

叶秀薇, 张项, 吕金水等. 2020. 珠三角鼎湖—高明—金湾深地震测深剖面地壳构造与速度结构特征分析. 地球物理学报, 63(5): 1959-1969, doi: 10. 6038/cjg2020M0378.

Ye X W, Zhang X, Lü J S, et al. 2020. Crustal structure and tectonic attribute revealed by a deep seismic sounding profile of Dinghu-Gaoming-Jinwan in the pearl river delta. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(5): 1959-1969, doi: 10. 6038/cjg2020M0378.

珠三角鼎湖—高明—金湾深地震测深剖面地壳构造与速度结构特征分析

叶秀薇^{1,2}, 张项^{1,2}, 吕金水^{1,2}, 刘宝峰³, 王小娜^{1,2},
王力伟^{1,2}, 吕作勇^{1,2}, 谭争光^{1,2}, 熊成^{1,2}

1 广东省地震局, 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070

2 广东省地震局, 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070

3 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002

摘要 为研究珠江三角洲及近海区域深部地壳结构, 广东省地震局联合多家单位于 2015 年在珠江口区域实施了大规模三维人工地震测深实验. 本文利用珠江口西侧 NW 向鼎湖—高明—金湾 L1 测线数据进行处理、解释, 采用地震射线走时正演构建了该剖面二维速度模型. 结果表明: 沿剖面莫霍面深度从 NW 向 SE, 从 30.0 km 逐渐抬升到 28.0 km, 鼎湖至高明间存在莫霍面隆起; 中地壳低速层非均匀连续, NW 一侧速度低于 SE 一侧, 且莫霍面隆起区之上为最显著的低速异常区域, 中心最低速度为 $6.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; 吴川—四会断裂、广州—恩平断裂可能为深部物质上涌的主要通道之一, 两条断裂所围限的从珠江口西侧的鼎湖、高明往北东延伸到珠江口东侧的清远、从化区域为可能的连续莫霍面隆起区.

关键词 珠江口深地震剖面; 地壳速度结构; 莫霍面隆起; 吴川—四会断裂; 广州—恩平断裂

doi: 10. 6038/cjg2020M0378

中图分类号 P315

收稿日期 2018-09-16, 2019-07-04 收修定稿

Crustal structure and tectonic attribute revealed by a deep seismic sounding profile of Dinghu-Gaoming-Jinwan in the pearl river delta

YE XiuWei^{1,2}, ZHANG Xiang^{1,2}, LÜ JinShui^{1,2}, LIU BaoFeng³, WANG XiaoNa^{1,2},
WANG LiWei^{1,2}, LÜ ZuoYong^{1,2}, TAN ZhengGuang^{1,2}, XIONG Cheng^{1,2}

1 Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Projects, Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China

2 CEA Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China

3 Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 45002, China

Abstract To find out the crustal structure and tectonic attribute of the Pearl river delta and offshore area (PRD), in 2015, the Guangdong Earthquake Agency collaboration with the other unit carried out a three-dimensional joint onshore-offshore seismic detection experiment in the PRD. This paper processed the data of Dinghu-Gaoming-Jinwan line L1 on the west side of PDR. We utilized ray tracing and travel-time simulation method to obtained a P-wave velocity model of the L1 profile.

基金项目 国家自然科学基金项目(41676057, 41604055), 广东省科技计划项目(2017B030314082, 2018B020207011)资助.

第一作者简介 叶秀薇, 女, 1970 年生, 研究员, 主要从事壳幔结构及震源构造研究. E-mail: 1424201562@qq.com

The study showed: Along the profile, The depth of the Moho gradually decreases from the northwestern inland 30.0 km to the southwestern coastal 28.0 km. Upheaval of the Moho is between Dinghu and Gaoming. Inhomogeneous continuity of low velocity layer in the middle crust. The velocity of low velocity layer NW side is lower than the SE side, especially between Dinghu and Gaoming. The minimum velocity is $6.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. The deep Wuchuan-Sihui fault and Guangzhou-Enping fault may be one of the most important channels for deep material upwelling. It is the continuum upheaval of the Moho which from Dinghu, Gaoming on the west side of PDR to Qingyuan, Conghua on the east side of PDR delimited by Wuchuan-Sihui fault and Guangzhou-Enping fault.

Keywords Deep seismic sounding profile of Pearl river delta and offshore area; Crustal structure; Upheaval of the Moho; Wuchuan-Sihui fault; Guangzhou-Enping fault

0 引言

珠江三角洲属于华南地块东南沿海中段的构造断陷盆地,该盆地的雏形发育于白垩纪的断块,此后经历过新构造运动,第四纪受多组断裂带活动控制,于晚更新世距今约四万年时演化成现今规模的呈多边形的大型断陷(魏柏林等,2002),同时著名的滨海断裂带(刘以宣,1981)从该区穿过.滨海断裂带是整个华南地区地震活动最强烈的构造,东南沿海地震带7级以上强震都发生在该带上,如1600年南澳7级地震、1604年泉州外海 $7\frac{1}{2}$ 级地震、1605年琼山 $7\frac{1}{2}$ 级地震、1918年南澎7.3级地震等(魏柏林等,2001;陈恩民等,1985;陈恩民和黄詠茵1989;符干和沈繁奎,2006).珠江三角洲近海既处于7级强震等间距空缺区,又与上述发生强震的地区具有类似的断裂构造样式和活动特征,即NW向断裂与滨海断裂带形成交切(孙金龙等,2012).2015年发布的《中国地震动参数区划图》将珠江口担杆岛以南近海列为7.5级潜在震源区;同时珠江三角洲地区经济发达,人口稠密,是国家发展战略“粤港澳大湾区”的核心地带,一旦发生强震,将有可能造成严重的生命和财产损失.因此,对该区开展深入的地壳构造特征研究尤为必要.

近年来,针对该区的人工地震学探测取得了一定的研究成果.1999年沿韶关连县至惠东港口进行了一次人工爆破地震探测实验(尹周勋等,1999);2004年在担杆岛海域布设了两条地震剖面(夏少红,2008;Xia et al.,2012);2010年在珠江口外布置了一条NW-SE向穿越滨海断裂带的海陆联测测线(孙金龙等,2010;曹敬贺等,2014).对华南沿海陆地及海陆过渡带地壳结构的研究越来越受国内外学者

的关注,为加强对珠江三角洲及近海地区地壳结构的进一步认识,2015年广东省地震局在中国地震局和广东省人民政府的支持下,联合中国科学院南海海洋研究所、中国地震局地球物理勘探中心对该区开展了大规模的主动源地震观测实验,部分研究成果已发表(熊成等,2018;Zhang et al.,2017,2018;吕作勇等,2017;Lv et al.,2018).本文利用此次观测实验中珠江口西侧NW向鼎湖—高明—金湾L1测线速度剖面进一步作解释,弥补前人对该地区地壳结构认识的不足,并探讨沿剖面的速度结构特征.

1 人工地震测深剖面位置与测线地区的地质格局

1.1 人工地震测深剖面及炮点位置

2015年珠江口海陆联测项目在珠江口陆地布设了三条宽角反射/折射剖面测线,其中NW向两条,分别为L1测线和L2测线,以及靠近海岸线的NE向L3测线(图1).本文中所使用的数据来自于L1测线,该条测线的最初设计目标是为了切割吴川—四会断裂带、广州—恩平断裂、五桂山断裂带等珠江口西侧陆地主要NE向、近EW向断裂带,通过主动源地震波观测来研究这些断裂在地壳深部延展的情况.L1测线西北端起于肇庆市鼎湖区凤凰镇新村石龙小组附近,其坐标为 23.47°N 、 112.45°E ,往SE经过佛山市高明区和南海区、江门市新会区和斗门县,终止于江门市金湾区沿海附近,其坐标为 22.05°N 、 113.26°E ,基本呈NW-SE方向展布.按照观测系统的最初设计,剖面起算点0.0 km桩号坐标为 24.02°N 、 112.05°E .L1测线陆地部分全长约178 km,观测点间距约2.0~2.5 km,共布设

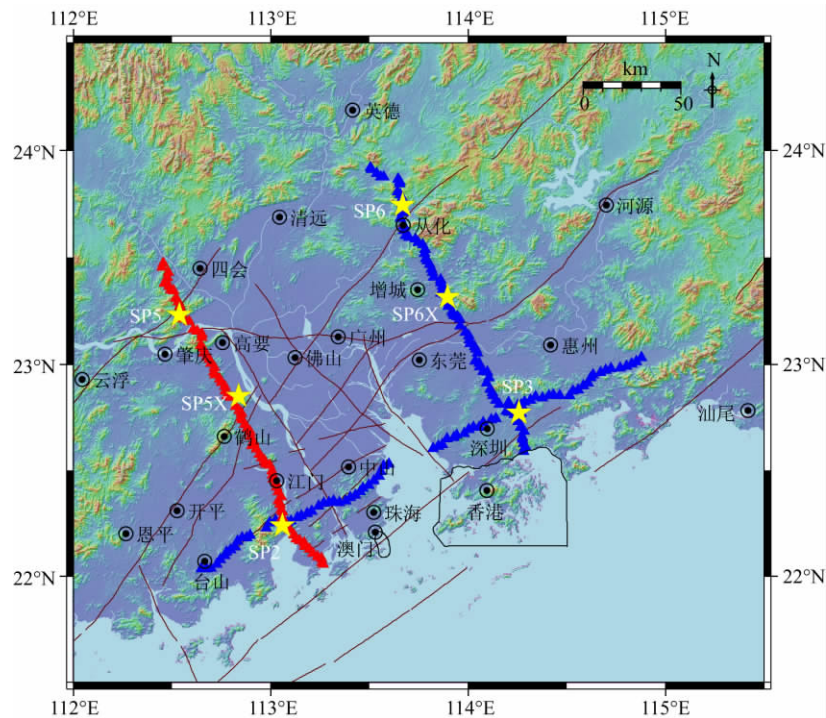


图 1 珠江口海陆联合深地震探测陆地部分测线、爆破点分布图

Fig. 1 Distribution of 3D deep seismic survey lines, stations and active sources in Pearl River Estuary area

80套台基经降噪处理的三分量数字地震仪和三个炮点,陆地单炮药量为 1.0~2.5 T,爆破点编号自 NW 向 SE 为 SP5、SP5X、SP2(图 1)。

1.2 测线地区的地质格局

研究区属于华南地块东南沿海中段的构造断陷盆地,除了长逾 1000 km 的滨海断裂带从该区南部穿过之外,盆地内部及边缘发育有 NE、NW、NEE 走向多组断裂(魏柏林等,2001;刘以宣,1981,1984,1985;刘以宣等,1994;张虎男,1995;林纪曾等,1980;任镇寰等,2016)。断裂包括了 NE 向的吴川—四会断裂、广州—恩平断裂、五华—深圳断裂, NW 向的西江断裂、白坭—沙湾断裂、狮子洋断裂,近 EW 向的五桂山北麓断裂和肇庆—广州断裂、鹤山—惠东断裂等(图 2)。这些断裂带互相切割,并控制了珠江三角洲盆地和珠江口外盆地的发育,具有多期活动的特点。本测线切割了多条 NE、近 EW 向断裂,现将两条最主要的 NE 向断裂介绍如下:

(1) 吴川—四会断裂

吴川—四会断裂带自西南的吴川向东北经阳春、云浮、四会、广宁、英德、曲江延伸至韶关。韶关以北、云浮以南断裂分为两支,断裂斜贯广东的西、中、北部,广东省内全长超过 500 km,是广东省新华夏系主要断裂带之一,也是东南沿海最早确定的重要

深断裂带之一¹⁻⁵⁾(广东省地震局,2000;魏柏林,2001;张虎男,1990;张虎男等,1995)。

在 L1 探测剖面的位置,四会—吴川断裂的走向约为 NE35°,与 L1 测线夹角约为 77°,倾向北西,倾角为 50°~80°。任镇寰等(2009,2016)通过重磁资料研究推断吴川—四会断裂的深度达到了 30 km,在地球物理场上是不同重力、磁场和莫霍面的分界线,布格重力场梯度带在断裂两侧表现为东高西低,断裂东侧为上地幔局部隆起区;航磁沿断裂表现出一条北东向展布的局部磁场异常带,磁场异常带的位置与重力梯度带位置基本一致。

(2) 广州—恩平断裂

广州—恩平断裂带 SW 起自阳江的海陵岛往 NE 经恩平、开平至高明一带被 EW 向的西江断裂所截,阳江至高明这一段分为东西两支,跨过西江断

- 1) 广东省地质矿产局. 1988. 广东省区域地质志.
- 2) 广东省地质矿产开发局等. 1998. 广东省暨香港特别行政区地质图 1:50 万数字版.
- 3) 广东省地震局. 2007. 广州市活断层探测与地震危险性评价工程技术报告.
- 4) 中国地震局地质研究所等. 2006. 广东台山核电项目可行性研究阶段地震安全性评价.
- 5) 中国地震局地球物理研究所. 2013. 广东惠州核电工程可行性研究阶段地震安全性评价报告.

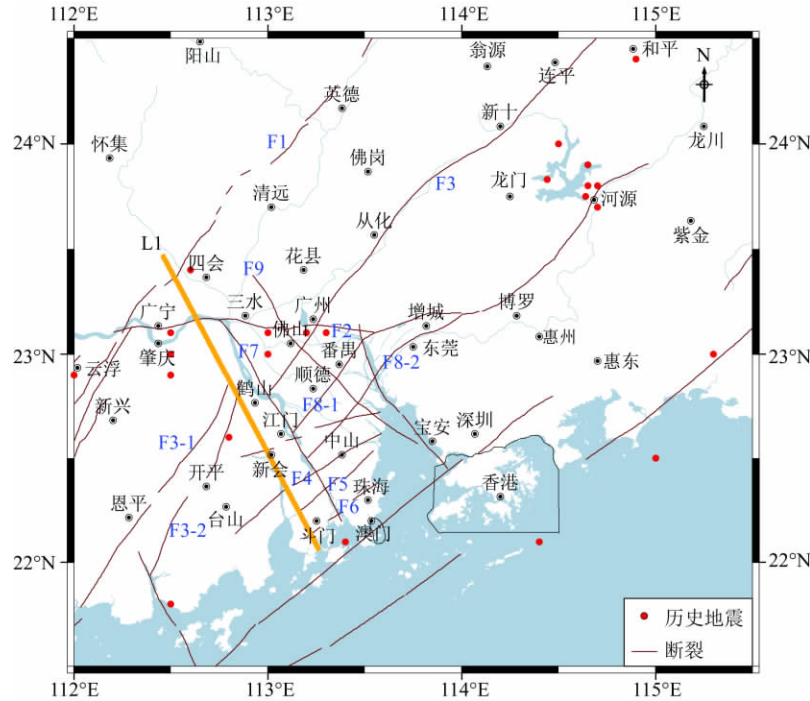


图 2 珠江口区域主要断裂分布

F1: 吴川—四会断裂; F2: 广州—肇庆断裂; F3: 广州—恩平断裂; F3-1: 开平—恩平断裂东支; F3-2: 开平—恩平断裂西支; F4: 五桂山北麓断裂; F5: 五桂山南麓断裂; F6: 珠海—澳门断裂; F7: 西江断裂; F8-1: 河源断裂西支; F8-2: 河源断裂东支; F9: 白泥—沙湾断裂.

Fig. 2 Main faults in Pearl River Estuary area

F1: Wuchuan-Sihui fault; F2: Guangzhou-Zhaoqing fault; F3: Guangzhou-Enping fault; F3-1: East branch of Kaiping-Enping fault; F3-2: West branch of Kaiping-Enping fault; F4: Wuguishan northern fault; F5: Wuguishan southern fault; F6: Zhuhai-Macau fault; F7: Xijiang fault; F8-1: West branch of Heyuan fault; F8-2: East branch of Heyuan fault; F9: Baini-Shawan fault.

裂后,经广州、从化至新丰一带,有的文献将断裂分别命名为:开平—恩平断裂西支(即苍城—海陵断裂)、开平—恩平断裂东支(即鹤城—金鸡断裂)以及广州—从化—新丰断裂.任震寰等(2016)的重磁反演结果显示开平—恩平断裂东支、西支,以及跨过西江断裂后,往 NE 经广州、从化到新丰,整个 NE 向断裂在重力、航磁上延 30 km 图件上仍连续、清晰可见,因此将这三个分别命名的断裂统称为广州—恩平断裂,并推断其埋深在 30 km 左右,是深达莫霍面的深断裂.整个断裂总体走向为 NE30°左右,总长度超过 300 km.

开平—恩平东西两支断裂形成对冲组合,共同控制着开平—恩平中生代断陷盆地的发育.断裂带切割了寒武系至古近系,控制了水系、谷地的发育,形成断层崖和跌水,那龙河、锦江和北贯谷地、潭江谷地都是沿此断裂带发育.开平—恩平断裂西支倾向 NW 或 SE,倾角 60°以上.在 L1 测线切割位置,开平—恩平断裂西支走向与 L1 测线走向夹角约为 57°.沿断裂发育宽达 10~40 m 的硅化构造岩、角砾岩和挤压带.开平—恩平断裂带的东支断裂

倾向 SE,倾角 50°~70°,控制开平—恩平断陷的东界,构造岩以挤压硅化破碎带为主.在 L1 探测剖面切割的位置,L1 测线与开平—恩平断裂东支走向的夹角约为 57°(广东省地震局,2000;魏柏林等,2001;张虎男,1990;任震寰等,2009,2016).

2 剖面二维速度模型构建

首先进行各炮点震相拾取,为便于震相分析、识别和对比,采用 $6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为折合速度处理 SP5、SP5X、SP2 炮点观测资料,并选取 2~9 Hz 进行带通滤波,得到 L1 测线的单炮折合地震剖面,识别对比出上地壳顶部基底折射波 Pg、莫霍界面反射波 Pm、上地幔顶部的折射波 Pn、壳内中间层的反射波组 P1、P2 等五组震相(图 3).总体来说,在 L1 测线地震剖面上,Pg、Pm 以及 Pn 等波组是该研究区内的优势波组,可连续的对比追踪且震相清晰可靠;壳内中间层的反射波组 P1、P2 震相在大部分区段表现出连续性和振幅较强的特征,但在部分区段却表现出能量较弱或是连续性差的特点.

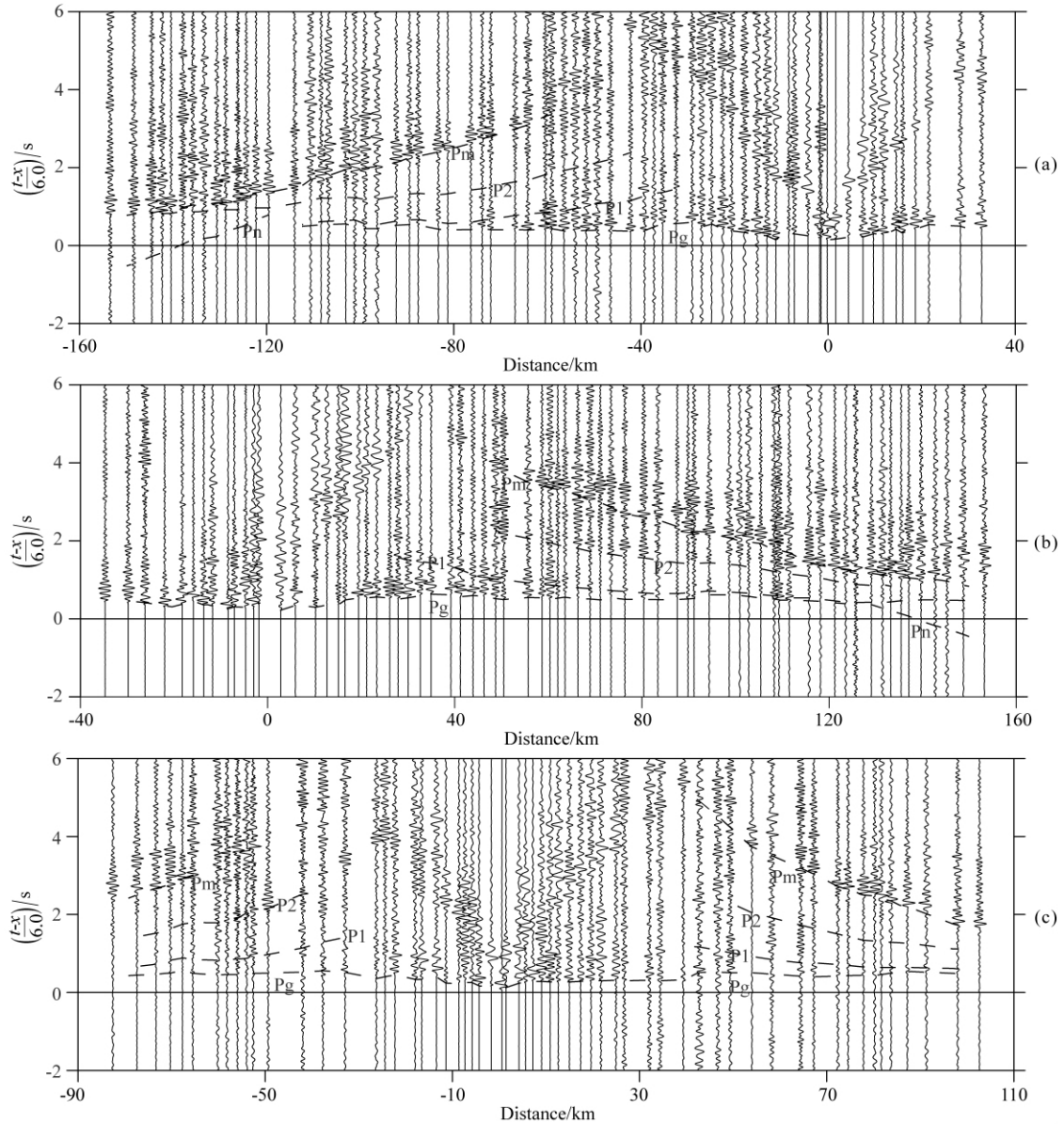


图3 L1测线P波折合宽角折/反射地震剖面

以炮点位置设为起点,北西向为负,南东向为正,折合速度取 $6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$; (a) SP2 炮点; (b) SP5 炮点; (c) SP5X 炮点.

Fig. 3 Wide-angle reflection/refraction vertical seismic profiles of line L1

To set shot point as zero, north-west is negative, south-east is positive, reduce velocity is $6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

(a) Shot SP2; (b) Shot SP5; (c) Shot SP5X.

在获取了各个有效的震相后,我们首先利用“ $T^2 - X^2$ 方法”计算 L1 测线的一维速度结构,以求取地壳深部各层的平均速度、平均深度、单点反射深度和视速度等.从一维速度结构拟合结果(图 4)可以看出:①基底折射波 P_g 和三个速度间断面产生的 P_1 、 P_2 及 P_m 三组反射波反映该区的地壳结构在垂向上,即埋深约 10~11 km、18~20 km、28~30 km 处具有速度的阶跃,呈现明显的分层特征;②在 SP5 与 SP2 炮之间埋深 15 km 附近、SP5 和 SP5X 之间埋深 25 km 附近出现一个较为明显的低速区域(图

4a、4b、4c 红圈处下凹部分).

在获得的一维地壳模型的基础上,利用 Červený 等(1982)提出的方法对各炮实际观测资料进行识别对比与反射、折射震相的正演拟合,不断调整初始模型,以使得所有台站的理论走时逐渐吻合实测走时,最终获得一个可以拟合所有震相走时的最优二维地壳结构模型.各震相的走时残差(RMS)见表 1,理论走时与实际走时的相关系数(CORREL)见表 2.总的走时残差为 0.1176 s,总的相关系数为 0.9958.一般情况下,走时残差 RMS 越小越好,相关系数越

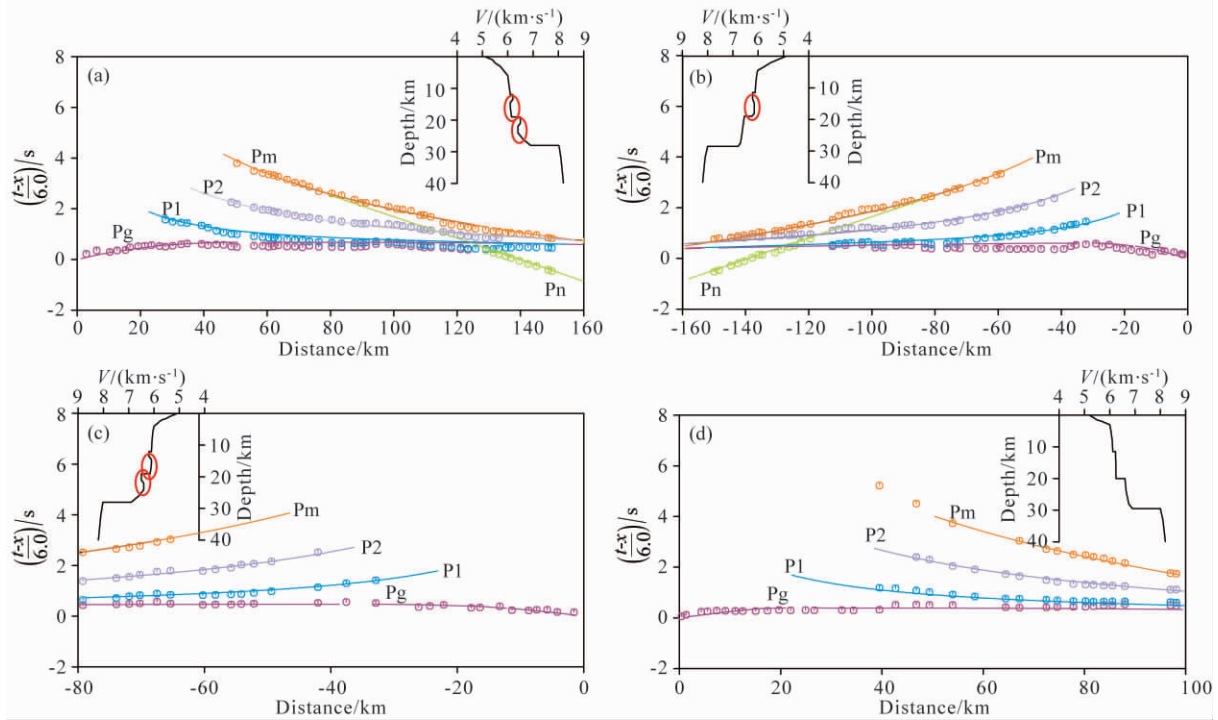


图 4 L1 测线各炮一维 P 波速度结构

(a) SP5 炮 SE 向; (b) SP2 炮 NW 向; (c) SP5X 炮 NW 向; (d) SP5X 炮 SE 向.

Fig. 4 P wave one-dimensional velocity-depth profiles of line L1

(a) SP5 SE direction; (b) SP2 NW direction; (c) SP5X NW direction; (d) SP5X SE direction.

表 1 各炮点各震相走时残差

Table 1 Travel time residuals of seismic phase

	Pg	P1	P2	Pm	Pn	综合 RMS
SP2	0.1129	0.1332	0.0736	0.0889	0.1156	0.1072
SP5	0.0811	0.1268	0.1694	0.1259	0.1259	0.1227
SP5X	0.0931	0.1236	0.1394	0.1724		0.1244
总计						0.1176

表 2 各炮点各震相理论走时与实际走时的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of observational and theoretical travel time

	Pg	P1	P2	Pm	Pn	综合 CORREL
SP2	0.6708	0.9940	0.9973	0.9984	0.9975	0.9954
SP5	0.8677	0.9912	0.9957	0.9978	0.9964	0.9965
SP5X	0.8674	0.9783	0.9807	0.9963		0.9964
总计						0.9958

接近 1, 表示拟合程度越好, 最终构建的剖面二维速度图见图 5.

基底折射波 Pg 和三个速度间断面产生的 P1、P2 及 Pm 三组反射波在一维速度模型上, 表现为垂向速度分层以及存在中、下地壳层间显著低速区域的特征(图 4). P1、P2 震相约束了中、下地壳低速区

域的位置, 在中地壳, 低速区域位于 SP5 炮东南、SP5X 炮东南以及 SP2 炮西北方向; 在下地壳, 低速区域位于 SP5 炮东南、SP5X 炮西北, 低速区域范围比中地壳少. 在二维模型上表现为中地壳出现多个低速区域, 下地壳的低速区域则仅出现在鼎湖至高明间, 与 SP5 与 SP5X 位置大体一致.

3 剖面壳幔速度结构特征

3.1 壳内间断面

通过对 SP5, SP5X, SP2 三炮的 P1、P2 记录到时的处理计算, 得到单点反射深度结果, 可以较好地反映出莫霍面之上地壳两个界面 C1、C2 的基本形态和深度范围. C1 界面埋深变化在 10.0~11.5 km, C1 界面的速度跳跃为 6.06~6.12 km·s⁻¹ 至 6.18~6.24 km·s⁻¹, 跳跃差在 0.12 km·s⁻¹ 左右. C2 界面埋深变化在 18.0~20 km 间, C2 界面的速度跳跃为 6.15~6.28 km·s⁻¹ 至 6.55~6.62 km·s⁻¹, 跳跃差在 0.32~0.40 km·s⁻¹ 之间. C1、C2 界面将珠江口西侧地壳划分为上、中、下三层地壳(Zhang et al., 2018).

上地壳又可进一步细分为两个亚层结构, 第一

亚层是由地表至基底折射波 P_g 所反映的界面之间的层位(图 5)。该亚层有较为强烈的垂直方向垂直梯度变化,速度从近地表的 $4.25 \sim 5.20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右变化到基底顶面之上 $5.50 \sim 5.70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。剖面基底顶面起伏深度变化从 $1.5 \sim 2.5 \text{ km}$,基底顶面多处出现隆起或下凹,如:剖面 $85, 125, 135, 190 \text{ km}$ 位置附近有明显下凹, 150 km 位置附近则表现为向上隆起,这种速度的变化应与断裂在该位置切割有关,反映了珠江口西侧历史地质构造运动。第二亚层是由基底顶面向下至由 P_1 震相确定的 C_1 界面之间的地壳层位,厚度约 9.5 km 左右,垂直速度梯度从结晶基底向 C_1 界面逐渐减小。总的来看上地壳厚度总体变化不大,平均约为 12 km 。

C_1 界面的深度变化、起伏规律和结晶基底变化规律较为一致,水平方向上有较为明显的速度变化,在断裂所在的界面有明显的隆起或下凹情况。相对于 C_1 界面, C_2 界面的起伏变化较小,反映出在中地壳切割到 C_2 界面的断裂数量要少于切割到 C_1 界面的断裂数。

3.2 莫霍面隆起

二维速度剖面显示(图 5),莫霍面的界面由 NW 往 SE 靠近海岸线时,逐渐向上抬升,莫霍面埋深从 30.0 km 抬升至 28.0 km ,莫霍面上方速度值为 $6.86 \sim 6.98 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、下方速度值为 $7.98 \sim 8.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,速度跳跃达 $1.13 \sim 1.16 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,远大于 C_1, C_2 界面的速度跳跃差,这与接收到的爆破激发波记录中 P_m 波组为该研究区内的能量最强的优势波组一致。沿剖面 $100 \sim 140 \text{ km}$ 处(即鼎湖

至高明间)的存在莫霍面隆起,其上对应的中、下地壳存在的低速异常区域;而这一隆起区域正好界限于四会—吴川断裂和广州(开平)—恩平断裂之间。

3.3 中、下地壳低速异常区

上地壳、下地壳均存在垂直方向的速度梯度,中地壳则速度梯度基本消失,而表现为:①具有多个低速异常区域,由陆向海低速异常区域逐渐减弱、减薄;最为显著的低速区域位于测线 NW 一端,即剖面 $100 \sim 140 \text{ km}$ 处鼎湖至高明间,中心最低速度为 $6.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$;② C_2 界面在 $100 \sim 140 \text{ km}$ 处隆起,隆起处位于莫霍面隆起区上方,且 C_2 界面隆起处上、下两侧均存在低速异常区域;③ C_2 界面起伏变化与莫霍面基本一致;由 NW 往 SE 向靠近海岸线时,由约 20.0 km 逐渐抬升至 18.0 km ,导致了中地壳的厚度逐渐变薄,中地壳厚度从 8.0 km 左右逐渐减薄至 6.0 km 左右。

下地壳速度梯度从上界面 $6.60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐步上升到下界面 $6.90 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,同时与中地壳一致的是在 $100 \sim 140 \text{ km}$ 处、埋深约 21.5 km 存在中心最低速度为 $6.37 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低速异常区域,该异常区之下为莫霍面隆起区。下地壳厚度总体保持在 10 km 。

4 讨论与结论

(1) 对华南地区莫霍面的深度,近年来不同学者分别利用布格重力异常(秦静欣等,2011)、接收函数(黄海波等,2014;沈玉松等,2013)、深地震测深(尹周勋等,1999;李培等,2015;赵明辉等,2004;曹

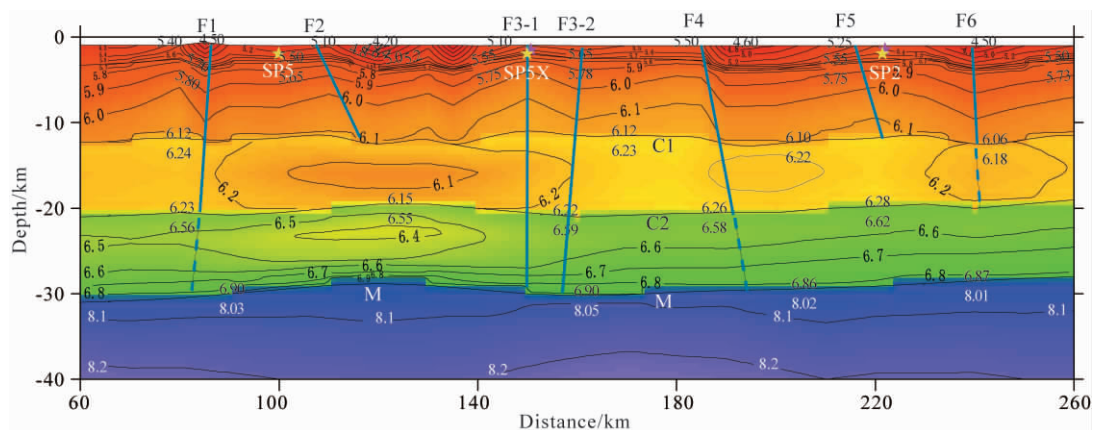


图 5 珠江口西侧 L1 剖面二维速度结构(Zhang et al., 2018, 有修改)

F1: 吴川—四会断裂; F2: 广州—肇庆断裂; F3-1: 开平—恩平断裂东支; F3-2: 开平—恩平断裂西支;
F4: 五桂山北麓断裂; F5: 五桂山南麓断裂; F6: 珠海—澳门断裂。

Fig. 5 Two-dimensional velocity structure profile of line L1 on the western side of the Pearl River Estuary
F3-1: East branch of Kaiping-Enping fault; F3-2: West branch of Kaiping-Enping fault; F4: Wuguishan northern fault;
F5: Wuguishan southern fault; F6: Zhuhai-Macau fault.

敬贺等,2014;夏少红等,2010;蔡辉腾等,2016;Lü et al.,2018)等方法开展研究,虽然测线位置或研究区域不同,均一致认为华南地区地壳厚度自 NW 向 SE 逐渐减薄,莫霍面逐渐抬升,莫霍面深度从陆到海基本统一在 30 ± 5 km,本文结果与上述观点基本一致.

(2) 尹周勋等(1999)、赵明辉等(2004)、曹敬贺等(2014)发现,在滨海断裂带 NW 一侧的华南大陆下方,测线经过的位置,上、下地壳间存在连续低速层,厚度在 5 km 左右,结果显示低速层在远离海岸线的南海逐渐减薄,并在穿过滨海断裂带后逐渐尖灭.上述研究结果其低速层位置与本文的中地壳位置基本一致.以往研究仅给出了低速层的位置及大致的速度,本文研究结果得益于探测台间距的缩小,射线密度增大使得二维模型对低速层水平方向速度的变化得以进一步细致刻画,低速层并非连续均匀区域,NW 一侧速度低于 SE 一侧,莫霍面隆起区之上的鼎湖至高明间的中地壳为低速层中最显著的低速区域,中心最低速度为 $6.05 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

(3) 尹周勋等(1999)根据 1988 年底在华南进行的人工地震测深工作,获得了位于珠江口东侧的

广东连县—博罗—港口北西向剖面的地壳速度结构(图 6),结果显示剖面在广东清远附近存在莫霍面上拱(图 6b),上拱高度约 2 km,隆起区为 NE 走向的四会—吴川断裂和广州—恩平断裂(图 6a 标示为恩平—新丰断裂)所围限.本文讨论的测线位于珠江口西侧,莫霍面隆起区位于鼎湖、高明间,上拱高度约 1 km,与尹周勋的东侧测线一致的是隆起区同样为四会—吴川断裂和广州—恩平断裂所围限.

根据《广东省地震构造图集》(2000)以及任镇寰等(2016)研究显示珠三角陆区存在布格重力正异常区,区域以佛山为中心,西到肇庆、东至惠州、南到中山、北至清远,L1 测线以及尹周勋的东侧测线的莫霍面隆起区正好为高重力异常区(图 7).因此,结合重力探测以及珠江口东、西两侧测线结果,可以推断从珠江口西侧的鼎湖、高明一直往北东延伸到珠江口东侧的清远、从化,被 NE 走向的四会—吴川断裂、广州—恩平断裂所围限的区域为可能的连续莫霍面隆起区.地幔物质的密度远大于地壳物质的密度,莫霍面的隆起是造成该区布格重力正异常的主要因素.

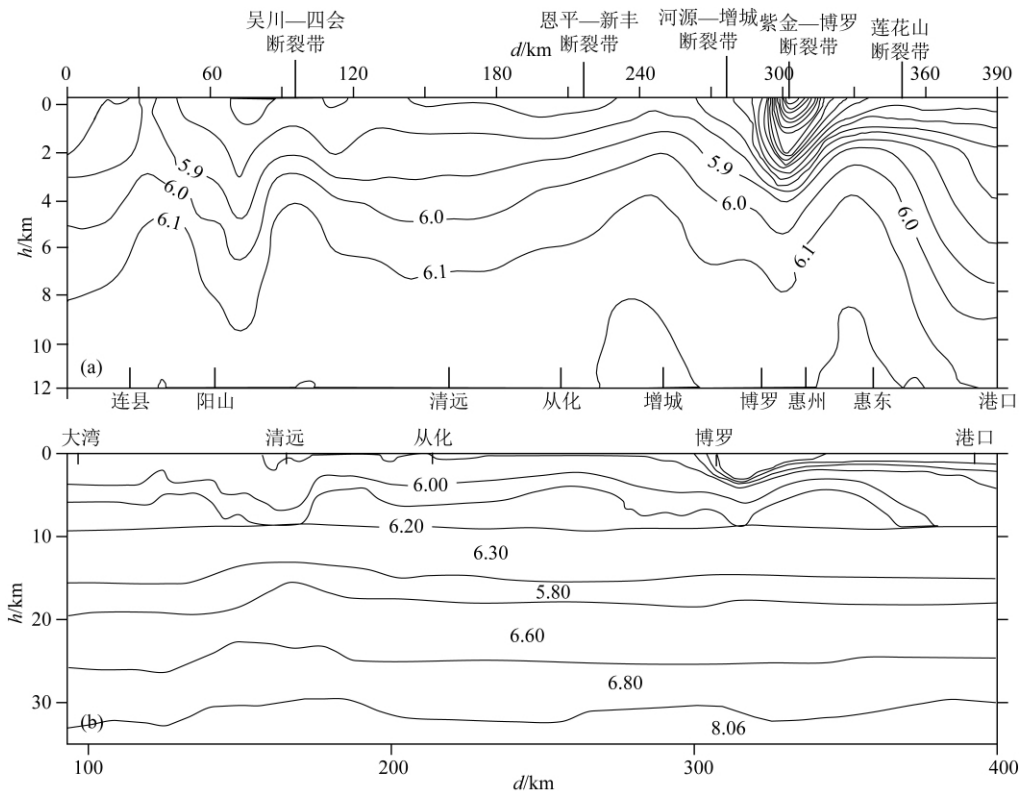


图 6 连县—博罗—港口地壳速度结构图(尹周勋等,1999,数值单位: $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 浅层结构; (b) 深部结构.

Fig. 6 The crustal structure of Lianxian-Boluo-Guangkou profile (Yin et al., 1999)
(a) Shallow crustal structure; (b) Deep crustal structure.

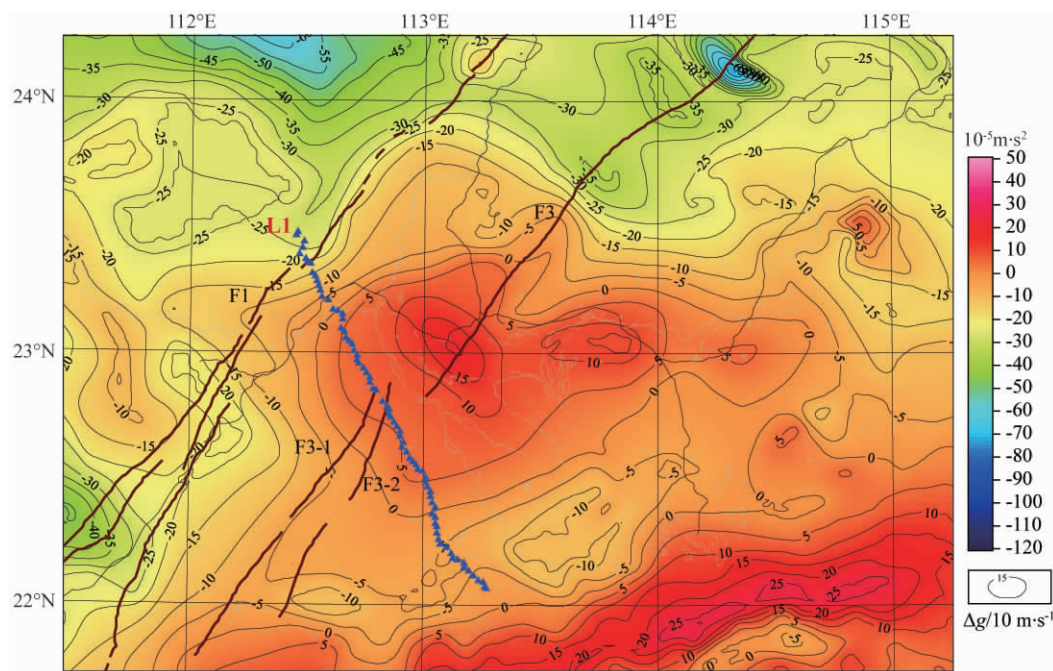


图7 珠江三角洲地区布格重力异常图(任镇寰等,2016,有修改)

Fig. 7 Bouguer gravity anomaly map of the Pearl River Delta (Ren et al., 2016, modified)

(4) 上述莫霍面隆起区域,矿产资料丰富¹⁻²⁾,沿断裂地热资源充足,四会—吴川断裂带上有 20 多处温泉发育,广州—恩平断裂的其中一支佛冈—丰良断裂上有 30 处温泉产出⁶⁾,且隆起区有多个 5 级以上地震的历史记录(魏柏林等,2001),上述现象均与该带上地幔与地壳可能存在的能量与物质的交换有关.任镇寰等(2016)利用重磁资料联合反演华南沿海地区深部断裂系统,在重力、航磁上延 1、3、5、10、20、30 km 不同深度的图件中均能识别出吴川—四会断裂、广州—恩平断裂,且吴川—四会断裂是不同重力、磁场的分界线,布格重力场梯度带在断裂两侧表现为东高西低,航磁沿断裂表现出一条北东向展布的局部磁场异常带.同时,L1 测线剖面显示吴川—四会断裂、广州—恩平断裂所围限的中、下地壳低速异常区正好位于莫霍面隆起区之上.因此,综合上述地震地质、重磁联合解译以及本次测深地震剖面结果,推断吴川—四会断裂、广州—恩平断裂可能为深部物质上涌的主要通道之一,低速区域可能包含有部分熔融物质,这两条 NE 走向的断裂是深达莫霍面、由浅到深贯通的深大断裂.

综上所述,根据获得的珠江口西侧海陆联合深地震探测 L1 测线的速度结构特征,显示沿剖面

莫霍面深度从 NW 向 SE,从 30.0 km 逐渐抬升到 28.0 km,鼎湖至高明间存在莫霍面隆起;进一步刻画了前人提出的华南大陆中地壳低速层在珠江口西侧的细致特征,即低速异常区域在鼎湖、高明间最为显著;并提出了吴川—四会断裂、广州—恩平断裂可能为深部物质上涌的主要通道之一,断裂所围限的从珠江口西侧的鼎湖、高明往北东延伸到珠江口东侧的清远、从化区域为可能的连续莫霍面隆起区.

References

- Cai H T, Jin X, Wang S X, et al. 2016. The crust structure and velocity structure characteristics beneath Ninghua-Datian-Hui'an. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(1): 157-168, doi: 10.6038/cjg20160113.
- Cao J H, Sun J L, Xu H L, et al. 2014. Seismological features of the littoral fault zone in the Pearl River Estuary. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(2): 498-508, doi: 10.6038/cjg20140215.
- Červený V, Popov M M, Pšenčík I. 1982. Computation of wave fields in inhomogeneous media—Gaussian beam approach. *Geophysical Journal International*, 70(1): 109-128.
- Chen E M, Huang Y Y, Su D. 1985. A preliminary study on the earthquake and its tectonic setting in NAN'AO, Guangdong province in 1918. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 5(1): 4-19.
- Chen E M, Huang Y Y. 1989. Characteristics of the seismic damage

6) 中国地质大学地热开发研究所. 2015. 广东省地热(温泉)分布规律.

- and analysis of the seismic structure of the 1605 great earthquake of Qiongzhou, Hainan Island. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 11(3): 319-331.
- Fu G, Shen F L. 2006. A Study on the Strong Aftershocks' Magnitude Parameters of the Qiongsan Macroquake in 1605. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 26(1): 37-46.
- 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* (in Chinese), 57(12): 3896-3906, doi: 10.6038/cjg20141204.
- Li P, Jin X, Wang S X, et al. 2015. Crustal velocity structure of the shaowu-Nanping-Pingtan transect through Fujian from deep seismic sounding-tectonic implications. *Science China Earth Sciences*, 58(12): 2188-2199, doi: 10.1007/s11430-015-5191-6.
- Lin J Z, Liang G H, Zhao Y, et al. 1980. Focal mechanism and tectonic stress field of coastal Southeast China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2(3): 245-257.
- Liu Y X. 1981. Analysis of Fault Structure in South China Coastal Area (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Liu Y X. 1984. The geotectonics of the south china sea and continental margin activation. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 8(3): 209-226.
- Liu Y X. 1985. The active fractures in South China Coast. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 5(3): 13-23.
- Liu Y X, Zhong J Q, Zhan W H. 1994. The basic characteristics of seismic belts and preliminary analyses of regional stability in north continental margin of South China Sea. *South China Journal of Seismology* (in Chinese), 14(4): 41-46.
- Lv Z Y, Qiu X L, Ye C M, et al. 2017. Data processing and phase identification of onshore-offshore 3D seismic exploration in Zhujiangkou area. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 36(3): 80-85, doi: 10.11978/2016076.
- Lv Z Y, Qiu X L, Lv J S, et al. 2018. Crustal structure beneath the east side of Pearl River Estuary from onshore-offshore seismic experiment. *International Geology Review*, doi: 10.1080/00206814.2018.1553114.
- Qin J X, Hao T Y, Xu Y, et al. 2011. The distribution characteristics and the relationship between the tectonic units of the Moho Depth in South China Sea and Adjacent Areas. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(12): 3171-3183, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.017.
- Ren Z H, Ye X W, Huang J T, et al. 2009. Deep faults interpreted by gravity-magnetic data in the pearl river delta region and their neotectonic significance. *Quaternary Research* (in Chinese), 29(3): 625-632.
- Ren Z H, Ye X W, Huang J T, et al. 2016. Deep Fault System and Strong Earthquake Structure in South China Coastal Area (in Chinese). Guangzhou: Guangdong science and Technology Press.
- Seismological Bureau of Guangdong Province. 2000. The Seismotectonic Atlas of Guangdong Province (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Shen Y S, Kang Y, Xu G M. 2013. The crustal thickness and Poisson's ratio distribution in Guangdong and its adjacent areas. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 29(2): 210-218.
- 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* (in Chinese), 30(S1): 45-52.
- 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* (in Chinese), 31(3): 40-47.
- Wei B L, Feng X M, Chen D G, et al. 2001. Seismic activity Characteristics of Southeast Coast (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Wei B L, Sun C C, Qin N G, et al. 2002. Seismic Activity and Prediction in the Pearl River Delta (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Xia S H, Qiu X L, Zhao M H, et al. 2008. Investigation on deep crustal structure along the onshore-offshore seismic profile near Hongkong. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(5): 1389-1397.
- 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* (in Chinese), 29(4): 63-70.
- Xia S H, Lin W, Chen J T, et al. 2012. Layout of portable stations and signal analysis in an onshore-offshore seismic experiment. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 31(3): 48-57.
- Xiong C, Cao J H, Sun J L, et al. 2018. Variation characteristics along the strike of the Littoral fault zone in offshore Pearl River Estuary. *Earth Science* (in Chinese), 43(10): 3682-3697.
- Yin Z X, Lai M H, Xiong S B, et al. 1999. Crustal structure and velocity distribution from deep seismic sounding along the profile of Lianxian-Boluo-Gangkou in South China. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 42(3): 383-392.
- Zhang H N. 1990. Neotectonic Movement and Geological Environment of South China Coast (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Zhang H N, Ji F J, Li Z Q, et al. 1995. A Study on the recent activity along the southern segment of Wuchuang-Sihui fault zone. *Seismology and Geology* (in Chinese), 17(4): 417-426.
- Zhang X, Gong X, Sun J L. 2017. Application of large capacity air gun in three-dimensional crustal structure exploration of the Pearl River estuary area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 69.
- Zhang X, Ye X W, Lv J S, et al. 2018. Crustal structure revealed by a deep seismic sounding profile of Baijing-Gaoming-Jinwan in the Pearl River Delta. *Journal of Ocean University of China*, 17(1): 186-194.
- 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* (in Chinese), 47(5): 845-852.

80-85, 10.11978/2016076.

附中文参考文献

- 蔡辉腾, 金星, 王善雄等. 2016. 宁化—大田—惠安地壳构造与速度结构特征. *地球物理学报*, 59(1): 157-168, doi: 10.6038/cjg20160113.
- 曹敬贺, 孙金龙, 徐辉龙等. 2014. 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, doi: 10.6038/cjg20140215.
- 陈恩民, 黄詠茵, 苏丹. 1985. 一九一八年广东南澳大地震及其发震构造背景的初步探讨. *华南地震*, 5(1): 4-19.
- 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. *地震学报*, 11(3): 319-331.
- 符干, 沈繁奎. 2006. 1605年琼州大地震强余震震级参数的研究. *华南地震*, 26(1): 37-46.
- 广东省地震局. 2000. 广东省地质构造图集. 北京: 地震出版社.
- 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, doi: 10.6038/cjg20141204.
- 李培, 金星, 王善雄等. 2015. 福建邵武—南平—平潭深地震测深剖面的地壳速度结构及其构造意义. *中国科学: 地球科学*, 45(11): 1757-1767.
- 林纪曾, 梁国昭, 赵毅等. 1980. 东南沿海地区的震源机制与构造应力场. *地震学报*, 2(3): 245-257.
- 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. 1984. 南海大地构造与陆缘活化. *大地构造与成矿学*, 8(3): 209-226.
- 刘以宣. 1985. 华南沿海的活动断裂. *海洋地质与第四纪地质*, 5(3): 13-23.
- 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.
- 吕作勇, 丘学林, 叶春明等. 2017. 珠江口区域海陆联合三维地震构造探测的数据处理与震相识别. *海洋地球物理学*, 36(3): 80-85, 10.11978/2016076.
- 秦静欣, 郝天挑, 徐亚等. 2011. 南海及邻区莫霍面深度分布特征及其与各构造单元的关系. *地球物理学报*, 54(12): 3171-3183, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.017.
- 任镇寰, 叶秀薇, 黄剑涛等. 2009. 珠江三角洲地区重磁资料解释的深部断裂及其新构造意义. *第四纪研究*, 29(3): 625-632.
- 任镇寰, 叶秀薇, 黄剑涛等. 2016. 华南沿海地区深部断裂系统与强震构造. 广州: 广东科技出版社.
- 沈玉松, 康英, 徐果明. 2013. 广东及其邻域的地壳厚度和泊松比分布. *中国地震*, 29(2): 210-218.
- 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.
- 魏柏林, 冯绚敏, 陈定国等. 2001. 东南沿海地震活动特征. 北京: 地震出版社.
- 魏柏林, 孙崇赤, 秦乃岗等. 2002. 珠江三角洲地震活动及预测研究. 北京: 地震出版社.
- 夏少红, 丘学林, 赵明辉等. 2008. 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.
- 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. *海洋地球物理学*, 29(4): 63-70.
- 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*, 2018, 43(10): 3682-3697.
- 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.
- 张虎男. 1990. 华南沿海新构造运动与地质环境. 北京: 地震出版社.
- 张虎男, 计凤桔, 李子权等. 1995. 四会—吴川断裂南段近期活动性研究. *地震地质*, 17(4): 417-426.
- 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): 845-852.

(本文编辑 汪海英)