

文章编号: 1004—5589 (2018) 01—0148—06

铺前一清澜断裂西支晚更新世活动特征

刘凤香¹, 苗雨雁², 荆振杰³, 杜海娥¹

1. 中国地质博物馆, 北京 100034;
2. 北京自然博物馆, 北京 100050;
3. 中国地震局 地壳应力研究所, 北京 100085

摘要: 海域浅层地震探测调查表明, 铺前一清澜断裂向北西海域方向延伸, 断裂走向 NW-SE, 倾向 SW, 为高倾角的正断层; 在地震剖面上, 断裂断错了第四系地层; 进一步应用钻探技术对铺前一清澜断裂进行探测研究, 结合层序地层学、岩性岩相分析与年代测定等方法建立了钻孔联合剖面, 揭示断层性质为正断层, 倾向 SW, 断距 >4.0 m, 断层的最新活动时代为晚更新世, 第四纪表现为张性活动, 断裂的平均垂直速率为 0.15 mm/a。

关键词: 铺前一清澜断裂; 隐伏活动断裂; 晚更新世活动; 浅层地震探测; 钻探探测

中图分类号: P534.631; P546 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.012

Late Pleistocene activities characteristics of western segment of Puqian-Qinglan fault

LIU Feng-xiang¹, MIAO Yu-yan², JING Zhen-jie³, DU Hai-e¹

1. Geological Museum of China, Beijing 100034, China;
2. Beijing Museum of National History, Beijing 100050, China;
3. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract: The marine shallow seismic exploration survey shows that Puqian-Qinglan fault extends NW seawards. It is a high angle normal fault striking NW-SE and dipping SW. On the seismic profile, the fault offsets Quaternary strata. Further study is undertaken combining drilling data with sequence stratigraphy, lithofacies analysis and dating, and a geological section across well boreholes is established, which reveals that the fault is a normal fault, dipping SW, and the fault throw is more than 4.0 m. The latest activity of the fault occurred in Late Pleistocene and it was characterized by extensional feature in Quaternary. The average vertical slip rate of the fault is 0.15 mm/a.

Key words: Puqian-Qinglan fault; buried active fault; Late Pleistocene activity; shallow seismic exploration; drilling exploration

0 引言

断裂活动性及其地震危险性和地表位错的可能

性评估, 是地震地质研究领域内的一项重要内容, 对制定防震减灾对策具有重要意义^[1]。铺前一清澜断裂位于琼北东部铺前湾至清澜港附近, 呈

收稿日期: 2016-03-20; 改回日期: 2017-06-28

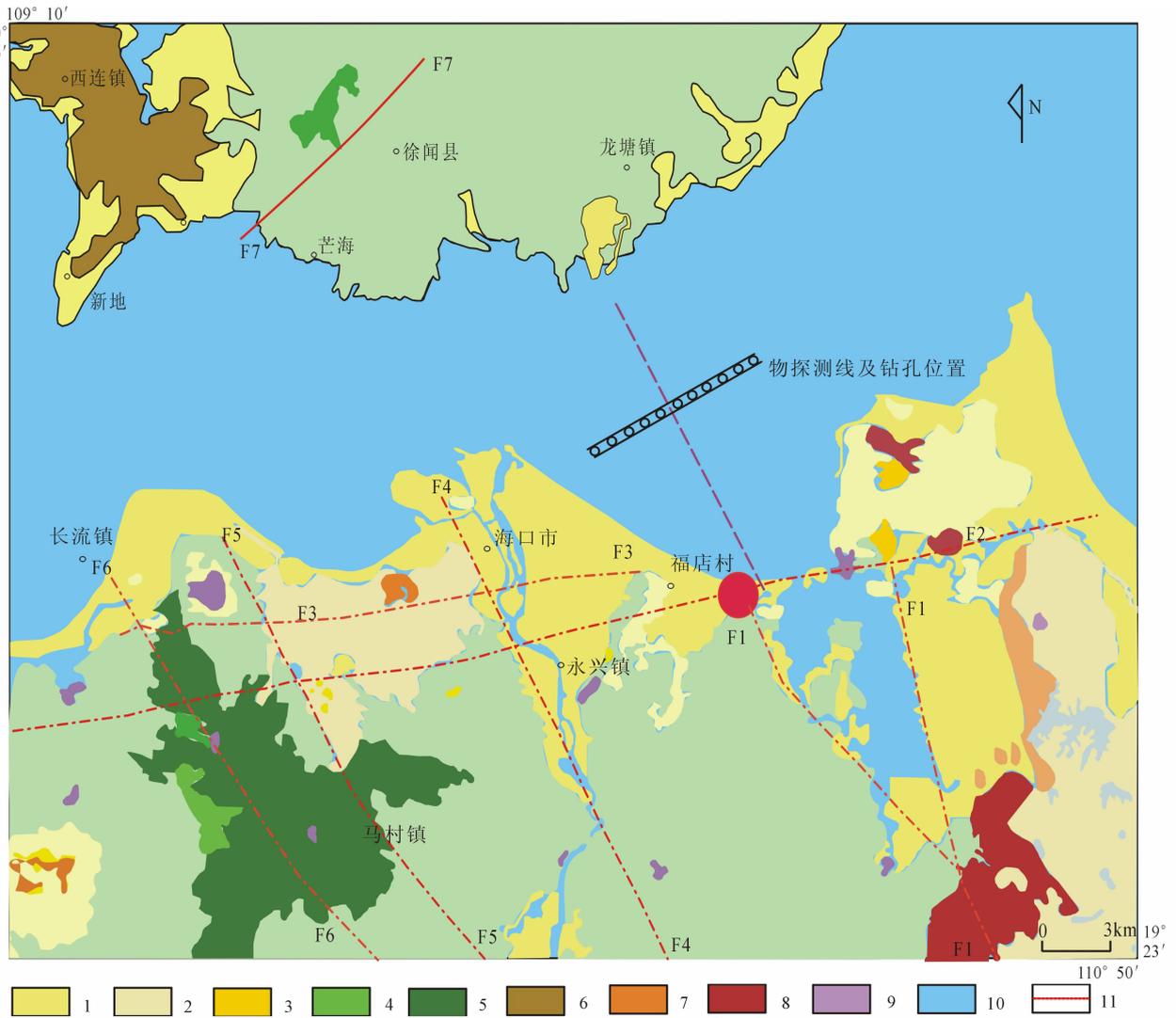
基金项目: 国土资源部部门预算项目 (121113118902)。

通讯作者: 荆振杰 (1976-), 男, 高级工程师, 主要从事断裂构造研究和地震安全性评价。E-mail: jingzhenjie@163.com

NW335°~345°展布,陆地上长约 60 km。两端延伸入海域(图 1),往南海海域长度可达数百公里^[2]。该断裂陆上部分由数条长约 10~25 km,呈雁行排列的断层组成,在大致坡以北分叉为两条,分别沿东寨港东、西两岸 NW 向延伸,平面上呈 Y 形,断裂带活动影响范围达 11 km。1605 年琼山 7 $\frac{1}{2}$ 级地震的烈度线分布形态显示,铺前一清澜断裂是该次大地震的发震构造之一^[24]。近 20 余年该断裂两侧小震活动仍相当活跃,且小震基本上沿断裂呈北西向排列,显示该断裂仍处于活动状态^[3]。

大量资料证实,该断裂东盘相对上升,西盘相对下降。

一些学者对该断裂做了研究,认为铺前一清澜断裂对地貌单元有控制作用,尤其对新近纪以来的地层控制,是该地区主要的发震构造断裂^[4],然而,目前仍然缺少该断裂断错第四纪地层的地质依据,尤其断裂向北西海域方向延伸段落的活动性不清楚,需要进一步深入工作。本次工作在物探基础之上,进行钻探,查明断裂在海域部分的展布和最新活动性。



1. 上全新统; 2. 下全新统; 3. 上更新统; 4. 下更新统; 5. 玄武岩; 6. 燕山期岩浆岩; 7. 喜山期岩浆岩; 8. 印支中期岩浆岩; 9. 印支晚期岩浆岩; 10. 海域; 11. 断裂。

断裂: F1. 铺前一清澜断裂; F2. 马袅—铺前断裂; F3. 新村—林乌断裂; F4. 海口—云龙断裂; F5. 琼华—莲塘村断裂; F6. 长流—仙沟断裂; F7. 徐闻断裂。

图 1 研究区地质构造图

Fig. 1 Geological map in studied area

1 物探剖面

地震勘探方法是探测地下地质构造的有效手段,对隐伏断层的探测目前主要采用地震反射波法。该方法利用多次覆盖技术压制干扰,提高地震资料的信噪比,利用地震叠加时间剖面上丰富的反射波信息判断构造形态和断层的位置、上断点的埋深、断面的倾向和倾角及断层的性质等^[5-13]。本次地震勘探采用多次覆盖反射波勘探方法。

在断裂延伸方向的海域布设1条NE向物探测线,并与可能存在的铺前一清澜断裂的西支走向尽可能垂直或大角度相交,测线长度约13 km,测线

间距1 500~1 600 m。浅震地震反射波法的点位利用高精度GPS系统进行定位放样,坐标系采用1954年国家坐标系;根据地震反射时间剖面成果资料,将反射波同相轴错断、反射同相轴数目突然增减或者消失、波组间隔突然变化、反射波同相轴形状突变、反射零乱或出现空白带或标准反射波同相轴发生分叉、合并、扭曲、强相位转换等现象作为判释断层的依据。

根据浅层地震勘探的结果,识别了2个主要反射界面,分别为T0和T5反射界面,其中在T0和T5之间又识别了4个次级反射界面,从上至下分别为T1、T2、T3和T4次级反射界面(图2)。

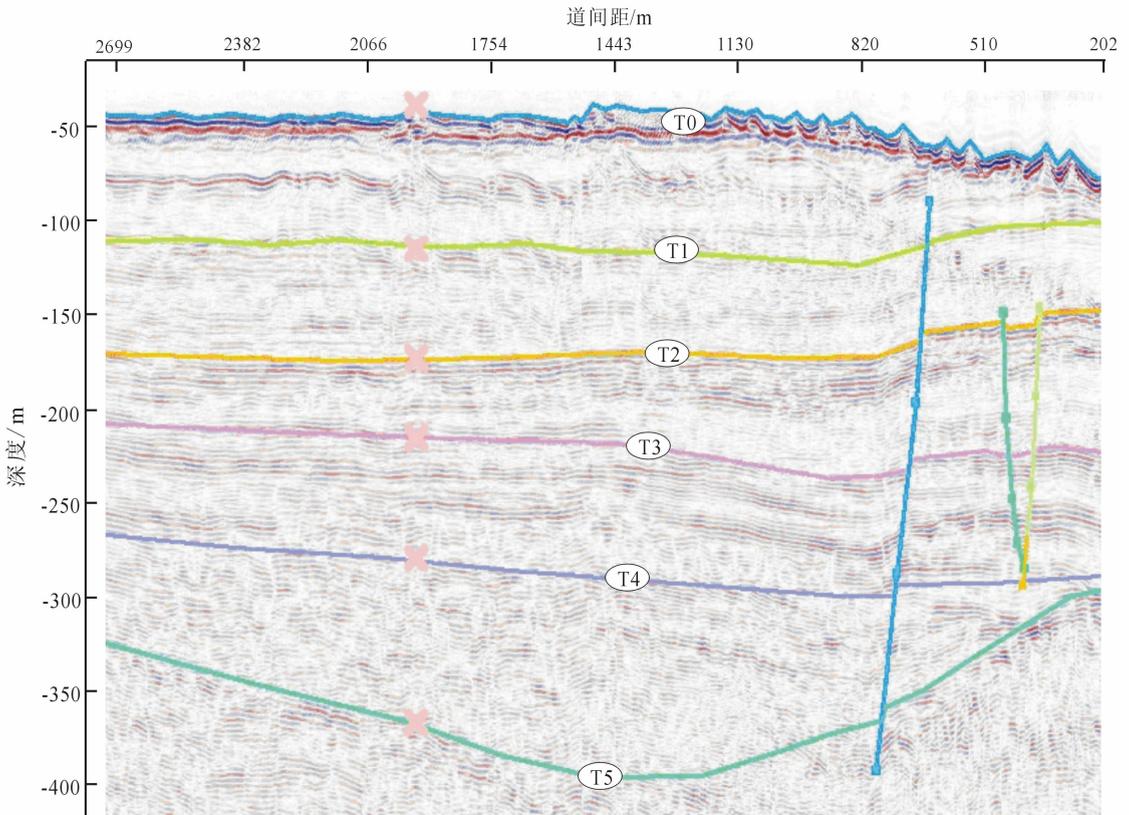


图2 浅层地震时间反射剖面

Fig. 2 Reflection profile of shallow seismic time

T1界面为一弱振幅、连续性较差、略有起伏的界面,表现为一削截面,它削截了下伏的T2界面。该界面以上表现为近于平行的反射特征。T2界面为一中振幅、中连续的反射界面,它是一个上超下削界面,在T2界面以上,地震反射轴表现为上超反射,在T2界面以下则表现为削截反射。沉

积物沿着先前形成的斜坡依次沉积,从而形成了上超的反射特征。T3界面为中振幅、连续性较好、平直的反射界面。该界面主要表现为一上超面,T3界面以上沉积层表现为向上超覆尖灭的反射特征,界面以下则表现为近平行的反射特征。部分测线可见该界面尖灭于下伏的T4界面。T4界面为中

-弱振幅、连续性较好、平直的反射界面。T4 界面主要表现为上超下削的反射特征，该界面以上表现为近平行的反射特征，部分测线可见该界面尖灭于下伏的 T5 界面。T5 界面为一连续性较好-中等的反射界面。该界面在工区东北端显示为一强振幅、倾斜的界面，且深部范围变化较大。部分测线可见 T3、T4 界面都尖灭于该界面。T5 界面明显区别于其他反射界面，是区域上一个重要的反射界面（图 2）。从反射时间剖面成果图上看，T1-T5 界面反射层同步中断，判断海域存在一条 NW-SE 向的正断层，倾向 SW，破碎带宽度约 20~60 m。

2 钻孔联合剖面

为验证浅层地震勘探结果，在测线发现的 F 断点的位置，沿着物探测线布置了 1 条钻探测线（图 3）。钻孔的布置采用了逐次限定的方法，首先在测线的端点及中间布设 3 个钻孔，根据相邻两个钻孔的地层差异性，在相邻两个钻孔中间逐渐增加

钻孔数量，以查清断裂的具体位置；在各地层中采取样品，利用地层测龄，限定断层最新的活动时代。根据钻孔揭示的断错位移量，确定断裂的平均滑动速率。

根据现场工作条件及钻孔揭示的地层，累计打了 10 个钻孔，钻孔间距见图 3，根据 10 个钻孔的岩性、颜色、粒度及铁锰结核含量，可分为 6 个标志层。由上至下分别为，钻孔上部①层为一套粉细砂，浅绿色，松散，级配良好，揭露的该层最大厚度 9.8 m，根据样品测试结果，地层的形成年代为全新世（5~6 ka）；位于该层之下的②层是灰绿色粉质黏土，含有粉砂，厚度 4.5~12 m，根据多个样品测试结果，沉积年代为全新世（7~8 ka）；③层为标志层灰褐色圆砾至粗砂，级配良好，磨圆度较好；该层之下的④层为灰色、黄色粉质黏土，层厚 26~47 m，在④层中夹④-1 层粗砂，根据多个样品测试结果，地层形成的年代为晚更新世（63~80 ka）；⑤层灰褐色中砂，夹有粉细砂，密实，分

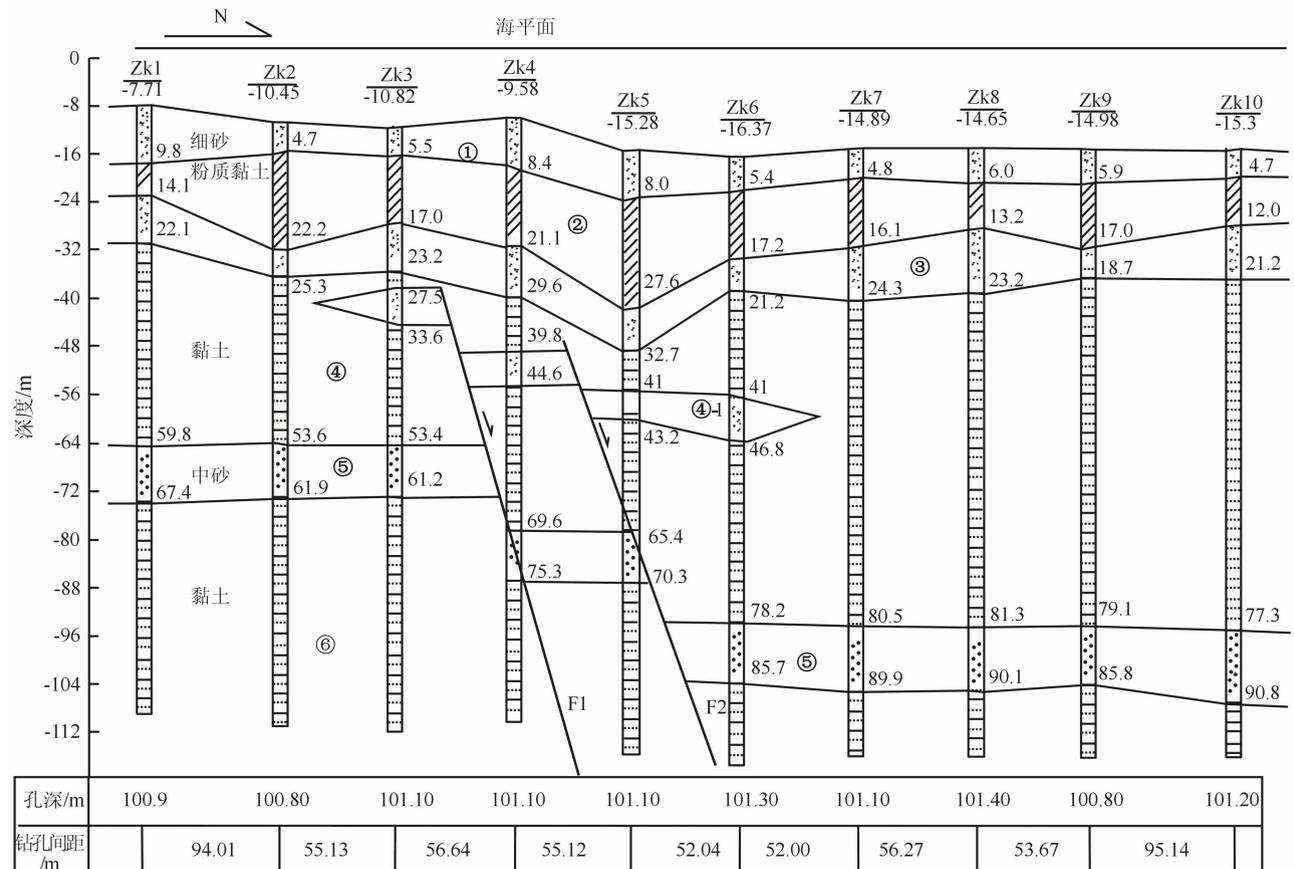


图 3 钻孔联合剖面

Fig. 3 Composite drilling section

选较好, 颗度均匀, 主要矿物成分为长石、石英, 含有零星黑色锰点与锈斑, 厚度为7~10 m; ⑥层灰色黏质粉土, 密实, 含有锰结核, 局部夹灰绿色条纹, 钻孔穿透该层, 根据光释光样品(OSL)测

年结果为96~140 ka(表1)。根据测年结果, 钻孔揭露的地层时代为晚更新世晚期至中更新世早期。

表1 地层光释光测年结果
Table 1 OSL dating results of strata

样品编号	样品埋深/m	U/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Th/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	K/%	实测含水量 /%	环境剂量率 /Gy · ka ⁻¹	等效剂量 /Gy	年龄/ka
2-OSL-64	11.30~11.50	2.87	15.90	2.14	24.29	4.20	28.26 ± 1.02	6.72 ± 0.71
2-OSL-65	13.00~13.20	3.08	17.20	2.15	28.04	4.14	30.11 ± 0.41	7.28 ± 0.73
2-OSL-66	22.40~22.60	2.98	16.60	1.83	19.83	4.24	341.98 ± 18.22	80.60 ± 9.13
2-OSL-67	33.50~33.70	2.84	16.50	1.90	21.19	4.19	345.59 ± 15.96	82.41 ± 9.08
2-OSL-68	30.60~30.80	3.58	22.60	2.11	17.36	5.34	341.36 ± 22.26	63.86 ± 7.62
2-OSL-69	99.80~100.00	2.77	14.60	2.04	14.39	4.25	308.84 ± 12.16	72.59 ± 7.80
5-OSL-70	5.90~6.10	3.26	17.60	2.06	28.09	4.17	28.03 ± 0.22	6.72 ± 0.67
5-OSL-71	21.50~21.70	2.63	17.20	2.31	22.23	4.46	315.26 ± 11.13	70.74 ± 7.50
5-OSL-72	23.10~23.30	2.20	12.90	2.18	20.82	3.89	373.24 ± 4.39	96.04 ± 9.67
5-OSL-73	47.10~47.30	3.02	15.70	2.17	16.42	4.62	290.98 ± 13.96	63.03 ± 6.99
6-OSL-74	7.10~7.30	2.90	16.10	1.96	21.77	4.26	29.12 ± 1.26	6.84 ± 0.73
6-OSL-75	16.50~16.70	3.74	18.00	2.08	18.64	4.87	28.04 ± 1.09	5.76 ± 0.62
6-OSL-76	74.50~74.70	2.59	15.00	2.13	21.45	4.09	391.42 ± 22.56	95.63 ± 11.04
6-OSL-77	28.70~28.90	1.09	8.59	1.46	18.88	2.52	343.91 ± 7.38	132.09 ± 13.53
6-OSL-78	38.50~38.70	2.65	15.80	2.11	21.93	4.21	310.19 ± 24.33	73.70 ± 9.37
9-OSL-79	9.30~9.50	2.67	14.40	1.86	23.95	3.62	26.79 ± 0.38	7.29 ± 0.74
9-OSL-80	14.00~14.20	3.11	16.80	1.87	27.46	3.93	31.96 ± 0.62	8.13 ± 0.83
9-OSL-81	20.80~21.00	3.40	20.20	2.30	27.93	4.53	33.16 ± 0.32	7.49 ± 0.79
9-OSL-82	25.10~25.30	2.77	18.70	2.51	16.60	5.03	399.17 ± 16.30	79.30 ± 8.57
9-OSL-83	87.20~87.40	1.47	9.08	1.52	21.28	2.62	368.18 ± 8.64	140.76 ± 14.46
9-OSL-84	39.60~39.80	3.11	19.70	2.31	22.96	4.76	373.27 ± 39.12	78.43 ± 11.36

注: 样品编号的第1位是钻孔编号; 样品由中国地震局地壳应力研究所释光实验室测定。

3 地层断错特征

根据钻孔揭露, 发现了两个断面; 在3号钻孔和5号钻孔之间, 断层F1错段④1层、⑤层和⑥层, 被断错的地层厚度基本一致, 断裂两侧地层对比清晰, ④1层上部断错垂直距离>4.0 m, ⑤层断错垂直距离8 m, 上断点顶部在④层顶部, 断裂倾向SW, 根据断错的最新地层及年代样品分析, 断裂最新活动时间为晚更新世晚期, 断裂上部断错距离4 m, 下部断错距离8 m, 具有累计效应, 分析4~8 m的断错距离可能由于断裂多期活动的累计结果。在4号钻孔和6号钻孔之间, 断层F2断错④1层、⑤层和⑥层, 倾向SW, 上断点在④层, 与物探资料有较好的一致性。根据被断错地层的时代及断错的位移, 得到断裂晚更新世以来的平均滑

动速率为0.15 mm/a。

4 结论与讨论

根据浅层地震勘探资料, 断层是一条NW-SE走向、倾向SW、视倾角约为39°~73°的正断层, 该断层在探测深度范围(海底以下200 m)内, 断距约3~12 m。根据钻孔联合剖面, 揭示断层性质为正断层, 倾向SW, 断距>4.0 m, 上断点位于④层顶部, 推测断裂的最新活动为晚更新世以来活动断裂。

由于海口地域特殊的地貌环境, 目前在陆域仍缺少有效的地层年代限定铺前一清澜断裂的滑动速率; 在海域根据钻孔联合剖面, 断裂的断错④1层的位移取4.0 m, 根据③层年代样品, 得到断裂的滑动速率为0.15 mm/a。

根据海域钻孔联合剖面, 断错④1层的位移 >4.0 m, 可判断断裂有过多次活动。

本次钻孔间距与地层划分精度的限制, 以层序地层学框架建立的钻孔联合剖面地层对比分析比较粗略, 仅能大体识别断层的特征, 尚不能分辨每一次地震事件。

致谢 文中光释光样品均由中国地震局地壳应力研究所释光年代实验室赵俊香测试, 谢富仁研究员、张世民研究员在本文形成过程中提出了宝贵意见, 在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 邓起东. 城市活动断裂探测和地震危险性评价问题 [J]. 地震地质, 2002, 24 (4): 601-605.
DENG Qi-dong. Exploration and seismic hazard assessment of active faults in urban areas [J]. Seismology and Geology, 2002, 24 (4): 601-605.
- [2] 丁原章, 郭钦华. 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, 1988: 32-39.
DING Yuan-zhang, GUO Qin-hua. Tectonic conditions and seismogenic mechanism of the earthquake in Qionghshan area [C] //Earthquake corpus in northern Hainan island. Beijing: Seismological Press, 1988: 32-39.
- [3] 李志雄, 赵文俊, 刘光夏. 1605年琼山大地震深部构造和应力状态研究 [J]. 华南地震, 1988, 26 (1): 28-36.
LI Zhi-xiong, ZHAO Wen-jun, LIU Guang-xia. A study on deep crust structures and stress situation of the 1605 Qionghshan strong earthquake [J]. South China Journal of Seismology, 1988, 26 (1): 28-36.
- [4] 陈恩民, 黄咏茵. 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, 1989, 11 (3): 319-331.
CHEN En-min, HUANG Yong-yin. Characteristics of the seismic damage and analysis of the seismic structure of the 1605 great earthquake of Qiongzhou Hainan island [J]. Acta Seismologica Sinica, 1989, 11(3): 319-331.
- [5] 高占武, 吴昊, 李光涛, 等. 太行山山前断裂带中北段晚第四纪活动性研究 [J]. 震灾防御技术, 2014, 9 (2): 159-170.
GAO Zhan-wu, WU Hao, LI Guang-tao, et al. Late Quaternary activity of the central-north segment of Taihang Mountain Piedmont fault zone [J]. Technology Earthquake Disaster Prevention, 2014, 9 (2): 159-170.
- [6] 江娃利. 北京平原夏垫断裂潘各庄钻孔晚更新世晚

期以来古地震事件分析 [C] //中国地震局地质研究所编. 活动断裂研究 (8). 北京: 地震出版社, 2001: 140-147.

- JIANG Wa-li. Paleoequake analysis of the Xiadian fault since late period of Pleistocene epoch from Pangzhuang boring in Bering Plain [C] //Institute of Geology, CEA. Research on Active Fault (8). Beijing: Seismological Press, 2001: 40-147.
- [7] 向宏发. 隐伏活动构造探测研究的若干问题讨论 [J]. 地震地质, 2003, 25 (3): 460-466.
XIANG Hong-fa. Some problems in the exploration and research of buried active fault [J]. Seismology and Geology, 2003, 25 (3): 460-466.
- [8] 徐锡伟, 计凤桔, 于贵华, 等. 用钻孔地层剖面记录恢复古地震序列: 河北夏垫断裂古地震研究 [J]. 地震地质, 2000, 22 (1): 9-19.
XU Xi-wei, JI Feng-ju, YU Gui-hua, et al. Reconstruction of paleoearthquake sequence using stratigraphic records from drill logs: a study at the Xiadian fault [J]. Seismology and Geology, 2000, 22 (1): 9-19.
- [9] McHugh C M G, Seeber L, Cormier M H. Submarine earthquake geology along the North Anatolia fault in the Marmara Sea, Turkey: a model for transform basin sedimentation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 248: 661-684.
- [10] 崔国柱, 李恩泽, 曾昭发. 活动断层与地球物理方法 [J]. 世界地质, 2003, 22 (2): 185-190.
CUI Guo-zhu, LI En-ze, ZENG Zhao-fa. Active fault and geophysical methods [J]. Global Geology, 2003, 22 (2): 185-190.
- [11] 金东淳, 崔天日. 物探方法在探测隐伏断层中的应用 [J]. 世界地质, 2003, 22 (1): 82-85.
JIN Dong-chun, CUI Tian-ri. Applying geophysical methods for detecting buried faults [J]. Global Geology, 2003, 22 (1): 82-85.
- [12] 何正勤, 陈宇坤, 叶太兰, 等. 浅层地震勘探在沿海地区隐伏断层探测中的应用 [J]. 地震地质, 2007, 29 (2): 363-372.
HE Zheng-qin, CHEN Yu-kun, YE Tai-lan, et al. Shallow seismic exploration in the coastal areas of concealed fault detection [J]. Seismology and Geology, 2007, 29 (2): 363-372.
- [13] 雷启云, 柴焯章, 孟广魁, 等. 银川隐伏断层钻孔联合剖面探测 [J]. 地震地质, 2008, 30 (1): 250-263.
LEI Qi-yun, CHAI Zhi-zhang, MENG Guang-kui, et al. The Yinchuan concealed faults drilling joint profiling [J]. Seismology and Geology, 2008, 30 (1): 250-263.