

田轶, 张华美, 李冬雅, 等. 海南地区一维速度模型的研究[J]. 华南地震, 2018, 38 (3): 119-129. [TIAN Yi, ZHANG Huamei, LI Dongya, et al. Research on 1D velocity model in Hainan area[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(3): 119-129]

海南地区一维速度模型的研究

田 轶, 张华美, 李冬雅, 洪 流, 潘朱耀
(海南省地震局, 海口 570203)

摘要: 为了使最终确立的海南地区地壳一维速度最优模型符合区域地质构造特征, 将研究的焦点放在海南地区一维速度模型上, 应用拟合、折合走时、滑动窗拟合及区间稳定性等方法对地震震相进行提取和分析, 并根据近年来地震编目报告中的数据, 采用 Hyposat 定位法, 在初始模型基础上修正, 佐证了最优模型的适应性和准确性, 获得了更适合于海南地区地壳结构的一维速度模型, 为最优模型的确立奠定了基础。

关键词: 一维速度模型; 折合走时; Hyposat 定位法

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)03-0119-0

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.03.018

Research on 1D velocity model in Hainan area

TIAN Yi, ZHANG Huamei, LI Dongya, Hong Liu, Pan Zhuyao
(Hainan Earthquake Agency, Haikou 570203, China)

Abstract: The 1 D velocity plays an indispensable role in the seismic location. This paper aims at studying the 1 D velocity model in Hainan area based on the method of fitting, sliding window fitting, reduced travel time and interval stability to extract and analyze the seismic phase. According to the recent reports of the seismological cataloging, the paper updates the old model on the basis of the initial model by adopting the Hyposat positioning method. Thus the adaptability and accuracy of the optimal model are confirmed and a more suitable 1 D velocity is obtained, which laid the foundation for the establishment of the optimal model.

Keywords: The 1 D crustal velocity model; Reduced travel time method; Hyposat positioning method

收稿日期: 2018-07-15

作者简介: 田 轶(1986-), 男, 助理工程师, 主要从事地震监测方面研究。

E-mail: 21347266@qq.com.

通信作者: 陈祥开(1985-), 男, 工程师, 主要从事地震监测、地震波分析, 地壳反演等方面研究。

E-mail: xiang.kai.chen@qq.com.

0 引言

海南在地质上处于板块构造学说所揭示的太平洋板块、欧亚板块、澳-印板块的交汇处,地壳活动十分活跃。自地质史上的中元古代以来,经历了中岳运动、晋宁运动、加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动、喜马拉雅运动和第四纪冰川活动等地质构造运动,造成雷琼之间多次发生断陷,使海南岛与大陆分离,成为位于南中国海北部大陆架上的“大陆型岛屿”,并分别留下各自的构造形态。海南地质遗迹主要类型有海蚀地貌、火山活动、矿泉活动、构造剥蚀、岩溶洞及石林等 6 类。历史上的火山喷发,在海南岛留下了许多死火山口。最为典型的是位于海口市琼山区的石山,石山有海拔 200 多米的双岭,岭上有 2 个火山口^[1-2]。

地震的定位依赖于地壳的一维速度模型,在此之前海南地区使用华南地壳模型进行定位,虽然范玉兰等^[3]利用华南地区大量天然地震和人工爆破资料研究得到华南模型,然而由于海南岛陆区域四面环海的特殊性,华南地壳模型跟实际地壳结构仍存在差异。黄海波等^[4]在研究海南岛地区的地壳厚度和泊松比分布时,应用海南岛固定地震台站记录到的远震接收函数波形,通过在地壳厚度和波速比域对壳一幔间断面的 ps 转换波及其多次波震相进行振幅叠加,同时参考人工地震探测结果,研究结果海南岛地区地壳厚度为 26~31 km。综合前人研究成果,为得出海南岛地区最优模型,提供了参考依据^[3-6]。为了使最终确立的海南地区地壳一维速度最优模型符合区域地质构造特征,需要检验现有的华南模型,确定初始模型,为本区域的最优模型的建立奠定基础。

1 资料的选取和预处理

1.1 本区域地震资料的概况和资料的选取情况说明

筛选资料遵循以下条件执行:①从国家地震信息数据库截取 2009 年 01 月 01 日至 2014 年 10 月 31 日的地震;②震级 M_L 1.5~6.0 的范围;③由 10 个台站记录到的地震事件,并做了分析编目入库,符合条件的地震数为 145 次;④重新筛选在海南省岛内或者附近海域的地震事件(含爆破事件),符合条件的地震数为 79 次;⑤重新筛选 80%台站有记录到的地震事件(含爆破事件),仅剩余 19 次符合。台站记录数 N 越多,说明地震定位

就会越好,但是,考虑到地震的分布均匀性,能更好的反应本区域的速度模型,因此, $N \geq 10$ 个台站记录到的地震资料,可以作为初始模型的基础资料,在分析资料时,发现所有的地震资料并没有 pb 震相,考虑到后面还需要对 V_{pb} 的调整,同时 pn 的震相偏少,因此重新对 79 件原始地震事件进行了震相分析,最终从 79 次地震事件中挑选了 55 次地震事件。

对 $N \geq 10$ 个台站以上记录到的 55 次地震事件(含爆破事件)进行震相统计,统计如表 1 所示。

表 1 不同震级档下 55 次地震震相记录数据统计
Table 1 The statistics of 55 seismic phase records under different magnitude

震级/ M_L	pb	pn	pmp	pg	sn	sg
1.5~2.0	1	26	2	182	9	178
2.1~2.5	28	65	4	224	10	241
2.6~3.0	12	47	6	174	4	176
3.1~3.5	9	50	1	133	24	131
3.6 以上	4	51	0	79	7	79
总数	57	239	14	806	54	805

1.2 本区域地震波观测走时曲线

基于华南速度模型($V_{pg}=6.01$ km/s; $V_{pb}=6.88$ km/s; $V_{pn}=7.98$ km/s; $h_1=21.4$ km; $h_2=11$ km), 筛选 $N \geq 10$ 个台站有记录的地震事件,使用 MSDP 软件对所有的事件进行重新震相分析,并使用相关软件分别提取 pg、pn、pb 震相数据,生成 3 个震相文件 pb.txt、pg.txt 和 pn.txt 文件,用于拟合走时曲线分析,计算得到理论折合走时和实际折合走时:

$$T_z = T_L - (\Delta \times V) \quad (1)$$

式(1)中: T_z 为折合走时; T_L 为理论走时; Δ 为震中距; V 为波速。

根据式(1)分析海南的 V_{pb} 、 V_{pg} 和 V_{pn} 的观测曲线,拟合出的 V_{pg} 速度为: 6.10 km/s, V_{pb} 速度为: 6.54 km/s, V_{pn} 的速度为: 7.86 km/s, 其地震波观测走时曲线如图 1 所示。

1.3 本区域初始地壳速度模型的确定

在台网实际工作中,速报和编目,使用的模型均为华南速度模型,按照国家台网的规定,不考虑台站记录地震事件包裹性的情况下,地震编目中地震定位残差达到最小(误差允许范围内)、则得出震源深度的测定应较合理。为了使最终确立的海南地区地壳一维速度最优模型符合区域地质构造特征,需要检验现有的华南模型,故将其

确定初始模型。

使用“速度拟合、折合走时”方法得到上地壳速度 V_{pg} 、莫霍面速度 V_{pn} 、上地壳厚度 h_1 、下地壳厚度 h_2 和不同震源深度速度拟合对比,以此来检验华南模型的适用性。

由于从国家数据库下载的资料里没有 pb 的震相数据,需要人工标注了一些 pb 震相,最终统计 pg 震相 806 个、pb 震相 57 个、pn 震相 239 个,使用最小二乘法拟合走时-震中距关系,可以得到速度拟合曲线。具体操作如下:首先以华南模型为基础,对 pg、pb、pn 震相进行折合走时拟合;其次通过看观测资料与理论资料的差别情况,恰当地调整 V_{pb} 、 V_{pg} 和 V_{pn} 的速度,以及上地壳厚度 h_1 和下地壳厚度 h_2 的值;最后得出的模型,可以作为初始模型结果。如下图 1 所示,pg 的走时曲

线斜率近似等于上地壳波速 V_{pg} ,通过速度拟合,得到 $V_{pg}=6.10$ km/s, $V_{pb}=6.54$ km/s, $V_{pn}=7.86$ km/s。对比华南模型, V_{pg} 变化了 0.09 km/s、 V_{pb} 变化了 0.34 km/s、 V_{pn} 变化了 0.12 km/s。为了进一步优化初始模型,需要再进一步对 80% 台站有记录的地震事件进行速度拟合,发现 $V_{pg}=6.17$ km/s, $V_{pb}=6.46$ km/s, $V_{pn}=7.86$ km/s, V_{pg} 变化了 0.07 km/s, V_{pb} 变化了 0.08 km/s, V_{pn} 基本没变化,从两个拟合结果来看,均可作为基础资料进行分析,但是考虑到 80% 以上的资料大部分都是分布在网缘,而 $N \geq 10$ 个台站以上记录的资料分布更加均匀,合理,况且 $N \geq 10$ 个台站以上记录的资料,pg、pn 等震相会明显比 80% 台站记录的资料多,可以认为,选择初始模型的基础资料是 $N \geq 10$ 个台以上记录的地震资料(含爆破)。

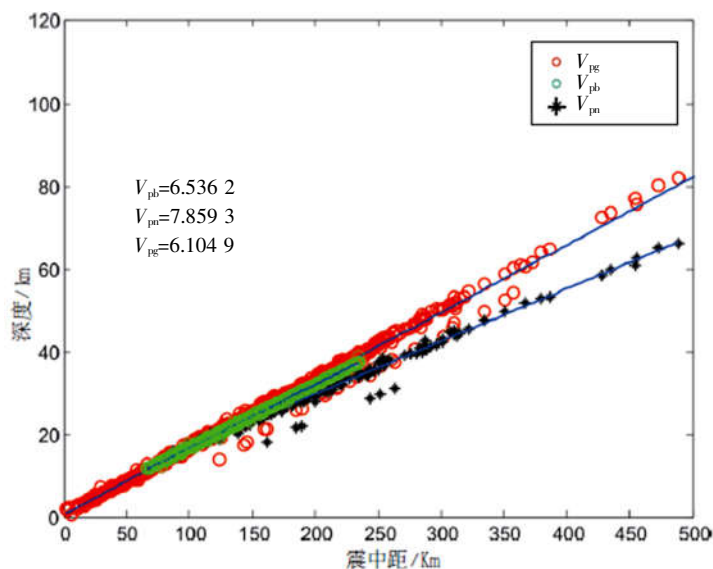


图1 拟合速度的曲线

Fig.1 The curve of fitting speed

根据“折合走时=理论走时-(震中距/波速)、实测折合走时=实际走时-(震中距/波速)”的方法,使用上述的 pg、pn 数据,计算得出 $N \geq 10$ 个台站以上记录到的理论折合走时和实际折合走时对比曲线,横轴表示震中距,纵轴表示时间,蓝色表示 V_{pg} 的理论值,红色表示 V_{pb} 的理论值,绿色表示 V_{pn} 的理论值,小圆点表示的是观测的数据,从图中可以看到,pg、pn 的观测数据基本都在理论直线上,pb 的观测数据有些偏下,需要对模型进行调整,如图 2 所示。

考察 V_{pg} 、 V_{pb} 和 V_{pn} 在不同震源深度下,速度拟合曲线中实际走时曲线与理论走时曲线的拟合

情况。由于海南岛内以及周边海域地震震源深度大部分集中在 6~20 km 期间,因此,分别选择了震源深度为 $h=5$ km、 $h=10$ km、 $h=15$ km、 $h=20$ km 四档,对理论走时曲线和实际走时曲线进行拟合,以便评估实际值。四档深度拟合曲线如下图 3 所示,横轴表示震中距,纵轴表示时间,蓝色直线表示 V_{pg} 的理论值,红色直线表示 V_{pb} 的理论值,绿色直线表示 V_{pn} 的理论值。

1.4 滑动窗拟合及区间稳定性分析

pn、pg、sn、sg 四种震相随区域范围增大的速度变化、在不同区域范围内的速度变化情况(见表 2)。

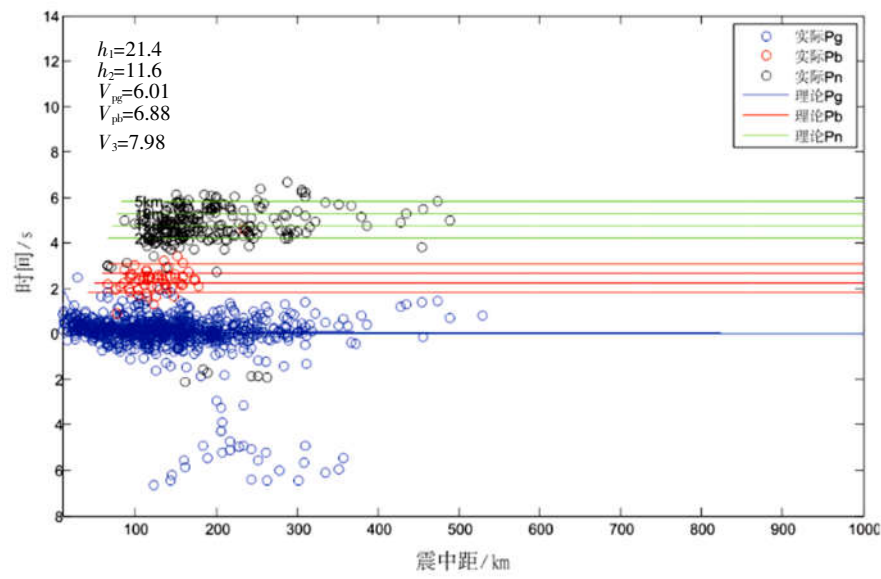


图 2 理论折合与实际折合走时曲线对比图

Fig.2 The travel time curve comparison between the theory and the actual

表 2 V_{pb} 、 V_{pn} 、 V_{pg} 、 V_{sn} 和 V_{sg} 随区域范围、以及不同区域的变化情况

Table 2 The changes of V_{pb} 、 V_{pn} 、 V_{pg} 、 V_{sn} 、 V_{sg} regional and regional variations

区域范围/km	变化情况	V_{pg}	V_{pb}	V_{pn}	V_{sg}	V_{sn}
50~150	速度	6.10	6.73	7.21	3.62	3.94
	个数	385	45	69	391	12
	误差	0.75	0.44	0.56	1.00	0.44
50~200	速度	6.10	6.70	7.57	3.61	3.95
	个数	560	56	154	565	27
	误差	0.82	0.44	1.11	1.03	1.16
50~250	速度	6.17	6.54	7.88	3.62	4.34
	个数	648	57	192	651	40
	误差	1.00	0.49	1.15	1.08	1.35
50~300	速度	6.14	6.54	7.97	4.36	3.60
	个数	692	57	214	695	42
	误差	1.07	0.49	1.28	1.16	1.46
50~350	速度	6.16	6.54	7.84	3.60	4.36
	个数	720	57	229	723	46
	误差	1.16	0.49	1.26	1.22	1.46
100~200	速度	6.14	6.72	7.76	3.63	4.01
	个数	387	43	148	388	26
	误差	0.94	0.44	1.11	1.10	1.17
150~250	速度	6.32	6.00	8.31	3.62	4.60
	个数	263	12	123	260	28
	误差	1.28	0.51	1.34	1.18	1.32
200~300	速度	5.83	6.19	8.21	3.48	4.43
	个数	132	1	60	130	15
	误差	1.76		1.61	1.55	1.59
250~350	速度	6.25		6.75	3.69	6.24
	个数	63		33	63	4
	误差			1.75	2.19	2.01

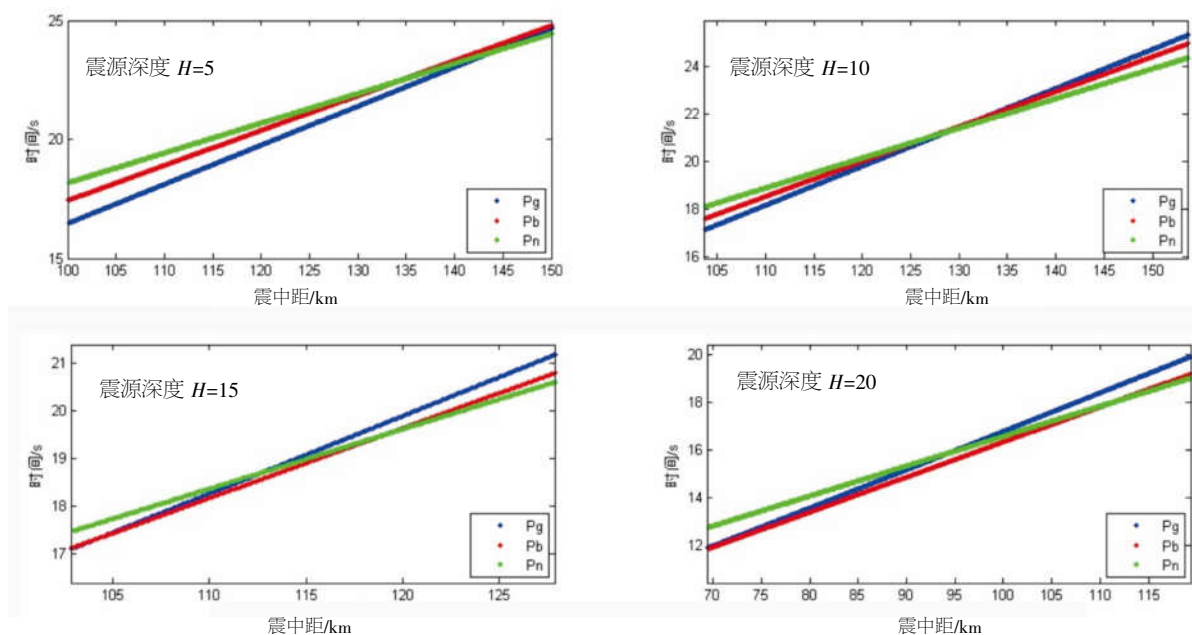


图3 初始模型下四档深度拟合的曲线图

Fig.3 The under the depthfitting diagram under the initial model

(1) 区域范围增大时的变化。对于 V_{pg} , 当 $\Delta=50\sim150$ km 和 $\Delta=50\sim200$ km 时, V_{pg} 均为 6.10 km/s, 当 $\Delta=50\sim250$ km 时, V_{pg} 最大值为 6.17 km/s, 当 $\Delta=50\sim300$ km 时, 使用震相数最多, 其值为 6.14 km/s; 对于 V_{pb} , 当 $\Delta=50\sim150$ km 和 $\Delta=50\sim200$ km 时, V_{pb} 值分别为 6.73 km/s 和 6.70 km/s, 之后, V_{pb} 值趋于稳定, 都为 6.54 km/s, 但是到了 200 km 以后, V_{pb} 值不准确。对于 V_{pn} , 当 $\Delta=50\sim150$ km 时, 为最小值 $V_{pg}=7.21$ km/s, 当 $\Delta=50\sim300$ km 时, 为最大值 $V_{pn}=7.97$ km/s; 对于 V_{sg} , 也在 Δ 的变化过程中比较稳定, 唯一波动的期间值为 4.36 km/s; 对于 V_{sn} , 当 $\Delta=50\sim300$ km 时为最小值 $V_{sn}=3.60$ km/s, 当 $\Delta=50\sim350$ km 时, 最大值 $V_{sg}=4.36$ km/s。

(2) 在不同区域范围内的变化。对于 V_{pg} , 当 $\Delta=200\sim300$ km 时, V_{pg} 速度最小为 5.83 km/s, 当 $\Delta=150\sim250$ km 时, V_{pg} 最大值为 6.32 km/s, 当 $\Delta=100\sim200$ km 时, 使用震相数最多, 其值为 6.14 km/s; 对于 V_{pb} , 当 $\Delta=50\sim150$ km 时, V_{pb} 值最大, 为 6.73 km/s, 之后 V_{pb} 值随变化变小。对于 V_{pn} , 当 $\Delta=50\sim150$ km 时, 为最小值 $V_{pg}=7.21$ km/s, 当 $\Delta=50\sim300$ km 时, 为最大值 $V_{pn}=7.97$ km/s; 对于 V_{sg} , 在 $\Delta=50\sim150$ km 时, V_{sg} 值为 4.36 随着 Δ 的变化, 波动范围较小, 变化相对稳定; 对于 V_{sn} , 当 $\Delta=50\sim300$ km 时, 为最小值 $V_{sn}=4.34$ km/s, 当 $\Delta=250\sim400$ km 时达到最大值 $V_{sn}=4.72$ km/s。

(3) 在不同区域范围内的变化。对于 V_{pb} , 当 $\Delta=150\sim350$ km 时, V_{pb} 最小值为 5.88 km/s, 当 $\Delta=50\sim250$ km 时, V_{pb} 最大值为 6.56 km/s, 到了 200 km 以后 V_{pb} 值不准确。对于 V_{pn} , 当 $\Delta=250\sim450$ km 时, 为最小值 $V_{pg}=7.50$ km/s, 当 $\Delta=100\sim300$ km 时, 为最大值 $V_{pn}=8.10$ km/s; 对于 V_{pg} , 当 $\Delta=250\sim450$ km 时, V_{pg} 最小值为 6.02 km/s, 当 $\Delta=50\sim250$ km 时, V_{pg} 最大值为 6.19 km/s。 V_{sg} 和 V_{sn} 的波动范围较小, 变化相对稳定。

1.5 剔除离散数据

(1) 排除 $N\geq 10$ 个的 55 次地震的离散数据通常采用如下方式, 对这些数据进行多项式拟合得到多项式的新的因子 b , 再对使用新因子 b 进行新的拟合, 得到新的 y 值, 新的 y 值与原来拟合的 y 值之间的差, 就是要排除的数据范围, 根据原始数据的离散情况, V_{pn} 取小于 4 s 的范围, V_{pg} 取小于 3 s 的范围, V_{pb} 取小于 2 s 的范围, 即可排除离散数据。

(2) 剔除离散数据后进行线性拟合, 拟合结果见图 4: $V_{pg}=6.02$ km/s, $V_{pb}=6.54$ km/s, $V_{pn}=7.67$ km/s, 相比华南模型, V_{pg} 增加了 0.01 km/s, V_{pb} 减少了 0.34 km/s, V_{pn} 减少了 0.31 km/s。观测数据基本在理论直线上。

因此, 确定海南区域速度模型的初始模型如表 3 所示。

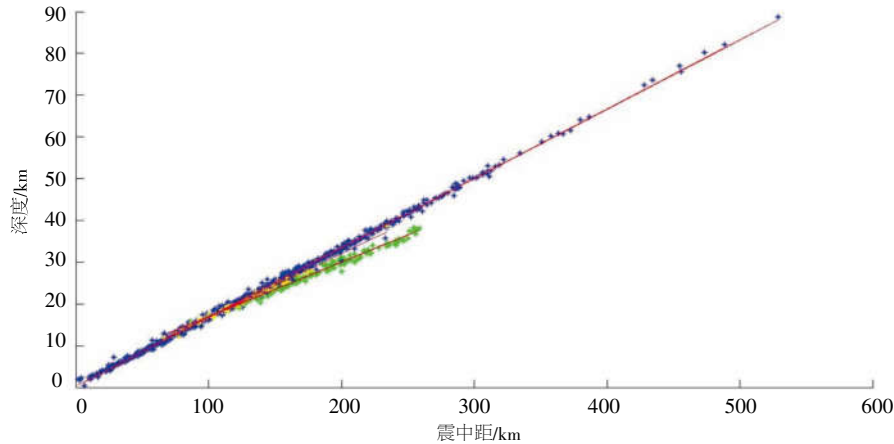


图 4 剔除离散数据后的拟合曲线图

Fig.4 The fitting curve after eliminating the scattered data

表 3 海南区域速度初始模型

Table 3 The initial velocity model in Hainan

速度/(km·s ⁻¹)	厚度/km
$V_{pg}=6.02$	$h_1=21.4$
$V_{pb}=6.54$	
$V_{pn}=7.67$	$h_2=11$

2 区域速度模型的建立

2.1 本区域地壳速度模型认定的原则

本区域地壳速度模型认定原则如下：

- (1) 以华南模型为基础，对 55 次地震事件(含爆破)进行 Hyposat “批处理”，重新定位，定位的结果，会产生平均误差 RMS 和新的定位结果。
- (2) 对华南模型定位出的新震中距，与编目报告里的震中距，进行比较分析，若 55 次地震中，它们之间的震中距差，大部分地震能在 5 km (5 km 以内的精度属于一类精度) 以内，则说明对 55 次地震事件采用 Hyposat 定位是有效的定位方法，也说明了 Hyposat 可以适用于本区域的其它地壳速度模型的定位。
- (3) 以本区域初始模型为基础，重复第(1)条的做法，同样产生平均误差 RMS 和新的定位结果。可以通过迭代多次，来调整各层的速度和莫霍深度，寻找出平均误差小于华南模型的那一组。一般认为平均误差小于华南模型下，未必所有的模型都符合本区域的模型，需要结合物理性质，比如速度在各层的变化是随深度变化而变化的。
- (4) 根据第(3)条原则，那么最优模型的确认是：选取误差 RMS 小于华南模型的模型并且符合物理意义的那一组，即为最优模型。

2.2 用地震批处理测定方法重新迭代初始模型

根据上一节的相关速度的稳定性分析以及初始速度模型，可以明确各层速度的范围，以及上地壳深度 h_1 和 h_2 的范围，使用迭代的方式进行批处理，便于寻找最优模型，具体如下：

第一次迭代：① V_{pg} 取 6.0~6.2 km/s，步长取 0.1；② V_{pb} 取 6.6~6.9 km/s，步长取 0.1；③ V_{pn} 取 7.7~8.0 km/s，步长取 0.1；④ h_1 取 20~22 km，步长取 1；⑤ h_2 取 30~33 km，步长取 1。

迭代批处理后的模型为： $V_{pg}=6.10$ 、 $V_{pb}=6.80$ 、 $V_{pn}=7.90$ 、CONR=20.00、MOHO=31.00、RMS=0.269。

第二次迭代：① V_{pg} 取 6.00~6.10 km/s，步长取 0.01；② V_{pb} 取 6.80~6.90 km/s，步长取 0.01；③ V_{pn} 取 7.8~8.0 km/s，步长取 0.01；④ h_1 取 20~22 km，步长取 1；⑤ h_2 取 31~33 km，步长取 1。

迭代批处理后的模型为： $V_{pg}=6.00$ 、 $V_{pb}=6.84$ 、 $V_{pn}=7.97$ 、CONR=21.00、MOHO=30.00、RMS=0.267。

在迭代初始模型之前，先对华南模型进行了批处理，批处理的结果是： $V_{pg}=6.01$ 、 $V_{pb}=6.88$ 、 $V_{pn}=7.98$ 、CONR=21.40、MOHO=32.40、RMS=0.300。

将以上结果做成一张表，看起来会比较直观，如表 4 所示：第一次迭代初始模型后的结果，比华南模型的残差稍微好一点，接下来以第一次迭代的结果为基础，进一步优化迭代的结果，从迭代结果中选择一组残差比华南模型的残差好，并且符合物理意义。因此，可以暂时认为第二次迭代的结果为本区域的最优模型。需要对最优模型、华南模型以及编目报告的结果，比对它们的震中距差，进而确定最优模型，如下 5 表所示。

表 4 两次迭代结果与华南模型批处理各层速度比较表

Table 4 Comparison of the results of two iterations and the South China model batch processing speed

类型	V_{pg}	V_{pb}	V_{pn}	CONR	MOHO	RMS
第一次迭代	6.10	6.80	7.90	20	31	0.269
第二次迭代	6.00	6.84	7.97	21	30	0.267
华南模型	6.01	6.88	7.98	21.4	32.4	0.300

表 5 海南区域速度最优模型

Table 5 The optimal velocity model in Hainan

速度/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	厚度/km
$V_{pg}=6.00$	$h_1=21$
$V_{pb}=6.84$	
$V_{pn}=7.97$	$h_2=9$

2.3 模型的选取和误差分布

根据本区域模型确定的原则，模型通过批处理后，残差小于华南模型，且符合物理意义的，则为最优模型，最优模型的优势除了比较它们之间的平均残差外，还可以通过震中差的比较。同样的地震资料，通过震中差在 2 km、5 km、10 km 以内占的比重，进一步说明该模型有优势。基于上述思路，比较的结果分析如下：① 华南模型与最优模型的震中距差结果，2 km 以内占到 94.5%，这说明两个模型在定位 55 次地震的数据是同一个

地震事件；② 华南模型与编目报告的震中距差结果，2 km 以内占到 58.2%，5km 以内占到 89.1%，最优模型与编目报告的震中距差结果，2km 以内占到 60.0%，5km 以内占到 90.9%，说明最优模型比华南模型更接近本区域的地壳模型。如下图 5 给出的是三个震中距差的比较图，图中横坐标表示地震序列，纵坐标表示残差量，三种不同的颜色代表不同的震中差值,橙色代表最优模型与编目报告的震中差，蓝色代表华南模型与编目报告的震中差，黑色代表最优模型与华南模型的震中差

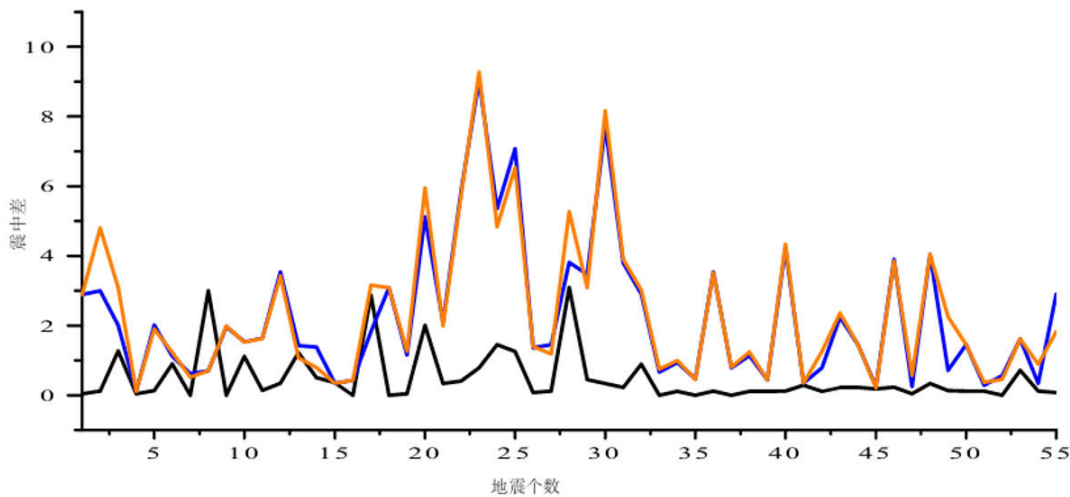


图 5 三个震中距差比较图

Fig.5 The comparison diagram of three epicentral distance

3 区域速度模型的检验

3.1 区域速度模型检验的说明

检验最优模型在海南岛及周边海域地区的适用性、准确性，本项目拟采用 3 种方法对最优模型进行检验。

(1) 人工爆破结果。根据台网记录到的 2 次大爆破，对这 2 次大爆破进行重新标注，取 2 次爆破拟合的速度均值与最优的速度模型比较，检验它们之间误差大小。

(2) PTD 程序。PTD 方法是使用初至波为 PG 直达波和初至波为 PN 首波到时，经转换后的到时间来确定地震深度。该方法使用的台网台站较多、初至震相读数精度高、直达波和首波射线路径差异大、莫霍界面速度较稳定、原理简单而且易求的优点^[7-8]。

(3) 检验结果对比分析。主要根据确定最优模型的过程中，模型之间的比较，并对其进行分析。

3.2 用爆破资料检验区域地壳速度模型

为了验证最优模型，需要重新标注爆破震相，

2009年9月28日16点37分爆破,共记录到pg到时14个,pn到时4个;2010年2月4日19时29分爆破,共记录到pg到时21个,pn到时7个。两次爆破均无精确的发震时刻,也无清晰的pb震相。为了得到 V_{pg} 和 V_{pn} 值,进行了如下拟合:①2009年9月28日16点37分爆破,使用到

时减去16点37分00秒得到时间差,再将这个时间差与震中距拟合,得到这次爆破的地壳波速 V_{pg} 和莫霍面波速 V_{pn} ;②2010年2月4日19时29分爆破,使用到时减去19点29分00秒得到时间差,再将这个时间差与震中距拟合,得到此次爆破的上地壳波速 V_{pg} 和莫霍面波速 V_{pn} (图6)。

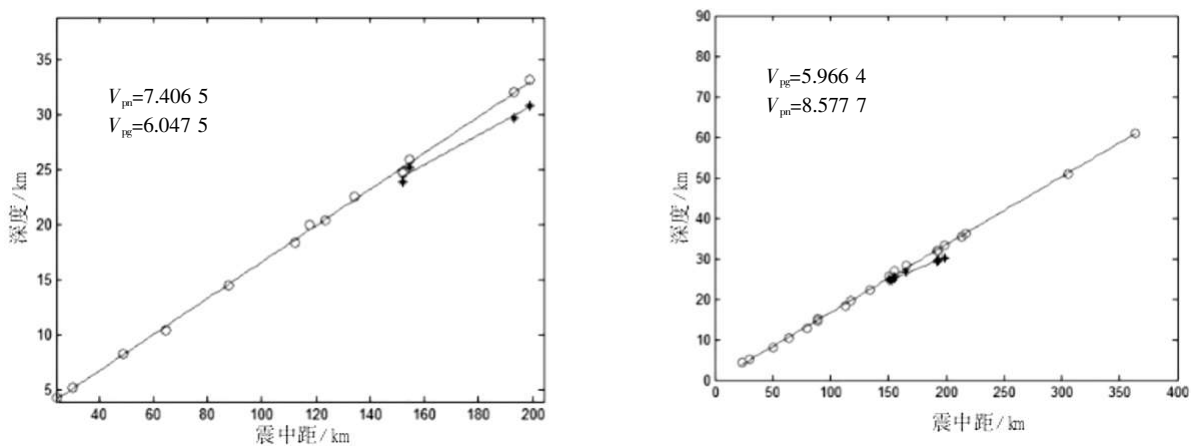


图6 两次爆破拟合PG和PN速度图
Fig.6 The PG and PN fitting diagram in two blasting

分析图6可得,2009年9月28日爆破速度拟合结果为 $V_{pg}=6.05$ km/s, $V_{pn}=7.41$ km/s;2010年2月4日爆破速度拟合结果为 $V_{pg}=5.96$ km/s, $V_{pn}=8.58$ km/s。均值为 $V_{pg}=6.00$ km/s, $V_{pn}=7.99$ km/s

表6给出了最优模型与爆破对比结果:①对于 V_{pg} ,最优模型与爆破结果差值相同;②对于 V_{pn} ,最优模型与爆破结果差值为0.02 km/s;③佐证了最优模型是符合海南区域的地壳模型。

表6 最优模型与爆破结果对比

Table 6 The comparison between optimal model and blasting			
速度	最优模型/(km/s ⁻¹)	爆破均值/(km/s ⁻¹)	差值/(km/s ⁻¹)
V_{pg}	6.00	6.00	0.00
V_{pn}	7.97	7.99	0.02

3.3 PTD方法检验区域地壳速度模型

pn-pg法较其它常规定位方法的优势在于,对震源深度更敏感。主要原因为:①拾取到时较其他震相精准,由于是初至震相,对应 M_L 2.5以上的网内地震,初至震相的信噪比都较高。一般地,pg拾取误差小于0.5 s,pn拾取误差小于1 s。②pn、pg震相离源射线上下方向相反,对震源深度扰动的变化较同向的震相(如pg、sg)敏感。③计算方便快捷。

以2011年11月27日的地震事例来说明PTD的使用情况:

此地震pg震相共计31个,pn震相共计25个,其中pg震中距最近的台站有160.1 km,最远的台站震中距有494.8 km,pn震中距最近的台站有160.1 km,最远的台站震中距有494.8 km,根据样本数 $N=pg$ 震相个数 \times pn震相个数,因此 $N=775$ 个。输入最优模型参数,不做任何的调整和处理,得出的结果,深度为14.5 km,如图7(a)所示。

为了让样本数更有效地发挥作用,这里需要调整一下走时残差和深度误差,此处剔除走时残差 $\Delta T \geq 0.1s$,深度误差 $\Delta h \geq 1km$ 的样本,样本数 $N=547$ 个,结果深度为12.3 km,如图7(b)所示。使用PTD程序,对55次地震进行批处理,检验模型的可靠性。针对模型的各个参数进行调整:① h_1 和 h_2 ,按 ± 0.5 km调整;② V_1 和 V_2 按 ± 0.1 km/s调整;③剔除大的走时残差和深度误差。经过调整和剔除数据后,使得最终结果保持有效样本数量最大,并且得到较好图形结果,高斯分布的顶点和最大值符合。

图8给出了2010年2月25日、2010年2月4日2个地震PTD结果图,其中2010年2月4日是爆破事件,因此它不是高斯分布图。

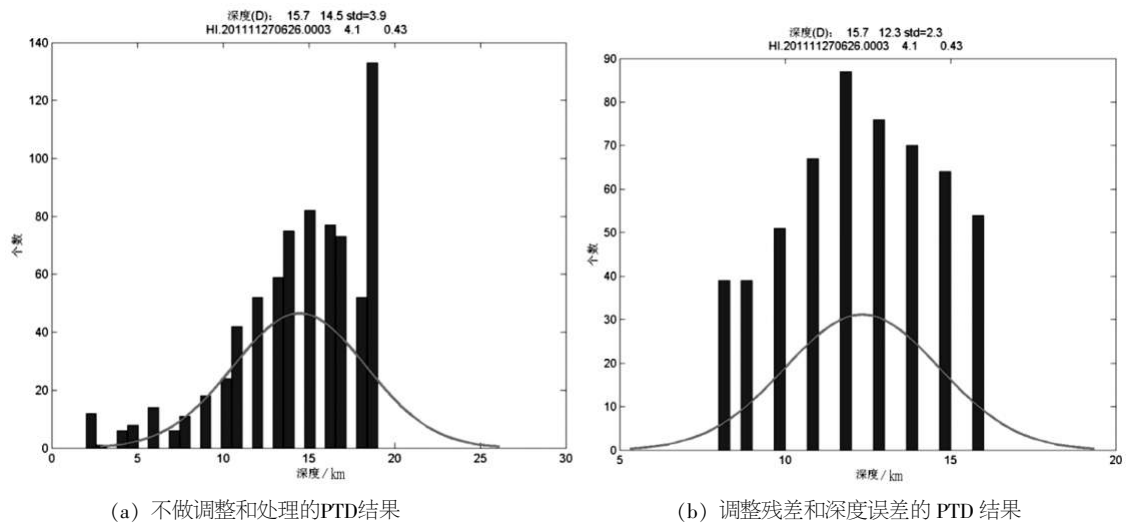


图 7 PTD 不同结果对比
Fig.7 Different results of PTD

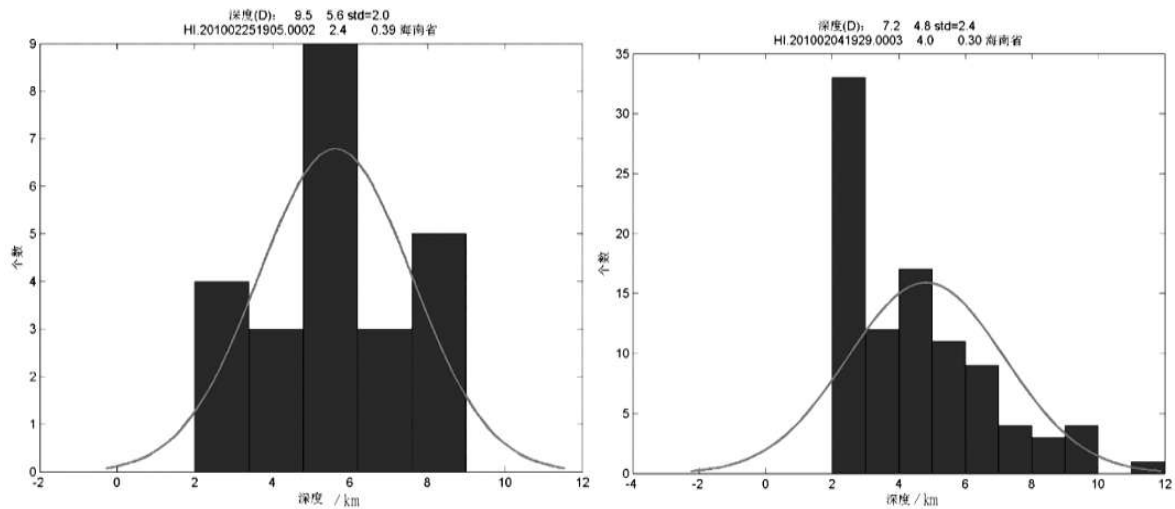


图 8 PTD 使用最优模型定位得出的图
Fig.8 The diagram of PTD location with optimal model

3.4 检验结果对比分析

采用 Hyposat 批处理的 55 次地震, 定位中使用 pn 震相 239 个、pg 震相 830 个, 共计 818 个台站的数据, 最终获得了华南模型与最优模型的震中差 D_1 、编目报告与最优模型的震中差 D_2 、编目报告与华南模型的震中差 D_3 。

(1) 华南模型与最优模型的比较。基于 Hyposat 批处理软件, 依据两点间距离公式, 通过华南模型与最优模型定位震中差 D_1 的对比, 为分析最优模型的检验结果作铺垫。

由图 9 可知, 华南模型与最优模型的震中距差 $D_1 \geq 2$ km 只有 3 个地震事件, 因此可以认为两组模型定位的数据是一致的, 那么它们分别与编目报告的震中差结果, 即可佐证哪个模型会更好

一些。

(2) 华南模型、最优模型分别与编目报告的比较基于最优模型, 使用 Hyposat 方法对 55 次地震定位, 其定位震中结果与编目报告定位震中结果对比, 得到两种模型的震中差 D_2 分布(图 10)。同理, 可以得出华南模型定位震中结果与编目报告定位震中结果对比, 得到两种模型的震中差 D_3 (图 11)。

分析编目报告与最优模型震中差 D_2 分布情况, 将震中差 D_2 分档, 对各档地震数占地震总数的百分比(η)进行统计, 见表 7。当 $D_2 < 2$ km 时, 地震数占地震总数的 $\eta=69.6\%$; 当 $D_2 < 5$ km 时, 地震数占地震总数的 $\eta=84.8\%$; 当 $D_2 > 5$ km 时, 地震数占地震总数的 $\eta=15.2\%$ 。分析编目报告与华南

模型震中差 D_3 分布情况, 将震中差 D_3 分档, 对各档地震数占地震总数的百分比(η)进行统计, 见表 7。当 $D_3 < 2$ km 时, 地震数占地震总数的 $\eta = 67.0\%$; 当 $D_2 < 5$ km 时, 地震数占地震总数的 $\eta = 87.3\%$; 当 $D_3 > 5$ km 时, 地震数占地震总数的 $\eta = 32.9\%$ 。

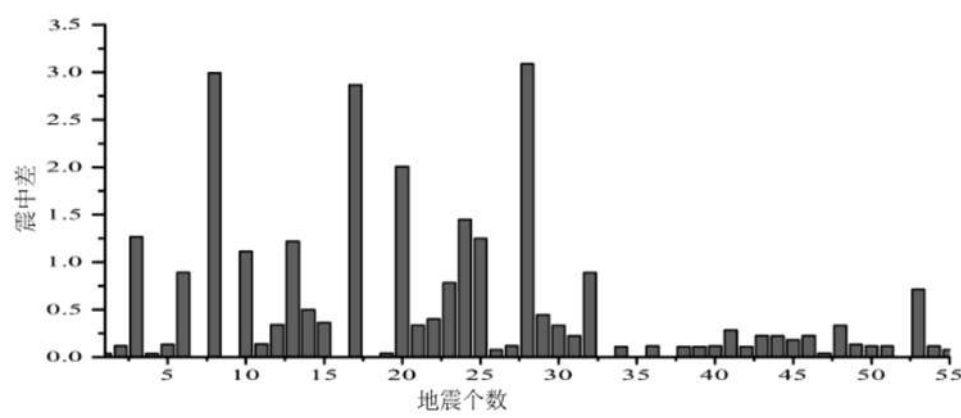


图 9 华南模型与最优模型震中距差 D_1

Fig.9 The epicentral distance difference between the South China crustal model and optimal model

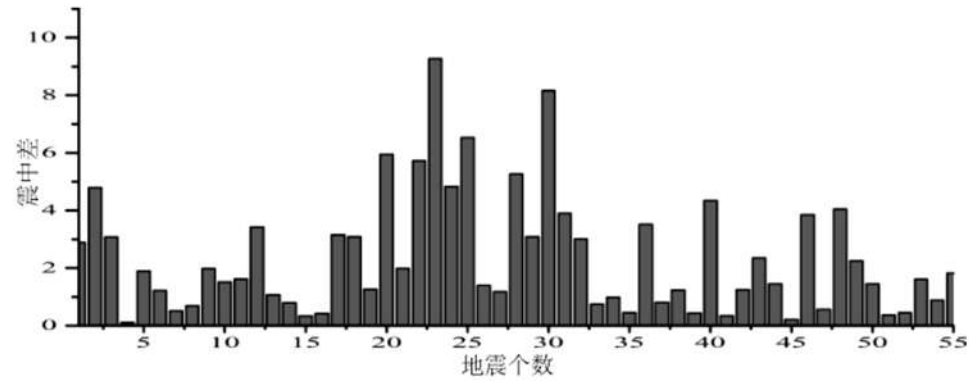


图 10 编目报告与最优模型的震中差 D_2

Fig.10 The epicentral distance difference between catalog report and optimal model

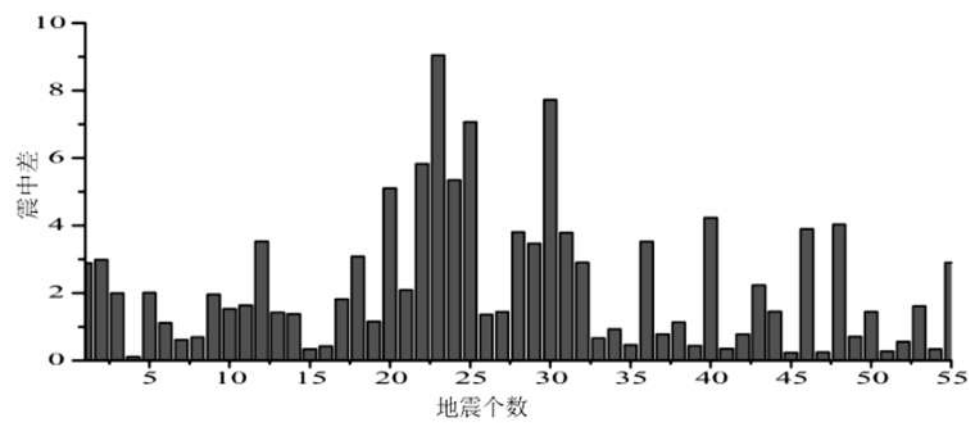


图 11 编目报告与华南模型的震中差 D_3

Fig.11 The epicentral distance difference between catalog report and the South China crustal model

从表 7 可以得出: 当 D 值小于 2 km 时, 最优模型比华南模型的结果稍微好点, 当 D 值小于 5 km 和大于 5 km 时, 最优模型与华南模型平分秋色, 但整体上最优模型比华南模型的结果要好, 这说明了最优模型比华南模型更接近本区域的地壳模型。

表 7 华南模型、最优模型分别与编目报告的震中距差分析表

Table 7 Epicentral distance analysis table of Southern China model and optimal model comparing with Cataloging report

地震数占地震总数的百分比/ η	<2 km	<5 km	>5 km
D_2	60.0%	89.1%	10.9%
D_3	58.1%	89.1%	10.9%

4 结语

通过开展海南地区地壳一维速度模型研究工作,可以得到如下结论:

(1) 通过对华南模型的检验的结果,华南模型应用于海南地区区域地质特征存在一定的差异,不具有普适性,需要修正。

(2) 根据编目报告中的基础数据,通过拟合的方式获得的速度初始模型,为最优模型的确立奠定了基础。确定最优模型的过程,进一步了解上地壳和下地壳的变化,但与华南模型的上地壳和下地壳差得不是很多,在进一步进行确认模型之时,进行批处理同一份数据后,最优模型的残差比华南模型小。

(3) 依据海南岛及其周边海域地质构造特征,基于已有的本区域地壳速度模型研究成果、地壳等结果,采用“Hyposat 批处理”和“模型间的震中矩对比”等方法,最终确立了海南地区地壳一维速度最优模型。

(4) 两次人工爆破速度拟合结果非常接近最优模型,真实反映了海南岛周围的地壳速度变化特征,佐证了最优模型的适应性和准确性。

(5) PTD 批处理程序发挥了准确测定地震深度、参与台站较多、初至震相读数精度高等优点,对最优模型的可靠性进行检验。

参考文献:

[1] 范玉兰,林纪曾. 华南地区近震走时表的研制[J]. 华南地震,1990,10(2):1-16.

[2] 黄海波,丘学林,夏少红. 海南岛地壳厚度与泊松比结构[J]. 热带海洋学报,2012,31(3):65-70.

[3] 嘉世旭,李志雄,徐朝繁,等. 雷琼拗陷地壳结构特征[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1385-1394.

[4] 熊小松,高锐,李秋生,等. 深地震探测揭示的华南地区莫霍面深度[J]. 地球学报,2009,31(6):23-31.

[5] 邓阳凡,李守林,范蔚茗,等. 深地震测深揭示的华南地区地壳结构及其动力学意义 [J]. 地球物理学报,2011,54(10):2560-2574.

[6] 陈祥开,曾维顺,丁有兴,等. 海南区域量规函数与台网震级的研究[J].华南地震,2018,38(1):77-82.

[7] 朱元清,夏从俊,李平. 确定震源深度的 PTD 方法及其应用[J]. 地震地磁观测与研究,1997,17(3):21-29.

[8] 朱元清,赵仲和. 提高地震定位精度新方法的研究[J]. 地震地磁观测与研究,1997,17(5):59-67.