

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2018.01.015

水域三维地形与活动断层探测研究

——以西昌邛海为例

蔡明刚 鲁人齐* 何宏林 徐锡伟 王振南 李海鸥 吴熙彦

(中国地震局地质研究所, 活动构造与火山重点实验室, 北京 100029)

摘 要 当前陆域活动断层研究的相关理论、探测技术和方法比较成熟, 但针对水域的活动断层探测和研究还很缺乏。采用 AAE 浅层剖面仪, 首次对西昌邛海水域三维地形和活动断层进行探测。探测剖面可以清楚地揭示水底反射界面、水下淤泥层底部与浅部沉积层的反射界面、浅部沉积层底部界面反射界面。文中基于 SKUA-GOCAD 软件平台及其 DSI 插值法对探测数据进行三维建模, 初步给出了邛海水域三维地形结构; 同时在多条探测剖面上, 发现了则木河断层错断浅部沉积层和水下淤泥层的证据, 表明该断层已延伸至邛海水域。探测结果对研究区的地震危险性评估提供了一定的资料基础。文中还分析和探讨了浅层剖面仪工作的特点、参数以及探测的各种影响因素。西昌邛海水域三维地形和活动断层的探测研究结果, 可以为水域活动构造研究提供一定的参考和依据。

关键词 浅层剖面仪 水域探测 三维地形 活动断层 西昌邛海

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2018)01-0204-11

0 引言

中国对陆域活动构造和地震构造的调查和研究取得了很大进展, 特别是随着定量活动构造学的发展, 对陆域大地震发生的构造条件及地震危险性评价取得了很大的进步。中国拥有广大海域, 与陆域相比, 海域的地震相关研究工作还远远不够(邓起东等, 2002)。此外, 调查清楚内陆一些大型湖泊中的地形结构及断层分布, 同样对活动断层的研究工作具有重要意义。

为了填补水域活动构造研究的不足, 有必要针对性地开展水域活动断层探测试验研究。开展此类研究通常可采用声波反射技术, 该技术分辨率高, 对水域浅部探测可以获得更清楚和细致的资料(中田高等, 1993), 对断层位错历史可以获得清楚的探测结果(邓起东等, 2002)。如前人在山东半岛北部近海海域进行了多条剖面的声波探测, 初步查明了蓬莱-威海断裂带的基本活动特征(王志才等, 2006); 证实了声波反射技术在探测深度和纵、横向分辨率上可以达到海域活动断层研究的要求。此外, 声波反射技术还在海底地貌(赵铁虎等, 2005)、泻湖的地貌演化(戴晨等, 2016)、浅海区沉积格架及海砂资源调查(赵铁虎等, 2011)、天然气水合物勘探(邢军辉等, 2016)、近海工程勘察(王尔觉等, 2016)、海管断裂点定位(侯志民等, 2017)等多个地质领域具有大量的应用。

〔收稿日期〕 2017-11-20 收稿, 2018-01-03 改回。

〔基金项目〕 中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA1422, IGCEA1707)与中国地震局川滇实验场科研专项(2017CESE0102)共同资助。

* 通讯作者: 鲁人齐, 男, 副研究员, E-mail: lurenqi@163.com。

西昌市区附近的邛海南端, 1 条重要的活动断层则木河断层(F_5)已出露地表(图 1)。该断层是否穿过邛海? 水域是否还存在其他未知活动断层? 断层如何展布? 这些都是涉及到西昌市地震安全性评价等方面的重要问题。此外, 研究区位于安宁河断裂和则木河断裂 2 条活动断裂的转折位置(王虎等, 2011), 验证 1850 年西昌 7.5 级地震的破裂带是否穿过邛海水域, 研究同震地表破裂带在隐伏区的几何展布, 以及西昌盆地的发展演化, 对该地区地震危险性评估具有重要的意义(Wang *et al.*, 2017, 2018)。基于此, 本研究设计在邛海整个水域部署 11 条剖面, 共约 50km。此次水域浅层剖面探测研究, 获得了该区质量较高的探测数据。根据探测结果可以对水下地形进行三维建模, 并在研究区陆上活动断层认识的基础上, 对邛海水域可能存在的活动断层进行研究。本文在简要介绍基于声波反射技术的浅层剖面仪工作原理及水上数据采集的基础上, 探讨了这种方法应用在内地大型湖泊水下活动断层探测中的可行性、优缺点、影响因素等, 并以西昌邛海为例展示相关探测研究成果。

1 研究区构造背景

四川省凉山彝族自治州的西昌市(图 1), 横跨推测或隐伏的安宁河西支断裂(F_1)、安宁河东支断裂(F_2)、则木河断裂(F_3)和西昌断裂(F_4)等^①(唐荣昌等, 1993; 徐锡伟等, 2003)。其中, 则木河主断裂走向 NNW, 为 1 条长约 130km 的左旋走滑活动断裂(唐荣昌等, 1986; 钱洪等, 1990)。历史强地震记载以及古地震研究结果揭示, 沿安宁河-则木河断裂带已发生多次强震和大地震(冉勇康等, 2008; He *et al.*, 2008; 王虎等, 2014), 表明这是 1 条强烈的地震活动带。邛海位于西昌市东南部(图 1), SN 长约 11.5km, EW 宽 5.5km, 水域面积约 30km², 是四川省第 2 大淡水湖。邛海断陷湖盆地受则木河深大断裂的控制, 属更新世早期断陷湖(王运生等, 1996)。

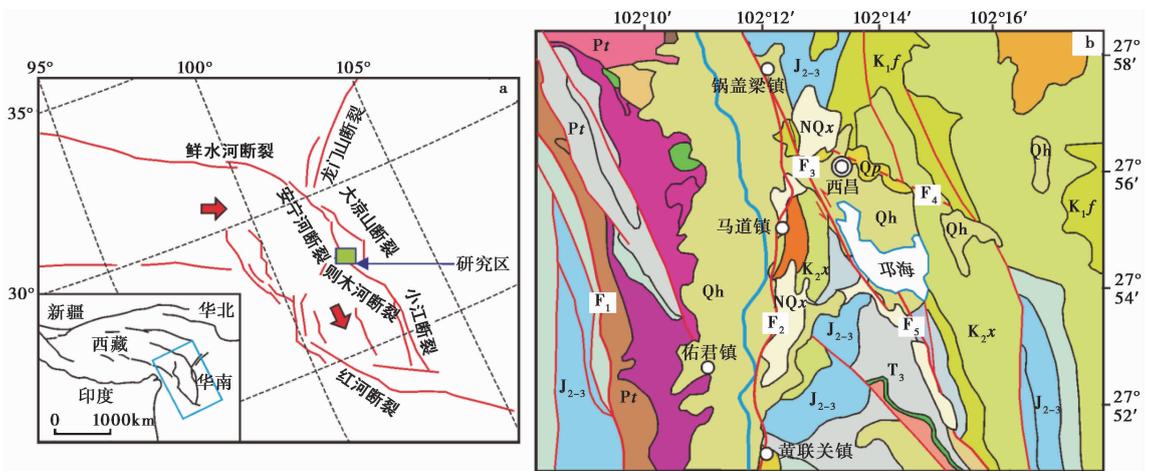


图 1 四川西昌市邛海地区地质构造特征

Fig. 1 Maps showing location of the study area(left) and geology of the Qionghai area, Xichang, Sichuan(right).

a 区域构造位置, 据王虎等, 2011 修改; b 地质图与断层分布, 据文献^①修改。

F_1 安宁河西支断裂; F_2 安宁河东支断裂; F_3 则木河主断裂; F_4 西昌断裂; F_5 则木河断裂邛海段

① 刘保金, 2012, 凉山州西昌市浅层地震勘探报告, 中国地震局地球物理勘探中心。

已有研究结果表明,1850年9月12日的西昌7.5级大地震地表破裂带长达90km(任金卫等,1993;闻学泽等,2007)。在西昌市以北,以及邛海以南的大箐梁子等地都发现了地表破裂带(冯元保等,2000;俞维贤等,2001;田勤俭等,2008)。沿着则木河断层,从邛海南端的海南乡到大箐梁子一带有众多明显的古地震遗迹(张明新,1994;王虎等,2011),分析认为则木河断裂邛海段(F_3)很可能是在1850西昌7.5级大地震中产生地表破裂的断裂。但该断裂在邛海水域隐伏区是否存在,一直缺少物探资料作为依据。

2 浅层剖面仪探测原理与参数

浅层剖面仪探测是基于声学原理,连续航行式探测水下地形结构和构造的地球物理方法。测量时,震源在水中激发声波传播到水底后,在液-固强反射界面上发生波的反射和透射,反射波直接被水中的水听器接收,而透射波再经过水底下不同的地层反射,最后信号再经过固-液界面透射传回到水中被水听器接收,这样水听器会接收到水下不同深度地层的速度界面反射(图2)。

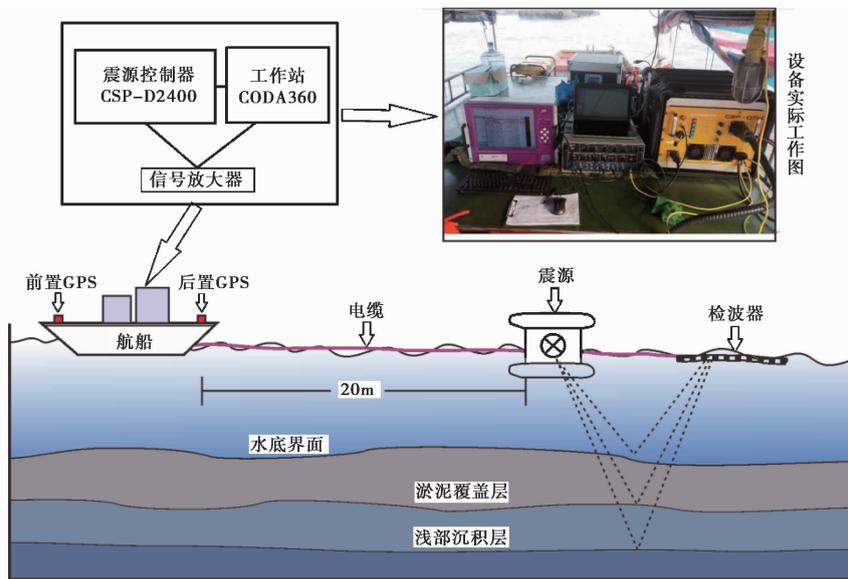


图2 AAE浅层剖面仪水下探测工作原理图

Fig. 2 Principle of underwater survey of the AAE shallow profiler.

本次数据采集使用的浅层剖面仪主体是英国AAE(Applied Acoustics Engineering)公司生产的Octopus360+高分辨率地震采集系统。主要工作系统包括电磁激震震源(AA300 Boomer)、CSP-D2400震源控制系统、Coda 360+工作站数据采集系统、20单元组合检波器拖缆接收系统和Hemisphere GPS定位系统(图2)。AA300 Boomer电磁激震震源最大输出能量为350J,穿透深度一般为水下20~30m,在地质条件理想的近岸浅水区探测深度可达120m,最高分辨率可达10cm(万芄等,2010)。

测量前,通过试航确定了船的尾流影响距离及采集信号质量后,本次工作采取的拖曳方式和作业参数为:船速设定约为0.5m/s(约1节);震源换能器和水听器拖缆位于船尾20m,二

者相距约 5m；震源沉放深度约 0.5m；水听器沉放深度约 0.3m；震源能量取 AA300 Boomer 可达到的最大能量 350J；采样率 62 μ s；记录长度 500ms 或 400ms；带通滤波为 200~7 000Hz。

3 邛海水域三维地形

本次工作围绕西昌市邛海水域开展，网状均匀布设了 11 条探测剖面(图 3)，其中近 EW 向剖面 9 条，线间距约 800m；近 SN 向剖面 2 条。受邛海海岸地形的限制，南部的 L1 和 L2 测线以及北部的 L6、L7 和 L8 测线较短，中间的 L3、L4 和 L5 测线较长。L11 测线位于 L2 和 L3 测线之间。L9 和 L10 测线作为联络线穿过 EW 向剖面(图 3)。依据数据采集时间和 GPS 导航时间上的对应关系(图 2)，将 GPS 导航坐标加载到原始探测数据道头中，从而可以获得研究区探测剖面比较准确的坐标位置，这有利于比较各个剖面上层位错断之间的相互位置关系，有助于分析断层位错是否来自同一条断层。

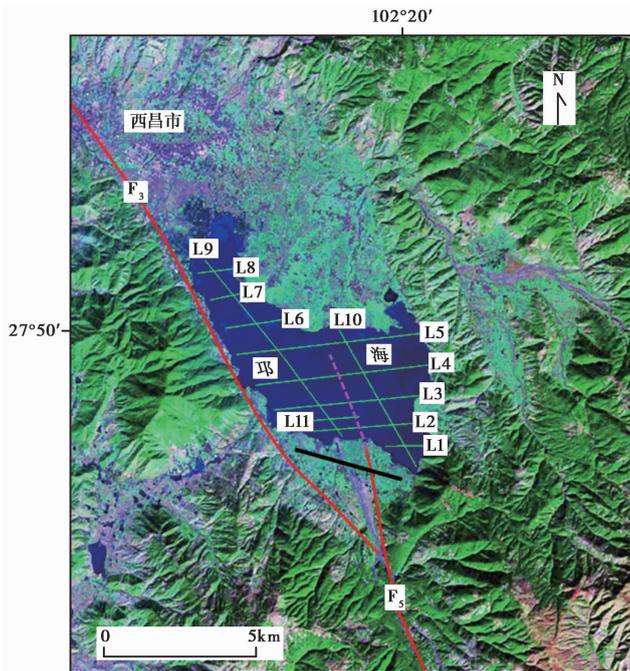


图 3 研究区断层分布与探测剖面分布图

Fig. 3 Distribution of active faults and exploration profiles in the study area.

紫色虚线为水域断层分布；黑色实线为海南乡人工浅地震探测剖面位置

因为水底界面是液-固界面，具有较强的速度间断和密度间断，因此可形成强反射轴。我们可以利用采集获得的原始数据资料，在地震处理软件上拾取所有测线的水底界面的强反射轴到时(ms)，然后选取声波在水里的传播速度 1 500m/s，计算邛海海域水深。通过上述 11 条探测剖面的数据(图 3)，初步获得了邛海水域三维地形等值线图(图 4)。三维水下地形等值线图显示邛海近岸水浅、中间水深，南岸比北岸水深。探测期间最深水位出现在邛海南部，达 26m。

本次研究采用 SKUA-GOCAD 软件平台的 DSI(Discrete Smooth Interpolation)插值法进行三

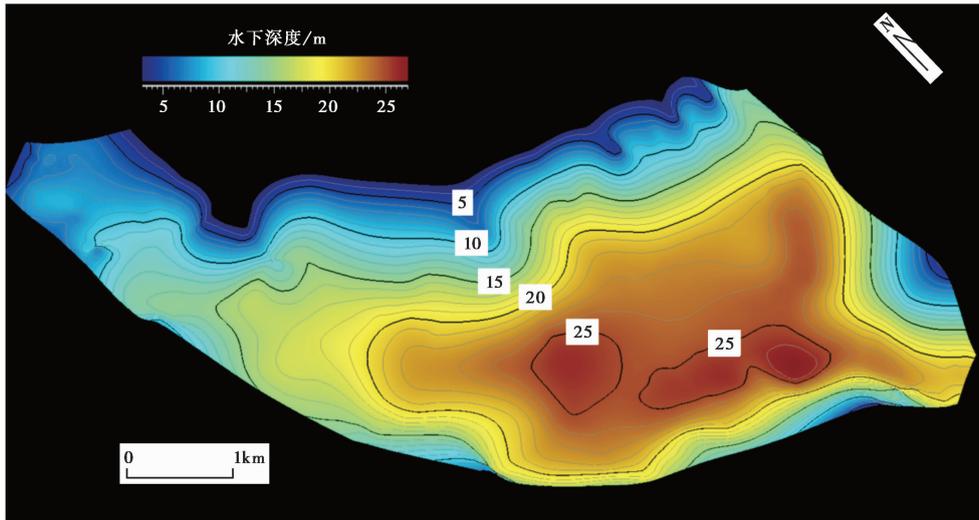


图 4 邛海水下三维地形等值线图

Fig. 4 Contours of three-dimensional topography underwater in the Qionghai area.

维水下地形建模(图 4)。DSI 插值法是法国南锡大学 Mallet 教授提出的 (Mallet, 1989)。DSI 插值的基本思想是在各个离散化数据点间建立相互联络的网络, 如果网络上的已知节点值满足某种约束条件, 则未知节点上的值可以通过解线性方程得到。该方法只依赖于网络结点的拓扑关系, 不以空间坐标为参数, 是 1 种不受维数限制的差值方法。DSI 插值法可以保持优化后的网格和原始网格的几何细节特征一致, 施加离散控制点约束, 在优化时保证了与原始网格的一致性, 网格质量得到很大的提高, 改善了可视化效果, 本文算法在几何模型重构和可视化方面具有广泛的应用前景(刘瑞刚等, 2008)。

4 邛海水域活动断层研究

邛海近 EW 向剖面共有 9 条(图 3), 除了 L8 测线因为水浅, 水底多个层位的一次波和多次波叠加在一起难以区分外, 其他剖面多次波到时调整到一定比例, 一次波均能清晰可见(图 5)。研究中通常只针对一次波进行详细分析, 避免多次波的干扰。本次数据, 未经过任何滤波、反褶积、道间均衡、去噪等处理, 结果均基于原始数据的显示分析获得。以 L2 探测结果为例, 每 1 条剖面的一次波反射均可见 3 个较强的同相轴, 分别表示水底反射界面(T1)、水下淤泥层底部与地下浅部沉积层的反射界面(T2)、浅部沉积层底部界面的反射界面(T3)。再往下, 声波反射受震源穿透能力的限制、层间多次波以及地层间波阻抗差异较小的影响, 没有明显的强反射层(图 5)。研究同时发现剖面上疑是断层的痕迹, 我们以中间 L2、L3 和 L4 测线为例, 结合前人的研究成果, 对邛海水域活动断层进行分析。

2012 年, 中国地震局地球物理勘探中心在邛海南端的海南乡采集了 1 条浅地震探测剖面(图 3), 发现了则木河主断裂(F_3)和则木河的另一支断层, 即则木河断裂邛海段(F_5)。人工反射剖面揭示则木河主断裂倾向 W, 埋藏较深; 而 F_5 倾向 E, 上断点埋藏较浅, 并控制了上部

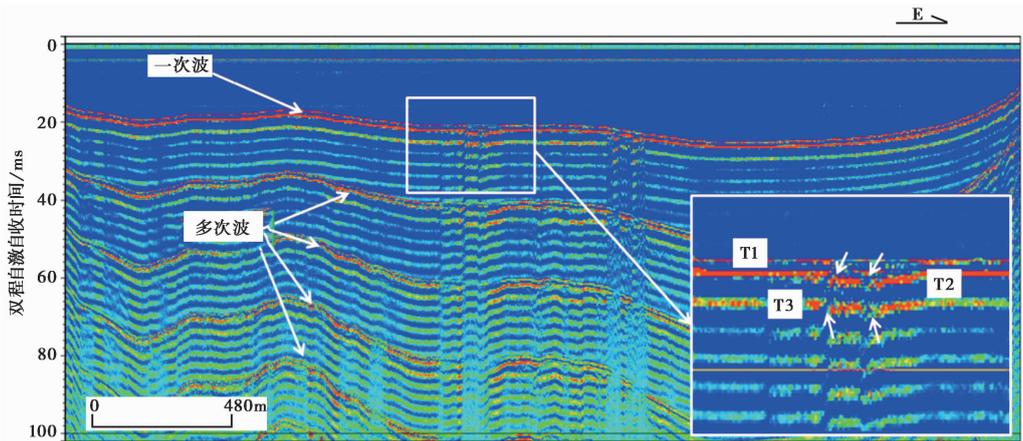


图 5 邛海水域 L2 探测剖面特征与解释

Fig. 5 Characteristics and interpretation of profile L2 in Qionghai.

第四纪地层的褶皱和变形^①，因此为 1 条典型的活动断层。

如果 F_5 已经进入水域(图 1)，根据其走向的自然延伸，理论上在 L2、L3、L4 和 L5 测线相应的位置均应该发现异常。其中，L5 剖面因测线靠近北岸，水浅且水下地形起伏变化，在相应位置地层错断难以辨别。在 L2 剖面靠近中部位置，我们发现了一处 T2 和 T3 界面不连续的反射特征。这个位置与 F_5 向邛海自然延伸的位置非常接近，因此推测可能是该断层经过的位置(图 5)。沿着 F_5 走向自然延伸的位置，我们在 L3 剖面同样发现了比较明显的异常(图 6)。从图 6 局部放大的细节可以看出，T2 和 T3 界面有明显的位错，连接 2 个断点后可以看出断层倾向 E，这与 F_5 倾向是一致的。在 L4 剖面则更加显著(图 7)，T2 和 T3 界面不仅被错断，而且断层下盘出现杂乱波组特征，这可能是断层破碎带的反映。

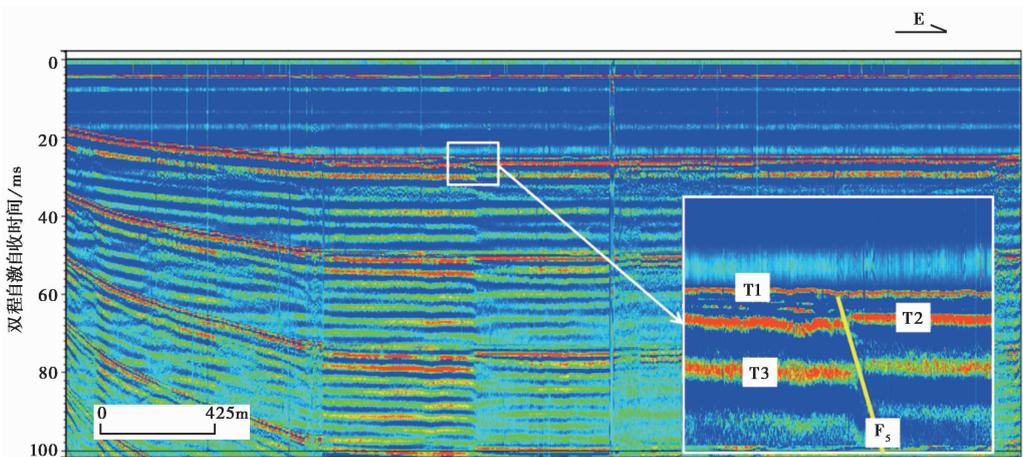


图 6 邛海水域 L3 探测剖面特征与解释

Fig. 6 Characteristics and interpretation of profile L3 in Qionghai.

① 刘保金，2012，凉山州西昌市浅层地震勘探报告，中国地震局地球物理勘探中心。

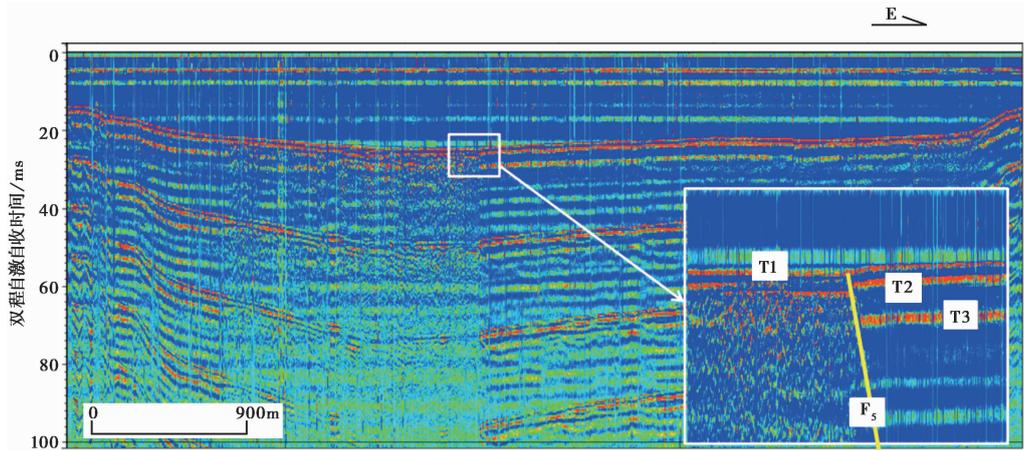


图 7 邛海水域 L4 探测剖面特征与解释

Fig. 7 Characteristics and interpretation of profile L4 in Qionghai.

在 L2、L3、L4 这 3 条剖面上, 出现断层的位置呈现线性关系, 与 F_5 走向自然延伸进入邛海的位置非常吻合, 因此分析认为 F_5 已经进入邛海(图 3), 它切割了第四纪的浅部沉积 T2 和 T3 界面(图 6)。水域探测与陆地浅层地震勘探结果的一致性, 证明了 F_5 的可靠性。

5 讨论与结论

浅层剖面仪探测过程中存在各种影响或干扰因素, 包括船的航速、风速、发电机输出功率、发动机涡流、多次波干扰等。探测时需尽量避免这些外在的影响或干扰, 采取相应措施, 以便获得高信噪比资料。探测剖面受航迹的影响较大, 探测时航船应尽可能根据设计走直线。但是航船拐弯时不可避免地会走曲线, 因此探测剖面设计时应尽可能比实际稍长些, 以便数据处理时可以截去航迹曲线的部分而不影响地下结构的探测。有些探测剖面会出现多个异常点, 这些异常往往与水下地形、构造、古遗迹等相关。因此探测时需要密切关注探测仪器的工作状态和资料效果, 实时记录相关参数以便分析和讨论, 排除非构造因素造成的异常。

此外, 1 条孤立的探测剖面发现异常, 并不能完全说明活动断层的特征。单一的剖面容易出现多解性, 这就需要多条或者加密剖面控制, 反复探测与对比, 相互约束和验证。同时需要密切结合区域地质情况, 掌握更多的水下相关信息, 如古河道、冲积扇、人工建筑等。本次研究中充分考虑并尽量排除了各种不利因素的影响, 保证了探测结果的可靠性。探测结果有效获取了 3 个界面数据: 水底深度、水下地形、第四系浅层覆盖层。探测结果在一定程度上反映了则木河断裂邛海段在邛海水域的异常情况, 以及其他可能存在的断层分布。但对于这些活动断层的更多信息, 如断层几何学、运动学、活动性参数, 以及与则木河主断裂、1850 年西昌大地震地表破裂带的关系等, 还需要其他大量相关研究工作。

致谢 此次在四川西昌邛海水域活动断层探测研究过程中, 得到了西昌市人民政府、西昌市泸山邛海管理局、西昌市防震减灾局、四川西昌攀西地质勘察院等单位的大力支持和协助, 在此表示衷心的感谢! 感谢审稿人以及西南交通大学王虎老师提出的大量宝贵建议!

参 考 文 献

- 戴晨, 高抒, 李高聪, 等. 2016. 基于浅地层记录的海南岛东南部泻湖全新世地貌演化 [J]. 第四纪研究, 36(1): 57—65.
- DAI Chen, GAO Shu, LI Gao-cong, *et al.* 2016. Shallow seismic stratigraphic records of Holocene geomorphological dynamics from barrier-lagoons of southeast Hainan island [J]. Quaternary Sciences, 36(1): 57—65 (in Chinese).
- 邓起东, 晁洪太, 闵伟, 等. 2002. 海域活动断裂探测和古地震研究 [J]. 中国地震, 18(3): 311—315.
- DENG Qi-dong, CHAO Hong-tai, MIN Wei, *et al.* 2002. Marine active fault exploration and paleoearthquake research [J]. Earthquake Research in China, 18(3): 311—315 (in Chinese).
- 冯元保, 礼平山, 黄玉书. 2000. 1850 年西昌地震地表破裂带 [J]. 四川地震, (1): 80—96.
- FENG Yuan-bao, LI Ping-shan, HUANG Yu-shu. 2000. Earthquake rupture belt of 1850 Xichang *M*7.5 earthquake [J]. Earthquake Research in Sichuan, (1): 80—96 (in Chinese).
- 侯志民, 施健, 胡斌. 2017. 侧扫声纳和浅地层剖面仪在海管断裂点定位中的应用 [J]. 海洋测绘, 37(1): 79—82.
- HOU Zhi-min, SHI Jian, HU Bin. 2017. Application of side-scan sonar and sub-bottom profiler in locating fracture positions of submarine pipelines [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 37(1): 79—82 (in Chinese).
- 刘瑞刚, 程丹, 杨钦, 等. 2008. 基于 DSI 插值的三角网格质量优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 34(2): 162—166.
- LIU Rui-gang, CHENG Dan, YANG Qin, *et al.* 2008. Triangle mesh optimization based on DSI interpolation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 34(2): 162—166 (in Chinese).
- 钱洪, 伍先国, 马声浩, 等. 1990. 安宁河断裂带北段的古地震事件及其在地震研究中的意义 [J]. 中国地震, 6(4): 43—49.
- QIAN Hong, WU Xian-guo, MA Sheng-hao, *et al.* 1990. Prehistorical earthquakes on the north segment of the Anninghe Fault and their significance to seismological research [J]. Earthquake Research in China, 6(4): 43—49 (in Chinese).
- 冉勇康, 程建武, 宫会玲, 等. 2008. 安宁河断裂紫马跨一带晚第四纪地貌变形与断层位移速率 [J]. 地震地质, 30(1): 86—98. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2008.01.006.
- RAN Yong-kang, CHENG Jian-wu, GONG Hui-ling, *et al.* 2008. Late Quaternary geomorphic deformation and displacement rates of the Anninghe Fault around Zimakua [J]. Seismology and Geology, 30(1): 86—98 (in Chinese).
- 任金卫, 李坪. 1993. 四川西昌 1850 年地震地表破裂特征研究 [J]. 地震地质, 15(2): 97—106.
- REN Jin-wei, LI Ping. 1993. The characteristics of surface faulting of 1850 earthquake in Xichang, Sichuan [J]. Seismology and Geology, 15(2): 97—106 (in Chinese).
- 唐荣昌, 韩渭宾. 1993. 四川活动断裂与地震 [M]. 北京: 地震出版社.
- TANG Rong-chang, HAN Wei-bin. 1993. Active Faults and Earthquakes in Sichuan [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 唐荣昌, 黄祖智, 伍先国, 等. 1986. 则木河断裂全新世以来的新活动与地震 [J]. 中国地震, 2(4): 82—98.
- TANG Rong-chang, HUANG Zu-zhi, WU Xian-guo, *et al.* 1986. The new activities and earthquakes of the Zemuhe Fault since the holocene [J]. Earthquake Research in China, 2(4): 82—98 (in Chinese).
- 田勤俭, 任志坤, 张军龙. 2008. 则木河断裂带大箐梁子附近古地震组合探槽研究 [J]. 地震地质, 30(2):

400—411.

- TIAN Qin-jian, REN Zhi-kun, ZHANG Jun-long. 2008. Study of paleoearthquakes by combined trench on Zemuhe Fault around Daqingliangzi, Xichang, Sichuan [J]. *Seismology and Geology*, 30(2): 400—411 (in Chinese).
- 万芃, 吴衡, 王劲松, 等. 2010. 海洋高分辨反射地震勘探震源的技术特征 [J]. *地质装备*, 11(3): 21—23, 28.
- WAN Peng, WU Heng, WANG Jin-song, *et al.* 2010. The technical characteristics of high-resolution reflection seismic source for marine geological survey [J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 11(3): 21—23, 28 (in Chinese).
- 王尔觉, 潘广山, 胡庆辉. 2016. 近海工程勘察中单道与多道地震方法对比研究 [J]. *工程地球物理学报*, 13(4): 502—507.
- WANG Er-jue, PAN Guang-shan, HU Qing-hui. 2016. Comparison between single and multi-channel seismic method in offshore engineering exploration [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 13(4): 502—507 (in Chinese).
- 王虎, 冉勇康, 李彦宝. 2011. 小型拉分盆地的生长与走滑断层的位移速率: 以青藏高原东南缘则木河断裂带为例 [J]. *地震地质*, 33(4): 818—827. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2011.04.007.
- WANG Hu, RAN Yong-kang, LI Yan-bao. 2011. Growth of a small pull-apart basin and slip rate of strike-slip fault: with the example of Zemuhe Fault on the southeastern margin of the Tibetan plateau [J]. *Seismology and Geology*, 33(4): 818—827 (in Chinese).
- 王虎, 冉勇康, 李彦宝. 2014. 川西地区安宁河断层古地震行为及其与则木河断层的比较 [J]. *地震地质*, 36(3): 706—717. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2014.03.013.
- WANG Hu, RAN Yong-kang, LI Yan-bao. 2014. Paleoseismic behavior of the Anninghe fault and its comparison with the Zemuhe Fault in western Sichuan [J]. *Seismology and Geology*, 36(3): 706—717 (in Chinese).
- 王运生, 李云岗. 1996. 西昌盆地的形成与演化 [J]. *成都理工学院学报*, 23(1): 85—90.
- WANG Yun-sheng, LI Yun-gang. 1996. Formation and evolution of the Xichang Basin [J]. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 23(1): 85—90 (in Chinese).
- 王志才, 邓起东, 晁洪太, 等. 2006. 山东半岛北部近海海域 NW 向蓬莱-威海断裂带的声波探测 [J]. *地球物理学报*, 49(4): 1092—1101.
- WANG Zhi-cai, DENG Qi-dong, CHAO Hong-tai, *et al.* 2006. Shallow-depth sonic reflection profiling studies on the active Penglai-Weihai fault zone offshore of the northern Shandong peninsula [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(4): 1092—1101 (in Chinese).
- 闻学泽, 马胜利, 雷兴林, 等. 2007. 安宁河-则木河断裂带过渡段及其附近新发现的历史大地震破裂遗迹 [J]. *地震地质*, 29(4): 826—833. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2007.04.013.
- WEN Xue-ze, MA Sheng-li, LEI Xing-lin, *et al.* 2007. Newly found surface rupture remains of large historical earthquakes on and near the transition segment of the Anninghe and Zemuhe Fault zones, western Sichuan, China [J]. *Seismology and Geology*, 29(4): 826—833 (in Chinese).
- 邢军辉, 姜效典, 李德勇. 2016. 海洋天然气水合物及相关浅层气藏的地球物理勘探技术应用进展: 以黑海地区德国研究航次为例 [J]. *中国海洋大学学报*, 46(1): 80—85.
- XING Jun-hui, JIANG Xiao-dian, LI De-yong. 2016. Application progress of geophysical exploration technology about marine gas hydrate and shallow gas reservoirs: A case for German research cruises in the Black Sea [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 46(1): 80—85 (in Chinese).
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源 [J]. *中国科学(D 辑)*, 33(S): 151—162.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, ZHENG Rong-zhang, *et al.* 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for

- active blocks in Sichuan-Yunnan region, China [J]. *Science in China(Ser D)*, 46(S2): 210—226.
- 俞维贤, 宋方敏, 闻学泽, 等. 2001. 1850年西昌地震地表破裂带的考察研究 [J]. *地震研究*, 24(4): 346—350.
- YU Wei-xian, SONG Fang-min, WEN Xue-ze, *et al.* 2001. Study of the surface rupture zone of Xichang earthquake in 1850 [J]. *Journal of Seismological Research*, 24(4): 346—350(in Chinese).
- 张明新. 1994. 西昌市大箐梁子一带古地震初探 [J]. *四川地震*, (2): 47—51.
- ZHANG Ming-xin. 1994. Approach on the Daqing-ridge ancient earthquake in Xichang [J]. *Earthquake Research in Sichuan*, (2): 47—51(in Chinese).
- 赵铁虎, 李春, 丛鸿文, 等. 2005. 青岛近岸海区海底地貌类型及声学特征 [J]. *海洋测绘*, 25(1): 40—43.
- ZHAO Tie-hu, LI Chun, CONG Hong-wen, *et al.* 2005. Relief type and acoustic Characters of inshore seabed along Qingdao [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 25(1): 40—43(in Chinese).
- 赵铁虎, 李军, 张异彪, 等. 2011. 舟山海域海砂资源声地层剖面探测研究 [J]. *物探化探计算技术*, 33(3): 340—345.
- ZHAO Tie-hu, LI Jun, ZHANG Yi-biao, *et al.* 2011. Study of high-resolution SBP exploration for sea sand resources in the Zhoushan offshore [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 33(3): 340—345(in Chinese).
- 中田高, 島崎邦彦. 1993. 海底の地震の巣を探る. *科学*, 63(9): 593—599.
- Nakada T, Shimazaki K. 1993. Prospecting of submarine seismogenic structures [J]. *Science in Japan*, 63(9): 593—599(in Japanese).
- He H L, Oguchi T. 2008. Late Quaternary activity of the Zemuhe and Xiaojiang Faults in southwest China from geomorphological mapping [J]. *Geomorphology*, 96(1-2): 62—85.
- Mallet J L. 1989. Discrete smooth interpolation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 8(2): 121—144.
- Wang H, Liang M J, Gao S P, *et al.* 2018. Reevaluation of Coseismic Surface Ruptures Produced by the 1850 M7. 5 Xichang Earthquake on the Southeastern Margin of the Tibetan plateau and Implications for Rupture Propagation at Bends on Strike-Slip Faults [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America(In press)*.
- Wang H, Ran Y K, Chen L C, *et al.* 2017. Paleoequakes on the Anninghe and Zemuhe Fault along the southeastern margin of the Tibetan plateau and implications for fault rupture behavior at fault bends on strike-slip faults [J]. *Tectonophysics*, 721:167—178.

EXPLORATION OF UNDERWATER THREE-DIMENSIONAL TOPOGRAPHY AND ACTIVE FAULTS: A CASE STUDY OF QIONGHAI, XICHANG

CAI Ming-gang LU Ren-qi HE Hong-lin XU Xi-wei

WANG Zhen-nan LI Hai-ou WU Xi-yan

*Key Laboratory of active Tectonics and Volcano, Institute of Geology,
China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

Abstract

The theories, techniques and methods for the exploration of active faults in the terrestrial domain are relatively mature, while such efforts in the water domain remain very few. In this study, the AAE shallow profiler was used to detect the underwater three-dimensional topography and active faults in the Qionghai area, Xichang for the first time. Based on the SKUA-GOCAD software platform and its DSI interpolation method, three-dimensional modeling of the exploration data was carried out. The survey profiles clearly reveal three different reflection interfaces, including the underwater interface, the interface between the silt layer and shallow sedimentary layer, and the bottom of the shallow sedimentary layer. The three-dimensional topography of the Qionghai area was mapped initially. Moreover, evidence of active faults was first found in several survey profiles from the reflection interface cutoff. This study also analyzed and discussed the working principle and characteristics of the AAE shallow profiler, including their parameters and various factors of exploration. The mapped three-dimensional topography and active faults in the Qionghai area of Xichang can provide a reference for research on the active tectonics underwater in the future.

Key words AAE shallow profiler, underwater exploration, 3-D topography, active fault, Qionghai of Xichang

[作者简介] 蔡明刚,男,1977年生,2011年于中国地震局地质研究所获固体地球物理学博士学位,助理研究员,现主要从事活动断层探测研究,电话:010-62009033, E-mail: caimg@ies.ac.cn。