

南海北部滨海断裂带的深部结构 探测现状和展望*

李志刚^{1,2}, 张培震^{1,2}, 惠格格^{1,2}, 胡立天^{1,2}, 李冠华^{2,3}, 张逸鹏^{1,2},
梁浩^{1,2}, 李琳琳^{1,2}, 王伟涛^{1,2}, 闫永刚^{1,2}, 代向明^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院 / 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 珠海 510892
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
3. 汕头大学理学院, 广东 汕头 515063

摘要: 南海北部滨海断裂带不仅是华南次级板块和南海次级板块的分界断裂, 同时是南海北部陆缘区域的主要控震和孕震构造, 也是珠江口盆地新生代含油气盆地的控盆断裂, 因此, 厘清其深部地壳结构、构造演化和最新活动性, 对理解南海北部陆缘的构造和含油气盆地演化过程、动力学机制以及地震灾害评估等具有重要意义。由于特殊的构造位置及研究的重要性, 不同学者对其开展过大量地球物理探测工作, 极大地提升了对该断裂带的认识。本文总结了滨海断裂带深部结构探测、构造属性、活动性和孕震构造等方面的研究进展及基本认识, 阐明了该断裂带的深部地壳结构和活动特征存在分段性, 指出了该断裂带与 NW 向断裂带和上地壳低速层三者结合位置为区域强震发生提供了深部动力学环境。加强不同位置的深-浅结构和海底变形综合探测研究, 结合周边区域已知的地质学、地球物理学和地震学数据, 解决滨海断裂带的深-浅构造耦合及其与 NW 向断裂带之间关系问题, 探讨其最新活动性与地震-海啸灾害的关系, 可能是滨海断裂带未来研究的重点和方向。

关键词: 南海北部; 滨海断裂带; 地球物理探测; 最新活动性; 发震构造

中图分类号: P54; P67 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 01-0055-08

Current status and prospect of the deep structure exploration of the littoral fault zone in the northern South China Sea

LI Zhigang^{1,2}, ZHANG Peizhen^{1,2}, HUI Gege^{1,2}, HU Litian^{1,2}, LI Guanhua^{2,3}, ZHANG Yipeng^{1,2},
LIANG Hao^{1,2}, LI Linlin^{1,2}, WANG Weitao^{1,2}, YAN Yonggang^{1,2}, DAI Xiangming^{1,2}

1. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards / School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 510892, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
3. School of Science, Shantou University, Shantou 515063, China

Abstract: The littoral fault zone (LFZ) in the northern South China Sea, is an important boundary fault between South China sub-plate and South China Sea sub-plate, is the seismogenic structure in the

* 收稿日期: 2021-07-04

录用日期: 2021-07-16

网络首发日期: 2021-09-26

基金项目: 广东省引进人才创新团队项目(2016ZT06N331); 国家自然科学基金(41772209, U1701641, 41906049, 41774049, 42172233); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)“南海科学考察计划”珠江口外海域地质地球物理综合科考航次(SML2020SI1002); 中山大学中央高校基本科研业务费(2021qntd23); 广州市科技计划项目(202102080112)

作者简介: 李志刚 (1984年生), 男; **研究方向:** 构造地质与活动构造; E-mail: lizhigang@mail.sysu.edu.cn

northern continental margin, and acts as a basin-controlling fault in the Pearl River Mouth Basin. Studies on the deeper crustal structures, structural evolution, and the latest activities of the LFZ have great significance in understanding the structural architecture and geodynamic processes, and in seismic hazard assessment. We review the deep structure exploration, tectonic attributes, activities, and seismogenic structure of the LFZ. Based on these, we propose that the LFZ is segmented concerning the deeper crustal structures and active characteristics; moreover, it has the potential of strong earthquakes when all three components of the LFZ, a NW-striking fault, and a low-velocity layer meet together. Finally, we highlight the problems to be solved in the future about the LFS, including the coupling of the deep and shallow structures, the relationship with the intersected NW-striking faults, the latest activities, and the assessment of earthquake-tsunami disasters.

Key words: northern South China Sea; littoral fault zone; geophysics exploration; latest activity; seismogenic structure

1 引言

受印澳板块和欧亚板块碰撞和侧向逃逸以及菲律宾海板块向北西俯冲的共同作用下,南海北部陆缘区发育了多组不同时期、规模不一的断裂带,这些断裂带纵横交织,共同构成了这个区域复杂的断裂框架^[1](图1^[2-3])。滨海断裂带,该区域其中一条NEE走向的活动断裂带,因其特殊的构造位置和复杂的地壳结构以及板内地震机制,长期以来受到了众多关注^[4-9]。滨海断裂带,不仅是华南次

级板块和南海次级板块的分界断裂^[6, 10],也是珠江口盆地新生代含油气盆地的控盆断裂^[11],同时是南海北部陆缘的主要控震和孕震构造^[5, 12],因此,研究该断裂带具有重大的科学、社会和经济意义。

滨海断裂带是华南南部地区正常型陆壳和南海北部地区减薄型陆壳的边界断裂,保存着跟南海扩张和演化过程相关的丰富的构造信息^[6, 13]。根据重、磁特征和深地震剖面研究揭示滨海断裂带本质上是华南大陆正常陆壳向南海微板块减薄的一个分界断裂,是南海被动大陆陆缘扩张过程

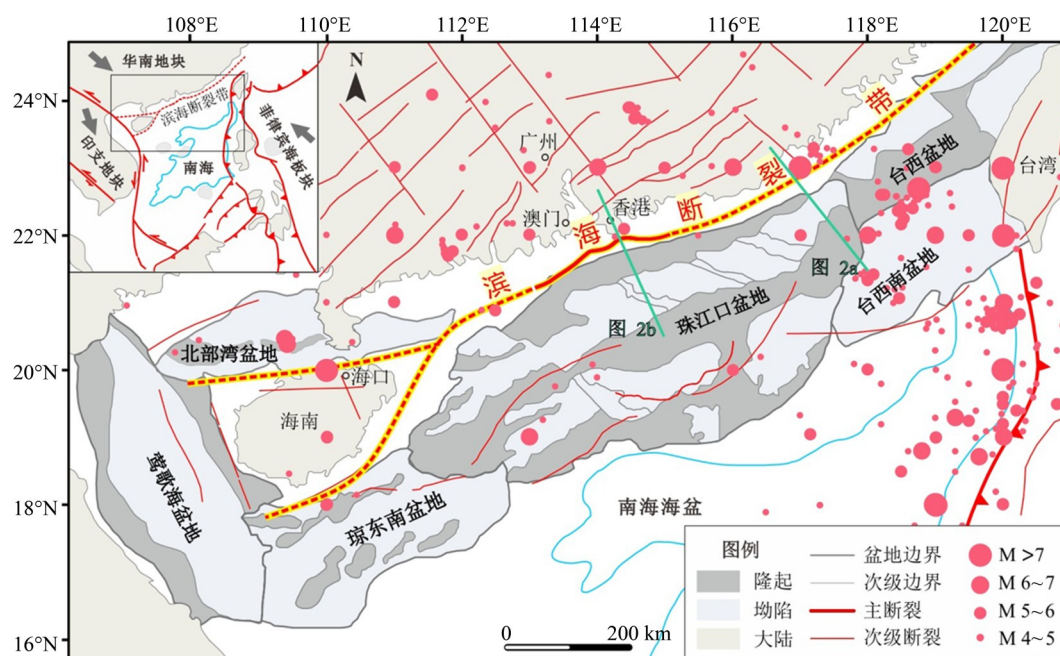


图1 南海北部滨海断裂带及其周缘构造-沉积-地震背景(改自文献[2-3])

Fig. 1 Tectonic-sedimentary-earthquake backgrounds of the littoral fault zone in the northern South China Sea (modified from Cao et al^[2] and Li et al^[3])

中活动的张性断裂构造带。跨滨海断裂带的地质和地球物理数据揭示出其南北两侧具有明显的地形、沉积和构造差异: 北侧地形起伏较大, 缺少新近系沉积地层, 第四系沉积厚度一般小于 30 m, 莫霍面深度大于 29 km, 整体呈现出正负交替的重力异常及显著变化的高磁异常带; 南侧地形起伏小, 以海底正地形为主, 新生界沉积厚度约 5~7 km, 其中第四系地层厚度一般大于 150 m, 莫霍面深度小于 28 km, 整体表现为正重力异常和稳定的负磁异常(图1)^[2, 4-5, 14-16]。滨海断裂带在深地震探测剖面 and 重、磁异常特征上都是切割深度超过莫霍面的重要构造边界, 其系统研究有助于理解南海北部构造几何学、运动学过程及其动力学机制, 为南海扩张和演化等重大科学问题提供基础的数据支撑。

滨海断裂带是南海北部地区地震活动强度最大、频度最高的地震带, 也是主要的控震和潜在的孕震构造^[8, 17]。有史料记载以来, 滨海断裂带共发生 7.0 以上的地震 4 次, 包括 1600 年南澳 7.0 级地震, 1604 年泉州 8.0 级地震, 1605 年琼海 7.5 级地震, 1918 年南澳 7.5 级破坏性强震。这些历史强震都表现为震源较浅、破坏较强的特点, 均造成了较大的人员伤亡和财产损失^[5, 10]。目前, 滨海断裂带西北段和东南段都发生过强震, 而且小震密集; 纵贯粤港澳大湾区的珠江口段, 未出现小震密集区, 并且大震、强震空缺, 形成了滨海断裂带珠江口段地震空区, 未来很有可能发生强震(图1)^[12]。因此, 研究滨海断裂带最新活动性, 对于粤港澳大湾区等华南沿海大中型城市的防震减灾事业、经济建设、社会发展等有十分重要的意义。

滨海断裂带作为珠江口盆地北部边界, 其研究可为南海北部新生代含油气盆地的形成和演化过程研究提供基础的数据约束。滨海断裂带两侧构造特征差异显著: 东南盘是沉降的新生代盆地, 分布有珠江口盆地、台西南盆地、琼东南盆地等含油气盆地, 其新生界地层沉积厚度大于 10 km; 北西盘为相对上升的隆起带。已有部分剖面结果显示断裂两侧新生代沉积物厚度向东增厚, 呈现明显的控盆特征, 然而晚渐新世后期断裂表现为逆断层性质(图1)^[11, 18]。滨海断裂带的形成和演化控制着断裂两侧的海相-陆相沉积地层的差异及南侧新生代含油气盆地的发育, 其研究具有重要的经济意义。

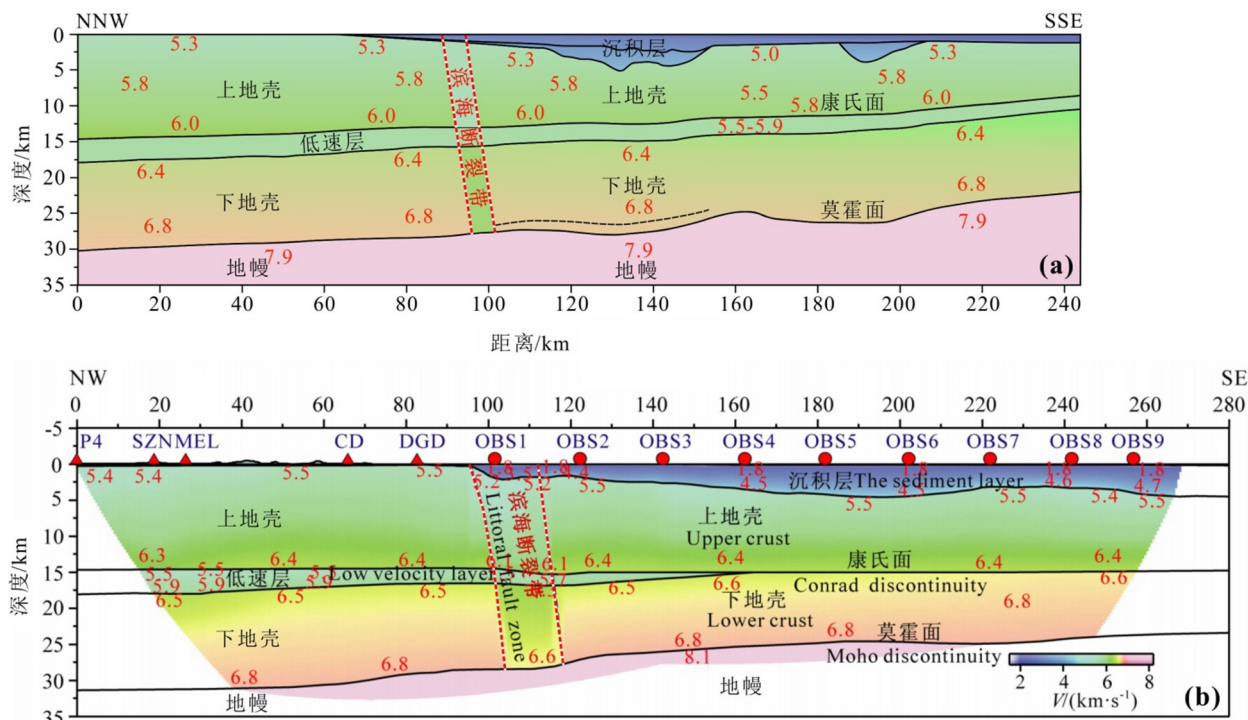
2 南海北部滨海断裂带的研究现状

2.1 断裂带地球物理特征与深部结构探测进展

滨海断裂带是南海北部陆缘区主要的构造边界。自 20 世纪 90 年代以来, 不同学者针对滨海断裂带位置、深部全地壳结构(图2^[2, 6, 15, 19-20])和上地壳变形(图3^[1-2, 20-22])等开展了大量研究工作, 取得了非常显著的成果^[1, 4-5, 17, 23]。刘以宣^[4]在研究华南沿海地区主要区域性断裂过程中, 第一次提出滨海断裂带这一概念, 并根据遥感卫星影像和重磁异常等数据, 首次给出了断裂带大致位置。随后, 刘以宣^[1, 5]和钟建强^[17]通过重力和航磁资料的推测, 结合南海北部区域地形、地貌特征和卫星影像解译结果, 证实了断裂带的位置。另外, 不同学者在滨海断裂带南北两侧分别开展了大量人工地震探测工作^[23-26]。但由于滨海断裂带特殊的位置, 特别是海洋和陆地的地球物理探测是分开的, 无法获得由海到陆连续的地壳结构剖面, 部分剖面也未跨过滨海断裂带, 因此, 滨海断裂带的精确位置及其邻近的沉积地层结构和变形特征都未能获取。另外, 海水覆盖、海洋地球物理探测技术等原因, 此阶段对滨海断裂带的整体认识主要以宏观观测为主, 缺少直接的探测结果。

2000 年之后, 中国科学院南海所联合广东省地震局等单位, 采用海底地震仪和陆上台站相结合的方式, 实测了多条海-陆联合的地壳结构探测剖面, 获得了由海至陆连续的地壳结构信息。这些剖面显示, 滨海断裂带表现为一条倾向南东、向下连续延伸至莫霍面深度的低速破碎带, 该断裂带宽度变化范围在 6~60 km 之间。在担杆列岛以南约 20 km 处, 存在一宽度为 10 km 左右的、向下连续延伸的低速破碎带; 在南澎列岛东南约 35 km 处, 也存在一纵向低速带, 宽度为 6 km 左右, 对应于重、磁异常带。担杆列岛和南澎列岛的低速破碎带被前人推测为滨海断裂带的位置, 变形带宽度存在一定的差异^[2, 6, 9, 15, 19-20, 27-28]。

2015 年, 中国科学院南海所同广东省地震局和中国地震局地球物理勘探中心(郑州)等单位合作, 在珠江口外海域利用多道地震、海底地震仪和陆上地震台站, 联合完成了一次海-陆探测, 获取了滨海断裂带在这一区域的精确位置以及邻区的沉积地层结构和莫霍面延展特征。由于使用的气枪震源频率较低、噪音较大等原因, 加上深地震探测分辨率限制, 该海-陆联合探测未获得海



(a) 过南澎列岛测线 (改自文献[6,15,19]); (b) 过担杆列岛测线 (改自文献[2,20])

(a) The line passes through NanAo and Nan Peng Lie Islands (modified from Qiu et al^[19]; Zhao et al^[6,15]);

(b) The line across Lema Islands (modified from Cao et al^[2], Xiong et al^[20]).

图2 滨海断裂带两侧的地壳速度结构

Fig. 2 The crustal velocity structures of the littoral fault zone

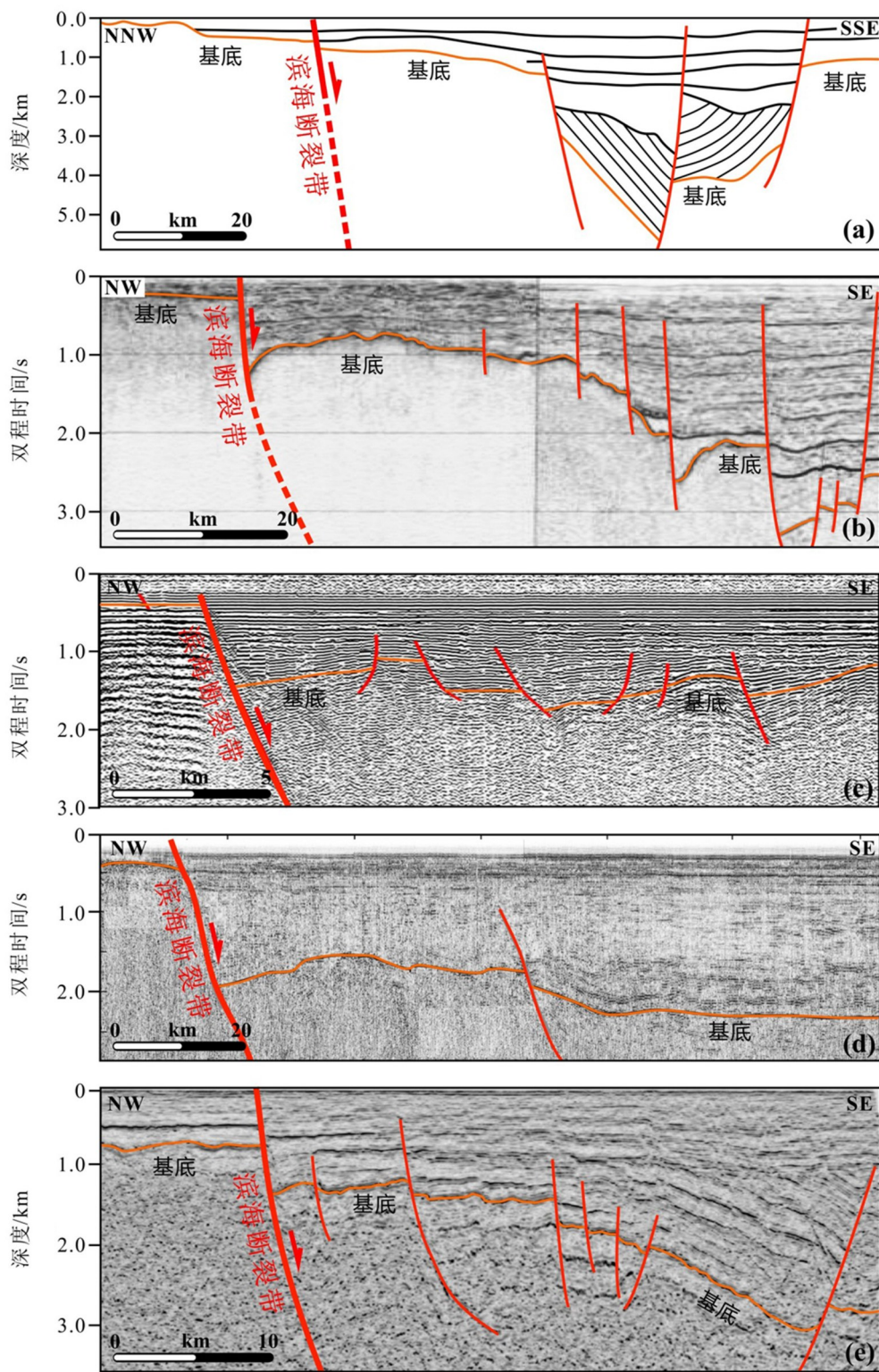
底部部的沉积地层精细结构和变形特征^[20-21, 29-30]。该探测中的剖面覆盖范围相对较小,仅集中在珠江口外海域和台湾海峡的小范围内,对滨海断裂带沿走向上的区域深部结构和变形特征等还知之甚少。

基于系统调研结果,发现现阶段对滨海断裂带的研究集中于宏观观测和深部全地壳结构,缺少浅部精细结构探测和近海底数据约束。滨海断裂带的走向、倾向、倾角和深度在空间上变化较大,说明存在明显的分段性,单纯依靠数条二维剖面和小比例尺的重力、航磁、地形等数据,难以获得滨海断裂带全段在三维空间上的展布规律。因此,需结合滨海断裂带深部(35 km)地壳结构探测结果,重点在不同关键位置开展浅部(5~10 km)、浅表(1.0~1.5 km)和近海底(40~50 m)的密集地震剖面联合探测,以获取断裂带精确位置、深-浅结构关系和空间展布规律。

2.2 滨海断裂带构造属性和活动性研究进展

许多学者也对滨海断裂带的构造属性和活动性做了大量研究,被认为形成于前中生代。刘以宣^[5]认为滨海断裂带强烈活动于渐新世-上新世,

是由陆缘扩张的拉张应力形成的张性断陷构造带。李唐根等^[31]根据重、磁异常条带解译和分析以及华南大陆及滨海地区的岩性和地质构造结构分析,认为滨海断裂带是来自印支-燕山时期的特提斯洋碰撞的缝合线。曾维军^[32]根据岩性分析认为滨海断裂带是加里东期华南地体和南海北部陆缘地体碰撞的古缝合线位置。刘宗惠^[33]采用了一套在当时较为先进的高分辨率地球物理系统(包括多道、单道地震,浅层剖面、测深等),以及浅钻和海底地质取样等手段,获取了滨海断裂带附近丰富的地质和地球物理资料,论证该断裂带在晚第三纪-第四纪期间较为活跃。李赶先^[34]认为滨海断裂带是中生代末期及新生代早期地幔上涌形成的张性断裂。冯志强等^[35]根据重磁异常及南海北部海陆沉积地层的差异演化史,认为滨海断裂带是华南次级板块和南海次级板块之间存在的一条岩石圈大断裂。吴进民^[36]提出在滨海断裂带附近并未发现蛇绿岩为代表的古洋壳证据,也未找到地质相关的其他证据,因此否定了古缝合线和碰撞带的观点,同时推出可能是新生代早期的断裂;徐杰等^[7]根据珠江口盆地基底性质分析,认为滨海断



(a)~(e)分别改自文献[1-2,20-22]。

(a)~(e) are modified from references of Liu^[1], Cao et al^[2], Xiong et al^[20], Zhang et al^[21] and Zhao et al^[22].

图 3 不同时期获取的过滨海断裂带的浅层地震反射剖面探测结果

Fig. 3 The seismic reflection profiles pass through the littoral fault zone

裂带是华南加里东褶皱系内部的一条岩石圈断裂带,而不是陆块之间的碰撞结合带。程世秀等^[37]根据滨海断裂带南北两侧的古新统沉积地层厚度差异,认为该断裂起始于古新世,是珠江口盆地的主要控盆断裂带,且6~5 Ma以来活动性增强,控制着两侧上新世以来的地层沉积和变形。Zhang et al^[21]利用反射地震剖面 and 钻井年代学约束出滨海断裂带在台湾海峡西部的活动时间开始于中新世。

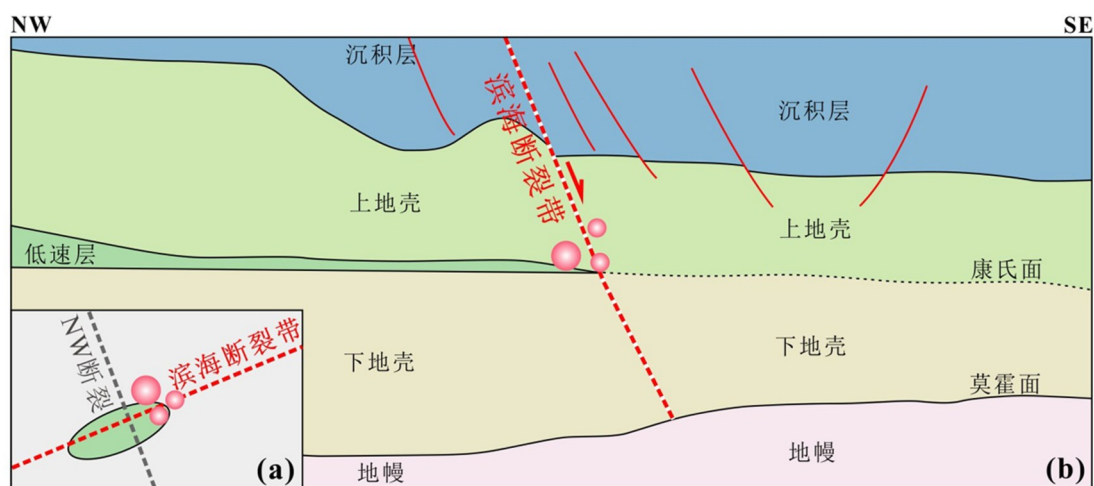
不难看出,导致上述观点层出不穷的原因是现有的勘探技术对滨海断裂带定量约束太少,精度更高的地质和地球物理探测数据相对较少,加上该断裂带空间上活动性的差异性,致使对其构造属性、空间分布、活动特征等方面的研究处于定性描述阶段。需要特别强调的是,目前对滨海断裂带晚第四纪活动性的研究依然是处于空白。

2.3 滨海断裂带孕震构造研究进展

南海北部陆缘存在一条明显的板内地震活跃带。滨海断裂带是这一区域中地震活动强度最大、频度最高的地震带,也是重要的控震和孕震构造^[8, 17]。滨海断裂带曾发生6级以上地震18次,7级以上地震4次,包括1600年南澳7.0级、1604

年泉州8.0级、1605年琼海7.5级和1918年南澳7.5级破坏性强震^[5, 10]。板内大震、强震发生的动力学来源和深部构造背景密切相关,壳内低速层往往作为主要的应力集中带和应变积聚带,强震易发生其中。深部探测结果显示,滨海断裂带在担杆列岛和南澎列岛附近为一壳内连续、倾向SE的低速破碎带,其宽度为6~10 km。不同学者认为滨海断裂带与该低速层的衔接构造位置组成了南海北部最为主要的应力集中带和应变积聚带,为强震的孕育和发生提供了深部动力学来源(图4)^[8, 10, 29, 38]。

以1918年发生在滨海断裂带东北段的南澳7.5级大地震为例,研究者开展了详细的深-浅结构探测、地震地质野外考察和历史地震记录对比研究工作,确定该地震的震中位于上地壳下部低速层向SW尖灭、NNE向滨海断裂带以及NW向黄岗水断裂带三者结合位置,对应深度约15~25 km(见图4)^[8, 39]。Zhang et al^[21]利用反射地震剖面获取了台湾海峡西部上地壳结构和变形特征,认为滨海断裂带的右旋走滑活动控制了1600年南澳7.0级和1918年南澳7.5级两次强震。



圆圈代表地震位置。

The circles show the locations of earthquakes.

图4 南海北部陆缘深部孕震构造模式图(改自文献[29,38])

Fig. 4 Deep seismogenic model for the continental margin of the northern South China Sea (modified from Cao et al^[29], Xu et al^[38])

3 展望

综上所述,滨海断裂带,作为华南陆区正常型陆壳和南海北部减薄型陆壳的边界断裂,也是珠江口盆地新生代含油气盆地的控盆断裂,同时

控制了南海北部陆缘的地震发育,但是,由于断裂带深部和浅部结构探测有限,致使对其精确位置、深-浅构造耦合关系、构造属性问题、空间展布规律知之甚少。因此,加强不同位置的深-浅结构探测研究,结合周边区域已知的地质-地球物理

和地震数据, 可能是解决滨海断裂带的深-浅构造耦合和构造属性问题的关键。

由于缺少滨海断裂带相关的海域活动构造研究, 导致对其晚第四纪活动规律和变形强度等认识存在缺失。因此, 加强该断裂带的浅部精细几何结构、海底变形综合探测、结合钻井及海底沉积物年代学和小震精定位和震源机制解研究结果, 可能是解决其最新活动性和强震复发模式的必经之路。需要指出的是, 与滨海断裂带相交的NW向断裂带的深-浅结构和最新活动性也需加强, 因为只有确认二者之间准确的交切关系和证明其在12

万年来存在活动, 才能作为探讨该区域强震孕震构造的基础。

海域活动断裂引发的强震易伴生海啸灾害, 而滨海断裂带珠江口段横贯整个粤港澳大湾区, 因此, 在上述断裂带结构探测、活动性研究(暨“海域活动断裂带探测”)基础上, 加强南海北部主要活动断裂带相关的地震-海啸灾害模拟研究^[40], 可为综合评估粤港澳大湾区等华南沿海地区未来强震危险和广东省防灾减灾工作提供基础资料和理论指导, 这也是当前大湾区建设和自然灾害研究的当务之急。

参考文献:

- [1] 刘以宣. 华南沿海的活动断裂[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(3): 11-21.
- [2] 曹敬贺, 夏少红, 孙金龙, 等. 珠江口盆地北部断裂构造特征对比及其地质意义[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2364-2369.
- [3] 李小林, 张冬丽, 张培震, 等. 多源探测数据揭示的南海东北部三维地壳结构特征[J]. 地球物理学报, 2020, 63(4): 1538-1552.
- [4] 刘以宣. 华南沿海区域断裂构造分析[M]. 北京: 地震出版社, 1981.
- [5] 刘以宣. 南澳断裂带与滨海断裂带的基本特征及其活动性探讨[J]. 华南地震, 1986, 6(3): 1-8.
- [6] 赵明辉, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海东北部滨海断裂带的研究现状与展望[J]. 华南地震, 2003, 23(1): 20-27.
- [7] 徐杰, 张进, 周本刚, 等. 关于南海北部滨海断裂带的研究[J]. 华南地震, 2006, 26(4): 8-13.
- [8] 徐辉龙, 叶春明, 丘学林, 等. 南海北部滨海断裂带的深部地球物理探测及其发震构造研究[J]. 华南地震, 2010, 30(增刊1): 10-18.
- [9] 曹敬贺, 夏少红, 孙金龙, 等. 珠江口外潜在强震区海陆地震联测的初步结果[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(3): 71-78.
- [10] 徐辉龙, 丘学林, 赵明辉, 等. 南海北部南澳大地震(M=7.5)震中区的地壳结构特征与震源构造[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊2): 83-91.
- [11] 龚再升, 李思田. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [12] 孙金龙, 徐辉龙, 詹文欢, 等. 南海北部陆缘地震带的活动性与发震机制[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(3): 40-47.
- [13] 夏少红, 赵明辉, 丘学林. 南海北部海陆过渡带地壳结构的研究现状及展望[J]. 华南地震, 2008, 28(4): 9-17.
- [14] 曹敬贺, 孙金龙, 徐辉龙, 等. 珠江口海域滨海断裂带的地震学特征[J]. 地球物理学报, 2014, 57(2): 498-508.
- [15] 赵明辉, 丘学林, 叶春明, 等. 南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 845-852.
- [16] 夏少红, 丘学林, 赵明辉, 等. 南海北部海陆过渡带地壳平均速度及莫霍面深度分析[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(4): 63-70.
- [17] 钟建强. 滨海断裂带之所在及其活动性初探[J]. 华南地震, 1987, 7(4): 4-10.
- [18] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [19] 丘学林, 赵明辉, 叶春明, 等. 南海东北部海陆联测与海底地震仪探测[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(4): 295-300.
- [20] 熊成, 曹敬贺, 孙金龙, 等. 珠江口外海域滨海断裂带沿构造走向的变化特征[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3682-3697.
- [21] ZHANG Y, HAO K C, ALVAREZ-MARRON J, et al. Imaging active faulting in the western Taiwan Strait[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 3703.
- [22] 赵中贤, 周蒂, 廖杰, 等. 珠江口盆地陆架区岩石圈伸展模拟及裂后沉降分析[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1135-1145.
- [23] 廖其林, 王振明, 王屏路, 等. 福州-泉州-汕头地区地壳结构的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 1988, 31(3): 270-280.
- [24] NISSEN S S, HAYES D E, YAO B C, et al. Deep penetration seismic soundings across the northern margin of the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(11): 22401-22433.

- [25] 尹周勋, 赖明惠, 熊绍柏, 等. 华南连县-博罗-港口地带地壳结构及速度分布的爆炸地震探测结果[J]. 地球物理学报, 1999, 42(3): 383-392.
- [26] YAN P, ZHOU D, LIU Z S. A crustal structure profile across the northern continental margin of the South China Sea [J]. *Tectonophysics*, 2001, 338(1): 1-21.
- [27] XIA S, ZHAO M, QIU X, et al. Crustal structure in an onshore-offshore transitional zone near Hong Kong, northern South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(5): 460-472.
- [28] 孙金龙, 夏少红, 徐辉龙, 等. 2010年南海北部海陆联测项目简介及初步成果[J]. 华南地震, 2010, 30(增刊 1): 45-52.
- [29] CAO J, XIA S, SUN J, et al. Offshore fault geometries in the Pearl River Estuary, southeastern China: evidence from seismic reflection data [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(4): 799-810.
- [30] XIA S, CAO J, SUN J, et al. Seismogenic structures of the 2006 $M_r 4.0$ Dangan Island earthquake offshore HongKong [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(1): 169-176.
- [31] 李唐根, 邱燕, 姚永坚. 南海大地构造特征[M]//刘光鼎主编. 中国海域及邻区地球物理特征. 北京: 科学出版社, 1992: 248-271.
- [32] 曾维军. 广州-巴拉望地学断面[M]//刘光鼎主编. 中国海域及邻区地球物理特征. 北京: 科学出版社, 1992: 272-288.
- [33] 刘宗惠. 南海珠江口盆地新构造运动特征[J]. 南海地质研究, 1992: 30-50.
- [34] 李赶先. 台湾海峡新生代断裂构造及其形成演化[J]. 热带海洋, 1994, 13(2): 17-24.
- [35] 冯志强, 刘宗惠, 王群. 香港东南海域的断层分布及潜在地质灾害分析[J]. 中国地质灾害与预防学报, 1998, 9(增刊 1): 114-118.
- [36] 吴进民. 南海地质构造演化的若干问题[M]//陈颀. 寸丹集——庆贺刘光鼎院士工作 50 周年学术论文集. 北京: 科学出版社, 1998: 61-73.
- [37] 程世秀, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(6): 79-93.
- [38] 徐辉龙, 夏少红, 孙金龙, 等. 南海北部海陆联合深地震探测及其地质学意义[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(3): 21-27.
- [39] XIA S, ZHOU P, ZHAO D, et al. Seismogenic structure in the source zone of the 1918 $M 7.5$ Nanao earthquake in the northern South China Sea [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2020, 302: 106472.
- [40] 李琳琳, 李发淳, 邱强, 等. 1918年南澳地震海啸影响模拟及其警示[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2022, 61(1): 27-38.

(责任编辑 秦社彩)