

# 桐柏杂岩北界剪切带的构造变形特征研究

李海龙<sup>1)</sup>, 宋传中<sup>1)</sup>, 韩建军<sup>2)</sup>, 李加好<sup>1)</sup>, 任升莲<sup>1)</sup>, 张妍<sup>1)</sup>, 王微<sup>1)</sup>, 杨帆<sup>1)</sup>,  
李振伟<sup>1)</sup>, 王阳阳<sup>1)</sup>, 袁芳<sup>1)</sup>, 兰瑞烜<sup>1)</sup>

1) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009; 2) 青海省地质调查局, 西宁, 810001

**内容提要:**桐柏杂岩北界剪切带是桐柏—大别造山带发育的一条大型的左行走滑韧性剪切带, 发育糜棱岩、超糜棱岩以及强直片麻岩等强变形岩石。通过对剪切带内岩石的矿物共生组合、剪切带的位移量计算、石英的分维数计算、石英颗粒的差异应力以及应变速率的估算等多种方法分析结果显示: 桐柏杂岩北界剪切带的位移量为 38.3 ~ 41.1 km; 动态重结晶石英颗粒边界统计数据的相关系数  $R$  均大于 0.96, 动态重结晶颗粒边界具有统计意义上的自相似性; 分维数为 1.207 ~ 1.302 之间, 从剪切带的核部向边部, 颗粒粒径和分维值的变化是逐渐变大的。石英的分维值反映出石英的动态重结晶与剪切带密切相关, 变质变形由剪切带核部向边部逐渐减弱。桐柏杂岩北界剪切带的差异应力值为 23.583 ~ 46.983 MPa 之间, 应变速率为  $1.70 \times 10^{-11} \sim 9.74 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ 。通过对比剪切带内动态重结晶石英颗粒的粒径、差异应力和应变速率可以发现, 差异应力与应变速率表现出一定的正相关性, 都随着从剪切带的核部到边部慢慢变小; 而石英的粒径则与差异应力和应变速率表现出负相关性, 从剪切带核部到边部, 随着石英粒径的变大, 差异应力和应变速率变小。差异应力越大, 导致石英颗粒的受力强度越大, 变形越强, 表现出来的就是应变速率越强。从显微构造变形角度来研究认识该剪切带, 对揭示桐柏—大别造山带的构造演化以及构造模型的建立有着重要的构造意义。

**关键词:**桐柏杂岩北界剪切带; 位移量; 分维度; 差异应力; 应变速率

秦岭—桐柏—大别—苏鲁碰撞造山带是世界上出露规模最大的高压—超高压构造带。该造山带被一系列北北东向断裂或盆地切割为五个主要构造块体, 从西向东可以将其分为五段: 秦岭造山带、桐柏造山带、西大别造山带、东大别造山带和苏鲁造山带(刘晓春等, 2011)。近几十年来, 基于岩石学、同位素地球化学、构造地质学、地质年代学等相关资料, 地质学家们提出了许多构造模式来解释该构造带的高压—超高压岩石的折返剥露机制, 这些研究主要集中在大别—苏鲁造山带以及秦岭造山带, 而对于中间的桐柏造山带以及西大别造山带研究较少(Okay et al., 1993; Eide et al., 1994; 杨志华, 1997; Faure et al., 1999, 2003; Webb et al., 1999; Hacker et al., 2000, 2009; Ratschbacher et al., 2000; Zheng Yongfei et al., 2003, 2007; 徐启东等, 2005; 周建波等, 2005; Hu Shengbiao et al., 2006; Xu Zhiqin et al., 2006; Zhou Jianbo et al., 2008; Liu Xiaochun et al.,

2008; Wu Yuanbao et al., 2008; 王宗起等, 2009; 刘鑫等, 2010; 刘晓春等, 2011; Cui Jianjun et al., 2012; Wang Xianda et al., 1998; Kröner et al., 1993; Wang Erchie et al., 2003; Lin Wei et al., 2015; 罗金海等, 2017; 任升莲等, 2017; 武昱东等, 2017)。前人的研究成果主要集中在造山带中的变质岩以及变质相、构造格局、碰撞折返模式等大的构造方向(翟淳, 1988; 武长得, 1990; 游振东等, 1999; 钟增球等, 1996, 2001; 索书田等, 2001; 林爱明等, 2002; 张利等, 2002; 黄少英等, 2006; 徐备等, 2007; 崔建军等, 2009; 宋传中等, 2009; 黄鹏等, 2016; 刘欢等, 2016)。而且对于造山带的折返模式的研究与认识大多依赖桐柏杂岩南北边界韧性剪切带的精细研究, 殷店—马垅剪切带是桐柏杂岩南界一条大型的重要边界剪切带, 该剪切带将桐柏杂岩主体与南部的高压—超高压岩片分离开来, 因此受到诸多地质学者的精细研究(林伟等, 2003; 郑永飞等, 2003; 向必伟等,

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41272222, 41502193)的成果。

投稿日期: 2016-10-23; 改回日期: 2017-3-23; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.03.010

作者简介: 李海龙, 男, 1991年生。博士研究生, 构造地质学专业。Email: sargnlee@126.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。

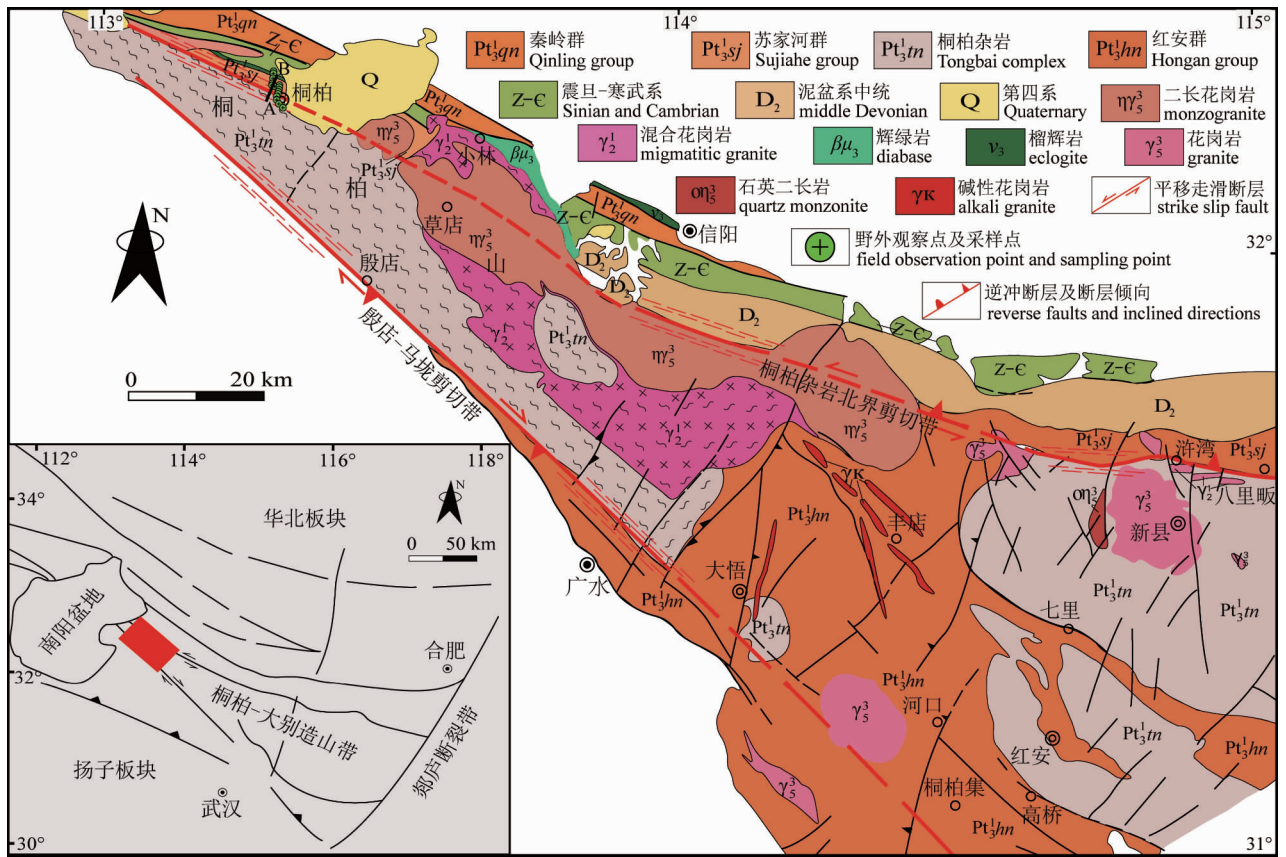


图1 桐柏造山带地质简图

Fig. 1 The geological sketch map of Tongbai orogenic belt

2007; 韩建军等, 2014, 2015; 刘欢等, 2015)。而对于桐柏杂岩北界韧性剪切带, 研究的不是很多, 也缺乏一定的资料数据 (崔建军等, 2009; 任升莲等, 2011), 桐柏杂岩北界剪切带与南界的殷店—马垅剪切带来讲同等重要, 对认识桐柏造山带的构造型式以及构造演化有着重要的作用。因此, 对桐柏杂岩北界剪切带的精细研究显得尤为重要。

近期笔者对桐柏杂岩北界剪切带上桐柏县地区进行了详细的野外观察, 发现该剪切带内发育大型杆状构造、糜棱岩、以及圈层结构等重要的构造现象, 而且这些构造现象应该与造山带内部变形有着密切联系。笔者尝试通过对该剪切带内的显微构造变形的精细研究来确定剪切带的应变速率、古应力差、分维度以及剪切位移量等剪切带要素, 从而反映出整个造山带的构造形态, 对认识桐柏造山带的构造演化过程以及构造格局有着重要的意义。

## 1 区域地质概况

桐柏—大别造山带是一个由华北陆块南缘和扬子陆块北缘通过陆—陆位碰撞而形成的大型造山

带, 该造山带位于秦岭—桐柏—大别—苏鲁造山带的中部, 是连接秦岭造山带与大别—苏鲁造山带的纽带。在斜向汇聚作用下 (索书田等, 1995, 2000, 2001; 张国伟等, 1996, 1997; 许志琴等, 1999, 2001), 在造山带的南北两侧发育了一系列断裂带, 其中研究程度最高的就是襄樊—广济断裂带和殷店—马垅剪切带, 著名的襄樊—广济断裂带一直被认为是作为桐柏—大别造山带与扬子板块的汇聚—拼合带 (张国伟等, 1996, 2006; 宋传中等, 2009; Li Sanzhong et al., 2010), 由于后期的构造叠加和改造, 现在仅出露在襄樊、安陆一带。作为桐柏杂岩主体南界的殷店—马垅剪切带也是许多地质学者所研究的对象 (宋传中等, 2009; 韩建军等, 2014, 2015; 刘欢等, 2015)。而对于桐柏杂岩北界以及以北的剪切带, 由于构造现象以及岩石单元比较复杂, 研究的较少 (任升莲等, 2011)。

桐柏造山带向西越过南阳盆地与秦岭造山带相连, 向东以大悟断裂为界与大别—苏鲁造山带相接 (张宏飞等, 1999; 董云鹏等, 2003; 张本仁等, 2005; Liu Xiaochun et al., 2005; 刘鑫等, 2010; 刘晓春等,

2011)。前人对桐柏造山带的岩性构造单元和边界进行了划分,从北到南分别是:宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭群杂岩、龟山组片岩、南湾组复理石、定远组火山岩、桐柏北部高压片岩、桐柏核部杂岩、桐柏南部高压片岩以及随州构造变形带,这些构造单元之间多以韧性剪切带分割,剪切活动主要发生在扬子与华北两大板块俯冲碰撞之后(刘少峰等,2013)。Liu Xiaochun 等(2005,2008,2011,2013)认为桐柏造山带主要由两套造山系统构成,北侧为古生代增生造山系统,南侧为中生代碰撞造山系统。其中古生代增生造山系统包括宽坪群、二郎坪群、秦岭群、龟山杂岩和南湾复理石。中生代碰撞造山系统则包括八里畷构造混杂岩带(定远组)、北部榴辉岩带(浒湾组)和桐柏杂岩、南部榴辉岩带和蓝片岩—绿片岩带。

桐柏杂岩北界韧性剪切带位于桐柏造山带北侧,分隔桐柏杂岩主体与北侧高压榴辉岩变质带,由于燕山期的岩浆侵入,使得该剪切带只在桐柏县地区出露完好。剪切带内岩石主要组成包括片岩、片麻岩、长英质糜棱岩系列,主要矿物包括长石、石英、黑云母、白云母及角闪石,石英、长石等主要矿物变形。剪切带内发育有大量透入性面线理,剪切带总体走向南东东向(约 130°),倾向东北(约 40°),倾角 40°~70°,矿物生长线理、杆状构造以及大量发育的 A 型褶皱枢纽均呈南东东走向(130°~150°)(图 1)。同时,桐柏杂岩北界剪切带内发育有丰富的构造流体,为研究剪切带的应变速率、古应力差、分维度以及剪切位移量等剪切带要素提供了有利条件。

## 2 桐柏杂岩北界剪切带的岩相学分析

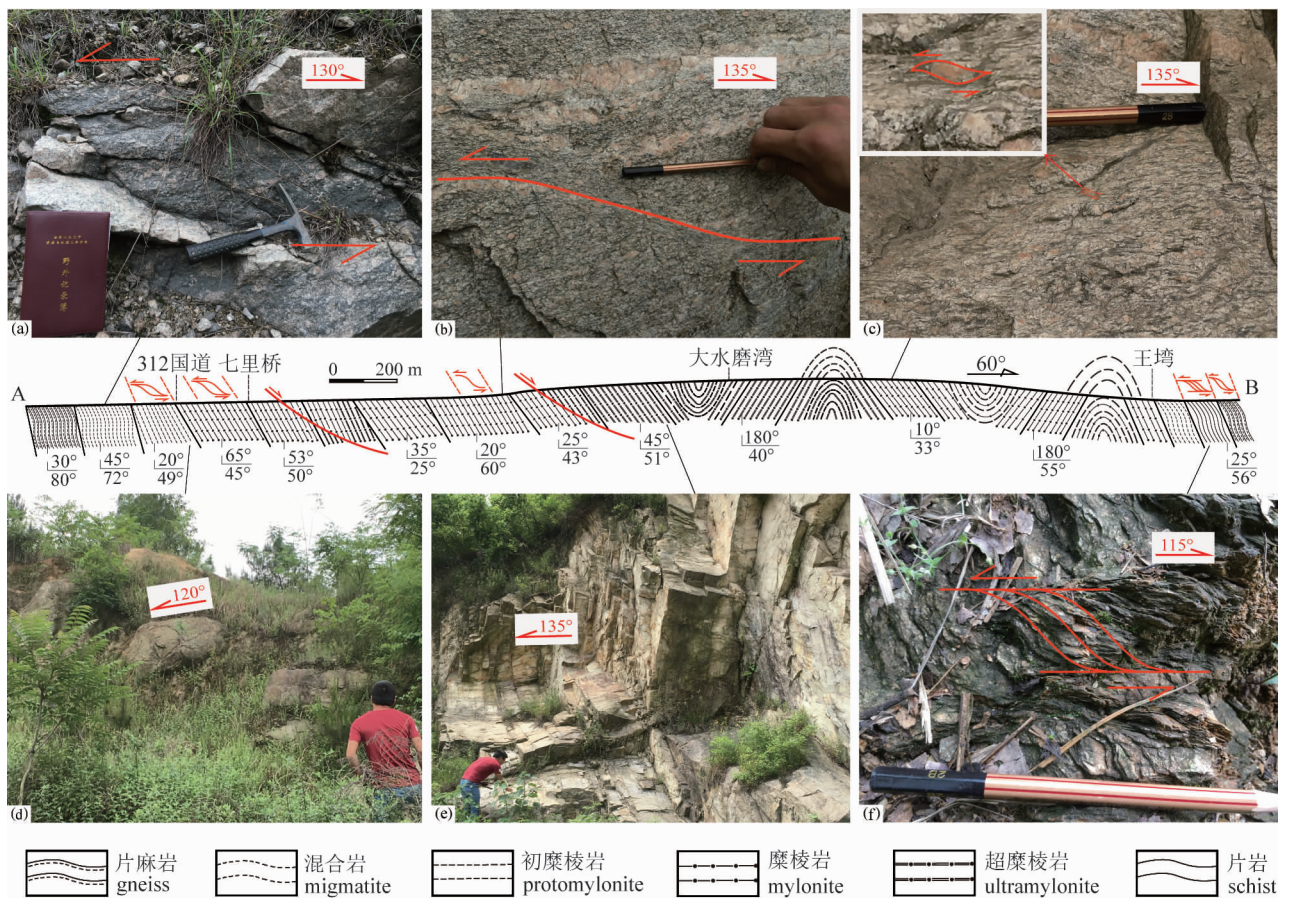


图 2 桐柏杂岩北界剪切带构造剖面图(据李海龙等,2017)

Fig. 2 The structural profile of the shear zone in northern boundary of Tongbai Complex (from Li Hailong et al., 2017)

(a)—312 国道旁混合岩透镜体;(b)—312 国道旁糜棱岩中的小型韧性剪切;(c)—糜棱岩中的钾长石残斑;(d)—312 国道旁糜棱岩中的杆状构造;(e)—一大水磨湾糜棱岩中的分层;(f)—白云片岩中的 S—C 组构

(a)—The migmatite lens beside 312 National Road;(b)—Small ductile shear in the mylonite beside 312 National Road;(c)—K-feldspar porphyroblast in the mylonite;(d)—Rod structure in the mylonite beside 312 National Road;(e)—The layer structure in the mylonite in Dashuimo Bay;(f)—S—C fabric in Muscovite schist

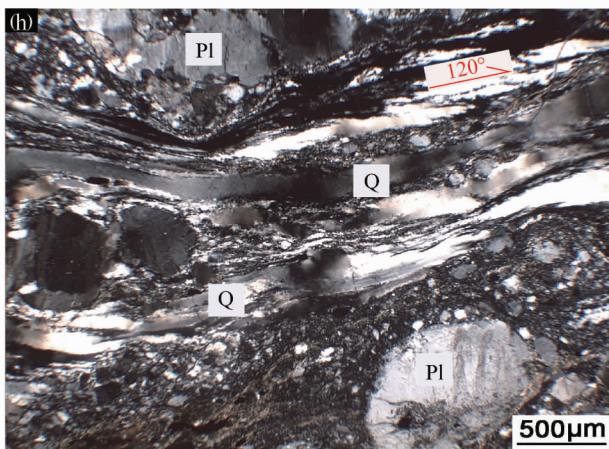
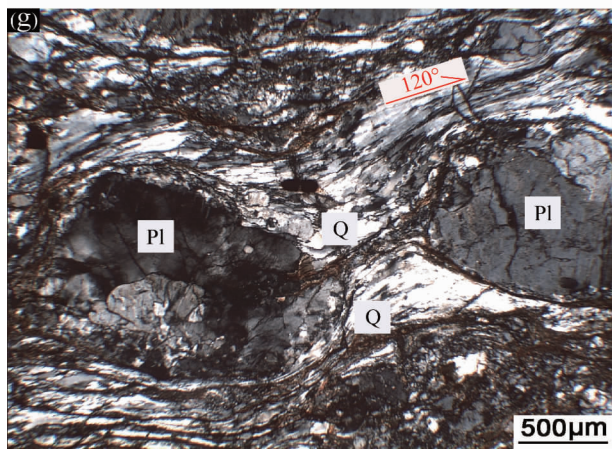
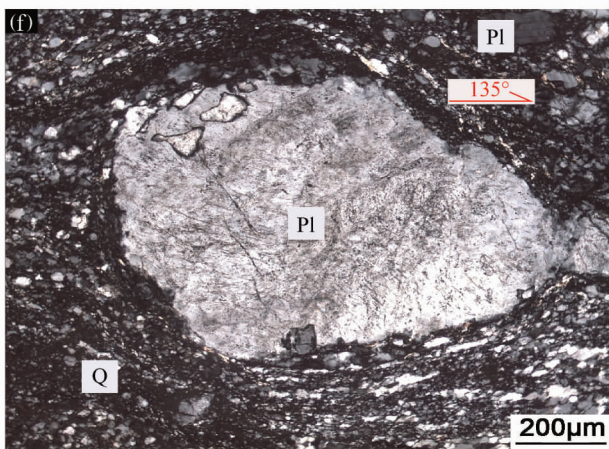
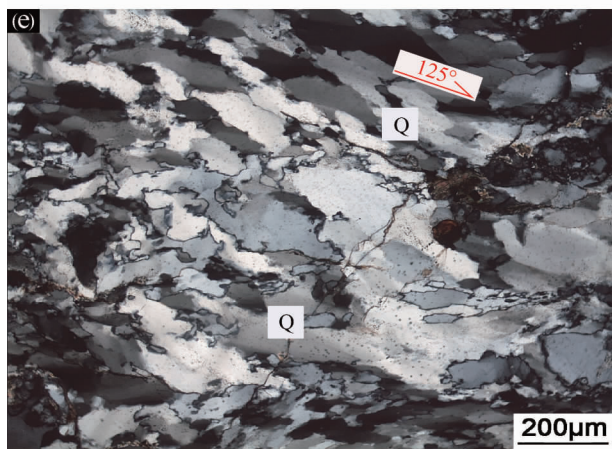
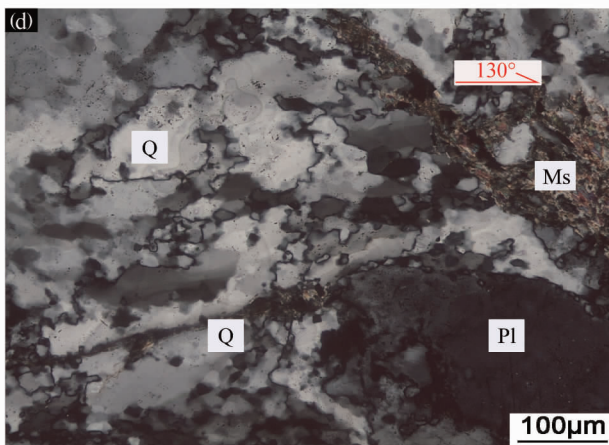
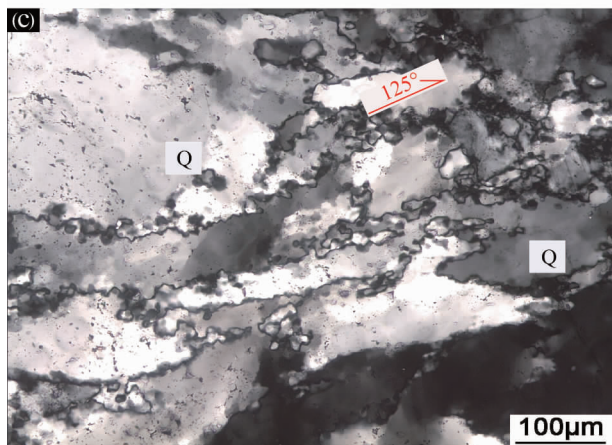
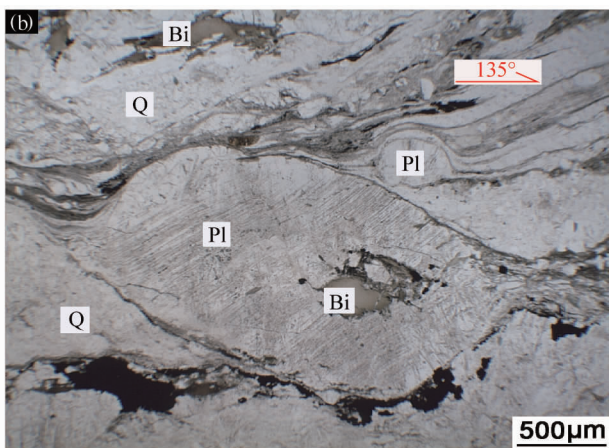
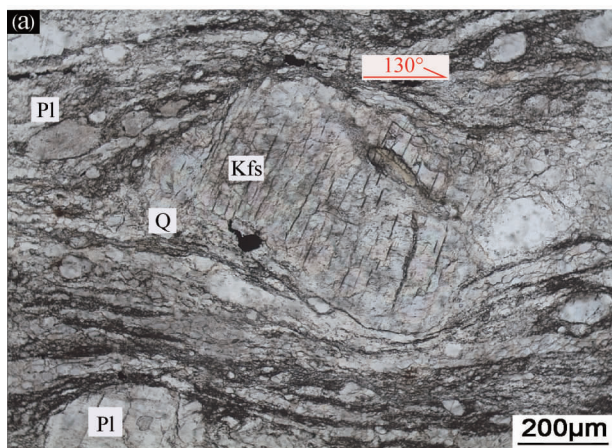


图 3 桐柏杂岩北界剪切带的显微构造图片

Fig. 3 The microscopic structure photos of the shear zone in northern boundary of Tongbai Complex

(a), (b)—糜棱岩的流动构造以及长石残斑; (c)—石英的膨凸式动态重结晶; (d)—石英亚颗粒旋转向颗粒边界迁移式动态重结晶转变; (e)—石英的颗粒边界迁移式动态重结晶; (f)—长石的膨凸式动态重结晶核幔构造; (g), (h)—石英的塑形流动以及单晶条带  
(a), (b)—Feldspar porphyroblast and flow structure of the mylonite; (c)—Bulge type dynamic recrystallization of quartz; (d)—Sub particle type transformed into boundary migration dynamic recrystallization of quartz; (e)—Boundary migration dynamic recrystallization of quartz; (f)—Bulge type dynamic recrystallization and core—mantle fabric of feldspar; (g), (h)—Plastic flow and single crystal band of quartz

为了对桐柏杂岩北界剪切带的变形进行精细的研究,以横跨剪切带的王湾—七里桥剖面作为研究对象,由剪切带北端向南观察一直到剪切带南端出现混合岩和片麻岩,并制作了实测剖面(图 2)。通过对该剪切带剖面的岩石进行矿物共生组合分析以及显微构造分析,来了解剪切带的变质变形特征。桐柏杂岩北界剪切带主要岩性出露有糜棱岩、超糜棱岩、混合岩以及强直片麻岩等(图 3)。

强直片麻岩是高级变质区发育的一种细密条带状或条纹状构造片麻岩。岩石中矿物分带性明显,或由浅色矿物和暗色矿物相间排列组成间隔较密而平直的条带或条纹。有时可见拉伸线理,形成 SL 组构。强直片麻岩是在中、深变质环境强应变带(韧性剪切流变带)中形成的,有明显的剪切流变特征,其空间分布常呈一定宽度的带状,与邻区的韧性剪切带内糜棱岩应属于同期构造产物。关于强直片麻岩,吴玉门等(2003)和孙占亮等(2004)的研究均有提及到。通过对野外片麻岩以及糜棱岩中构造现象的分析可以知道,桐柏杂岩北界剪切带是以条左旋平移的大型韧性剪切带。这些构造现象包括糜棱岩中不对称钾长石残斑(图 2c),小型韧性剪切(图 2b),白云片岩中的 S—C 组构(图 2f)以及混合岩透镜体(图 2a)等,这些构造标志说明桐柏杂岩北界剪切带是左行平移的。

桐柏杂岩北界剪切带上的糜棱岩均是长英质糜棱岩,共生矿物组合主要为石英+斜长石+钾长石+黑云母等,石英发生 GBM 式动态重结晶,呈它形,多晶条带状,粒径大小 0.01~0.30 mm,含量约 60%;长石具核幔构造,残斑呈自形,基质长石呈半自形—它形,粒径大小 0.1~2.0 mm,含量约 35%;黑云母在基质中沿石英的多晶条带分布,呈它形,粒径 0.01~0.03 mm,含量约 3%;具有典型的糜棱结构和流动构造。残斑主要为斜长石和钾长石,基质为石英+斜长石+黑云母等;根据石英和长石的动态重结晶样式估计变形温度约 580℃。

桐柏杂岩北界剪切带上的超糜棱岩均是长英质

糜棱岩,共生矿物组合主要为石英+斜长石+钾长石+黑云母+白云母等,石英发生 GBM 式动态重结晶,呈它形,单晶条带状,呈拔丝构造,粒径大小 0.01~0.20 mm,含量约 50%;长石具核幔构造,发生 BLG 式动态重结晶,残斑呈自形,基质长石呈半自形—它形,粒径大小 0.2~3.0 mm,含量约 40%;黑云母在基质中沿石英的多晶条带和长石残斑的边界分布,呈它形,粒径 0.01~0.03 mm,含量约 5%;白云母含量很少,呈自形—半自形,粒径 0.02~0.10 mm,含量约 3%;具有典型的糜棱结构和流动构造以及拔丝构造。残斑主要为斜长石和钾长石,基质为石英+斜长石+黑云母+黑云母等;根据石英和长石的动态重结晶样式估计变形温度约 650℃。

桐柏杂岩北界剪切带上的强直糜棱岩主要是角闪质片麻岩,共生矿物组合主要为石英+斜长石角闪石等,呈细密条带状,浅色矿物和深相间排列,透入性片麻理发育,并且产状与剪切带糜棱岩的一致,石英呈半自形—它形,粒径大小 0.1~0.8 mm,含量约 40%;长石呈自形,粒径大小 0.2~2.0 mm,含量约 30%;角闪石呈自形—半自形与斜长石共生,粒径约 0.3~1.4 mm,含量约 25%;黑云母呈自形,粒径 0.05~0.50 mm,含量约 3%,具有粒状结构和细密条带状构造。共生的角闪石和斜长石矿物对可以通过探针实验来计算形成温度。

### 3 桐柏杂岩北界剪切带的位移量计算

#### 3.1 有限应变测量及涡度分析

为了查明该地区由于韧性剪切变形而造成的岩石有限应变特征及规律,笔者从剪切带内选择 10 块标本进行岩石的有限应变测量。样品编号分别是 XY-27、XY29-1、XY29-2、XY-30、XY-31、XY32-1、XY-33、XY-35、XY-36、XY-37。有限应变测量采用长短轴法,显微镜下对 XZ 面上的变形长石进行测量统计(至少 50 组),计算其长短轴比。测量结果显示(李海龙等,2017),桐柏杂岩北界剪切带中岩石的有限应变  $R_{\text{长}} = 1.88 \sim 2.04$ ,平均值为 1.96;涡

度为  $W_k = 0.82 \sim 0.90$ , 平均值为 0.86, 均大于 0.75, 由此可以知道, 桐柏杂岩北界剪切带是一条以简单剪切为主, 纯剪切为辅的韧性剪切带。

### 3.2 剪切带的位移量估算

自 1979 年西班牙巴塞罗那第一次国际韧性剪切带会议以来, 韧性剪切带不仅作为地壳深部变形的重要形式受到普遍重视, 而且一直被认为是研究最全面、最深入和详尽的构造带, 对韧性剪切带位移量的研究是其中研究最多的内容之一(赵仁夫等, 2009)。然而, 对于位移量的计算针对不同地区的地质体有多种方法, 如:

(1)平衡剖面法: 假定在一个滑脱面上的变形过程中剖面的面积是守恒的, 并据此估算出了滑脱面的深度: 假设滑脱面的深度是已知的, 面积守恒的技术反过来用于计算造山带的缩短作用, 利用长度平衡方法即可计算滑脱面的位移量, 这种方法是假定在平面应变和纯剪切变形中, 且忽略构造压实作用和压溶作用产生的误差的前提下进行估算的;

(2)数学方法: Ramsay 等(1984)提出用数学方法计算总剪切量即  $S = \int_0^x \gamma dx$ , 其中  $\gamma$  为剪应变,  $x$  为距剪切带一边的距离, 这个积分值是求出剪切量  $\gamma$  对距离  $x$  曲线下方的面积即等于剪切带总位移量, 一般函数都是未知, 都用方格纸来测得面积代表位移, 这种方法适用于简单剪切变形的剪切带。自然界不存在简单剪切变形和纯剪切变形, 所以一般情况下, 只要是以简单剪切变形为主 ( $W_k > 0.75$ ) 的剪切带都可以利用数学方法来估算剪切位移量;

(3)图解(集成)方法: 在横过剪切带剖面的利用各点上的剪应变  $\gamma = \tan\Phi$  反算出角应变  $\Phi$ , 根据  $\Phi$  角在各个点上绘出方位线, 最初的方位线垂直于

剪切带, 然后用图解法将  $\Phi$  余角方向用圆滑曲线连接, 即可确定剪切带总位移量。这种方法适用范围较广;

(4)地质方法: 利用层面、岩性界面、脉岩等先存标志的偏转进行位移量计算, 这种计算直观、简单, 可直接用于计算, 但在地质要素不全的情况下难以计算剪切带总位移量, 在剖面上所计算的是垂直位移量, 在平面上所计算的是水平位移量。

由于剪切带位移量计算方法比较多, 但是各有相应的使用条件, 所以要根据剪切带的特征选择相应的方法。由有限应变测量和涡度分析结果知道桐柏杂岩北界剪切带是以简单剪切变形为主的, 纯剪分量很少, 在此排除岩石变形中体积变化。可以通过数学方法来进行估算。为了保证估算结果的可信度, 再利用集成方法来进行辅佐验证。

#### 3.2.1 数学法估算位移量

由于桐柏杂岩北界剪切带完整出露的区域比较少, 此次观察野外横穿一条完整剪切带的露头剖面(位置如图 1 中的 AB 剖面), 在观测点上统计性测量糜棱岩中的 S—C 组构的锐夹角  $\theta$ , 根据剪切带内面理和剪切带边界间夹角确定横过剪切带不同点位的剪应变  $\gamma$  ( $\gamma = 2/\tan 2\theta$ ), 从剪切带由北向南依次为 No24 的 4 个测点、No26 的 7 个测点、No27 的 3 个测点、No29 的 2 个测点、No30 的 2 个测点、No32 的 3 个测点和 No35 的 3 个测点, 共测了 24 个点, 统计测量  $\theta$ , 计算  $\gamma$ 、 $\Phi$ , 结果如表 1, 根据计算结果作图  $\gamma-x$  曲线(图 4a)。

将剪切带的  $\gamma-x$  曲线导入到 Adobe Photoshop, 利用测量工具测量出  $\gamma$  曲线与  $x$  轴围成的面积为 41.1, 即利用数学法计算得到的剪切带位移量为

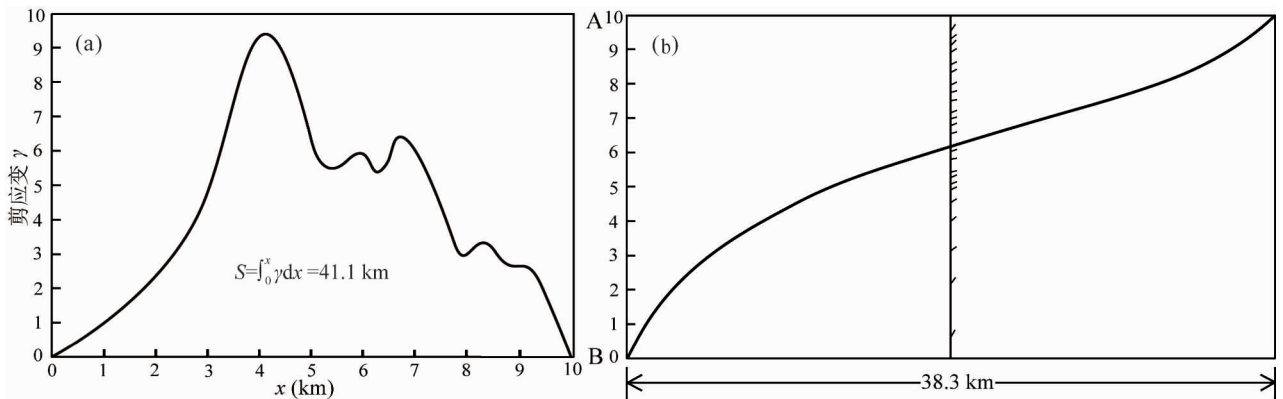


图 4 桐柏杂岩北界剪切带位移量计算方法对比图: (a) 数学法; (b) 图解法; A、B—图 1 中剖面 AB 的两端点

Fig. 4 Diagrams for comparing the calculating methods of the shear zone in northern boundary of Tongbai Complex :

(a) Mathematical method; (b) Graphic method; A, B—Two ends of AB profile in the Fig. 1

41.1 km。

### 3.2.2 图解法(集成法)估算位移量

以测量点到剪切带南边的距离  $x$  为纵坐标,利用测量点与剪切带边界的夹角  $\varphi$  来作图,在每个对应的测量点上用短线标出  $\varphi$  角的方向(图 4b 中的短线),根据短线的方向将这些短线拟合成一条平滑的曲线,这条曲线在  $x$  轴上的投影即为未知的位移量。所以根据图解法所求得的位移量为 38.3 km。

综合数学法和图解法可知,这两种方法虽然思路不同,但是得到的结果是吻合的,所以可以视为桐柏杂岩北界剪切带的位移量为 38.3 ~ 41.1 km。

## 4 桐柏杂岩北界剪切带的显微构造变形分析

显微构造变形既是区内构造活动事件响应,也是到区内重大成矿事件流体行为的表现(邓军等,2004)。而韧性剪切带是变形和流体活动集中的区域,剪切带内的构造岩则是显微构造变形特征变形

行为的载体,也是相应变形环境的受体。显微构造研究岩石内部几何要素或矿物(集合体)组构越来越受到重视(陈国达,1985;胡玲等,1998,2009;刘瑞珣,1992),并且已经发挥出微观尺度构造研究的独特优势。精细的显微构造研究不仅对构造变形环境约束具有重要意义,还在一定程度上对控矿断裂动力学机制具有指导性意义。显微构造分析的内容主要包括韧性变形、脆性变形、分形特征、差异应力测量、应变测量以及应变速率测量等。李本亮等(1999)分别对四川盆地含油气区、江西德兴和湘中金属矿产区的断裂分维值进行研究比较,发现含油气区的断裂分维值大致介于 1.00 ~ 1.24 之间,明显低于整个区域断裂分维值,分维值越小,越有利于油气成藏;金属矿产区分位置多大于 1.80,大于整个区域分维值, $D$  值越大,矿床规模越大。

桐柏杂岩北界剪切带是桐柏造山带内发育的一条重要的大型剪切带,详细的分形、差异应力以及应变速率等显微构造变形研究对认识剪切带的变形环境乃至桐柏造山带的构造演化、形成机制具有重要

表 1 桐柏杂岩北界剪切带位移量的参数计算结果

Table 1 Parameter calculation result of the displacement of the shear zone in northern boundary of Tongbai Complex

露头点	$x$ (m)	夹角 $\theta$ (°)	剪应变 $\gamma$	$\Phi$ (°)	$\varphi$ (°)	产状
No24	9500	35	0.7279	36.05	53.95	面理 $15^\circ \angle 57^\circ$ 矿物拉伸线理 $128^\circ \angle 20^\circ$
	9300	21	2.2212	65.76	24.24	
	9100	25	1.6782	59.21	30.79	
	8900	19	2.5599	68.66	21.34	
No26	8700	15	3.4641	73.90	16.10	面理 $10^\circ \angle 46^\circ$ 矿物拉伸线理 $135^\circ \angle 15^\circ$
	8400	17	2.9651	71.36	18.64	
	8000	15	3.4641	73.90	16.10	
	7700	10	5.4950	79.69	10.31	
	7500	9	6.1554	80.77	9.23	
	7200	12	4.4921	77.45	12.55	
	7000	10	5.4950	79.69	10.31	
No27	6800	12	4.4921	77.45	12.55	面理 $20^\circ \angle 35^\circ$ 矿物拉伸线理 $130^\circ \angle 23^\circ$
	6600	9	6.1554	80.77	9.23	
	6300	11	4.9502	78.58	11.42	
No29	6000	6	9.4093	83.93	6.07	面理 $50^\circ \angle 60^\circ$ 矿物拉伸线理 $130^\circ \angle 3^\circ$
	5600	8	6.9748	81.84	8.16	
No30	5300	13	4.1006	76.30	13.70	面理 $45^\circ \angle 51^\circ$ 矿物拉伸线理 $125^\circ \angle 8^\circ$
	5100	12	4.4921	77.45	12.55	
No32	4900	15	3.4641	73.90	16.10	面理 $20^\circ \angle 60^\circ$ 矿物拉伸线理 $120^\circ \angle 30^\circ$
	4500	19	2.5599	68.66	21.34	
	4200	22	2.0711	64.23	25.77	
No35	3500	20	2.3835	67.24	22.76	面理 $45^\circ \angle 72^\circ$ 矿物拉伸线理 $140^\circ \angle 12^\circ$
	2500	29	1.2497	51.33	38.67	
	1000	32	0.9755	44.29	45.71	

注: $x$ —测量点到剪切带南边的距离; $\theta$ —测量点糜棱岩中 S—C 组构的锐夹角; $\Phi$ —剪应变对应的角应变; $\varphi$ —角应变  $\Phi$  的余角(测量点与剪切带边界的夹角)

的地质意义。

#### 4.1 石英的分形特征

##### 4.1.1 分维数的应用

分形这一概念自引入地质学科以来,作为一种简单而实用的工具已广泛应用于地质学各分支领域,但用于确定韧性变形岩石变形温度和应变速率的研究实例却不多。分形即一个粗糙或零碎的几何形状,可以分成数个部分,并且每个部分都近似为几个整体缩小后的形状,即相似性,分形的程度可以通过分维数  $D$  值来衡量。韧性剪切带变形岩石中动态重结晶石英颗粒边界形态具有自相似性,即表现出分形特征。不同变质程度的石英颗粒其分维数  $D$  值在 1.05 ~ 1.30 范围内。在岩石的变质变形研究中,动态重结晶石英颗粒边界的分形维数随着颗粒边界形成温度的升高而减小,随着应变速率的增加而增大,可以作为韧性变形温度及应变速率的标度计 (Kruhl et al., 1996; Takahashi et al., 1998; Turcotte, 1990)。

(1) 当  $D = 1.23 \sim 1.31$  时,变质相为低绿片岩相,变质温度为 300 ~ 400℃;

(2) 当  $D = 1.14 \sim 1.23$  时,变质相为高绿片岩相到低角闪岩相,变质温度为 490 ~ 540℃;

(3) 当  $D = 1.05 \sim 1.14$  时,变质相为低麻粒岩相,或者花岗岩和英云闪长岩,对应的变质温度或者形成温度为 650 ~ 750℃。

##### 4.1.2 分维数的测量方法

分维数是定量表示自相似性的随机形态的现象最基本的量,是分形几何学中的一个十分重要的参数。其计算方法有很多,常用的测量方法主要有:封闭折线法、周长一面积法和数盒子法。

(1) 封闭折线法。封闭折线法是利用一定边数的多边形来拟合不规则、复杂的曲线图形。主要针对动态重结晶的石英颗粒,假设多边形的边长为  $r$ ,测量多边形的周长  $L$ ,如果  $L$  和  $r$  遵循幂次定律  $L = r^{1-D}$ ,则说明动态重结晶石英颗粒边界的形态是分形分布的。作  $L$  和  $r$  的双对数图,两者之间拟合直线的斜率即为分维数  $D$  值 (Kruhl et al., 1996; 王新社等, 2001)。

(2) 面积一周长法。与封闭折线法思路相同,面积一周长法是通过不规则动态重结晶石英颗粒的周长与和石英颗粒等面积圆的直径相比较来确定分维数。对于重结晶石英颗粒,在显微镜下拍摄显微照片,在显微照片上测定石英颗粒边界的真实周长  $P$  以及颗粒的面积  $A$ 。通过  $A$  计算出与石英颗粒具

有相同面积圆的直径  $d$ 。对  $P$  和  $d$  进行统计测量,以真实周长的对数  $\lg P$  为纵轴,粒径的对数  $\lg d$  为横轴,将所有测量数据投影到双对数图上,对投影点进行最小二乘估计来拟合成一条直线,所得直线的斜率即为分维值  $D$  (王新社等, 2001; 吴小奇等, 2006)。

(3) 数盒子法。数盒子法是测量和计算分维数的传统方法,其基本原理为:用尺度为  $X$  的盒子去覆盖不规则图形,并统计盒子数  $N$ ,然后将尺度  $X$  和盒子数  $N$  投影到双自然对数图上或将  $\ln N$  与  $\ln X$  投影到普通坐标上,最后对投影点利用线性回归方法拟合一条直线,所得直线斜率即为分维数  $D$  (梁东方等, 2002)。

由于数盒子法得结果较为分散,并且相对来说不是很敏锐,所以这种传统的方法现在所用比较少,更多的是利用封闭折线法和面积一周长法,平面内几何对象的分维数值应该在 1 ~ 2 之间。

##### 4.1.3 样品采集和计算结果

桐柏杂岩北界剪切带是桐柏造山带的一条重要的大型左行走滑剪切带,其产状为倾向 20° ~ 60°,倾角 40° ~ 70°,该剪切带上主要发育初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩、混合岩以及强直片麻岩等。此次的 9 个测量样品编号分别为 XY-25、XY29-1、XY29-2、XY-30、XY32-1、XY-33、XY-35、XY-36 和 XY-37,样品分布在从剪切带由北到南的方向上,显微镜下均可看到石英的动态重结晶。

笔者此次选择面积一周长法对动态重结晶石英颗粒来统计测量。首先对薄片中进行动态重结晶的石英颗粒进行显微拍照,然后利用 Adobe Photoshop 软件来绘制样条曲线来逐个拟合石英颗粒的边界,再利用测量工具来测量每个颗粒的真实周长和真实面积,利用所得面积来计算具有相同面积圆的直径,并以此作为动态重结晶石英颗粒的粒径,最后做周长和粒径双对数图。计算结果见表 2 和图 5。

颗粒边界的分维分析结果显示,9 个样品中动态重结晶石英颗粒边界统计数据的相关系数  $R$  均大于 0.96,由此可见,动态重结晶适应颗粒边界具有统计意义上的自相似性;分维数在 1.207 ~ 1.302 之间,并且随着从剪切带的北部到南部,颗粒粒径和分维值得变化也是有规律的,都是先减小后增大,即粒径和分维值从剪切带的核部向边部是逐渐变大的。这表明剪切带核部的变质变形强度要强于边部的,随着远离剪切带核部,变质变形作用减弱,岩石



表 2 桐柏杂岩北界剪切带岩石动态重结晶石英颗粒边界分形特征

Table 2 Fractal characteristics of dynamically recrystallized quartz grain boundary of the shear zone in northern boundary of Tongbai Complex

样品号	测量数 N	粒径分布 (μm)	平均粒径 (μm)	周长分布 (μm)	平均周长 (μm)	分维数 (D)	相关系数 (R)
XY-25	40	59.09 ~ 456.07	169.21	106.92 ~ 1152.69	409.88	1.302	0.973
XY29-1	43	48.28 ~ 281.39	109.38	177.97 ~ 1609.71	519.71	1.265	0.978
XY29-2	42	54.03 ~ 216.75	105.48	230.05 ~ 1017.72	508.09	1.258	0.980
XY-30	46	47.43 ~ 121.41	75.29	177.93 ~ 627.12	322.98	1.224	0.961
XY32-1	42	24.66 ~ 104.23	56.42	96.20 ~ 470.52	259.24	1.207	0.986
XY-33	38	30.12 ~ 167.87	86.33	127.37 ~ 1049.61	468.63	1.232	0.987
XY-35	36	52.43 ~ 169.86	85.30	206.42 ~ 927.11	376.54	1.235	0.985
XY-36	51	48.96 ~ 252.31	100.34	196.36 ~ 1259.86	490.67	1.251	0.969
XY-37	45	58.04 ~ 342.33	159.84	218.37 ~ 2102.83	852.32	1.289	0.960

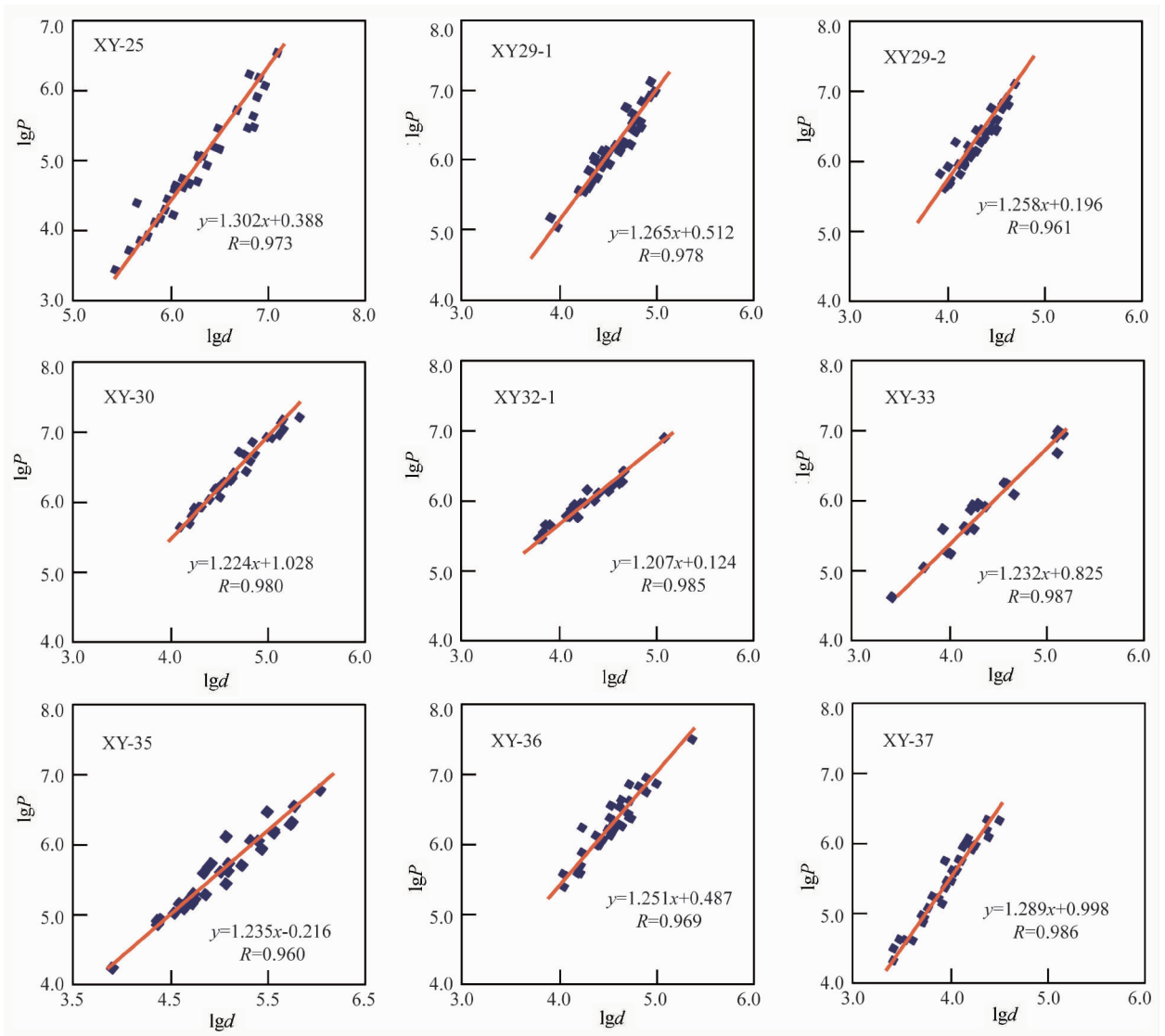


图 5 桐柏杂岩北界剪切带动态重结晶石英颗粒的周长—粒径双对数图

Fig. 5 Log—Log plot of dynamically recrystallized quartz grain size against the perimeter of the Northern boundary shear zone of the Tongbai Complex

$d$ —重结晶石英颗粒粒径;  $P$ —重结晶石英颗粒周长;  $R$ —相关系数

$d$ —diameter of dynamically recrystallized quartz;  $P$ —perimeter of dynamically recrystallized quartz;  $R$ —correlation coefficient

的颗粒粒径和分维值变大。因此,由石英的分维值可以看出石英的动态重结晶与剪切带密切相关,变质变形由剪切带核部向边部逐渐减弱。

## 4.2 差异应力与应变速率

### 4.2.1 差异应力

古应力值的估算对恢复变形构造层次,成矿深度测算等方面具有参考价值(吕承训等,2011)。显微构造测量差应力方法包括矿物自由位错密度统计法、亚颗粒大小法、机械双晶法及动态重结晶颗粒大小法等(胡玲等,2009;刘瑞珣,1992)。目前测量差异应力常用的是动态重结晶颗粒大小法,石英是变形岩石中最为常见的造岩矿物,分布贯穿各个构造变形期,存储了大量的构造期变形信息,在不同温度、不同应力、不同应变速率下产生不同的显微构造,动态重结晶石英颗粒边界普遍具缝合线结构或锯齿状结构,对应变和变形环境做了很好的记录,以其为测量统计对象,具有普遍、简捷、实用的优点(王新社等,2001;李瑞红等,2014)。

本文采用石英动态重结晶亚颗粒大小法对桐柏杂岩北界剪切带差应力值进行计算,利用 Twiss (1986)提出的石英动态重结晶颗粒粒径计算差异应力,公式如下:

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_3 = A \cdot D^{-m} = 6.1 \cdot D^{-0.68} \quad (1)$$

公式(1)中的  $D$  为石英动态重结晶颗粒粒径(mm);  $\sigma$  为差异应力(MPa);  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为最大应力值和最小应力值;  $A$  和  $m$  是常数 6.1 和 0.68。将计算分维值所测量的平均粒径(表 2)代入,即可得到差异应力值。

### 4.2.2 应变速率

应变速率指的是单位时间内发生的线应变或者剪应变,构造运动的应变速率变化范围很宽,可反映韧性剪切带的应变状态,同时会对矿物的动态重结

晶机制产生影响。前人经过对比研究发现, Parrish 等(1976)的湿石英流变速率方法最可靠,公式为:

$$\dot{\epsilon} / (s^{-1}) = 4.4 \cdot 10^{-2} \cdot [\sigma / (MPa)]^{2.6} \cdot \exp[-27778 / (T / K)] \quad (2)$$

公式(2)中  $\dot{\epsilon}$  为应变速率( $s^{-1}$ );  $\sigma$  为差异应力(MPa);  $T$  为变形温度(K),温度采用李海龙等(2017)得到的变形温度平均值 622 °C,即 895.15 K,计算结果见表 3。

计算结果显示:桐柏杂岩北界剪切带的差应力值  $\sigma$  为 23.583 ~ 46.983 MPa 之间,应变速率  $\dot{\epsilon}$  为  $1.70 \times 10^{-11} \sim 9.74 \times 10^{-11} s^{-1}$  之间。通过对比剪切带内动态重结晶石英颗粒的粒径、差异应力和应变速率可以发现,差异应力与应变速率表现出一定的正相关性,都随着从剪切带的核部到边部慢慢变小;而石英的粒径则与差异应力和应变速率表现出负相关性,随着石英粒径的变大,差异应力和应变速率变小,并且从剪切带核部到边部,石英粒径逐渐变大。金属和矿物的实验研究均表明,动态重结晶颗粒的大小与形变达到稳态时的差应力大小有关:差应力越大,颗粒越细(Passchier et al., 2005),差应力越大,导致石英颗粒的受力强度大,变形更强,表现出来的就是应变速率强,这与此次计算结果相吻合。

## 5 讨论与结论

### 5.1 讨论

(1)分形这一概念自从被引入地球学科以来,作为一种简单而实用的工具已广泛应用于地质学各分支领域,但用于确定韧性变形岩石变形温度和应变速率的研究实例却不多。上个世纪末 90 年代, Kruhl 等(1996)和 Takahashi 等(1998)分别对岩石变形温度和应变速率这两方面进行了探索和研究,结果表明动态重结晶石英颗粒的几何边界具有明显

表 3 桐柏杂岩北界剪切带差异应力及应变速率

Table 3 Differential stress and strain rate of the shear zone in northern boundary of Tongbai Complex

样品号	测量数 N	岩性	粒径分布( $\mu m$ )	平均粒径( $\mu m$ )	差异应力(MPa)	应变速率( $s^{-1}$ )
XY-25	40	长英质片麻岩	59.09 ~ 456.07	169.21	23.583	$1.70 \times 10^{-11}$
XY29-1	43	长英质糜棱岩	48.28 ~ 281.39	109.38	29.390	$3.02 \times 10^{-11}$
XY29-2	42	长英质超糜棱岩	54.03 ~ 216.75	105.48	30.435	$3.11 \times 10^{-11}$
XY-30	46	长英质超糜棱岩	47.43 ~ 121.41	75.29	36.719	$4.67 \times 10^{-11}$
XY32-1	42	长英质超糜棱岩	24.66 ~ 104.23	56.42	46.983	$9.74 \times 10^{-11}$
XY-33	38	长英质超糜棱岩	30.12 ~ 167.87	86.33	36.597	$5.29 \times 10^{-11}$
XY-35	36	长英质糜棱岩	52.43 ~ 169.86	85.30	34.621	$4.09 \times 10^{-11}$
XY-36	51	长英质糜棱岩	48.96 ~ 252.31	100.34	31.128	$3.18 \times 10^{-11}$
XY-37	45	长英质糜棱岩	58.04 ~ 342.33	159.84	24.355	$1.98 \times 10^{-11}$

的分形特征,其分维值可用作变形温度计和应变速率计,这是对常规的变形温度和应变速率计算方法的重要补充。但是,Kruhl等(1996)只是根据为数不多的样品推断出的结论,其是否具有普遍意义值得分析;而Takahashi等(1998)的结论则是根据实验推导出的,是在理想状态下适用的结论,而是否适用于复杂的自然界更值得商榷。王新社等(2001)和吴小奇等(2006)尝试性地将Kruhl温度计和Takahashi应变速率计应用在分析鲁西青邑韧性剪切带和郟庐断裂浮槎山构造岩上。探讨了Kruhl温度计和Takahashi应变速率计的适用程度。王新社等(2001)所得到变形温度与矿物变形特征组合及岩组分析所确定的变形温度相一致,而吴小奇等(2006)得出的结果是Kruhl温度计是可行的。但在应变速率计算方面,传统方法的可信度更高,Takahashi的应变速率计对于自然界较深层次形成的韧性剪切带是不适用的。本文所得到的分维值 $D = 1.207 \sim 1.302$ ,应该是位于Kruhl温度计的低绿片岩相到低角闪岩相( $300^{\circ}\text{C} \sim 540^{\circ}\text{C}$ )之间,而李海龙等(2017)通过石英和长石动态重结晶以及角闪石—斜长石温压计等所计算出来的温度范围在 $560^{\circ}\text{C} \sim 684^{\circ}\text{C}$ 之间,高于Kruhl温度计所反映的温度。笔者认为Kruhl温度计并不是适用于所有的构造岩,但是笔者认为Kruhl温度计的建立很有道理,而且有着重要的地质意义。可能只是Kruhl等(1996)根据为数不多的样品推断出的结论,不具有普遍意义值或者这个温度计需要有个使用范围来限定。尚需大量实验的进一步验证,但是可以作为粗略确定韧性变形环境的一种可取的方法。

(2)关于应变速率计,传统方法计算应变速率是通过差异应力计算的,而计算差异应力的方法有位错密度法、亚晶粒法和动态重结晶颗粒法等。本文在测量的时候使用的并不是Takahashi分形法应变速率计,而是传统的Parrish等(1976)提出的湿石英流变速率法(动态重结晶颗粒法)。吴小奇等(2006)在郟庐断裂浮槎山构造岩研究发现分形法计算出的应变速率值比利用传统方法所得值高出近5个数量级,王新社等(2001)用分形法得出鲁西青邑韧性剪切带的应变速率为同样很大。本文也尝试运用Takahashi分形法应变速率计来计算应变速率,结果均显示在 $10^{-6}$ 左右,也是比Parrish等(1976)的湿石英流变速率法大了5个数量级。这可能与Takahashi等(1998)等在通过实验推导公式时采用的应变速率为 $10^{-6}$ 量级有关。而吴小奇等(2006)

采用石英自由位错密度法所得的应变速率与动态重结晶颗粒法所计算的应变速率属于同一量级,两种传统的方法所得应变速率之间仅相差近半个量级。表明传统方法可信度更高,而且Parrish等(1976)的公式被引用更频繁,众多研究学者更倾向于接受Parrish等(1976)提出的湿石英流变速率法。

(3)桐柏杂岩北界剪切带的桐柏一大别造山带发育的一条大型的左行走滑韧性剪切带,发育糜棱岩、超糜棱岩以及强直片麻岩等强变形岩石。桐柏一大别造山带作为中央造山带的中间连接位置,是历来地质学者研究的热点。那么桐柏造山带和大别造山带又是通过哪种形式建立联系呢,笔者认为除了桐柏杂岩和大别杂岩等岩性连接之外,构造连接也是两个造山带的重要连接方式。桐柏杂岩和大别杂岩的南界剪切带都是殷店—马垅剪切带,而北界却没有像殷店—马垅剪切带那么明显的边界。研究表明(宋传中等,2009;黄鹏等,2015),晓天一磨子潭剪切带是大别杂岩北界的剪切带,根据中华人民共和国秦岭—大巴山及邻区地质图(1992)<sup>①</sup>发现晓天一磨子潭剪切带在西延的过程中于商麻断裂的西部发生向南的弧形弯曲,再往西被红安群岩层所覆盖。反观桐柏杂岩北界剪切带,由于后期的岩浆侵入将该剪切带破坏掉,但是保留了桐柏县的部分,在不考虑岩体的情况下,将桐柏杂岩北界剪切带向东顺延的过程中也是被红安群所覆盖。针对这一现象,笔者猜测假设没有红安群岩层的覆盖,晓天一磨子潭剪切带和桐柏杂岩北界剪切带很有可能是相连的。为了证明此猜想,笔者对桐柏杂岩北界剪切带进行了研究,并与晓天一磨子潭剪切带和商丹断裂带进行对比分析,通过与商丹断裂带以及晓天一磨子潭剪切带的运动学方向、有限应变及涡度、变质条件以及年代学和地层界线对比可以知道,桐柏杂岩北界剪切带是和晓天一磨子潭剪切带相连的,而不是商丹断裂带(李海龙等,2017)。并且本文在桐柏杂岩北界剪切带内所得到的差异应力值以及应变速率值与王勇生等(2008)在晓天一磨子潭剪切带所得到的差异应力和应变速率值是吻合的。这从显微构造角度限定了桐柏杂岩北界剪切带是和晓天一磨子潭剪切带的一致性。

(4)桐柏杂岩北界剪切带的活动年代学约束是认识桐柏造山带构造演化的重要层面。笔者对桐柏杂岩北界剪切带进行了年代学研究<sup>②</sup>,结果显示桐柏杂岩北界剪切带的活动年龄是 $171 \sim 142 \text{ Ma}$ 。但是锆石 LA-ICP-MS 微区 U-Pb 同位素测年结果以及

锆石 CL 图显示锆石不全是变质锆石,也有岩浆锆石的存在,从这个角度来看,所得出的年龄值未必可以代表剪切带的活动时间。但是通过对剪切带的四个样的锆石 LA-ICP-MS 微区 U-Pb 同位素测年可以知道,剪切带中变质锆石与岩浆锆石记录的年龄是有重叠的,也可能是后期管状流动挤出过程中降压导致中地壳伴生深熔作用,出现混合岩化,这表明在重叠的时间段内,剪切带的活动和岩浆活动可以同期进行的。通过岩浆锆石所记录最早的时间可以看出,岩浆活动最开始可能在 150 Ma。张超等(2008)在大别山南部的张榜花岗岩侵入体中得出锆石 LA-ICP MS 年龄为  $150.3 \pm 2.0$  Ma,是当时发现的大别山最早的中生代岩浆活动记录,比早白垩世岩浆活动的峰期( $\sim 130$  Ma)早约 20 Ma,这个年龄值标志着大别山晚中生代巨量岩浆活动的启动。所以笔者认为桐柏—大别造山带可能均在晚侏罗世(约 150Ma)发生了小规模岩浆活动。而变质锆石记录的最早的时间(约 170 Ma)比最早的岩浆活动早了约 20 Ma,150 Ma 以后,剪切带的活动与岩浆活动可以是同期的。牛宝贵等(1994)研究表明,在 130~111 Ma 的燕山阶段,在桐柏—大别山腹地不仅具有强烈的深层构造岩浆作用及伴随的变质作用和深层次剪切作用,还伴随着快速的隆升作用。所以综合分析认为桐柏杂岩北界剪切带的活动年龄是 171~142 Ma。

王勇生等(2009)利用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 方法得出晓天—磨石潭韧性剪切带的形成时间应为 142 Ma 之前的晚侏罗世末或早白垩世。而赵淑娟等(2016)研究分析表明在 320 Ma 时,华北陆块和南秦岭微陆块之间的剪刀式拼合导致洛南—栾川剪切带表现为右行剪切,商丹剪切带表现为左行剪切,表示商丹断裂的形成在 320 Ma 之前。从年代学层面可以看出桐柏杂岩北界剪切带的活动年代与晓天—磨石潭剪切带更吻合,而与商丹断裂带明显不一致,应该是不同时代不同地质事件的产物。结合中华人民共和国秦岭—大巴山及邻区地质图(1992)<sup>①</sup>发现东秦岭地区商丹断裂带位于秦岭岩群与泥盆系地层之间,而在桐柏地区在秦岭岩群的南界确实存在一条剪切带,但是剪切带南侧则是寒武—奥陶系地层,寒武奥陶系南侧是泥盆系地层。所以笔者猜测在东秦岭地区秦岭岩群和泥盆系之间缺少了寒武—奥陶系地层,商丹断裂带东延应该对应秦岭岩群南界剪切带,而桐柏杂岩北界剪切带则是后期衍生的一条剪切带,并不一定在东秦岭有对应的剪切带存在。由于

南阳盆地东秦岭与桐柏—大别造山带隔开,所以商丹断裂带的东延是不是秦岭岩群南界剪切带,还需要详细深入的研究分析对比。

## 5.2 结论

通过对剪切带内岩石的矿物共生组合、剪切带的位移量计算、石英的分维数计算、石英颗粒的差异应力以及流变速率的估算等多种方法对桐柏杂岩北界剪切带岩石的构造变形进行了分析。结果显示桐柏杂岩北界剪切带的位移量为 38.3~41.1 km,动态重结晶石英颗粒边界统计数据的相关系数  $R$  均大于 0.96,由此可见,动态重结晶适应颗粒边界具有统计意义上的自相似性;分维数在 1.207~1.302 之间,并且随着从剪切带的北部到南部,颗粒粒径和分维值得变化也是有规律的,都是先减小后增大,即粒径和分维值从剪切带的核部向边部是逐渐变大的。这表明剪切带核部的变质变形强度要强于边部的,随着远离剪切带核部,变质变形作用减弱,岩石的颗粒粒径和分维值变大。因此,由石英的分维值可以看出石英的动态重结晶与剪切带密切相关,变质变形由剪切带核部向边部逐渐减弱。桐柏杂岩北界剪切带的差应力值  $\sigma$  在 23.583~46.983 MPa 之间,应变速率  $\dot{\epsilon}$  在  $1.70 \times 10^{-11} \sim 9.74 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$  之间。通过对比剪切带内动态重结晶石英颗粒的粒径、差异应力和应变速率可以发现,差异应力与应变速率表现出一定的正相关性,都随着从剪切带的核部到边部慢慢变小;而石英的粒径则与差异应力和应变速率表现出负相关性,从剪切带核部到边部,随着石英粒径的变大,差异应力和应变速率变小,差异应力越大,导致石英颗粒的受力强度越大,变形越强,表现出来的就是应变速率越强。

## 注释 / Notes

- ① 陕西省地质矿产局区域地质调查队. 1992. 中华人民共和国 1:100 万地质图. 秦岭—大巴山幅. 北京:地质出版社.
- ② 李海龙,宋传中,韩建军,任升莲,李加好,张妍,王微,王娟,孙文龙. 2017. 桐柏杂岩南北边界剪切带的对比以及对桐柏造山带构造格局的制约. 岩石学报,待刊.

## 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)
- 陈国达. 1985. 成矿构造研究法(第二版). 北京:地质出版社:1~53.
- 崔建军,胡健民,刘晓春. 2009. 桐柏地区高压变质地体在地壳中的抬升机制. 岩石学报,25(9):2165~2176.
- 邓军,王庆飞,杨立强,王建平,高帮飞,刘琰. 2004. 胶西北金矿集区成矿作用发生的地质背景. 地学前缘,11(4):527~533.
- 董云鹏,张国伟,姚安平,赵霞. 2003. 襄樊—广济断裂西段三里岗—三阳构造混染岩带构造变形与演化. 地质科学,38(4):425~

- 436.
- 韩建军,宋传中,李加好,刘欢. 2014. 桐柏—大别南缘殷店—马垅韧性剪切带的变形及年代学分析. 地质科学, 49(4): 1035 ~ 1044.
- 韩建军,宋传中,李加好,任升莲,刘欢,杨帆,刘国厅. 2015. 桐柏造山带中剪切带的位移量及年代学研究. 地质科学, 50(3): 824 ~ 833.
- 胡玲. 1998. 显微构造地质学概论. 北京:地质出版社, 1 ~ 158.
- 胡玲. 2009. 变形显微构造识别手册. 北京:地质出版社, 1 ~ 92.
- 黄鹏,宋传中,任升莲, LIN Shoufa, 张妍, 李加好, 宫龙, 刘欢, 王微. 2015. 晓天—磨子潭断裂带构造变形分析及其对大别山构造变形的启示. 地质论评, 61(3): 512 ~ 524.
- 黄鹏,宋传中,任升莲, LIN Shoufa, 张妍, 李加好, 刘欢, 王微, 杨帆, 刘启能. 2016. 北淮阳构造带的属性及其对板块缝合线位置的启示. 地质学报, 90(6): 1112 ~ 1129.
- 黄少英,徐备,王长秋,湛胜,邓荣敬. 2006. 桐柏造山带几何学、运动学和演化. 中国科学, 36(3): 242 ~ 251.
- 李本亮,张慧慧,孙岩,卢新卫. 1999. 断裂分维值对矿产资源预测的指示意义—以西藏地区为例. 高校地质学报, 5(1): 17 ~ 21.
- 李海龙,宋传中,李加好,任升莲,张妍,王微,杨帆. 2017. 桐柏杂岩北界剪切带的变质变形分析及归属讨论. 地质论评, 63(2): 347 ~ 362.
- 李瑞红,刘育,李海林,郑小礼,赵海,孙政. 2014. 胶东新城金矿床控矿构造变形环境:显微构造和 EBSD 组构约束. 岩石学报, 30(9): 2546 ~ 2558.
- 梁东方,李玉梁,江春波. 2002. 测量分维的“数盒子”算法研究. 中国图象图形学报, 7(3): 246 ~ 250.
- 林爱明,孙知明,杨振宇. 2002. 桐柏—大别造山带内与脆性—韧性剪切带共生的假玄武玻璃的发现及意义. 地质学报, 76(3): 373 ~ 378.
- 林伟,王清晨, Faure M, 孙岩, 舒良树, Scharer U. 2003. 大别山的构造变形期次和超高压岩石折返的动力学. 地质学报, 77(1): 44 ~ 54.
- 刘欢,宋传中,林寿发,韩建军,马涛,由夏冰. 2015. 殷马断裂带在桐柏山—大别造山带中的地质意义探讨. 地质论评, 61(1): 95 ~ 108.
- 刘欢,林寿发,宋传中. 2016. 桐柏山 L 构造岩形成机制构造解析及其对造山带演化的制约. 地质学报, 90(6): 1098 ~ 1111.
- 刘瑞珣. 1992. 显微构造地质学. 北京:北京大学出版社.
- 刘少峰,张国伟. 2013. 大别造山带周缘盆地发育及其对碰撞造山过程的指示. 科学通报, 58(1): 1 ~ 26.
- 刘鑫,李三忠,索艳慧,刘晓春,刘恩山,戴黎明. 2010. 桐柏碰撞造山带及其邻区变形特征与构造格局. 岩石学报, 26(04): 1289 ~ 1302.
- 刘晓春,江博明,李三忠,崔建军,刘鑫,娄玉行,曲玮. 2011. 桐柏高压变质体:对桐柏—大别—苏鲁高压/超高压变质带构造框架和俯冲/折返机制的制约. 岩石学报, 27(4): 1151 ~ 1162.
- 罗金海,周亚军,徐欢,尤佳,李亦飞,车自成. 2017. 南秦岭旬阳盆地东部晚泥盆世岩浆成因钠长岩及其构造意义. 地质学报, 91(2): 302 ~ 314.
- 吕承训,吴淦国,张迎春,张迅与. 2011. 胶东地区区域构造及应力应变特征. 矿物学报, (s1): 70 ~ 71.
- 牛宝贵,富云莲,刘志刚,任纪舜,陈文. 1994. 桐柏—大别山主要构造热事件及<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 地质定年研究. 地球学报, (1~2): 20 ~ 34.
- 任升莲,宋传中,林寿发,张浩然,李加好,涂文传,章骏杰. 2011. 桐柏山丹南断裂带东延段石榴子岩中石榴子石显微构造特征及变质—变形环境分析. 地质论评, 57(6): 799 ~ 809.
- 任升莲,李加好,李龙明,杨青亮,刘建敏,葛黎,宋传中,林寿发,杨帆,王静雅,韩旭,李振强. 2017. 秦岭洛栾断裂带糜棱岩的变形特征及形成环境分析. 地质学报, 91(1): 1 ~ 14.
- 宋传中,张国伟,任升莲,李加好,黄文成. 2009. 秦岭—大别造山带中几条重要构造带的特征及其意义. 西北大学学报(自然科学版), 39(3): 368 ~ 380.
- 孙占亮,李建荣,刘成如,张玉生,杨耀华,闫文胜. 2004. 山西龙泉关韧性剪切带新认识. 地质调查与研究, 27(2): 92 ~ 100.
- 索书田,侯光久,魏启蒙,郑贵池. 1995. 造山带内部的正花状构造. 湖北地质, 9(1): 1 ~ 13.
- 索书田,钟增球,游振东,周汉文. 2000. 大别—苏鲁区超高压构造及其动力学意义. 地球科学, 25(6): 557 ~ 563.
- 索书田,钟增球,游振东. 2001. 大别—苏鲁超高压—高压变质带伸展构造格架及其动力学意义. 地质学报, 75(1): 14 ~ 24.
- 王新社,郑亚东,侯贵廷,杨崇辉. 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,向必伟,朱光,陈文,魏鑫. 2009. 晓天—磨子潭断裂后造山伸展活动的<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年代学记录. 地球化学, 38(5): 458 ~ 471.
- 王宗起,闫全人,闫臻,王涛,姜春发,高联达,李秋根,陈隽璐,张英利,刘平,谢春林,向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. 地质学报, 83(11): 1527 ~ 1546.
- 武长得. 1990. 桐柏地区蛇绿岩块体及其构造意义. 地质论评, 36(6): 494 ~ 503.
- 吴小奇,刘德良,李振生,杨强. 2006. 确定变形温度和应变速率分形法的探讨——以郟庐断裂浮槎山构造岩为例. 中国地质, 33(1): 153 ~ 159.
- 武昱东,王宗起,刘成新,贾少华,张玉涛,吴波,王刚. 2017. 西大别岩岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 91(2): 315 ~ 333.
- 吴玉门,王德贵,何秀兰,郭华春,朱志新. 2006. 东天山卡瓦布拉克地区层状韧流岩系研究. 新疆地质, 21(3): 358 ~ 359.
- 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.
- 徐备,黄少英,湛胜,邓荣敬,刘兵. 2007. 试论桐柏造山带与西大别造山带的对比. 地质学报, 81(1): 32 ~ 37.
- 徐启东,欧阳建平,张本仁. 2005. 大别造山带北缘古生代构造—地层岩片沉积物源区及构造演化的地球化学研究. 地质学报, 79(3): 402 ~ 413.
- 许志琴,杨经绥,姜枚,李海兵. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起. 地学前缘, 6(3): 139 ~ 151.
- 许志琴,姜枚,杨经绥. 2001. 青藏高原北部的碰撞造山及深部动力学. 地球学报, 22(1): 1 ~ 10.
- 杨志华. 1997. 秦岭造山带南北向构造及有关问题的讨论. 地质论评, 43(1): 10 ~ 16.
- 游振东,钟增球,张泽明. 1999. 桐柏—大别山区高压变质相的构造配置. 地学前缘, 6(4): 237 ~ 245.
- 翟淳. 1988. 桐柏北部韧性剪切带中假玄武玻璃的成因. 地质论评, 34(3): 203 ~ 212.
- 张本仁. 2005. 地球化学进展:化学工业出版社.
- 张超,马昌前. 2008. 大别山晚中生代巨量岩浆活动的启动:花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. 矿物岩石, 28(4): 71 ~ 79.
- 张国伟,郭安林,刘福田,孟庆任,肖庆辉. 1996. 秦岭造山带三维结构及其动力学分析. 中国科学(D 辑), 26(增刊): 1 ~ 6.
- 张国伟,孟庆任,刘少峰,姚安平. 1997. 华北地块南部巨型陆内俯冲带与秦岭造山带岩石圈现今三维结构. 高校地质学报, 3(2): 129 ~ 143.
- 张国伟,郭安林,姚安平. 2006. 关于中国大陆地质与大陆构造基础研究的思考. 自然科学进展, 16(10): 1210 ~ 1215.
- 张宏飞,张利,高山,张本仁,王林森. 1999. 桐柏地区变质杂岩和侵入岩类 Pb 同位素组成特征及其地质意义. 地球科学, 24(3): 269 ~ 273.
- 张利,王林森,周炼,凌文黎. 2002. 桐柏北部黄岗侵入杂岩地球化学特征及地质意义. 地质论评, 48(增刊): 53 ~ 58.
- 赵仁夫,何芳,丁仁平. 2000. 韧性剪切带位移量统计方法评述——以

- 西秦岭元家坪韧性剪切带为例. 甘肃地质(2);37~42.
- 赵淑娟,李三忠,余珊,李玺瑶,曹花花,刘鑫,王鹏程. 2016. 东亚原特提斯洋(Ⅲ):北秦岭韧性剪切带构造特征. 岩石学报,32(9):2645~2655.
- 任升莲,宋传中,林寿发,张浩然,李加好,涂文传,章骏杰. 2011. 桐柏山商丹断裂带东延段石榴子岩中石榴子石显微构造特征及变质—变形环境分析. 地质论评,57(6):799~809.
- 郑永飞,陈福坤,龚冰,赵子福. 2003. 大别—苏鲁造山带超高压变质岩原岩性质:锆石氧同位素和 U-Pb 年龄证据. 科学通报,48(2):110~119.
- 钟增球,索书田,徐启东. 1996. 桐柏—大别造山带剪切带阵列的构造岩研究. 地质学报,70(4):315~323.
- 钟增球,索书田,张宏飞,周汉文. 2001. 桐柏—大别碰撞造山带的基本组成与结构. 地球科学,26(6):560~567.
- 周建波,刘建辉,郑常青. 2005. 苏鲁造山带浅变质岩的成因及其大地构造意义. 地质学报,79(4):475~486.
- Chen Guoda. 1985#. Metallotectonic Research Method. The 2<sup>nd</sup> Edition. Beijing:Geological Publishing House:1~53.
- Cui Jianjun, Hu Jianmin, Liu Xiaochun. 2009#. Exhumation of high-pressure metamorphic terrane at the crustal levels in the Tongbai area, central China. Acta Petrologica Sinica,25(9):2165~2176.
- Cui Jianjun, Liu Xiaochun, Dong Shuwen, and Hu Jianmin. 2012. U-Pb and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of the Tongbai complex, central China: Implications for Cretaceous exhumation and lateral extrusion of the Tongbai—Dabie HP/UHP terrane. Journal of Asian Earth Sciences,47:155~170.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Yang Liqiang, Wang Jianping, Gao Bangfei and Liu Yan. 2004#. The geological settings to the gold metallogeny in northwestern Jiaodong Peninsula, Shandong Province. Earth Sciences Frontiers,11(4):527~533.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Yao Anping, Zhao Xia. 2003#. Deformation and evolution of the Sanligang—Sanyang tectonic mélange belt along the west sector of Xiangfan—Guangji fault. Chinese Journal of Geology,38(4):425~436.
- Eide E A, McWilliams M O and Liou J G. 1994. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar geochronology and exhumation of high-pressure to ultrahigh-pressure metamorphic rocks in east—central China. Geology,22(7):601~604.
- Ernst W G, Tsujimori T, Zhang R, Liou J G. 2007. Permo-Triassic Collision, Subduction-Zone Metamorphism, and Tectonic Exhumation Along the East Asian Continental Margin. Annual Review of Earth & Planetary Sciences,35(1):73~110.
- Faure M, Lin W, Shu L S, Sun Y and Schärer U. 1999. Tectonics of the Dabieshan (eastern China) and possible exhumation mechanism of ultrahigh-pressure rocks. Terra Nova,11(6):251~258.
- Faure M, Lin W, Monié P, Breton N L, Poussineau S, Panis D, Deloué E. 2003. Exhumation tectonics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Qinling orogen in east China: New petrological—structural—radiometric insights from the Shandong Peninsula. Tectonics,22(3):127~143.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, McWilliams M O, Ireland T, Calvert A, Chateigner D. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic—Early Jurassic tectonic unroofing. Journal of Geophysical Research Solid Earth,105(B6):13339~13364.
- Hacker B R, Wallis S R, McWilliams M O and Gans P B. 2009. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar Constraints on the tectonic history and architecture of the ultrahigh-pressure Sulu orogen. Journal of Metamorphic Geology,27(9):827~844.
- Han Jianjun, Song Chuanzhong, Li Jiahao, Liu Huan. 2014#. Deformation analysis and chronological dating of Yindian—Malong ductile shear zone in the southern margin of Tongbai—Dabie orogenic belt. Chinese Journal of Geology,49(04):1035~1044.
- Han Jianjun, Song Chuanzhong, Li Jiahao, Ren Shenglian, Liu Huan, Yang Fan, Liu Guoting. 2015#. Study on the displacement and geochronology of shear band in Tongbai orogenic belt. Chinese Journal of Geology,50(3):824~833.
- Hu Ling. 1998#. Concept of Micro-Structure Geology. Beijing: Geological Publishing House,1~158.
- Hu Ling. 2009#. Deformation microstructure identification manual. Beijing: Geological Publishing House,1~92.
- Hu Shengbiao, Kohn B, Raza A, Wang Jiyang, Gleadow A. 2006. Cretaceous and Cenozoic cooling history across the ultrahigh pressure Tongbai—Dabie belt, central China, from apatite fission-track thermochronology. Tectonophysics,420(3~4):409~429.
- Huang Peng, Song Chuanzhong, Ren Shenglian, Lin Shoufa, Zhang Yan, Li Jiahao, Gong Long, Liu Huan, Wang Wei. 2015#. Analysis on structural deformation of Xiaotian—Mozitan shear zone and its implication on Dabie orogen. Geological Review,61(3):512~524.
- Huang Peng, Song Chuanzhong, Ren Shenglian, Lin Shoufa, Zhang Yan, Li Jiahao, Liu Huan, Wang Wei, Yang Fan, Liu Qineng. 2016#. Tectonic property of the Beihuaiyang tectonic belt and its implications for the location of the suture zone between Yangtze block and North China block. Acta Geologica Sinica,90(6):1112~1129.
- Huang Shaoying, Xu Bbei, Wang Changqiu, Zhan Sheng and Deng Rongjing. 2006#. The geometry, kinematics and evolution of the Tongbai orogenic belt. Science in China,36(3):242~251.
- Kröner A, Zhang G W, Sun Y. 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia. Tectonics 12(1):245~255.
- Kruhl J H and Nega M. 1996. The fractal shape of sutured quartz grain boundaries: Application as a geothermometer. International Journal of Earth Science,85(1):38~43.
- Li Benliang, Zhang Xinhui, Sun Yan, Lu Xinwei. 1999#. Significance of dimension valued of fault systems in evaluating natural resources with Tibet as an example. Geological Journal of China Universities,5(1):17~21.
- Li Hailong, Song Chuanzhong, Li Jiahao, Ren Shenglian, Zhang Yan, Wang Wei, Yang Fan. 2017#. Metamorphism and deformation analysis of the shear zone in the northern boundary of the Tongbai complex and discussion on its ascription. Geological Review,63(2):347~362.
- Li Ruihong, Liu Yu, Li Hailin, Zheng Xiaoli, Zhao Hai and Sun Zheng. 2014#. Ore-controlling structure deformation environment of Xincheng gold deposit, Jiaodong: Microstructure and EBSD fabrics analysis constrain. Acta Petrologica Sinica,30(9):2546~2558.
- Li Sanzhong, Zhao Guochun, Zhang Guowei, Liu Xiaochun, Dong Shuwen, Wang Yuejun, Liu Xin, Suo Yanhui, Dai Liming, Jin Chk, Liu Liping, Hao Y., Liu Ensheng, Wang J., Wang Tianxing. 2010. Not all folds and thrusts in the Yangtze foreland thrust belt are related to the Dabie orogen: Insights from Mesozoic south of the Yangtze River. Geological Journal,45(5~6):650~663.
- Liang Dongfang, Li Yuliang, Jiang Chunbo. 2002#. Research on the box counting algorithm in fractal dimension measurement. Journal of Image and Graphics,7(3):246~250.
- Lin Aiming, Sun Zhiming, Yang Zhenyu. 2002#. Pseudotachylytes generated in the Dahezhen Brittle—ductile shear zone in the Tongbai—Dabie Orogenic Belt, China and their significance for Seismo—tectonics. Acta Geologica Sinica,76(3):373~378.

- Lin Wei, Wang Qingchen, Faure M, Sun Yan, Shu Liangshu and Scharer U. 2003. Different deformation stages of the Dabieshan Mountains and UHP rocks exhumation mechanism. *Acta Geologica Sinica*, 77 (1): 44 ~ 54.
- Lin Wei, Ji Wenbin, Faure M, Wu Lin, Li Qiuli, Shi Yonghong, Scharer U, Wang Fei and Wang Qingchen. 2015. Early Cretaceous extensional reworking of the Triassic HP—UHP metamorphic orogen in Eastern China. *Tectonophysics*, 662: 56 ~ 270.
- Liu Huan, Song Chuanzhong, Lin SF, Han Jianjun, Ma Tao, You Xiabing. 2015. Discussion on geological significance of Yindian—Malong fault in Tongbai—Dabie Mountains. *Geological Review*, (1): 95 ~ 108.
- Liu Huan, Lin Shoufa, Song Chuanzhong. 2016. The structural formation mechanism of L tectonites in Tongbai Mountain and its constraints on the orogenic evolution. *Acta Geologica Sinica*, 90(6): 1098 ~ 1111.
- Liu Ruixun. 1992#. *Microtectonics*; Peking University press.
- Liu Shaofeng, Zhang Guowei. 2013. The development of collision orogenic process of Dabie orogenic belt indicate peripheral Basin. *Acta Geological Sinica*, 58(1): 1 ~ 26.
- Liu Xin, Li Sanzhong, Suo Huiyan, Liu Xiaochun, Liu Enshan and Dai Liming. 2010. Tectonic outline and structural styles of the Tongbai collisional orogeny and its neighbors. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (4): 1289 ~ 1302.
- Liu Xiaochun, Lou Yuxing, Dong Shuwen. 2005. *P—T* path of low-temperature eclogites from the Tongbaishan area. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1081 ~ 1093.
- Liu Xiaochun, Jahn Boming, Dong Shuwen, Lou Yuxing, Cui Jianjun. 2008. High-pressure metamorphic rocks from Tongbaishan, central China; U—Pb and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age constraints on the provenance of protoliths and timing of metamorphism. *Lithos*, 105 (3 ~ 4): 301 ~ 318.
- Liu Xiaochun, Jahn Boming, Li Sanzhong, Cui Jianjun, Liu Xin, Lou Yuxing and Qu Wei. 2011. The Tongbai HP metamorphic terrane: Constraints on the architecture and subduction/exhumation of the Tongbai—Dabie—Sulu HP/UHP metamorphic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1151 ~ 1162.
- Liu Xiaochun, Jiang Boming, Li Sanzhong. 2013. Subduction and exhumation of rock plate, diachroneity; restricting Tongbai orogenic belt two late Triassic UHP metamorphic terrane provided. *Chinese Science Bulletin*, (23): 2251 ~ 2258.
- Luo Jimhai, Zhou Yajun, Xu Huan, You Jia, Li Yifei, Che Zicheng. 2017. Late Devonian magmatogenic albitites in the eastern Xunyang basin of the South Qinling orogen and their tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 91(2): 302 ~ 314.
- Lü Chengxun, Wu Ganguo, Zhang Yingchun, Zhang Xunyu. 2011. Regional structure and stress strain characteristics in Jiaodong area. *Mineral Journal*, (s1): 70 ~ 71.
- Niu Baogui, Fu Yunlian, Liu Zhigang, Ren Jishun, Chen Wen. 1994. Main tectonothermal events and <sup>40</sup>Ar—<sup>39</sup>Ar dating of the Tongbai—Dabie Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, (1 ~ 2): 20 ~ 34.
- Okay A I, Celal A M, Satir M. 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: The Dabie Shan/Tongbai Shan Orogen, China. *Tectonics*, 12(6): 1320 ~ 1334.
- Parrish D K, Krivz A, Cater N L. 1976. Finite element folds of similar geometry. *Tectonophysics*, 32: 183 ~ 207.
- Passchier C W and Trouw R A. 2005. *Microtectonics*. 2<sup>nd</sup> Edition. Berlin; Springer, 1 ~ 289.
- Ramsay J G and Huber M I. 1984. The techniques of three-dimensional kinematic vorticity analysis. *Journal of Structural Geology*, 17(12): 1771 ~ 1784.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliams M, Ireland T, Dong S, Wenk H R. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 105 (B6): 13303 ~ 13338.
- Ren Shenglian, Song Chuanzhong, Lin Shoufa, Zhang Haoran, Li Jiahao, Tu Wenchuan and Zhang Junjie. 2011. The study of microstructure characters and the condition of metamorphism and deformation of garnets from garnet—mica schist in the Tongbai Mountain, east section of Shangnan—Danfeng fault belt. *Geological Review*, 57(6): 799 ~ 809.
- Ren Shenglian, Li Jiahao, Li Longming, Yang Qingliang, Liu Jianmin, Ge Can, Song Chuanzhong, Lin Shoufa, Yang Fan, Wang Jingya, Han Xu, Li Zhenqiang. 2017. Characteristics of deformation and metamorphism and analysis of the formation environment of Luoluan fault belt in the Qinling orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 91 (1): 1 ~ 14.
- Song Chuanzhong, Zhang Guowei, Ren Shenglian, Li Jiahao and Hunag Wencheng. 2009. The research on deformation features of some structural zones in the Qinling—Dabieshan orogenic belt. *Journal of Northwestern University*, 36(3): 242 ~ 251.
- Sun Zhanliang, Li Jianrong, Liu Chengru, Zhang Yusheng, Yang Yaohua, Yan Wensheng. 2004. Another view on the Longquanguan ductile shear zone. *Geological Survey and Research*, 27(2): 92 ~ 100.
- Suo Shutian, Hou Guangjiu, Wei Qimeng, Zheng Guichi. 1995. Positive flower structure in orogenic belt. *Geology of Hubei*, 9(1): 1 ~ 13.
- Suo Shutian, Zhong Zengqiu, You Zhenqiang, Zhou Hanwen. 2000. The ultrahigh pressure structure and its dynamic significance in the Dabie—Sulu region. *Earth Science*, 25(6): 557 ~ 563.
- Suo Shutian, Zhong Zengqiu, You Zhenqiang. 2001. Extension tectonic framework of the Dabie—Sulu UHP—HP metamorphic belt, central China, and its geodynamical significance. *Acta Geologica Sinica*, 75 (1): 14 ~ 24.
- Takahashi M, Nagahama H, Masuda T and Fujimura A. 1998. Fractal analysis of experimentally, dynamically recrystallized quartz grains and its possible application as a strain state meter. *Journal of Structural Geology*, 20(2): 269 ~ 275.
- Turcotte D L. 1990. Implication of chaos, scale-invariance, and fractal statistics in geology. *Global and Planetary Change*, 89: 301 ~ 308.
- Twiss R J. 1986. Variable sensitivity piezometric equations for dislocation density and subgrain diameter and the irrelevance to olivine and quartz. *Geophysical Monography Series*, 36: 247 ~ 261.
- Wang Erchie, Meng Qingren, Burchfiel B. Clark and Zhang Guowei. 2003. Mesozoic large-scale lateral extrusion, rotation and uplift of the Tongbai—Dabie Shan belt in east China; *Geology*, 31(4): 307 ~ 310.
- Wang Xianda, Neubauer F, Genser J and Yang Weiran. 1998. The Dabie UHP unit, central China: A Cretaceous extensional allochthon superposed on a Triassic orogen. *Terra Nova*, 10(5): 260 ~ 267.
- Wang Xinshe, Zheng Yadong, Hou Guiting, Yang Chonghui. 2001. Determination of the Deformation Temperature and Strain Rate by the Fractal Shape of Dynamically Recrystallized Quartz Grains. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 20(1): 36 ~ 41.
- Wang Yongsheng, Xiang Biwei, Zhu Guang, Chen Wen and Wei Xin. 2009. <sup>40</sup>Ar—<sup>39</sup>Ar Geochronology records for post-orogenic extension of the Xiaotian—Mozitan fault. *Geochimica*, 38(05): 458 ~ 471.
- Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, Wang Tao, Jiang Chunfa, Gao Lianda, Li Qiugen, Chen Junlu, Zhang Yingli, Liu Ping, Xie Chunlin, Xiang Zhongjin. 2009. New division of the main tectonic units of the Qinling orogenic belt, central China. *Acta Geologica*

- Sinica, 83(11):1527~1546.
- Webb L E, Hacker B R, Ratschbacher L, McWilliams M O, Dong S. 1999. Thermochronologic constraints on deformation and cooling history of high and ultrahigh-pressure rocks in the Qinling—Dabie orogen, eastern China. *Tectonics*, 18(4):621~638.
- Wu Changde. 1990. Study of the Ophiolite in Tongbai area and its tectonic significance. *Geological Review*, 36(6):494~503.
- Wu Xiaoqi, Liu Deliang, Li Zhensheng, Yang Qiang. 2006. A new fractal method for the determination of deformation temperatures and strain rates—A case study of the Fuchashan tectonite in the Tan-lu fault. *Geology in China*, 33(1):153~159.
- Wu Yudong, Wang Zongqi, Liu Chengxin, Jia Shaohua, Zhang Yutao, Wu Bo, Wang Gang. 2017. Zircon U-Pb age and geochemistry of the Fangfan A-type granite in western Dabie mountains and their tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 91(2):315~333.
- Wu Yumen, Wang Degui, He Xiulan, Guo Huachun, Zhu Zhixin. 2006. Study on the ductile flow rock with layers in Braque slip of the East Tianshan area. *Xinjiang Geology*, 21(3):358~359.
- Wu Yuanbao, Gao Shan, Zhang Hongfei, Yang Saihong, Jiao Wenfang, Liu Yongsheng, Yuan Honglin. 2008. Timing of UHP metamorphism in the Hong'an area, western Dabie Mountains, China: evidence from zircon U-Pb age, trace element and Hf isotope composition. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 155(1):123~133.
- Xiang Biwei, Zhu Guang, Wang Yongsheng, Xie Chenglong and Hu Zhaoqi. 2007. Mineral deformation thermometer for mylonitization. *Advances in Earth Science*, 22(2):126~135.
- Xu Bei, Huang Shaoying, Zhan Sheng, Deng Rongjing, Liu Bing. 2007. Correlation between Tongbai and western Dabie orogenic belts. *Acta Geologica Sinica*, 81(1):32~37.
- Xu Qidong, Ouyang Jianping, Zhang Benren. 2005. Geochemical records of sedimentary source and tectonic evolution of Paleozoic Strata along the northern margin in the Dabie orogen, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 79(3):402~413.
- Xu Zhiqin, Zeng Lingsen, Liu Fulai, Yang Jingsui, Zhang Zeming, McWilliams M O, Liou J G. 2006. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-pressure—ultrahigh-pressure metamorphic terrane. *Special Paper of the Geological Society of America*, 403(1):324~328.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Jiang Mei, Li Haibing. 1999. Continental subduction uplifting of the orogenic belts at the margin of the Qinghai—Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 6(3):139~151.
- Xu Zhiqin, Jiang Mei, Yang Jingsui. 2001. Collision-orogeny of the Northern Qinghai—Tibet Plateau and its deep dynamics. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(1):1~10.
- Yang Zhihua. 1997. The N—S-Trending tectonics in the Qinling orogeny and problems concerned. *Geological Review*, 43(1):10~16.
- You Zhendong, Zhong Zengqiu, Zhang Zeming. 1999. The Tectonic distribution of high-pressure metamorphic facies in Tongbai—Dabieshan, central China. *Earth Science Frontiers*, 6(4):237~245.
- Zhai Chun. 1988. Origin of pseudotachylite in ductile shear zones in the northern part of Tongbai, Henan Province. *Geological Review*, 34(3):203~212.
- Zhang Benren. 2005. Advances in geochemistry: Chemical Industry Press.
- Zhang Chao, Ma Changqian. 2008. Large-scale late Mesozoic magmatism in the Dabie Mountain: Constraints from zircon U-Pb dating and Hf isotopes. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(4):71~79.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Liu Futian, Meng Qingren, Xiao Qinghui. 1996. Three dimensional structure of the Qinling Mountains orogenic belt and its dynamic analysis. *Science in China (series D)*, 26(s):1~6.
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Liu Shaofeng, Yao Anping. 1997. The present three-dimensional structure of the lithosphere in the southern part of the North China block and the Qinling Mountains orogenic belt. *Geological Journal of China Universities*, 3(2):129~143.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Yao Anping. 2006. Thinking on the basic research of geology and tectonics in mainland China. *Progress in Natural Science*, 16(10):1210~1215.
- Zhang Hongfei, Zhong Zengqiu, Gao Shan, Zhang Benren, Zhang Li, Hu Shenghong, Hou Qingye. 2004. Pb and Nd isotopic composition of the Jigongshan granite: constraints on crustal structure of Tongbaishan in the middle part of the Qinling—Tongbai—Dabie orogenic belt, Central China. *Lithos*, 73(3~4):215~227.
- Zhang Hongfei, Zhang Li, Gao Shan, Zhang Benren, Wang Linsen. 1999. Pb isotopic compositions of metamorphic rocks and intrusive rocks in Tongbai region and their geological implication. *Earth Science*, 24(3):269~273.
- Zhang Li, Wang Linsen, Zhou Lian, Ling Wenli. 2002. Huanggang intrusive complex in the northern Tongbai area: Geochemistry and geological significance. *Geological Review*, 48(s):53~58.
- Zhang RY, Liou JG. 1994. Significance of magnesite paragenesis in ultrahigh-pressure metamorphic rocks. *American Mineralogist*, 79(3~4):397~400.
- Zhao Renfu, He Fang, Ding Sanping. 2000. Discussion on calculating method for displacement of shear zones. *Acta Geologica Gansu* (2):37~42.
- Zhao Shujuan, Li Sanzhong, Yu Shan, Li Xiyao, Cao Huahua, Liu Xin, Wang Pengcheng. 2016. Proto-Tethys Ocean in East Asia: Structures of ductile shear zones in the North Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9):2645~2655.
- Zheng Yongfei, Fu Bin, Gong Bing, Li Long. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie—Sulu orogen in China; implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Science Reviews*, 62(1~2):105~161.
- Zheng Yongfei, Gao Tianshan, Wu Yuanbao, Gong Bing, Liu Xiaomin. 2007. Fluid flow during exhumation of deeply subducted continental crust: zircon U-Pb age and O-isotope studies of a quartz vein within ultrahigh-pressure eclogite. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(2):267~283.
- Zheng Yongfei, Chen Fukun, Gong Bing, Zhao Zifu. 2003. The Dabie—Sulu orogenic belt UHP metamorphic protolith nature: Zircon oxygen isotope age evidence and U-Pb. *Acta Geologica Sinica*, 48(2):110~119.
- Zhong Zengqiu, Suo Shutian, Xu Qidong. 1996. Tectonites in the shear zone array of the Tongbai—Dabie orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 70(4):315~323.
- Zhong Zengqiu, Suo Shutian, Zhang Hongfei, Zhou Hanwen. 2001. Major constituents and texture of the Tongbai—Dabie collisional orogenic belt. *Earth Science*, 26(6):560~567.
- Zhou Jianbo, Wilde S, Zhao Guochun, Zheng Changqing, Jin Wei, Zhang X Z, Cheng Hong. 2008. Detrital zircon U-Pb dating of low-grade metamorphic rocks in the Sulu UHP belt; Evidence for over thrusting of the North China Craton onto the South China Craton during continental subduction. *Journal of the Geological Society*, 165(9):423~433.
- Zhou Jianbo, Liu Jianhui, Zheng Changqing. 2005. Geological genesis and tectonic implications of low-grade metamorphic rocks in Sulu orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 79(4):475~486.



## Study on the Structural Deformation Characteristics of the Shear Zone in the Northern Boundary of the Tongbai Complex

LI Hailong<sup>1)</sup>, SONG Chuanzhong<sup>1)</sup>, HAN Jianjun<sup>2)</sup>, LI Jiahao<sup>1)</sup>, REN Shenglian<sup>1)</sup>, ZHANG Yan<sup>1)</sup>,  
WANG Wei<sup>1)</sup>, YANG Fan<sup>1)</sup>, LI Zhenwei<sup>1)</sup>, WANG Yangyang<sup>1)</sup>, YUAN Fang<sup>1)</sup>, LAN Ruixuan<sup>1)</sup>

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

2) Qinghai Geological Survey, Xining, 810001

**Objective:** There are two large ductile shear zones on the sides of the Tongbai—Dabie orogenic belt, and geological scholars have done many studies on the Yindian—Malong shear zone in the south of Tongbai Complex. But there is few study on the shear zone in the northern boundary of the Tongbai Complex. This paper uses many methods to make an in-depth research on the large ductile shear zone in the northern boundary of the Tongbai Complex.

**Methods:** The shear zone in the northern boundary of the Tongbai Complex is a large sinistral strike slip ductile shear zone of the Tongbai—Dabie orogenic belt, which develops mylonite, ultra-mylonite and straight gneiss. On the basis of the field observations, we make studies on the structural deformation characteristics of the shear zone through the analysis of the mineral composition, the displacement calculation of the shear zone, the fractal dimension of the quartz, and the calculation of differential stress and strain rate of quartz.

**Results:** The results show that the displacement of the shear zone in the northern boundary of the Tongbai Complex is from 38.3 km to 41.1 km. The correlation coefficient  $R$  of the grain boundary of the quartz with dynamic recrystallization is more than 0.96 statistically, the dynamic recrystallization grain boundaries have self-similarity in statistically significant. The fractal dimension is from 1.207 to 1.302, and from the core to the edge of the shear zone, the change of particle size and fractal dimension is gradually becoming larger and larger. The shear zone's differential stress value is between 23.583 MPa and 46.983 MPa, and the strain rate is from  $1.70 \times 10^{-11}$  to  $9.74 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ .

**Conclusions:** On the basis of the detailed field observations and indoor analysis, and by comparing the diameter of quartz with dynamic recrystallization, the differential stress and the strain rate in the shear zone can be found that the differential stress and strain rate showed a positive correlation, both becoming gradually smaller from the core to the edge in the shear zone. But quartz diameter shows a negative correlation with the differential stress and strain rate, as the quartz diameter becomes larger from the core to the edge in the shear zone, the differential stress and strain rate becoming smaller. The larger the difference stress, causes the quartz particle's strength stronger, the deformation stronger, and the strain rate performs stronger. From the microscopic structure deformation view to study and understand this shear zone is of great significance to reveal the tectonic evolution and to establish the structural model of Tongbai—Dabie orogenic belt.

**Keywords:** the shear zone in northern boundary of Tongbai Complex, displacement, fractal dimension, differential stress, strain rate

**Acknowledgements:** This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos: 41272222, 41502193)

**First author:** LI Hailong, male, born in 1991, a doctoral candidate of Hefei University of Technology and majored in structural geology. Email: sargnlee@126.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: 2016-10-23; Accepted on: 2017-03-23; Edited by: LIU Zhiqiang

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2017.03.010