

引用格式: 杨肖肖, 胡道功, 贾丽云, 等, 2023. 海南琼华-莲塘断裂带第四纪活动特征 [J]. 地质力学学报, 29 (1): 127-137. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022020

Citation: YANG X X, HU D G, JIA L Y, et al., 2023. Quaternary activity characteristics of the Qionghua-Liantang fault belt in Hainan[J]. Journal of Geomechanics, 29 (1): 127-137. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022020

海南琼华-莲塘断裂带第四纪活动特征

杨肖肖^{1,2,3}, 胡道功^{1,2,3}, 贾丽云^{1,2,3}, 王超群^{1,2,3}, 孙东霞^{1,2,3}, 张磊^{1,2,3}
YANG Xiaoxiao^{1,2,3}, HU Daogong^{1,2,3}, JIA Liyun^{1,2,3}, WANG Chaoqun^{1,2,3}, SUN Dongxia^{1,2,3}, ZHANG Lei^{1,2,3}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
3. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心, 北京 100081
1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China*

Quaternary activity characteristics of the Qionghua-Liantang fault belt in Hainan

Abstract: The Qionghua-Liantang fault belt, located at the boundary between the Fushan depression and the Haikou uplift, is the result of the impact of the uneven extension of the NE-trending Beibu Gulf rift. The Qionghua-Liantang fault belt passes through the Changliu New District and the major projects of the island-looping high-speed railway in Haikou, directly impacting the planning and construction of the Hainan Free Trade Zone. The article uses tectonic geomorphic survey, geophysical exploration, and drilling exploration to reveal that the Qionghua-Liantang fault consists of three NW-trending buried and semi-buried normal faults, which are the Wuyuanhe-Daoxincun fault (F1-1), the Yongzhuangshuiiku fault (F1-2), and the Haikouzhuanchang fault (F1-3). The width of the Qionghua-Liantang fault belt is about 1.8 km, and the length is about 17 km. The vertical displacement of the fault belt is 8.7~41.6 m since the Quaternary. The latest active age of these three faults is the late Pleistocene; the vertical activity rate was less than 0.1 mm/a. It is worth noting that the vertical activity rate of the Haikouzhuanchang fault (F1-3) is higher than the other two faults and has more vigorous activity. Combining the tectonic background, the latest active age of the Qionghua-Liantang fault, and its relationship with Quaternary volcanic activity, this paper puts forward suggestions on the planning and construction of the Hainan Free Trade Zone and building avoidance of active fault.

Keywords: Qionghua-Liantang fault belt; fault activity; avoidance of active fault; Hainan; Quaternary period

摘要: 位于琼北福山凹陷与海口隆起边界的琼华-莲塘断裂带, 是调节北东向北部湾陆内裂谷不均匀伸展的结果, 该断裂带穿过海口市长流新区与环岛高铁重大工程, 对海南自贸区规划建设具有直接影响。文章采用构造地貌调查、地球物理探测与钻孔联合剖面等方法, 揭露琼华-莲塘断裂带由五源河-道心村断裂、永庄水库断裂及海口砖瓦厂断裂共 3 条北西向平行展布的高角度活动断裂组成, 呈隐伏或半隐伏状态, 总体表现为正断层性质。断裂带宽约 1.8 km, 长度约 17 km, 第四纪以来断裂垂直位移为 8.7~41.6 m, 均属于较强活动断裂。3 条断裂最新活动时代均为晚更新世, 垂直位移速率 < 0.1 mm/a, 其中以海口砖瓦厂断裂错动速率最大。结合琼华-莲塘断裂带的形成构造背景、最新活动时代, 及其与第四纪火山活动的关系, 文章提出了海南自贸区规划建设及工程避让活动断裂的建议。

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190306, DD20190317)

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grants DD20190306 and DD20190317).

第一作者: 杨肖肖 (1988—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事第四纪地质与活动构造研究。E-mail: yangxiaoxiao57@163.com

通讯作者: 胡道功 (1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事新构造与活动构造研究。E-mail: hudg@263.net

收稿日期: 2022-05-29; 修回日期: 2022-10-09; 责任编辑: 吴芳

关键词: 琼华-莲塘断裂带; 断裂活动性; 活动断裂避让; 海南; 第四纪

中图分类号: P553 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2023) 01-0127-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022020

0 引言

琼北地区位于华南地块、南海地块及印支地块交汇部位,属于南海北部陆缘地震带和雷琼断陷盆地的组成部分。该地区新生代以来构造运动强烈,地震与火山活动频繁(陈恩民和黄詠茵,1984;黄镇国和蔡福祥,1994;樊祺诚等,2004;闫成国和江娃利,2007;丁莹莹等,2018;李薇等,2019),1605年琼山大地震直接造成该地区东寨港大陆断陷成海(陈恩民和黄詠茵,1989)。国内不同学者对琼北地区活动断裂,如马袅-铺前断裂带和琼华-莲塘断裂带,开展了长期调查,并取得很多重要进展。刘华国等(2018)通过地球物理和联孔剖面综合研究,发现了马袅-铺前断裂带具有全新世活动迹象,并对东寨港沉降具有明显的控制作用(丁莹莹等,2018);王超群等(2021,2022)揭示了马袅-铺前断裂带是琼山大地震的发震断裂;徐锡伟等(2015)在海口市城市活动断裂调查中对琼北地区琼华-莲塘断裂带进行了地球物理探测和钻探验证,认为该断裂带在晚更新世早期有过活动,其南段寒武系基岩破裂带是在新构造运动强烈隆升的背景下产生的(李坪等,1988)。但是,由于琼华-莲塘断裂带主要呈隐伏状态且目前已有的钻探揭露深度较浅(李坪等,1988;徐锡伟等,2015),琼华-莲塘断裂带的研究仍较为薄弱,还不能有效覆盖断裂的空间分布及其活动性。

琼华-莲塘断裂带是海口隆起与福山凹陷分界断裂带之一(闫成国和江娃利,2007;谢振福等,2010),该断裂带由五源河-道心村断裂、永庄水库断裂及海口砖瓦厂断裂共3条平行展布的断裂组成,其北端伸入琼州海峡,向南经琼华村、永庄水库、莲塘村往东南延伸至道心村一带,走向北西,断裂倾角较陡。该断裂穿过海口市长流新区以及环岛高铁等重大工程,对海南自贸区规划建设具有直接影响。因此,通过对活动断裂的详细调查,特别是通过钻孔联合剖面以揭示隐伏活动断裂空间展布及活动性参数,不仅对于深入了解该断裂带未来地震危险性具有重要的科学意义,对于海南自贸区规划建设也有重要的现实意义。

文章通过野外填图、地球物理探测、钻探验证和年代学测试,对琼华-莲塘断裂带开展调查与研究工作;并将详细介绍调查获得的琼华-莲塘断裂带空间展布、活动性及其与火山活动的关系,简要分析活动断裂对工程建设可能产生的影响,为海南自贸区建设提供地质支撑。

1 区域地质背景

南海北部大陆边缘受到印度板块与菲律宾海板块的持续挤压作用和南海洋壳形成与俯冲的影响(张虎男和赵希涛,1984;张进江等,1999;张岳桥,2004),在古南海向南俯冲导致的拖曳作用下,产生北西-南东向拉张作用(雷超等,2011;Li et al.,2015),形成北东至北东东向展布的断裂系和珠江口盆地、琼东南盆地等被动大陆边缘盆地,以及北部湾陆内裂谷盆地(解习农等,2015)。为调节北东至北东东向断裂的正断活动,在北部湾盆地福山凹陷东界形成了北西向展布的长流-仙沟断裂带和琼华-莲塘断裂带(图1a),与东西向王五-文教断裂带及北东向临高断裂带,共同控制了福山凹陷厚度>7000m的新生代沉积(Li et al.,2008)。在古南海的俯冲、南海西北次海盆扩张、洋脊向西南次海盆的跃迁、南海扩张期及扩张后岩浆活动(雷超等,2011;解习农等,2015)等区域构造-热事件的作用下,盆地内部及盆地边界断裂至今依然处于较强活动状态,其最新活动导致全新世火山口沿长流-仙沟断裂分布以及5级以上地震震中沿东西向断裂带分布。

地球物理勘查和钻探揭示琼华-莲塘断裂带以西的新生代地层厚度超过7000m,以东的新生代地层厚度仅1000~2000m(Li et al.,2008)。沿琼华-莲塘断裂带出露的地层主要有中更新统北海组(Qp^2b)和多文组(Qp^2d)、上更新统八所组(Qp^3bs)和道堂组(Qp^3d)、全新统石山组(Qh^1s)、琼山组(Qh^2q)和烟墩组(Qh^3y)等(图1b)。

上述地层之下隐伏的新生代地层主要为新近系中新统灯楼角组(N_1d)、上新统海口组(N_2h)及第四系下更新统秀英组(Qp^1x),古近系较薄。北海组岩性为紫红、棕红、褐红色粉砂质黏土与砂砾层,厚



a—海口砖瓦厂断层剖面、浅层人工地震测线以及钻孔分布图；b—永庄水库高密度电阻率法测线分布图；c—琼华村钻孔分布图

图2 琼华—莲塘断裂带剖面与地球物理测线及钻孔分布图

Fig. 2 Profile of the Qionghua-Liantang fault belt and distribution of geophysical survey lines and boreholes

(a) Profile of the Haikouzhuanwachang fault section and distribution of shallow artificial seismic lines and boreholes; (b) Distribution of high-density geophysical survey lines using the electrical method along the Yongzhuangshuiku fault; (c) Borehole distribution in Qionghua village

纪活动特征。

2.1 海口砖瓦厂剖面记录的琼华—莲塘断裂带活动特征

海口砖瓦厂剖面位于海口市那合村南砖瓦厂内(图2a),剖面呈北东向展布,全长60 m,高5.5~6.5 m,直接记录了琼华—莲塘断裂带海口砖瓦厂断裂的第四纪活动特征(图3a)。该剖面出露地层有海口组、秀英组、北海组及八所组,剖面岩性自上至下可分为7层(图3b—3h),分别为:层①人工填土;层②八所组浅黄褐色中粗砂,在剖面东侧该层被侵蚀尖灭;层③北海组浅棕红色中细砂,偶含粗砂,砂的成分主要为石英;层④—⑥为秀英组,其中,层④是黄褐色、棕红色、灰白色等杂色黏土,层⑤为铁质结核,表层呈红褐色,风化略严重,层⑥是黄褐色、棕红色、灰白色等杂色黏土,偶含炭屑;层⑦为海口组青灰色纹层状黏土与粉砂质黏土。

根据露头剖面显示,其发育有两条断层(F_{1-3a} 、 F_{1-3b}),西侧断层 F_{1-3a} 为主断层,产状为 $80^{\circ}\angle 67^{\circ}$,北海组(层③)底界垂直断距约1.1 m(图3d),断层面上张裂隙发育直立擦痕(图3f),铁质结核层(层⑤)受断裂活动产生牵引变形(图3g),并且沿断层面发育铁质结核层(图3h),擦痕和地层变形特征指示断层正断活动。在 F_{1-3a} 断层面上盘浅黄褐色中粗砂中取OSL测年样品(图3d),测年结果揭示层②为上更新统八所组(图3b),说明断层 F_{1-3a} 晚更新世以来仍有活动。东侧反倾的次级断层 F_{1-3b} 产状为 $260^{\circ}\angle 65^{\circ}$,错断层③—⑥,断错最新地层为中更新世北海组,上被人工填土覆盖,推测最新活动时代为晚更新世,断层垂直断距约0.5 m,断层上下盘地层牵引

变形特征显示其亦为正断层。

2.2 断裂带地球物理特征

高密度电阻率法、浅层地震勘探是隐伏活动断裂探测常用的地球物理勘探方法,高密度电阻率法可探测第四系结构以及活动断裂上断点位置及埋深情况,浅层地震勘探能解决隐伏断裂定位及深部结构问题(宋春华等, 2021; 张浩等, 2021)。

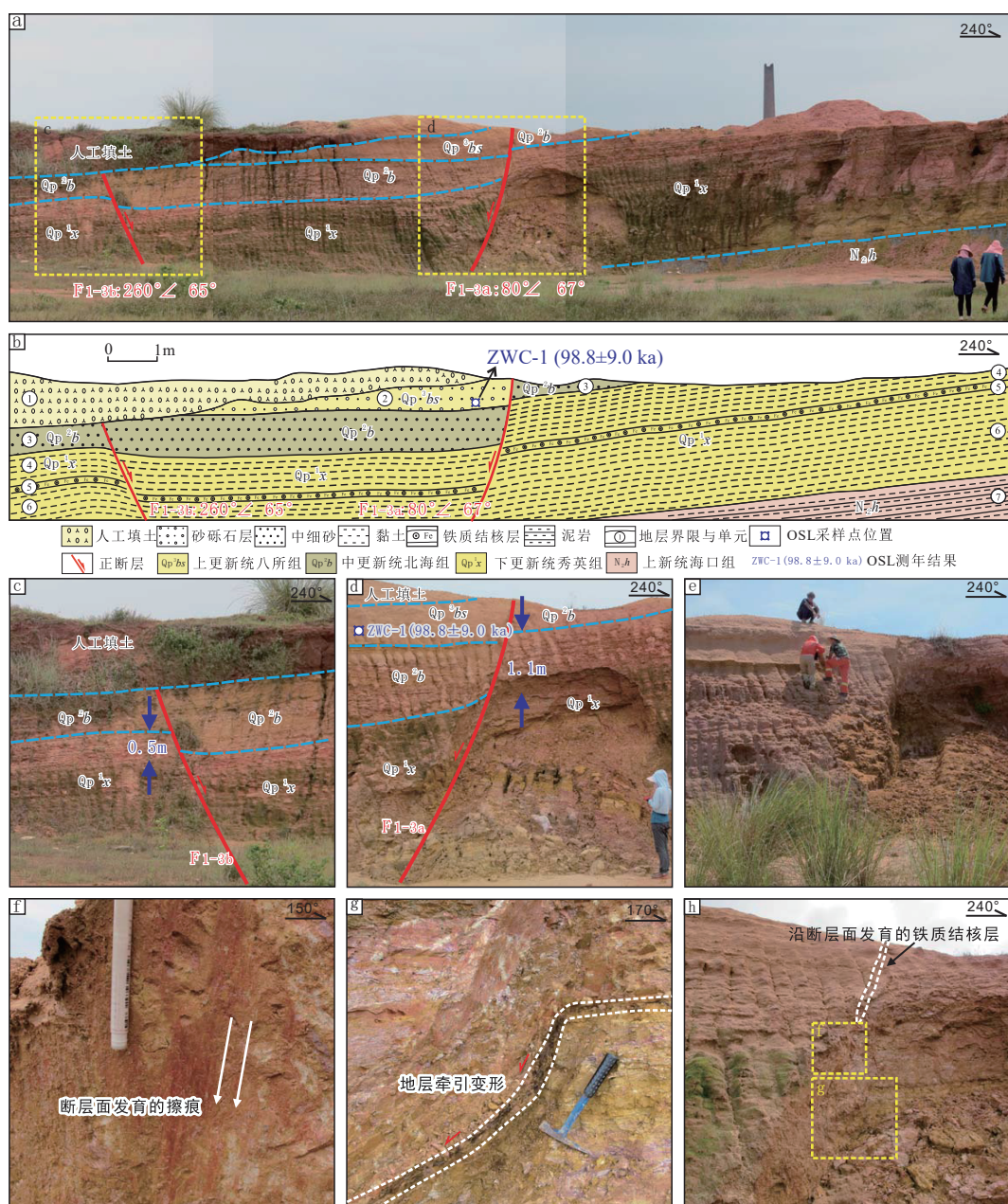
为探测琼华—莲塘断裂带平面展布位置、上断点的埋深以及深部结构特征,在永庄水库西侧和海口砖瓦厂分别布置高密度电阻率法和浅层人工地震勘探剖面(图2a、2b)。

2.2.1 高密度电阻率法探测

高密度电阻率法测量采用Geopen三维高密度电阻率法工作站,点距10 m,通过数据质量优化与地形校正后,采用Earth Imager高密度数据处理软件处理电阻率数据反演成像。永庄水库高密度电阻率法勘探线P26位于陈礼村至本夏村之间,测线长680 m,测量方向由西到东(图2b)。P26测线的温纳 β 装置反演电阻率等值线图像显示(图4a),剖面中纵向电阻率电性层状分布明显,电性界面显示清楚,浅部中高阻层显示为第四系松散堆积物,深部低阻反映的是海口组黏土与粉砂质黏土层的特征(图4b)。反演电阻率等值线图水平方向电阻率电性具有明显差异,在距起点430~450 m处可见倾向南西的低阻异常条带,断裂范围较为破碎而富含地下水,导致具低阻特征,判定为断裂异常带,解释为五源河—道心村断裂(F_{1-1}),其视倾向南西,视倾角约 60° 。

2.2.2 浅层人工地震探测

浅层地震勘探采用ALLSEIS一体式无缆地震



a—海口砖瓦厂断层剖面; b—海口砖瓦厂断层剖面图; c— F_{1-3b} 断层垂直错距 0.5 m; d— F_{1-3a} 断层垂直错距 1.1 m; e—OSL 样品采样点; f— F_{1-3a} 断层擦痕特征; g—沿 F_{1-3a} 断层形成的地层牵引变形; h—沿 F_{1-3a} 断层面发育的铁质结核

图 3 海口砖瓦厂断裂特征

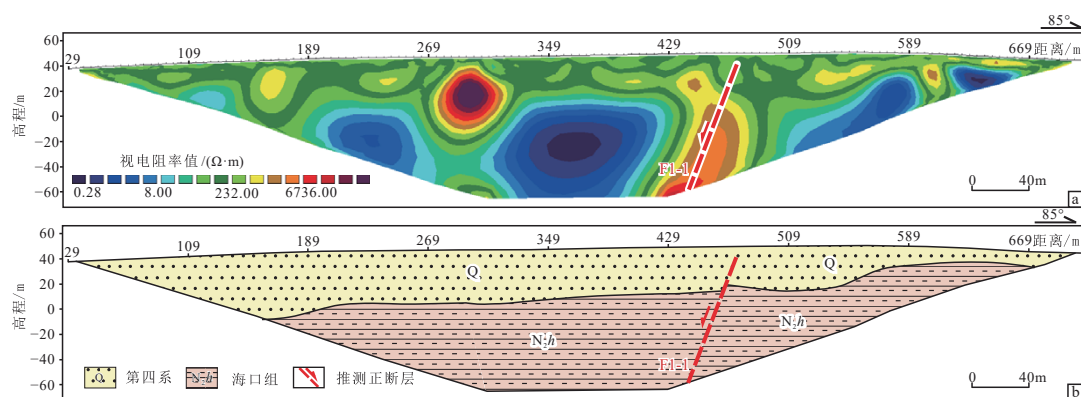
Fig. 3 Characteristics of the Haikouzhuanwachang fault

(a) Picture of the Haikouzhuanwachang fault section; (b) Schematic diagram of the Haikouzhuanwachang fault section; (c) Characteristics of the secondary fault (F_{1-3b}); vertical offset of this fault is 0.5 m; (d) Characteristics of the secondary fault (F_{1-3a}); vertical offset of this fault is 1.1 m; (e) OSL sampling location; (f) Characteristics of fault slickenside in F_{1-3a} ; (g) Characteristics of stratum deformation; (h) Iron concretion along the F_{1-3a} surface

采集站与锤击高效宽频激发震源, 通过高密度激发, 提高近道覆盖次数以改善浅层资料信噪比, 从而获得高分辨率结果。根据现场实际地质条件, 采用道间距 3 m, 炮间距 3 m, 采样率 1 ms, 覆盖次数 88 次, 震源震动次数 3 次, 接收道数 105 道的方案进

行勘探。

CDZ08 测线位于海口市那合村西南, 测线走向 $N36^{\circ}E$, 长度 312 m (图 2a)。根据剖面反射同相轴的振幅与频率等特征, 可揭示一组强能量的同相轴 (T1) (图 5a)。T1 具有连续性好和能量强的特征,

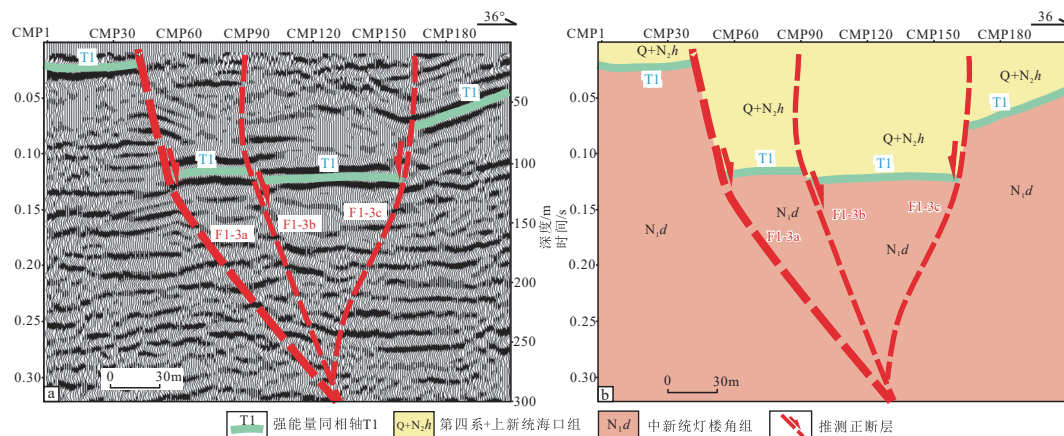


a—视电阻率断面图；b—高密度电阻率法剖面解释结果

图4 五源河—道心村断裂高密度电阻率法勘探剖面

Fig. 4 Exploration profile of the Wuyuanhe–Daoxincun fault using high density resistivity

(a) Apparent resistivity section; (b) Interpretation results using high density resistivity



a—浅层人工地震勘探剖面；b—浅层人工地震勘探剖面解释结果

图5 海口砖瓦厂断裂浅层人工地震勘探剖面

Fig. 5 Exploration profile of the Haikouzhuangwanchang fault using shallow artificial seismic reflection

(a) Exploration profile of the shallow artificial seismic reflection; (b) Interpretation results of the shallow artificial seismic exploration profile

在 CMP 点 1—40、40—90 和 90—170 处埋深分别为 18~30 m、110 m 和 117~125 m，层面近水平；在 CMP 点 170~209 处埋深为 45~70 m，层面视倾向西，视倾角约 10°。结合区域钻孔资料，推测该界面为上统海口组与中新统灯楼角组之间分界面（图 5b）。

地震剖面显示，在 CMP 号 40、90 和 170 附近，T1 同相轴存在明显错动迹象（图 5b），发现 3 条断层，在地面露头剖面可见的主断层 F_{1-3a} 与次级断层 F_{1-3b} 的东侧发现了次级断层 F_{1-3c}。F_{1-3a} 断层视倾向东，视倾角约 45°~80°，上陡下缓，以正断活动为主，上断点近地表，上盘 T1 同相轴的深度为 115 m，下盘 T1 同相轴的深度为 25 m 左右，错距约为 90 m，推测为主干断层。F_{1-3b} 断层视倾向东，视倾角约 80°，产状陡倾，以正断活动为主，上断点埋深约 70 m，上

盘 T1 同相轴的深度为 125 m，下盘为 115 m 左右，错距约为 10 m，为平行海口砖瓦厂主断层的次级断层（图 5b）。F_{1-3c} 断层视倾向西，视倾角约 60°~80°，产状上陡下缓，以正断活动为主，上断点近地表，上盘 T1 同相轴的深度为 125 m，下盘为 48~70 m，错距约为 55 m，亦为次级断层。

2.3 断裂带钻孔联合剖面特征

根据物探剖面推断的断裂位置及地表调查陡坎的延伸方向进行钻孔联合剖面，在海口砖瓦厂布设 5 个工程地质钻孔进行断层验证，并结合琼华村水文钻孔资料进行联合剖面分析（图 2a、2c），以详细揭示断裂位置与活动特征。

2.3.1 琼华村钻孔剖面

琼华村钻孔联合剖面位于琼华村附近，由 7 个

水文钻孔组成, 分别为 ZK5-2、ZK5-1、ZK5-3、ZK5、C34、C33 和 ZK2(图 2c)。联合剖面揭露的地层自上而下可分为琼山组青灰色淤泥质黏土和砂、北海组中细砂、道堂组玄武岩、秀英组杂色黏土、秀英组砂砾石、海口组褐色黏土、海口组粉细砂和贝壳碎屑岩。剖面中海口组与灯楼角组界面(B1)、海口组三段贝壳砂砾岩层(B2)、海口组顶部褐色黏土层(B3)和秀英组杂色黏土顶界面(B4)可作为判断断裂是否存在及最新活动的标志层(图 6)。

由 B1 标志层的断错解释出倾向南西的五源河—道心村断裂(F_{1-1}), 由 B3 和 B4 标志层的断错解释出倾向北东的海口砖瓦厂断裂(F_{1-3})(图 6)。钻孔 ZK5-1 与 ZK5-3 之间 F_{1-1} 断裂上、下盘 B1 和 B2 标志层断距分别为 10.7 m 和 9.7 m, 指示断裂在海口组沉积结束之后开始活动, B3 和 B4 标志层断错 15.8 m 和 11.1 m, 断距大于下部地层可能是由于古河流侵蚀作用所致, B4 标志层发生明显断错, 指示断裂 F_{1-1} 为中—

晚更新世活动断裂。断裂 F_{1-1} 断错 B1 标志层 10.7 m, 断裂第四纪以来垂直位移速率分别为 4.1 mm/ka。钻孔 C33 与 ZK2 之间断裂 F_{1-3} 断错 B3 和 B4 标志层, 秀英组杂色黏土顶界错距 21.1 m, 海口组褐色黏土顶界错距 15.9 m, 揭示断裂 F_{1-3} 表现为北东盘下降、南西盘上升, 揭示该断裂倾向北东, 以正断活动为主, 错断最新地层亦为中更新统北海组, 断裂最新活动时代为中—晚更新世。 F_{1-3} 断裂断错 B4 标志层 21.1 m, 断裂中更新世以来垂直位移速率为 27.1 mm/ka。

2.3.2 海口砖瓦厂钻孔联孔剖面

海口砖瓦厂钻孔联合剖面位于海口砖瓦厂至沙坡水库, 钻孔联合剖面呈北东向展布, 由 9 个钻孔组成, 单孔深度 85.9~296.9 m 不等, 其中钻孔 ZK2—ZK2-7 为揭示琼华—莲塘断裂带第四纪活动特征而实施的钻探验证工程地质钻孔, CK53、CK71 和 ZK1 钻孔资料为水文地质钻孔(图 2a)。联合剖面

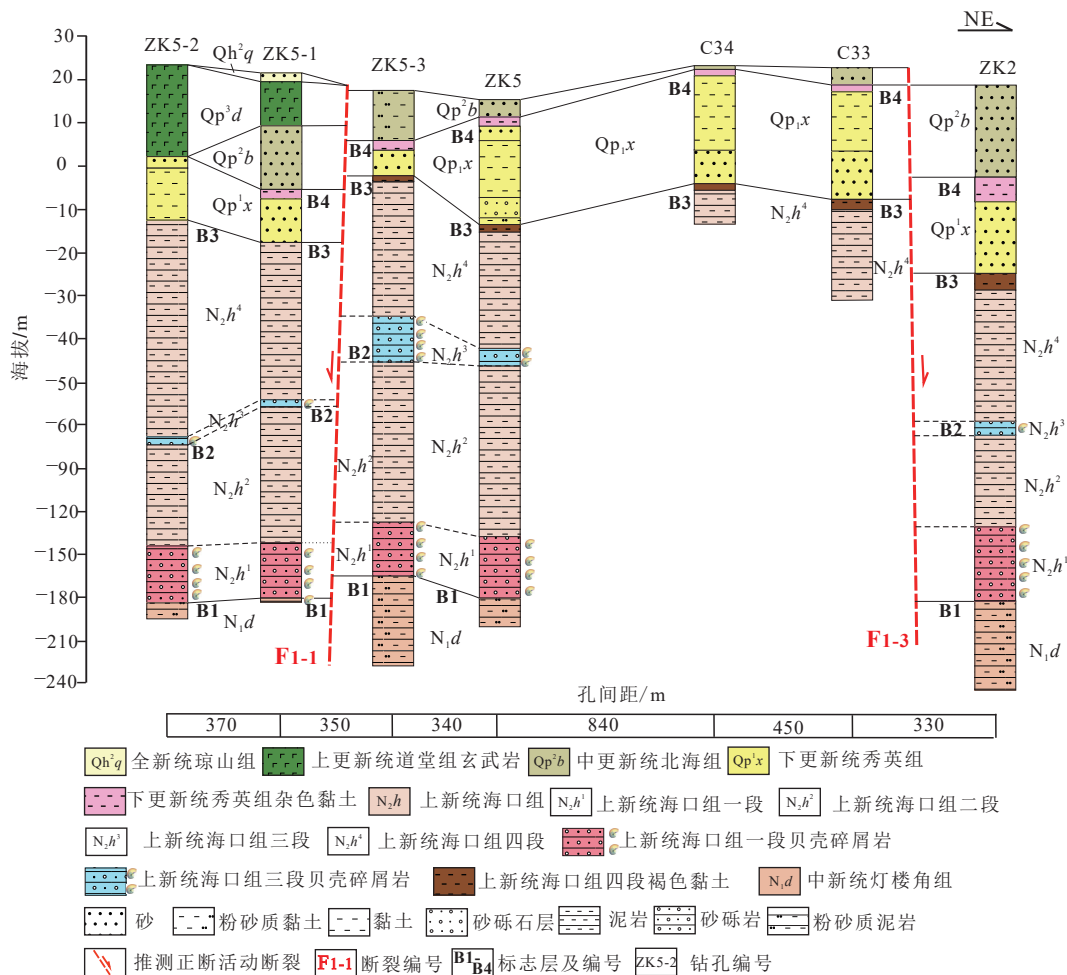


图 6 琼华村钻孔剖面

Fig. 6 Geological section of the composite drilling across the Qionghua-Liantang fault in Qionghua village

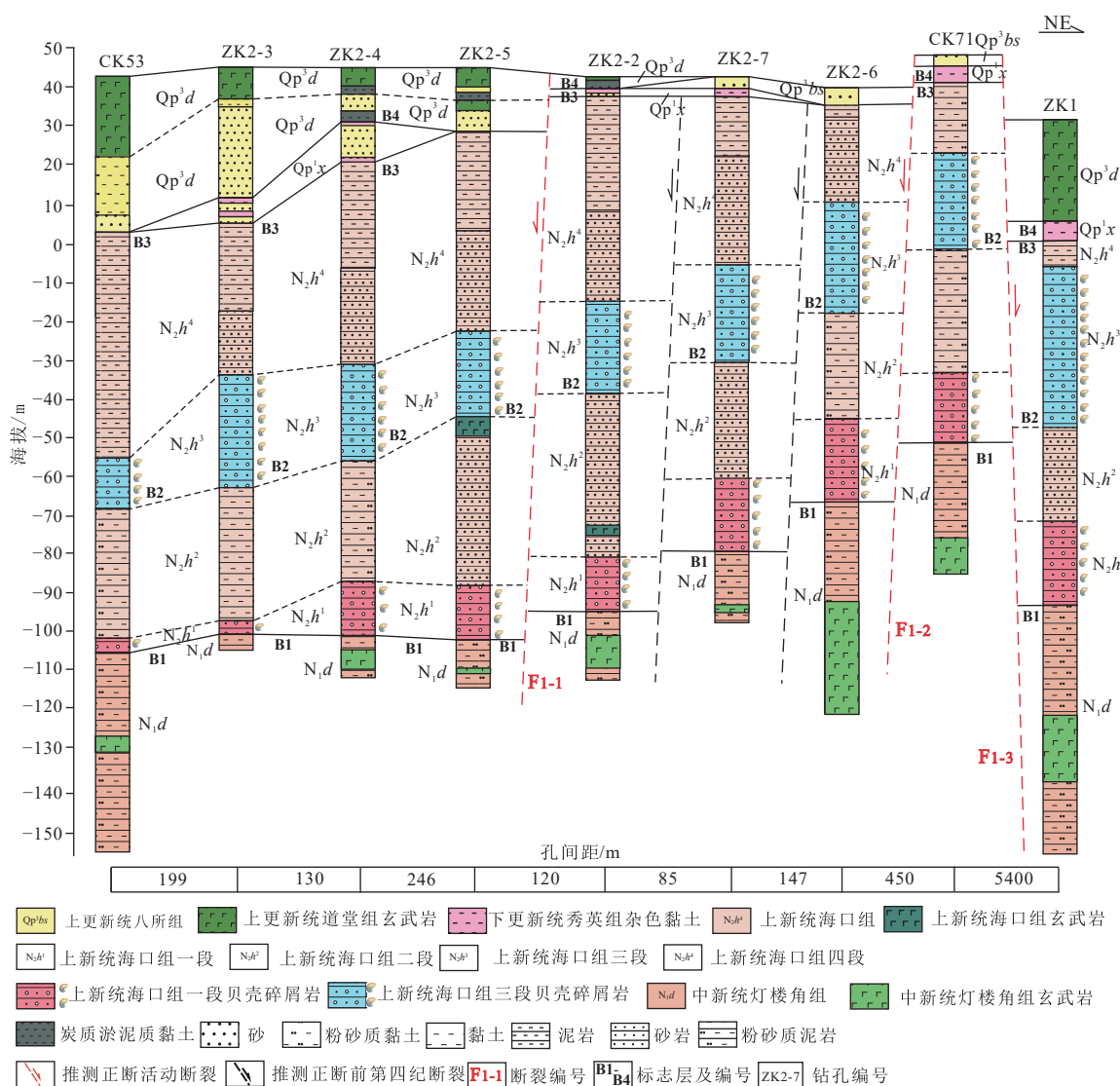
揭露的地层包括道堂组深灰色中粗砂、淤泥质黏土及玄武岩、秀英组杂色黏土及粉细砂、海口组青灰色黏土、含生物碎屑中细砂、贝壳碎屑岩及玄武岩、灯楼角组含海绿石中细砂、粉细砂与玄武岩。剖面中海口组与灯楼角组界面(B1)、海口组三段贝壳砂砾岩层(B2)、海口组顶部(B3)和秀英组杂色黏土顶界面(B4)可作为判断断裂是否存在及最新活动的标志层,共发育五源河-道心村断裂(F_{1-1})、永庄水库断裂(F_{1-2})及海口砖瓦厂断裂(F_{1-3})3条活动断裂和2条前第四纪断裂(图7),其中断裂 F_{1-1} 、 F_{1-2} 和2条前第四纪断裂均为倾向南西,正断活动, F_{1-3} 断裂倾向北东,亦以正断活动为主。

F_{1-1} 断裂上、下盘B1和B2标志层断距分别为8.7 m和7.0 m,由于古河流的侵蚀作用,断裂上盘

ZK2-5中B3和B4标志层缺失,以ZK2-4保留的B4标志层估算B4标志层断距为10.1 m,其断距大于B1和B2标志层的断距说明断裂上盘第四纪沉积遭受过侵蚀作用,B4标志层发生明显断错,指示 F_{1-1} 断裂为晚更新世活动断裂,4.3 m的断距代表了晚更新世以来的断裂最大垂直断距。

ZK2-2和ZK2-7之间的断裂上、下盘B1和B2标志层断距分别为14.7 m和8.2 m,上覆秀英组杂色黏土和八所组地层无明显断错,为前第四纪断裂;ZK2-7和ZK2-6之间的断裂上、下盘B1和B2标志层断距分别为12.2 m和16.1 m,上覆秀英组和八所组地层无明显断错,断裂为前第四纪断裂。

F_{1-2} 断裂上、下盘B1和B2标志层断距分别为17.3 m和16.1 m,断距基本一致说明断裂在海口组



沉积结束之后开始形成并发生垂直位移, 断裂上盘 ZK2-6 中 B3 和 B4 标志层由于河流侵蚀而缺失, 参考 ZK2-7 中 B3 和 B4 标志层海拔可估算 F_{1-2} 断裂断错 B3 和 B4 标志层分别为 4.4 m 和 5.0 m, 该断裂在晚更新世发生过明显的正断活动, 八所组在断裂两盘存在明显的高差, 由于河流相沉积横向变化较大, 八所组垂直位移量具有不确定性。

F_{1-3} 断裂上、下盘 B1、B2、B3 和 B4 标志层断距分别为 41.6 m、46.8 m、41.2 m 和 37.7 m, 基本相同的断距指示断裂在早更新世秀英组沉积之后开始强烈活动。 F_{1-3} 断裂上覆道堂组具有明显断错, 由于断裂两侧岩性不同且两孔之间距离较大, 判断晚更新世以来位移量及最新活动时代皆具不确定性, 但位于 CK71 孔东侧的断裂剖面(图 3)指示该断裂为晚更新世断裂。

由 B1、B2 和 B3 标志层断距分析, 海口组一段和三段贝壳砂砾岩层除受古地理影响厚度略有变化外, 断裂附近的地层厚度基本相同, 不具有同沉积断裂的特征, 五源河-道心村断裂、永庄水库断裂及海口砖瓦厂断裂均在海口组沉积结束之后开始活动(图 7), 因此, B1 标志层断错量代表了第四纪以来断裂的总位移量。断裂 F_{1-1} 、 F_{1-2} 和 F_{1-3} 的 B1 标志层位移量分别为 8.7 m、17.3 m 和 41.6 m, 第四纪以来垂直位移速率分别为 3.3 mm/ka、6.7 mm/ka 和 16.1 mm/ka, 其中 F_{1-3} 活动速率最大, 但均小于 0.1 mm/a。尽管断裂活动速率较小, 按活动时代判断 3 条断裂均为较强活动断裂。

根据上述各断裂平均活动速率和最新活动时代, 按照中国地质调查局《活动断层与区域地壳稳定性调查评价规范》标准, F_{1-1} 、 F_{1-2} 及 F_{1-3} 断裂均为较强活动断裂, 钻孔 ZK2-2 和 ZK2-6 之间发育的 2 条断裂为前第四纪断裂(图 7)。

3 琼华-莲塘断裂带晚第四纪活动与火山活动关系的讨论

琼华-莲塘断裂带与长流-仙沟断裂带共同构成了海口隆起与福山凹陷的边界(图 1a), 跨长流-仙沟断裂带的钻孔联合剖面探测表明, 该断裂带在晚更新世晚期以来不活动, 晚更新世晚期以来的活动主要表现在作为深部岩浆的上涌通道(闫成国和江娃利, 2007), 但穿越琼北第四纪火山与北西向断裂带的宽频大地电磁反演显示, 深部近直立的低阻体并不受西倾的长流-仙沟断裂带及琼华-莲塘断裂带控制, 在长流-仙沟断裂带以西的福山凹陷和琼华-莲塘断裂带以东的云龙隆起中存在上地壳低阻体, 同时下地壳和上地幔顶部存在相对低阻的层, 指示琼北第四纪火山区存在两个岩浆运输的上升通道(Liu et al., 2021), 面积性 AMT 研究也显示该低阻体并不受北西向断裂带控制(Liu et al., 2019), 即长流-仙沟断裂带与琼华-莲塘断裂带并不是深大断裂, 该断裂只是作为调节北东向北部湾陆内裂谷不均匀伸展的上地壳表层断裂, 尽管该断裂带控制了福山凹陷新生代以来的沉积, 但并不控制深部岩浆路径, 由钻孔和地球物理探测资料控制的福山凹陷构造剖面证实长流-仙沟断裂带与琼华-莲塘断裂带均不构成火山通道, 但近地表岩浆会沿断裂带喷发(图 8)。

火山活动区由于上地幔上隆, 大量岩浆频繁上涌与喷溢, 热流值较高, 因此一般不易积聚应力和发生大于 6.5 级的地震(李坪等, 1988)。如采用统计得出的中国东部活动断裂长度(L)与地震震级的关系式 $M=4.094+1.699 \log L$ (董瑞树等, 1993)估算, 琼华-莲塘断裂可能发生的地震震级为 $M 5.3$ 级。因此, 琼华-莲塘断裂带发生大于 6.5 级地震的可能

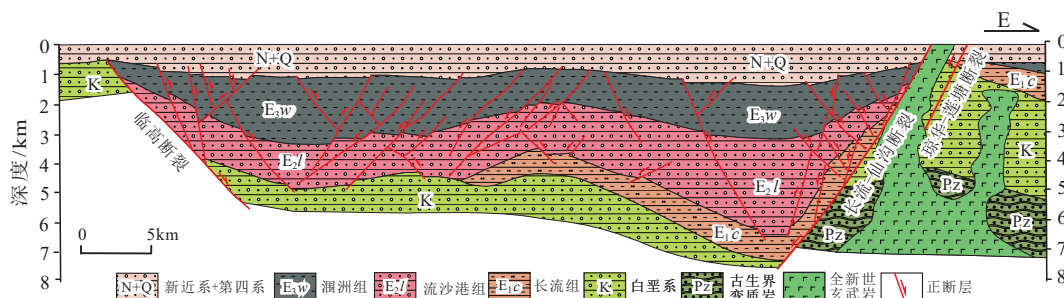


图 8 福山凹陷及琼华-莲塘断裂带剖面图(据 Li et al., 2008 修改)

Fig. 8 Sections of the Fushan depression and the Qionghua-Liantang fault belt (modified from Li et al., 2008)

性较小。琼华-莲塘断裂带向南东终止于全新世火山岩表明该断裂带南段被火山所吞噬,这将进一步减少琼华-莲塘断裂带发生大地震的可能性。

4 结束语

综合琼华-莲塘断裂带的地质、地球物理及钻孔分析结果,得出以下主要认识。

(1) 琼华-莲塘断裂带由五源河-道心村断裂(F_{1-1})、永庄水库断裂(F_{1-2})及海口砖瓦厂断裂(F_{1-3})共3条北西向平行展布的高角度断裂组成,呈隐伏-半隐伏状态,总体表现为正断性质。3条断裂第四纪以来发生的垂直位移为8.7~41.6 m不等,最新活动时代均为晚更新世,垂直位移速率小于0.1 mm/a,均属于较强活动断裂。

(2) 琼华-莲塘活动断裂带对穿越该断裂带的铁路与公路等线状工程影响较大,拟建或运营中的环岛高速等工程需穿越1.8 km宽的活动断裂带,虽然工程面临发震断裂的同震地表错动毁坏的风险可能性较小,但仍然需要加强活动断裂的变形监测,规划建设需要考虑工程穿越活动断裂的位置,或者按照正断型活动断裂的避让距离进行合理避让。

References

- CHEN E M, HUANG Y Y, 1984. A summary of 19 strong earthquakes in South China and the continental margin seismic belt in the northern South China Sea[J]. *South China Journal of Seismology*, 4(1): 11-32. (in Chinese with English abstract)
- CHEN E M, HUANG Y Y, 1989. Characteristics of the seismic damage and analysis of the seismic structure of the 1605 great earthquake of Qiongzhou, Hainan Island[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 11(3): 319-331. (in Chinese with English abstract)
- CHEN W G, ZHANG H N, LI Z Q, et al., 1987. Some problems of deposition and development of the Beihai formation in northern Hainan Island[J]. *Tropical Geography*, 7(3): 268-275. (in Chinese with English abstract)
- CHEN W J, GE T M, LI D M, et al., 1992. K-Ar-Magnetostratigraphic chronology of Cenozoic basalt in Lei-Qiong region [M]/LIU R X. Chronology and geochemistry of Cenozoic volcanic rocks in China. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- DING Y Y, ZHAO X T, HU D G, et al., 2018. Late Cenozoic fault activity in northeastern Hainan Island and its controlling effect on tectonic subsidence in Dongzhai Port[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(2): 155-166. (in Chinese with English abstract)
- DONG R S, RAN H L, GAO Z, 1993. The relationship between earthquake magnitude and length of active fault in China[J]. *Seismology and Geology*, 15(4): 395-400. (in Chinese with English abstract)
- FAN Q C, SUN Q, LI N, et al., 2004. Periods of volcanic activity and magma evolution of Holocene in North Hainan Island[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 533-544. (in Chinese with English abstract)
- GE T M, FAN L M, XU X, et al., 1994. Paleomagnetism of Beihai and Zhanjiang formations in Lei-Qiong region[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 14(4): 61-70. (in Chinese with English abstract)
- HO K S, CHEN J C, JUANG W S, 2000. Geochronology and geochemistry of late Cenozoic basalts from the Leiqiong area, southern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 307-324.
- HUANG Z G, CAI F X, 1994. A new approach to the quaternary volcanicity in the Leiqiong area[J]. *Tropical Geography*, 14(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- LEI C, REN J Y, PEI J X, et al., 2011. Tectonic framework and multiple episode tectonic evolution in deepwater area of Qiongdongnan basin, northern continental margin of South China Sea[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 36(1): 151-162. (in Chinese with English abstract)
- LI M J, WANG T G, LIU J, et al., 2008. Occurrence and origin of carbon dioxide in the Fushan Depression, Beibuwan Basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 25(6): 500-513.
- LI P, YANG M E, LIU X S, et al., 1988. Analysis of active fault in the northern Qiongzhou[M]/DING Y Z, LI P, SHI Z L, et al. A collection of earthquake studies in northern Hainan Island. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- LI P C, ZHOU D, ZHANG C M, et al., 2015. Assessment of the effective CO₂ storage capacity in the Beibuwan Basin, offshore of southwestern P. R. China[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 37: 325-339.
- LI W, JIA L Y, HU D G, et al., 2019. Late Pleistocene tectonic history of the western segment of Maniao-Puqian fault: evidence from the Laocheng section, northern Hainan Island[J]. *Geoscience*, 33(5): 970-978. (in Chinese with English abstract)
- LIU H G, WU X J, LI F, et al., 2018. Active characteristics of the middle segment of Maniao-Puqian fault in the Holocene[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 13(3): 588-599. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y, HU D G, XU Y X, et al., 2019. 3D magnetotelluric imaging of the middle-upper crustal conduit system beneath the Lei-Hu-Ling volcanic area of northern Hainan Island, China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 371: 220-228.
- LIU Y, DU J S, HU Z W, et al., 2021. Crustal magma plumbing system beneath the Quaternary volcanic area (northern Hainan Island, China) revealed by magnetotelluric data[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 419: 107362.
- LONG W G, LIN Y H, ZHU Y H, et al., 2006. Establishment of the early-mid Pleistocene Duowen formation on northern Hainan Island, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 408-414. (in Chinese with English abstract)
- SONG C H, SHI G, WU H, et al., 2021. Application of seismic detection by spark source for concealed faults in Shanghai urban water network area[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(6): 938-948. (in Chinese with English abstract)
- SUN J Z, 1988. Study on Quaternary volcanic activity in northern Hainan Island[M]/DING Y Z, LI P, SHI Z L, et al. A collection of earthquake studies in northern Hainan Island. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

- WANG C Q, JIA L Y, HU D G, et al., 2021. Activity of eastern part of the Maniao-Puqian fault in northern Hainan Island and its evaluation of crustal stability[J]. *Geology in China*, 48(2): 618-631. (in Chinese with English abstract)
- WANG C Q, JIA L Y, HU D G, et al., 2022. Quaternary activity characteristics of the Maniao-Puqian fault in the Jiangdong New District of Haikou[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(2): 403-417. (in Chinese with English abstract)
- XIA M M, WANG C Q, HU D G, et al., 2019. ESR dating of the Basuo formation in the northeastern Hainan Island and its tectonic significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(2): 257-266. (in Chinese with English abstract)
- XIE X N, REN J Y, WANG Z F, et al., 2015. Difference of tectonic evolution of continental marginal basins of South China Sea and relationship with SCS spreading[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 77-87. (in Chinese with English abstract)
- XIE Z F, XIE S S, CAI S K, et al., 2010. Gravity and magnetic field characteristics and regional geological structures of Northern Hainan area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(5): 579-582. (in Chinese with English abstract)
- XU X W, YU G H, RAN Y K, et al., 2015. An introduction to urban active faults in China[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- XUE W J, 1983. On the age and sedimentation environment of Beihai formation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 3(3): 31-48. (in Chinese with English abstract)
- YAN C G, JIANG W L, 2007. Relationship between the activity of the Changliu-Xiangou fault zone in Late-Quaternary and volcanic activity in North Hainan Island[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2(3): 230-242. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, SHI G, WU H, et al., 2021. Quaternary activity of the Luodian-Zhoupu buried fault in the Shanghai region: integrated exploration and research[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(2): 267-279. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H N, ZHAO X T, 1984. Characteristics of the neotectonic movement in the Hainan Island and Leizhou peninsula area[J]. *Scientia Geologica Sinica*(3): 276-287. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J J, ZHONG D L, ZHOU Y, 1999. Tectonic evolution of southeast Asia and the Ailao-Honghe tectonic belt[J]. *Geological Review*, 45(4): 337-344. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, 2004. Late Cenozoic squeezing-out tectonism in Qinghai-Tibet Plateau and its impacts on late hydrocarbon accumulation in rift basins in eastern China[J]. *Oil & Gas Geology*, 25(2): 162-169. (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 陈恩民, 黄咏茵, 1984. 华南十九次强震暨南海北部陆缘地震带概述[J]. *华南地震*, 4(1): 11-32.
- 陈恩民, 黄咏茵, 1989. 1605年海南岛琼州大地震的震害特征和发震构造研究[J]. *地震学报*, 11(3): 319-331.
- 陈伟光, 张虎男, 李子权, 等, 1987. 琼北北海组地层沉积、发育的几个问题[J]. *热带地理*, 7(3): 268-275.
- 陈文奇, 葛同明, 李大明, 等, 1992. 雷琼地区新生代玄武岩的K-Ar放射性地层年代学[M]/刘若新. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社.
- 丁莹莹, 赵希涛, 胡道功, 等, 2018. 琼东北晚新生代断裂活动及其对东寨港沉降的控制作用[J]. *地球学报*, 39(2): 155-166.
- 董瑞树, 冉洪流, 高铮, 1993. 中国大陆地震震级和地震活动断层长度的关系讨论[J]. *地震地质*, 15(4): 395-400.
- 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 等, 2004. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化[J]. *岩石学报*, 20(3): 533-544.
- 葛同明, 樊利民, 徐行, 等, 1994. 雷琼地区湛江组、北海组的古地磁学研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 14(4): 61-70.
- 黄镇国, 蔡福祥, 1994. 雷琼第四纪火山活动的新认识[J]. *热带地理*, 14(1): 1-10.
- 雷超, 任建业, 裴健翔, 等, 2011. 琼东南盆地深水区构造格局和幕式演化过程[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 36(1): 151-162.
- 李坪, 杨美娥, 刘行松, 等, 1988. 琼北地区活动性断裂的研究[M]/丁原章, 李坪, 时振梁, 等. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社.
- 李薇, 贾丽云, 胡道功, 等, 2019. 琼北老城剖面记录的马袅-铺前断裂西段晚更新世活动历史[J]. *现代地质*, 33(5): 970-978.
- 刘华国, 吴小江, 李峰, 等, 2018. 马袅-铺前断裂中段全新世活动特征研究[J]. *震灾防御技术*, 13(3): 588-599.
- 龙文国, 林义华, 朱耀河, 等, 2006. 海南岛北部第四纪早中更新世多文组的建立[J]. *地质通报*, 25(3): 408-414.
- 宋春华, 施刚, 巫虹, 等, 2021. 上海城市水网地区电火花震源地震探测隐伏断裂的应用探索[J]. *地质力学学报*, 27(6): 938-948.
- 孙建中, 1988. 琼北地区第四纪火山活动研究[M]/丁原章, 李坪, 时振梁, 等. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社.
- 王超群, 贾丽云, 胡道功, 等, 2021. 海南岛北部马袅-铺前断裂东段活动性与地壳稳定性评价[J]. *中国地质*, 48(2): 618-631.
- 王超群, 贾丽云, 胡道功, 等, 2022. 海口市江东新区马袅-铺前断裂第四纪活动特征[J]. *地质学报*, 96(2): 403-417.
- 夏蒙蒙, 王超群, 胡道功, 等, 2019. 琼东北八所组ESR年龄及其构造意义[J]. *地质力学学报*, 25(2): 257-266.
- 解习农, 任建业, 王振峰, 等, 2015. 南海大陆边缘盆地构造演化差异性及其与南海扩张耦合关系[J]. *地学前缘*, 22(1): 77-87.
- 谢振福, 谢顺胜, 蔡水库, 等, 2010. 琼北地区重磁场特征与区域地质构造[J]. *物探与化探*, 34(5): 579-582.
- 徐锡伟, 于贵华, 冉勇康, 等, 2015. 中国城市活动断层概论[M]. 北京: 地震出版社.
- 薛万俊, 1983. 北海组的地质时代及其沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 3(3): 31-48.
- 闫成国, 江娃利, 2007. 琼北地区北西方向长流-仙沟断裂带晚第四纪活动及与火山活动关系的讨论[J]. *震灾防御技术*, 2(3): 230-242.
- 张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2021. 上海罗店-周浦隐伏断裂第四纪活动性综合探测与研究[J]. *地质力学学报*, 27(2): 267-279.
- 张虎男, 赵希涛, 1984. 雷琼地区新构造运动的特征[J]. *地质科学*(3): 276-287.
- 张进江, 钟大赉, 周勇, 1999. 东南亚及哀牢山红河构造带构造演化的讨论[J]. *地质论评*, 45(4): 337-344.
- 张岳桥, 2004. 晚新生代青藏高原构造挤出及其对中国东部裂陷盆地晚期油气成藏的影响[J]. *石油与天然气地质*, 25(2): 162-169.