

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.04.008

## 广东罗湖断裂中南段构造活动性分析

付素蓉<sup>1</sup>, 唐宇<sup>2,3\*</sup>, 高伟<sup>1</sup>, 王亚辉<sup>1</sup>, 聂云华<sup>1</sup>

FU Su-Rong<sup>1</sup>, TANG Yu<sup>2,3\*</sup>, GAO Wei<sup>1</sup>, WANG Ya-Hui<sup>1</sup>, NIE Yun-Hua<sup>1</sup>

1. 深圳市建设综合勘察设计院有限公司, 广东深圳 518029; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州贵阳 550081;

3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

1. Shenzhen Integrated Geotechnical Investigation & Surveying Corporation Limited, Shenzhen 518029, Guangdong, China;

2. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, Guizhou, China;

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

**摘要:** 断裂的构造活动性对区域地壳稳定性、地震与变形监测、重大工程的设计和施工等具有重大的影响。本文对罗湖断裂中南段进行地层组成与分布特征、构造变形特征等方面进行研究, 结合放射性<sup>14</sup>C法和伊利石<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar法等年代学测试手段, 发现自中更新世晚期以来, 区内断裂带再无明显活动。罗湖断裂先后经历了早白垩世初期的韧性变形和晚白垩世末期的脆性变形, 晚白垩世末期的脆性变形活动可能一直持续到古新世早期; 始新世中期, 罗湖断裂中南段可能又发生了一期构造活动。

**关键词:** 罗湖断裂; 构造活动; 构造变形; <sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar法

中图分类号: P642.27

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)-04-0693-10

**Fu S R, Tang Y, Gao W, Wang Y H and Nie Y H. 2024. Analysis of Tectonic Activity in the Central-southern Segments of the Luohu Faults, Guangdong Province. *South China Geology*, 40(4): 693-702.**

**Abstract:** The tectonic activity of the fault zone has a significant impact on regional crustal stability, earthquake and deformation monitoring, as well as the design and construction of major projects. We focus on studying of the stratigraphic composition, distribution characteristics, and structural deformation characteristics of the central-southern sections of the Luohu Faults, and adopt chronological testing methods such as the radioactive <sup>14</sup>C of the strata and the illite <sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar of the fault gouge, then find that there has been no obviously activity of the Luohu faults since the late Middle Pleistocene. Besides, the Luohu Faults had experienced ductile deformation in the Early Cretaceous and brittle deformation in the Late Cretaceous. The brittle deformation activity in the Late Cretaceous may have continued until the early Paleocene. In the middle Eocene, another phase of tectonic activity may have occurred in the central-southern sections of the Luohu Faults.

**Key words:** Luohu faults; tectonic activity; structural deformation; <sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar method

收稿日期: 2024-07-23; 修回日期: 2024-08-12

第一作者: 付素蓉(1974—), 女, 高级工程师, 水文地质与工程地质专业, E-mail: 568165282@qq.com

通讯作者: 唐宇(1990—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 构造地质学专业, Email: 382030483@qq.com

罗湖断裂又名横岗—罗湖断裂,主要近 NE-SW 向展布,在区域上系构成深圳断裂带的主要断裂之一,属于 NE 向深圳—五华断裂带的南西段(广东省地质矿产局,1998;图 1a),而深圳—五华断裂带则又是 NE 向莲花山断裂带的一部分。罗湖断裂中南段自深圳水库大坝沿沙湾河谷进入罗湖区内,经黄贝岭、文锦渡和渔民村一带,总体呈舒缓波状“S”形延伸,主要由 F<sub>3</sub>、F<sub>4</sub>、F<sub>5</sub>、F<sub>6</sub>、F<sub>7</sub>、F<sub>8</sub>、F<sub>9</sub> 和 F<sub>10</sub> 等 8 条断层组成(康镇江,2009;图 1b)。

罗湖断裂中南段的构造稳定性和活动性特征对罗湖区城市、工程建设的安全稳定和区域地壳稳定性评估具有重要的作用,对此前人做了大量的研究,但是仍然存在一些争议。一是该断裂最新活动时间跨度范围大(140 ka ~ 930 ka),从早更新世晚期到晚更新世晚期(陈挺光,1989;王战鹏等,2005;贾建业等,2006;孙杰等,2007;余成华,2010;徐俊等,2013;雷东宁等,2018);二是缺乏覆盖在断裂带之上未变形地层的最新时代的直接证据,导致该断裂的活动时代的上限一直悬而未定;三是基于断层泥的伊利石<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar 定年技术在断

层活动时代的约束方面具有更高的精度和更好的应用成效(Zwingmann et al., 2004, 2010; Solum et al., 2005; 郑勇等, 2019; 徐先兵等, 2022; 童旭等, 2024),可却一直未被应用在罗湖断裂上,导致断裂带的构造变形活动过程缺少准确的时代限定。因此,本文依托深圳春风隧道工程项目勘察阶段揭露的地下钻孔进行地层组成和分布特征、构造变形特征、<sup>14</sup>C 地层年代测定和断层泥的伊利石<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar 测年等方面的研究,旨在刻画浅地表之下罗湖断裂的剖面结构特征,约束断裂中南段最新活动时限,探讨断裂的构造变形过程,为区域断裂构造演化提供参考。

### 1 地层组成与分布特征

依据春风隧道勘察钻孔揭露的特征显示,研究区岩石地层主要由下石炭统测水组(C<sub>1c</sub>)、下-中侏罗统塘厦组(J<sub>1-2t</sub>)、早白垩世斑状二长花岗岩( $\eta\gamma^5K_1$ )、第四系冲洪积层和海陆交互沉积的砂质粘土层等组成(唐宇,2017;图 1b)。

测水组主要分布在华侨新村—罗湖村委会—

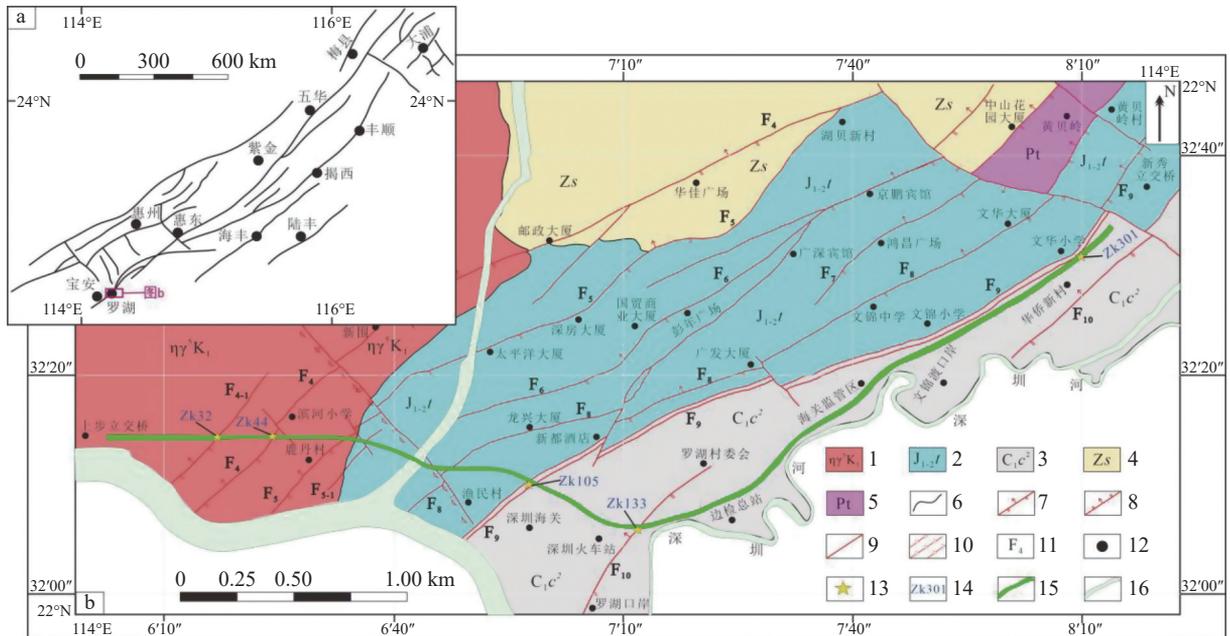


图 1 罗湖断裂区域地质图

Fig. 1 Regional Geological map of the Luohu fault

a-莲花山断裂带分布图(包含深圳—五华断裂带); b-罗湖断裂中南段基岩地质图 [修改自康镇江(2009)和深圳市地质局(2013)]

1-早白垩世斑状二长花岗岩; 2-早中侏罗统塘厦组; 3-早石炭统测水组二段; 4-震旦纪石岭岩组; 5-元古界混合花岗岩; 6-地层界线; 7-逆断层; 8-正断层; 9-性质不明断层; 10-角砾、碎裂岩; 11-断层编号; 12-地点位置; 13-采样位置; 14-样品编号; 15-隧道路线; 16-河流河道

深圳罗湖火车站—渔民村一带(图 1b), 岩性为土黄色、青灰色变质砂岩和灰色、深灰色绢云砂质(钙质)板岩(图 2a), 钻孔揭露地层深度超过 70 m, 未见底(唐宇, 2017)。塘厦组为一套灰色、黄褐色凝灰质长英质砂岩(图 2b), 主要分布在渔民村—彭年广场—黄贝岭村一带, 岩石存在一定程度的变质, 主要岩性为变质含砾砂质粉砂岩、岩屑石英砂岩、含铁质(碎裂状)细粒岩屑砂岩、变质粗中粒石英砂岩、变质复成分砾岩等, 夹少量紫红色砂质泥岩(唐宇, 2017), 塘厦组与测水组呈断层接触(图 1b)。早白垩世斑状二长花岗岩(图 2c)主要分布在研究区西侧的上步立交桥—鹿丹村—新围一带, 其与塘厦组呈侵入接触关系(图 1b), 岩石中发育较多的节理和裂隙, 特别是靠近断层附近的岩石破碎强烈, 多呈碎裂岩或构造角砾。

第四系从老至新主要有更新统冲洪积层、更新统湖沼沉积层、全新统冲洪积层、海陆交互沉积层。其中, 更新统冲洪积层主要以褐黄、灰黄、

灰白色的沙、沙砾、卵石为主, 部分层位发育薄层的黑色泥炭, 沙砾和卵石主要成分为石英, 含少量黏土(图 2d、2e), 分选性较差, 磨圆度较好, 主要分布在上步立交桥—鹿丹村一带的燕山期花岗岩之上和中东侧海关监管区—新秀立交桥一带石炭系测水组之上, 砾石层下伏为全—强风化的基岩, 两者呈覆盖接触或不整合接触。更新统湖沼沉积层则以淤泥质黏土为主, 灰黑、黑色, 含有机质(图 2f)。按照《1:50000 深圳市地质图及说明书》(深圳市地质局, 2013)中第四系划分方案, 含细砾砂和砾石的上更新统冲洪积层可能为晚更新世中期的石排组。

## 2 罗湖断裂构造特征

### 2.1 组成和分布特征

#### (1) F<sub>0</sub> 断层

前人研究资料认为 F<sub>0</sub> 断层为研究区北东向



图 2 研究区地层岩心照片

Fig. 2 The photos showing stratigraphy features of the study area

a. 测水组绢云砂质板岩; b. 塘厦组长英质砂岩; c. 早白垩世斑状二长花岗岩; d、e. 同一钻孔含砂砾石层的分布情况, 底部为强风化花岗岩; f. 全风化基岩(砂岩)之上覆盖的黑色泥炭

断裂系的主断层,由深圳水库向南东,经过沿河北路,沿河南路,新都酒店,然后进入深圳河。钻孔揭露,  $F_9$  断层走向为 NE, 倾向 NW $325^\circ \sim 330^\circ$ , 倾角为  $25^\circ \sim 35^\circ$ , 断裂带垂直厚度 18 ~ 26 m (唐宇, 2017)。断层构造岩主要可分为上下两段, 上段为碎裂岩和构造角砾, 碎裂岩主要成分为砂岩、凝灰质砂岩和基性岩等; 下段主要为灰绿色断层泥, 含有少量的构造角砾, 断层泥垂直厚度在 3.3 ~ 10.5 m 之间, 断层面可能是呈舒缓波状, 断层错动迹象表明其性质为逆断层。该断层为一分界断层, 上盘为塘厦组、下盘为测水组(图 1b)。此外,  $F_9$  断层的联孔剖面(图 3a)显示, 主断层与次级断层均被砾石层覆盖, 且断层并未切穿改造砾石层。

### (2) $F_8$ 断层

钻孔揭露,  $F_8$  断层性质为逆断层, 走向 NE, 倾向为  $325^\circ \sim 330^\circ$ , 倾角为  $65^\circ \sim 70^\circ$ 。断层破碎带垂直厚度大约 36 m 左右, 绿泥石化、高岭土化蚀变作用明显, 主要以断层泥为主, 可分为上下两段, 上段为浅灰绿色角砾和断层泥组成; 下段主要为断层泥, 夹少量的角砾和碎裂岩(唐宇, 2017)。除此之外,  $F_8$  断层的联孔剖面(图 3b)显示, 断层切过了塘厦组弱风化—强风化长英质砂岩, 最后

被砾石层覆盖。

### (3) $F_6$ 断层

前人研究表明  $F_6$  断层始于东深供水局, 经凤凰山南坡、京鹏宾馆、国贸商业大厦, 至渔民村穿入深圳河。钻孔揭露, 断层走向为  $53^\circ$ , 倾角为  $50^\circ \sim 60^\circ$ , 主要切过侏罗纪浅变质岩屑砂岩, 破碎带内呈现明显的强弱分带现象, 中间为断层构造角砾和浅灰绿色断层泥, 两侧为断层碎裂岩组成, 碎裂岩中还充填了方解石和石英脉(唐宇, 2017)。根据发育在钻孔底部的复成分角砾岩中石英细脉被后期脆性破裂剪切错动现象, 判定断层性质为逆断层。此外, 在断层下盘的岩石中见到两期裂隙, 较缓的一期切割早期, 显示为正断层, 因此可能存在两期断裂活动。

### (4) $F_5$ 断层

该断层主要沿东园路湖贝新村—太平洋大厦—鹿丹村呈 NE $60^\circ$  展布, 倾向北西, 倾角为  $55^\circ \sim 60^\circ$ 。断层构造岩主要为浅灰绿色、绿泥石化的花岗质碎裂岩与少量的断层泥, 未见明显的构造角砾(唐宇, 2017)。破碎带两侧岩石中发育较多的网状方解石和石英脉, 切割的脉体显示断层性质为压性的逆断层。

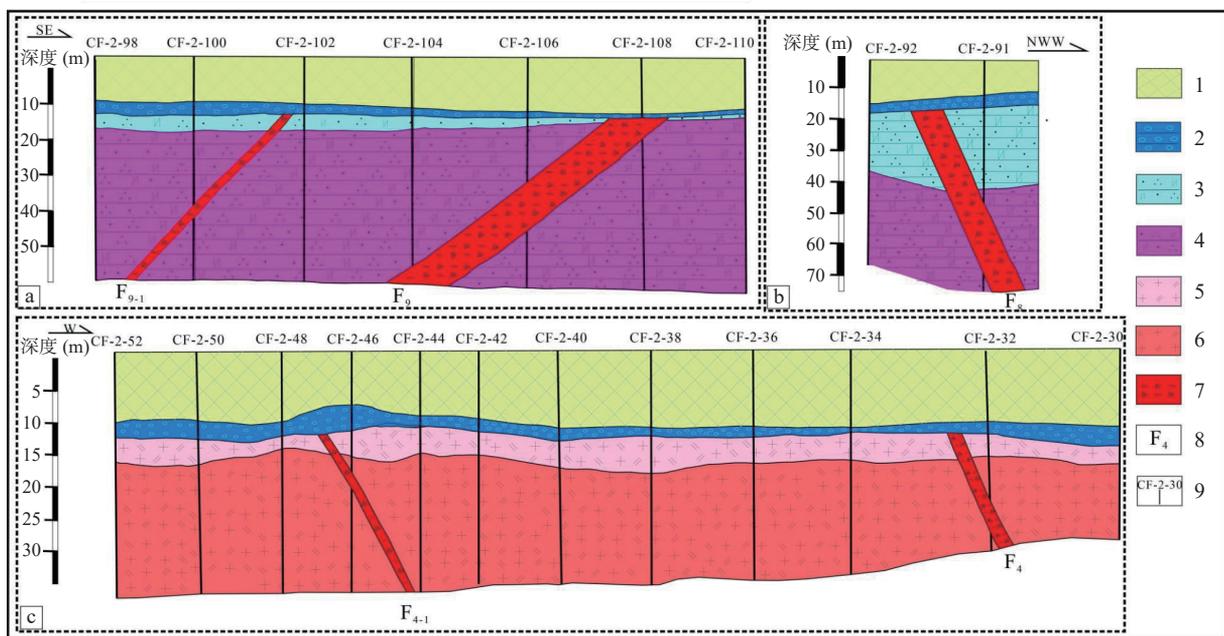


图 3 罗湖断裂中主要断层的联孔剖面图

Fig. 3 The cross-section of the main fault in the Luohu faults

a.  $F_9$  断层及其次级断层  $F_{9-1}$ ; b.  $F_8$  断层; c.  $F_4$  断层及其次级断层  $F_{4-1}$ ; 1-第四系砂、淤泥和粘土; 2-含砂砾石层; 3-强风化长英质砂岩; 4-碎裂岩化长英质砂岩; 5-强风化二长花岗岩; 6-中风化二长花岗岩; 7-断层破碎带; 8-断层编号; 9-钻孔编号

### (5)F<sub>4</sub> 断层

断层走向约为北东 35°, 倾角为 60°~65°, 钻孔内垂直厚度 6.6~6.8 m, 断裂切过白垩纪花岗岩, 岩石普遍破碎, 绿泥石化蚀变较强。断裂构造岩主要有碎裂岩、硅化角砾以及少量的断层泥, 根据断层内发育的擦痕推测为右行逆冲断层(唐宇, 2017)。F<sub>4</sub> 断层的联孔剖面(图 3c)显示, 主断层与次级断层均被砾石层覆盖, 且砾石层并未被断层改造发生变形。

### 2.2 构造变形特征

本文对钻孔揭露的断层构造岩进行构造变形研究发现, 罗湖断裂至少存在两期大的构造变形, 早期为韧性变形, 晚期为脆性变形。而脆性变形又可以细分为两期构造活动。因此, 本文认为罗湖断裂中南段至少经历了两期构造变形和三期断裂构造活动。

韧性变形期(D<sub>1</sub>) 在钻孔岩石中表现为韧性断层, 形成了大量的糜棱岩、糜棱岩化灰岩, 发育剪切旋转碎斑(图 4a)、石香肠、条带状构造(图 4b)以及小褶皱等变形构造, 伴随大量的流体参与, 碎斑和剪切条带的运动学指示为右行剪切(图 4c), 脉体普遍发育碳酸盐化和硅化两种蚀变作用。

根据构造岩的性质、切割关系以及断裂构造派生出的节理、小断层等特征划分了两期脆性变形。早期脆性变形(D<sub>2</sub>) 形成了大量棱角状的构造角砾岩和碎裂岩(图 4d、4e), 表现为伸展应力背景下的正断层特征, 明显切割了 D<sub>1</sub> 期变形形成的剪切褶皱, 同时在碎裂岩中还可见到 D<sub>1</sub> 期形成的石英脉和变质砂岩被卷入到 D<sub>2</sub> 期变形中形成构造角砾(图 4f)。晚期脆性变形(D<sub>3</sub>) 发育大量的脆性破裂和蚀变作用, 形成了构造角砾、断层泥(图 4g), 蚀变以绿帘石化、绿泥石化、高岭土化(图 4g)为主, 局部发育褐铁矿化, D<sub>3</sub> 期变形对 D<sub>1</sub> 期韧性变形和 D<sub>2</sub> 期脆性变形都有明显的改造作用, 岩石中见到大量的脆性裂隙切过 D<sub>1</sub> 期韧性变形构造面理, 表明 D<sub>3</sub> 期的脆性变形具有伸展运动性质(图 4h), 同时, D<sub>2</sub> 期变形形成的石英脉和角砾岩, 被 D<sub>3</sub> 期脆性破裂切过或错动, 也指示后者具有右行逆冲剪切的运动特征(图 4i)。

## 3 样品采集及测试方法

放射性<sup>14</sup>C 法在古环境与古气候演变(邹司雅等, 2024)、新构造与活动构造、考古及地热水(戴竹等, 2023; 韩基弘等, 2024)等方面的定年具有较高的精度(田婷婷等, 2013), 而<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar 法则常用于与新构造及活动构造密切相关的火成岩和断层时代的测定和研究(Davidsa et al., 2010, 2013; Surace et al., 2011; Clauer, 2013)。为了更好的限定罗湖断裂的活动性, 根据野外钻孔的岩性组成和变形特征, 本文不仅采用放射性<sup>14</sup>C 测年法来约束研究区基岩上覆砾石层之内的黑色泥炭(样品 ZK44 泥炭埋深 6.2~6.7 m, 样品 ZK133 泥炭埋深 6.4~7.0 m, 采样位置见图 1b)形成时代, 同时采用伊利石<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar 法来限定断层(样品 ZK32 采于 F<sub>4</sub> 断层中, 样品 ZK105 和样品 ZK301 分别采于 F<sub>9</sub> 断层中, 采样位置见图 1b)的活动时代, 以期准确厘定罗湖断裂中南段的最新活动时限。

<sup>14</sup>C 测年实验在中国地震局地质研究所新构造年代学实验室完成。实验室在分析这些物质的放射性 C 含量之前, 工作人员先对样品进行物理和化学预处理以去除可能存在的污染物, 然后采用较为有效的加速器质谱定年法(AMS)进行定年。

<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar 法伊利石测年则是先将断层泥样品进行 XRD 多次分离实验后, 挑选出自生伊利石样品, 再将其送到日本株式会社蒜山地质年代学研究所(Hiruzen Institute for Geology and Chronology Co., Ltd.)进行定年实验。实验人员将伊利石样品放入硝酸和氢氟酸混合液中溶解约 12 个小时, 随后将其蒸发并放在热板上干燥, 使用 2000×10<sup>-6</sup> Cs 缓冲液通过火焰光度法对样品中的钾进行两次或两次以上的定性分析, 最后采用多次分析平均值来计算年龄, 钾的分析及其误差遵循 Nagao et al. (1984) 报告的方法。Ar 同位素的分析则主要通过 180~200 °C 温度下加热 72 小时, 并在真空环境中吸附气体, 冷却后再使用钼坩埚在 1500 °C 温度下加热 30 分钟, 进而提取超高真空环境中的样品气体。最后, 基于伊利石矿物中放

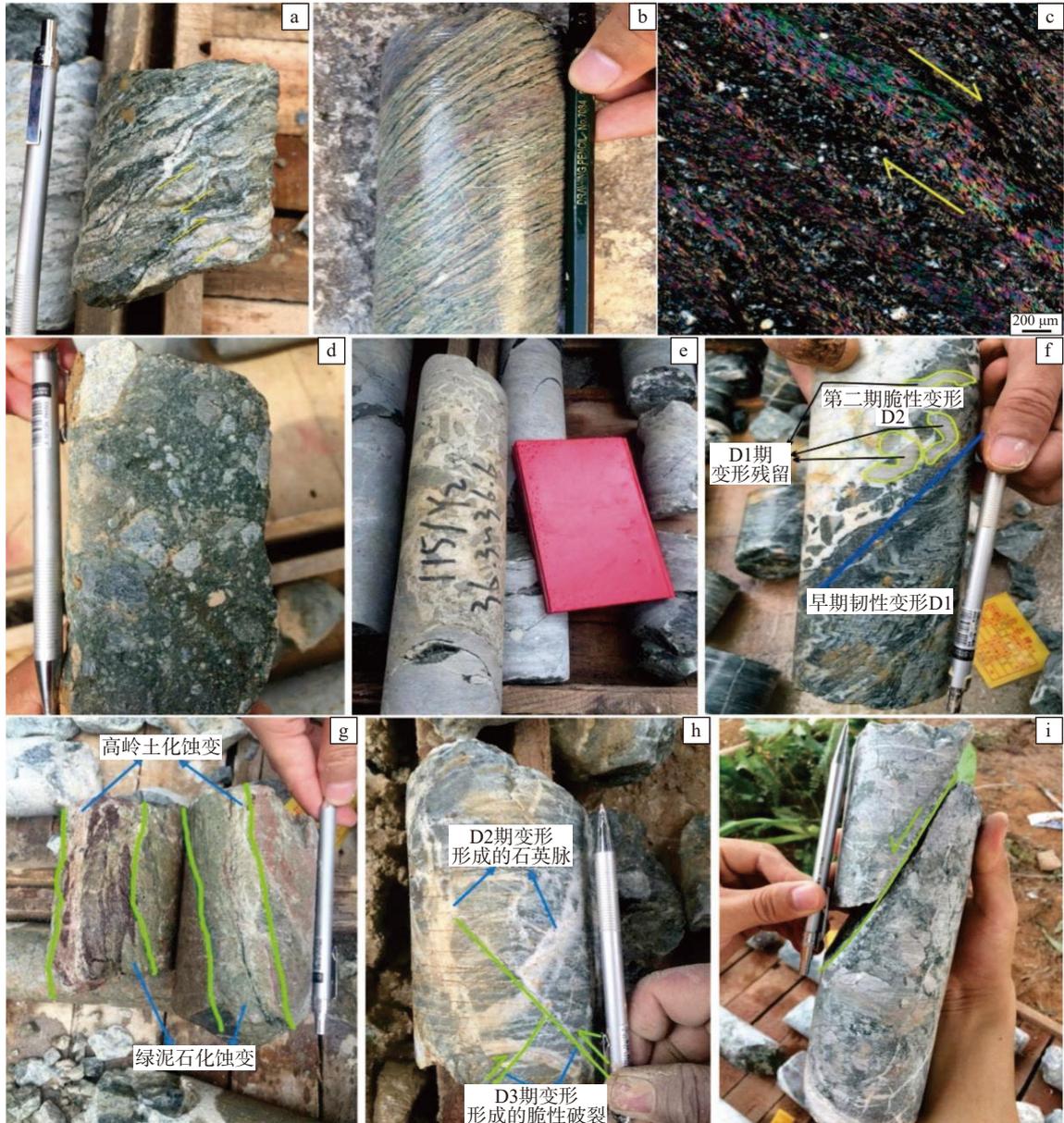


图4 罗湖断裂构造变形特征

Fig. 4 Structural deformation features of the Luohu faults

a. 石英剪切旋转碎斑; b. 条带状脉体构造; c. 正交偏光镜下板岩中发育的剪切褶皱; d. 碎裂岩和断层泥; e. 砂岩和石英脉组成的碎裂岩; f. 碎裂岩切割改造了早期韧性剪切变形形成的褶皱构造; g. 绿泥石化、高岭土化的构造角砾和断层泥; h. D3 期脆性变形改造 D1 期和 D2 期构造岩; i. D2 期形成的碎裂岩被 D3 期张性断层改造

射性母体 $^{40}\text{K}$ 捕获或释放正电子衰变为 $^{39}\text{Ar}$ 的关系来计算地质体或地质事件的年龄(Nagao et al., 1984; Zwingmann et al., 2004)。

## 4 结果

### 4.1 砾石层厚度变化规律及 $^{14}\text{C}$ 年代学结果

本文对 304 个钻孔编录发现, 砾石层在 224

个钻孔中均有分布, 表明其具有区域性的分布特点。笔者进一步统计分析所有钻孔砾石层的最大埋深值和最浅埋深值(图 5), 结果发现: (1) 花岗岩段的砾石层埋深在 8.5 ~ 18.4 m 之间, 厚度变化在 0.4 ~ 4.4 m 之间, 主要厚度集中在 1 ~ 3 m 之间, 平均厚度为 2.3 m; (2) 塘厦组长英质砂岩段砾石层埋深在 10 ~ 17 m 之间, 主要厚度集中在 1.5 ~ 2.4 m 之间, 平均厚度为 2.1 m; (3) 测水组灰岩段

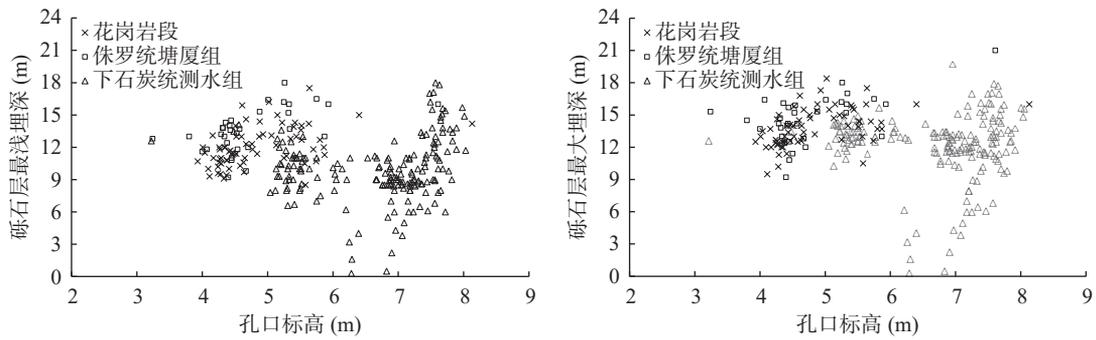


图5 断裂带上覆砾石层埋深及厚度变化散点图

Fig. 5 Scatter plot of burial depth and thickness variation of overlying gravel layer on the fault zone

砾石层埋深在 7~16.2 m 之间, 主要厚度范围集中在 1.8~2.9 m 之间, 平均厚度为 2.2 m。

综合对比发现, 虽然不同地层岩性单元的砾石层埋深、主要厚度等存在一定的差异, 但是砾石层的整体平均厚度值却几乎相同, 暗示砾石层沉积时研究区稳定性和连续性较好(图 5)。同时, 联孔剖面图也显示, 砾石层顶—底埋深没有明显的突变, 整体呈现连续的缓波状起伏(图 3), 且砾石层之下的断层并未对其进行改造或切穿, 整体反映当时沉积环境的构造活动性很微弱。因此,

在砾石层沉积之后, 研究区整体处于地壳活动稳定区。

对砾石层之上沉积覆盖的泥炭进行<sup>14</sup>C 测年, 得到的测年结果为 (30590±1130) a ~ (36260±890) a(表 1), 表明泥炭的形成时代为晚更新世中期。这与深圳市地质局(2013)在研究区北东侧、北西侧揭示的晚更新世中期 [(32610±1650)a ~ (38500±570) a] 石排组砾石层具有相同的形成时代, 指示研究区钻孔揭露的薄泥炭层可能属于石排组。

表 1 罗湖断裂钻孔中泥炭的<sup>14</sup>C 测年结果Table 1 <sup>14</sup>C dating results of peat in boreholes in Luohu faults

样品号	采样地点	采样深度(m)	年龄(a)
ZK44	鹿丹村NW侧200 m	6.2~6.7	36260±890
ZK133	深圳站E侧300 m	6.4~7.0	30590±1130

#### 4.2 断层泥<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar 法年代学结果

伴随流体运移的断层活动往往会在低温环境下形成断层泥中发育的大量多型 1Md/1M 伊利石(张有瑜等, 2016), 其往往记录了断层多期活动的时间(张彦等, 2007; Davidsa et al., 2010, 2013; Clauer, 2013)。因此, 利用断裂(断层)活动形成的断层泥进行伊利石<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar 法测年来约束其活动期次和形成时代, 是定量判别断裂(断层)构造活

动时间的重要手段(赵奇和闫义, 2021)。本文对罗湖断裂的 F<sub>4</sub> 和 F<sub>9</sub> 两条断层分别进行了断层泥<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar 法测年, 结果显示, F<sub>4</sub> 断层(样品 ZK32)获取的 K-Ar 年龄为 67.3±1.5 Ma, 对应晚白垩世末期; F<sub>9</sub> 断层得到的 K-Ar 年龄分别为 63.7±1.4 Ma(样品 ZK105)和 46.7±1.2 Ma(样品 ZK301)(表 2), 分别对应古新世早期和始新世中期。

表 2 罗湖断裂<sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar 法测年结果Table 2 Dating Results of <sup>40</sup>K-<sup>39</sup>Ar Method for the Luohu Faults

样品号	测试矿物	K(wt.%)	辐射 <sup>40</sup> K吸附量(×10 <sup>-8</sup> ccSTP/g)	K-Ar年龄(Ma)	非辐射 <sup>40</sup> Ar占比(%)
ZK32	伊利石	6.990±0.140	1858.6±20.5	67.3±1.5	11.6
ZK105	伊利石	7.561±0.151	1901.0±19.7	63.7±1.4	6.1
ZK301	伊利石	5.861±0.117	1077.0±16.1	46.7±1.2	31.0

## 5 讨论

### 5.1 罗湖断裂中南段最新活动时限

一般而言,获取断层破碎带内构造岩的测年数据是限定和约束断层活动时限的直接手段。同时,地震监测、断裂变形监测、地应力分析等手段也可作为判定区内地壳稳定性和断层活动性的证据,间接约束断裂的构造活动性。除了上述手段之外,对断裂带的活动性分析还可以通过研究断裂带的变形特征和历史构造活动演化来加以佐证。

前人主要运用电子自旋共振(ESR)、光释光(OSL)和热释光(TL)等方法对罗湖断裂进行了年代学测定。如陈挺光(1989)对罗湖断裂中的 $F_8$ 断层进行了热释光年龄测定,提出罗湖断裂(黄贝岭附近)较强的最新活动时间为早更新世晚期至中更新世早期(56.9~93万年)。深圳市地质局(2013)对横岗-罗湖断裂断层泥利用ESR法获得的结果为 $(41.1\pm 10) \sim (49.8\pm 15.5)$ (万年)。马浩明和陈庞龙(2009)在罗湖断裂不同地段采集构造岩进行ESR年龄测定,得到 $(32.2\pm 3.2) \sim (103.2\pm 10.3)$ (万年)的结果。徐俊等(2013)对深圳海关停车场和深圳水库附近的 $F_9$ 断层构造岩进行ESR实验,得到的断层最新活动时间为 $(59.2\pm 59) \sim (73.2\pm 73)$ (万年)。分析上述年代学数据可知,目前罗湖断裂的最新活动时限被认为发生在中更新世中—晚期 $[(103.2\pm 10.3) \sim (32.2\pm 3.2)$ 万年],该时限在万年的活动尺度来说跨度较大,难以确定准确的最新活动时限。

对断裂带之上覆盖的沉积稳定层的识别和精确定年是限定断裂活动上限的重要途径。余成华(2010)对罗湖断裂中的 $F_9$ 断层之上覆盖的土层样品进行ESR测年,得出结果为 $(44\,400\pm 44) \sim (40\,000\pm 40)$ a,据此判定罗湖断裂自中更新世中期以来没有再活动(余成华,2010)。而本文通过对罗湖断裂中南段上覆的砾石层(局部含泥炭)进行物质组成对比和 $^{14}\text{C}$ 测年,得到的结果为 $(30\,590\pm 1\,130) \sim (36\,260\pm 890)$ a,同时推测断裂带之上的砾石层可能对应深圳市地质局(2013)划定的晚更新世中期的石排组 $[(38\,500\pm 570)\text{a} \sim (32\,610\pm 1\,650)$

a]。虽然雷东宁等(2018)对横岗—罗湖断裂中南段研究时提出断裂最新活动时限为中更新世晚期(31 000 a~14 000 a),但作者却缺少直接的定年证据,仅将现有数据进行简单整合分类,不具有代表性。

在其他证据方面,原地质矿产部(1991)在对深圳市地壳稳定性进行综合评价时提出,自全新世以来,深圳断裂带未见复活现象,罗湖断裂现今活动微弱,构造上整体比较稳定。卢演涛和孙建中(1991)对深圳断裂带分布的第四纪盆地的地质和地貌研究发现,断裂带整体处于间隙性抬升过程,地壳相对升降速率约为0.04~0.02 mm/a,断裂活动不明显。断裂变形监测数据则表明,断裂现今变形速率在0.05~0.5 mm/a之间,属于中等偏下活动水平(雷东宁等,2018);马淑芝等(2006)对罗湖断裂进行地应力场三维有限元模拟研究发现, $F_8$ 和 $F_9$ 两条断层北西段存在塑性破坏区,构造稳定性稍差,存在进一步活动的趋势;王建军等(2002)对罗湖断裂的构造活动性研究时认为,罗湖断裂从全新世以来,一直处于不活动状态。随后,部分研究者基于地震监测和地壳稳定性分析,认为晚更新世以来,深圳断裂带整体处于稳定状态,不会发生较大规模的活动(王战鹏等,2005;贾建业等,2006;孙杰等,2007)。上述证据共同表明,罗湖断裂现今活动微弱,局部地段可能存在微弱的变形,但是整体处于构造稳定状态。

因此,综合断层构造岩ESR、OSL、TL等直接定年结果、断裂带上覆最新稳定沉积地层时代、以及地震监测、断裂变形监测、地应力分析和其它证据,本文认为罗湖断裂中南段的断层最新活动时代上限不会晚于 $36\,260\pm 890 \text{ a} \sim 38\,500\pm 570 \text{ a}$ ,即中更新世晚期以来,区内断裂带再无明显活动。

### 5.2 罗湖断裂的构造变形过程

前人通过 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究表明莲花山断裂带(包括深圳—五华断裂)韧性剪切作用主要发生在117.5~129.7 Ma之间(邹和平等,2000;王晓虎等,2020;王军等,2021)。Li J H et al.(2020)结合野外构造解析、地质/热年代学和其他相关资料,重建了莲花山断裂带的构造演化序列,认为莲

花山断裂带经历了挤压—伸展多期构造演化。挤压变形主要表现为晚侏罗世末期的逆冲韧性剪切,伸展变形则与华南广泛分布的晚白垩世盆地和伸展穹隆的形成时代近乎同期。其他部分学者揭示,横岗—罗湖断裂自晚侏罗世以来,经历了早白垩世初期的韧性剪切变形和之后的脆性—初脆性变形作用,分别形成了大量的糜棱岩带、碎裂岩带和硅化岩带(广东省地质矿产局,1988;李建超和丘元禧,1990)。笔者通过野外调查和断裂构造变形研究发现,罗湖断裂至少经历了两期构造变形和三期断裂构造活动,早期为韧性剪切变形,晚期为脆性变形,而脆性变形又可至少细分为两期构造活动。

综合区域不同尺度对比结果,罗湖断裂与深圳—五华断裂带以及莲花山断裂带均有类似的构造变形活动特征,暗示它们应具有相同的构造演化过程。本文对钻孔中采取的断层泥样品进行伊利石 $^{40}\text{K}$ - $^{39}\text{Ar}$ 法测年,结果分别为 $67.3\pm 1.5$  Ma(晚白垩世末期)、 $63.7\pm 1.4$  Ma(古新世早期)、 $46.7\pm 1.2$  Ma(始新世中期),表明罗湖断裂东南段在经历晚白垩世末期的脆性变形活动(可能对应文中的 $D_3$ )之后,可能并未立即结束,而是一直持续活动到古新世早期;随后在始新世中期,由于区域伸展应力的持续作用,研究区罗湖断裂中南段可能又发生了一次构造活动。这里需要说明的是,我们的断层泥 $^{40}\text{K}$ - $^{39}\text{Ar}$ 法测年并未获取到晚侏罗世末期—早白垩世初期的韧性剪切变形时代,可能的原因是早期断裂的韧性剪切活动证据被晚期持续的脆性变形活动完全改造,未能有效地保留下来。

## 6 结论

本文通过对罗湖断裂中南段进行地层组成与分布特征、构造变形特征、放射性 $^{14}\text{C}$ 法、伊利石 $^{40}\text{K}$ - $^{39}\text{Ar}$ 法等的几何学、运动学和年代学研究,结合前人研究成果,得出以下结论:

(1)罗湖断裂中南段断层上覆砾石层的最新沉积时代为 $(36\,260\pm 890)\text{a}$ ~ $(38\,500\pm 570)\text{a}$ ,因此,罗湖断裂的最新活动时代上限不晚于 $(38\,500\pm$

$570)\text{a}$ ,即中更新世晚期以来,区内断裂带再无明显活动。

(2)罗湖断裂中南段自晚侏罗世末期—早白垩世初期的韧性剪切变形活动和晚白垩世末期的脆性变形活动之后,脆性变形活动可能一直持续到古新世早期;始新世中期,罗湖断裂可能又发生了一期构造活动。

## 参考文献:

- 陈挺光.1989.深圳断裂带基本特征及其现今活动性[J].广东地质,4(1):51-61.
- 戴竹,詹文,石威,吴鹏飞,余方.2023.鄂东罗田县典型地热田水文地球化学特征及相关性[J].资源环境与工程,37(3):272-280.
- 地质矿产部.1991.深圳市区域稳定性评价[M].北京:地质出版社.
- 广东省地质矿产局.1988.广东省区域地质志[M].北京:地质出版社.
- 韩基弘,唐石,黄长生,陈威,李璇,王芳婷,侯萍萍,邹金,任崇贺.2024.基于水化学特征的赣东南石城-寻乌断裂带地热水成因模式[J].华南地质,40(2):413-434.
- 贾建业,孙杰,詹文欢,易顺民.2006.深圳断裂带活动性分析[J].广东地质,21(4):1-6.
- 康镇江.2009.深圳地质[M].北京:地质出版社.
- 雷东宁,姚运生,但卫,李雪,蔡永建,余松.2018.深圳横岗—罗湖断裂中南段活动特征及现今构造变形监测[J].大地构造与成矿学,42(2):225-234.
- 李建超,丘元禧.1990.广东莲花山燕山早期断裂带热变质带的基本特征及形成机制的探讨[J].长春地质学院学报,20(1):11-20+123.
- 卢演传,孙建中.1991.广东深圳断裂带活动性的第四纪地质和地貌研究[J].地震地质,13(2):138-146.
- 马浩明,陈彪龙.2009.深圳市横岗—罗湖断裂第四纪活动性研究[J].地质科学,4(3):266-274.
- 马淑芝,贾洪彪,易顺民,龚淑云.2006.罗湖断裂带地应力场三维有限元模拟分析[J].岩石力学与工程学报,25(S2):3898-3903.
- 深圳市地质局.2013.1:50000 深圳市地质图及说明书[M].深圳:广东省地图出版社.
- 孙杰,贾建业,詹文欢,易顺民.2007.深圳断裂带构造活动性分析[J].地球科学进展,22(3):234-240.
- 唐宇.2017.深圳罗湖断裂带构造活动性研究及对工程的

- 影响[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文.
- 田婷婷,吴中海,张克旗,张绪教.2013.第四纪主要定年方法及其在新构造与活动构造研究中的应用综述[J]. 地质力学学报,19(3):242-266.
- 童 旭,李智武,刘树根,I. Tongu UYSAL,施泽进,李金玺,Andrew TODD,武文慧,王自剑,刘升武,李 轲,华天.2024.始新世中期安宁河断裂冲断变形特征及其构造意义:来自断层泥自生伊利石 K-Ar 定年的证据[J]. 地学前缘,31(4):297-313.
- 王 军,汪礼明,公凡影,王 艳,王成明,卜 安,朱沛云.2021.粤东莲花山断裂带韧性剪切的温压条件及其对钨锡铜多金属成矿作用的约束[J]. 岩石学报,37(6):1921-1932.
- 王建军,张鸿旭,李荣强,赵营海,陈加红.2002.深圳市罗湖断裂带活动性及建筑物安全监测系统设计[J]. 灾害学,17(3):14-20.
- 王晓虎,张文高,陈正乐,周荣德,陈柏林,许典葵,霍海龙,李季霖,张 涛,丁志磊,李效壮.2020.华南沿海莲花山断裂带控矿构造变形时限:来自锆石 U-Pb 年龄与地层时代的约束[J]. 中国地质,47(4):985-997.
- 王战鹏,朱珍德,易顺民.2005.深圳罗湖断裂带黄贝岭 F8 断层流变有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报,26(S2):211-214.
- 徐 俊,余成华,张桂香,肖 兵,蒋 鹏,陈庞龙.2013.钻孔及探槽探测鉴定横岗-罗湖断裂活动性[J]. 城市勘测,(2):170-176.
- 徐先兵,邓 飞,王 墩,罗锡宜.2022.基岩区断层泥的物质组成、定年方法与地震断层弱化机制研究进展[J]. 地质科技通报,41(5):122-131.
- 余成华.2010.深圳市断层活动性和地震危险性研究[D]. 浙江大学博士学位论文.
- 张 彦,陈克龙,刘新宇.2007.沉积岩中自生伊利石 K-Ar 定年研究—存在问题及原因讨论[J]. 岩矿测试,26(2):117-120.
- 张有瑜,刘可禹,罗修泉.2016.自生伊利石年代学研究——理论、方法与实践[M]. 北京:科学出版社.
- 赵 奇,闫 义.2021.伊利石 K-Ar/Ar-Ar 年龄约束浅地表断层活动时间:原理和潜力[J]. 地球科学进展,36(7):671-683.
- 郑 勇,李海兵,王世广,白明坤.2019.断层泥自生伊利石年龄分析及其在龙门山断裂带的应用[J]. 地球学报,40(1):173-185.
- 邹和平,王建华,丘元禧.2000.广东南澳和莲花山韧性剪切带  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄及其地质意义[J]. 地球学报,21(4):356-364.
- 邹司雅,季军良,徐亚东,朱 宁.2024.川西高原毛垭坝盆地全新世气候变化[J]. 地质科技通报,43(1):173-183.
- Clauer N. 2013. The K-Ar and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  methods revisited for dating fine-grained K-bearing clay minerals[J]. *Chemical Geology*, 354: 163-185.
- Dauids C, Bergh S G, Wemmer K. 2010. K-Ar and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Dating of Post-Caledonian Brittle Faults in Northern Norway[C]. Thermo, 12<sup>th</sup> international Conference on Thermochronology, Glasgow, UKI, 16-20.
- Dauids C, Wemmerb K, Zwingmann H, Kohlmann F, Jacobs J, Bergh S G. 2013. K-Ar illite and apatite fission track constraints on brittle faulting and the evolution of the northern Norwegian passive margin[J]. *Tectonophysics*, 608: 196-211.
- Li J H, Cawood P A, Ratschbacher L, Zhang Y Q, Dong S W, Xin Y J, Yang H, Zhang P X. 2020. Building Southeast China in the late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone[J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 103056.
- Nagao K. 1984. An age determination by K-Ar method[J]. *Bulletin of the Hiruzen Research Institute*, 9: 19-38.
- Solum J G, van der Pluijm B A, Peacor D R. 2005. Neocrystallization, fabrics and age of clay minerals from an exposure of the Moab Fault, Utah[J]. *Journal of Structural Geology*, 27(9): 1563-1576.
- Surace I R, Clauer N, Thélin P, Pfeifer H R. 2011. Structural analysis, clay mineralogy and K-Ar dating of fault gouges from Centovalli Line (Central Alps) for reconstruction of their recent activity[J]. *Tectonophysics*, 510(1-2): 80-93.
- Zwingmann H, Offler R, Wilson T, Cox S F. 2004. K-Ar dating of fault gouge in the northern Sydney Basin, NSW, Australia—implications for the breakup of Gondwana[J]. *Journal of Structural Geology*, 26(12): 2285-2295.
- Zwingmann H, Mancktelow N, Antognini M, Lucchini R. 2010. Dating of shallow faults: new constraints from the AlpTransit tunnel site (Switzerland)[J]. *Geology*, 38(6): 487-490.