

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.553



珠江口外海域滨海断裂带沿构造走向的变化特征

熊成^{1,2}, 曹敬贺¹, 孙金龙^{1*}, 夏少红¹, 万奎元¹, 范朝焰^{1,2}, 杨碧峰^{1,2}

1. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东广州 510301

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 珠江口外海域滨海断裂带是南海北部陆缘重要的控震和发震构造, 其研究关系到区域防震抗震、地壳稳定性评价及对南海构造演化的认识。为探明滨海断裂带沿构造走向上的变化特征, 对2015年珠江口海陆联测数据进行了处理, 使用射线追踪、走时模拟等方法, 获得了珠江口西侧的地壳纵波速度结构模型和滨海断裂带在珠江口地区的发育位置和构造形态等信息。结果显示, 珠江口西侧滨海断裂带总体倾向SE, 向下可能延伸至莫霍面; 沉积层在断裂带陆侧较薄, 在滨海断裂带处突然增厚; 断裂带内地壳速度为5.3~6.7 km/s, 相对两侧地壳表现出低速特征; 莫霍面的埋深由断裂带陆侧的28.5 km抬升至其海侧的24.5 km; 海陆两侧的地壳结构具有明显的非均一性。对比前人在珠江口东侧的研究成果, 珠江口外滨海断裂带总体形态特征相似, 但也表现出明显的差异, 自东向西, 断裂带内部的结构形态从简单变得复杂, 逐渐发育明显的阶梯状断层; 北界断裂从断距很大的陡崖式正断层逐渐转变为断距较小的低角度正断层, 且北界断裂的位置向北错动了一段距离, 断裂带内的低速异常则逐渐变弱。本研究不但可以加深对滨海断裂带浅、深部结构的认识, 而且还能为研究南海北部陆缘的发震构造提供参考。

关键词: 珠江口; 滨海断裂带; 地壳结构; 深地震探测; 地球物理。

中图分类号: P738.4

文章编号: 1000-2383(2018)10-3682-16

收稿日期: 2017-11-15

Variation Characteristics along the Strike of the Littoral Fault Zone in Offshore Pearl River Estuary

Xiong Cheng^{1,2}, Cao Jinghe¹, Sun Jinlong^{1*}, Xia Shaohong¹, Wan Kuiyuan¹, Fan Chaoyan^{1,2}, Yang Bifeng^{1,2}

1. CAS Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510301, China

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: The Littoral Fault Zone (LFZ) is an important seismic control and seismic structure in the northern continental margin of the South China Sea. The study of LFZ is related to regional seismic resistance, crustal stability evaluation and the understanding of tectonic evolution of the South China Sea. To find out the spatial variations along the strike of the LFZ, we processed the data of the onshore-offshore deep seismic experiment in Pearl River Estuary (PRE) area in 2015 and simulated a P-wave velocity model in the western PRE and detected the general location of LFZ. The results show that the LFZ dips southeast down to the Moho with a low velocity of 5.3–6.7 km/s in the crust. The basement fluctuates greatly and the depth of the Moho interface is decreases gradually from 28.5 km to 24.5 km from the onshore to offshore. Compared with previous studies in the eastern PRE, the general morphological characteristics of the LFZ on both sides of the PRE are similar. However they also show obvious differences. From east to west, the structure of the fault zone becomes more complex, with stepped normal faults developed and the northern boundary fault moves northward a distance and changes into low angle normal fault with small fracture distance from steep normal fault with large break distance, and the low velocity anomaly in the fault zone gradually decrea-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41376060, 41576046, 41506046); 中国科学院边缘海地质重点实验室开放基金项目 (No. MSGL15-05).

作者简介: 熊成 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地球物理研究. ORCID: 0000-0003-2420-1360. E-mail: xiongcheng15@mails.ucas.ac.cn

*** 通讯作者:** 孙金龙, ORCID: 0000-0002-8153-9344. E-mail: sunjl@scsio.ac.cn

引用格式: 熊成, 曹敬贺, 孙金龙, 等, 2018. 珠江口外海域滨海断裂带沿构造走向的变化特征. 地球科学, 43(10): 3682–3697.

ses. The results not only deepen the understanding of the shallow and deep structure of LFZ, but also provide a reference for the seismotectonics of the northern continental margin of South China Sea.

Key words: the Pearl River Estuary; the littoral fault zone; crustal structure; deep seismic experiment; geophysics.

0 引言

珠江口海陆过渡带所处的南海北部陆缘记录了晚中生代西太平洋向欧亚大陆俯冲以及新生代陆缘裂解到南海海底扩张的演化过程和演化历史的重要信息(汪品先, 2003; 夏少红等, 2008a; 刘光鼎, 2011), 在大地构造背景上, 南海北部陆缘受菲律宾海板块北西向俯冲和印藏碰撞侧向应力传递的影响, 新构造运动较为强烈, 表现为岩浆活动频繁、地震活动强烈和断裂构造发育等特征(刘以宣等, 1994), 主要发育有 NE、NW、NEE 走向的 3 组断裂体系, 这些断裂相互叠加和交织, 且具有多期活动的特点(姚伯初等, 1999; 魏柏林, 2001; 宋海斌等, 2002; 陈冰等, 2005; 曹敬贺等, 2014a). 著名的华南滨海断裂带在这里大致沿 30~50 m 等深线分布(刘以宣, 1986; 张菲菲等, 2014). 作为南海北部地区的一个重要构造, 滨海断裂带长期以来受到了众多学

者的关注(陈恩民和黄咏茵, 1984; 邹和平, 1998; 赵明辉等, 2004; 徐辉龙等, 2010; 孙金龙等, 2012; 曹敬贺等, 2014b), 被认为是南海北部陆缘重要的控震和发震构造(徐辉龙等, 2010), 南海北部历史上很多 6 级以上强震均是沿该断裂带分布(图 1). 而珠江口外海域是南海北部陆缘地震带 7 级地震等间距分布的空缺区(廖其林等, 1988; 魏柏林, 2001), 且该区与沿滨海断裂带发育的强震区具有相同的构造条件, 因而被认为是一个潜在强震区(丁原章和黄新辉, 1995, 1998; Lee *et al.*, 2000; 陈仁法等, 2009). 同时由于珠三角是华南人口最稠密、经济最发达的区域, 一旦发生强震, 将造成难以估量的损失. 因此, 对珠江口区域的滨海断裂带进行研究, 不论是对于区域防震抗震、地壳稳定性评价, 还是对于认识南海构造演化等都具有十分重要的意义.

滨海断裂带的发现最早来自于重力和航磁资料推测(刘以宣, 1981, 1986), 进而通过重磁异常、地形

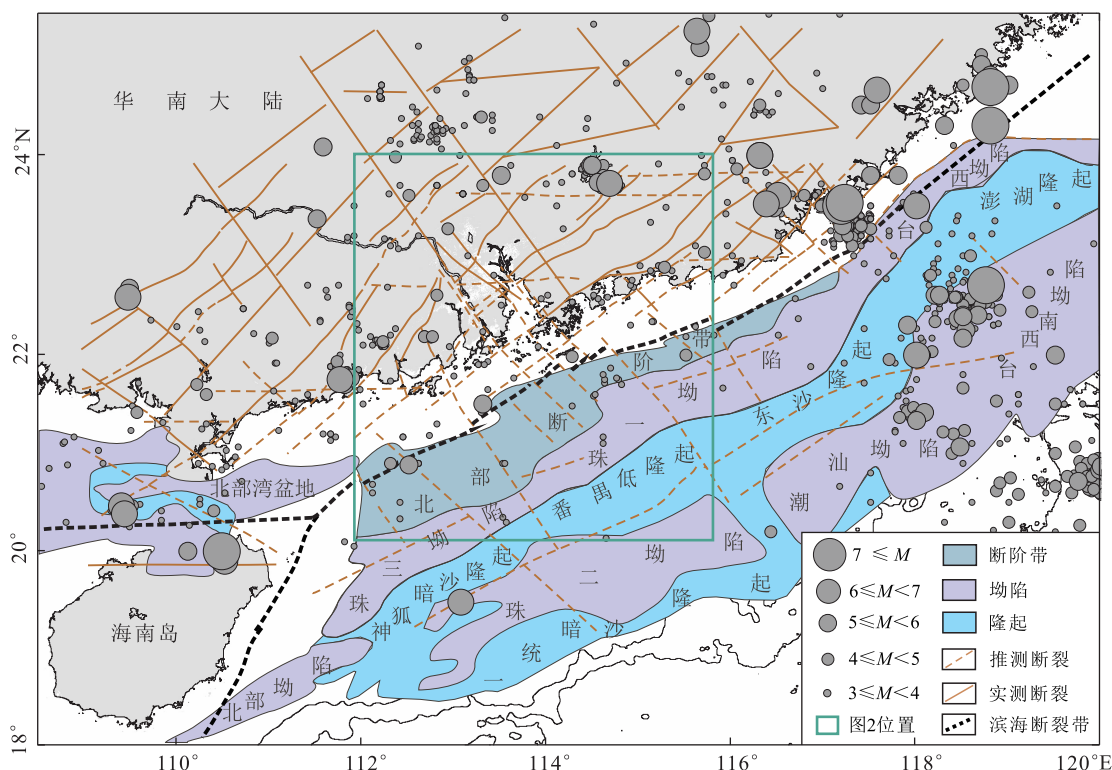


图 1 华南陆块与南海北部陆缘地震活动及构造

Fig.1 Seismicity and tectonics in and around the research area

台网记录地震数据来自中国地震台网; 历史地震据陈恩民和黄咏茵(1984)及许振栋(2006); 断裂及构造单元据程世秀等(2012), Zhu *et al.* (2012) 和叶青等(2017)

地貌和卫星影像等宏观方法得到证实(钟建强, 1987; 刘光鼎, 1992; 徐起浩等, 2004). 然而, 受限于技术和浅海复杂环境等因素, 精度更高的地质和地震探测相对较少, 因此对于滨海断裂带的分布位置和构造形态等特征的认识一直处于定性阶段. 利用气枪震源进行海陆联合的深地震探测是一种新的了解地壳结构的有效方法(Nazareth, 2003). 2001 和 2004 年, 中科院南海所与广东省地震局合作, 先后两次在南海北部进行了海陆联合深地震探测实验(丘学林等, 2003), 结果在南澎列岛南侧和香港海外海均探测到一条倾角较陡、倾向 SE、向下连续延伸至

莫霍面的低速破碎带(赵明辉等, 2004, 2006; 夏少红等, 2008b, 2010). 2010~2011 年, 中科院南海所分别在珠江口外海等区域完成了 3 条海陆联测深地震测线(孙金龙等, 2010; 曹敬贺等, 2012), 探明了滨海断裂带在珠江口东侧的发育位置和规模(曹敬贺等, 2014a, 2014b). 与此同时, 学者们对其在南海北部陆缘地震带内的发震、控震作用也有了新的认识(徐辉龙等, 2006, 2010; 孙金龙等, 2012). 然而, 这几次对滨海断裂带的探测均位于珠江口东侧, 对于滨海断裂带沿走向向西延伸的展布情况, 目前还知之甚少, 其深部结构、与 NW 向断裂的交叉关系、沿走向的

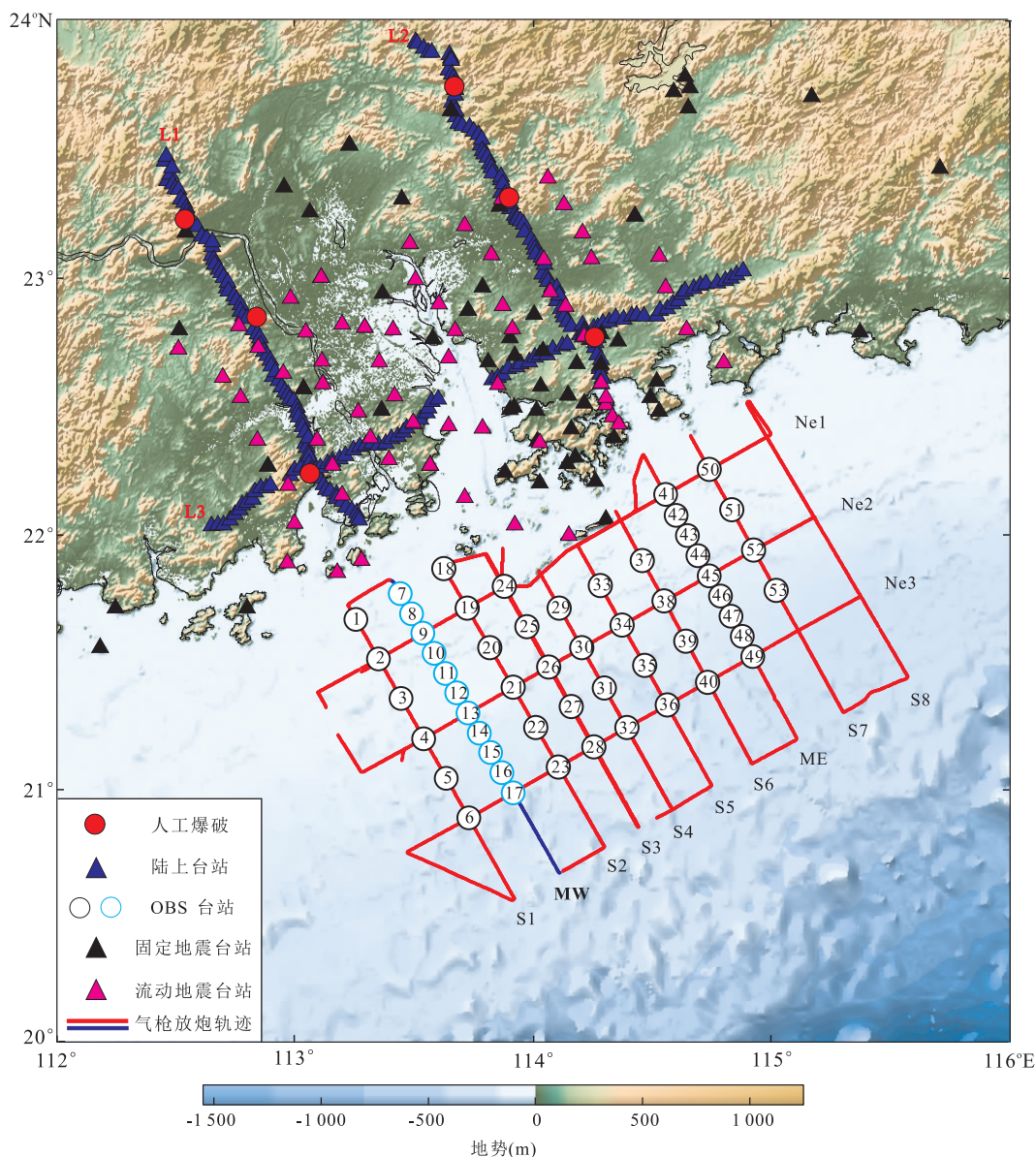


图 2 2015 年珠江口区域海陆联合地震探测站位和测线

Fig.2 Profiles and array deployed in the onshore-offshore deep seismic survey in research area in 2015

蓝色实线为本文研究测线

变化以及对珠江口地区地震活动和区域稳定性的影响,都是目前迫切需要解决的问题。

2015 年中国科学院南海所、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,在珠江口地区开展了一次集多道地震、海底地震仪(OBS, Ocean Bottom Seismometer)、陆上地震台站的海陆联合三维地震探测实验(图2),海域使用大容量气枪作为震源,陆上以炸药爆破作为震源,沿测线布设的 OBS、流动地震台以及广东省固定地震台站作为接收台网。本文利用其中的 MW 测线作为研究对象,对珠江口西侧海陆过渡带的深部地壳结构进行研究,得到了该地区的二维纵波速度结构模型和滨海断裂带在该区域的大致位置,揭示了滨海断裂带空间上的变化特征,为系统研究滨海断裂带在本区域的结构形态以及构建该地区的三维地壳结构模型打下了坚实的基础。

1 数据采集与处理

本文以 2015 年珠江口地区海陆联测 MW 测线

海域部分作为研究对象(图 2)。海上作业由“海调 6 号”科考船负责实施,测线呈 NW-SE 向垂直穿越滨海断裂带(图 3),水深 25~90 m,全长约为 146 km,以 10 km 为间距共投放 11 台由中科院地质与地球物理研究所研制生产的 OBS,其中 07~12 站位为节点式 OBS(GOBS),13~17 站位为国产宽频带低功耗 OBS(郝天珧和游庆瑜,2011),回收了 7 台 OBS,其中有 6 台记录到有效数据(OBS08、OBS10、OBS11、OBS12、OBS13、OBS16)。震源系统由 4 支美国大容量 BOLT (0.025 m^3) 组成,总容量达 0.1 m^3 ,放炮间隔 80 s,船速约为 5 节,炮间距约为 200 m,放炮期间同时进行多道反射地震数据的采集,由 Hypack 导航系统精确记录炮点的位置信息。

数据处理流程包括:利用导航数据提取炮点精准坐标和放炮时间;将 OBS 仪器记录的原始数据依次转化为 SAC 格式和国际通用的 SEG-Y 格式;利用船载测深仪测得的水深数据确定测线海底面深度;用直达水波的到时数据对 OBS 内部时钟进行校正;经过滤波、均衡和折合等方式处理后得到单台地震记录剖面图。同时对同步采集的多道数据进行处理,得到沿测线的反射地震剖面。

2 珠江口外滨海断裂带的浅部结构特征

本次实验由于放炮震源频率较低、水深较浅、噪音较大等原因,反射地震剖面数据的质量较为一般,但仍然能够比较清晰地反映基底面的起伏情况和断裂的形态。本文利用 2015 年珠江口海陆联测的 MW、S3 和 S6 测线的反射地震数据,得到 3 个反射地震剖面(图 4),并分别从中获得了滨海断裂带在珠江口东侧、中部以及西侧的浅部形态特征。

图 4 显示滨海断裂带在珠江口地区的整体形态相似,宽度为 40~55 km,水深为 30~50 m;在反射地震剖面中表现为一较宽的断裂破碎带,断裂带主体倾向 SE,北界断裂均为一断距明显、倾向 SE 的正断层;断裂带内部沉积层厚度较大,根据测线附近钻井的时深转换关系计算(赵中贤等,2010),基底埋深为 0.6~3.0 km,且都表现出由陆到海突然增加的特点;表明滨海断裂带浅部结构特征在珠江口地区自东向西具有一定相似性。

但同时,滨海断裂带在珠江口不同位置的几何形态又具有明显的差异。在珠江口东部(S6 测线),滨海断裂带的形态结构最为简单,宽度约为 50 km,不存在明显的阶梯状断层,北界断裂为明显的陡崖式正断

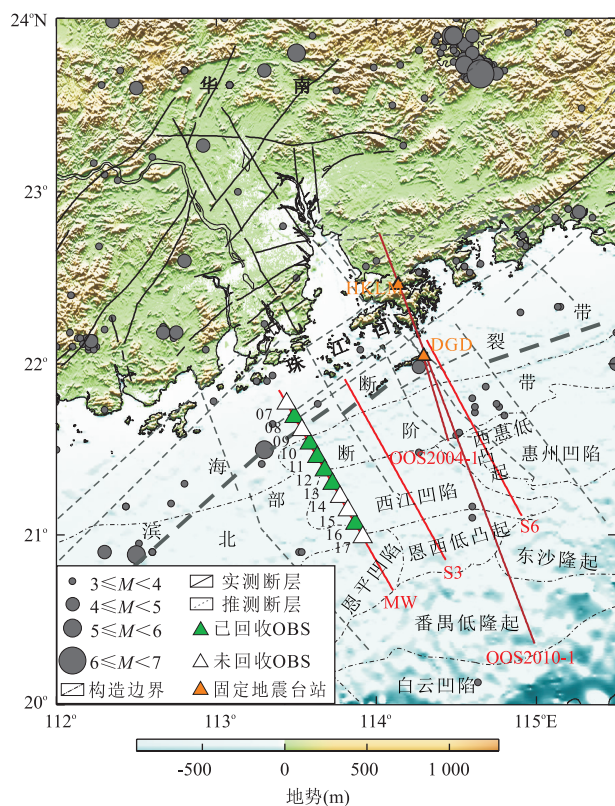


图 3 珠江口区域地震活动、断裂分布及构造单元

Fig.3 Tectonic settings in Pearl River Estuary

红色实线为本文使用多道反射地震测线,深红色实线为 2015 年前该区完成的海陆联测测线

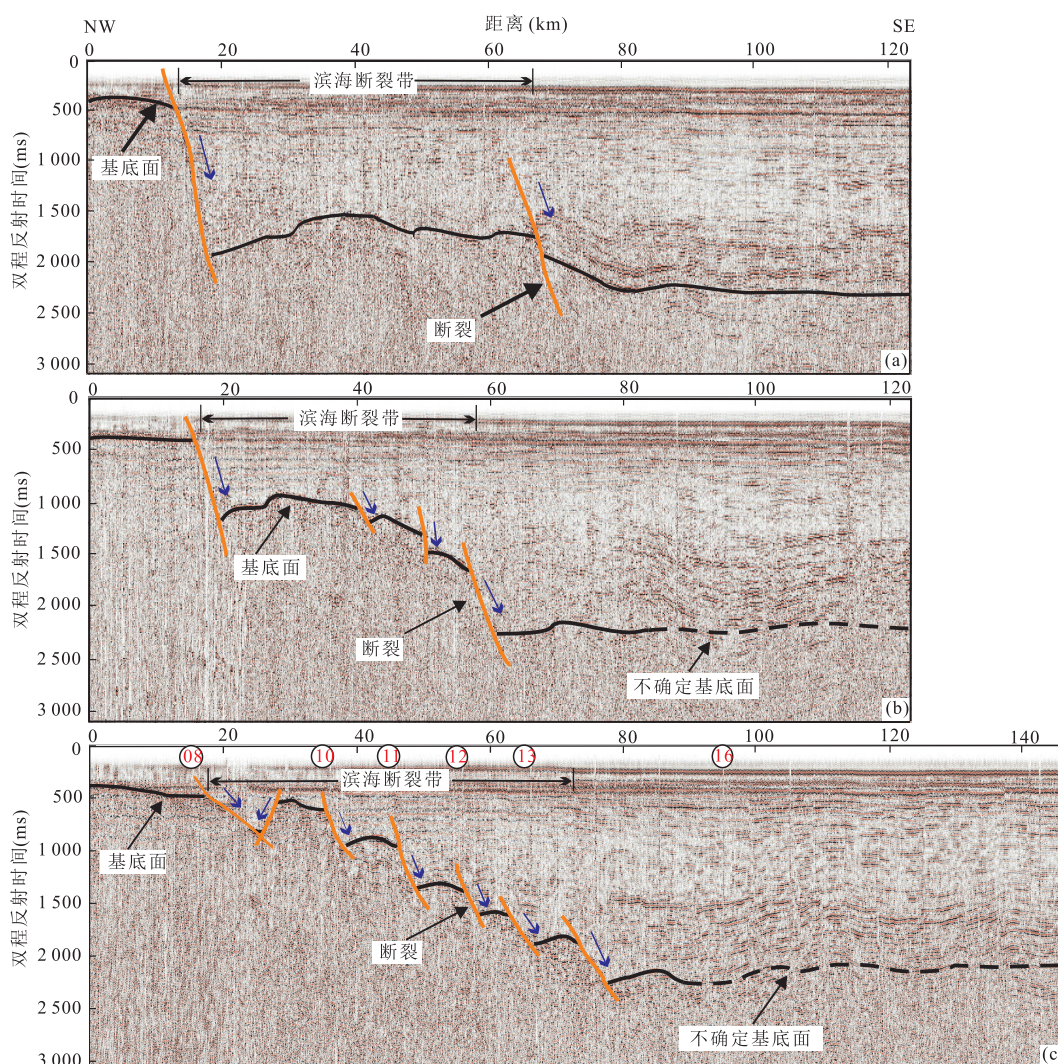


图 4 反射地震剖面上的滨海断裂带形态

Fig.4 Geometries of the LFZ displayed on the reflection seismic profiles

a、b、c 分别对应 S6、S3 和 MW 测线,黄色圆圈代表 OBS 位置,测线位置见图 3

层,断距很大,约为 1.6 km,倾角约为 55° ;在珠江口中部(S3 测线),滨海断裂带形态结构较为简单,宽度约为 40 km,阶梯状断层不是很明显,断距较小,其北界断裂为较大的陡崖,断距约为 1.2 km,倾角约为 45° ;在珠江口西侧(MW 测线),滨海断裂带形态结构较为复杂,宽度约为 55 km,发育一系列断距明显、倾向 SE 的阶梯状断层,仅有一条 NW 向正断层,并且将基岩切割成地垒,其北界断裂更靠近陆侧,断距相对较小,约为 0.6 km,断层倾角较小,约为 10° 。

从上述剖面可以看出,滨海断裂带在珠江口表现出明显的差异性,自东向西,断裂内部的结构形态从简单变得复杂,逐渐发育明显的阶梯状断层;北界断裂从断距很大的陡崖式正断层逐渐转变为断距较小的低角度正断层,且北界断层的位置向北错动了一段距离,滨

海断裂带宽度由东部的 50 km 到中部的 40 km 变化到西部的 55 km,呈现两头宽中间窄的形态。

3 滨海断裂带深部结构特征

3.1 震相识别及特征分析

对本次试验获得的数据进行处理后获得了地震记录剖面,数据质量较高,震相丰富且清晰(图 5~7)。笔者从中共拾取了 6 661 个初次反射和折射震相到时(表 1,2),其中折射震相包括沉积层折射震相(P_s),上地壳折射震相(P_{g1}),下地壳折射震相(P_{g2}),上地幔折射震相(P_n);反射震相包括莫霍面反射(P_mP)。根据 OBS 记录各种震相的数据质量、信噪比以及前人的经验参数,笔者确定各种震相的

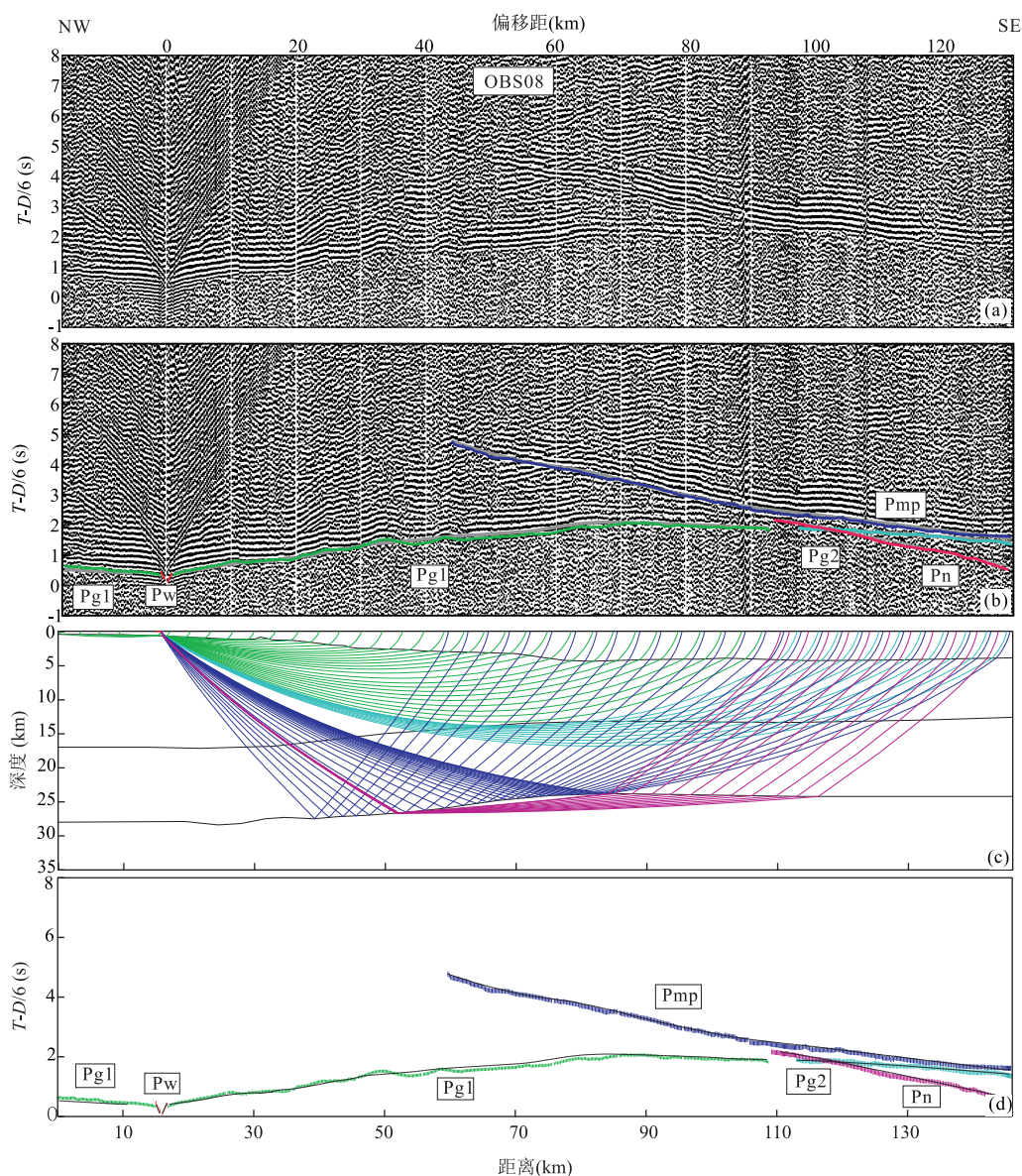


图 5 OBS08 台站地震记录剖面及射线追踪

Fig.5 Seismic record section and ray tracing simulation of OBS08

a.OBS08 台站地震剖面,折合速度为 6 km/s;b.OBS08 台站震相拾取;c.纵波速度结构模型和射线追踪;d.OBS08 台站实测走时(彩色)和理论走时(黑色);T 为实际走时,D 为偏移距

拾取不确定度范围为 50~80 ms.

本次试验中共拾取 196 个 Ps 震相到时,拾取不确定度设定为 80 ms,由于视速度较低且靠陆侧部分沉积层较薄,因此靠陆侧的 OBS08 和 OBS10 未拾取 Ps 震相,海侧的 4 个台站都有识别,但偏移距相对较小,一般小于 10 km.识别获得了清晰连续的 Pg1 震相,设定拾取不确定度为 50 ms,拾取到时 3 330 个,Pg1 震相在所有台站中均可清楚识别,都可以追踪到 80 km 外,最远可达到 100 km,反映了该组震相能量强、可连续追踪的特点,左右两支基本对称,视速度在 25~80 km 处相对较小,约为

5.5 km/s,向两侧增加到 5.8~6.1 km/s.各台站所记录的 Pg1 震相的折合走时曲线特征均相似,可以观察到部分台站在陆侧向海约 25 km 处,走时曲线出现一个小的拐点(图 6),表现出 Pg1 折合走时滞后的现象,这反映了该地区沉积层的厚度和速度发生一定的变化.部分台站可以识别到 Pg2 和 Pn 震相,设定不确定度均为 80 ms,分别拾取到 323 个和 613 个走时,但是震相不如 Pg1 清晰,追踪长度也较短.PmP 在各台站剖面中普遍出现,该震相振幅能量强、较为连续,走时曲线没有较大起伏,共拾取到时 2 134 个,设定不确定度为 80 ms,大部分台站陆海

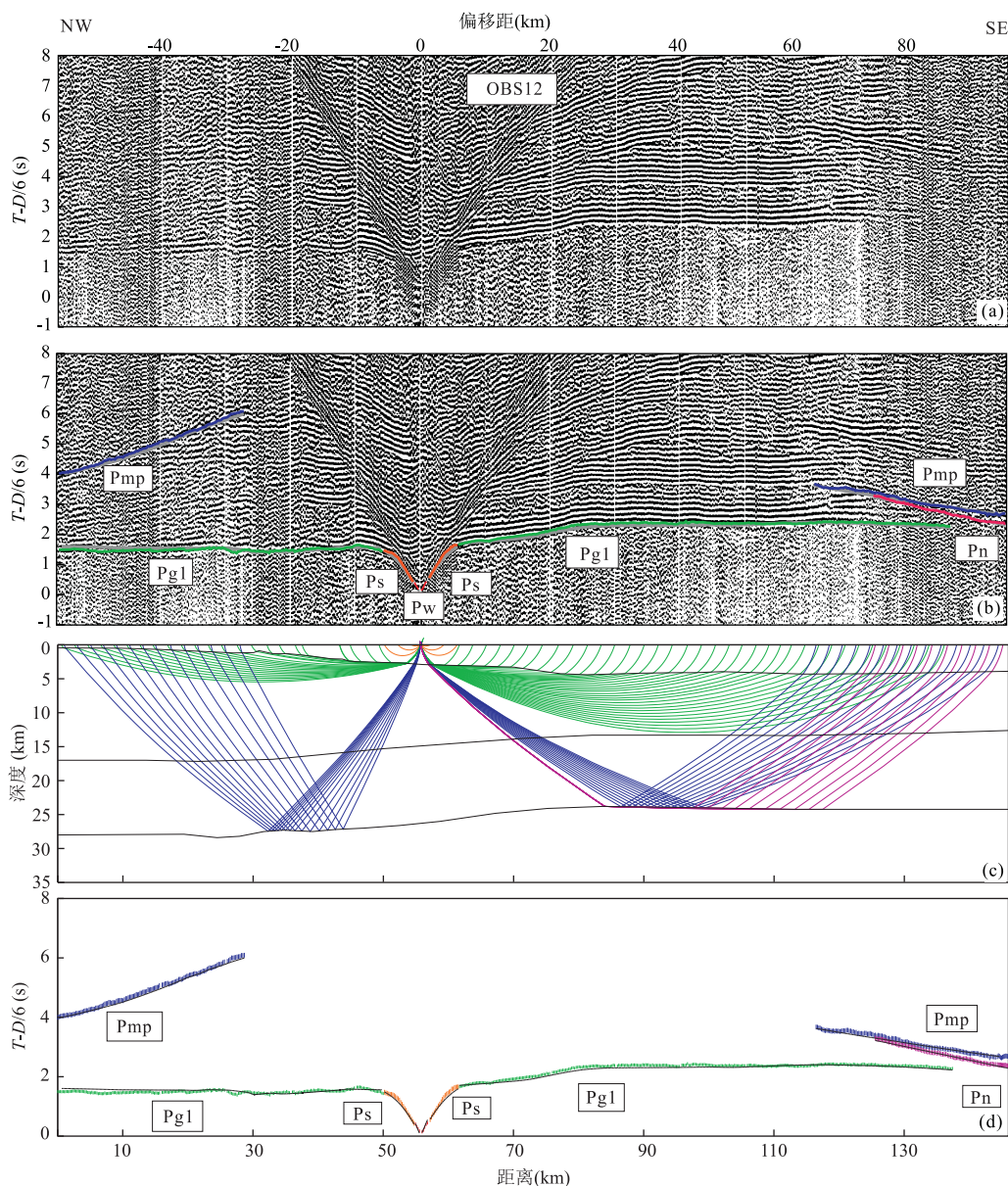


图 6 OBS12 台站地震记录剖面及射线追踪

Fig.6 Seismic record section and ray tracing simulation of OBS12

a.OBS12 台站地震剖面,折合速度为 6 km/s;b.OBS12 台站震相拾取;c.纵波速度结构模型和射线追踪;d.OBS12 台站实测走时(彩色)和理论走时(黑色). T 为实际走时, D 为偏移距

两侧都能识别出 PmP 震相,但左右两支折合走时曲线并不对称,海侧走时明显要小于陆侧,反映出莫霍面从陆到海逐渐变浅的特点.本次试验没有识别出比较明显的中地壳界面反射 PcP 震相,说明研究区的上下地壳速度分层并不明显,因此本文对速度结构模型中康氏面上下界面没有设置速度差.

3.2 地壳结构模型结果

以船载测深仪来确定水深,结合同步采集的反射地震数据、测线周边的多道地震剖面以及区域地质背景资料来约束浅部沉积层,再根据 OBS 地震记

录剖面中的震相特征建立初始模型.然后使用 ray-invr 软件(Zelt and Smith, 1992)进行二维射线追踪,计算不同震相的理论走时,并对理论走时与实测走时拟合情况(图 5~7),以此为基础,采用试错法不断调节初始模型,以使所有台站的理论走时都逐渐吻合实测走时(表 1),最后得到一个拟合最佳的二维地壳速度结构模型(图 8).最终模型表明,各个台站的震相走时均拟合得较好,模型中大部分区域的射线覆盖在 10 次以上,因此模型的约束和分辨率都比较好.

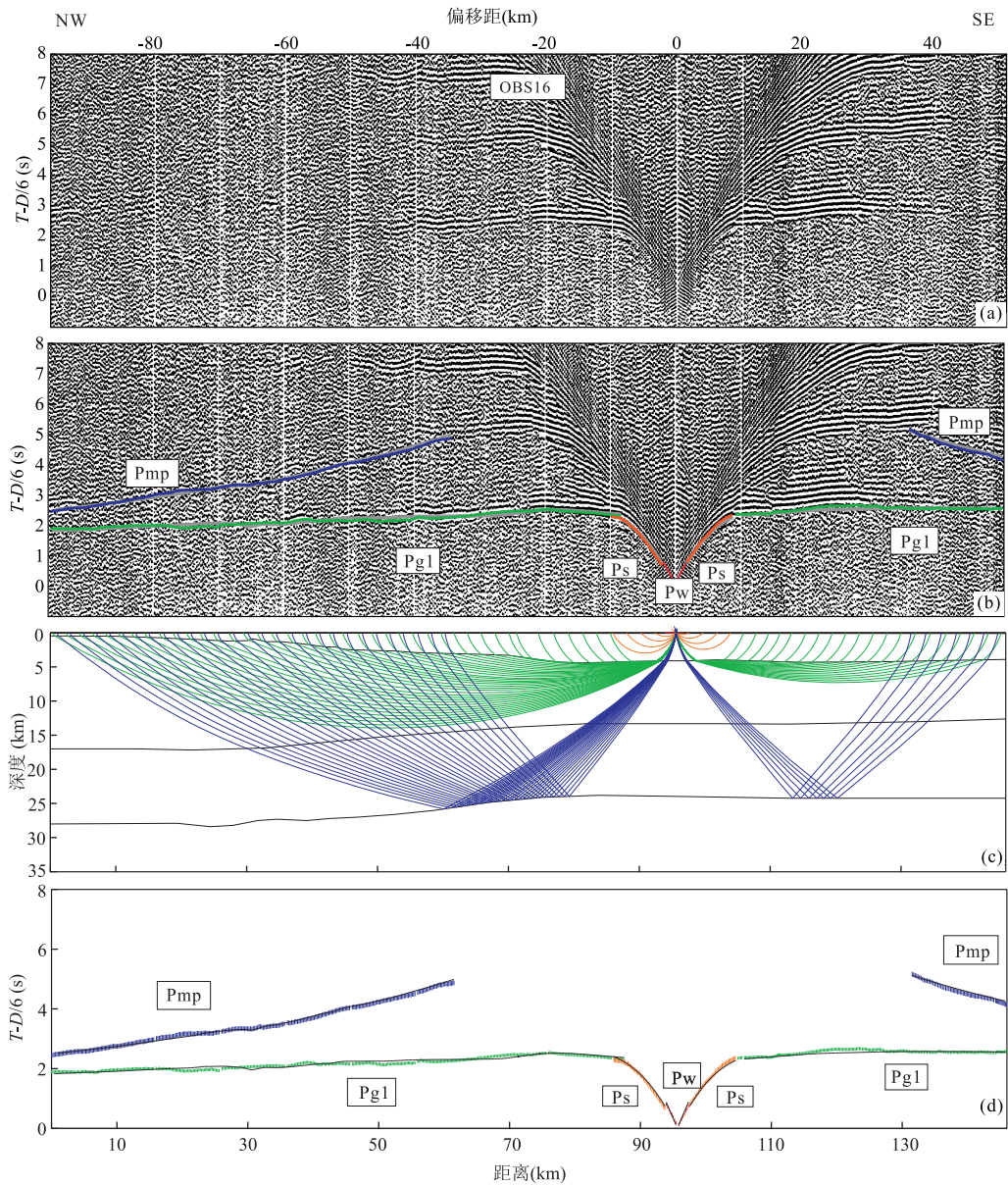


图 7 OBS16 台站地震记录剖面及射线追踪

Fig.7 Seismic record section and ray tracing simulation of OBS16

a.OBS16 台站地震剖面,折合速度为 6 km/s;b.OBS16 台站震相拾取;c.纵波速度结构模型和射线追踪;d.OBS16 台站实测走时(彩色)和理论走时(黑色). T 为实际走时, D 为偏移距

表 1 OBS 台站震相拾取数量、走时拟合残差和卡方值

Table 1 Number of traveltimes, RMS misfit and normalized χ^2 for different OBS stations

地震台站	分量	水深(s)	震相数	RMS(s)	卡方值
OBS08	hydrophone	35	1 213	0.066	1.327
OBS10	hydrophone	42	1 103	0.060	1.342
OBS11	hydrophone	45	1 166	0.068	1.224
OBS12	hydrophone	51	1 002	0.058	1.094
OBS13	hydrophone	55	1 127	0.053	1.086
OBS16	hydrophone	81	1 050	0.061	1.163
Total			6 661	0.061	1.204

表 2 各震相走时拟合残差和卡方值

Table 2 RMS misfit and normalized χ^2 for different phases

震相	拾取震相数量	不确定度(ms)	RMS(s)	卡方值
Pw	65	50	0.065	1.724
Ps	196	80	0.066	0.676
Pgl	3 330	50	0.066	1.759
Pg2	323	80	0.034	0.178
PmP	2 134	80	0.058	0.747
Pn	613	80	0.053	0.434
Total	6 661		0.063	1.287

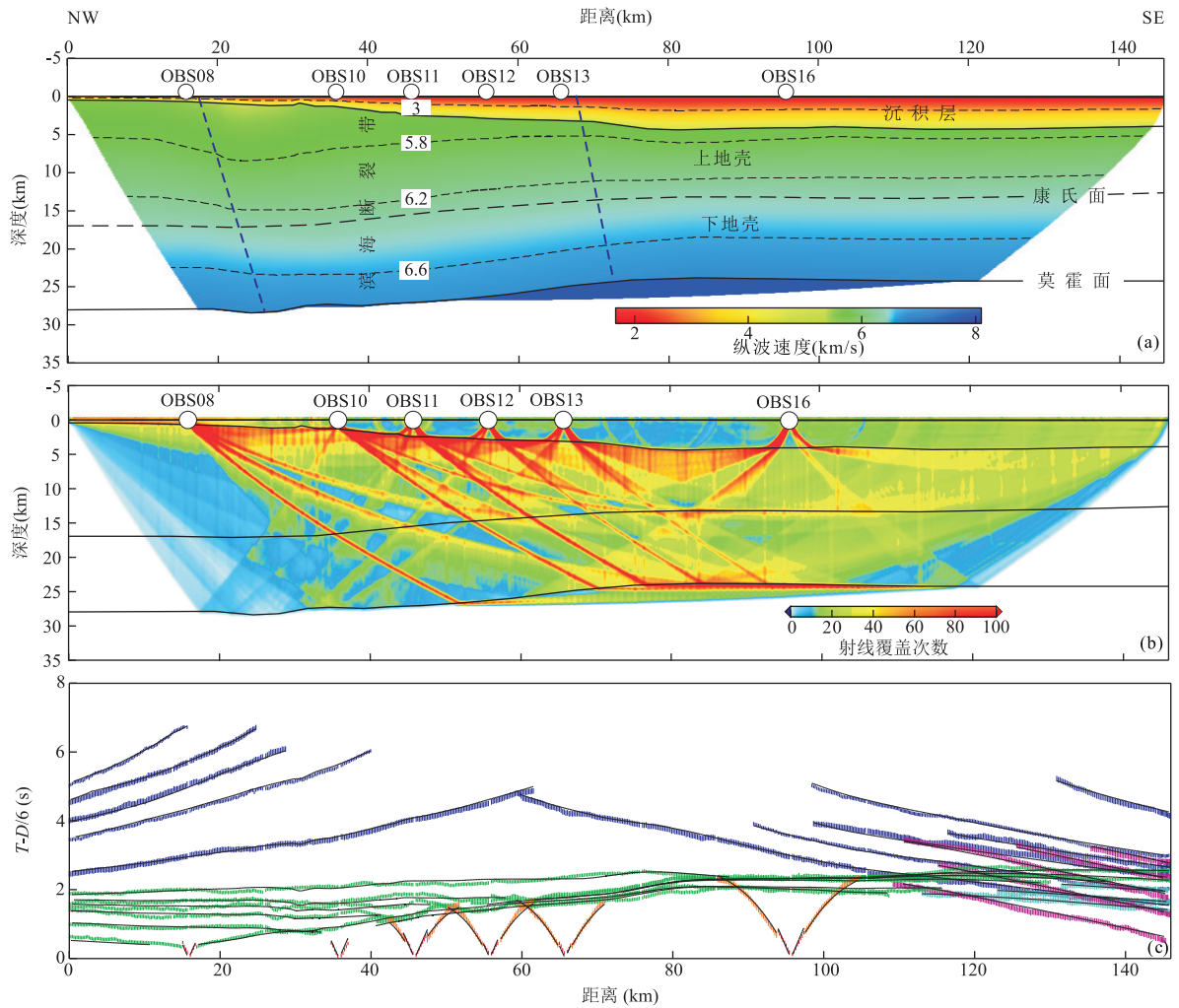


图 8 MW 测线地震纵波速度结构模型

Fig.8 P-wave velocity structure of MW profile

a.MW 测线地最终速度模型,白色圆点代表 OBS 位置;b.射线密度分布图;c.射线追踪图;d.走时拟合, T 为实际走时, D 为偏移距,折合速度为 6 km/s

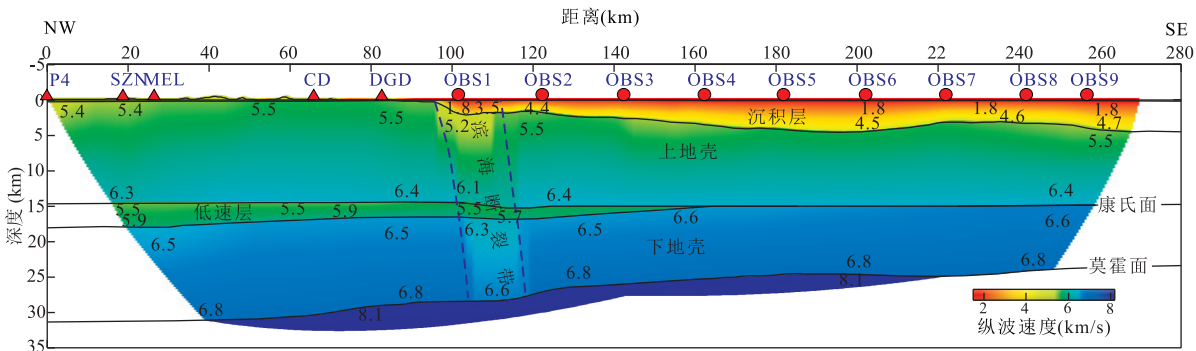


图 9 OOS2010-1 测线地壳速度结构

Fig.9 The crustal velocity structure of the seismic line OOS2010-1

据曹敬贺等(2014a,2014b),测线位置见图 3

模型自上而下分别为海水层、沉积层、上地壳、下地壳和上地幔,共 5 层.海水速度为 1.5 km/s;沉积层速度从顶部的 1.8 km/s 增加到底部的 4.6~

4.7 km/s,厚度由陆侧的 0.4 km 向海逐渐增加到 4.2 km;上地壳厚度变化较大,滨海断裂带向陆侧约为 17 km,向海侧逐渐减薄到 8.5 km 左右,速度由

表 3 珠江口两侧滨海断裂带不同层位低速异常值

Table 3 Low velocity anomaly at different layers in the Littoral

Fault Zone at both sides of Pearl River Estuary

位置	沉积层低速异常 $\Delta V(\text{km/s})$	上地壳低速异常 $\Delta V(\text{km/s})$	下地壳低速异常 $\Delta V(\text{km/s})$
珠江口西侧	0.2~0.5	0.1~0.3	0.1
珠江口东侧	0.8~0.9	0.3~0.4	0.2

顶部的 5.5~5.7 km/s 增加到底部的 6.4 km/s, 上下地壳之间没有设置速度间断面, 下地壳的速度从顶面的 6.4 km/s 增加到莫霍面的 6.8 km/s, 下地壳的厚度较为均一, 为 10~13 km, 莫霍面埋深的变化非常明显, 从向陆端的 28.5 km 处向海逐渐抬升到 24.5 km; 莫霍面下方的速度为 8.1~8.2 km/s.

由于约束条件较少, 模型中未设置前人研究提出的中地壳低速层(赵明辉等, 2006). 壳内低速层一般是根据上地壳的折射震相与下地壳折射震相之间的走时间断现象来识别(赵明辉等, 2007), 但是由于低速层埋藏较深, 只有距离足够远的台站, 才能出现这种现象, 而本条测线长约 146 km, 且 OBS 都布置在放炮测线上, 仅 1 个台站能接收到偏移距大于 120 km 的信号, 无法明显地识别到走时间断现象, 只有后续对本次海陆联测偏移距较大的陆上台站进行研究, 才能更好地判断低速层存在与否.

3.3 珠江口外滨海断裂带的深部结构特征

由于地壳速度结构模型中无法精确的判定滨海断裂带的具体范围, 因此在图 8a 中滨海断裂带的位置是根据反射地震结果(图 4c)来划定的. 模型表明, 滨海断裂带整体表现出一定的低速特征, 速度等值线在断裂带处有下凹的趋势, 与其两侧的地壳结构存在横向非均一性, 但断裂带的 NW 侧低速异常远强于 SE 侧, 这可能与断裂带内部不同位置的断层规模和活动性有关. 断裂带内沉积层厚度从陆侧海域的 0.6 km, 突然增厚至断裂带内的 1.2 km; 滨海断裂带内地壳厚度为 24~26 km, 其所在莫霍面发生较为明显的抬升, 从陆侧的 28.5 km 上升至海侧的 24.5 km, 断裂带内上地壳速度为 5.3~6.3 km/s, 较之两侧下地壳速度降低 0.1~0.3 km/s, 断裂带内下地壳速度为 6.3~6.7 km/s, 比两侧下地壳速度低 0.1 km/s 左右, 可见滨海断裂带的低速异常由浅到深逐渐减小.

前人在珠江口东侧的速度结构模型上用 P 波低速异常划定的滨海断裂带(曹敬贺, 2014b; 图 9)与本文所划定的滨海断裂带有所不同, 前者大致对应图 8a 的 20~40 km 处. 对比珠江口西、东侧(图 8a, 9)的深部结构特征, 二者总体上相似, 莫霍面均在滨海断裂

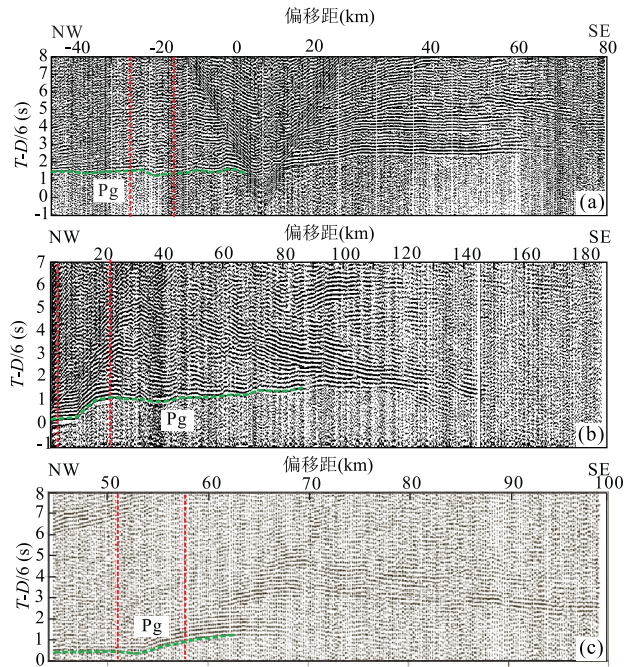


图 10 台站地震剖面中记录的走时滞后现象

Fig.10 The traveltime lag on seismic profiles

a. MW 测线 OBS12 台站地震剖面; b. OOS2010-1 测线担杆岛台地震剖, 据曹敬贺等(2014b); c. OOS2004 测线香港天文台铅凹台地震剖面, 据夏少红等(2008b)

带处突然抬升, 地壳厚度由陆到海不断减薄; 滨海断裂带同样表现出低速特征, 该低速异常在纵向上均表现为从浅到深逐渐变弱的特点(表 3); 沉积层低速异常最强、上地壳次之、下地壳最弱, 这可能与不同深度的岩石属性有关; 但两侧地壳结构也表现出一定的差异性, 滨海断裂带在珠江口西侧的低速异常要弱于珠江口东侧, 前者的总体低速异常在 0.1~0.5 km/s 之间, 而后者在 0.2~0.9 km/s 之间(表 3).

夏少红等(2008b)和曹敬贺等(2014b)在珠江口东侧的单台地震剖面图中, 均发现了非常明显的走时滞后现象(图 10b, 10c), 本次研究中珠江口西侧台站的剖面也出现这种现象(图 10a), 但相对东侧来说很微弱. 一方面这可能是由于珠江口东侧沉积层的厚度变化远大于西侧, 如反射地震剖面中所示; 另一方面, 也可能与珠江口东侧滨海断裂带内的低速异常相对西侧较强有关, 这也符合地壳结构模型的结果.

4 讨论

4.1 地壳结构模型

最终的结果表明, 研究区的沉积层的厚度和莫

霍面深度发生明显变化,并且滨海断裂带相对地发育在沉积层开始变厚和莫霍面突然抬升的位置,滨海断裂带北侧地壳厚度为 28 km,与前人得到的华南陆壳厚度一致(Zhang and Wang, 2007; 黄建平, 2008; Xia *et al.*, 2010; 黄海波等, 2014),南侧为减薄型陆壳,反映出该断裂带作为华南陆区正常型陆壳与海区减薄型陆壳的分界断裂性质(赵明辉等, 2004; 徐辉龙等, 2010; 夏少红等, 2011)。

华南沿海大陆曾进行过多次炸药震源的深地震探测实验(廖其林等, 1988; 熊绍柏等, 1991; 尹周勋等, 1999; 嘉世旭等, 2006),均探测到中地壳低速层的存在,说明华南沿海广泛分布中地壳低速层;而在南海北部海陆过渡带的海陆联测中,也探测到了中地壳低速层,且向海区尖灭(赵明辉等, 2004; 曹敬贺等, 2014b)。目前对于壳内低速层的识别,主要是依据 Pg1 和 Pg2 之间出现走时跳跃,在地震剖面上 Pg1 和 Pg2 之间呈现明显的空白带(赵明辉等, 2007)。笔者并未找到壳内低速层在研究区存在的明显证据,但是本条测线台站较少,偏移距较短,没有很好的约束条件,所以也不能排除该段测线具有存在低速层的可能性,需要后续对本次海陆联测的陆上台站进行研究,才能更好地判断该地区是否存在低速层。研究区未发现下地壳高速层的存在,而在南海北部陆缘的陆架区和洋陆转换带发现有大量下地壳高速体的发育(Yan *et al.*, 2001; Hsu *et al.*, 2004; Wang and Zhao, 2006; 张中杰等, 2009; 卫小冬等, 2011; Lester *et al.*, 2014; Wan *et al.*, 2017),因此南海北部海陆过渡带可能是广泛发育有中地壳低速层的华南大陆与发育有下地壳高速体的南海北部边缘的转换地带(夏少红等, 2010)。

4.2 珠江口外海域滨海断裂带的几何学特征

世界上大型断裂带的几何形态和构造活动都不是单一的,而是具有复杂的变化(Ben-Zion *et al.*, 1993; Magistrale and Sanders, 1996; Deng *et al.*, 2013; 张婧等, 2017)。滨海断裂带作为南海北部重要的大型断裂带,其几何形态的研究相当薄弱,进而限制了人们对该区地震构造和破裂传播方式等问题的深入认识。

研究结果表明,珠江口外海域滨海断裂带的形态结构自东向西具有非常明显的差异。(1)结构由简单变复杂,珠江口东侧断裂带内小断层发育不明显,中部有部分断距较小的断层,西侧则发育一系列断距明显的阶梯状断层;(2)北界断裂由东侧断距很大的陡崖式正断层向西变化为断距较小的低角度正断层,且北界断裂的位置向北发生了偏移;(3)断裂带宽度由东部的 50 km 到中部的 40 km 变化到西部

的 55 km,呈现两头宽中间窄的形态。而形成这些差异的原因,可能与滨海断裂带被该地区多条 NW 向断层切截有关,北界断裂向北偏移以及倾角的变化可能与西江断裂 NW 向错动有关。

4.3 地震活动性

研究表明南海北部陆缘地震带的强震基本都发生在 NEE 向的滨海断裂带与 NW 向断裂的交汇处,其相互交错的断裂与中地壳低速层的共同作用很可能是南海北部陆缘地震带发震的主要原因(徐辉龙等, 2006, 2010)。然而具有类似构造条件的珠江口区域,却是沿滨海断裂带 7 级以上地震等距离分布的空缺区,并因此被认为是一个潜在强震震源区(丁原章和黄新辉, 1995, 1998; Lee *et al.*, 2000; 陈仁法等, 2009)。

究其原因,从构造背景上来讲,一方面可能与珠江口地区的 NE 向与 NW 向交叉断裂相对其他地区较为稀疏有关。董好刚和陈宇达(2017)通过测年数据和构造解析,认为本地区大型的 NW 向断裂—西江断裂活动强度较弱;任镇寰等(2008)根据重磁资料的解释,发现珠江三角洲地区 NW 向断裂体系与其东、西两侧的粤闽赣、粤桂琼交界地区比较,其规模、切割深度也都相对较小。另一方面研究区地处南海北部陆缘的中部,与东西两侧构造边界近似等距离,所受东西两侧的影响弱于其他地区(孙金龙等, 2012),这也是一个不可忽视的因素。

断层分段差异性对地震活动性有一定影响(Machette *et al.*, 1991; Ragona *et al.*, 2001; Manighetti *et al.*, 2007),而本文研究表明,珠江口滨海断裂带自东向西具有较为明显的差异。而滨海断裂带作为南海北部陆缘主要控震断裂,这种差异或对地震活动产生较大的影响。闻学泽等(1989)对鲜水河断裂带研究发现,单一结构的断层北段对比结构复杂的断层南段,强震的活动频率明显更高。而从反射地震剖面的结果来看,滨海断裂带在珠江口东侧的结构形态明显比珠江口西侧简单,东侧的北界断裂呈陡崖式将基底切断,断距明显,而西侧为一系列阶梯状正断层;而且根据珠江口两侧深部速度结构的特征,珠江口东侧滨海断裂带的低速异常也要明显强于西侧。因此,珠江口东侧发生强震的可能性应该会大于西侧。

5 结论

(1)珠江口西侧滨海断裂带,形态结构较为复

杂,表现为一系列断距明显的阶梯状正断层,总体倾向为 SE 向,向下可能延伸至莫霍面;断裂带内沉积层速度为 1.8~4.2 km/s,地壳速度约为 5.3~6.7 km/s,在速度结构模型中表现出低速特征;沉积层在陆侧较薄,在滨海断裂带处突然增厚,莫霍面的埋深由滨海断裂带陆侧的 28.5 km 抬升至其海侧的 24.5 km,断裂带北侧为华南正常型陆壳,南侧为减薄型陆壳,该断裂带是华南陆区正常型陆壳与海区减薄型陆壳的分界断裂。

(2)珠江口两侧滨海断裂带总体形态特征相似,宽度为 40~55 km,在反射地震剖面中表现为一较宽的断裂破碎带,断裂带主体倾向 SE,北界断裂均为一断距明显、倾向 SE 的正断层;在二维速度结构模型中,滨海断裂带处基底和莫霍面都发生突然变化,表现为一条延伸至莫霍面的低速带,且低速异常自上而下逐渐减弱。

(3)滨海断裂带在珠江口外海域表现出明显的横向变化,在反射地震剖面中自东向西,断裂带内部的结构形态从简单逐渐变得复杂,逐渐发育明显的阶梯状断层;北界断裂从断距很大的陡崖式正断层逐渐转变为断距较小的低角度正断层,且北界断层的位置向北错动了一段距离;断裂带呈现两头宽中间窄的形态;在二维速度结构模型中,珠江口西侧滨海断裂带内的低速异常相对东侧较弱。

致谢:感谢“海调 6 号”全体船员及科考队员辛苦的海上作业,感谢广东省地震局吕作勇博士在数据处理中提供的帮助,此外还要感谢两位匿名审稿人的仔细评阅。

References

- Ben-Zion, Y., Rice, J. R., Dmowska, R., 1993. Interaction of the San Andreas Fault Creeping Segment with Adjacent Great Rupture Zones and Earthquake Recurrence at Parkfield. *Journal of Geophysical Research*, 98 (B2): 2135—2144. <https://doi.org/10.1029/92jb02154>
- Cao, J. H., Xia, S. H., Sun, J. L., et al., 2014a. Comparison of Fault Structure Characteristics in the Northern Pearl River Mouth Basin and Its Geological Implication. *Progress in Geophysics*, 29 (5): 2364—2369 (in Chinese with English abstract).
- Cao, J. H., Sun, J. L., Xu, H. L., et al., 2014b. Seismological Features of the Littoral Fault Zone in the Pearl River Estuary. *Chinese Journal of Geophysics*, 57 (2): 498—508 (in Chinese with English abstract).
- Cao, J. H., Xia, S. H., Sun, J. L., et al., 2012. Preliminary Results of Onshore-Offshore Seismic Experiments in a Potential Strong Earthquake Area off the Pearl River Estuary. *Journal of Tropical Oceanography*, 31 (3): 71—78 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Wang, J. L., Zhong, H. Z., et al., 2005. A Study on Fault Distribution and Tectonic Framework in Northeastern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 24 (2): 42—51 (in Chinese with English abstract).
- Chen, E. M., Huang, Y. Y., 1984. Nineteen Strong Earthquakes in South China—The Summary of Continental Margin Seismic Belt along the Northern South China Sea. *South China Journal of Seismology*, 4 (1): 14—35 (in Chinese).
- Chen, R. F., Kang, Y., Huang, X. H., et al., 2009. Seismic Risk Analysis in Northern South China Sea. *South China Journal of Seismology*, 29 (4): 36—45 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, S. X., Li, S. Z., Suo, Y. H., et al., 2012. Cenozoic Tectonics and Dynamics of Basin Groups of the Northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32 (6): 79—93 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Y. F., Fan, W. M., Zhang, Z. J., et al., 2013. Geophysical Evidence on Segmentation of the Tancheng-Lujiang Fault and Its Implications on the Lithosphere Evolution in East China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78 (S1): 263—276. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2012.11.006>
- Ding, Y. Z., Huang, X. H., 1995. Mathematical Simulation after the Seismic Risk on the Coastal Fault Zone in the South China Sea. *South China Journal of Seismology*, 15 (1): 14—20 (in Chinese).
- Ding, Y. Z., Huang, X. H., 1998. Seismic Hazard Prediction in the Pearl River Delta Area. *South China Journal of Seismology*, 18 (1): 56—63 (in Chinese).
- Dong, H. G., Chen, Y. D., 2017. Re-Visiting the Quaternary Activity of Xijiang Fault from Sanshui to Modaome. *Journal of Tropical Oceanography*, 36 (2): 26—32 (in Chinese with English abstract).
- Hao, T. Y., You, Q. Y., 2011. Progress of Homemade OBS and Its Application on Ocean Bottom Structure Survey. *Chinese Journal of Geophysics*, 54 (12): 3352—3361 (in Chinese with English abstract).
- Hsu, S. K., Yeh, Y. C., Doo, W. B., et al., 2004. New Bathymetry and Magnetic Lineations Identifications in the Northernmost South China Sea and Their Tectonic Implications. *Marine Geophysical Researches*, 25 (1—2): 29—44. <https://doi.org/10.1007/s11001-005-0731-7>
- Huang, H. B., Guo, X. W., Xia, S. H., et al., 2014. Crustal Thickness and Poisson's Ratio in the Coastal Areas of

- South China. *Chinese Journal of Geophysics*, 57 (12): 3896—3906 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. P., Chong, J. J., Ni, S. D., 2008. Inversing the Crustal Thickness under Hestations of China via H-Kappa Method. *Journal of University of Science and Technology of China*, 38 (1): 33—40 (in Chinese with English abstract).
- Jia, S. X., Li, Z. X., Xu, Z. F., et al., 2006. Crustal Structure Features of the Leiqiong Depression in Hainan Province. *Chinese Journal of Geophysics*, 49 (5): 1385—1394 (in Chinese with English abstract).
- Lee, C. F., Ding, Y. Z., Huang, X. H., 2000. Seismic Hazard Analysis of the Hong Kong Region. *Journal of Seismology & Earthquake Engineering*, 2 (4): 22—29. https://doi.org/10.5353/th_b3122635
- Lester, R., Van Avendonk, H. J. A., McIntosh, K., et al., 2014. Rifting and Magmatism in the Northeastern South China Sea from Wide-Angle Tomography and Seismic Reflection Imaging. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119 (3): 2305—2323. <https://doi.org/10.1002/2013jb010639>
- Liao, Q. L., Wang, Z. M., Wang, P. L., et al., 1988. Explosive Seismic Study of the Crustal Structure in Fuzhou-Quanzhou-Shantou Region. *Chinese Journal of Geophysics*, 31 (3): 270—280 (in Chinese).
- Liu, G. D., 1992. Geologic Geophysical Features of China Seas and Adjacent Reggions. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, G. D., 2011. Intensify the Research on Continental Margin of South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 54 (12): 2991—2992 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. X., 1981. Analysis of Fault Structure in Adjacent the Coast of South China. Seismologic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, Y. X., 1986. Basic Features and Activity Discussion of Nan'ao Fault Zone and Littoral Fault Zone. *South China Journal of Seismology*, 6 (3): 4—11 (in Chinese).
- Liu, Y. X., Zhong, J. Q., Zhan, W. H., 1994. The Basic Characteristics of Seismic Belts and Preliminary Analyses of Regional Stability in Northern Continental Margin of South China Sea. *South China Journal of Seismology*, 14 (4): 41—46 (in Chinese).
- Machette, M. N., Personius, S. F., Nelson, A. R., et al., 1991. The Wasatch Fault Zone, Utah-Segmentation and History of Holocene Earthquakes. *Journal of Structural Geology*, 13 (2): 137—149. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90062-n](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90062-n)
- Magistrale, H., Sanders, C., 1996. Evidence from Precise Earthquake Hypocenters for Segmentation of the San Andreas Fault in San Gorgonio Pass. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101 (B2): 3031—3044. <https://doi.org/10.1029/95jb03447>
- Manighetti, I., Campillo, M., Bouley, S., et al., 2007. Earthquake Scaling, Fault Segmentation, and Structural Maturity. *Earth and Planetary Science Letters*, 253 (3—4): 429—438. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.11.004>
- Nazareth, J. J., 2003. Crustal Structure of the Borderland-Continent Transition Zone of Southern California Adjacent to Los Angeles. *Journal of Geophysical Research*, 108 (B8): 183—187. <https://doi.org/10.1029/2001jb000223>
- Qiu, X. L., Zhao, M. H., Ye, C. M., et al., 2003. Ocean Bottom Seismometer and Onshore-Offshore Seismic Experiment in Northeastern South China Sea. *Geotectonica et Metallogenia*, 27 (4): 295—300 (in Chinese with English abstract).
- Ragona, D., Rockwell, T. K., Orgil, A., 2001. Fault Segmentation and Earthquake Behavior: A High Resolution Paleoseismic Study in the Southern San Jacinto Fault Zone. AGU Fall Meeting.
- Ren, Z. H., Sun, C. C., Huang, J. T., et al., 2008. Interpretation of the Gravimetry and Magnetometry Data of the Segment of the Coastal Fracture Zone in the Zhujiang (Pearl) River Mouth. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 28 (3): 61—66 (in Chinese with English abstract).
- Song, H. B., Hao, T. Y., Jiang, W. W., et al., 2002. Research on Geophysical Field Characteristics and Basement Fault System of South China Sea. *Progress in Geophysics*, 17 (1): 24—34 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. L., Xia, S. H., Xu, H. L., et al., 2010. Introduction of the Onshore-Offshore Joint Deep Seismic Prospecting in the Northern South China Sea, 2010, and Its Preliminary Results. *South China Journal of Seismology*, 30 (Suppl. 1): 45—52 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. L., Xu, H. L., Zhan, W. H., et al., 2012. Activity and Triggering Mechanism of Seismic Belt along the Northern South China Sea Continental Margin. *Journal of Tropical Oceanography*, 31 (3): 40—47 (in Chinese with English abstract).
- Wan, K. Y., Xia, S. H., Cao, J. H., et al., 2017. Deep Seismic Structure of the Northeastern South China Sea: Origin of a High-Velocity Layer in the Lower Crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122 (4): 2831—2858.
- Wang, Z., Zhao, D. P., 2006. Seismic Images of the Source Area of the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake in Northeast Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 244 (1—2): 16—31. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.02.015>

- Wang, P. X., 2003. Only Way towards the Earth Systems Science. *Advances in Earth Science*, 18(5): 795—796 (in Chinese).
- Wei, B. L., 2001. Characteristics of Earthquakes in Southeastern Onshore Region in China. Seismologic Publishing House, Beijing, 58—60 (in Chinese).
- Wei, X. D., Ruan, A. G., Zhao, M. H., et al., 2011. A Wide-angle OBS Profile across the Dongsha Uplift and Chaoshan Depression in the Mid-Northern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 3325—3335 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X. Z., Allen, C. R., Luo, Z. L., et al., 1989. Segmentation, Geometric Features and Their Seismotectonic Implications for the Holocene Xianshuihe Fault Zone. *Acta Seismologica Sinica*, 11(4): 362—372 (in Chinese).
- Xia, S. H., Zhao, M. H., Qiu, X. L., et al., 2010. Crustal Structure in an Onshore-Offshore Transitional Zone Near Hong Kong, Northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(5—6): 460—472. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2009.11.004>
- Xia, S. H., Qiu, X. L., Zhao, M. H., et al., 2010. Analysis of Crustal Average Velocity and Moho Depth beneath the Onshore-Offshore Transitional Zone in the Northern South China Sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 29(4): 63—70 (in Chinese with English abstract).
- Xia, S. H., Qiu, X. L., Zhao, M. H., et al., 2011. Crustal Structure and Features in the Conjugate Margins of South China Sea. *Earth Science*, 36(5): 877—885 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2011.092>
- Xia, S. H., Zhao, M. H., Qiu, X. L., 2008a. Situation and Prospect of Study on Crustal Structure beneath the Onshore-Offshore Transitional Zone in the Northern Margin of South China Sea. *South China Journal of Seismology*, 28(4): 9—17 (in Chinese with English abstract).
- Xia, S. H., Qiu, X. L., Zhao, M. H., et al., 2008b. Investigation on Deep Crustal Structure along the Onshore-Offshore Seismic Profile near Hong Kong. *Progress in Geophysics*, 23(5): 1389—1397 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, S. B., Jin, D. M., Sun, K. Z., et al., 1991. Some Characteristics of Deep Structure of the Zhangzhou Geothermal Field and Its Neighborhood in the Fujian Province. *Chinese Journal of Geophysics*, 34(1): 55—63 (in Chinese).
- Xu, H. L., Qiu, X. L., Zhao, M. H., et al., 2006. Characteristics of the Crustal Structure and Hypocentral Tectonics in the Epicentral Area of Nan'ao Earthquake ($M7.5$), the Northeastern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 51(S3): 83—91 (in Chinese).
- Xu, H. L., Ye, C. M., Qiu, X. L., et al., 2010. Studies on the Binhai Fault Zone in the Northern South China Sea by the Deep Geophysical Exploration and Its Seismogenic Structure. *South China Journal of Seismology*, 30(Suppl.1): 10—18 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. H., Hua, W., Wan, Y. F., et al., 2004. Division of Tectonic and Seismic Activity in Guangdong Province and Its Adjacent Areas since the Neozoic Era. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 31(4): 33—40 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. D., 2006. On 1604 M8.0 Quanzhou Earthquake in Fujian Province. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 26(3): 78—83 (in Chinese with English abstract).
- Yan, P., Zhou, D., Liu, Z. S., 2001. A Crustal Structure Profile Across the Northern Continental Margin of the South China Sea. *Tectonophysics*, 338(1): 1—21. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00062-2)
- Yao, B. C., Qiu, Y., Wu, N. Y., et al., 1999. Geological and Tectonic Characteristics and Cenozoic Sedimentation of the Western South China Sea. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ye, Q., Shi, H. S., Mei, L. F., et al., 2017. Post-Rift Faulting Migration, Transition and Dynamics in Zhuo Depression, Pear River Mouth Basin. *Earth Science*, 42(1): 105—118 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.008>
- Yin, Z. X., Lai, M. H., Xiong, S. B., et al., 1999. Crustal Structure and Velocity Distribution Based on Deep Seismic Sounding along the Lianxian-Boluo-Gangkou Profile in Southern China. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(3): 383—392 (in Chinese with English abstract).
- Zelt, C. A., Smith, R. B., 1992. Seismic Traveltime Inversion for 2D Crustal Velocity Structure. *Geophysical Journal International*, 108(1): 16—34. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1992.tb00836.x>
- Zhang, F. F., Wang, W. Y., Yang, J. Y., et al., 2014. Research on the Extension of Faults Zones in Northern Margin of the South China Sea Based on the Gravity Data. *Progress in Geophysics*, 29(5): 2113—2119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Li, W., Wu, Z. P., et al., 2017. Structural Characteristics of TanLu Fault Zone in South Area of Bohai Sea and Its Control on Basin Structure. *Earth Science*, 42(9): 1549—1564 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.110>
- Zhang, Z. J., Liu, Y. F., Zhang, S. F., et al., 2009. Crustal P Wave Velocity Structure and Layering beneath Zhujiangkou-Qiongdongnan Basins, the Northern Conti-

- mental Margin of South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(10): 2461–2471 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. J., Wang, Y. H., 2007. Crustal Structure and Contact Relationship Revealed from Deep Seismic Sounding Data in South China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 165(1–2): 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2007.08.005>
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xu, H. L., et al., 2006. Crustal Structure and Its Low-Velocity Layer in Transition Zone of South China. *Journal of Tropical Oceanography*, 25(5): 36–42 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Xu, H. L., et al., 2007. The Distribution and Identification of the Low-Velocity Layer in the Northern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 17(4): 471–479 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, M. H., Qiu, X. L., Ye, C. M., et al., 2004. Analysis on Deep Crustal Structure along the Onshore-Offshore Seismic Profile across the Binhai (Littoral) Fault Zone in Northeastern South China Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(5): 846–853 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. X., Zhou, D., Liao, J., et al., 2010. Lithospheric Stretching Modeling of the Continental Shelf in the Pearl River Mouth Basin and Analysis of Post-Breakup Subsidence. *Acta Geologica Sinica*, 84(8): 1135–1145 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, J. Q., 1987. The Location and Activity of Binhai Fracture Zone. *South China Journal of Seismology*, 7(4): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. J., Qiu, X. L., Kopp, H., et al., 2012. Shallow Anatomy of a Continent-Ocean Transition Zone in the Northern South China Sea from Multichannel Seismic Data. *Tectonophysics*, 554–557: 18–29.
- Zou, H. P., 1998. The Deep Structure and Earthquake Mechanism of the Continental Marginal Seismic Belt along the Northern South China Sea. *South China Journal of Seismology*, 18(3): 16–20 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 曹敬贺, 夏少红, 孙金龙, 等, 2014a. 珠江口盆地北部断裂构造特征对比及其地质学意义. *地球物理学进展*, 29(5): 2364–2369.
- 曹敬贺, 孙金龙, 徐辉龙, 等, 2014b. 珠江口海域滨海断裂带的地震学特征. *地球物理学报*, 57(2): 498–508.
- 曹敬贺, 夏少红, 孙金龙, 等, 2012. 珠江口外潜在强震区海陆地震联测的初步结果. *热带海洋学报*, 31(3): 71–78.
- 陈冰, 王家林, 钟慧智, 等, 2005. 南海东北部的断裂分布及其构造格局研究. *热带海洋学报*, 24(2): 42–51.
- 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. *华南地震*, 4(1): 14–35.
- 陈仁法, 康英, 黄新辉, 等, 2009. 南海北部地震危险性分析. *华南地震*, 29(4): 36–45.
- 程世秀, 李三忠, 索艳慧, 等, 2012. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因. *海洋地质与第四纪地质*, 32(6): 79–93.
- 丁原章, 黄新辉, 1995. 华南滨海断裂带地震危险性的数学模拟. *华南地震*, 51(1): 14–20.
- 丁原章, 黄新辉, 1998. 珠江三角洲地区未来地震危险性预测. *华南地震*, 18(1): 56–63.
- 董好刚, 陈宇达, 2017. 西江断裂三水至磨刀门段第四纪活动性再研究. *热带海洋学报*, 36(2): 26–32.
- 郝天珧, 游庆瑜, 2011. 国产海底地震仪研制现状及其在海底结构探测中的应用. *地球物理学报*, 54(12): 3352–3361.
- 黄海波, 郭兴伟, 夏少红, 等, 2014. 华南沿海地区地壳厚度与泊松比研究. *地球物理学报*, 57(12): 3896–3906.
- 黄建平, 崇加军, 倪四道, 2008. 利用 H-Kappa 方法反演中国地区台站下地壳厚度. *中国科学技术大学学报*, 38(1): 33–40.
- 嘉世旭, 李志雄, 徐朝繁, 等, 2006. 雷琼拗陷地壳结构特征. *地球物理学报*, 49(5): 1385–1394.
- 廖其林, 王振明, 王屏路, 等, 1988. 福州—泉州—汕头地区地壳结构的爆炸地震研究. *地球物理学报*, 31(3): 270–280.
- 刘光鼎, 1992. 中国海区及邻域地质地球物理特征. 北京: 科学出版社.
- 刘光鼎, 2011. 深化南海大陆边缘研究. *地球物理学报*, 54(12): 2991–2992.
- 刘以宣, 1981. 华南沿海区域断裂构造分析. 北京: 地震出版社.
- 刘以宣, 钟建强, 詹文欢, 1994. 南海北部陆缘地震带基本特征及区域稳定性初步分析. *华南地震*, 14(4): 41–46.
- 刘以宣, 1986. 南澳断裂带与滨海断裂带的基本特征及其活动性探讨. *华南地震*, 6(3): 4–11.
- 丘学林, 赵明辉, 叶春明, 等, 2003. 南海东北部海陆联测与海底地震仪探测. *大地构造与成矿学*, 27(4): 295–300.
- 任镇寰, 孙崇赤, 黄剑涛, 等, 2008. 滨海断裂带珠江口段的重磁资料解释. *海洋地质与第四纪地质*, 28(3): 61–66.
- 宋海斌, 郝天珧, 江为为, 等, 2002. 南海地球物理场特征与基底断裂体系研究. *地球物理学进展*, 17(1): 24–34.
- 孙金龙, 夏少红, 徐辉龙, 等, 2010. 2010 年南海北部海陆联测项目简介及初步成果. *华南地震*, 30(S1): 45–52.
- 孙金龙, 徐辉龙, 詹文欢, 等, 2012. 南海北部陆缘地震带的活动性与发震机制. *热带海洋学报*, 31(3): 40–47.
- 汪品先, 2003. 走向地球系统科学的必由之路. *地球科学进展*, 18(5): 795–796.
- 魏柏林, 2001. 东南沿海地震活动特征. 北京: 地震出版社,

- 58—60.
- 卫小冬,阮爱国,赵明辉,等,2011.穿越东沙隆起和潮汕坳陷的Obs 广角地震剖面.地球物理学报,54(12):3325—3335.
- 闻学泽,Allen,C.R.,罗灼礼,等,1989.鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义.地震学报,11(4):362—372.
- 夏少红,丘学林,赵明辉,等,2010.南海北部海陆过渡带地壳平均速度及莫霍面深度分析.热带海洋学报,29(4):63—70.
- 夏少红,丘学林,赵明辉,等,2011.南海共轭大陆边缘地壳结构及其类型特征.地球科学,36(5):877—885.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2011.092>
- 夏少红,赵明辉,丘学林,2008a.南海北部海陆过渡带地壳结构的研究现状及展望.华南地震,28(4):9—17.
- 夏少红,丘学林,赵明辉,等,2008b.香港地区海陆地震联测及深部地壳结构研究.地球物理学进展,23(5):1389—1397.
- 熊绍柏,金东敏,孙克忠,等,1991.福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征.地球物理学报,34(1):55—63.
- 徐辉龙,丘学林,赵明辉,等,2006.南海东北部南澳大地震($M=7.5$)震中区的地壳结构特征与震源构造.科学通报,51(S3):83—91.
- 徐辉龙,叶春明,丘学林,等,2010.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.华南地震,30(S1):10—18.
- 徐起浩,华卫,万永芳,等,2004.广东省及邻区新生代以来构造运动与地震活动分区的研究.水文地质工程地质,31(4):33—40.
- 许振栋,2006.1604年泉州海外8级地震研究.大地测量与地球动力学,26(3):78—83.
- 姚伯初,邱燕,吴能友,等,1999.南海西部海域地质构造特征和新生代沉积.北京:地质出版社.
- 叶青,施和生,梅廉夫,等,2017.珠江口盆地珠一坳陷裂后期断裂作用:迁移、转换及其动力学.地球科学,42(1):105—118.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.008>
- 尹周勋,赖明惠,熊绍柏,等,1999.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.地球物理学报,42(3):383—392.
- 张菲菲,王万银,杨金玉,等,2014.根据重力数据研究南海北部陆缘断裂带的延伸问题.地球物理学进展,29(5):2113—2119.
- 张婧,李伟,吴智平,等,2017.庐断断裂带渤南段构造特征及其控盆作用.地球科学,42(9):1549—1564.<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.110>
- 张中杰,刘一峰,张素芳,等,2009.南海北部珠江口—琼东南盆地地壳速度结构与几何分层.地球物理学报,52(10):2461—2471.
- 赵明辉,丘学林,徐辉龙,等,2006.南海海陆过渡带的地壳结构与壳内低速层.热带海洋学报,25(5):36—42.
- 赵明辉,丘学林,徐辉龙,等,2007.南海北部沉积层和地壳内低速层的分布与识别.自然科学进展,17(4):471—479.
- 赵明辉,丘学林,叶春明,等,2004.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.地球物理学报,47(5):846—853.
- 赵中贤,周蒂,廖杰,等,2010.珠江口盆地陆架区岩石圈伸展模拟及裂后沉降分析.地质学报,84(8):1135—1145.
- 钟建强,1987.滨海断裂带之所在及其活动性初探.华南地震,7(4):1—7.
- 邹和平,1998.南海北部陆缘地震带的深部结构和孕震机制.华南地震,18(3):16—20.