

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.196

引用格式: 罗俊超, 林振文, 李冠华, 等. 广东莲花山构造带三灶断裂带特征及活动性[J]. 中国地质调查, 2025, 12(4): 36–45. (Luo J C, Lin Z W, Li G H, et al. Characteristics and activity of Sanzao fault zone in Lianhuashan tectonic zone of Guangdong[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(4): 36–45.)

广东莲花山构造带三灶断裂带特征及活动性

罗俊超¹, 林振文^{1*}, 李冠华², 李出安¹, 阳峰¹, 张翔翔¹

(1. 广东省海洋地质调查院, 广东 广州 510062; 2. 汕头大学海洋灾害与防护广东省重点实验室, 广东 汕头 515063)

摘要: 三灶断裂带是莲花山构造带西束的分支, 是构造带在珠江口西岸的延伸, 已有资料和研究认为该断裂带可能为活动断裂。通过野外地质调查、微动法勘探、浅层地震法勘探、钻孔验证、碎粉岩年代测试, 对三灶断裂带在横琴地区的展布特征及活动性开展研究。结果表明: 三灶断裂带总体走向为 NE—NEE 向, 倾向北西, 错断了上更新统三角层, 断裂带内的碎粉岩光释光 (optically stimulated luminescence, OSL) 测年结果为 (27.77 ± 2.99) ka 和 (22.24 ± 1.04) ka, 指示横琴地区在晚更新世晚期发生过一次较大规模的脆性断裂活动。研究可为横琴粤澳深度合作区的城市建设和防灾减灾提供参考。

关键词: 三灶断裂带; 莲花山构造带; 断裂活动性; 光释光; 横琴地区

中图分类号: P546

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2025)04–0036–10

0 引言

横琴粤澳深度合作区是国务院批准设立的国家级新区, 区内的 NE—NEE 向断裂在区域上隶属于三灶断裂带, 厘清该断裂带在横琴地区的展布特征及活动性对区域地质稳定性评价和灾害防控具有重要意义。前人在珠江口以东区域围绕与断裂带相关的韧性剪切带、岩浆活动、拉分盆地和成矿作用的研究已取得丰富成果^[1–10], 但针对该区域新生代以来断裂活动性的研究相对薄弱。对三灶断裂带活动性的研究开始于 20 世纪 80 年代, 中国地震局 (原国家地震局)^[11] 通过遥感解译识别出水下岸坡的陡坎, 初步指示其存在活动性; 广东省地矿局七五七地质大队^[12] 在横琴地区开展过 1:5 万区域地质调查, 系统查明了横琴地区的地质背景和断裂带地表行迹, 但未涉及断裂带的组合关系、多期活动特征及隐伏段展布。20 世纪 90 年代初, 潘建

雄等^[13] 对位于横琴西侧的三灶断裂带进行了调查, 查明了断裂带在三灶岛的行迹特征, 并对断裂带中的碎粉岩进行热释光 (thermo luminescence, TL) 测年, 报道了指示古地震活动的地震构造楔, 为论证三灶断裂带历史上曾发生过脆性断裂活动提供了关键证据。然而, 在确定断裂带最新活动时代时, TL 法的测年精度通常低于光释光 (optically stimulated luminescence, OSL) 等方法, 因此还需要采用更高精度的测年方法对断裂活动时代进行厘定。

本文在总结前人研究工作的基础上, 通过对横琴地区陆域 (面积约 85 km²) 开展 1:2.5 万基础地质填图, 并结合地球物理探测 (微动法勘探测线 3 条及浅层地震法勘探测线 2 条)、钻孔验证 (2 个) 及碎粉岩年代测试, 结合对第四纪特殊沉积记录的系统分析, 对三灶断裂带的展布特征和活动性开展研究, 以期为该断裂带的地震活动性预测提供科学依据。

收稿日期: 2024–04–21; 修订日期: 2024–09–13。

基金项目: 广东省地质调查与城市地质专项“广东省海岸带综合地质调查——横琴新区调查示范 (编号: 2020–13)”“广东 1:5 万蓝塘、观音阁幅区域地质调查 (编号: 2024–01)”及“广东海陵湾海岸带综合地质调查 (编号: 2024–59)”联合资助。

第一作者简介: 罗俊超 (1991—), 男, 工程师, 主要从事构造地质调查和研究。Email: luojunchao0710@qq.com。

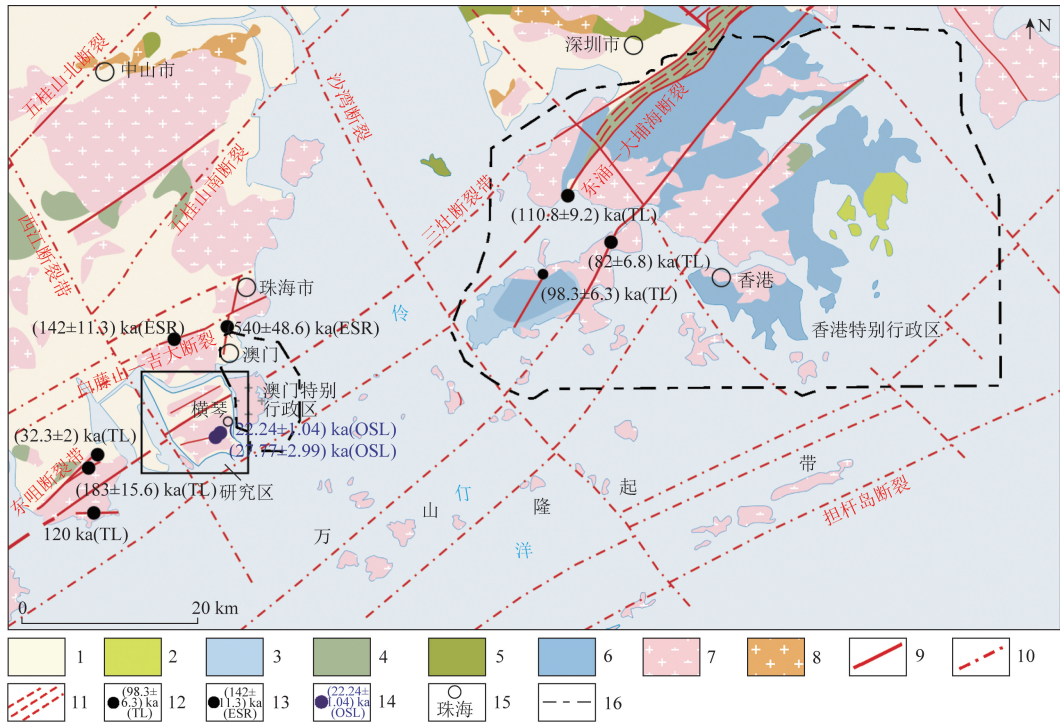
通信作者简介: 林振文 (1986—), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质与矿产勘查研究。Email: linzhenwen9704@163.com。

1 横琴地区地质概况

莲花山构造带在区域上属于政和—大埔断裂带西南段^[14-16],是广东省境内的区域性主干断裂,从梅州五华、大埔延伸至深圳、珠海三灶后入海,长度约 360 km,可分为相距约 50 km 的东、西两个断裂束,东断裂束为大埔—海丰断裂束,西断裂束为五华—深圳断裂束,在珠江口西岸被称为三灶断裂带,断裂带整体为由压扭性断裂、韧性剪切带和褶皱构造变形组成的挤压破碎带。断裂带形成于印支运动,自中生代晚期以来,由区域上交

替经历多个阶段的 NW—SE 向挤压和伸展作用形成^[1,2,17-18]。

珠海市位于珠江出海口西侧,大地构造上属于华夏造山系,大陆部分属新华夏系第二隆起带中莲花山深大断裂带的西南段,并被 NW 向的西江断裂分割成梯形断块,岛屿部分属 NE 向的万山隆起带。区域上经历了复杂的构造运动,其中燕山运动最为强烈,以断裂构造和岩浆活动为特征。燕山运动晚期,受太平洋板块俯冲的影响,华南板块自东南向北西方向挤压隆起,形成了 NE—NEE 向、NW 向的断裂带,同时形成中酸性侵入岩带^[12],断裂相互切割、复合,构成了现今的基本构造格架(图 1)。



1. 第四系; 2. 上侏罗统一白垩系; 3. 上三叠统一中侏罗统; 4. 寒武系—石炭系; 5. 前寒武系; 6. 侏罗纪—白垩纪火山岩; 7. 燕山期花岗岩; 8. 加里东期花岗岩; 9. 断裂; 10. 隐伏断裂; 11. 剪切带; 12. 已发表热释光年龄; 13. 已发表电子自旋共振 (electron spin resonance, ESR) 年龄; 14. 本文获得的光释光年龄; 15. 地名; 16. 特别行政区范围

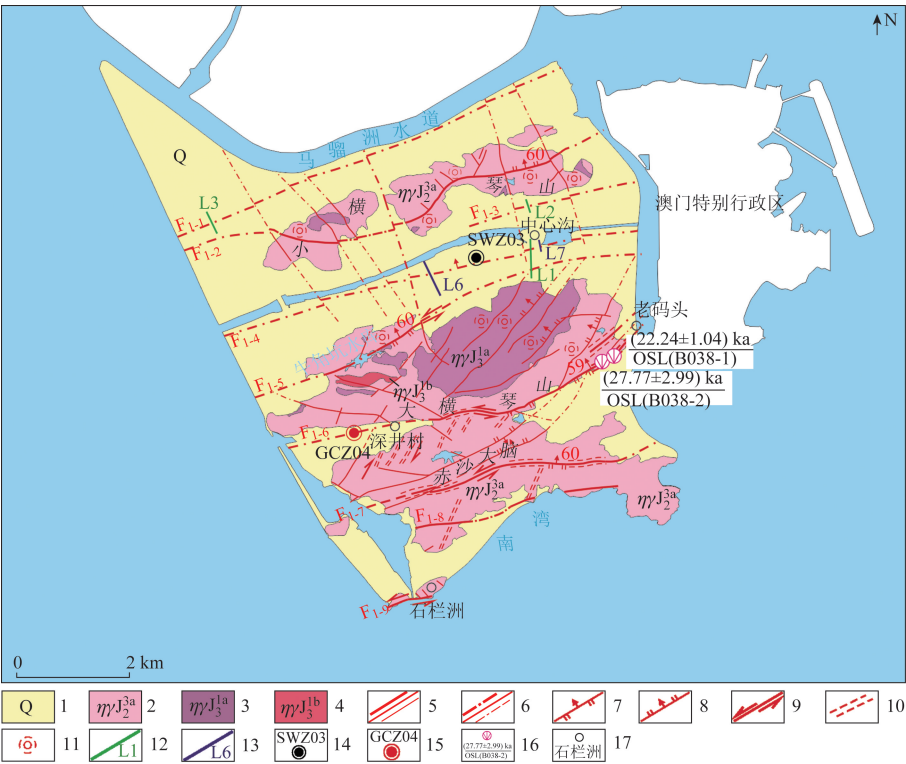
图 1 珠江口两岸地质简图

Fig. 1 Geological sketch of both sides of Pearl River estuary

横琴地区由南北两座 NEE 向的岛屿组成,地势南北两侧高、中间低。北侧为小横琴岛低丘陵(图 2),海拔多在 200 m 以下,山坡较平缓;南侧为大横琴岛高丘陵,主要有脑背山和赤沙大脑两个山体(图 2),主峰位于脑背山,海拔 457 m,坡度为 45°~60°。两岛之间的中心沟在 20 世纪 70 年代由海沟围垦成平原。岛屿由岩浆岩组成,岩性为中—晚侏罗世的黑云二长花岗岩^[19],岛屿外围地层为第四系,厚度 0~40 m,自下而上可分为上更新统泥

质粉砂、黏土、砂及全新统淤泥;全新统与上更新统以一套花斑黏土层或砂砾层(三角层)分界,三角层在珠江三角洲广泛发育,由晚更新世晚期 MIS2 盛冰期海退过程风化形成^[20-24],时代属晚更新世—全新世。

基岩区断裂构造十分发育,局部发育韧性剪切带。从展布方向看,主要有 NE—NEE 向断裂和 NW 向断裂(图 2),在区域上分别属于三灶断裂带和西江断裂带(图 1)^[25-26]。



1. 第四系; 2. 粗中粒黑云二长花岗岩; 3. 细粒黑云二长花岗岩; 4. 细粒含斑黑云二长花岗岩; 5. 主干断裂/次级断裂; 6. 主干隐伏断裂/次级隐伏断裂; 7. 逆冲断裂; 8. 正断裂; 9. 走滑断裂; 10. 韧性剪切带; 11. 硅化; 12. 微动法测线及编号; 13. 浅层地震测线及编号; 14. 地质钻孔位置及编号; 15. 揭露断裂钻孔位置及编号; 16. 光释光样品采样位置及年龄; 17. 地名; F_{1-1} . 马骝洲断裂; F_{1-2} . 小横琴断裂; F_{1-3} . 石头咀断裂; F_{1-4} . 中心沟断裂; F_{1-5} . 牛角坑断裂; F_{1-6} . 深井坳断裂; F_{1-7} . 黄茅形断裂; F_{1-8} . 南湾断裂; F_{1-9} . 石栏洲断裂

图 2 横琴地区地质简图
Fig. 2 Geological sketch of Hengqin area

2 断裂带地质特征

横琴地区自北向南发育了 9 条贯穿全区的 NE—NNE 向断裂 (图 2, 表 1), 其中马骝洲断裂 (F_{1-1})、中心沟断裂 (F_{1-4})、牛角坑断裂 (F_{1-5}) 和

深井坳断裂 (F_{1-6}) 规模最大。马骝洲断裂和中心沟断裂隐伏于第四系之下, 本文通过物探和钻探手段对这两条断裂进行了揭露。牛角坑断裂和深井坳断裂在地表有完整的露头, 为研究断裂变形特征和活动性提供了直接的证据。下文对断裂的野外露头、钻孔揭露的隐伏断裂和物探特征进行介绍。

表 1 横琴地区主要 NE 向断裂特征

Tab. 1 Main faults characteristics of Hengqin area

断裂名称 (编号)	产状	断裂特征	断裂性质	调查方法
马骝洲 (F_{1-1})	走向约 65°, 倾向东南, 倾角 60°~70°	微动法测线出现等值线凹陷和低速异常, 岩面明显变深	—	微动法测线 L3 揭露
小横琴 (F_{1-2})	150°~170°∠75°~80°	延伸长度约 10 km, 断面平直陡峭, 断裂面发育硅质、铁质薄膜、擦痕等	多期活动断裂	地表追索
石头咀 (F_{1-3})	倾向北, 倾角约 70°	微动法测线显示等值线凹陷和低速异常, 岩面明显变深	—	微动法测线 L2 揭露
中心沟 (F_{1-4})	走向约 70°, 倾向北西, 倾角 60°~70°	微动法测线出现等值线凹陷和向深部延伸的低速异常带; 浅层地震横波反射出现向深部延伸的低速异常和波组不连续异常, 反射波组同相轴均出现连续性变差、错断的现象	多期活动断裂	微动法测线 L1、浅层地震法测线 L6 及 L7 揭露

续表

断裂名称(编号)	产状	断裂特征	断裂性质	调查方法
牛角坑(F ₁₋₅)	320° ~ 330° ∠ 50° ~ 60°	延伸长度约 10 km,在牛角坑水库有露头,实际影响宽度超 10 m,断裂具有明显分带性,从中心向两侧可以划分出硅化构造角砾岩带和花岗质碎裂岩带;在隐伏区布设的微波法测线出现等值线凹陷和低速异常,岩面明显变深	多期活动断裂	地表追索、隐伏段浅层地震法测线 L6 揭露
深井坳(F ₁₋₆)	330° ~ 360° ∠ 60° ~ 80°	延伸长度约 10 km,影响宽度超 10 m。在横琴长隆站旁可见完整露头,发育的构造岩类型有碎粉岩、磨砾岩-压碎角砾岩、构造角砾岩、硅化岩、碎裂岩等。	以压扭性左行走滑断裂为主,晚期发育一期右行走滑断裂	地表追索、隐伏段通过钻孔 GCZ04 揭露
黄茅形(F ₁₋₇)	330° ~ 350° ∠ 50° ~ 60°	断裂带宽约 30 cm,主要由花岗质构造角砾岩,构造岩发生片理化,根据片理化的 S-C 组构可以判断为左行走滑断裂	压扭性左行走滑断裂	地表追索
南湾(F ₁₋₈)	320° ~ 350° ∠ 50° ~ 70°	断裂带为宽约 1.5 m 的硅化岩带,围岩花岗岩也受硅化影响,硅化岩带内部空洞较多,指示硅化岩带是由于张性活动而形成	张性正断裂	地表追索
石栏洲(F ₁₋₉)	295° ~ 330° ∠ 75° ~ 85°	断裂破碎带宽约 1 m,主要由花岗质碎裂岩、构造透镜体和构造角砾岩组成,角砾呈棱角状,直径 0.5 ~ 5 cm 不等	左行走滑断裂	地表追索

注:“-”表示断裂性质不明。

2.1 断裂带露头特征

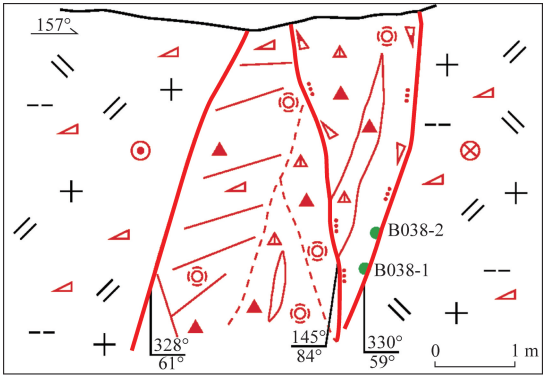
深井坳断裂(F₁₋₆)分布于深井村至老码头,断裂发育于中侏罗世粗中粒黑云二长花岗岩中,断裂面产状为 330°~360°∠60°~80°,形成的影响带大于10 m,其中主断裂带宽约 4 m,内部发育两条碎粉岩带,产状分别为 330°∠59°和 145°∠84°,碎粉岩带之间为磨砾岩-压碎角砾岩,向两侧过渡为构造角砾岩带和碎裂岩带(图 3(a),(b))。碎粉岩呈青灰色-灰色,带宽 2~5 cm,松散泥质结构,未固结,含有少量的石英质碎斑,碎斑呈次圆状,直径 1~5 mm;磨砾岩-压碎角砾岩带内部呈现强烈的挤压特征,成分主要为石英、花岗岩及少量花岗质糜棱岩,砾径 4~30 cm,表明该断裂经历了多期的构造变形,其中花岗质糜棱岩、磨砾岩指示断裂经

历了早期的压扭性变形,构造岩发生萤石化、黄铁矿化、碳酸盐化及硅化,指示断裂经历了热液蚀变。在主断裂带两侧,断裂影响逐渐减弱,形成宽约 4 m 的花岗质碎裂岩带,次级断裂将岩体切割破碎成棱角状的碎块,碎块间无位移,块径数厘米至40 cm 不等。根据里德尔剪切体系,结合次级断裂的发育情况,断裂性质以左行走滑运动为主,后期发生了一期右行走滑运动。

牛角坑断裂(F₁₋₅)在大横琴山北西侧出露,发育于中侏罗世粗中粒黑云二长花岗岩中,地貌上沿断裂形成负地形,表现为沿 NE 向展布的牛角坑水库。断面产状为 320°~330°∠50°~60°,断裂带宽约 6 m,由内至外形成硅化岩构造角砾岩带和黑云二长花岗岩碎裂岩带(图 3(c),(d))。硅化岩构



(a) 深井坳断裂野外露头



(b) 深井坳断裂素描图

-
1. 黑云二长花岗岩; 2. 主断裂面; 3. 次级断裂; 4. 碎粉岩; 5. 碎斑岩; 6. 碎裂岩; 7. 构造角砾岩; 8. 构造磨砾岩; 9. 硅化; 10. 光释光样品采样位置及编号; 11. 断裂运动方向向内/向外; 12. 产状

图 3-1 断裂野外露头特征

Fig. 3-1 Field outcrop characteristics of faults

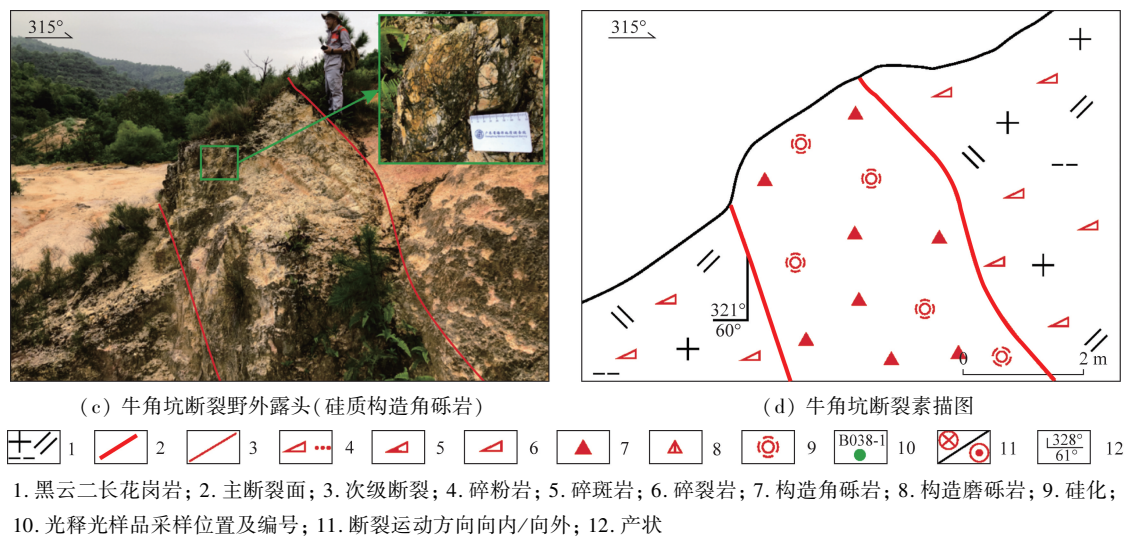


图 3-2 断裂野外露头特征

Fig. 3-2 Field outcrop characteristics of faults

造角砾岩带宽约 2 m,主要由硅质构造角砾岩组成(图 3(c)),角砾多呈次圆状,砾径 2~10 cm。碎裂岩带的碎块多呈棱角状,块径 4~30 cm,碎块间充填物主要为白色黏土。构造岩带中硅化岩的出现指示断裂早期经历了张性活动,之后又经历了压扭性活动,使硅化岩再次发生碎裂并有一定的磨圆特征。

2.2 隐伏段钻孔揭露构造岩特征

位于横琴地区西南部深井村西侧的 GCZ04 钻孔(图 2,孔深 104 m)揭露了深井拗断裂(F_{1-6})隐伏段,钻孔显示断裂在垂向上且具有明显的分带性,构造岩带可分为硅化岩-碎裂岩带(25~47 m)

和角砾岩-磨砾岩带(47~104 m)。碎裂岩带构造岩组合为硅化岩、硅质碎裂岩(图 4(a))、花岗质碎裂岩等。角砾岩-磨砾岩带构造岩组合以硅化花岗质构造角砾岩(图 4(b))、磨砾岩为主,部分变形强烈部位发育碎斑岩-碎粉岩等,角砾成分多为次棱角状-次圆状的石英等,砾径 0.5~6.0 cm。

位于中心沟断裂上盘的 SWZ03 钻孔(图 2)显示,在钻孔深度 26.5~28 m 处,上更新统三角层的花斑黏土层底部(图 4(c)红框)层序紊乱,向上层序逐渐稳定(图 4(c)绿框),表明地层在晚更新世晚期的沉积过程中受到扰动,推测受到了中心沟断裂(F_{1-4})活动的干扰。

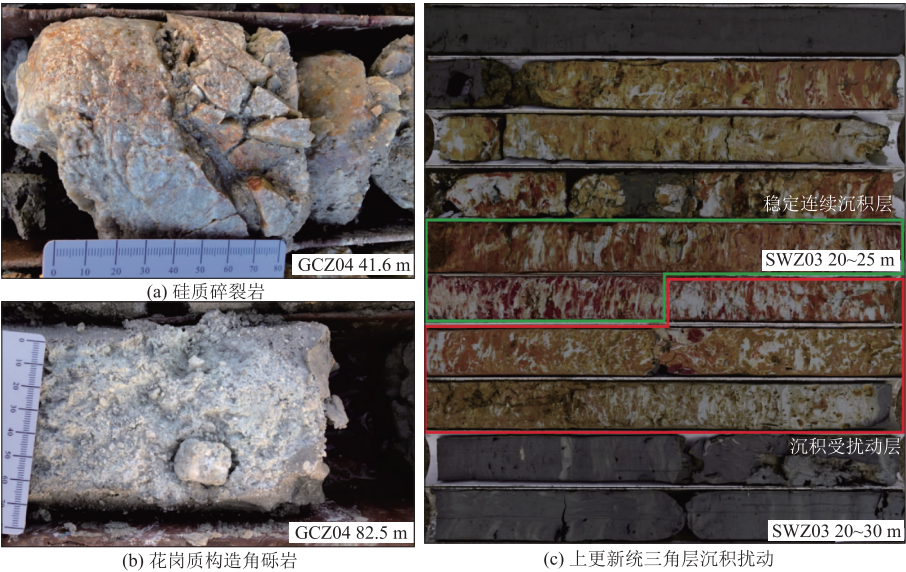


图 4 钻孔中的断裂特征

Fig. 4 Characteristics of faults in the drilling hole

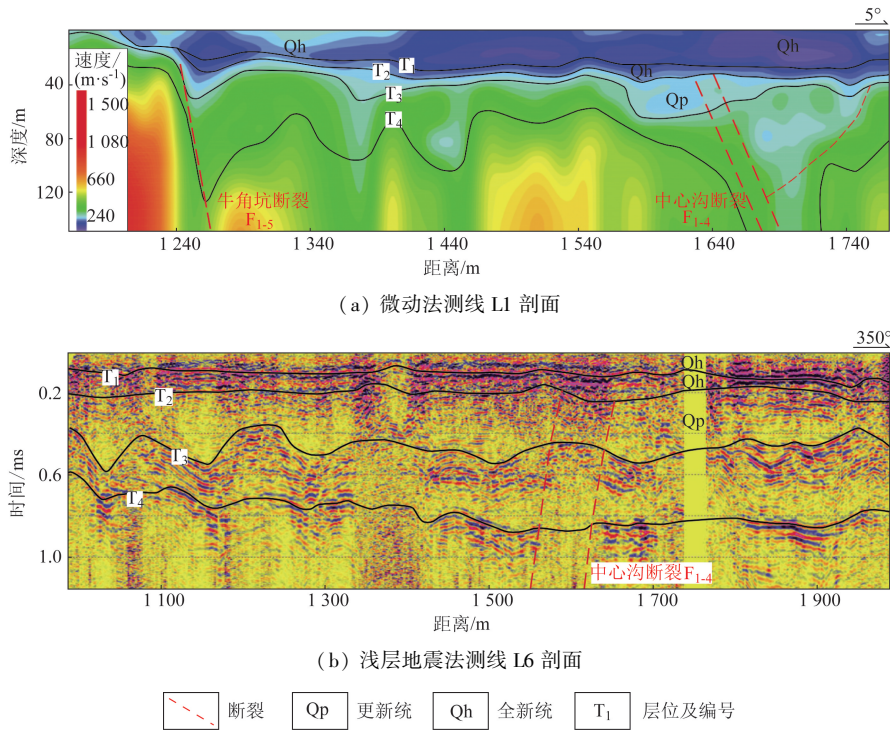
2.3 中心沟物探特征

对于中心沟地区隐伏于第四系中的断裂,利用微动法和浅层地震法,结合钻孔验证取得了良好效果。微动法利用地表日常微小振动的面波信息对地下介质结构进行研究,具有野外观测方便、不受电磁干扰等优点^[27]。浅层地震法主要利用剖面上丰富的反射波组特征来判定断层是否存在,并确定断层产状等参数,在断层定位及几何特征的判定上具有较高的精度^[28]。以上两种勘探方法被广泛应用于勘查隐伏断裂。

中心沟断裂(F_{1-4})隐伏于第四系中,结合微动法剖面、浅层地震法剖面及钻孔,可知剖面自上而下可分为 T_1 — T_4 共4个层位(图5), T_1 层位之上为人工堆积和全新统桂州组灯笼沙段,岩性为花岗岩堆石和淤泥; T_1 — T_2 层位为全新统桂洲组灯笼沙段—横栏段,沉积物为淤泥; T_2 — T_3 层位为上更新统礼乐组三角层,沉

积物为砂层及花斑黏土; T_3 — T_4 层位为上更新统礼乐组石排段—基岩强风化层,该层主要为砂层、卵石层、强风化层等; T_4 层位之下为花岗岩基岩层。微动法测线L1剖面显示出等值线凹陷和向深部延伸的低速异常带(图5(a)),识别出中心沟断裂(F_{1-4})和牛角坑断裂(F_{1-5})。中心沟断裂(F_{1-4})倾向北西,视倾角约 70° ,断裂附近, T_2 — T_3 层位行迹杂乱,存在明显异常,推测更新统被错断(图5(a));牛角坑断裂(F_{1-5}),倾向北西,视倾角约 80° ,产状与断裂地表露头一致。

浅层地震测量采用地震横波反射法,使用德国DMT公司的新型Summit X One地震仪,采用锤击震源激发,由西安地质仪器厂生产的SN4H-28 Hz横波检波器接收。测线L6断裂处显示波组不连续异常,这些断点与区域上中心沟断裂的发育一致。反射波组同相轴的错断现象均延伸至 T_2 、 T_3 层位之间,推测更新统被错断(图5(b))。



3 光释光样品采集与分析

3.1 样品采集

在深井拗断裂(F_{1-6})碎粉岩带内采集了2个光释光样品(图2,图3(a),(b)),采样过程首先选取碎粉岩带宽度约5 cm的部位,剥除表面20 cm

深度的碎粉岩,利用长度20 cm、直径5 cm、壁厚约1.5 mm的圆柱形304不锈钢钢管,在尾部套上不透光的塑料袋和锡箔纸,利用铁锤砸入碎粉岩带中,用不透光黑色塑料袋覆盖住钢管口和附近围岩,晃动钢管慢慢将其拔出,在完全拔出时,覆盖在钢管周围的不透光黑色塑料袋将尾部包裹,并用透明胶进行缠绕,保证钢管中部的碎粉岩未受光影响。

3.2 分析过程与结果

光释光测年原理为断裂带在活动过程中形成的石英颗粒埋藏后具有捕获电子的能力,当捕获的电子在实验室被光激发时,以光形式释放的能量可以换算为石英形成的年代^[29]。

样品测试在广州大学地理科学与遥感学院实验室完成,选取样品中段约 300 g 样品,去除杂质,留下 4 ~ 11 μm 的细粒石英颗粒。使用 Day-break 2200(美国)光释光仪对石英颗粒进行测试工作,设备蓝光光源波长为 470 nm,半宽 5 nm,最大功率为 60 mW/cm²;红外光源波长为 880 nm,半宽 10 nm,最大功率为 80 mW/cm²,使用 80% 功率进行测量,预热温度为每 10 s 260 ℃,试验剂量

预热温度为每 10 s 220 ℃。测片的辐照在 801E 辐照仪中进行,其 90Sr – Y β 放射源的照射剂量率约为 0.05 Gy/s。样品密封较好,将测得的含水量设定为石英沉积时的原始含水量,并对环境剂量率进行了修正。两个样品采用细颗粒简单多片再生法获得等效剂量(equivalent dose, De),用饱和指数方法进行拟合,生长曲线图显示样品再生剂量点不分散,生长曲线没有明显饱和,可以认为本批样品测试数据基本可信。

测试结果见表 2。两个样品的细粒石英颗粒年龄分别为(22.24 ± 1.04) ka 和(27.77 ± 2.99) ka,测试结果在误差范围内基本一致,显示该断裂带在晚更新世晚期仍有活动。

表 2 样品特征及光释光分析结果

Tab.2 Sample characteristics and optically stimulated luminescence analysis results

编号	岩性	成分	样品长度/cm	$\omega(U)/10^{-6}$	$\omega(Th)/10^{-6}$	$\omega(K)/\%$	年龄/ka
B038-1	花岗质碎粉岩	烟灰色石英、花岗岩角砾及少量花岗质糜棱岩	15	22.21 ± 1.11	22.77 ± 1.13	3.21	22.24 ± 1.04
B038-2	花岗质碎粉岩	烟灰色石英、花岗岩角砾及少量花岗质糜棱岩	15	16.30 ± 0.81	20.74 ± 1.03	3.26	27.77 ± 2.99

4 讨论

在中国地震局(原国家地震局)于 1982 年编制的《中国活动构造典型卫星影象集》^[11]中,依据岛屿、水下沙洲的线状排列和水下岸坡的陡坎形态,认为三灶断裂带部分存在活动性。潘建雄等^[13]在三灶岛东南侧的 NE 向断裂带中发现古地震形成的断层崖崩塌楔和地震构造楔,通过对比断块的形态,推测

曾发生过含 7 级以上强度的地震。在珠江口东岸的香港特别行政区,Ding 等^[30]、丁原章等^[31]及广东省工程防震研究院^[32]对贯穿全岛的 NE 向东涌—大埔海断裂开展了热释光年代测定,结果显示该断裂在 110.8 ~ 82.0 ka 存在活动(图 1)。前人在珠江口两岸对 NE—NEE 向断裂测年结果显示:断裂最新活动时间主要集中于 183 ~ 82 ka(图 1,表 3),时代为中更新世晚期—晚更新世早期,最年轻的年龄是位于三灶岛北东侧的 32 ka。

表 3 珠江口两岸 NE 向与 NEE 向断裂年龄统计

Tab.3 Statistics of NE and NEE faults ages on both sides of the Pearl River estuary

地区	地点	断裂名称	断裂走向	样品类型	年龄/ka	测试方法
香港	屯门蝴蝶湾 ^[31]	东涌—大埔海断裂	NE 向	断层物质	110.8 ± 9.2	TL
	大屿山阴澳笃 ^[31]		NE 向	断层泥	82 ± 6.8	TL
	黄泥屋 ^[32]		NE 向	剪切带物质	98.3 ± 6.3	TL
横琴	长隆站东侧	深井坳断裂	NEE 向	花岗质碎粉岩	22.24 ± 1.04	OSL
				花岗质碎粉岩	27.77 ± 2.99	OSL
三灶	东咀 ^[13]	东咀断裂	EW 向	碎粉岩	32.3 ± 2	TL
	老爷仔 ^[13]	老爷仔断裂	EW 向	碎粉岩	120	TL
	斜尾村西南侧 ^[33]			构造岩	183 ± 15.6	TL
	东咀 ^[13]	欧排咀—东咀断裂	NE—NEE 向	花岗质碎斑岩	180	TL
香洲	白莲山 ^[33]	白藤山—吉大断裂	NE—NEE 向	碎粉岩	142 ± 11.3	ESR
	湾仔 ^[33]	湾仔断裂	NE 向	糜棱质碎粉岩	540 ± 48.6	ESR
江门	大襟岛 ^[33]	高栏岛断裂	NE—NEE 向	碎粉岩	172.8	TL

本文通过地质填图、物探、钻探方法,查明了三灶断裂带在横琴地区的分布和变形特征,横琴地区自北向南可以厘定出 9 条规模较大的断裂(F_{1-1} — F_{1-9}),断裂整体走向为 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$,倾向北西,倾角为 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,在横琴地区延伸约 10 km,中心沟断裂等多条断裂组成的破碎影响带最宽可达 200 m。地表露头 and GCZ04 钻孔揭露的隐伏断裂显示:断裂构造岩组合主要为花岗质构造角砾岩、磨砾岩、碎裂岩、硅化岩和花岗质糜棱岩,部分变形强烈部位出现碎粉岩带。根据构造岩组合和配套次级断裂特征判断:断裂性质早期为压扭性—脆性—韧性走滑,晚期转变为张性走滑。在横琴深井坳断裂(F_{1-6})内采集的碎粉岩光释光测年结果为 (27.77 ± 2.99) ka 和 (22.24 ± 1.04) ka,与三灶岛北东侧的东咀断裂 (32.3 ± 2) ka 的年龄接近^[13],时代为晚更新世晚期。中心沟断裂(F_{1-4})上盘的 SWZ03 钻孔显示上更新统三角层沉积紊乱,中心沟微动勘探法测线 L1、浅层地震法测线 L6 显示断裂错断了更新统三角层,以上结果与深井坳断裂年龄结果相符,进一步明确在晚更新世晚期,三灶断裂带在横琴地区发生过一次较大规模的脆性断裂活动。

5 结论

(1) 三灶断裂带在横琴地区由一系列 NE—NEE 向断裂组成,整体走向为 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$,倾向北西,倾角为 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,在横琴地区延伸约 10 km。断裂性质早期为压扭性—脆性—韧性走滑,晚期转变为张性走滑。

(2) 通过微动法勘探、浅层地震勘探和钻探揭露,三灶断裂带的中心沟断裂(F_{1-5})和牛角坑断裂(F_{1-6})错断了上更新统三角层。

(3) 深井坳断裂(F_{1-6})带内的碎粉岩光释光年龄为 (27.77 ± 2.99) ka 和 (22.24 ± 1.04) ka,结合断裂带错断上更新统三角层的特征,判断其在晚更新世晚期发生过一次较大规模的脆性断裂活动。

参考文献 (References):

[1] 邱元禧,邱津松,李建超,等. 广东莲花山断裂带中、新生代多期复合变形变质带的基本特征及其形成机制的探讨[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊,1991:93—106.
Qiu Y X, Qiu J S, Li J C, et al. Deformational and metamorphic

features of Lianhuashan fault zone during Meso—Cenozoic time and mechanism of their formation[J]. Bulletin of the Institute of Geomechanics Cacs,1991:93—106.

[2] 邹和平,王建华,丘元禧. 广东南澳和莲花山韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其地质意义[J]. 地球学报,2000,21(4):356—364.
Zou H P, Wang J H, Qiu Y X. ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of the Nan'ao Shear Zone and the Lianhuashan Shear Zone in Guangdong Province and their geological significance[J]. Acta Geoscientia Sinica,2000,21(4):356—364.

[3] Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, et al. Major types and time—space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings [J]. Mineralium Deposita, 2013, 48(3):267—294.

[4] 汪礼明,王军,王核,等. 粤东莲花山断裂带动力变质作用与动力变质热液成矿[J]. 大地构造与成矿学,2018,42(5):908—917.
Wang L M, Wang J, Wang H, et al. Dynamic metamorphism origin for the tin—copper polymetallic mineralization in the Lianhuashan fault, Eastern Guangdong Province[J]. Geotectonica et Metallogenia,2018,42(5):908—917.

[5] 丁志磊,陈正乐,王晓虎,等. 粤东莲花山断裂带高山寨钨多金属矿床流体包裹体研究[J]. 矿物岩石,2019,39(1):7—14.
Ding Z L, Chen Z L, Wang X H, et al. Study of fluid inclusions of the Gaoshanzhai tungsten polymetallic deposit in Lianhuashan fault zone, Eastern Guangdong Province[J]. Mineralogy and Petrology,2019,39(1):7—14.

[6] 王晓虎,张文高,陈正乐,等. 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,2020,47(4):985—997.
Wang X H, Zhang W G, Chen Z L, et al. Deformation time limit of ore—controlling structures in Lianhuashan fault zone along the South China Coast: Constraints from zircon U—Pb age and stratigraphic age[J]. Geology in China,2020,47(4):985—997.

[7] 王军,汪礼明,公凡影,等. 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,2021,37(6):1921—1932.
Wang J, Wang L M, Gong F Y, et al. Temperature and pressure conditions of dynamic metamorphism with its constraints on polymetallic mineralization of tungsten, tin and copper in Lianhuashan fault zone in Eastern Guangdong Province [J]. Acta Petrologica Sinica,2021,37(6):1921—1932.

[8] 阳峰,陆野,李诗颖,等. 横琴粤澳深度合作区海域表层沉积物微量元素地球化学特征[J]. 中国地质调查,2024,11(6):76—85.
Yang F, Lu Y, Li S Y, et al. Geochemical characteristics of trace elements in marine surface sediments of Guangdong—Macao in—depth cooperation zone in Hengqin[J]. Geological Survey of China,2024,11(6):76—85.

[9] 张孟然,姜正龙. 珠江口盆地白云凹陷沉降特征分析[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2016,35(1):30—37.

- Zhang M R, Jiang Z L. Analysis of subsidence characteristics of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Journal of Shandong University of science and Technology (Natural Science), 2016, 35(1): 30–37.
- [10] 王国槐, 梁昊, 赵卫, 等. 珠江口南部海域表层沉积物中微塑料的空间分布及运移机制[J]. 中国地质调查, 2024, 11(3): 76–82.
- Wang G H, Liang H, Zhao W, et al. Spatial distribution and migration mechanism of microplastics in the surface sediments of the southern Pearl River Estuary[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(3): 76–82.
- [11] 国家地震局地震研究所, 国家地震局地质研究所. 中国活动构造典型卫星影像集[M]. 北京: 地震出版社, 1982.
- Earthquake Research Institute of the National Seismological Bureau, Geological Research Institute of the National Seismological Bureau. Typical Satellite Image Set of China Active Tectonics[M]. Beijing: Seismological Press, 1982.
- [12] 广东省地质矿产局七五七地质大队. 珠海区域地质综合调查报告(1:50 000) (唐家幅、斗门县幅、澳门幅、三灶圩幅、大横琴幅)[R]. 江门: 广东省地质矿产局七五七地质大队, 1989.
- The 757 Geological Brigade of Guangdong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Comprehensive Geological Survey Report of Zhuhai(1:50 000) (Tangjia, Doumen county, Sanzao, Large Henqin) [R]. Jiangmen: The 757 Geological Brigade of Guangdong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources; 1989.
- [13] 潘建雄, 黄日恒, 陈定国. 广东三灶岛发现史前大地震[J]. 南海研究与开发, 1994(2): 45–50.
- Pan J X, Huang R H, Chen D G. A prehistoric earthquake was found in Sanzao Island, Guangdong Province[J]. Research and Development of the South China Sea, 1994(2): 45–50.
- [14] Shu L S, Faure M, Jiang S Y, et al. SHRIMP zircon U–Pb age, litho– and biostratigraphic analyses of the Huaiyu Domain in South China – evidence for a neoproterozoic orogen, not Late Paleozoic – Early Mesozoic collision[J]. Episodes, 2006, 29(4): 244–252.
- [15] Shu L S, Faure M, Wang B, et al. Late Palaeozoic – Early Mesozoic geological features of South China; response to the Indosinian collision events in Southeast Asia[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2008, 340(2–3): 151–165.
- [16] 张文高, 王晓虎, 陈正乐, 等. 广东莲花山断裂带韧性剪切带变形特征及其与成矿的关系[J]. 中国地质, 2020, 47(4): 932–943.
- Zhang W G, Wang X H, Chen Z L, et al. The deformation characteristics of ductile shear zone and its relationship with mineralization in Lianhuashan fault zone, Guangdong Province[J]. Geology in China, 2020, 47(4): 932–943.
- [17] 杜继宇. 莲花山断裂带和长乐—南澳断裂带构造特征及活动时代[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- Du J Y. The Structural Features and Ages of Activities of Lianhuashan Fault and Changle – Nan'ao Fault[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [18] Li J H, Cawood P A, Ratschbacher L, et al. Building Southeast China in the late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone[J]. Earth – Science Reviews, 2020, 201: 103056.
- [19] 李出安, 阳峰, 林振文, 等. 珠海横琴粗中粒黑云母二长花岗岩的地质化学特征及年代学限制[J]. 广东地质, 2022(37): 1–8.
- LI C A, Yang F, Lin Z W, et al. Geochemical characteristics and geochronological constraints of coarse – medium grained biotite monzonitic granite in Hengqin, Zhuhai[J]. Guangdong Geology, 2022(37): 1–8.
- [20] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变[M]. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982.
- Huang Z G, Li P R, Zhang Z Y, et al. Formation, Development and Evolution of the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Science Popularization Press Guangzhou Branch, 1982.
- [21] 杨小强, Grapes R, 周厚云, 等. 珠江三角洲沉积物的岩石磁学性质及其环境意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(11): 1493–1503.
- Yang X Q, Grapes R, Zhou H Y, et al. Magnetic properties of sediments from the Pearl River Delta, South China: paleoenvironmental implications[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(11): 1493–1503.
- [22] 赵煊庭. 珠江河口湾伶仃洋的地形[J]. 海洋学报, 1981, 3(2): 255–274.
- Zhao H T. Bottom relief of ling ding yang of the Zhujiang river estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1981, 3(2): 255–274.
- [23] Liu C L, Fürsich F T, Wu J, et al. Late Quaternary palaeoenvironmental changes documented by microfaunas and shell stable isotopes in the southern Pearl River Delta plain, South China[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 2(4): 344–361.
- [24] 郑思琦, 林振文, 李出安, 等. 珠江三角洲第四纪沉积物初始沉积年龄及沉积演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 145–156.
- Zheng S Q, Lin Z W, Li C A, et al. Discussion on the quaternary initial sedimentary age and sedimentary evolution in the Pearl River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 145–156.
- [25] 卢帮华, 王萍, 王慧颖, 等. 珠江三角洲西缘西江断裂鹤山—磨刀门段的活动性[J]. 地震地质, 2020, 42(6): 1370–1384.
- Lu B H, Wang P, Wang H Y, et al. Latest progress on activity of Heshan – Modaoen segment, Xijiang Fault[J]. Seismology and Geology, 2020, 42(6): 1370–1384.
- [26] 董好刚, 陈宇达. 西江断裂三水至磨刀门段第四纪活动性再研究[J]. 热带海洋, 2017, 36(2): 26–32.
- Dong H G, Chen Y D. Re – visiting the quaternary activity of Xijiang fault from Sanshui to modaoen[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36(2): 26–32.
- [27] 张一梵. 微动勘探法在浅层探测中的研究与应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.

- Zhang Y F. Research and Application of Microtremor Survey Method in Shallow Exploration[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019.
- [28] 刘远志,刘胜,李大虎,等. 高分辨率反射波地震勘探在城市隐伏断裂探测中的应用——以成都天府新区苏码头断裂为例[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(9): 910–915.
- Liu Y Z, Liu S, Li D H, et al. Application of high resolution reflected seismic exploration in the detection of urban buried faults: Sumatou fault of Tianfu new district[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(9): 910–915.
- [29] 赖忠平, 欧先交. 光释光测年基本流程[J]. 地理科学进展, 2013, 32(5): 683–693.
- Lai Z P, Ou X J. Basic procedures of optically stimulated luminescence (OSL) dating[J]. Progress in Geography, 2013, 32(5): 683–693.
- [30] Ding Y Z, LAI K W. Neotectonic fault activity in Hong Kong: evidence from seismic events and thermoluminescence dating of fault gouge[J]. Journal of the Geological Society, 1997, 154: 1001–1007.
- [31] 丁原章, 黎权伟, 黄日恒, 等. 香港地区断裂构造的新活动性[J]. 华南地震, 1997, 17(2): 9–15.
- Ding Y Z, Li Q W, Huang R H, et al. New activity of the faults in Hong Kong [J]. South China Journal Of Seismology, 1997, 17(2): 9–15.
- [32] 广东省工程防震研究院. 新界西北部地震小区划试点研究: 地震对天然斜坡潜在影响调查[R]. 2010.
- GEERRI (Guangdong Engineering Earthquake Resistance Research Institute). Pilot seismic microzonation study in northwest new territories for the study of potential effect of earthquake on Natural Terrain – Investigation[R]. 2010.
- [33] 广东省工程防震研究院. 珠海横琴总部大厦工程场地地震安全评价报告[R]. 2011.
- Guangdong Engineering Earthquake Prevention Research Institute. Seismic safety evaluation report of Zhuhai Hengqin Headquarters Building project site[R]. 2011.

Characteristics and activity of Sanzao fault zone in Lianhuashan tectonic zone of Guangdong

LUO Junchao¹, LIN Zhenwen¹, LI Guanhua², LI Chu'an¹, YANG Feng¹, ZHANG Xiangxiang¹

(1. Guangdong Marine Geological Survey, Guangzhou Guangdong 510062, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Disaster Prediction and Prevention, Shantou University, Shantou Guangdong 515063, China)

Abstract: Sanzao fault zone is a branch of the western beam of Lianhuashan tectonic zone, and also the extension of the fault zone on the west bank of Pearl River estuary. This fault was defined as an active fault by existing data and research. The distribution characteristics and activity of Sanzao fault zone in Hengqin area were studied through detailed field geological survey, micro-motion method, shallow seismic exploration, drilling verification and clastic rock age test. The results show that the overall strike of Sanzao fault zone is NE – NEE trending and dipping north west, which dislocated the mottled clay of the Upper Pleistocene deltaic deposits. The results of optically stimulated luminescence (OSL) dating of clastic rocks in the fault zone are (27.77 ± 2.99) ka and (22.24 ± 1.04) ka, indicating a large-scale brittle fault activity in the Late Pleistocene in Hengqin area. The research could provide references for urban construction and disaster prevention and mitigation in Guangdong – Macao in-depth cooperation zone in Hengqin area.

Keywords: Sanzao fault zone; Lianhuashan tectonic zone; fault activity; optically stimulated luminescence; Hengqin area

(责任编辑: 魏昊明)