

文章编号: 1004—5589 (2021) 02—0307—12

活动断裂带断层泥中石英颗粒表面微形貌特征： 以内蒙古水泉子沟—天山口断裂带为例

朱彤^{1,2}, 李本仙¹, 李耀宗³, 孟杰⁴, 刘晓阳^{1,5}, 费渴心¹

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;
2. 吉林省地质调查院 九分院, 长春 130102;
3. 平煤神马建工集团有限公司, 河南 平顶山 467000;
4. 哈尔滨师范大学 地理科学学院, 哈尔滨 150025;
5. 吉林大学 无机合成与制备化学国家重点实验室, 长春 130012

摘要: 以水泉子沟—天山口断裂带杨树林剖面为研究对象, 利用扫描电镜分析技术 (SEM) 对从该剖面野外采集的断层泥样品中分离出来的石英颗粒进行微观形貌研究, 进而对石英颗粒的微形貌类型进行识别分类和统计分析, 估算断层活动的相对时间; 同时利用模糊数学方法确定了断层的活动方式。结果表明, 断层活动始于早更新世, 经历过多次活动, 直至全新世仍具有一定的活动性。依据横向上断层活动年代由新到老的趋势, 推测断层上盘为主动盘, 断层泥的发育方向为由下盘到上盘。断层的活动方式以黏滑为主, 蠕滑表现较弱, 是与地震活动有关的活动断裂。

关键词: 内蒙古; 水泉子沟—天山口断裂带; 断层泥; 石英颗粒; 微形貌特征; 断层活动

中图分类号: P542 **文献标识码:** A **开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):**

doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2021.02.008



Micro-morphological characteristics of quartz grains surface in fault gouge of active fault zone: taking Shuiquanzigou- Tianshankou fault zone in Inner Mongolia as an example

ZHU Tong^{1,2}, LI Ben-xian¹, LI Yao-zong³, MENG Jie⁴, LIU Xiao-yang^{1,5}, FEI Ke-xin¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. Ninth Branch, Geological Survey of Jilin Province, Changchun 130102, China;
3. Pingmei Shenma Jiangong Group Co. Ltd., Pingdingshan 467000, Henan, China;
4. College of Geography Sciences, Harbin Normal University, Harbin 150025, China;
5. State Key Laboratory of Inorganic Synthesis and Preparative Chemistry, Changchun 130012, China

Abstract: The micro-morphological characteristics of quartz grains isolated from fault gouge samples collected in the Yangshulin profile of Shuiquanzigou–Tianshankou fault zone were studied by scanning electron microscopy (SEM). The micro-morphological types of quartz grains were identified, classified and statistically analyzed to estimate the relative time of fault activity. Meanwhile, the activity mode of the fault was identified by fuzzy mathematical method. The results show that fault activity began in the Early Pleistocene and experienced many stages of activity until the Holocene. According to the lateral tendency of the age of fault activity from new to old, it is inferred that the hanging wall of the fault was the main moving side, and the development direction of fault gouge was from

收稿日期: 2021-01-06; 改回日期: 2021-02-08

基金项目: 国家青年科学基金项目 (41502044)

通讯作者: 李本仙 (1980—), 男, 副教授, 主要从事构造地质及地球化学研究。E-mail: lbxian@jlu.edu.cn

the footwall to hanging wall. The movement mode of fault was mainly stick-slip, and the creep - slip was weak, it was an active fault related to earthquake.

Keywords: Inner Mongolia; Shuiquanzigou-Tianshankou fault zone; fault gouge; quartz grains; micro-morphological characteristics; fault activity

0 引言

地质体在地应力作用下破裂,沿破裂面滑动形成断层。在断层活动过程中,岩石在强烈的应力作用下发生破碎,断层构造面会发生角砾化,甚至泥粉化,最终形成断层泥质物质^[1-9]。大量研究结果表明,断层泥的形成是断层反复运动的结果,物质组成主要与母岩成分有关,细粒物质主要为石英和长石等矿物碎屑,以及黏土矿物和少量岩屑。它是断层两侧机械摩擦形成的泥质物质,是断层脆性剪切变形的物质记录^[7-14]。作为断层演化历史的见证者,断层泥能揭示关于断层活动的年代、性质和强度等重要信息^[3-17]。

断层泥中夹杂的石英碎屑溶解速度缓慢、具有较强的抗风化能力,性质较为稳定,其表面的微观形貌特征复杂、类型繁多,记录了断层的滑动方式和最新活动时间等重要的断层剪切变形信息^[10-13,18]。石英颗粒表面的微观形貌主要取决于断层活动的历史,并不会受母岩岩性特征的影响,通过对断层泥中石英颗粒表面微形貌特征的识别和统计,可以为估算断层活动相对时间提供证据和判断断层的滑动方式^[15,19]。一般认为,断层的滑动方式有两种:一种是黏滑,源于断层的骤然失稳及破裂;另一种是蠕滑,断层在较长时间内缓慢低速地运动。由于前者伴随着地震的发生,而后者不发生地震^[20]。因此,识别判断断层的滑动方式,特别是活动断层的黏滑,对判断其是否与地震作用有关具有重要意义。

大兴安岭断块隆起区位于内蒙古东北部松辽平原西侧,存在一些中强地震及小地震活动。2003年8月和2004年3月,先后于内蒙古巴林左旗和内蒙古东乌珠穆沁旗发生 $M_s 5.9$ 地震,为该地区有记载以来的最高震级^[21]。杜龙等^[21-22]在调查研究中确定了存在走向为NW向的水泉子沟一天山口断裂带,推测该断裂带为2003年内蒙古巴林左旗 $M_s 5.9$ 地震的发震断裂带。

以内蒙古水泉子沟一天山口断裂带中的杨树林

剖面作为研究对象,利用扫描电子显微镜(SEM)技术,观察和统计分析内蒙古水泉子沟一天山口断裂带断层泥中石英颗粒表面微形貌特征,确定研究区内断裂带的活动年代和运动方式,深入研究断裂带的活动性,为区内地质灾害的分布、发育特征、形成机制及防治措施,地震的预报和预测、活动断裂与地震的关系的研究提供参考。

1 国内外断层泥中石英颗粒微形貌研究进展

20世纪80年代初,日本学者Kanaori et al.^[10]率先提出可将石英微形貌应用于断裂活动性研究。Kanaori et al.^[10-13]对日本Atotsugawa断裂构造断层泥中石英颗粒表面微形貌类型统计分析,总结出断层泥受地下水的侵蚀时间越长,石英颗粒表面溶蚀的微形貌越复杂的规律。通过对比断层泥中石英的热释光年龄(TL),确定了断层泥溶蚀微形貌与断层活动年代的对对应关系,将断层泥中石英颗粒表面的溶蚀微形貌分为I~IV 4类,其中I类的溶蚀程度最浅,代表断层形成的时间最短,IV类的溶蚀程度最深,代表断层的形成时间最长。同期,中国学者杨主恩^[18]和金凤英^[23]等利用石英微形貌对断裂的活动方式进行了研究。俞维贤^[24-25]、申俊峰^[15,19]等又将I类结构细分为3个亚类(Ia、Ib、Ic),并更为细致地划分了其形成年代。

理论上说,石英的实际溶蚀过程会受到多重因素的影响,与所处环境的温度、压力以及溶蚀液的pH值有关^[13]。然而,实验结果^[12-13]证实,在接近地表的断层中,温度和pH值等环境条件对石英颗粒溶蚀过程的影响非常小,当 $pH \leq 9$ 时石英的溶解度为 10^{-6} 量级,温度在 $25^\circ C$ 时石英溶解度约 10×10^{-6} 。时间是影响石英溶蚀过程的关键因素,时间的尺度又非常大,在地表下10 m的地方,1 cm³的石英晶体如果溶解掉90 mg(相当于石英重量的7%),大约需要 2×10^4 a^[16]。所以,根据地质年代与断层泥中石英颗粒溶蚀微形貌的对应关系,编制出断层泥中石英颗粒溶蚀微形貌与地质年代的综合图谱(图1)^[7,15-16,26-28]。

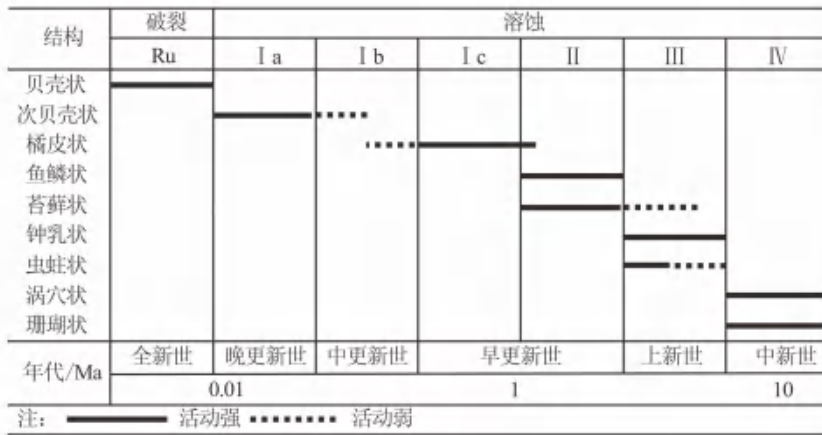


图1 断层泥中石英颗粒形貌结构分类和相对年代

Fig. 1 Classification of morphology and structure of quartz grains in fault gouge and their relative chronology

由图1可以看出, 断层泥中石英颗粒表面的微形貌结构可进行如下排列: 首先是表面光滑度较高的贝壳状和次贝壳状结构; 其次是表面光滑度较低的橘皮状结构; 再次则是相对较为粗糙的鱼鳞状和苔藓状结构; 从次结构更为复杂的钟乳状和虫蛙状结构; 最后为复杂程度最高的涡穴状和珊瑚状结构。这些石英颗粒的微形貌结构依次代表了风化的深度和复杂程度, 实际上体现了风化时间的长短。一般来讲, 石英颗粒表面的溶蚀形貌特征越复杂、溶蚀凹沟越深, 意味着其遭受溶蚀作用的时间越长, 断层的活动年代越久远^[15,19]。

杨主恩等发现^[18], 断层的活动方式会对断层泥中石英颗粒表面的破裂特征产生较为显著的影响。

受高应力作用的影响, 断层以快速的黏滑形式运动时, 往往会在石英颗粒表面形成贝壳状和阶步状等形貌特征; 然而, 若断层以缓慢的蠕滑形式运动, 那么一般会在其表面留下研磨坑和弧形擦痕等形貌特征。依据这些机械作用产生的痕迹能够识别断层活动方式。大量的综合研究表明^[23-25], 具Ru、I a类溶蚀形貌特征的石英颗粒表面叠加的机械作用特征可分为A、B、C 3类。断层泥中石英颗粒的A1、B1和C1类特征源于断层的蠕滑压磨; 而A4、B4和C4类特征则源于断层的快速运动。A2、B2、C2与A3、B3、C3是介于上述两大类典型特征间的过渡类型, 分别是与蠕滑型接近的过渡I型和与黏滑型接近的过渡II型(表1)。

表1 石英颗粒表面机械作用分类
Table 1 Classification of mechanical actions on surface of quartz grains

分类	亚类	典型特征	断层活动方式
A 撞擦特征	A1	弧形擦痕、研磨纹和近等轴状压磨坑	蠕滑
	A2	准直线擦痕、长轴型撞磨坑	过渡I型
	A3	直线形擦痕、楔形撞击坑	过渡II型
	A4	直线型高速错动擦痕或擦槽、高速撞击坑	黏滑
B 破裂特征	B1	曲形裂纹	蠕滑
	B2	平直裂纹	过渡I型
	B3	阶步和小贝壳状断口	过渡II型
	B4	高速冲击破裂特征	黏滑
C 碎砾形态特征	C1	圆状	蠕滑
	C2	次圆状	过渡I型
	C3	次棱角状	过渡II型
	C4	棱角状	黏滑

2 水泉子沟—天山口断裂带地质特征

杜龙等^[21-22]在对2003年内蒙古巴林左旗 $M_s5.9$ 地震的调查研究中,发现了水泉子沟—天山口断裂带。该断裂带由两段组成:一段是NWW向

的水泉子沟—西山湾段,另一段是NW向的杨树林—天山口段(图2)^[21-22]。断层泥电子自旋共振结果表明,本文所研究的杨树林剖面所在的杨树林—天山口段断层泥的形成年龄为 (602 ± 60) ka,推测其为中更新世早期活动断裂^[21-22]。

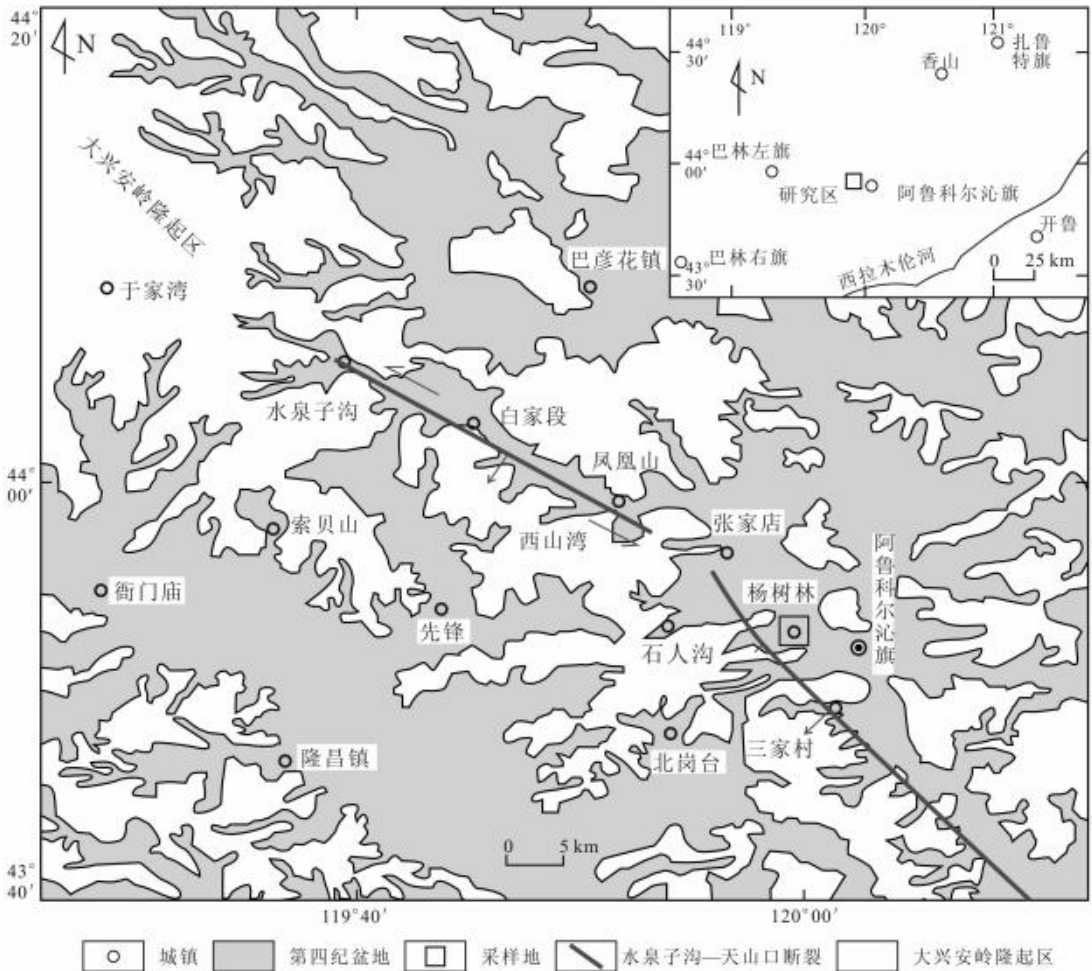


图2 水泉子沟—天山口断裂带杨树林剖面位置简图

Fig. 2 Location map of Yangshulin profile in Shuiquanzigou-Tianshankou fault zone

剖面位于内蒙古赤峰市阿鲁科尔沁旗西北部,坐标: $43^{\circ}53'29''N$, $119^{\circ}59'38''E$, 归属于NW向的杨树林—天山口段,剖面方位 349° 。经野外实地观测,断层带发育于晚侏罗世玛尼吐组(J_3mn)火山岩中,岩性为暗红色英安岩和暗黄绿色安山岩,英安岩呈集块状被安山质熔岩固结。断层带形成了一条宽0.1~0.5 m不等的破碎带,破碎带两侧断层面产状为:上盘面产状 $255^{\circ} \angle 74^{\circ}$,下盘面产状 $189^{\circ} \angle 76^{\circ}$,而且断层面上发现有碳质薄膜。此外断层带两侧还发育有羽状节理(图3),羽状

节理与断层面的交角为 $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$,野外观测判断此断层为逆断层^[29-30]。

3 样品的采集及实验方法

3.1 样品的采集及预处理过程

采集样品前,去除表层已风化的断层泥约10 cm。在垂直断层面方向上等间距布置采样位置,采集5个样品,其尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$,单个样品约重200 g,采样位置如图3所示,由南向北依次命名为样品1.1、1.2、1.3、1.4、1.5。

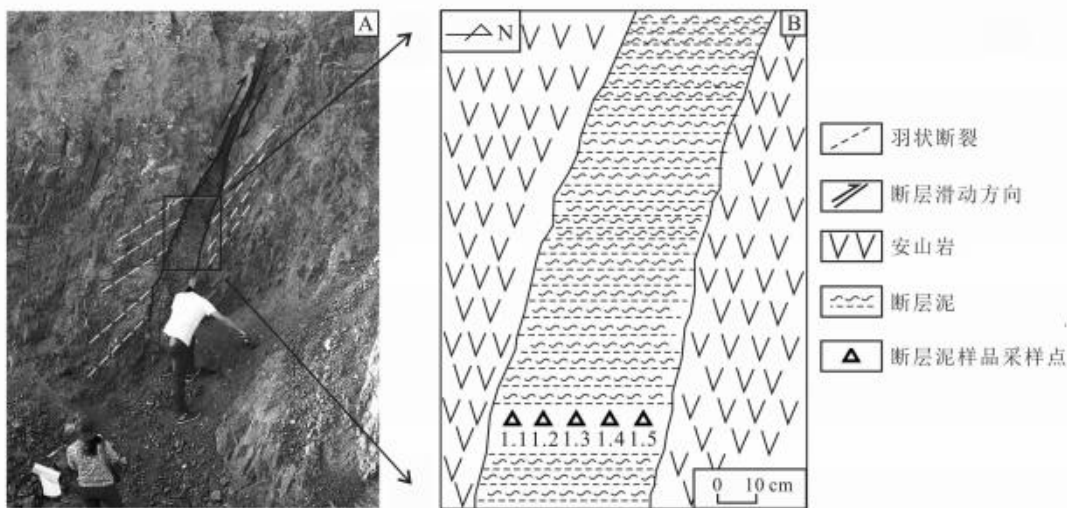


图3 断层剖面照片 (A) 及其采样位置示意图 (B)

Fig. 3 Photo of fault profile (A) and sketch map of its sampling locations (B)

野外采取的样品在开展石英微形貌研究测试工作前进行预处理, 相继完成淘洗、酸洗、挑纯和镜下拍摄4个过程^[7,15-16,26,31], 预处理工作在吉林大学无机合成与制备化学国家重点实验室进行, 详细操作步骤为:

(1) 淘洗除去黏粒级的矿物

将采集的断层泥样品放置于烘箱内, 温度80℃持续烘干8 h, 待冷却后取出5 g样品置入烧杯内; 加入足量的蒸馏水, 充分搅拌后浸泡8 h, 间隔2 h晃动, 确保其矿物颗粒充分吸水, 自然分散、解体且细粒黏土矿物悬浮, 浸泡后晃动静置20 min, 除去悬浮液。对沉淀碎屑颗粒加水重复此操作, 反复淘洗, 直至悬浮液不再浑浊, 最大限度去除细粒级黏土矿物。

(2) 10% 盐酸浸泡去除碳酸盐碎屑

将之前得到的沉淀碎屑颗粒在烘箱中60℃低温烘干8 h, 冷却后置于烧杯, 加入足量10%的盐酸充分搅拌, 待碎屑颗粒与盐酸充分反应没有气泡产生后。静置15 min, 再用蒸馏水淘洗, 之后重复加入10%的盐酸, 充分搅拌后静置8 h, 静置后淘洗、烘干得到去除碳酸盐碎屑的断层泥碎屑颗粒。

(3) 体视镜下挑选石英颗粒

对碎屑颗粒进行筛分分级, 选择粒度在60目(0.25 mm)~200目(0.075 mm)之间的颗粒进行石英样品的挑选。

3.2 石英颗粒表面微形貌观察方法

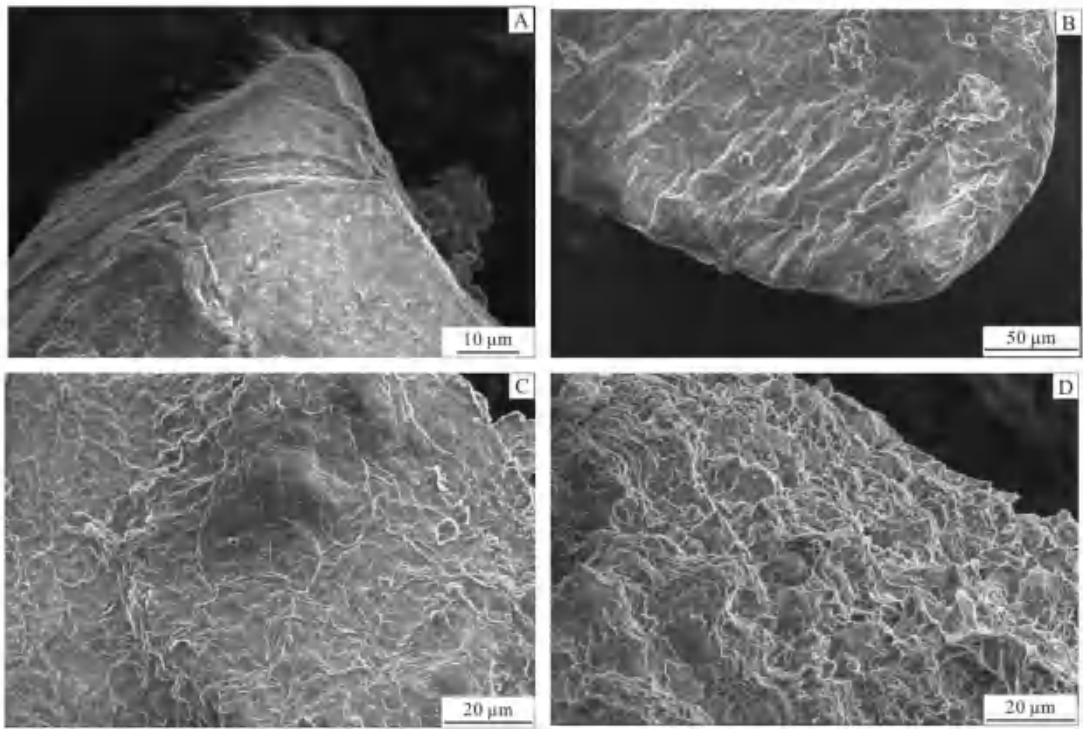
扫描电镜分析在吉林大学化学学院化学综合平台完成, 采用荷兰 Thermo Fisher (FEI) 公司的具有环境真空功能的高分辨率扫描电镜进行测试分析。加速电压200 V~30 kV, 连续可调, 二次电子分辨率1.0~2.3 nm, 最大束流200 nA, 焦距10.9 nm, 样品室压力最高达4 000 Pa。

本次研究以每个样品随机选取的80颗石英作为研究对象。为便于逐个观察, 用导电胶将石英颗粒按顺序排列。将已固定好的样品, 粘贴在样品台上, 将样品送入样品仓内放置于扫描电镜下扫描观察, 采用不同倍数放大, 观察测量石英表面的微形貌, 同时拍摄存储不同倍数下的石英微型貌照片, 以便后期统计和分析。根据所观察到的每个石英碎屑表面形貌结构进行测定统计, 一颗碎屑作一次计数。

4 测试与分析

4.1 石英颗粒表面微形貌

石英颗粒表面微形貌呈贝壳状、次贝壳状、橘皮状和鱼鳞状4类结构(图4)。从石英颗粒表面微形貌特征统计结果(表2)中可以看出, 样品1.1~样品1.4中, 均有贝壳状结构的石英颗粒出现, 呈棱角状外形, 具有棱和脊。依据石英颗粒形貌结构分类和相对年代的对应关系(图1), 贝壳状结构对应Ru类, 指示断层在全新世有过活动。



A. 表面贝壳状微形貌, Ru类; B. 表面次贝壳状微形貌, Ia类; C. 表面橘皮状微形貌, Ib类; D. 表面鱼鳞状微形貌, Ic类。

图4 石英颗粒表面微形貌特征

Fig. 4 Micro-morphological characteristics of quartz grains surface

表2 石英颗粒表面微形貌特征统计

Table 2 Statistics of micro-morphological characteristics of quartz grains surface

表面微形貌结构	贝壳状	次贝壳状	橘皮状	鱼鳞状
对应分类	Ru类	Ia类	Ib类	Ic类
样品 1.1	24.1%	44.4%	18.5%	13%
样品 1.2	13.0%	40.7%	33.3%	13%
样品 1.3	12.0%	16.0%	44.0%	28%
样品 1.4	9.3%	21.9%	43.8%	25%
样品 1.5	0%	19.6%	30.4%	50%

在样品 1.1 和样品 1.2 中, 石英颗粒多呈次贝壳状结构, 棱脊略有蚀损, 对应 Ia 类。在样品 1.3 和样品 1.4 中, 石英颗粒多呈橘皮状结构, 微观形貌表面起伏不平, 对应 Ib 类。在样品 1.5 中, 可以明显看出石英颗粒表面多呈鱼鳞状结构, 对应 Ic 类。因此, 杨树林剖面采集的 5 个样品中, 横向上, 石英颗粒表面风化刻蚀的深度和复杂程度不断加深。

4.2 石英表面机械作用特征

石英颗粒表面出现的典型机械作用特征如图 5 所示。根据石英颗粒表面机械作用分类 (表 1), 将 5 个样品中石英颗粒表面叠加的机械作用特征按照撞擦特征 (A)、破裂特征 (B) 和碎砾形态特征 (C) 分为 3 类^[32], 其中:

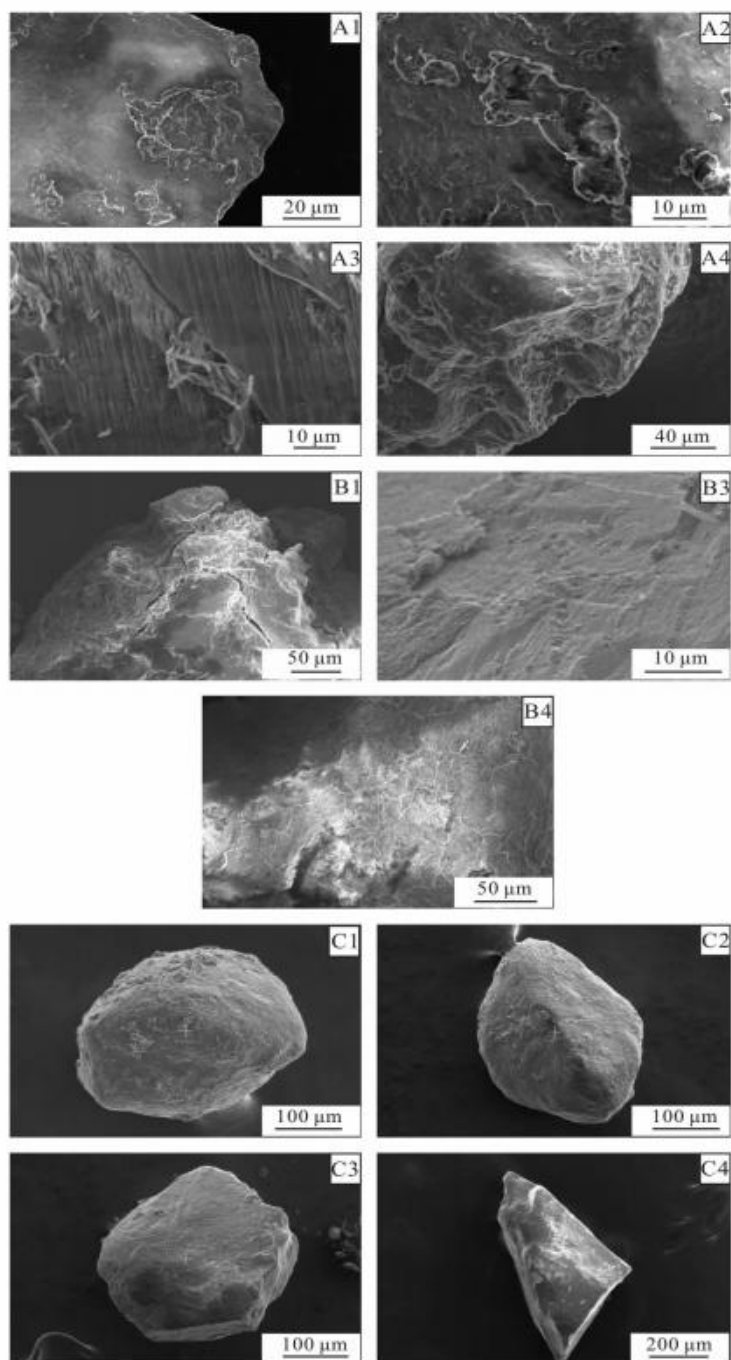
等轴状压磨坑属于 A1 类, 推测是断层在复杂环境中不断挤压和研磨, 由颗粒间的压磨而形成, 常是断层蠕滑压磨下的产物; 长轴形撞磨坑属于 A2 类, 与蠕滑产物相接近; 直线形擦痕属于 A3 类, 意味着较快速的摩擦运动, 与黏滑产物相接近; 高速撞击坑属于 A4 类, 推测是高应力的快速撞击楔入特征, 代表快速的断层运动成因, 是断层发生黏滑运动的产物。

曲形裂纹属于 B1 类, 裂而不断, 曲状延伸, 由缓慢擦裂形成, 在蠕滑状态下最为发育; 阶步属于 B3 类, 由快速张裂而无摩擦运动所致, 指示断层运动与黏滑型接近; 河流花样属于 B4 类, 是典型的高速冲击破裂特征, 是断层突发性地快速黏滑

运动的产物。

圆状形态属于 C1 类, 是断层蠕滑运动的产物; 次圆状形态属于 C2 类, 指示断层运动与蠕滑

型接近; 次棱角状形态属于 C3 类, 指示断层运动与黏滑型接近; 棱角状形态属于 C4 类, 是断层黏滑运动的产物。



A1. 近等轴状压磨坑; A2. 长轴形撞磨坑; A3. 直线形擦痕; A4. 高速撞击坑; B1. 曲形裂纹; B3. 阶步; B4. 河流花样;
C1. 圆状; C2. 次圆状; C3. 次棱角状; C4. 棱角状。

图5 石英颗粒表面机械作用特征

Fig. 5 Characteristics of mechanical action on surface of quartz grains

5 讨论

5.1 断层活动年代讨论

将观察到的断层泥中石英微形貌特征进行统计分析,可以得出,所有结果的分布范围均在 Ru 类~I c 类之间,其中样品 1.1 和样品 1.2 中 I a 类最多,分别占总数的 44.4% 和 40.7%; 样品 1.3 和样品 1.4 中 I b 类最多,分别占总数的 44% 和 43.8%; 样品 1.5 中 I c 类最多,占总数 50%。(图 6)

样品 1.1~样品 1.4 中,均有 Ru 类出现。对照石英颗粒形貌结构分类和相对年代图谱(图 1)可以推断:该断层活动始于早更新世,经历过多次活动,具有良好的延续性,直至全新世仍具有一定的活动性,由此可判断该断层为活动断层,与杜龙所确定的断层为中更新世早期活动断层的结论一致^[24]。

依据石英颗粒形貌结构分类和相对年代图谱(图 1),将观察到的断层泥中石英微形貌特征进行统计分析,由统计结果(图 6)可以分析得出:样品 1.1 中 I a 类形貌特征占比最大,对应年代为晚更新世;样品 1.2 中 I a 类形貌特征占比最大,对应年代为晚更新世;样品 1.3 中 I b 类形貌特征占比最大,对应年代为中更新世;样品 1.4 中 I b 类形貌特征占比最大,对应年代为中更新世;样品 1.5 中 I c 类形貌特征占比最大,对应年代为早更新世。可以明显地看出,横向上(沿着断层面水平方向),断层活动年代有由新到老的趋势。越靠近上盘,活动年代越新;越靠近下盘,活动年代越久。在上盘上升过程中,断层泥不断发育。由此推测,在此逆断层的形成过程中,上盘为主动盘,断层泥的发育方向为由下盘到上盘。

按照逆断层形成的一般力学机制^[33],断层的形成是受水平构造应力 σ_1 和岩层自重应力 σ_w 共同作用的结果,形成两组剖面共轭剪切,导致岩层破裂。通常情况下,两组剪切破裂中的一组由于构造应力的持续作用而发育为逆断层(图 7)。根据逆断层形成过程中的动力学条件判断,主动力 σ_1 和 σ_w 位于断层上盘,随着上盘的上升形成逆断层,可见上盘为主动盘,下盘为被动盘,断层上下两盘的位移是上盘运动的结果。文中所得出的结论与逆断层形成的动力学和运动学分析相吻合。

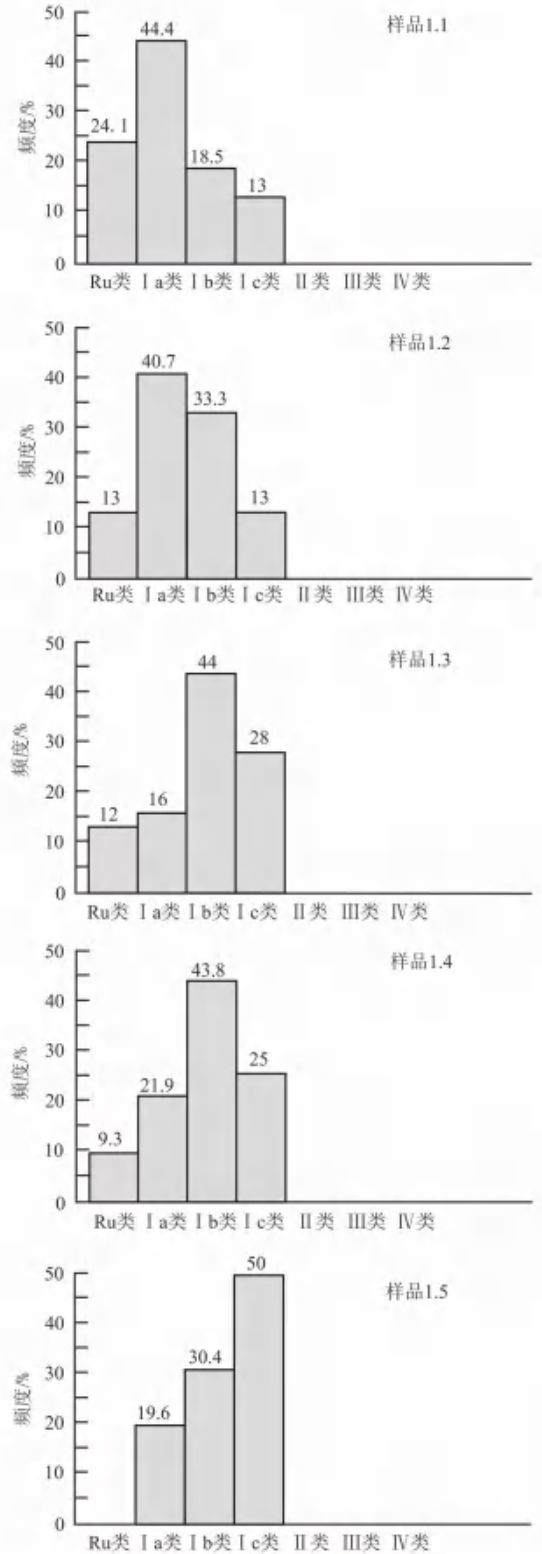


图 6 石英颗粒表面微形貌特征统计结果

Fig. 6 Statistical results of micro-morphological characteristics of quartz grains surface

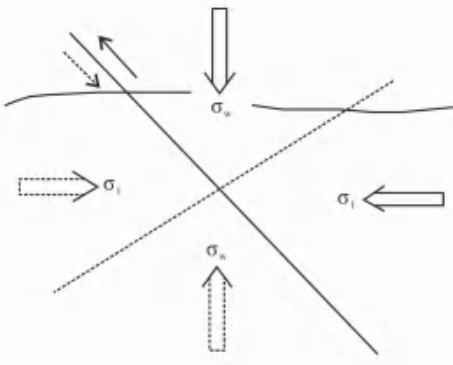


图7 逆断层形成过程中力学分析示意图

Fig.7 Schematic illustration of mechanical analysis during formation on reverse fault

5.2 断层活动方式讨论

断层滑动方式的判断较复杂, 仅凭石英单一特征不足以确定。研究表明^[24-25]: 若只是按照 A 类、B 类或 C 类单一特征的发育丰度进行分析和评估, 即便是对同一试样, 也难以获得统一的判定结果。若要准确地确定断层滑动的方式, 既要考虑到测试样品的各类特征的丰度状况, 也需要对撞擦特征、破裂特征和碎砾形态多种因素在判定活动方式中所占的比重进行综合分析, 应用模糊综合评判的方法进行分析, 更易得出符合客观实际的准确结论。

设 U 为机械作用因素集: $U = \{A, B, C\}$

V 为滑动方式评判集: $V = \{V1, V2, V3, V4\}$

其中, A 、 B 、 C 分别表示撞擦特征、破裂特征和碎砾形态 3 类机械作用特征; $V1$ 、 $V2$ 、 $V3$ 、 $V4$ 分别表示蠕滑型、过渡 I 型、过渡 II 型和黏滑型 4 类不同的滑动方式。

对于采集到的断层泥样品, 通过清晰直观的扫描电镜照片对其呈现出来的各种特征进行准确全面地统计, 其各类特征所占统计颗粒的百分数可构成 U 与 V 的模糊矩阵关系。

以样品 1.1 为例, 就因素 A 而言, 通过扫描电镜照片对其呈现出来的各种特征进行准确全面地统计。其中, 具有 $A1$ 类特征且滑动方式为 $V1$ 的颗粒占总数的 5%; 具有 $A2$ 类特征且滑动方式为 $V2$ 的颗粒占总数的 22%; 具有 $A3$ 类特征且滑动方式为 $V3$ 的颗粒占总数的 14%; 具有 $A4$ 类特征且滑动方式为 $V4$ 的颗粒占总数的 59%。即得出该断层滑动方式评价向量为:

$$(0.05, 0.22, 0.14, 0.59)$$

按照上述方法统计计算可知, 对于因素 B , 其滑动方式评价向量为:

$$(0.08, 0, 0.35, 0.57)$$

对于因素 C , 其滑动方式评价向量为:

$$(0, 0.08, 0.46, 0.46)$$

对于样品 1.1, 设 $R_{1.1}$ 为 U 和 V 的模糊矩阵关系, 即模糊评价矩阵。基于模糊数学综合评判理论, 可由以上 3 个评价向量组成科学合理的滑动方式评价矩阵 (式 1):

$$R_{1.1} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.22 & 0.14 & 0.59 \\ 0.08 & 0 & 0.35 & 0.57 \\ 0 & 0.08 & 0.46 & 0.46 \end{bmatrix} \quad (1)$$

同理, 样品 1.2、样品 1.3、样品 1.4、样品 1.5 的滑动方式评价矩阵依次如下 (式 2 ~ 式 5):

$$R_{1.2} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.10 & 0.24 & 0.61 \\ 0.11 & 0 & 0.34 & 0.55 \\ 0 & 0.03 & 0.31 & 0.66 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{1.3} = \begin{bmatrix} 0.07 & 0.21 & 0.08 & 0.64 \\ 0.28 & 0 & 0.43 & 0.29 \\ 0 & 0.14 & 0.29 & 0.57 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_{1.4} = \begin{bmatrix} 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.70 \\ 0.10 & 0 & 0.25 & 0.65 \\ 0 & 0.10 & 0.45 & 0.45 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R_{1.5} = \begin{bmatrix} 0 & 0.33 & 0.22 & 0.45 \\ 0.11 & 0 & 0.22 & 0.67 \\ 0.11 & 0.33 & 0.22 & 0.34 \end{bmatrix} \quad (5)$$

大量实验证实^[25-28,32], 对于撞擦特征、破裂特征和碎砾形态特征 3 个因素, 在对断层运动形式进行分析和确定时, 前两个特征尤为关键, 尤其是撞擦特征, 能够比较直观、准确地表明机械运动变化。参考前人^[24-25]在特征因素权数分配中的成果, 将本实验中撞擦特征、破裂特征和碎砾形态特征 3 个因素的权重分配系数定为:

$$Q = (0.40, 0.35, 0.25)$$

据此,对于样品 1.1,断层滑动方式的模糊综合评价为:

$$B_{1.1} = Q \cdot R_{1.1} = (0.40 \quad 0.35 \quad 0.25) \cdot \begin{bmatrix} 0.05 & 0.22 & 0.14 & 0.59 \\ 0.08 & 0 & 0.35 & 0.57 \\ 0 & 0.08 & 0.46 & 0.46 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据最大、最小运算法则并做归一化处理:

$$B_{1.1} = (0.08 \quad 0.21 \quad 0.33 \quad 0.38)$$

公式(6)的归一化处理结果表明,模糊综合评价函数与前述函数 $V = \{V1, V2, V3, V4\}$ 存在对应关系,对于样品 1.1,按权重分配 Q 考虑,支持 $V1$ 判断的比重为 8%,支持 $V2$ 判断的比重为 21%,支持 $V3$ 判断的比重为 33%,支持 $V4$ 判断的比重为 38%。取最大值,即 $V4$ 判断所占的比重最大,综合判断样品 1.1 的结果为黏滑型。

同理,样品 1.2、样品 1.3、样品 1.4、样品 1.5 的模糊综合评价的最终结果依次如下:

$$B_{1.2} = (0.12 \quad 0.11 \quad 0.36 \quad 0.42)$$

$$B_{1.3} = (0.23 \quad 0.17 \quad 0.28 \quad 0.32)$$

$$B_{1.4} = (0.12 \quad 0.12 \quad 0.29 \quad 0.47)$$

$$B_{1.5} = (0.10 \quad 0.31 \quad 0.21 \quad 0.38)$$

上述结果表明,样品 1.1、1.2、1.3、1.4、1.5,按权重分配 Q 考虑撞磨特征、破裂特征和碎砾形态 3 种因素,支持 $V4$ 判断的比重均大于 $V1$ 、 $V2$ 、 $V3$,可以得出,全新世及晚更新世以来,断层的主要活动方式为黏滑,蠕滑表现较弱。

6 结论

(1) 水泉子沟一天山口断裂带杨树林剖面断层活动始于早更新世,经历过多期次活动,直至全新世仍具有一定的活动性,且具有良好的延续性。

(2) 水泉子沟一天山口断裂带杨树林剖面断层为逆断层,依据横向上断层泥活动年代的变化趋势,推测断层泥是在上盘上升的过程中不断发育,上盘为主动盘,断层泥的发育方向为由下盘到上盘,与逆断层形成的一般力学性质相一致。

(3) 根据断层泥中石英颗粒表面机械作用特征的统计分析结果,判断水泉子沟一天山口断裂带杨树林剖面断层的活动方式以黏滑为主,蠕滑表现较弱,是与地震活动有关的活动断裂。

致谢 感谢吉林大学无机合成与制备国家重点实验室和吉林大学化学学院化学综合平台在本次 SEM 测试工作中给予的支持!

参考文献:

- [1] Ben-Zion Y, Sammis C G. Characterization of fault zones [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2003, 160 (1): 677-715.
- [2] Kim Y S, Peacock D C P, Sanderson D J. Fault damage zones [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26 (1): 503-517.
- [3] Bos B, Peach C J, Spiers C J. Frictional-viscous flow of simulated fault gouge caused by the combined effects of phyllosilicates and pressure solution [J]. *Tectonophysics*, 2000, 327 (1): 173-194.
- [4] Bos B, Spiers C J. Effect of phyllosilicates on fluid-assisted healing of gouge-bearing faults [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 184 (1): 199-210.
- [5] Vrolijk P, Van Der Pluijm B A. Clay gouge [J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21 (1): 1039-1048.
- [6] Moore D E, Summer R, Byerlee J D. Sliding behavior and deformation textures of heated illite gouge [J]. *Journal of Structural Geology*, 1989, 11 (1): 329-342.
- [7] 何超枫,张春光,王秋良,等. 仙女山—九畹溪断裂带断层泥石英微形貌特征及其年代学意义 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2017, 37 (4): 355-360.
HE Chao-feng, ZHANG Chun-guang, WANG Qiu-liang, et al. Micro-morphology characteristics and dating implications of the gouge quartz of Xiannüshan-Jiuwanxi fault [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37 (4): 355-360.
- [8] 王雷,晁洪太,王志才,等. 活动断裂带断层泥的纳微米构造研究方法 [J]. *震灾防御技术*, 2018, 13 (3): 600-608.
WANG Lei, CHAO Hong-tai, WANG Zhi-cai, et al. Study on nanometer structure of fault gouge in active fault zone [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2018, 13 (3): 600-608.
- [9] 卢威. 断层泥及其工程力学性质初探 [J]. *中山大学研究生学刊*, 2016, 37 (1): 16-22.

- LU Wei. Fault gouge and engineering mechanics properties research [J]. Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University, 2016, 37 (1): 16-22.
- [10] Kanaori Y, Miyakoshi K, Kakuta T. Dating fault activity by surface textures of quartz grains from fault gouges [J]. Engineering Geology, 1980, 16 (3): 243-262.
- [11] Kanaori Y, Miyakoshi K, Kakuta T. Dating fault activity by surface textures of quartz grains from fault gouges [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, 1981, 18 (5): 91.
- [12] Kanaori Y. Surface textures of intrafault quartz grains as an indicator of fault movement [J]. Catena, 1985, 12 (4): 271-279.
- [13] Kanaori Y. A SEM cathodoluminescence study of quartz in mildly deformed granite from the region of the Atotsugawa fault, central Japan [J]. Tectonophysics, 1986, 131 (1): 133-146.
- [14] 陈剑尚, 林署炯. 断层泥的地质特征及其工程地质意义 [J]. 中山大学研究生学刊, 2015, 36 (1): 16-22.
CHEN Jian-shang, LIN Shu-jiang. The geologic features and engineering geological significance of fault gouge [J]. Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University, 2015, 36 (1): 16-22.
- [15] 申俊峰, 杨为民, 刘廷, 等. 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 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33 (3): 271-278.
SHEN Jun-feng, YANG Wei-min, LIU Ting, et al. Micro-morphology of quartz in the Bailong River fault gouge, West Qinling, China, and its chronological significance [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33 (3): 271-278.
- [16] 刘廷. 西秦岭临潭—宕昌断裂带断层泥及年代学: 硕士学位论文 [D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
LIU Ting. The research of fault gouge and its geochronology from Lintan-Dangchang fault zone in western Qinling; master's degree thesis [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [17] 马向贤. 断层泥特征及其工程地质意义: 硕士学位论文 [D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
MA Xiang-xian. Characteristics of fault gouge and its engineering geological significance; master's degree thesis [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [18] 杨主恩, 胡碧茹, 洪汉净. 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, 1984, 29 (8): 484-486.
- YANG Zhu-en, HU Bi-ru, HONG Han-jing. The microscopic features and significance of quartz fragment in fault gouge in active fault [J]. Chinese Science Bulletin, 1984, 29 (8): 484-486.
- [19] 申俊峰, 申旭辉, 曹忠全, 等. 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, 2007, 27 (1): 90-96.
SHEN Jun-feng, SHEN Xu-hui, CAO Zhong-quan, et al. The characteristics and significances of quartz micro-appearance in the fault gouges on evaluation of the fault activity [J]. Mineralogy and Petrology, 2007, 27 (1): 90-96.
- [20] 罗登贵, 刘江平, 金聪, 等. 活断层的地震响应特征与瞬时地震属性 [J]. 地球科学, 2017, 42 (3): 462-470.
LUO Deng-gui, LIU Jiang-ping, JIN Cong, et al. Instantaneous seismic attributes and response characteristics of active faults [J]. Earth Science, 2017, 42 (3): 462-470.
- [21] 杜龙. 2003年巴林左旗5.9级地震发源构造及大兴安岭隆起区潜在震源区划分研究: 硕士学位论文 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2008.
DU Long. The seismogenic structure of $M_s5.9$ Balinzuqi earthquake and the preliminary study on the delineation of potential seismic sources in the Daxing'anling uplift; master's degree thesis [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2008.
- [22] 杜龙, 周本刚, 王明明. 2003年内蒙古巴林左旗 $M_s5.9$ 地震发震构造 [J]. 中国地震, 2009, 25 (2): 123-131.
DU Long, ZHOU Ben-gang, WANG Ming-ming. Seismogenic structure of 2003 Balinzuqi $M_s5.9$ earthquake in Inner Mongolia, China [J]. Earthquake Research in China, 2009, 25 (2): 123-131.
- [23] 金凤英, 闫润娥. 从断层泥石英颗粒的微观形貌研究八宝山断裂带的活动性 [J]. 地震地质, 1985, 7 (2): 45-52.
JIN Feng-ying, YAN Run-e. Study of activities of the Babaoshan fault zone in terms of the microscopic surface features of quartz grains in gouge [J]. Seismology and Geology, 1985, 7 (2): 45-52.
- [24] 俞维贤, 何蔚, 向才英, 等. 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, 1998, 21 (2): 172-178.
YU Wei-xian, HE Wei, XIANG Cai-ying, et al. Surface SEM feature of quartz gravel in fault gouge in Jian-

- shui region and its fault activity [J]. *Journal of Seismological Research*, 1998, 21 (2): 172-178.
- [25] 俞维贤, 王彬, 毛燕, 等. 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*, 2004, 20 (4): 347-352.
YU Wei-xian, WANG Bin, MAO Yan, et al. The SEM characteristics of the surface of quartz grains in the gouge of Chenghai fault and evaluation of its activity [J]. *Earthquake Research in China*, 2004, 20 (4): 347-352.
- [26] 李建, 张岳桥, 吴泰然, 等. 青川断裂带中段断层泥中石英颗粒表面微形貌特征及其年代学意义 [J]. *地球学报*, 2016, 37 (2): 153-162.
LI Jian, ZHANG Yue-qiao, WU Tai-ran, et al. Micro-morphology of quartz in fault gouge from the middle segment of the Qingchuan fault zone and its chronological implications [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37 (2): 153-162.
- [27] 王超. 断层泥特征对断层活动性质的启示: 以浙江江山五家垄断层为例: 硕士学位论文 [D]. 南昌: 东华理工大学, 2018.
WANG Chao. Characteristics of fault gouge in Wujialong fault of Jiangshan, Zhejiang Province: implications for fault activity: master's degree thesis [D]. Nanchang: East China University of Science and Technology, 2018.
- [28] 黄晓. 白龙江流域主要断裂带断层泥研究及其工程意义: 硕士学位论文 [D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
HUANG Xiao. The research of fault gouge from main active fault zone and its engineering significance in Bailongjiang Basin: master's degree thesis [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [29] 李耀宗. 内蒙古水泉子沟—天山口断裂带断层泥特征及对断层活动热效应的指示: 硕士学位论文 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LI Yao-zong. Characteristics of fault gouge in Shuiquanzigou-Tianshankou fault of Inner Mongolia and its indication on thermal effect of fault activity: master's degree thesis [D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [30] 李耀宗, 李本仙, 孟杰, 等. 内蒙古杨树林剖面断层泥特征及其对断层活动的指示意义 [J]. *世界地质*, 2020, 39 (2): 353-367.
LI Yao-zong, LI Ben-xian, MENG Jie, et al. Characteristics of fault gouge and its indication of fault activity in Yangshulin profile, Inner Mongolia [J]. *Global Geology*, 2020, 39 (2): 353-367.
- [31] 刘海明, 申俊峰, 曹忠权, 等. 西藏日喀则拉堆—乃东断裂带断层泥石英微形貌特征及其年代学意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34 (1): 149-154.
LIU Hai-ming, SHEN Jun-feng, CAO Zhong-quan, et al. Surface texture characteristics and dating implication of the gouge quartz in the Ladui-Naidong faults, Xigaze, Tibet [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34 (1): 149-154.
- [32] 张汝藩, 杨主恩. 扫描电镜与微观电子研究 [M]. 北京: 学苑出版社, 1999: 57-63.
ZHANG Ru-fan, YANG Zhu-en. *Microgeology research in scanning electron microscopy* [M]. Beijing: Xueyuan Press, 1999: 57-63.
- [33] 王恩营, 邵强, 杜云宽, 等. 逆断层两盘构造煤成因机理与分布 [J]. *矿业安全与环保*, 2010, 37 (1): 4-7.
WANG En-ying, SHAO Qiang, DU Yun-kuan, et al. Genesis mechanism and distribution of structural coal on two sides of reverse fault [J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2010, 37 (1): 4-7.