

doi: 10.12029/gc20210219

王超群, 贾丽云, 胡道功, 马秀敏, 顾静超, 丁莹莹, 曹新文, 夏蒙蒙, 吴环环. 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.

Wang Chaoqun, Jia Liyun, Hu DaoGong, Ma XiuMin, Gu JingChao, Ding Yingying, Cao Xinwen, Xia Mengmeng, Wu Huanhuan. 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).

海南岛北部马袅—铺前断裂东段活动性与地壳稳定性评价

王超群¹, 贾丽云^{1,2}, 胡道功^{1,2}, 马秀敏¹, 顾静超⁴,
丁莹莹³, 曹新文¹, 夏蒙蒙¹, 吴环环¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 江苏省地质矿产局第三地质大队, 江苏 南京 212000)

摘要:近东西向展布的马袅—铺前断裂是琼北地区主要活动断裂之一,也是1605年琼山7.5级地震主要控震断裂之一,其活动性对评价海南岛北部地壳稳定性及地质灾害预测有着重要意义。本文通过遥感解译、活动断裂断错地貌填图、高密度电法剖面测量、联孔剖面钻探验证等方法,查明了马袅—铺前断裂东段的空间展布特征:8条北东东向展布、北倾或南倾的正断层 F_{2-1} ~ F_{2-8} 组成三堑夹两垒构造,继承上新世之前的多期活动断裂。年代学测试结果鉴别出5条全新世活动断裂(F_{2-1} 、 F_{2-4} 、 F_{2-6} 、 F_{2-7} 、 F_{2-8}),2条前第四纪断裂(F_{2-2} 、 F_{2-5})和1条早中更新世断裂(F_{2-3});全新世以来 F_{2-1} 、 F_{2-7} 、 F_{2-8} 断裂垂直活动速率为0.43~1.79 mm/a; F_{2-4} 、 F_{2-6} 断裂垂直活动速率为0.12~0.33 mm/a。结果表明,东寨港东岸地区处于不稳定区,应加强断裂活动的监测力度,工程建设时应按照相关标准进行规避。

关键词:马袅—铺前断裂;断裂活动性;高密度电法剖面;钻探联孔剖面;地质调查工程;海南岛
中图分类号:P546 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)02-0618-14

Activity of eastern part of the Maniao–Puqian fault in northern Hainan Island and its evaluation of crustal stability

WANG Chaoqun¹, JIA Liyun^{1,3}, HU Daogong^{1,2}, MA Xiumin¹, GU Jingchao⁴, DING Yingying³,
CAO Xinwen¹, XIA Mengmeng¹, WU Huanhuan¹

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 3. *Key laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Beijing, 100081, China*; 4. *No. 13 Geological Party of Jiangsu Province, Jiangsu 212000, China*)

Abstract: The Maniao–Puqian fault trending east–west, as the major one controlling the Qiongsan earthquake registered 7.5

收稿日期:2018-09-20;改回日期:2019-01-30

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190306、DD20160269)资助。

作者简介:王超群,女,1993年生,博士生,活动构造方向;E-mail:871269501@qq.com。

通讯作者:贾丽云,女,1982年生,副研究员,从事新构造与活动构造、构造地貌方向的研究工作;E-mail:158943653@qq.com。

magnitude on Richter scale in 1605, is a major active fault in the northern Hainan area. Hence, its activity's measuring is critical for crustal stability evaluation and for geological hazard forecast in the northern part of Hainan Island. Various methods were used to determine the distribution of the eastern part of this fault, including remote sensing images interpretation, fault landform mapping, high-density electrical detecting and cross-section drilling validation. The results show that it is spatially composed of 8 north-dipping or south-dipping NEE-trending normal faults (F₂₋₁~F₂₋₈), constituting the three-graben and two-barrier structure, and inheriting the multi-stage activities from the faults before the Pliocene. Five Holocene active faults (F₂₋₁, F₂₋₄, F₂₋₆, F₂₋₇ and F₂₋₈), two pre-Quaternary faults (F₂₋₂ and F₂₋₃) and one early Miocene fault (F₂₋₅) were identified by chronological tests. Moreover, the vertical movement rate of F₂₋₁, F₂₋₇ and F₂₋₈ was 0.43–1.79 mm/a, while that of F₂₋₄ and F₂₋₆ between 0.12–0.33 mm/a since Holocene. The above research shows that the structures in this area are all in an active state, which has a great influence on the future engineering construction, and the monitoring efforts must be strengthened.

Key words: Maniao–Puqian Fault; fault activity; high-density electrical profile; united drilling section; geological survey engineering; Hainan island

About the first author: WANG Chaoqun, female, born in 1993, doctoral candidate, engaged in the study of active structure survey and research; E-mail: 871269501@qq.com.

About the corresponding author: JIA Liyun, female, born in 1982, assistant research fellow, engaged in the study of active structure and tectonic landform; E-mail: 158943653@qq.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190306, No.DD20160269).

1 引言

近EW向展布的马袅—铺前断裂是琼北地区主要活动断裂之一,该断裂控制了1605年琼山7.5级地震的发生(徐起浩,1986;陈恩民等,1989;徐锡伟等,2015;梁光河,2018),造成大面积的陆陷成海,其活动性对评价海南岛北部地壳稳定性、地质灾害预测及海南岛自贸区开发规划建设有着重要意义。

国家地震局等单位20世纪80年代在洋浦港口地震烈度复核等工作中,初步查明了该断裂为一条总体走向NEE,倾向NNW,倾角陡的正断层(张虎男,1984;徐起浩,1985,1986;邹和平,1987;张世良,1988;李珏,1988;吴泽龙,1988),并根据地层对比和历史地震事件,认为晚更新世以来该断裂南、北两盘有强烈的差异升降(章林云,1988;陈恩民,1989;胡亚轩,2014;徐锡伟,2015)。2005年,国家地震局在海口城市活动断裂调查工作中,对马袅—铺前断裂东寨港以西的断裂中、西段采用遥感、地质、地球物理、钻探及槽探等调查方法进行了综合调查研究,认为马袅—铺前断裂中西段主要由4条左阶雁列分布的断层组成,为隐伏—半隐伏的活动断裂,走向均为NEE向或EW向,倾向北,且倾角较陡的正断层,断层断错全新世地层,最新活动时间在(1070±120)a左右(徐锡伟等,2008)。然而,东寨港以东地区,即马袅—铺前断裂东段,前人仅根据

珠溪河地貌特征、1605年大级地震破裂方向及中、西段断裂延伸方向,推测马袅—铺前断裂东段主要沿珠溪河呈NEE向展布(李珏,1988;丁原章等,1988;陈恩民等,1989),其空间分布及产状并不清楚,活动幅度、时代及活动速率更是缺乏详细研究,远不能满足海南岛自贸区开发规划、工程建设的需求。

本文在野外构造地貌调查的基础上,采用高密度电法探测、钻探联孔剖面验证和年代学等方法,从马袅—铺前断裂东段的断裂结构、活动时代、垂直位移速率等方面讨论了断裂的第四纪活动性特征。

2 马袅—铺前断裂带概况

马袅—铺前断裂分布于琼州海峡南侧,西起马袅西侧,向东经马村、长流、琼山至铺前,走向近EW,陆上长约100 km。断层向北陡倾,正断层性质。在平面上,马袅—铺前断裂呈左阶雁列状展布,为一系列平行斜列、倾向相同或相反的次级断裂构成的断断续续的隐伏断裂带。历史上沿中、东断裂段发生过1605年琼山7.5级地震,1913年海口5级和1618年老城5.5级地震。

根据马袅—铺前断裂的空间展布和几何结构、跨越的地质构造单元、深部构造特征、断层活动性及与北北西向断裂的交切关系,前人将该断裂划分为三段(图1):东段(东寨港以东段)、中段(老城至

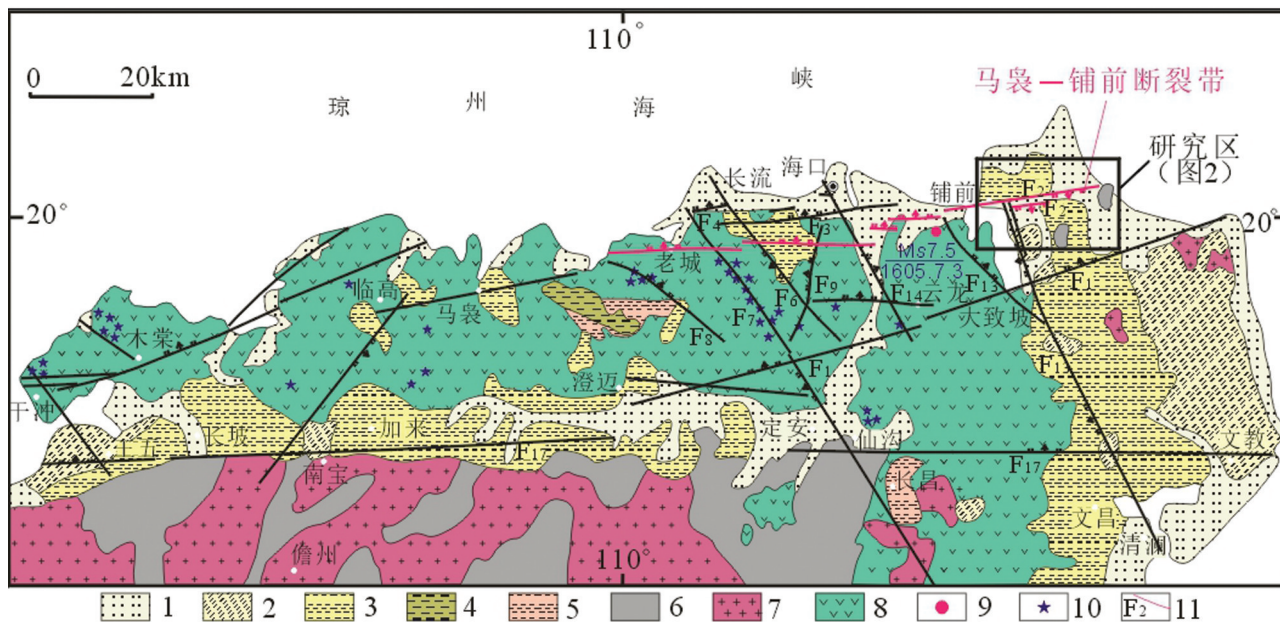


图1 马袅—铺前断裂分布图

1—全新统;2—上更新统八所组;3—中更新统北海组;4—下更新统秀英组;5—上新统海口组;6—前新生代基岩;7—花岗岩;8—第四纪玄武岩;9—1605年琼山7.5级地震;10—火山口;11—断裂带;F₁—澄迈—冯坡断裂;F₂—马袅—铺前断裂;F₃—新村—林乌断裂;F₄—龙头—博抚断裂;F₅—琼华—莲塘断裂;F₆—长流—仙沟断裂;F₇—颜春岭—道崖断裂;F₈—城府—卜亚岭断裂;F₉—铺前—清澜断裂;F₁₀—海口—云龙断裂;F₁₁—王五一文教断裂

Fig.1 Structural map showing distribution of the Maniao-Puqian fault

1—Holocene series; 2—Basuo Formation of Upper Pleistocene series; 3—Beihai Formation of Middle Pleistocene series; 4—Xiuying Formation of Lower Pleistocene series; 5—Haikou formation of Pliocene series; 6—Pre-Cenozoic bedrock; 7—Granite; 8—Quaternary basalt; 9—1605 Qionshan M7.5 earthquake; 10—Crater; 11—Fault zone; F₁—Chengmai-Fengpo fault; F₂—Maniao-Puqian fault; F₃—Xincun-Linwu fault; F₄—Longtou-Bowu fault; F₅—Qionghua-Liantang fault; F₆—Changliu-Xiangou fault; F₇—Yanchunling-Daoya fault; F₈—Chengfu-Buyaling fault; F₉—Puqian-Qinglan fault; F₁₀—Haikou-Yunlong fault; F₁₁—Wangwu-Wenjiao fault

塔市段)和西段(马袅至花场段)(李珏,1988)。

中国地震局在海口市城市活动断裂调查过程中,通过地表地貌调查、浅层地震探测、钻孔联合剖面探测、槽探揭露和年代学测试等方法技术,对马袅—铺前断裂带的西段和中段进行了综合调查与研究,发现马袅—铺前中、西段错断最新地层分别为距今 (1.07 ± 0.12) ka地层和 (24.39 ± 2.07) ka地层,认为马袅—铺前断裂活动强度呈东强西弱的特点,东段为全新世活动断裂,中段为晚更新世活动断裂,西段为中更新世活动断裂。而且人工地震剖面显示东段的断点是北盘上升,南盘下降;中、西段的断点则是北盘下降,南盘上升;这说明马袅—铺前断裂具有分段性,中、西段与东段断裂倾向不同(章林云,1988)。

3 研究方法及结果

马袅—铺前断裂东段大部分隐伏在地下,难以

直观地确定断裂的近期活动特征。为了揭示马袅—铺前断裂与第四纪地层的切割关系,根据高密度电法剖面垂直活动断层的布线原则,结合地表构造地貌填图工作,在研究区内垂直地表陡坎及高分辨率遥感解译的断裂,布设了5条高密度电法剖面(图2),以确定断裂深部产状及延伸情况,并对测线进行了联合钻孔验证,最后结合电子自旋共振(ESR)、光释光(OSL)和碳同位素(¹⁴C)年代学测试,分析断裂第四纪的活动性。

3.1 活动断裂遥感解译与野外断裂地貌调查

3.1.1 活动断裂遥感解译

由于琼北地区沉积物覆盖广泛,隐伏断层发育,地表被人类活动改造和破坏较多,因此,选用早期的遥感影像,进行处理和解译,尽量剔除人类活动的影响(张世良等,1988)。选取1987年、空间分辨率30m的TM影像,地表人工破坏程度低,有利于断裂形态的识别;1999年的ETM+影像全色波段,其空间分辨

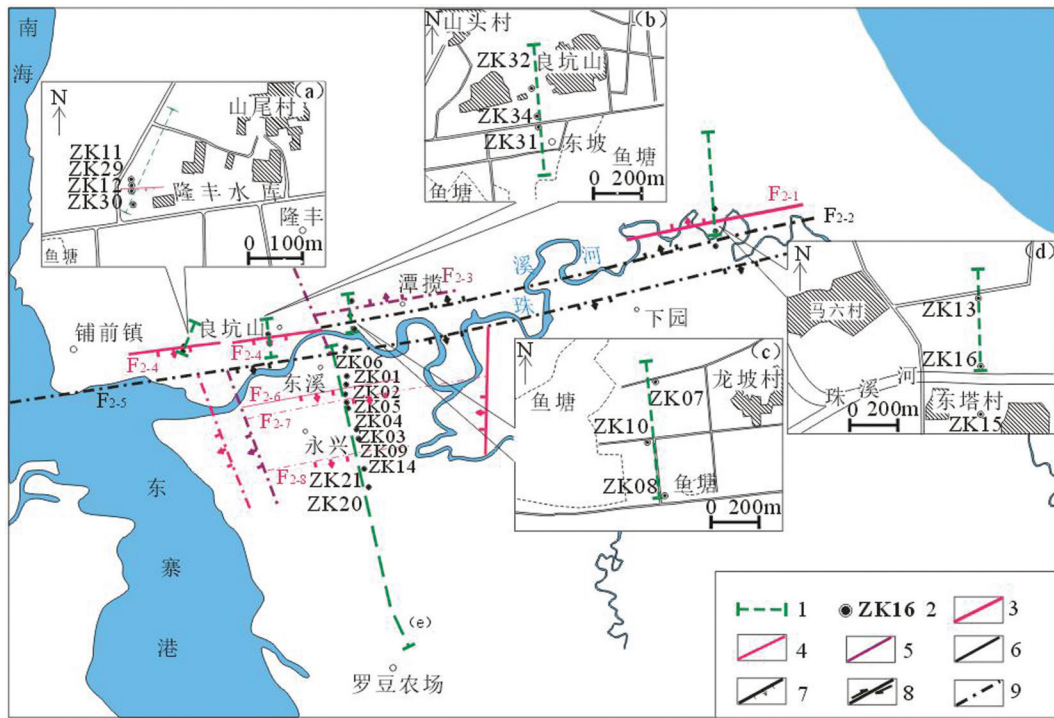


图2 电测剖面与钻孔分布位置图

a—山尾村剖面;b—良坑山剖面;c—港头村剖面;d—珠溪桥剖面;e—珠溪河南岸剖面;1—高密度电法测线;2—钻孔及编号;3—全新世活动断层;4—晚更新世活动断层,5—早-中更新世活动断层;6—前第四纪活动断层;7—正断层;8—走滑断层;9—隐伏断层

Fig.2 Distribution of the high-density electrical detecting profiles and drill holes along the eastern Maniao-Puqian fault
a-ShanWei Village profile; b-Liangkeng Village profile; c-Gangtou Village profile; d-Zhuxi Bridge profile; e-South side of Zhuxi River profile;
1-High density electrical detecting line; 2-Drill hole and serial numbers; 3-Holocene Active Fault; 4-Late Pleistocene active fault; 5-Early to middle Pleistocene active faults; 6-Pre-Quaternary active fault; 7-Normal fault; 8-Strike-slip fault; 9-Hidden fault

率 15 m,热红外波段空间分辨率 30 m。

将TM图像与ETM+的全色波段进行融合,得到分辨率为15 m的影像,再对其进行缨帽变换(K-T变换),得到的影像具有丰富的颜色和较高的饱和度,影像的微弱差异信息得到增强(图3)。首先,断裂错断使得地表水系有明显线性特征,容易将断裂解译出来(图3 c,d);其次,由于断裂带沉积物较为疏松,含水性较高,从而导致高含水沉积物及其上覆植被线性排列(图3b);断裂错断导致两盘出露地表的岩性不同,使断裂从遥感图像上判读出来(图3e)。

3.1.2 野外断裂地貌调查

为了调查断裂的分布及活动性,沿断裂带进行了遥感解译与断裂地貌填图。由于东寨港东部地区地貌上属于潟湖平原,露头出露不明显,断裂在地表的表现以小陡坎为主。珠溪河北岸西排首村附近(图4a)观察到北东70°方向展布的线性排列陡坎,为相距5 m左右的2个陡坎组成,总体向北缓倾,坎高为0.5 m,后期改造成缓坡。在珠溪河南岸

良坑村附近(图4b),发现高0.5 m的陡坎,倾向南,东西向延伸约1 km的陡坎,地层岩性为灰白夹砖红、棕黄色黏土质粉砂,成分以粉砂居多。珠溪桥北马六村东(图4c),也发现有高1.2 m的陡坎,倾向北,走向NEE;珠溪河南岸罗豆农场北也发育有断层陡坎(图4d),倾向北,走向亦为NEE,地表被草地覆盖,地层含水性较高。

总之,东寨港以东马袅—铺前断裂东段,发育有一系列东西向的断层陡坎,或南倾或北倾,陡坎高度0.3~2 m不等,大部分陡坎位置与遥感解译的断裂通过位置对应。

3.2 高密度电法探测

研究区地层以花岗岩和层状沉积物为主,由于断裂破坏了地层的连续性,造成了地下岩层密度、电阻率、弹性性质等物理特性的不连续性变化,因此,根据断层破碎带与区域不同岩性地层电阻率差异,利用高密度电法可以探测隐伏断裂带的分布情况(林承灏等,2017;曹新文等,2017;戚帮申,2019)。

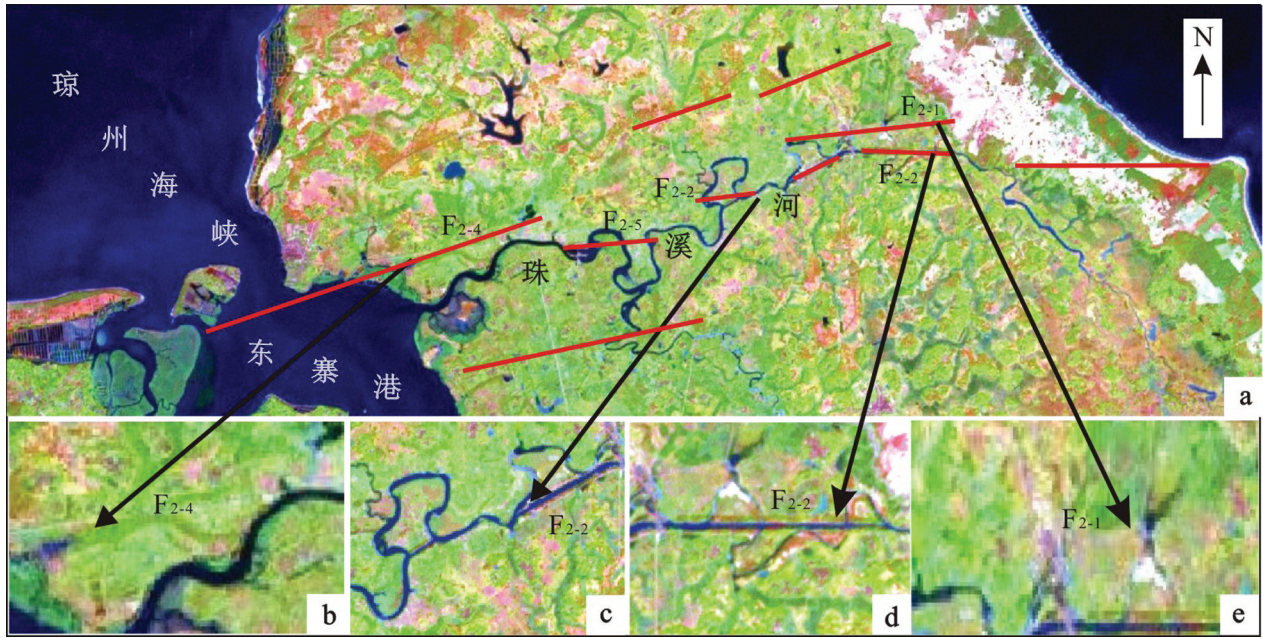


图3 马袅铺前断裂东段遥感解译图(数据源:TM与ETM+遥感数据合成影像)

Fig.3 Remote sensing image interpretation of the eastern segment of the Maniao-Puqian fault (data source: merge images of TM and ETM+)

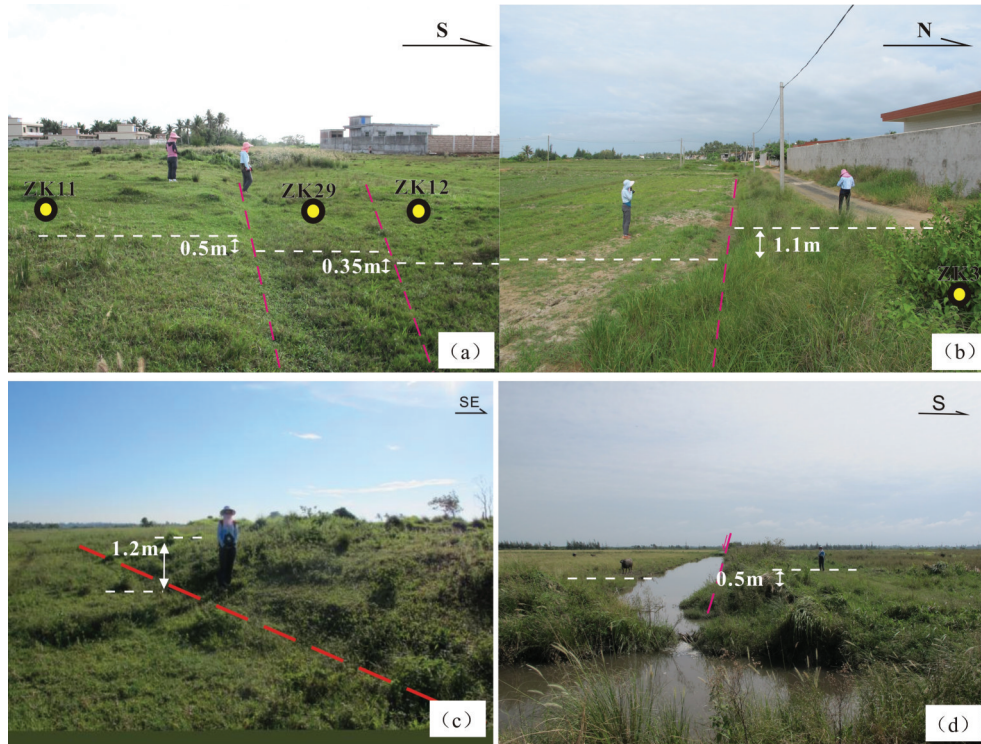


图4 马袅—铺前断裂所形成的地表陡坎

a—铺前东南倾断层陡坎;b—铺前南倾断层陡坎;c—珠溪桥北倾断层陡坎;d—罗豆农场北北东向断裂形成的断层陡坎

Fig.4 Surface scarps along the Maniao-Puqian fault

a-South dipping fault scarp at eastern Puqian Town;b-South dipping fault scarp at Puqian Town;c-North dipping fault scarp at Zhuxi Bridge; d-North-east direction dipping fault scarp at northern Luodou Farm

本研究在东寨港以东的马袅—铺前断裂东段,布置了5条高密度电法探测剖面,分别是:山尾村剖面(剖面a)、良坑山剖面(剖面b)、港头村剖面(剖面c)、珠溪桥剖面(剖面d)和珠溪河南岸剖面(剖面e)(图2)。采用Geopen三维高密度电法工作站进行测量,点距2~10 m,通过数据质量优化后,地形校正及采用EarthImager高密度数据处理软件处理电阻率数据等一系列数据处理过程得到了反演成像(图5a、b、c、d、e):

山尾村剖面(图2)起始点坐标20°1'35.42"N, 110°35'48.79"E,测线近南北向。剖面位于山尾村至福坡村之间,长度为224 m,测量方向由南向北,电极间距2 m。从反演图中(图5a)看出,整条剖面中纵向电阻率电性层状分布明显,基岩电性界面显示清楚。水平向电阻率电性出现差异性变化,在距起点42~54 m显示出一高角度,线性特征较明显的低阻条带,低阻条带的两侧电性为连续的相对高阻,判定为一断裂异常带。

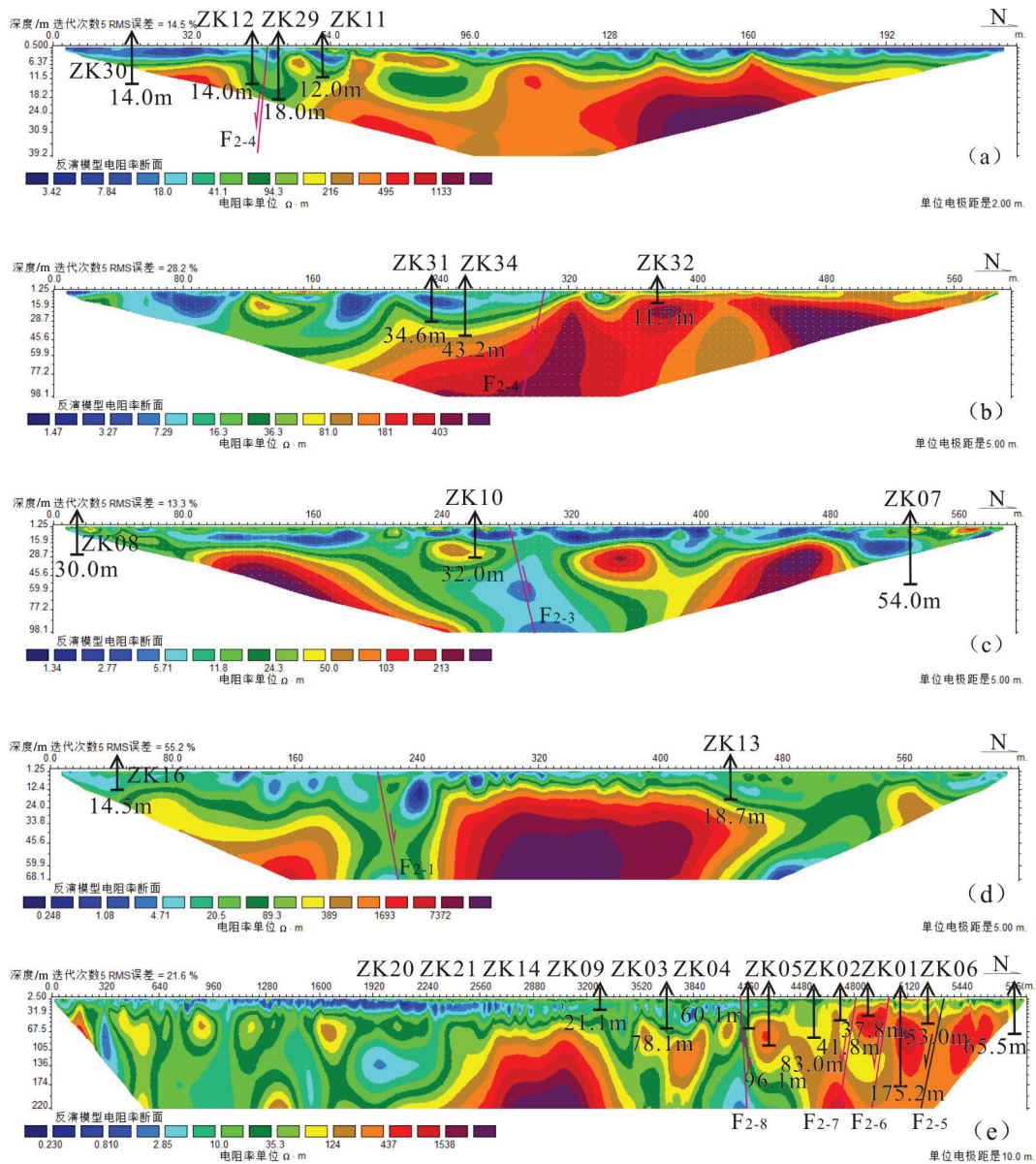


图5 马袅—铺前断裂东段高密度电法层析反演图像

a—山尾村剖面;b—良坑山剖面;c—港头村剖面;d—珠溪桥剖面;e—珠溪河南岸剖面

Fig.5 Tomography of high density electrical resistivity along the eastern segment of the Maniao—Puqian fault

a—Shanwei village profile;b— Liangkeng Village profile;c—Gangtou Village profile;d— Zhuxi bridge;e—South side of Zhuxi River profile

良坑山剖面(图2)起始点坐标 $20^{\circ}1'34.87''N$, $110^{\circ}36'44.74''E$,剖面近南北向。剖面位于珠溪河北岸良坑山至铺龙村之间,长度为600 m,测量方向由南向北,电极间距5 m。反演图像5b显示,整条剖面中纵向电阻率电性层状分布明显,水平向电阻率电性出现差异性变化,在160~320 m处显示出阻值梯度带,梯度带的两端电性差异较大,该带两侧的电性结构与数值会呈现出整体性的差异,区别于水平层状结构。正断层的上盘几乎都为低阻区和形态斑驳的局部高低阻扰动区,而断层下盘多为大范围数值均匀的高阻区。这同断层上盘易于破碎、不整合、风化强烈以及地下水富集直接相关。

港头村剖面(图2)起始点坐标 $20^{\circ}1'50.25''N$, $110^{\circ}37'36.62''E$,剖面近南北向。剖面位于港头村至龙坡村之间,长度为600 m,测量方向由南向北,电极间距5 m。反演图(图5c)分析可知,整条剖面中纵向电阻率电性层状分布明显,基岩电性界面显示清楚。水平向电阻率电性出现差异性变化,在距起点228~320 m显示出低阻条带,低阻条带的两侧电性为连续的相对高阻,判定为断裂异常带,在距起点0~80 m位置下部地层有收敛趋势,推断为正断层。

珠溪桥剖面(图2)起始点坐标 $20^{\circ}2'46.99''N$, $110^{\circ}41'22.43''E$,测线近南北向。测线位于珠溪河北岸,珠溪桥以北,由南至北途经东塔村等村落,此测线长度640 m,测量方向由南向北,电极间距5m。反演图(图5d)分析认为,整条剖面中纵向电阻率电性层状分布明显,水平向电阻率电性出现差异性变化,在190~260 m、480~640 m处显示出阻值梯度带,梯度带的两端电性差异较大,区间内为低阻区,判定为断裂异常。

珠溪河南岸剖面(图2)起始点坐标 $20^{\circ}01'41''N$, $110^{\circ}37'25''E$,近南北向,剖面全长4850 m。从反演图(图5e)中看出,剖面中纵向电阻率电性层状分布明显,水平向电阻率电性出现差异性变化,整体电阻率较低,尤其浅部位置,这是由于地表浅层富含水而引起。剖面南端700 m范围内基岩非常完整,显示为高阻特征,且基岩面较浅,平均深度为20~30 m,甚至更浅;剖面700~4800 m范围,较为破碎,大部分地区显示为低阻特征。从北向南依次揭示了四个断裂破碎带,分别位于剖面700~1300 m段、1700~2100 m段、2800~4100 m段。推测为 F_{2-5} 、

F_{2-6} 、 F_{2-7} 和 F_{2-8} 四条断裂。电性分布特征反映 F_{2-5} 、 F_{2-6} 、 F_{2-7} 和 F_{2-8} 断裂均为正断层,电性结构间的倾向角为 70° ~ 80° ;其中, F_{2-5} 、 F_{2-6} 、 F_{2-7} 南倾,断裂范围较为破碎而富含地下水,导致低阻特征; F_{2-8} 北倾,断裂带宽,基岩面较深,第四纪沉积地层堆积较厚,且富含水分,引起低阻异常。

3.3 钻探联孔剖面揭示

结合地表陡坎、高密度电法反演分析结果,对各条断裂进行了钻探联孔剖面验证。在剖面a分布线上,由北向南布设了ZK11、ZK29、ZK12和ZK30四个钻孔;在b、c、d剖面线上,由北向南依次布设了ZK32、ZK34、ZK31; ZK07、ZK10、ZK08; ZK13、ZK16、ZK15等9个钻孔。

3.3.1 钻孔地层错断标志层的确立

钻孔揭露的地层是判断断层活动性的关键标志。前人在琼北地区开展的地层学和古生物化石研究(龙文国等,2006a,b),为我们判断标志层和断裂的活动时代提供了年代学依据。琼东北地区广泛沉积全新统、下更新统秀英组、上新统海口组,琼东北的全新统主要以黄褐色黏土质粉细砂、青灰色淤泥质黏土为主,下更新统秀英组主要以杂色(砖红色、黄褐色、杂灰白色)黏土、黄褐色含砾中细砂为主,上新统海口组以褐色黏土、灰绿色黏土、灰色砂砾石为主(吴泽龙,1988)。

通过对比钻孔联合剖面与现有的研究成果,结合9个钻孔所揭露的地层,有4个具有一定落差的标志层,由新到老编号依次为标志层 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 。标志层 B_1 为青灰色淤泥质黏土,黏土含量达90%以上,其次为少量粉砂,含有机质,有腥臭味,上、下岩性界面清晰,时代为全新世;标志层 B_2 为一套杂色(砖红色、黄褐色、杂灰白色)黏土,成分主要为黏土,含少量粉砂(约5%),岩性致密,干燥后较坚硬,黏性较大,该层顶、底接触岩性岩性过渡色彩界面清晰,易于判断,对应早更新世秀英组地层;标志层 B_3 褐色黏土与其下灰绿色黏土、灰色砂砾石层,认为其对应着上新世海口组;标志层 B_4 为花岗岩基底面或变质岩基底面。

3.3.2 钻孔联合剖面揭露断层活动

利用联孔剖面中的标志层,统计分析不同时代地层在剖面上的断错量,确定断层不同时期的活动幅度是研究隐伏断裂的常用方法,已得到广泛应用

(向宏发, 2003; 柴焯章等, 2006; 赵成斌等, 2007; 雷启云等, 2008, 2011; 张磊等, 2014; 张晓亮等, 2016)。本次研究的5个联孔剖面(表1)可以清晰揭露断层的错断情况:

(1)山尾村剖面(图6a)全长56 m, 由自北向南ZK11、ZK29、ZK12、ZK30四个钻孔组成, 总进尺48 m, 单孔深度最大18 m, 最小8 m; 孔间距最大28 m, 最小8 m。ZK29与ZK12之间揭示的标志层B₂的顶面与标志层B₄的顶面分别下降了1.76 m、1.84 m, 两标志层均表现为由北向南的落差, 倾角80°, 且地表出现高为0.35 m的陡坎(图4b), 陡坎南倾, 上断点断错地表全新世黄褐色粉细砂, 揭示了断裂F₂₋₄为全新世活动断层, 极有可能为1605年琼山M7½级地震时形成的地震断层, 地表同震垂向位移为0.35 m。

(2)良坑山钻孔剖面(图6b)全长167 m, 由南北向展布的ZK31、ZK34、ZK32三个钻孔组成, 总进尺90.5 m; 单孔深度最大44.2 m, 最小11.7 m; 孔间距最大140 m, 最小27 m。ZK34与ZK32之间标志层B₂顶面下降了1.85 m, ZK32标志层B₄基底面标高为-2.1 m, 但ZK34到-42.85 m还未见到基底面, 说明标志层B₄下落超过40.75 m。两标志层均表现为由北向南落差, 地表出现高为1 m的陡坎(图5a), 揭示了断裂F₂₋₄断面南倾, 倾角75°。

(3)港头村钻孔剖面(图6c)全长526 m, 呈南北向展布, 由ZK07、ZK10、ZK08三个钻孔组成, 总进尺115.3 m, 单孔深度最大53.8 m, 最小29.7 m; 孔间距最大268 m, 最小258 m。ZK08与ZK10间未见到标志层B₁, 其所揭示的标志层B₂和标志层B₃稳定延伸, 标志层B₄基底面向北下落11.48 m, 揭示该断层北倾, 倾角较陡; ZK10与ZK07标志层B₂底面稳定延伸, ZK07中标志层B₂顶部可能受到侵蚀而导致与ZK10中标志层B₂顶部的高差, B₃顶面及B₄基底面分别下落3.19 m、15.79 m, 该剖面揭示的断裂F₂₋₃断面均向北陡倾, 倾角75°。

(4)珠溪桥钻孔剖面(图6d)全长697 m, 由南北向的ZK15、ZK16、ZK13三个钻孔组成, 总进尺42.92 m, 单孔深度最大18.68 m, 最小9.7 m; 孔间距最大418 m, 最小279 m。ZK16与ZK13间标志层B₁顶面和标志层B₄基底面分别下落0.66 m、3.94 m, 且地表发现高0.5 m、北倾的陡坎, 顶部黄褐色粉砂被断错; ZK15与ZK16间标志层B₄基底面下掉3.72

m, 该剖面揭示的平行展布、呈阶梯状的两条断裂F₂₋₁、F₂₋₂, 断面均北倾, 由高密度电法反演图像推断倾角70°~80°。

(5)珠溪河南岸剖面(图6e)的联合钻孔剖面验证, 由南到北依次为ZK20、ZK21、ZK14、ZK09、ZK03、ZK04、ZK05、ZK02、ZK01和ZK06, 揭露基岩埋深与地球物理探测结果基本一致, 其中, F₂₋₅为错断基底大于154.3 m, 导致珠溪河以南为断陷幅度最大的地带, 晚新生代地层沉积厚度较大, 基底花岗岩断距数百米, 上覆第四纪及上新世海口组较南、北两侧厚200 m左右。由ZK04、ZK02和ZK05揭示, 顶上黄褐色粉细砂、标志层B₁青灰色淤泥质黏土和标志层B₂杂色黏土均出现落差, 认为F₂₋₆、F₂₋₇两条断裂断面均北倾, 正断层性质; ZK14、ZK09、ZK03和ZK04之间上新世海口组砂砾岩稳定延伸, 上部杂色黏土层可能受到河流冲刷作用等因素出现尖灭、而沉积较厚青灰色淤泥质黏土层。该剖面揭示的F₂₋₅、F₂₋₆和F₂₋₇倾角70°~75°。为平行展布、呈阶梯下掉的3条断裂, 南部断裂F₂₋₈控制了珠溪河南部分流域向西拐弯。

3.4 年代学测试

¹⁴C测年法和光释光(OSL)测年法广泛应用于第四纪地层定年, 以分析活动断裂最新活动时代, (杨顺虎, 2014; 董好刚等, 2016; 周毅, 2016)。分别在钻孔ZK07、ZK10、ZK11、ZK16中最新地层中采集1个¹⁴C年龄样品和2个光释光(OSL)年龄样品, 样品分布图见图6。针对标志层B₁, 在ZK07深度3.8~4 m处青灰色淤泥质黏土取¹⁴C年龄样品, 测试年龄为(6.93±0.03) ka B.P., 在ZK16深度2.9~3.0 m处青灰色淤泥质黏土取光释光年龄样品, 测试年龄结果(5.8±0.4) ka B.P., 在ZK11深度0.9~1 m处黄褐色粉细砂取光释光(OSL)年龄样品, 测试年龄为(5.0±0.4) ka B.P.(表2); 此外, 前人测得淤泥质黏土中贝壳¹⁴C年龄为(2214±156) a, 属于全新统(赵希涛, 1978)。

4 讨论

4.1 马袅—铺前断裂东延特征

通过前述活动断裂地貌填图、高密度电法探测和联孔剖面验证, 结合吴泽龙(1988)与徐锡伟等(2015)等研究成果, 认为东寨港以东马袅—铺前断

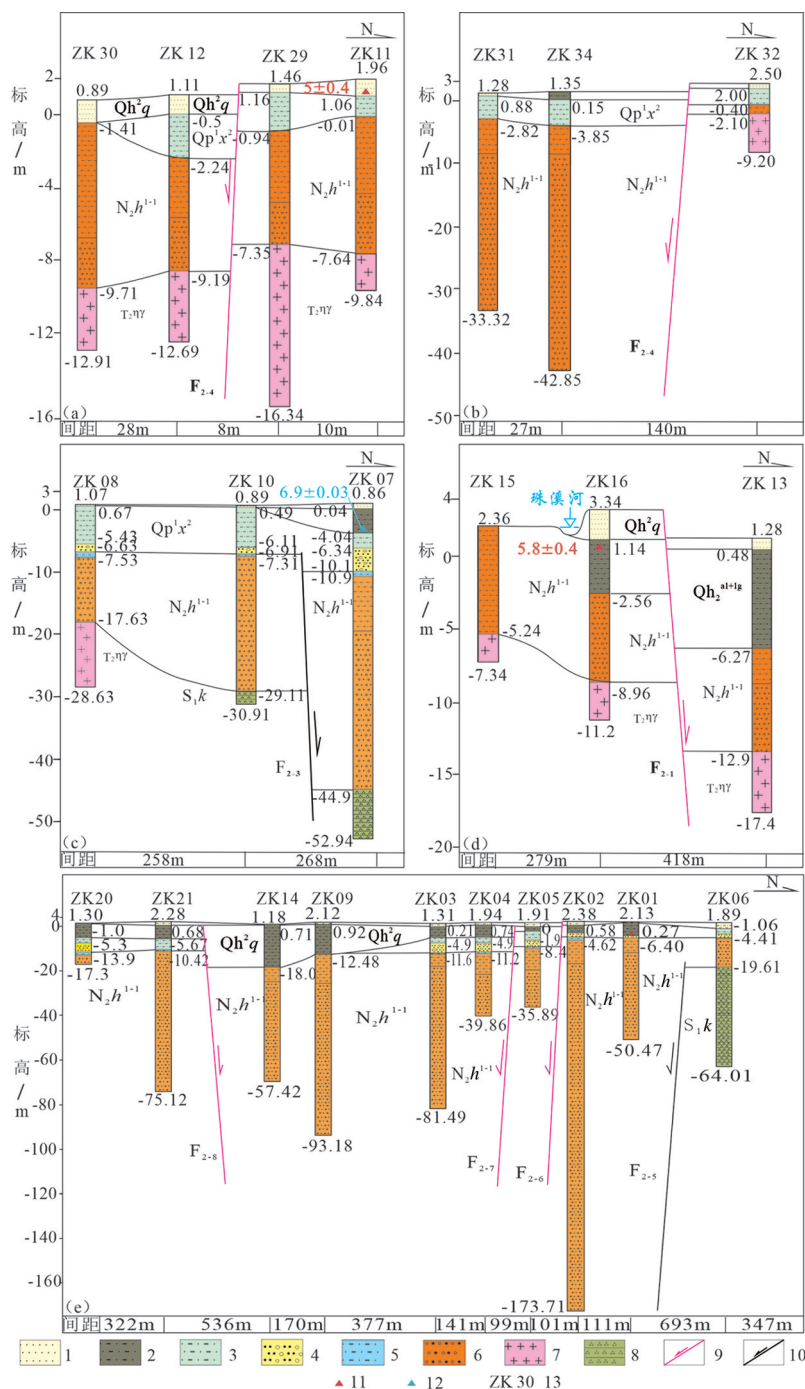


图6 马袅—铺前断裂东段钻探联孔剖面图

a—山尾村钻孔剖面；b—良坑山钻孔剖面；c—港头村钻孔剖面；d—珠溪桥钻孔剖面；e—珠溪河南岸联孔剖面。1—全新统黄褐色粉细砂(Qh²q)；2—全新统青灰色淤泥质黏土(Qh²g)；3—下更新统秀英组杂色黏土(Qp¹x²)；4—下更新统秀英组砾质砂(Qp¹x¹)；5—上新统海口组褐色黏土(N₂h¹⁻³)；6—上新统海口组砾岩(N₂h¹⁻³)；7—中三叠系花岗岩(T₂γ)；8—志留系空列村组变质岩(S₁k)；9—新生断裂；10—前第四纪断裂；11—OSL样品；5±0.4；测年结果/ka B.P.；12—¹⁴C样品；6±0.03；测年结果/ka B.P.；13—钻孔号

Fig.6 Geological sections of united drilling across the eastern segment of the Maniao-Puqian fault

a—Shanwei Village profile；b—Liangkeng Village profile；c—Gangtuo Village profile；d—Zhuxi bridge profile；e—South side of Zhuxi River profile. 1—Holocene silty sand(Qh²q)；2—Holocene cinerous clay(Qh²g)；3—Lower Pleistocene Xiuying Formation variegated clay(Qp¹x²)；4—Lower Pleistocene Xiuying Formation sandy gravel(Qp¹x¹)；5—Pliocene Haikou Formation brown clay(N₂h¹⁻³)；6—Pliocene Haikou Formation sandy gravel(N₂h¹⁻³)；7—Middle Triassic granite(T₂γ)；8—Silurian Tuolie Formation gneiss(S₁k)；9—Newly-generated faults；10—Pre-Quaternary fault；11—Thermoluminescence samples；5±0.4；dating result /ka B.P.；12—¹⁴C sample；6±0.03；dating result ka B.P.；13—Drilling number

表1 马袅—铺前断裂东段钻孔揭示标志层断距

Table 1 Vertical offsets of stratigraphic markers revealed by drillings across the eastern segment of the Maniao - Puqian Fault

剖面	断层编号	断层倾向	上断点埋深/m	标志层编号	下盘顶界标高与厚度/m		上盘顶界标高与厚度/m		断距/m
					标高	厚度	标高	厚度	
山尾村剖面(a)	F ₂₋₄	S	地表陡坎	B ₂	1.16	2.1	-0.5	2.19	1.66
				B ₄	-7.35	未见底	-9.19	未见底	1.84
良坑山剖面(b)	F ₂₋₄	S	地表陡坎	B ₂	2.0	2.4	-0.15	3.7	1.85
				B ₄	-2.1	未见底	>-42.85	未见底	>40.8
港头村剖面(c)	F ₂₋₃	N	(-6.11)~(-6.91)	B ₁	未见		0.04	4.08	
				B ₂	0.49	5.62	-4.04	2.3	<3.55
				B ₃	-6.91	0.4	-10.1	0.8	3.19
	F ₂₋₅	N	(-7.53)~(-17.63)	B ₄	-29.11	未见底	-44.9	未见底	15.79
				B ₂	0.67	4.76	0.49	5.62	0.18
				B ₃	-6.63	1.1	-6.91	0.4	0.28
珠溪桥剖面(d)	F ₂₋₁	N	地表陡坎	B ₄	-17.63	未见底	-29.11	未见底	11.48
				B ₁	1.14	3.7	0.48	6.75	0.66
	F ₂₋₂	N	2.36	B ₄	-8.96	未见底	-12.9	未见底	2.94
				B ₄	-5.24	未见底	-8.96	未见底	3.72
珠溪河南岸剖面(e)	F ₂₋₅	S	(-5.3)~(-20.5)	B ₄	19.61	未见底	未见		>154.1
				B ₁	0.58	3.4	0	1.9	0.58
	F ₂₋₆	S	地表陡坎	B ₃	-4.62	1.0	-8.4	0.8	3.78
				B ₂	-1.9	3.1	-4.86	2.2	2.96
	F ₂₋₇	S	(-1.36)~(-2.1)	B ₃	-8.4	0.8	-11.2	0.8	2.8
B ₁				-5.67	4.99	-18.02	17.31	12.35	

裂东段为全长约20 km,约11 km宽的断裂带,正断性质。总体呈北东东向展布,西起琼山,向东经珠溪河至锦山镇南桥村东侧,空间上呈断续雁列状排列。一系列北倾与南倾正断层组成三堑夹两垒的构造,继承了上新世构造形态,主体由8条次级正断层组成。F₂₋₁位于珠溪河东部,下寨村西部至红坡

村北部,长约4.2 km,NEE向展布;F₂₋₂西起东井村西侧,向东经珠溪河至东村洋一带,走向北东东,倾角向南,倾角较陡,全长11 km;F₂₋₃位于F₂₋₂北侧潭榄村附近,长约3 km,为隐伏断裂;F₂₋₄位于良坑山附近,NE走向,地貌及地球物理特征显示其不连续分布特性;F₂₋₅断裂显示出明显的几何分段特征,西起琼山,向东横切东寨港,经铺前,沿珠溪河至锦山镇南桥村东侧,总体为断续分布的南倾正断层,长约20 km,宽1.5 km。地貌上控制了珠溪河的分布;F₂₋₆、F₂₋₇和F₂₋₈倾角70°~75°,为平行展布、呈阶梯下掉的3条断裂,南部断裂F₂₋₈控制了珠溪河南部分支流域向西拐弯。

4.2 断裂活动性

4.2.1 断裂最新活动时代

根据地表活动断层断错地貌现象、地球物理探测及钻孔联孔剖面揭示的上断点位置和断错垂直

表2 钻孔样品年龄测试结果

Table 2 Dating results of the drilling samples

样品号	采样地点	岩性及采样深度/m	测试类型	距今年龄/ka B.P.
ZK07-02	ZK07	泥炭(3.8~4)	¹⁴ C	6.93±0.03
OSL11-1	ZK11	黄褐色粉细砂(0.9~1.0)	OSL	5.0±0.4
OSL16-1	ZK16	青灰色淤泥质黏土(2.9~3.0)	OSL	5.8±0.4

注:光释光年龄测试均在南京师范大学实验室进行;¹⁴C年龄测试均在美国Beta实验室进行。

表3 马袅铺前断裂东段断裂活动性质及时代

Table 3 Activity character and ages of the eastern segment of Maniao - Puqian fault

断层编号	上断点埋深/m	断错最新地层	断距/m	活动时代	备注
F ₂₋₁	地表陡坎	全新世黄褐色粉细砂	0.5	全新世	裸露
F ₂₋₂	2.36	上新世海口组砂砾石层	3.72	上新世	隐伏
F ₂₋₃	-6.11~-6.91	上新世海口组褐色黏土	3.19	早-中更新世	隐伏
F ₂₋₄	地表陡坎	全新世黄褐色粉细砂	0.35	全新世	裸露
F ₂₋₄	地表陡坎	全新世黄褐色粉细砂	0.5	全新世	裸露
F ₂₋₅	-7.53~-17.63	上新世海口组砂砾石层	11.48	上新世	隐伏
F ₂₋₆	地表陡坎	全新世黄褐色粉细砂	0.58	全新世	裸露
F ₂₋₇	-1.36~-2.1	全新世青灰色淤泥质黏土	2.96	全新世	隐伏
F ₂₋₈	-1.6~-7.95	全新世青灰色淤泥质黏土	<12.35	全新世	隐伏

位移,结合 OSL 和 ¹⁴C 测年结果,认为 F₂₋₁ 断层为全新世裸露断层,地表发现高 0.5 m、北倾的陡坎,顶部黄褐色粉砂被断错,下部全新世青灰色淤泥质黏土和花岗岩基底面被断错,垂直位移分别为 0.66 m 和 2.94 m,说明该断层属多期活动的断层;F₂₋₂ 为前第四纪断层,根据上部断距应小于等于下部断距,判断其上断点埋深 1.14~2.56 m,断层断错了上新世砂砾石层,垂直断距 3.72 m,根据测年结果判定,该断层早更新世以来未有显著活动;F₂₋₃ 为隐伏早-中更新世断层,上断点埋深 0.04~4.04 m,被早更新世杂色黏土所覆盖,垂直断距 3.19 m,下部变质岩基底垂直断距 15.79 m,由标志层的沉积年龄限定该断层的最新活动时代在早更新世到中更新世;F₂₋₄ 断层为全新世裸露活动断层,地表形成北高南低的陡坎,全新世晚期陆相沉积的黄褐色粉砂质黏土被断错,垂直位移 0.35 m,钻孔揭示下部杂色黏土和花岗岩基底面位移量为 0.88 m 和 1.52 m,说明该断裂属于全新世地震断裂;F₂₋₅ 为前第四纪隐伏断层,限于标志的分布和钻探的局限性,只能确定该断层的上断点在标志层 B₃ 和变质岩基底之间,上断点埋深 7.53~17.63 m,被上部上新世海口组褐色黏土所覆

盖,表明该断层在标志层 B₃ 沉积以来没有发生明显断错活动,变质岩基底垂直断距 11.48 m。F₂₋₆ 为裸露活动断层,全新世晚期陆相沉积的黄褐色粉砂质黏土被断错,垂直位移 0.58 m,地表形成北高南低的陡坎,钻孔揭示上新世海口组垂直位移 3.78 m,该断层有多期活动;F₂₋₇ 为隐伏活动断层,上断点埋深 1.36~2.1 m,断层断错了全新世中期青灰色贝壳淤泥质黏土层,上断点被全新世晚期黄褐色粉砂质黏土所覆盖,全新世中期青灰色贝壳淤泥质黏土层垂直断错 2.96 m,与下部上新世海口组垂直位移量一致,说明该断裂属于全新世新生断裂(表 3)。珠溪河南岸活动断裂 F₂₋₈ 断错断错全新世贝壳淤泥质黏土,垂直断错全新世地层 12.35 m。

4.2.2 断裂活动速率

由测年结果和钻孔剖面揭露的断层最新断距可以计算出各条活动断裂全新世以来的最新活动速率(表 4)。根据测年结果,地表黄褐色粉细砂底界沉积年龄为(5±0.4) ka B.P.,标志层 B₁ 底界沉积年龄为(6.9±0.03) Ka B.P.。珠溪桥剖面揭示的断层 F₂₋₁,标志层 B₁ 垂直断距 3.71 m,(6.9±0.03)ka B.P. 以来垂直活动速率为 0.54 mm/a;黄褐色粉细砂底界

表4 马袅—铺前断裂带东段全新世滑动速率

Table 4 Slip rate of the eastern segment of Maniao - Puqian fault during Holocene

断裂编号	隐伏/裸露	最新活动时代	Qh(B ₁) 断距/m	(6.9±0.03) ka 以来 活动速率/(mm/a)	Qh(黄褐色粉细砂) 底界断距/m	(5±0.4) ka 以来 活动速率/(mm/a)
F ₂₋₁	裸露	Qh	3.71	0.54	0.66	0.13
F ₂₋₄	裸露	Qh			1.66	0.33
F ₂₋₄	裸露	Qh			1.15	0.23
F ₂₋₆	裸露	Qh	3.78	0.71	0.58	0.12
F ₂₋₇	隐伏	Qh	2.96	0.43		
F ₂₋₈	隐伏	Qh	12.35	1.79		

垂直断距 0.66 m,即全新世(5.8±0.4) ka B.P. 以来的垂直活动速率为 0.13 mm/a;山尾村钻孔剖面揭示的断层 F₂₋₄,黄褐色粉细砂底界垂直断距 1.66 m,考虑黄褐色粉细砂顶界落差小于该值,因此认为该断距即为(5±0.4)ka 以来断层的累计位移 1.66 m,从而估算得全新世(5±0.4)ka B.P. 以来的垂直运动速率为 0.33 mm/a;良坑山钻孔剖面揭示的断层 F₂₋₄,黄褐色粉细砂底界垂直断距约为 0.15 m,计算其(5±0.4) ka B.P. 以来的垂直运动速率为 0.23 mm/a;珠溪河南岸剖面 F₂₋₆、F₂₋₇、和 F₂₋₈ 自(6.9±0.03)ka 以来垂直活动速率分别为:0.71、0.43、1.79 mm/a。

4.3 地壳稳定性评价

为保障评价结果客观并具有区域可比性,稳定性评价指标参照中国地质调查局《活动断层与区域地壳稳定性调查评价规范(1:50000、1:250000)》(DD2015-02)以及国家专业标准 ZBD14002-89 相关分级指标的要求,综合区域稳定性级别评判分为不稳定、次不稳定、次稳定和稳定四级,按照区域地壳稳定性评价规范中的断层活动强度分级标准((DD2015-02)2015),马袅—铺前断裂带东段活动强度属于中等—较强活动断裂,其中, F₂₋₁~F₂₋₇ 为中等活动断层, F₂₋₈ 为较强活动断层。影响琼东北地区地壳稳定性评价的主要因素包括断层活动强度、历史地震震级、潜在震源区地震烈度等((DD2015-02)2015),历史上,沿马袅—铺前断裂发生过多地地震,如 1605 年琼山 7.5 级地震、1618 年老城 5.5 级地震和 1913 年海口 5 级地震,其中,1605 年琼山大地震烈度曾达 II 级(陈恩民和黄咏茵,1989)。因此,东寨港东岸地区属于构造不稳定区,应加强断裂活动的监测力度,工程建设时应按照相关标准进行规避,尤其在 NEE 向马袅—铺前断裂和 NNW 向铺前一清澜断裂交汇区域不亦规划大型工程及建筑,以开发旅游和农业为主。

5 结 论

本文通过活动断裂地貌填图、高密度电法探测、联孔钻探等方法,并结合年代学测试,对琼北马袅—铺前断裂东段活动断裂进行了调查:

(1)查明了马袅—铺前断裂东段展布特征:马袅—铺前断裂总体呈北东东向展布,西起琼山,向东经珠溪河至锦山镇南桥村东侧,空间上呈断续雁

列状排列,东寨港以东全长约 20 km,约 11 km 宽的断裂带,由北至南的 F₂₋₁~F₂₋₈ 等 8 条次级正断层组成,构成三堑夹两垒构造。

(2)在东寨港以东段,鉴别出 8 条断裂: F₂₋₁、F₂₋₄、F₂₋₆、F₂₋₇、F₂₋₈ 等 5 条为全新世活动断裂,其中 F₂₋₇ 和 F₂₋₈ 为隐伏活动断层, F₂₋₁、F₂₋₄、F₂₋₆ 为裸露活动断裂; F₂₋₂、F₂₋₅ 为前第四纪断裂; F₂₋₃ 为早中更新世断裂;全新世断裂部分继承老断层,同时在地震时也产生新的破裂;不同时代的断层均表现为正断为主的活动方式,断距随活动时代变新而逐渐减小。全新世以来 F₂₋₁、F₂₋₇、F₂₋₈ 断裂垂直活动速率在 0.43~1.79 mm/a; F₂₋₄、F₂₋₆ 断裂垂直活动速率在 0.12~0.33 mm/a。

(3)东寨港东岸地区为构造不稳定区,应加强断裂活动的监测力度,工程建设时应按照相关标准进行规避,尤其在 NEE 向马袅—铺前断裂和 NNW 向铺前一清澜断裂交汇区域不亦规划大型工程及建筑,以开发旅游和农业为主。

致谢:光释光样品由南京师范大学白世彪老师测试完成,中国地质大学(北京)的游报捷同学在遥感影像处理工作中给予了很大帮助,审稿专家及编辑老师对论文提出宝贵意见,在此一并表示感谢。

References

- Cao Xinwen, Ma Xiumin, Hu Daogong. 2017. Application of the resistivity tomography method to detection of active faults northeast of the Hainan Island[J]. *Geology and Exploration*, 53(5): 1001-1009 (in Chinese with English abstract).
- Chai Zhizhang, Meng Guangkui, Du Juan, Wang Yin, Liu Baojin, Shen Weihua, Lei Qiyun, Liao Yuhua, Zhao Chengbin, Deng Shaoying, Zhang Xuehui, Xie Xiaofeng. 2006. Comprehensive multilevel exploration of buried active fault: An example of Yinchuan buried active fault[J]. *Seismology and Geology*, 28(4): 536-546 (in Chinese with English abstract).
- Chen Enmin, Huang Yongyin. 1989. Characteristics of the seismic damage and analysis of the seismic structure of the 1605 great earthquake of Qiongzhou, Hainan Island[J]. *Seismology and Geology*, (3): 319-331 (in Chinese with English abstract).
- Ding Yuanzhang, Guo Qinhua. 1988. Structural conditions and seismological mechanism of Qiongzhou earthquake [C]// Ding Yuanzhang (ed.). *A Collection of Earthquake Studies in Northern Hainan Island*. Beijing: Seismological Press, 265-272 (in Chinese).
- Dong Haogang, Lu Tao, Li Yiyong, Li Yiyong, Zeng Min. 2016.

- Quaternary activity of Shawan fault in Pearl River delta[J]. *Geology in China*, 43(5): 1803–1813(in Chinese with English abstract).
- Hu Yaxuan, Hao Ming, Ji Lingyun, Wang Qingliang. 2014. The Characteristics of three-dimensional crustal movement in the northeastern margin of Qiongzhou[C]//Papers Collection of the China Geosciences Joint Academic Annual Meeting, Beijing: China Geophysical Society (in Chinese with English abstract).
- Lei Qiyun, Chai Zhizhang, Meng Guangkui, Du Peng, Wang Yin, Xie Xiaofeng, Zhang Xuehui. 2008. Composite drilling section exploration of Yinchuan buried fault[J]. *Seismology and Geology*, 30(1): 250–263 (in Chinese with English abstract).
- Lei Qiyun, Chai Zhizhang, Meng Guangkui, Du Peng, Wang Yin, Xie Xiaofeng. 2011. Method of locating buried active fault by composite drilling section doubling exploration[J]. *Seismology and Geology*, 33(1): 45–55 (in Chinese with English abstract).
- Li Ping, Yang Meie, Liu Xingsong, Zhao Xiang. 1988. Analysis of active fault in the northern Qiongzhou[C]//Ding Yuanzhang (ed.). A collection of Earthquake Studies in Northern Hainan Island. Beijing: Seismological Press, 41–52 (in Chinese).
- Liang Guanghe. 2018. A study of the genesis of Hainan Island[J]. *Geology in China*, 45(4): 693–705 (in Chinese with English abstract).
- Lin Chenghao, Wang Lei, Li Zhejun, Chu Fei. 2017. Application of collected resistivity tomography and shallow seismic method to the detection of concealed faults in areas with thin covers[J]. *Geology and Exploration*, 53(1): 133–140 (in Chinese with English abstract).
- Long Wenguo, Lin Yihua, Shi Chun, Zhou Jinbo, Lü Changyan. 2006a. Revision of the Pleistocene Daotang in northern Hainan Island[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(4): 469–474 (in Chinese with English abstract).
- Long Wenguo, Lin Yihua, Zhu Yaohe, Shi Chun, Zhou Jinbo. 2006b. Establishment of the early-mid Pleistocene Duowen Formation on northern Hainan Island[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 408–414 (in Chinese with English abstract).
- Qi Bangshen, Feng Chengjun, Tan Chengxuan, Zhang Peng, Meng Jing, Zhang Chunshan, Yang Weimin, Yang Xiaoxiao, Lei Xiaodong. 2019. Application of comprehensive geophysical-drilling exploration to detect the buried North Boundary active fault belt of Yanqing-Fanshan Basin in Sangyuan town, Beijing-Zhangjiakou area[J]. *Geology in China*, 46(3): 468–481(in Chinese with English abstract).
- Wu Zelong. 1988. Discussion on tectonic activity in Dongzhaigang Area[C]//Ding Yuanzhang (ed.). A Collection of Earthquake Studies in Northern Hainan Island. Beijing: Seismological Press, 106–111 (in Chinese).
- Xiang Hongfa. 2003. Some problems in the exploratina and research of buried active fault[J]. *Seismology and Geology*, 25(3): 460–466 (in Chinese with English abstract).
- Xu Qihao. 1985. Discussion on subsidence mechanism of Qiongzhou earthquake[J]. *South China Journal of Seismology*, (4): 30–37 (in Chinese).
- Xu Qihao. 1986. Formation and migration of Dongzhai Port in the northern Hainan Island and the major Qiongzhou earthquake of 1605[J]. *Seismology and Geology*, (3): 94–98 (in Chinese with English abstract).
- XU Xiwei. 2015. An Introduction to Urban Active Faults in China[M]. Beijing: Seismological Press, 380–403 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shunhu, Miao Laicheng, Zhu Mingshuai, Li Xingbo, Li Jingchen. 2014. Lata Cenozoic structural deformation and tectono-geomorphic features along the Gobi-Tianshan Fault System[J]. *Geology in China*, 41(4):1159–1166(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hunan, Zhao Xitao. 1984. Characteristics of the Neotectonic movement in the Hainan Island and Leizhou Peninsula Area[J]. *Chinese Journal of Geology*, (3): 276–287 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Bai Lingyan, Cai Xiangmin, Wang Jiming, Liu Yu, He Fubin, Wang Zhihui, He Jing. 2014. An analysis of the activity of the northwest part of Nankou-Sunhe fault[J]. *Geology in China*, 41(3): 902–911 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Linyun, Wang Zhenmin. 1988. Study on the deep depth of artificial seismic exploration in Northeast Qiongzhou[C]//Ding Yuanzhang (ed.). A Collection of Earthquake Studies in Northern Hainan Island. Beijing: Seismological Press, 112–116 (in Chinese).
- Zhang Shiliang, Zhang Ruihe. 1988. Analysis of fault structures in North Qiongzhou Area by remote sensing technology[C]//Ding Yuanzhang (ed.). A Collection of Earthquake Studies in Northern Hainan Island. Beijing: Seismological Press, 1–9 (in Chinese).
- Zhang Xiaoliang, Zhang Lei, Cai Xiangmin, Bai Lingyan. 2016. A study of structure and activity characteristics of the northern segment of Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing plain area[J]. *Geology in China*, 43(4): 1258–1265 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chengbin, Yuan Hongke, Li Deqing, Sun Zhenguo, Zhao Jingrao. 2007. Exploration and study of buried faults under a loose overburden[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 27(2): 107–1136 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xitao, Sha Qingan, Feng Wenke. 1978. Holocene beachrocks at Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Geology*, 13(2): 163–173 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yi, Guo Gaoxuan, Zhang Lei, Cai Xiangmin, Lei Kunchao. 2016. The division of Quaternary strata and tectonic evolution in Houshayu Sag of Beijing[J]. *Geology in China*, 43(3): 1067–1075 (in Chinese with English abstract).
- Zou Heping, Huang Yukun. 1987. The tectonic characteristics and

evolution of the Qiongbai Cenozoic depression[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, (1): 33–46 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹新文, 马秀敏, 胡道功. 2017. 电阻率层析成像技术在琼东北活动断裂探测中的应用[J]. *地质与勘探*, 53(5): 1001–1009.
- 柴焱章, 孟广魁, 杜鹏, 王银, 刘保金, 沈卫华, 雷启云, 廖玉华, 赵成斌, 鄞少英, 张学辉, 谢晓峰. 2006. 隐伏活动断层的多层次综合探测——以银川隐伏活动断层为例[J]. *地震地质*, 28(4): 536–546.
- 陈恩民, 黄詠茵. 1989. 1605年海南岛琼州大地震的震害特征和发震构造研究[J]. *地震地质*, (3): 319–331.
- 丁原章, 郭钦华. 1988. 琼山地震的构造条件和发震机制[C]//海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社, 265–272.
- 董好刚, 路韬, 何万双, 黎义勇, 曾敏. 2016. 珠江三角洲沙湾断裂带第四纪活动性研究[J]. *中国地质*, 43(5): 1803–1813.
- 胡亚轩, 郝明, 季灵运, 王庆良. 2014. 琼东北缘现今地壳三维运动特征[C]//中国地球科学联合学术年会论文集. 北京: 中国地球物理学会.
- 雷启云, 柴焱章, 孟广魁, 杜鹏, 王银, 谢晓峰, 张学辉. 2008. 银川隐伏断层钻孔联合剖面探测[J]. *地震地质*, 30(1): 250–263.
- 雷启云, 柴焱章, 孟广魁, 杜鹏, 王银, 谢晓峰. 2011. 隐伏活断层钻孔联合剖面对折定位方法[J]. *地震地质*, 33(1): 45–55.
- 李珏, 杨美娥, 刘行松, 赵翔. 1988. 琼北地区活动性断裂的研究[C]//丁原章主编. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社, 41–52.
- 梁光河. 2018. 海南岛的成因机制研究[J]. *中国地质*, 45(4): 693–705.
- 林承灏, 王雷, 黎哲君, 诸飞. 2017. 电成像与浅层地震联合在浅覆盖区隐伏断层探测中的应用[J]. *地质与勘探*, 53(1): 133–140.
- 龙文国, 林义华, 石春, 吕嫦艳. 2006a. 海南岛北部更新世道堂组的重新厘定[J]. *地质通报*, 25(4): 469–474.
- 龙文国, 林义华, 朱耀河, 石春, 周进波. 2006b. 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.
- 戚帮申, 丰成君, 谭成轩, 张鹏, 孟静, 张春山, 杨为民, 杨肖肖, 雷晓东. 2019. 京张地区延矾盆地北缘活动断裂带桑园镇隐伏段综合地球物理及钻孔地层剖面研究[J]. *中国地质*, 46(3): 468–481.
- 吴泽龙. 1988. 东寨港地区构造活动性的探讨[C]//丁原章主编. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社, 106–111.
- 向宏发. 2003. 隐伏活动构造探测研究的若干问题讨论[J]. *地震地质*, 25(3): 460–466.
- 徐起浩. 1985. 琼山大震沉陷机理讨论[J]. *华南地震*, (4): 30–37.
- 徐起浩. 1986. 海南岛北部东寨港的形成、变迁与1605年琼州大地震[J]. *地震地质*, (3): 94–98.
- 徐锡伟. 2015. 中国城市活动断层概论[M]. 北京: 地震出版社, 380–403.
- 杨顺虎, 苗来成, 朱明帅, 李兴波, 李景晨. 2014. 蒙古戈壁天山断裂带晚新生代构造变形与构造地貌研究[J]. *中国地质*, 41(4): 1159–1166.
- 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.
- 张磊, 白凌燕, 蔡向民, 王继明, 刘予, 何付兵, 王志辉, 何静. 2014. 北京平原南口—孙河断裂带北西段活动性分析[J]. *中国地质*, 41(3): 902–911.
- 章林云, 王振明. 1988. 琼东北地区人工地震测深研究[C]//丁原章主编. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社, 112–116.
- 张世良, 张瑞禾. 1988. 应用遥感技术对琼北地区断裂构造的分析[C]//丁原章主编. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社, 1–9.
- 张晓亮, 张磊, 蔡向民, 白凌燕. 2016. 北京平原黄庄—高丽营断裂北段结构特征及活动特点研究[J]. *中国地质*, 43(4): 1258–1265.
- 赵成斌, 袁洪克, 李德庆, 孙振国, 赵景尧. 2007. 松散覆盖层内隐伏断层探测研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 27(2): 107–113.
- 赵希涛, 沙庆安, 冯文科. 1978. 海南岛全新世海滩岩[J]. *地质科学*, 13(2): 163–173.
- 周毅, 郭高轩, 张磊, 蔡向民, 雷坤超. 2016. 北京后沙峪凹陷的第四纪地层划分与构造演化[J]. *中国地质*, 43(3): 1067–1075.
- 邹和平, 黄玉昆. 1987. 琼北新生代拗陷构造特征及其演化[J]. *大地构造与成矿学*, (1)33–46.