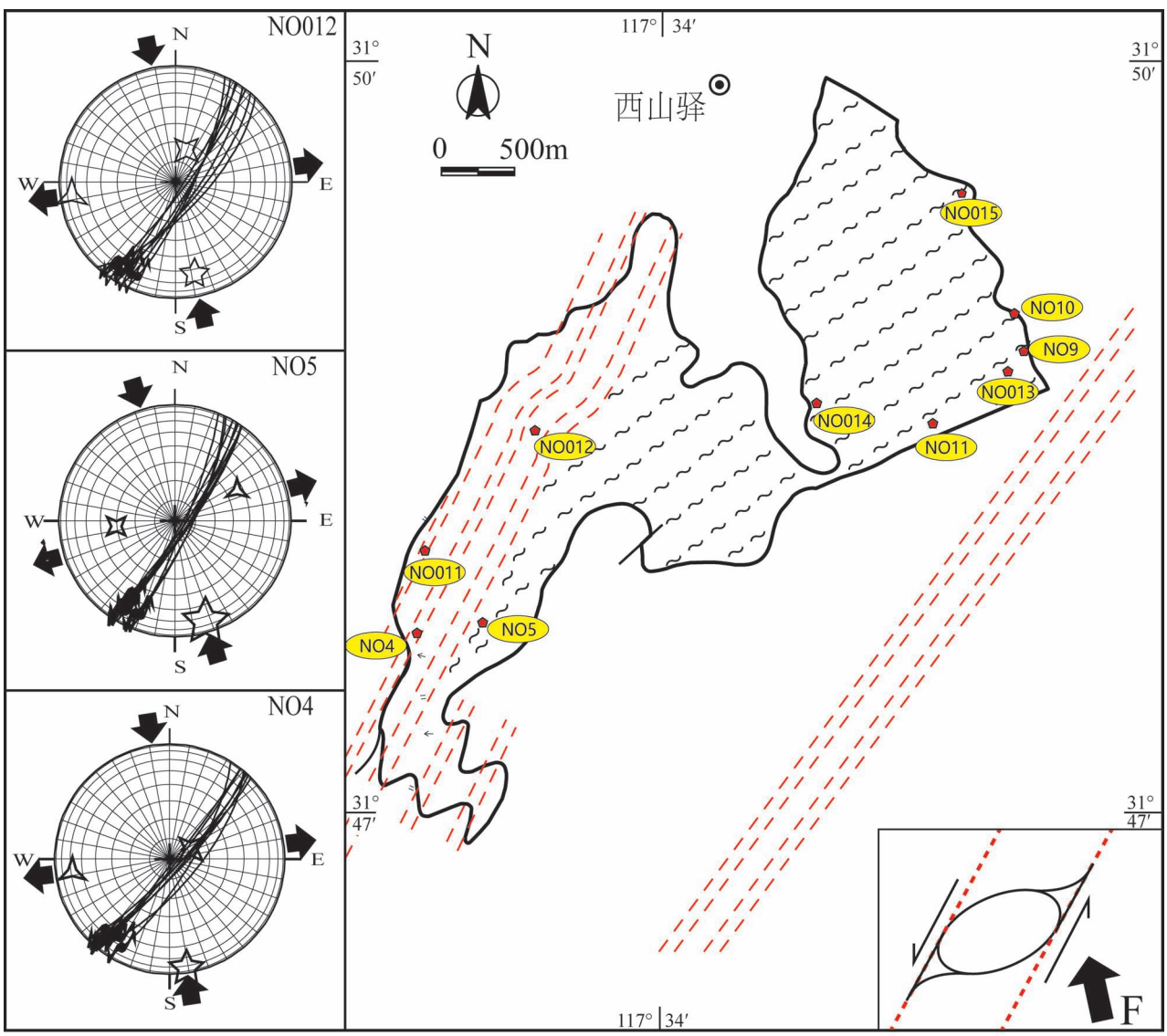


图 5 西山驿岩体构造变形及应力场分析

Fig. 5 The characteristics of tectonic deformation and tectonic stress field of the Xishanyi pluton

表 2 张八岭隆起西山驿应力场分析

Table 2 Analysis oftectonic stress field of the Xishanyi pluton, Zhangba uplift

点号	经度(E)	纬度(N)	产状数(组)	σ_1(az/pl)	σ_2(az/pl)	σ_3(az/pl)
NO4	117°33′22″	31°47′45″	8	171°∠11°	65°∠78°	263°∠33°
NO5	117°33′39″	31°47′48″	8	164°∠26°	265°∠60°	64°∠53°
NO012	117°34′03″	31°48′35″	8	167°∠36°	17°∠74°	262°∠25°

注:σ_1—最大主应力;σ_2—中间主应力;σ_3—最小主应力;az—倾伏向;pl—倾伏角

有较好的一致性,指示了区域性挤压应力状态,并且最大主应力的方向分别是 171°、164°、167°,即最大主应力方向为 SSE—S。在古应力场构建过程中,正断层的应力状态为 σ_1近直立,σ_2、σ_3近水平;逆断层的应力状态为 σ_3近直立,σ_1、σ_2近水平;走滑断层的应力状态为 σ_2近直立,σ_1、σ_3近水平(严乐佳等,2014)。此区域的应力状态基本表现为第二、三的复合形式,但走滑的程度要大于逆冲的程度。

通过分析西山驿岩体西侧韧性剪切带的应力场可以看出,岩体受到了 SSE—S 主方向的挤压力。在大的区域背景下,当时太平洋板块向欧亚板块的俯冲作用,施加 SSE—S 向的挤压力,而郯庐断裂带作为最接近俯冲带的陆上构造活动带,对挤压作用作出响应,与最大主应力方向有一定的夹角,即顺 NNE 走向发生大规模的左行走滑运动的同时,在垂直断裂带方向上伴有一定的逆冲挤压分量。

4　边界剪切带的变形类型分析

韧性剪切带剪切类型的判定对于研究剪切带而言,具有十分重要的意义。剪切类型具有纯剪切和简单剪切两种端元类型,而自然界中的剪切变形通常是两个端元复合作用的结果(Matthews et al.,1974;De Paor et al.,1983)。通常情况下,剪切类型是为纯剪切为主还是简单剪切为主,主要运用运动学涡度(W_k)进行判定,运动学涡度是目前分析、验证剪切属性有效的重要参数,也是较全面准确的刻画剪切带的变形机制与类型的重要因素(王勇生等,2004b;薛德杰等,2014;李建波等,2017)。

涡度(W_k)最初是指流体力学中某一运动形式所拥有的旋转量,在地质学中主要应用于应变非共轴程度的确定(Means et al.,1980)。当 $W_k=0$ 时,剪切变形完全为纯剪切,当 $W_k=1$ 时,完全为简单剪切。但纯剪切与简单剪切作用相等时,W_k并不等于 0.5,而是 0.71 ~ 0.75(郑亚东等,2008),这种现象称为“纯剪倾向性”(Tikoff et al.,1995)。

涡度测量具有多种方法,但较为实用的主要有刚体旋转量法(Tikoff et al.,1995)、石英 C 轴组构与主应变比值法(Vissers,1989;Wallis,1992,1995)和斜列颗粒形态法(Passchier et al.,1988)等等。本文主要运用石英 C 轴组构法对西山驿岩体西侧糜棱岩进行涡度测量。选取 XW04、CH007、CH008 三个标本按照岩石变形 XZ 面进行切片,镜下观察矿物变斑晶,并对其最长轴(X)、最短轴(Z)以及最长轴与剪切边界的夹角(β)进行测量并记录,进而求得长短轴之比(R_{XZ})和夹角的弧度值(θ),最终运用下列公式:

$$W_K=\sin\left[\arctan\left(\frac{\sin2\theta}{\frac{R_{XZ}+1}{R_{XZ}-1}-\cos2\theta}\right)\right]\cdot\frac{R_{XZ}+1}{R_{XZ}-1}$$

求得各个标本中的 W_K,并运用轴比(R_{XZ})、夹角(β)与涡度(W_K)之间的关系进行投图分析(即有限应变与涡度关系图解)。(表 3、图 6)

表 3 张八岭隆起西山驿糜棱岩涡度分析

Table 3 The vorticity calculation analysis of the Xishanyi pluton, Zhangba uplift

标本号	测量数	β(°)	θ(°)	R_{XZ}	W_K
XW04	59	27.83	0.49	2.47	0.94
CH007	40	27.34	0.48	2.09	0.86
CH008	52	22.51	0.39	2.53	0.88

结果显示西山驿西侧韧性剪切带中三个糜棱岩标本的涡度值分别是 0.94、0.86、0.88,与王勇生等(2006)在郯庐断裂带南段所获取的结果相吻合,都介于 0.75~1,即此韧性剪切带是简单剪切为主的一般剪切,存在很小的纯剪切作用,说明当时的构造应力场并不完全平行于剪切带的运动方向,而是具有一定的夹角,这也充分印证了西山驿岩体左行平移时古应力场的反演结果。单个标本中的各个测点的 W_K绝大部分都集中在 0.8~1,只有很少的部分低于 0.75,即单个变斑晶的运动学特征也指示为以简单剪切为主。说明涡度测量的数据符合统计学要求,数据有效。

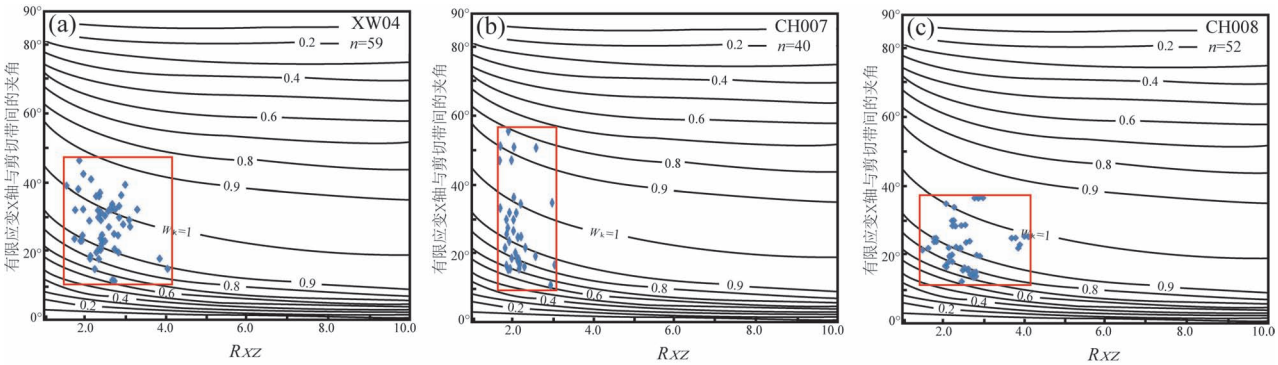


图 6 西山驿糜棱岩有限应变与涡度关系图解

Fig. 6 The diagram showing the relationships between the finite strain and vorticity of mylonite of the Xishanyi pluton

5 边界剪切带变质相分析

深层次岩石在区域应力场作用下发生韧性变形时,矿物在一定温度范围和足够的应力强度时,达到稳定的流变状态,发生动态重结晶。石英发生动态重结晶作用时,其颗粒边界具有自相似性,表现出分形特征(王新社等,2001)。分形几何学中最重要的参数为分维数,Kruhl 等(1996)和 Takahashi 等(1998)通过大量实验表明,不同变形温度和应力条件下动态重结晶石英颗粒边界具有不同的分维数。因此,分维数可以作为岩石韧性变形的地质温度计、应变速率计,这在一定程度上是矿物颗粒的变形对构造应力场的表征。

适合动态重结晶石英颗粒边界分维数的测量方法主要有封闭折线法和面积—周长法,本文运用了面积—周长法对西山驿岩体西侧糜棱岩(XW04、XW05、XW06、XW07、CH007、CH008)中的动态重结晶石英进行分维测量。糜棱岩中石英颗粒普遍发生动态重结晶,颗粒边界呈不规则的曲线状、港湾状,表现为缝合线、锯齿状结构(图 2),为分维数的测定提供了良好条件。通过对动态重结晶石英的真实周长(P)和面积(A)进行测量,确定出相同面积圆的直径 d(即粒径)。再以真实周长的对数 $\lg P$ 为纵轴,粒径的对数 $\lg d$ 为横轴,将所有测量数据投在双对数图上,其最小二乘法拟合线的斜率即为分维值 D(表 4、图 7)。

分析发现,西山驿岩体西侧边界糜棱岩中动态重结晶石英颗粒边界特征统计数据的相关系数 R 在 0.91 以上,分维值 D 的范围为 1.164~1.178,说明糜棱岩带中的动态重结晶石英颗粒边界具有自相似性以及分形特征,并且动态重结晶程度基本相同。导致动态重结晶石英颗粒边界分维值不同的主导因素是韧性变形温度,在石英颗粒边界缝合线结构形成过程中,应变速率不变的情况下,随着温度的升高,石英颗粒边界的分维数减小,即分维数与温度成反相关关系。所以,分维数可作为变形变质的温度

表 4 张八岭隆起西山驿岩体西侧边界糜棱岩中动态重结晶石英边界分维特征

Table 4 The fractal dimension of the dynamic recrystallization quartz of mylonite on the western border of the Xishanyi pluton, Zhangba uplift

标本编号	测量数 (n)	粒径范围 (d, μm)	平均粒径 (d', μm)	真实周长范围 (P, μm)	平均周长 (P', μm)	相关系数 (R)	分维值 (D)
XW04	53	75.17~372.35	174.15	313.58~2196.59	955.51	0.956	1.173
XW05	60	66.27~312.33	141.28	262.35~1489.62	721.56	0.966	1.170
XW06	63	57.33~322.66	152.33	255.69~1368.62	654.32	0.968	1.166
XW07	51	68.96~351.23	143.22	278.96~1654.35	785.61	0.953	1.175
CH007	53	68.26~316.71	143.68	289.63~1578.55	752.36	0.965	1.164
CH008	58	67.02~292.13	158.90	328.79~1928.50	833.67	0.919	1.178

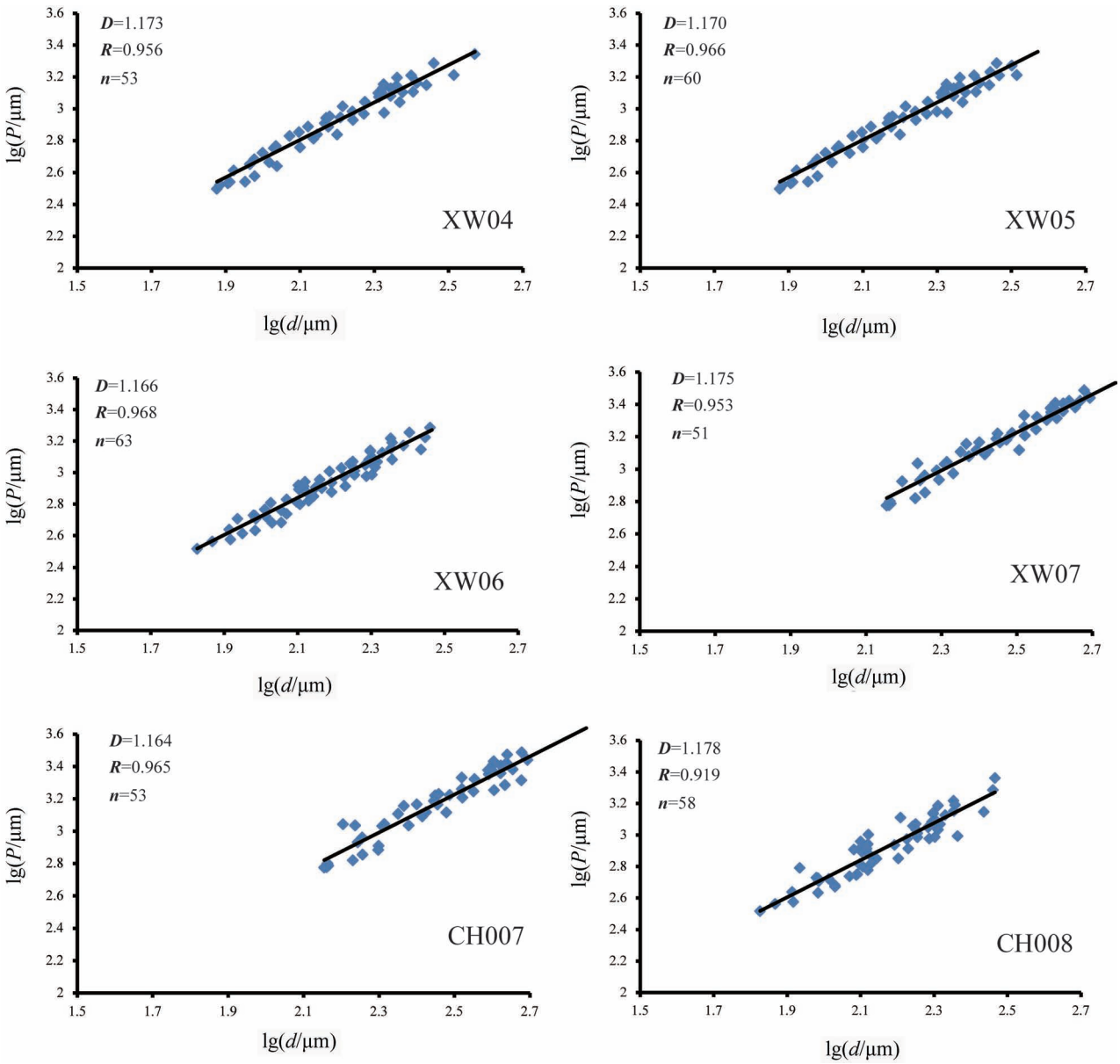


图 7 西山驿岩体西侧边界糜棱岩中动态重结晶石英颗粒粒径—周长双对数图解

Fig. 7 The dynamic recrystallization quartz size—perimeter double logarithm of mylonite on the western border of the Xishanyi pluton

D—分维值,*R*—相关系数,*n*—测量数

D—the fractal dimension, *R*—correlation coefficient, *n*—number

计。

根据前人的研究(Kruhl et al.,1995)可知,低绿片岩相变质岩中石英颗粒边界的分维数在 1.23~1.31 之间变化,高绿片岩相到低角闪岩相的分维数为 1.14~1.23,麻粒岩相及同构造花岗岩中的分维数则为 1.05~1.14。与本地区的动态重结晶石英颗粒边界分维值 1.164~1.178 相对应的变质相为高绿片岩相到低角闪岩相(图 8)。

前面运用 XW04、XW05、XW06、XW07、CH007、CH008 六个糜棱岩样品中矿物动态重结晶程度所估算的整体温度范围与上图的投点温度范围在误差范围内基本是一致的。由此可见,通过矿物动态重结晶和分维值测定两种方法对西山驿岩体西侧边界糜棱岩整体的变质变形温度估算为 500~600℃,变质相为高绿片岩相到低角闪岩相,为中温变形环境。

矿物的动态重结晶作用是在变形温度和应变速

表 5 张八岭隆起西山驿岩体糜棱岩应变速率计算

Table 5 Calculation of strain rate of Xishanyi pluton, Zhangba uplift

标本编号	XW04	XW05	XW06	XW07	CH007	CH008
分维值(D)	1.173	1.170	1.166	1.175	1.164	1.178
变形温度(T, K)	816	822	830	812	833	806
应变速率(ε, s^{-1})	5.79×10^{-4}	5.96×10^{-4}	6.20×10^{-4}	5.67×10^{-4}	6.25×10^{-4}	5.50×10^{-4}

率两种因素作用下发生的。Takahashi 等(1998)通过大量实验认为,韧性剪切过程中变形温度不变的情况下,分维数随应变速率的增加而增大,即分维数与应变速率成正相关关系所以,分维除了可以作为变形温度计之外,还可以作为应变速率计,并且分维值(D)、变形温度(T)以及应变速率(ε)之间存在一下关系式:

$$D=\varphi\lg[\varepsilon/(s^{-1})]+\frac{\rho}{(T/K)}+1.08$$

φ 和 ρ 都是实验参数,当应变速率单位为 s^{-1}, 温度单位为 K 时, $\varphi=0.0934$, $\rho=644$。

将上述糜棱岩的变质—变形温度的中值温度(图 8)代入公式,通过计算可以看出,运用动态重结晶石英分形法计算西山驿岩体西侧韧性剪切带的应变速率范围为 $5.50\times10^{-4}\sim6.25\times10^{-4}$ s^{-1}(表 5)。

6 边界剪切带差应力、应变速率研究

岩石在发生韧性变形时,矿物的变形过程是温度、压力、应力状态以及应变速率等因素共同作用的结果。所以,通过对岩石中矿物变形程度的研究,可以用来确定各个影响因素在构造活动时的状态。

差应力的大小的计算,对于构造层次的划分具有重要意义。一般认为,石英发生动态重结晶时,细粒化的颗粒粒度能很好地反映差应力大小。根据 Twiss(1977)的研究,差应力和动态重结晶石英颗粒粒度存在以下关系:

$$\Delta(\sigma/MPa)=6.1\times(D/mm)^{-0.68},$$

其中,$\Delta\sigma$ 为最大主应力 σ_1 与最小主应力 σ_3 的

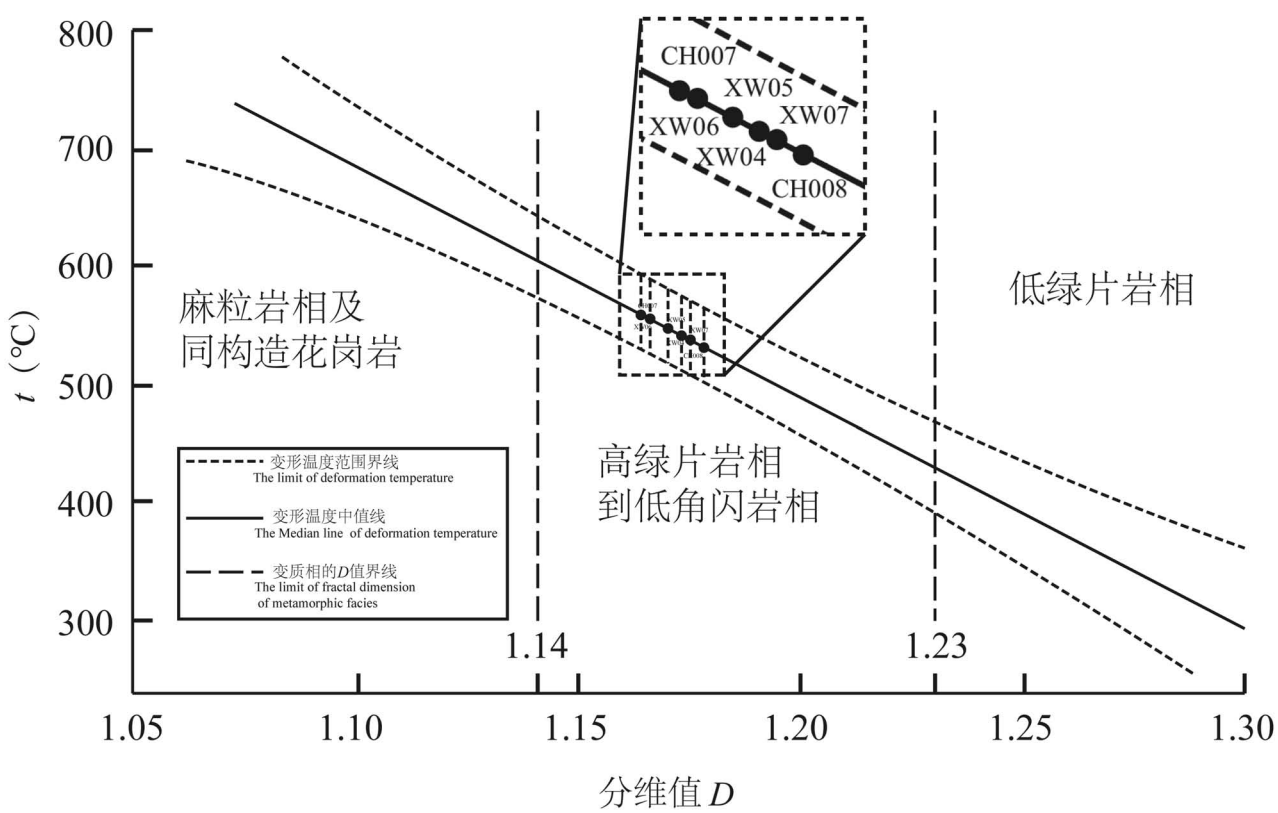


图 8 分维值、变质相对应温度关系图解

Fig. 8 Relationships between the fractal dimension, metamorphic phase and temperature

表 6 张八岭隆起西山驿西侧边界糜棱岩差应力与应变速率

Table 6 Statistical calculation results of differential stress and strain rate of mylonite at the western border of the Xishanyi pluton, Zhangba uplift

样品号	温度 T(K)	平均粒径 D(mm)	差应力 $\Delta\sigma$(MPa)	应变速率 ε(s^{-1})
XW04	816	0.174	20.02	1.75×10^{-13}
XW05	822	0.141	23.08	3.25×10^{-13}
XW06	830	0.152	21.93	3.94×10^{-13}
XW07	812	0.143	22.87	2.09×10^{-13}
CH007	833	0.144	22.82	4.93×10^{-13}
CH008	806	0.159	21.31	1.35×10^{-13}

差值,D 为动态重结晶石英颗粒的平均粒径。本次所用的 XW04、XW05、XW06、XW07、CH007、CH008 六个糜棱岩样品中,石英发生 GBM 动态重结晶,颗粒细粒化十分明显,能够很好地反应出差应力状态。测量和计算结果如表 6 所示。

对于韧性剪切带活动时应变速率的研究,还可以利用石英岩的实验高温流变律来进行计算,与之相关的参数为差应力值($\Delta\sigma$)和变形时的温度(T),并且一旦差应力和变形温度确定后,应变速率遵循以下基本公式:

$$\varepsilon/(s^{-1}) = A[\Delta(\sigma/MPa)]^n \exp[-\frac{H}{RT}]$$

其中 ε 为应变速率;$\Delta\sigma$ 为差应力值;T 为温度,单位为 K;R 为气体常数,R = 8.314 J/(K · mol);A、n、H 均为常数,通过前人的研究对比认为,Parrish 等(1976)所提出的湿石英流变速率方法最为可靠,上述三个参数分别是:$A = 4.40\times10^{-2}$、$n = 2.6$、$H = 230946.2$ J/mol。每个样品的变形温度采用分维值对应的各个样品的中值温度,统计计算结果如图 7 所示。

通过计算可知,西山驿岩体西侧韧性剪切带的差应力值范围为 20.02~23.08 MPa,考虑到韧性剪切带变形之后可能存在动态重结晶石英颗粒粒度增大效应,所以计算得到的差应力值只能代表岩体边界韧性剪切时的最低差应力下限;应变速率范围为 1.35×10^{-13}~$4.93\times10^{-13}s^{-1}$,通过前人的研究发现,一般的区域性韧性变形的应变速率范围为 10^{-13}~$10^{-15}s^{-1}$,所以,此地区的应变速率与世界上大多数韧性剪切带应变速率一致。

而对比前面运用动态重结晶石英分形法计算得到的应变速率范围为 5.50×10^{-4}~$6.25\times10^{-4}s^{-1}$,两者差别非常大。通过动态重结晶矿物形态和石英分维所测得的此地区韧性剪切带变形温度范围为 500~600℃,而分形法计算应变速率是来自于实验室中 800~1000℃超高温、10^{-6}~10^{-4}高应变速率环境下,这不太符合自然条件下的韧性剪切带的变形环境(Pfiffner,1982),况且,石英发生韧性变形的应变速率条件是小于 $10^{-9}s^{-1}$(张波等,2006;李振生等,2013)。所以,利用石英岩的实验高温流变律所计算的应变速率值更准确。

7 结论

(1) 西山驿岩体位于郯庐断裂带内,几何学特征受郯庐断裂带影响。根据岩体岩石的变形强度,将岩体划分为西侧边界的糜棱岩带和内部的片麻岩带,并着重对边界糜棱岩带进行了构造变质变形分析,野外和镜下结果显示,糜棱岩表现出左旋剪切的特征。

(2) 根据野外产状的测量发现,岩石的变形程度与产状的不同在空间上是相对应的:糜棱岩面理走向与郯庐断裂带方向平行,为 NNE 向,产状陡立;片麻岩面理走向与糜棱面理走向夹角近 30°,为 NE—NEE 向,产状平缓。

(3) 镜下鉴定,两种岩石的矿物变形程度不同:糜棱岩中石英绝大部分为 GBM 动态重结晶,长石表现为 BLG—SR 动态重结晶;片麻岩中石英绝大部分为 SR 动态重结晶,长石表现为塑性拉长到 BLG 动态重结晶。边界糜棱岩中的动态重结晶石英分维值为 1.164~1.178,相关系数 R 大于 0.919。所得到的变形温度为:边界糜棱岩的变形温度为 500~600℃,变质相为高绿片岩相到低角闪岩相变质;内部片麻岩的变形温度为 400~530℃。

(4) 通过对边界糜棱岩带古应力场的反演结果显示,三个测点的最大主应力(σ_1)方向范围为 164°~171°,说明当时西山驿岩体受到了来自 SSE 向的太平洋板块的应力。对糜棱岩中长石变斑晶进行涡度分析,得到涡度值为 0.86~0.94,均大于 0.75,表现为以简单剪切为主,但具有一定纯剪分量的特征,即在走滑背景下,具有很小的垂直挤压分量。所以古应力场的反演与运动学涡度计算结果具有很好的一致性。

(5) 运用动态重结晶石英粒度的方法测得西山驿岩体西侧糜棱岩的最低差应力下限值范围为 20.02~23.08MPa,应变速率为 1.35×10^{-13}~$4.93\times10^{-13}s^{-1}$。但是运用动态重结晶石英边界分维值所

测定的应变速率范围为 $5.50\times10^{-4}\sim6.25\times10^{-4}s^{-1}$，两者具有很大差别，原因是后者是来自于实验数据模拟，和自然条件下的变形环境具有一定差别。所以，$1.35\times10^{-13}\sim4.93\times10^{-13}s^{-1}$这一应变速率结果更为准确。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈宣华,王小凤,张青,陈柏林,陈正乐,Harrison T M,Yin An.2000.郯庐断裂带形成演化的年代学研究.长春科技大学学报,30(3):215~220.

董树文,吴宣志,高锐,卢德源,李英康,何义权,汤加富,曹奋扬,侯明金,黄德志.1998.大别造山带地壳速度结构与动力学.地球物理学报,41(3):349~361.

侯明金,王永敏,Jacques M,Pierre V.2003.郯庐断裂带(安徽部分)动力学演化及其构造意义.地质通报,22(2):105~112.

侯明金,Jacques M,Pierre V,王永敏.2006.郯庐断裂带的两大发展阶段——广义的逆冲推覆断裂带和狭义的平移断裂带.中国地质,33(6):1267~1275.

胡惟,朱光,严乐佳,詹润.2014.郯庐断裂带中段地震活动性与深部地壳电性 结构关系的探讨. 地质论评,60(1):80~90.

李建波,郭磊,鲁勇花,曾涛.2017.华北克拉通北缘医巫闾山韧性剪切拆离带的运动学涡度与韧性减薄量.地质论评,63(6):1429~1439.

李曙光,刘德良,陈移之,王松山,裘冀,胡世玲,桑海清.1993.中国中部蓝片岩的形成时代.地质科学,28(1):21~27.

李振生,田晓莉,张文俊,陶冶. 2013.安徽桐城挂车河镇地区东西向韧性剪切带分形特征及其估算应变速率适用性分析.科技导报,31(20):15~19.

刘备,朱光,胡红雷,宋利宏.2015.郯庐断裂带江苏段新构造活动规律分析.地质学报,89(8):1352~1366.

乔秀夫.1981.对郯—庐断裂巨大平移之质疑. 地质论评,27(3):222-224.

宋传中,朱光,刘洋,牛漫兰,刘国生.2003.郯庐断裂带肥东韧性剪切带的变形规律、同位素年龄及其构造意义.地质论评,49(1):10~17.

宋传中,黄文成,Shoufa Lin,任升莲,李加好,涂文传.2010a.长江中下游转换构造结的特征、属性及其研究意义.安徽地质,20(1):14~29.

宋传中,Lin Shoufa,周涛发,闫峻,任升莲,李加好,涂文传,张妍.2010b.长江中下游及其邻区中生代构造体制转换.岩石学报,26(9):2835~2849.

宋传中,张华,任升莲,李加好,Lin Shoufa,涂文传,张妍,王中.2011.长江中下游转换构造结与区域成矿背景分析.地质学报,85(5):778~788.

宋传中,李加好,任升莲,Lin Shoufa,刘欢,黄鹏,王微,杨帆.2014.长江中下游地区中生代陆内构造作用与成因分析.地质科学,49(2):339~354.

汤加富,许卫.2002.郯庐断裂带南段并无巨大平移——来自安徽境内的证据. 地质论评, 48(5):449~456.

汤加富,李怀坤,娄清.2003.郯庐断裂南段研究进展与断裂性质讨论.地质通报,22(6):426~436.

万桂梅,汤良杰,金文正,余一欣.2009.郯庐断裂带研究进展及存在问题探讨.地质论评,55(2):251~259.

万天丰,朱鸿,赵磊,林建平,程捷,陈进.1996.郯庐断裂带的形成与演化:综述.现代地质,10(2):159~168.

王书琴,孙晓猛,杜继宇,王英德,许强伟,田景雄.2012.郯庐断裂带北段构造样式解析.地质论评,58(3):414~425.

王微,宋传中,任升莲,李加好,张妍,汪佩佩,胡达.2016a.郯庐断裂带中桃源韧性剪切带剪切温压条件及锆石 U-Pb 分析.岩石学报,32(3):787~803.

王微,宋传中,李加好,任升莲,张妍,冯腊梅,李振伟,王阳阳.2016b.郯庐断裂带肥东桃源韧性剪切带构造分析及时限探究.地质科学,51(4):1040~1058.

王小凤.2000.郯庐断裂带.地质出版社.

王新社,郑亚东,杨崇辉,侯贵廷.2001.用动态重结晶石英颗粒的分形确定变形温度及应变速率.岩石矿物学杂志,20(1):36~41.

王勇生,朱光,王道轩,刘国生,宋传中.2004a.大别山东缘郯庐两期走滑剪切带形成的温压条件与造山带折返的关系.大地构造与成矿学,28(3):228~238.

王勇生,朱光.2004b.运动学涡度及其测量方法.合肥工业大学学报,27(11):1480~1484.

王勇生,朱光,王道轩,宋传中,刘国生.2005.地质温度计在郯庐断裂带南段低温糜棱岩中的尝试.中国地质,32(4):625~633.

王勇生,朱光,宋传中,刘国生.2006.郯庐断裂带南段晚期韧性剪切带涡度分析及其构造意义.地质论评,52(5):591~600.

向必伟,朱光,王勇生,谢成龙,胡召齐.2007.糜棱岩化过程中矿物变形温度计.地球科学进展,22(2):126~135.

肖文交,周姚秀,杨振宇,赵西西.2000.大别—郯庐—苏鲁造山带复合旋转拼贴作用.地球科学进展,15(2):147~153.

徐嘉炜. 1980. 郯庐断裂带的平移运动及其地质意义. 见: 国际交流地质学术论文集(1):构造地质,地质力学. 北京: 地质出版社:129~142.

徐嘉炜.1985.郯庐断裂带北段平移研究的若干进展——答乔秀夫的"对郯庐断裂巨大平移质疑". 地质论评,31(1):83~86.

徐嘉炜,马国锋.1992.郯庐断裂带研究的十年回顾. 地质论评,38(4):316~324.

徐嘉炜,朱光,吕培基,郑学信,孙世群.1995.郯庐断裂带平移年代学研究的进展.安徽地质,5(1):1~12.

徐树桐,江来利,刘怡灿,张勇.1992.大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程.地质学报,66(1):1~14.

薛德杰,徐先兵,李源,章泽军,楼法生.2014.华南武功山早古生代花岗岩构造变形特征及其形成机制,地质学报,88(7):1236~1246.

严乐佳,朱光,林少泽,赵田.2014.沂沭断裂带新构造活动规律与机制.中国科学(D 辑),44(7):1452~1467.

杨文采,于常青. 2001.根据地球物理资料分析大别-苏鲁超高压变质带演化的运动学与动力学.地球物理学报,44(3):346~359.

张波,张进江,郭磊.2006.北喜马拉雅穹隆带然巴韧性剪切带石英动态重结晶颗粒的分维几何分析与主要流变参数的估算.地质科学,41(1):158~169.

张鹏,王良书,钟锴,丁增勇.2007.郯庐断裂带的分段性研究.地质论评,53(5):586~591.

张岳桥,董树文.2008.郯庐断裂带中生代构造演化史:进展与新认识.地质通报,27(9):1371~1390.

赵田,朱光,林少泽,宋利宏.2014a.郯庐断裂带南段张八岭群变质岩的原岩时代及其构造意义.地质论评,60(6):1266~1283.

赵田,朱光,林少泽,严乐佳,姜芹芹.2014b.郯庐断裂带张八岭隆起段变质岩的原岩时代与变形机制.中国科学(D 辑),44(10):2112~2129.

赵田,朱光,向必伟,林少泽,顾承串.2016.郯庐断裂带起源机制的探

讨.矿物岩石地球化学通报,35(5):1120~1140.
郑亚东,王涛,张进江.2008.运动学涡度的理论与实践.地学前缘,15(3):209~220.
朱光,徐嘉炜,孙世群.1995.郯庐断裂带平移时代的同位素年龄证据.地质论评,41(5):452~456.
朱光,牛漫兰,刘国生,王道轩,宋传中.2002.郯庐断裂带早白垩世走滑运动中的构造、岩浆、沉积事件.地质学报,76(3):325~334.
朱光,王道轩,刘国生,牛漫兰,宋传中.2004a.郯庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应.地质科学,39(1):36~49.
朱光,王勇生,牛漫兰,刘国生,谢成龙.2004b.郯庐断裂带的同造山活动.地学前缘,11(3):169~182.
朱光,牛漫兰,刘国生,王勇生,谢成龙,李长城 2005.郯庐断裂带肥东段走滑运动的$^{40}Ar/^{39}Ar$法定年.地质学报,79(3):303~316.
朱光,张力,谢成龙,牛漫兰,王勇生.2009.郯庐断裂带构造演化的同位素年代学制约.地质科学,44(4):1327~1342.
朱光,王薇,顾承串,张帅,刘程.2016.郯庐断裂带晚中生代演化历史及其对华北克拉通破坏过程的指示.岩石学报,32(04):935~949.
Chung Sunlin. 1999.Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu Fault with implications for the eastern plate boundary between North and South China.The Journal of Geology, 107(3):301~312.
Chen Xuanhua, Wang Xiaofeng, Zhang Qing, Chen Bolin, Chen Zhengle, Harrison T Mark, Yin An. 2000&. Gechronologic study on the formation and evolution of Tanlu fault. Journal of Changchun University of Science and Technology,30(3):215~220.
De Paor D G. 1983. Orthographic analysis of geologic structures—I. Deformation theory.Journal of Structural Geology,5(3):255~278.
Dong Shuwen, Wu Xuanzhi, Gao Rui, Lu Deyuan, Li Yingkang, He Yiquan, Tang Jiafu, Cao Fenyang, Hou Mingjin, Huang Dezhi. 1998&.On the crust velocity levels and dynamics of the Dabieshan orogenic belt.Acta Geophysica Sinica,41(3):349~361.
Hou Mingjin, Wang Yongmin, Jacques M, Pierre V. 2003&. Dynamic evolution and tectonic significance of the Tanlu fault zone (Anhui segment).Geological Bulletin of China,22(2):105~112.
Hou Mingjin, Jacques M, Pierre V, Wang Yongmin. 2006&. Two development stages of the Tanlu fault zone: the stages of the overthrust fault zone sensu lato and the wrench fault zone sensu stricto.Geology in China,33(6):1267~1275.
Hu Wei, Zhu Guang, Yan Lejia, Zhan Run. 2014&. Analysis of relationship between seismic activity and crust electrical textures for the central segment of the Tan-Lu fault zone. Geological Review,60(1):80~90.
Kruhl J H, Nega M and MillaH E. 1995. The fractal shape of grain boundary sutures:reality,modeland application asa geo-thermometer. Book of Abstracts,2nd In.t Con.f on Fractaland.Dynamic Systems in Geosciences,84 Frankfort:31~32.
Kruhl J H, Nega M. 1996. The fractal shape of sutured quartz grain boundaries:application as a geothermometer.Geologishe Rundschau, 85(1):38~43.
Li Jianbo,Guo Lei,Lu Yonghua,Zeng Tao.2017&.The kinematic vorticity and the ductile thinning of the YiwulüShan ductile shear detachment zone in North China Craton. Geological Review,63(6):1429~1439.
Li Shuguang, Liu Deliang, Chen Yizhi, Wang Songshan, Qiu Ji, Hu Shiling,Sang Haiqing.1993&.Time of the blueschis belt formation in central China.Scientia Geological Sinica,28(1):21~27.
Li Zhensheng, Tian Xiaoli, Zhang Wenjun, Tao Ye. 2013&. Fractal analysis of east—west ductile shear zone in Guachehe town area, Tongcheng, Anhui and its applicability of strain-rate estimation. Science & Technology Review,31(20):15~19.
Li Zhengxiang.1994.Collision between the north and south China blocks: A crust-detachment model for suturing in the region east of the Tan-Lu fault.Geology,22(8):739~742.
Liu Bei, Zhu Guang, Hu Honglei, Song Lihong. 2015&. Analysis on neotectonic activity of the Jiangsu Part of the Tan-Lu Fault Zone. Acta Geologica Sinica,89(8):1352~1366.
Matthews P E, Bond R A, Vallden Berg J. 1974. Analgebraic method of strain analysis using ellipitical markers.Tectonopbysics,24(1~2): 31~67.
Means W D,Hobbs B E,Lister G S, Willianms P F.1980.Vorticity and non-coaxialicy in progressive deformation. Journal of Structural Geology,2(3):371~378.
Qiao Xiufu. 1981&. Doubts concerning the great horizontal displacement along the Tancheng—Lujiang fault zone. 1981. Geological Review, 27(3):222~224.
Orife T, Lisle R J. 2006. Assessing the statistical significance of palaeostress estimates: Simulations using random fault slips. J. Struct. Geol.,28(6):952~956.
Parrish D K,Krivz A L,Carter N L.1976. Finite—element folds of similar geometry.Tectonophysics,32(3~4):183~207.
Passchier C W, Urai J L. 1988. Vorticity and strain analysis using Mohrdiagrams.J Struct Geol,10(8):755~763.
Passchier C W,Trouw R A J.1996.Microtectonics. Springer-verlag Berlin Heidelberg:36~45.
Pfiffner O A, Ramsay J G. 1982. Constraints on geological strain rates: Arguments from finite strain states of naturally deformed rocks. Journal of Geophysical Research,87(B1):311~321.
Song Chuanzhong, Zhu Guang, Liu Yang, Niu Manlan, Liu Guosheng. 2003&.Deformation features and isotopic ages of the Feidong ductile shear belt in the Tanlu fault zone and its tectonic implications. Geological Review,49(1):10~17.
Song Chuanzhong, Huang Wencheng, Shoufa Lin, Ren Shenglian, Li Jiahao, Tu Wenchuan. 2010a&. Features, attributes and research implications of transfer structure knots along the middle—lower Yangtze river reaches.Geology of Anhui,20(1):14~29.
Song Chuanzhong, Lin Shoufa, Zhou Taofa, Yan Jun, Ren Shenglian, Li Jiahao,Tu Wenchuan,Zhang Yan.2010b&.Mesozoic tectonic regime transition of the middle and lower reaches of the Yangtze river and its adjacent area.Acta Petrologica Sinica,26(9):2835~2849.
Song Chuanzhong,Zhang Hua,Ren Shenglian,Li Jiahao,Lin Shoufa,Tu Wenchuan,Zhang Yan,Wang Zhong. 2011&. Transform Tectonic node of the middle and lower reaches of the Yangtze river and analysis of regional metallogenic settings.Acta Geological Sinica,85(5):778~788.
Song Chuanzhong,Li Jiahao,Ren Shenglian,Lin Shoufa,Liu Huan,Huang Peng, Wang Wei, Yang Fan. 2014&. Mesozoic intracontinental tectonism and its genesis analysis of the middle—lower reaches of the Yangtze River.Chinese Journal of Geology,49(2):339~354.
Stipp M, Stunitz H, Heilbronner R, Schmid S M. 2002. The eastern Tonalefault zone:A natural laboratory for crystal plastic deformation ofquartz overa temperature range from 250 to 700℃. Journal of Structural Geology,24(12):1861~1884.
Takahashi M, Nagahama H, Masuda T. 1998. Fractal analysis of experimentally, dynamically recrystallized quartz grains and its possible application as a strain rats meter. Journal of Structural Geology,20(2~3):269~275.
Tang Jiafu, Xu Wei. 2002&. No huge strike slip in the southern sector of the Tancheng—Lujiang fault——Tectonic evidence from Anhui Province. Geological Review, 48(5):449~456.

Tang Jiafu, Li Huaikun, Lou Qing. 2003&. Progress in the study of the southern segment of the Tanlu Fault and a discussion of the nature of the fault. Geological Bulletin of China, 22(6): 426~436.

Tikoff B, Fossen H. 1995. The limitati ons of three-dimensional kinematic vorticity analysis. Journal of Structural Geology, 17(12): 1771~1784.

Twiss R J. 1977. Theory and application of a recrystallized grainsize paleopiezometer. Pure Applied Geophysics, 115(1~2): 227~244.

Vissers R L M. 1989. Asymmetric quartz c-axis fabrics and flow vorticity: astudy using rotated garnets. Journal of Structural Geology, 11(3): 231~144.

Wallis S R. 1992. Vorticity analysis in a metachert from the Sanbagawabelt, SW Japan. Journal of Structural Geology, 14(3): 271~280.

Wallis S R. 1995. Vorticity analysis and recognition of ductile extension in Sanbagawa belt, SW Japan. Journal of Structural Geology, 17(8): 1077~1094.

Wan Guimei, Tang Liangjie, Jin Wenzheng, Yu Yixin. 2009&. Progresses and problems in the study of Tancheng—Lujiang Fault Zone. Geological Review, 55(2): 251~259.

Wan Tianfeng, Zhu Hong, Zhao Lei, Lin Jianping, Cheng Jie, Chen Jin. 1996&. Formation and evolution of Tancheng—Lujiang fault zone: A review. Geoscience, 10(2): 159~168.

Wang Shuqin, Sun Xiaomeng, Du Jiyu, Wang Yingde, Xu Qiangwei, Tian Jingxiong. 2012&. Analysis of structural styles in northern segment of Tancheng—Lujiang Fault Zone. Geological Review, 58(3): 414~425.

Wang Wei, Song Chuanzhong, Ren Shenglian, Li Jiahao, Zhang Yan, Wang Peipei, Hu Da. 2016a&. *P—T* conditions and zircon U-Pb analysis of the Taoyuan ductile shear zone in Tan-Lu fault zone. Acta Petrologica Sinica, 3(32): 787~803.

Wang Wei, Song Chuanzhong, Li Jiahao, Ren Shenglian, Zhang Yan, Feng Lamei, Li Zhenwei, Wang Yangyang. 2016b&. Structural and geochronology characteristics of Taoyuan ductile shear zone in Tanlu fault belt and their significance. Chinese Journal of Geology, 51(4): 1040~1058.

Wang Xiaofeng. 2000 #. The Tanlu Fault Zone. Beijing: Geological Publishing House.

Wang Xinshe, Zhang Shangkun, Zhang Fuzhong, Yang Chonghui. 2005&. Kinematic vorticities and shear types of the Qingyi ductile shear zone in western Shandong. Acta Geoscientica Sinica, 26(5): 423~428.

Wang Yongsheng, Zhu Guang, Wang Daoxuan, Liu Guosheng, Song Chuanzhong. 2004a&. Relation between *P—T* contitions of two phases of Tanlu strike-slip shear zones and delamination of the orogenic belts on the eastern margin of the Dabie mountains. Geotectonica et Metallogenia, 28(3): 228~238.

Wang Yongsheng, Zhu Guang. 2004b&. The kinematic vorticity number and its measurement. Journal of Hefei University of Technology, 27(11): 1480~1484.

Wang Yongsheng, Zhu Guang, Wang Daoxuan, Song Chuanzhong, Liu Guosheng. 2005&. An attempt to apply three geothermometers in the interpretation of low-temperature mylonites in the southern segment of the Tanlu fault zone. Geology in China, 32(4): 625~633.

Wang Yongsheng, Zhu Guang, Song Chuanzhong, Liu Guosheng. 2006&. Vorticity analysis of the late ductile shear zone in the southern segment of the Tancheng—Lujiang Fault Zone and its tectonic significances. Geological Review, 52(5): 591~600.

Xiang Biwei, Zhu Guang, Wang Yongsheng, Xie Chenglong, Hu Zhaoqi. 2007&. Mineral deformation thermometer for mylonitization. Advances in Earth Science, 22(2): 126~135.

Xiao Wenjiao, Zhou Yaoxiu, Yang Zhenyu, Zhao Xixi. 2000&. Multiple rotation and amalgamation processes of Dabie—Tanlu—Sulu orogeny. Avdance in Earth Sciences, 15(2): 147~153.

Xu Jiawei. 1980#. Translational movement and geological significance of Tan-Lu fault zone. Academic Papers on International Exchange Geology (1): Structural Geology, Geomechanics. Beijing: Geological Publishing House: 129~142.

Xu Jiawei. 1985&. Some advances in the study of the great horizontal displacement along the northern Tancheng—Lujiang fracture zone. Geological Review, 31(1): 83~86.

Xu Jiawei, Wang Ping, Ching Rengao, Ye Zhoujie. 1986. Ductile deformation and regional strain field in the southern segment of the Tancheng—Lujiang fault zone, castern China. Pure Applied Geophys, 124(1~2): 337~364.

Xu Jiawei, Zhu Guang, Tong Weixing, Cui Kerei, Liu Qing. 1987. Formation and evolution of the Tancheng—Lujiang wrench fault system: a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean. Tectonophysics, 134(4): 273~310.

Xu Jiawei, Ma Guofeng. 1992&. Review of ten years (1981~1991) of research on the Tancheng—Lujiang fault zone. Geological Review, 38(4): 316~324.

Xu Jiawei, Zhu Guang, Lü Peiji, Zheng Xuexin, Sun Shiqun. 1995&. Progress in studies on strike-slip chronology of the Tanlu fault zone. Geology of Anhui, 5(1): 1~12.

Xu Shutong, Jiang Laili, Liu Yican, Zhang Yong. 1992&. Tectonic framework and evolution of the Dabie mountains in Anhui, eastern China. Acta Geological Sinica, 66(1): 1~14.

Xue Dejie, Xu Xianbing, Li Yuan, Zhang Zejun, Lou Fasheng. 2014&. Structural characteristics and deformation mechanism of early Paleozoic Granite in the Wugongshan Area, South China. Acta Geological Sinica, 88(7): 1236~1246.

Yan Lejia, Zhu Guang, LinShaoze, Zhao Tian. 2014#. Neotectonic activity and formation mechanism of the Yishu fault zone. Science China (Series D), 44(7): 1452~1467.

Yang Wencai, Yu Changqing. 2001&. Kinetics and dynamics of development of the Dabie—Sulu UHPM terranes based on geophysical evidences. Chinese Journal of Geophysics, 44(3): 346~359.

Yin An, Nie Shangyou. 1993. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault system, eastern Asia. Tectonics, 12(4): 801~813.

Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Guo Lei. 2006&. Fractal analysis of dynamically recrystallized quartz grains and estimation of mainly rheological parameters of the Ranba ductile shear zone, northern Himalayan dome belt. Chinese Journal of Geology, 41(1): 158~169.

Zhang Kaijun. 1997. North and South China collision along the eastern and southern North China margins. Tectonphysics, 270(1~2): 145~156.

Zhang Peng, Wang Liangshu, Zhong Kai, Ding Zengyong. 2007&. Research on the segmentation of Tancheng—Lujiang Fault Zone. Geological Review, 53(5): 586~591.

Zhang Yueqiao, Dong Shuwen. 2008&. Mesozoic tectonic evolution history of the Tanlu fault zone, China: Advances and new understanding. Geological Bulletin of China, 27(9): 1371~1390.

Zhao Tian, Zhu Guang, Lin Shaoze, Song lihong. 2014a&. Protolith ages of metamorphic rocks of the Zhangbaling group along the southern segment of the Tanlu fault zone and their tectonic implications. Geological Review, 60(6): 1266~1283.

Zhao Tian, Zhu Guang, Lin Shaoze, Yan Lejia, Jiang Qinqin. 2014b #. Protolith ages and deformation mechanism of metamorphic rocks in the Zhangbaling uplift segment of the Tanlu fault zone. Science China

(Series D),44(10):2112~2129.

Zhao Tian,Zhu Guang,Xiang Biwei,Lin Shaoze,Gu Chengchuan.2016&. Discussion on initial mechanism of the Tanlu fault zone. Bulletin of Mineralogy,Petrology and Geochemistry,35(6):1120~1140.

Zheng Yadong,Wang Tao,Zhang Jinjiang.2008&. Theory and practice of kinematic vorticity(Wt). Earth Science Frontiers,15(3):209~220.

Zhu Guang,Xu Jiawei, Sun Shiqun.1995&. Isotopic age evidence for the timing of strike-slip movement of the Tan-Lu Fault Zone. Geological Review,41(5):452~456.

Zhu Guang, Niu Manlan, Liu Guosheng, Wang Daoxuan, Song Chuanzhong.2002&. Structural,Magmatic and Sedimentary Events of the Tanlu fault belt during its early cretaceous strike-slip movement. Acta Geologica Sinica,76(3):325~334.

Zhu Guang, Wang Daoxuan, Liu Guosheng, Niu Manlan, Song Chuanzhong. 2004a&. Evolution of the Tanlu fault zone and its responses to plate movements in west pacific basin. Chinese Journal of Geology,39(1):36~49.

Zhu Guang,Wang Yongsheng,Niu Manlan,Liu Guosheng,Xie Chenglong. 2004b&. Synorogenic movement of the Tanlu Fault Zone. Earth Science Frontiers,11(3):169~182.

Zhu Guang,Hou Mingjin,Wang Yongsheng,Liu Guosheng,Niu Manlan. 2004.Thermal evolution of the Tan-Lu fault zone on the eastern margin of the Dabie mountains and Its tectonic implications. Acta Geologica Sinica(English edition),78(4):940~953.

Zhu Guang, Niu Manlan, Liu Guosheng, Wang Yongsheng, Xie Chenglong,Li Changcheng. 2005&. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating for the strike-slip movement on the Feidong part of the Tanlu fault belt. Acta Geologica Sinica,79(3):303~316.

Zhu Guang, Zhang Li, Xie Chenglong, Niu Manlan, Wang Yongsheng. 2009&. Geochronological constraints on tectonic evolution of the Tanlu fault zone.Chinese Journal of Geology,44(4):1327~1342.

Zhu Guang,Wang Wei,Gu Chengchaun,Zhang Shuai,Liu Cheng.2016&. Late mesozoic evolution history of the Tanlu fault zone and its indication to destruction processes of the north China craton. Acta Petrologica Sinica,32(4):935~949.

Analysis on structural deformation of the Xishanyi pluton in the Tancheng—Lujiang fault belt

LI Zhenwei[1), SONG Chuanzhong[1), LI Jiahao[1), WANG Wei[2), WANG Yangyang[1),
REN Shenglian[1), LI Hailong[1), YUAN Fang[1), HAN Xu[1), LAN Ruixuan[1)

1) *School of Resources and Environmental Engineering,Hefei University of Technology,Hefei*,230009;

2) *Key Laboratory of nuclear resources and environment,East China Institute of Technology,Nanchang*,330013

Objective: The Tancheng—Lujiang fault (Tanlu fault) belt,as a giant shear zone in eastern China,has been a hot spot among geologists since it was discovered.The Xishanyi pluton,which protolith was monzogranite,located in the west of Feidong group.However,the pluton occurred ductile deformation due to sinistral strike-slip shearing of the Tanlu fault belt.The mylonite with strong deformation is formed on both sides of the pluton,and the gneiss within the pluton is deformed weakly.Due to the serious overburden, only the west side is exposed. In this paper, the structural analysis of mylonite and gneiss are carried out,to investigate the structural deformation characteristics of the Xishanyi pluton.

Methods: Detailed field observation, microstructure analysis, estimation of metamorphic—deformation temperature,analysis of tectonic stress field,kinematic vorticity calculation,the fractal dimension of the quartz,and the calculation of differential stress and strain rate of quartz are used to study the Xishanyi pluton.

Results: Through the observation and analysis,the dynamic recrystallization type of quartz and feldspar in mylonite is mainly GBM and BLG—SR,respectively.The dynamic recrystallization type of quartz and feldspar in gneiss is SR—GBM and BLG,respectively .In addition,the fractal dimension of the quartz in mylonite is between 1.164~1.173,indicating the metamorphic—deformation temperature of mylonite is between 500~600℃.However it is 400~530℃ in gneiss.Through microscopic analysis and measurement ,the vorticity value W_k is between 0.86~0.94, which is greater than 0.75 and indicates that the shear zone on the west side of the Xishanyi pluton is mainly simple shear,with little component of pure shearing;The results of stress field show that the direction of maximum compressional stress is between 164°~171°.The minimum differential stress is between 20.02~23.08Mpa,and strain rate of the shear zone is between 1.35×10^{-13}~$4.93\times10^{-13}s^{-1}$.

Conclusions: Through detailed field observation and indoor analysis on the Xishanyi pluton,we know the pluton participated in the activities of the Tanlu fault belt as a tectonic lenticles.The pluton and the shear zone on both sides constitute the "S—C" fabric.The pluton recorded the activity characteristics of the Tanlu fault belt.

Keywords: the Tancheng—Lujiang fault belt (Tanlu fault belt);the Xishanyi pluton;ductile shear zones;

mylonite;analysis of tructural deformation

Acknowledgements: This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41272222) and Anhui province public welfare geological project (No. 2016-g-4)

First author: LI Zhenwei, male, born in 1991, a doctoral candidate of Hefei University of Technology and majored in structural geology. Email: wflqzhenwei@ sina.com

Corresponding author: SONG Chuanzhong, male, born in 1954, a professor of Hefei University of Technology, mainly engaged in the teaching and research of structural geology. Email: czsong69@ 163.com

Manuscript received on: 2018-02-26; Accepted on: 2019-02-20; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.02.004

《地质论评》、《地质学报》(中、英文版)继续被评为“中国最具国际影响力学术期刊”

《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志有限公司、清华大学图书馆和中国学术文献国际评价研究中心《中国学术期刊国际引证年报》(2018 版)(以下简称《年报》)已发布。《年报》数据显示,由中国地质学会主办的《地质学报(英文版)》、《地质学报》和《地质论评》均名列“2018 中国最具国际影响力学术期刊”榜。《地质学报(英文版)》的国际影响力指数 *CI* 为 235.734,国际他引总被引频次 3325,国际他引影响因子(1.457);《地质学报》的国际影响力指数 *CI* 为 150.885,国际他引总被引频次 2603,国际他引影响因子(0.451);《地质论评》的国际影响力指数 *CI* 为 84.486,国际他引总被引频次 1321,国际他引影响因子(0.365)。

《年报》将中国主办的期刊分为人文社科、自然科学与工程技术两个类别,按一定公式(佚名,2014)分别计算期刊的国际影响力指数(*CI*),按 *CI* 排序,遴选 TOP10%为国际影响力品牌学术期刊。TOP5%(175 种)的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5%~10% (175 种)为“国际影响力优秀学术期刊”。《年报》已连续发布 7 年,《地质论评》、《地质学报》(中、英文版)一直名列 TOP5%。《年报》指出:这些 TOP10%的期刊是我国学术期刊“走出去”的杰出代表,对我国学术期刊的国际影响力提升起到了良好的带动作用。







参 考 文 献

佚名. 2014.《地质论评》等被遴选为“2013 中国最具国际影响力学术期刊”. 地质论评, 60(2):331,408.

LIU Zhiqiang, ZHANG Yuxu: *Geological Review*, *Acta Geologica Sinica* (Chinese and English edition) Continuously Awarded the Title of “the Most Influential International Academic Journals of China”