

西秦岭白龙江断裂带断层泥石英微形貌特征 及其年代学意义

申俊峰¹, 杨为民², 刘 廷¹, 黄 晓¹, 郑卫杰¹, 王国强¹, 于 雷¹

1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081

摘 要: 断层泥是断裂活动信息的重要载体, 其中石英碎砾微形貌特征的识别和统计, 可以提供断裂活动的年代学证据。在野外调查的基础上, 对西秦岭白龙江断裂带西段尼什峡剖面进行了系统的断层泥样品采集, 共采集 22 件样品全部进行了石英碎砾提取和扫描电镜微形貌观察统计, 其中 5 件样品进行热释光测年。结果表明, 该断裂带尼什峡段在晚近以来曾多次活动。活动始于上新世, 早更新世至中更新世早期进入高峰期, 晚更新世仍在活动, 但全新世已不再活动。这一结论对于正确评价白龙江断裂带的活动规律及其对该区自然环境的影响具有重要参考意义。

关 键 词: 断层泥; 石英微形貌; 热释光测年; 更新世; 白龙江断裂带

中图分类号: P578.4⁺94 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2802(2014)03-0271-08 **doi:** 10.3969/j.issn.1007-2802.2014.03.001

Micro-morphology of Quartz in the Bailong River Fault Gouge, West Qinling, China, and its Chronological Significance

SHEN Jun-feng¹, YANG Wei-min², LIU Ting¹, HUANG Xiao¹, ZHENG Wei-jie¹,
WANG Guo-qiang¹, YU Lei¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Gouge is an important information carrier for fault activities and the surface texture of gouge quartz contains chronological information of the fault activity. Gouge quartz samples were collected from 22 gouge samples, which were sampled at the Nis gorge section of the Bailong River (BR) fault, western Qinling, and their micro-textures were observed by SEM, besides, 5 of the gouge samples were tested by thermo-luminescence dating. The results showed that BR fault has undergone a few periods of activity, started from the Pliocene, peaked in the early-Pleistocene to early mid-Pleistocene period, was active in the late-Pleistocene but wasn't in the Holocene. This finding is significant for evaluating the activities of BR fault and for assessing their impacts to the regional environment.

Key words: gouge; quartz micro-morphology; TL dating; Pleistocene; Bailong River fault

断裂活动的多期次性或强大应力作用下的断层活动, 均可能导致断层带物质碎裂甚至泥粉化(Moore *et al.*, 1989; 张秉良等, 1994; Vrolijk and Van Der Pluijm, 1999; 张秉良和周永胜, 2000; 张秉良等, 2000; Bos *et al.*, 2000; Ben-Zion and Sammis, 2003; Kim *et al.*, 2004)。显然, 断层泥是断层活动信息的重要载体, 能够记录诸如断裂活动时间、活动期次、力学强度等丰富的动力学和运动学信

息(Kanaori, 1986; 邵顺妹, 1994; Masuda *et al.*, 1995; Fukuchi, 1996; Bos *et al.*, 2000; Kanaori, 2000)。

由于断层活动过程中总是将断裂结构面上软弱的矿物颗粒优先研磨细化甚至发生相转化(张秉良等, 1994; Vrolijk *et al.*, 1999; Bos *et al.*, 2000), 所以相对硬质的矿物颗粒(如石英等)就会以碎屑状保留在断层泥中(Sibson, 1977; Vrolijk *et al.*,

收稿日期: 2013-06-02 收到, 10-17 改回

基金项目: 中国地质调查项目(1212011120072); 国家科技支撑项目(2011BAK12B09); 国家自然科学基金项目(41072269, 41072070)

第一作者简介: 申俊峰(1962—), 男, 教授, 博导, 研究方向: 成因矿物学。E-mail: shenjif@cugb.edu.cn.

发地震、滑坡、泥石流等自然灾害。因此,该区应属于我国地质灾害高发地区。

1.1 区域地层和岩浆岩

该区地层出露较为完整,发育了古生代中期至新生代较为完整的地层序列。主要出露地层为:志留系和泥盆系的一套滨浅海相碎屑-碳酸盐沉积组合,多数遭受浅变质作用,岩性以硅质、碳质板岩组合的黑色岩系为主,夹有少量薄层碳酸盐岩或火山碎屑岩;石炭系一二叠系以碳酸盐沉积组合为主,局部夹有海陆交互相碎屑岩地层;三叠系为一套砂岩和粉砂岩、浅变质泥岩(千枚岩和板岩),夹碳酸盐岩;白垩系为一套紫红色砂岩、砂砾岩夹碳质板岩,局部发育煤层(肖力等,2009)。

在白龙江一带,其地层的平面展布特点明显具有沿白龙江呈东西向与流域一致的条带状展布规律。自条带中央至条带边缘地层由老至新依次分布,即总体上条带中心以志留系为主,两侧外围则以三叠系为主,其他地层多呈断续条带状展布。这一地层展布特点也与该区主构造线方向一致(图1)。

值得强调的是,由于地层展布和主构造线方向一致,许多地层界线呈断层接触。总体上断裂带切穿的地层以板岩、千枚岩以及细碎屑岩和薄层灰岩为主。由于长期的构造作用,多数地层呈高角度或近直立产状。

白龙江地区的岩浆活动较为发育,但以侵入活动为主。其中,加里东期发育一些火山岩和少量中酸性侵入岩。海西-印支期岩浆活动较剧烈,以花岗质岩浆侵入活动为主,伴生有少量中基性岩。燕山和喜马拉雅山期岩浆活动旋回发育大规模花岗质岩浆活动,存在有零星出露但数量较多的中酸性-中基性或碱性小岩体侵位和少量陆相火山活动。

总体上看,该区岩浆岩从基性岩至酸性岩均有发育,但以中酸性岩为主。时代上以印支-燕山期岩浆侵入活动为主。空间上多呈零星小侵入体(岩珠、岩脉等)出露(肖力等,2009)。这说明,该区在印支-燕山期发育了重要的构造岩浆活动,并对该区构造格架产生了重要影响,同时对该区的新构造运动也具有强烈的继承性影响。

1.2 区域构造格架及主要断裂特征

由于该区经历了长期复杂的构造运动,断裂和褶皱均较为发育。其中,断裂构造控制了区内的主体构造格架。从图1可以明显看出,构造线总体呈北西-北西西走向,局部存在近东西向和北东-北东东走向的断层。

有资料显示(肖力等,2009),这些北西-北西西

走向断裂主要为一些压扭性断裂。其中,对白龙江一带影响较大的断裂带包括摩天岭东西向推覆体系(主要展布于松潘-文县一带或诺尔盖-文县一带)、武都-康县-略阳东西向构造带、隆扎-迭部东西向构造带(展布于玛曲-迭部一带),以及成县-铁山断裂带、岷县-成县断裂等、玛曲-武都断裂带、岷县断裂、临潭-宕昌断裂等;

从图1还可看出,白龙江断裂带实际上是由一系列不同方向、不同期次的断裂组成。其中,北西走向的断裂主要是早期断裂,该组断裂沿走向延续性较好,倾向南西和北东,与白龙江流域近同向展布。从早期北西向断裂发育的密集程度看,位于白龙江北东侧存在一个断裂密集带,表现为多条走向较为一致的断裂平行密集发育,可能是对印支-燕山期构造持续继承性活动的结果。

另外,存在与早期构造交叉的北东走向和少量北北西走向2组晚期断裂,前者较为发育。多处可见这2组晚期断裂分别对早期的北西走向断裂产生切割。可见受早期断裂限制,晚期断裂延伸距离较短,但同样存在多条断层并行发育并连续切断早期断裂的现象(图1)。

野外调查显示,白龙江断裂带东段(舟曲至武都段)和西段(迭部至舟曲段)运动学特征存在差异。其中,西段的断裂可见水平运动特征。如,迭部县西侧可见发育于断裂带南侧的分支断裂出现明显挤压特征并伴随近水平状滑动擦痕。在舟曲一带也可见类似的滑擦面。

2 样品采集与测试

野外调查表明,白龙江断裂带受区域构造格架的影响,新构造运动具有继承东西断裂的特点,同时断层泥在该断裂带的东、西段发育存在差异,反映出新构造运动的强度和持续时间也具有差异。

发育断层泥的岩性多为板岩、碳质板岩、灰岩、细砂粉砂岩。当板岩组合中存在碳质板岩时,其泥化现象较为多见。另外,在碳质板岩或板岩与灰岩接触带也易产生断层泥。

本次研究选择白龙江断裂带西段典型的尼什峡断裂带剖面进行系统研究,以期获得对该断裂带活动历史的全面认识。

2.1 断层泥样品采集和预处理

尼什峡断裂带剖面发育和出露很好。本段断裂带总体走向东西为 $290^{\circ}\sim 300^{\circ}$,其南侧主要发育石炭系的砂岩、粉砂岩,薄层灰岩,断裂带北侧则主要是白垩系红色砂砾岩层。断裂带宽约130

m,以断层角砾岩和断层泥为主,局部可见断夹块或定向排列的断层角砾。其中靠近破碎带南侧泥化严重,几乎未见构造砾石断层角砾,主要以黄色、白色、红色断层泥为主,多处可见不同颜色的断层泥呈条带状出露;靠近破碎带北侧则明显以红色断层泥为主,并含有一定量的断层角砾,砾石含量5%~10%,直径约2~30 mm,个别大者达10 cm。砾石含量有愈靠近断裂带北缘愈多的趋势,当接近断裂带北缘时还可见10 cm以上砾石,并逐渐过渡为碎裂岩。

断层泥采样主要选择断裂带剖面明显具有泥化

特征的部位进行系统采集,自南至北依次取样品22件,采样位置见图2。样品采集前,把表层风化土清理干净,一般剥去表层土15 cm以上,然后采集新鲜断层泥样品,采样过程采取避光措施。对于进行热释光定年的样品,首先取得1~1.5 kg新鲜样,并立刻用黑色塑料袋(或锡纸或黑色布袋)封装,用于热释光定年。然后采集约1 kg断层泥用于分选其中的石英碎砾进行扫描电镜微形貌观察统计。热释光定年测试由中国地震局地壳应力研究所完成。断层泥石英微形貌观察统计在中国地质大学(北京)矿物标型实验室完成。

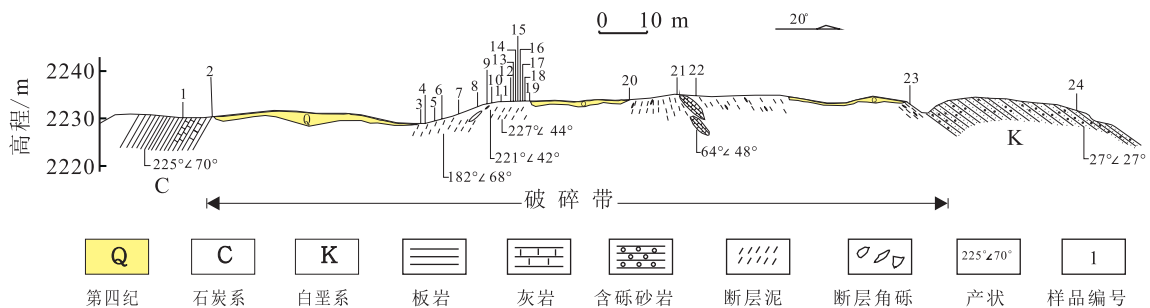


图2 白龙江断裂带尼什峡段剖面图及其采样位置

Fig. 2 Nis gorge section of the Bailong River fault and the sampling positions

进行石英微形貌观察的断层泥样品,需要进行如下几个步骤的预处理:

①淘洗去除细粒级黏土矿物:首先把野外取得的断层泥样品在105℃下烘干,然后放入烧杯中并注入足量水浸泡,使样品中矿物颗粒自然解体分散。浸泡一定时间后,采取“搅拌-静置-溢去上浮水”程序分选石英碎砾,重复上述步骤,达到最大限度去除细粒级黏土质矿物,最终获得沉淀颗粒碎屑。一般来说,淘洗沉淀的碎屑颗粒物主要是石英、长石、铁质氧化物和碳酸盐颗粒等。

②盐酸浸泡去除碳酸盐颗粒:将淘洗沉淀的碎砾样品用10%盐酸浸泡,以去除碳酸盐颗粒。一般在常温下浸泡8 h以上(Kanaori *et al.*, 1980)。

③立体显微镜下石英挑纯:经盐酸浸泡的碎砾样品需进行分级、挑纯。一般来说,40目(0.45 mm)或60目(0.3 mm)以上的碎砾常常以岩屑为主。而-200目(-0.074 mm)以下粒度则太细,常常由于静电引力而使得石英碎砾表面粘附有黏土矿物等微细粒物质,影响对石英微形貌的观察。所以,根据立体显微镜下的检查结果,本次选择-60目(-0.3 mm)至200目(0.074 mm)的粒度作为石英碎砾挑纯和石英微形貌观察的最佳粒度。

需要说明,在立体显微镜下挑纯的石英碎砾,仍可能混有少量长石类矿物。因此,在扫描电镜下观察微形貌时仍需对存疑的碎砾采用能谱确认,以确保电镜下观察的碎砾全部是石英。

2.2 扫描电镜下观察石英碎砾微形貌方法

石英微形貌观察统计采用泰斯肯(上海)有限公司的MIRA3 XMU型场发射扫描电镜进行。观察统计前,将挑纯的石英碎砾粘附于导电胶带并置于样品台上,粘附时将颗粒分散排列,然后喷镀导电膜(本次喷镀铬作导电膜)。将粘有样品的胶带置于扫描电镜样品舱内,选择不同放大倍数条件观察样品微形貌特征,并拍摄照片用于微形貌统计。观察过程中对于存疑的碎砾采用能谱确认,确保统计颗粒为石英碎砾。观察统计时采用对照图谱(Kanaori *et al.*, 1981;杨主恩等,1984;俞维贤等,1998)进行分类统计,统计结果采用图表表达。

3 结果及讨论

一般来说,由于断层活动历史(活动时间、次数、强度等)不同,其中石英表面微形貌结构也会明显不同。大量研究结果表明(Kanaori *et al.*, 1980; Kanaori *et al.*, 1981; 杨主恩等,1984; 张秉良等,

1996a; 俞维贤等, 1998, 2002, 2004; 张汝潘和杨主恩, 1999; 申俊峰等, 2007): 断层泥中常出现的石英微形貌结构主要有贝壳状、次贝壳状、似桔皮状、似苔藓状、似鱼鳞状、似虫蛀状、似钟乳石状、似锅穴坑状和似珊瑚状。而贝壳状微形貌的大量出现代表石英破裂时间不长的“新鲜”结构特征, 称之为应力微形貌(申俊峰等, 2007)。实际上, 大量贝壳状微形貌出现时还会伴随划痕、刻槽、阶步、撞击碎裂等破裂特征的微形貌。随着断层活动进入相对平静期, 石英碎砾即开始遭受物理、化学甚至生物的风化溶蚀作用, 其应力微形貌特征会随之向次贝壳状、似桔皮状、似苔藓状、似鱼鳞状、似虫蛀状、似钟乳石状、似锅穴坑状和珊瑚状等风化特征微形貌方向演化, 这些主要由溶蚀作用形成的微形貌称之为溶蚀微形貌(申俊峰等, 2007)。

由此看来, 断层泥中石英碎砾的微形貌主要包括 2 种微形貌类型: 应力微形貌和溶蚀微形貌。在断层泥形成和演化过程中, 石英表面形貌的总体演化趋势表现为: 早期主要出现贝壳状、划痕、刻槽、阶步、撞击碎裂等应力微形貌特征。随着断层泥的进一步演化, 应力微形貌逐渐消失, 取而代之的是大量溶蚀微形貌的出现。石英表面逐渐由锐化或具有显著刻划、碎裂的特征转化为平滑、圆滑或凹坑、洞穴等特征。因此, 根据断层泥石英微形貌组合特征可以判读断层活动历史信息。

一些研究者(Kanaori *et al.*, 1980, 1981; 杨主恩等, 1984; 张秉良等, 1996a; 俞维贤等, 1998, 2002, 2004; 张汝潘和杨主恩, 1999; 申俊峰等, 2007)将断层泥石英微形貌大致分为如下几类:

(1) Ru 类(破裂类): 石英主要显示破裂特征, 基本表现为表面光滑无溶蚀特征, 偶见被溶蚀的贝壳状断口。大量出现贝壳状微形貌或溶蚀不严重的次贝壳微形貌, 以及撞击碎裂特征、显著划痕、阶步等微形貌时, 说明该断层活动年代不是太久, 多数情况下表明断层在全新世有过活动。

(2) I a 类(溶蚀类): 石英碎砾表面具不规则外形, 有较尖锐的棱和脊, 没有磨钝, 表面可观察到孔深 $1\ \mu\text{m}$ 的细小孔洞。虽然仍可以见到次贝壳断口, 但可见有明显的被溶蚀特征, 大量出现桔皮或似桔皮状微形貌。

(3) I b 类(溶蚀类): 石英碎砾表面具不规则外形, 有较尖锐或几乎没有磨钝的棱和脊, 表面可见孔深 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的细小孔洞, 而难见被溶蚀的贝壳断口等应力微形貌, 大量出现桔皮或似鱼鳞状微形貌。

(4) I c 类(溶蚀类): 石英碎砾表面有较尖锐的

棱和脊, 几乎没有磨钝, 表面可观察到细小孔洞, 孔深约 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 。大量出现鱼鳞状微形貌, 也见桔皮状微形貌。

(5) II 类(溶蚀类): 石英碎砾表面多为次棱角状, 具小凹凸或不规则小孔洞, 溶蚀坑深约 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 。表面以鱼鳞、苔藓状微形貌为主, 也可见一些钟乳状微形貌。

(6) III 类(溶蚀类): 石英碎砾多呈近似球形, 具显著的凹凸表面, 凹凸程度约 $4\sim 10\ \mu\text{m}$, 表面多呈钟乳甚至虫蛀状微形貌, 但仍可见一些苔藓状微形貌。

(7) IV 类(溶蚀类): 石英碎砾表面完全磨圆, 溶蚀孔洞明显大而深, 绝大多数孔洞相互之间已经贯通, 呈现复杂的三维孔洞微形貌, 孔洞延深约 $50\sim 100\ \mu\text{m}$, 表面呈明显的蜗穴状或珊瑚状, 也可见一些虫蛀状溶蚀特征。

由上可见, 随着溶蚀作用加强, 溶蚀微形貌表现出如下明显的规律性变化: 即尖锐棱角逐渐消失、相对平坦的表面越来越凹凸、溶蚀孔不断加深加大。实际上, 溶蚀作用的强弱代表了溶蚀作用时间长短。所以, 溶蚀微形貌的发育与溶蚀时间密切相关。

理论上, 石英的溶蚀还与环境温度、压力以及溶蚀液的 pH 值有关(Kanaori, 1985; Kanaori *et al.*, 1985)。即, 石英的实际溶蚀过程会受到多重因素的影响。然而, 实验结果证实, 在一般条件下石英是相当稳定的(Kanaori *et al.*, 1980)。当 $\text{pH} \leq 9$ 时, 石英的溶解度为 10^{-6} 量级。在接近地球表面的温度和压力下石英溶解度几乎为零。比如, 在温度 25°C 条件下石英溶解度约 10×10^{-6} , 100°C 时也仅为 50×10^{-6} 。Kanaori 等(1980)进一步证实, 在地表下 $10\ \text{m}$ 的地方, $1\ \text{cm}^3$ 的石英晶体如果溶解掉 $90\ \text{mg}$ (相当于石英重量的 7%), 大约需要 2 万年。

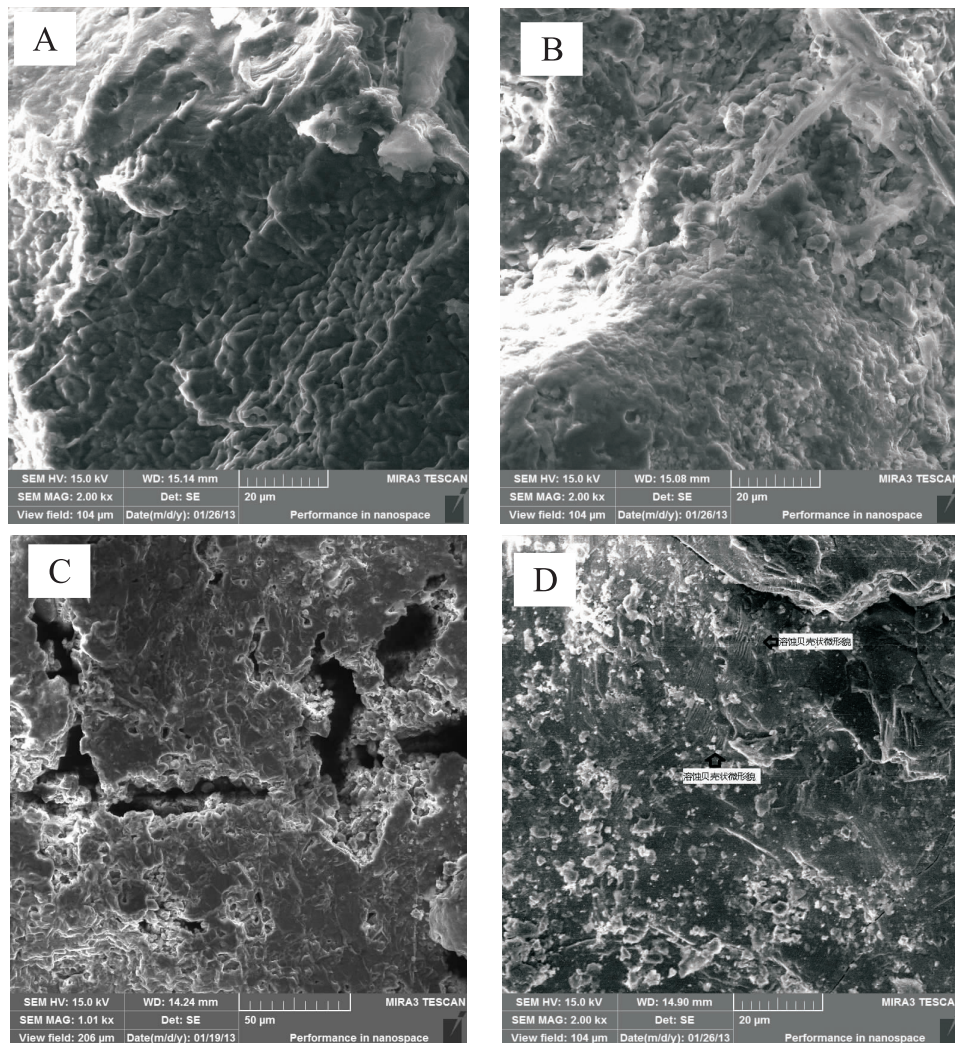
这样看来, 对于接近地表的断层中石英微形貌形成过程可获得如下 2 点认识: ①环境条件(温度、pH 等)对石英溶蚀过程的影响可以忽略不计; ②石英溶蚀过程主要与时间有关, 而且时间尺度大约在千年至万年量级。因此, 基于地质年代尺度与断层泥石英的溶蚀微形貌, 可以编制出溶蚀微形貌年代学图谱(Kanaori *et al.*, 1981; 杨主恩等, 1984; 俞维贤等, 1998)。

按照该图谱, 断层泥中石英的微形貌结构从简单到复杂依次可划分为: 较光滑的贝壳状、次贝壳状结构; 欠光滑的桔皮状或次桔皮状结构; 略显粗糙的鱼鳞状、苔藓状结构; 较为复杂的钟乳状、蛀虫状结构; 更加复杂的洞穴状、珊瑚状结构。显然, 伴随颗粒表面结构的复杂程度, 表面溶蚀凹沟深度也在加

大。石英颗粒表面的溶蚀结构越复杂、溶蚀沟越深,表明石英颗粒遭受的溶蚀时间越长,断层活动距今也就越久。因此,通过统计不同发育程度的溶蚀微形貌,可以获得断层活动的年代学信息。

有必要说明,通过断泥石英溶蚀微形貌统计结果获得的年代学信息,如果结合热释光或光释光定年数据来评价断层活动年代将更有意义。

本次在白龙江断裂带尼什峡剖面共取得断层泥样品 22 件。观察结果显示,石英表面大量出现溶蚀微形貌,仅偶见应力微形貌。其中,溶蚀微形貌以鱼鳞状(图 3A)和苔藓状(图 3B)为主,其次为钟乳状(图 3C)、桔皮状和虫蛀状,其他微形貌甚少。另外,也偶见被溶蚀的贝壳状微形貌(图 3D),基本未见明显的贝壳状微形貌。



A-鱼鳞状; B-苔藓状; C-钟乳状; D-溶蚀微形貌和贝壳状溶蚀微形貌

图 3 断层泥石英碎砾

Fig. 3 Quartz grains in the gouge

将观察到的微形貌特征进行频率统计,结果发现主要分布范围为 II 类至 III 类之间,二者之和超过统计总数的 80%。其中以 II 类为最多(图 4),占总数约 55%。其次有少量的 Ia、Ib、Ic 和 IV 类微形貌,但总和不及总数的 15%。

需要说明的是,在该剖面的第 20120714-13 号样品微形貌统计图(图 5)和第 20120714-17 号样品微形貌统计图(图 6)中,明显可见出现了较多的 I 类微形貌(包括 Ia、Ib、Ic)。对照剖面图可以发现,

这两个样品所在位置正好是两类岩性(即石炭系的薄层灰岩和板岩组合与白垩系的红色砂砾岩)接触部位,也是断层泥泥化最严重的部位(出现红、白、黄等杂色条带状断层泥)。显然说明,断层剖面的这个部位是断层多次活动的显著部位,即该处经历了更晚期再次活动磋磨,因而导致石英出现了明显应力微形貌与溶蚀微形貌组合特征。

综合上述断层泥石英微形貌特征,并对照典型年代学图谱可以推断:该断裂带显著的活动始于上

新世,早更新世活动达到高峰,在其后的中更新世,直至晚更新世仍然在活动。全新世该断裂已基本不再活动了。

有意思的是,在该剖面取得的 5 件热释光定年结果(表 1)佐证了上述结论。从表 1 可知,5 件热释光定年结果全部落在中、晚更新世的范围,其中 4 个年龄值(占总数的 80%)非常接近,集中在 76.03~92.18 ka 之间,属晚更新世(IUGS 标准,晚更新世为 126~11.7 ka)早期范围,另外 1 个年龄值(190.82 ka)属于中更新世(IUGS 标准,中更新世为 781~126 ka)晚期范围。

我们知道,热释光所得的年龄数据代表的是断裂最后一次活动的时间(因为断层的多次活动可能引发热事件并导致释放部分累计于石英晶格内的能量,即热激发归零事件)。这使得断层泥采用热释光测年法获得的年代学信息与石英微形貌统计所获得的年代学信息正好存在时间差,即热释光定年时间滞后于石英微形貌定年时间。

需要说明,剖面中第 120714-01-13 号样品出现了 190.82 ka 的定年结果,而如前所述的石英微形

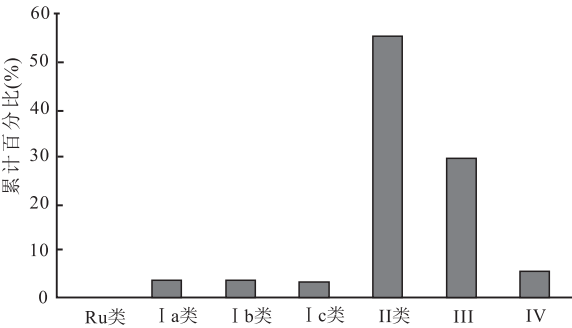


图 4 白龙江断裂带尼什峡剖面断层泥石英微形貌统计结果
Fig. 4 Histogram of micro-morphology of gouge quartzes in the Nis gorge section of the Bailong River fault

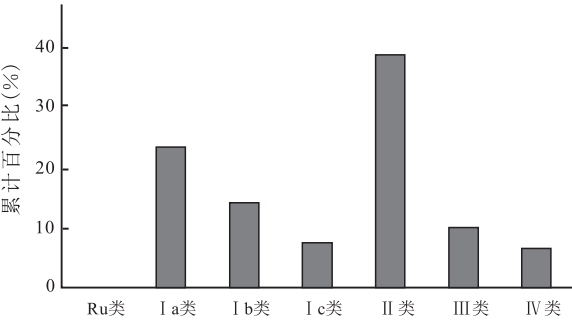


图 5 白龙江断裂带尼什峡段第 20120714-13 样品断层泥石英微形貌统计结果
Fig. 5 Histogram of micro-morphology of gouge quartzes in the Nis gorge section of the Bailong River fault, samples 20120714-13

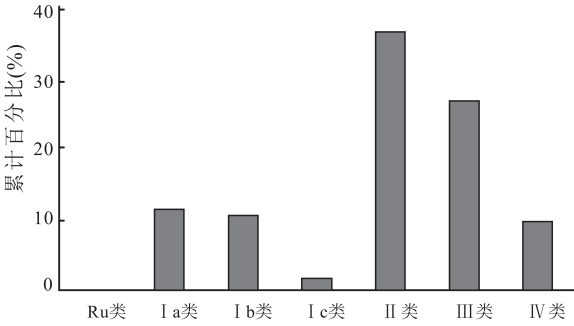


图 6 白龙江断裂带尼什峡段第 20120714-17 样品断层泥石英微形貌统计结果
Fig. 6 Histogram of micro-morphology of gouge quartzes in the Nis gorge section in the Bailong River fault, samples 20120714-17

表 1 断层泥热释光测年数据表
Table 1 TL dating data of fault gouge samples

样号	放射性元素含量(10 ⁻⁶)			年剂量率(Gy/a ×10 ⁻³)	等效剂量(Gy ×10 ⁻³)	年龄(ka)	误差
	U	Th	K				
120714-1-05	3.48	18.5	3.60	3.15	240.0	76.03	6.46
120714-1-06	3.26	18.5	3.76	3.05	256.0	83.94	7.13
120714-1-11	2.96	15.1	2.91	2.60	240.0	92.18	7.83
120714-1-13	3.66	19.1	4.09	3.35	640.0	190.82	20.99
120714-1-23	2.98	16.8	3.54	2.87	232.0	80.77	6.86

测试者: 中国地震局地壳应力研究所, 2012.11

貌统计结果显示,在第 120714-01-13 样品明显出现了较多的表征中、晚更新世的石英微形貌组合(Ia+Ib+Ic 类型组合),结合剖面野外特征显示该部位正好是不同岩性接触带和断裂泥化最强部位。综合这些现象可以认为,该断裂经历了多期次运动,且中更新世仍然是主要活动时期。因此,该断裂带主要活动时间限定在早、中更新世,多次严重磋商在剖面中部偏南的部位(相当于剖面图 2 中第 120714-3 至第 120714-20 号采样部位)。

上述 2 种方法联合对该断层的年代学厘定,且获得了高度吻合的定年结果,证实了对该断裂带活动性评价具有合理性。

需要特别说明的是,断裂带断泥中石英微形貌总体显示“应力微形貌出现频率极低,多数石英具深度溶蚀”的特征,显然可以认为该断裂在全新世已不再有明显活动。这一点与“野外调查尚未发现全新世地层被明显扰动”的事实一致。

4 结 论

(1)白龙江断裂带尼什峡断层剖面泥化带石英微形貌系统统计结果和热释光定年结果综合显示,该断裂带从上新世就有活动,早、中更新世达到高峰,晚更新世仍在活动,全新世基本不再活动。

(2)该断裂带断层泥石英大量出现溶蚀微形貌组合,而极低频率出现应力微形貌,并且在剖面中部偏南部位的样品同时出现 190.82 ka(中更新世)热释光测年结果和较多出现表征中晚更新世的 I 类型石英微形貌组合,说明该断裂具有长期活动的特点,剖面中第 120714-01-13 至 120714-01-13 号采样位置是断层多次活动显著部位。

(3)断层泥石英微形貌统计定年结果与热释光测年结果的高度吻合,并与野外调查“第四系全新世未见明显扰动痕迹”的地质事实一致,说明该综合评价方法对该断裂带的活动性评价具有合理性。

参考文献 (References):

- Ben-Zion Y, Sammis C G. 2003. Characterization of fault zones[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 160: 677—715.
- Bos B, Peach C J, Spiers C J. 2000. Frictional-viscous flow of simulated fault gouge caused by the combined effects of phyllosilicates and pressure solution[J]. *Tectonophysics*, 327: 173—194.
- Bos B, Spiers C J. 2000. Effect of phyllosilicates on fluid-assisted healing of gouge-bearing faults[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 184: 199—210.
- Chen Y, Feng J, Gao J, Taylor L, Grun R. 1997. Observations on the micro-texture and ESR spectra of quartz from fault gouge[J]. *Quaternary Science Reviews*, 16: 487—493.
- Fukuchi T. 1996. Direct ESR dating of fault gouge using clay minerals and assessment of fault activity[J]. *Engineering Geology*, 43: 201—211.
- Kim Y S, Peacock D C P, Sanderson D J. 2004. Fault damage zones[J]. *Journal of Structural Geology*, 26: 503—517.
- Kanaori Y, Miyakoshi K, Kakuta T. 1980. Dating fault activity by surface textures of quartz grains from fault gouges[J]. *Engineering Geology*, 16(3): 243—262.
- Kanaori Y, Miyakoshi K, Kakuta T. 1981. Dating fault activity by surface textures of quartz grains from fault gouges[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics*, 18(5): 91.
- Kanaori Y, Tanaka K, Miyakoshi K. 1985. Further studies on the use of Quartz grain from fault gouges establish the age of faulting[J]. *Engineering Geology*, 21(1-2): 175—194.
- Kanaori Y. 1985. Surface textures of intrafault quartz grains as an indicator of fault movement[J]. *Catena*, 12(4): 271—279.
- Kanaori Y. 1986. A SEM cathodoluminescence study of quartz in mildly deformed granite from the region of the Atotsugawa fault, central Japan[J]. *Tectonophysics*, 131:133—146.
- Kanaori Y. 2000. Seismic risk assessment of an active fault system: The example of the Tsurugawan—Isewan tectonic line[J]. *Engineering Geology*, 56:109—123.
- Masuda A, Sugino K, Toyota K. 1995. Lead isotopic composition in fault gouges and their parent rocks: Implication for ancient fault activity[J]. *Applied Geochemistry*, 10: 437—446.
- Moore D E, Summer R, Byerlee J D. 1989. Sliding behavior and deformation textures of heated illite gouge[J]. *Journal of Structural Geology*, 11: 329—342.
- Pedersen K. 1997. Microbial life in deep granitic rock[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 20: 399—414.
- Sibson R H. 1977. Fault rocks and fault mechanisms[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 133: 191—213.
- Vrolijk P, Van Der Pluijm B A. 1999. Clay gouge[J]. *Journal of Structural Geology*, 21: 1039—1048.
- 戚国庆, 黄润秋, 彭汉兴. 2004. 水岩相互作用下结晶岩的矿物演化[J]. *矿物岩石*, 24(1): 43—47.
- 邵顺妹. 1994. 断层泥研究的现状和进展[J]. *高原地质*, 6(3): 51—56.
- 申俊峰, 申旭辉, 曹忠全, 郭士金. 2007. 断层泥石英微形貌特征在断层活动性研究中的意义[J]. *矿物岩石*, 27(1): 90—96.
- 汪明武, 章杨松, 李丽, 罗国煜. 2002. 应用断层泥石英形貌测龄评价桥基断裂活动性[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 25(3): 335—339.
- 肖力, 赵玉锁, 张文钊, 周依林, 潘爱军, 韩先菊, 崔龙, 张峰, 张勇. 2009. 西秦岭成矿带中段金(铅锌)多金属成矿规律及资源潜力评价[M]. 北京: 地质出版社, 12.
- 杨主恩, 胡碧茹, 洪汉净. 1984. 活断层中断层泥的石英碎砾的显微特征及其意义[J]. *科学通报*, 3(24): 484—486.
- 杨主恩, 张流, 石桂梅. 1986. 粘滑与稳滑实验条件下石英的某些显微形貌特征及其地震地质意义[J]. *地震地质*, 8(2): 21—25.
- 俞维贤, 何蔚, 向才英, 毛玉平. 1998. 建水地区主要断裂断层泥中石英碎砾表面 SEM 特征及其断裂活动[J]. *地震研究*, 21(2): 172—179.
- 俞维贤, 安晓文, 李世成, 周瑞奇, 杨继武. 2002. 澜沧江流域主要断裂断层泥中石英碎砾表面 SEM 特征及其断裂活动研究[J]. *地震研究*, 25(3): 275—280.
- 俞维贤, 王彬, 毛燕, 杨继武. 2004. 程海断裂带断层泥中石英碎砾表面 SEM 特征及断层活动状态的分析[J]. *中国地震*, 20(4): 347—352.
- 张秉良, 刘桂芬, 方仲景, 林西生, 郑乃宣. 1994. 云南小湾断层泥中伊利石矿物特征及其意义[J]. *地震地质*, 16(1): 89—96.
- 张秉良, 方仲景, 段端涛, 向宏发. 1996a. 程各庄断裂断层泥显微结构特征及其断裂活动性探讨[J]. *华北地震科学*, 14(4): 31—39.
- 张秉良, 方仲景, 向宏发, 段端涛. 1996b. 断层显微结构特征与断层活动习性的研究[J]. *华南地震*, 16(4): 68—72.
- 张秉良, 何昌荣, 刘行松. 2000. 云南小湾断层泥矿物特征及其构造意义[J]. *地质科学*, 35(2): 197—205.
- 张秉良, 周永胜. 2000. 含有黏土矿物断层泥地震与非地震标志[J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 21(4): 67—71.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 2002. 关于中国大陆动力学与造山带研究的几点思考[J]. *中国地质*, 29(1): 7—14.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭-松潘大陆构造结[J]. *地学前缘*, 11(3): 23—32.
- 张汝潘, 杨主恩. 1999. 扫描电镜与微观地质研究[M]. 北京: 学苑出版社.