

张红才, 邵平荣, 段刚, 廖诗荣, 陈智勇. 2020. 福建及台湾海峡地区新一维速度模型的适用性分析. 地震学报, 42(3): 283–292. doi: 10.11939/jass.20190121.
Zhang H C, Shao P R, Duan G, Liao S R, Chen Z Y. 2020. Applicability of the new one-dimensional velocity model in Fujian and Taiwan strait region. *Acta Seismologica Sinica*, 42(3): 283–292. doi: 10.11939/jass.20190121.

福建及台湾海峡地区新一维速度模型的适用性分析*

张红才^{1,2), †} 邵平荣¹⁾ 段 刚¹⁾ 廖诗荣¹⁾ 陈智勇^{1,2)}

1) 中国福州 350003 福建省地震局

2) 中国福建厦门 361000 中国地震局厦门海洋地震研究所

摘要 通过福建及台湾海峡地区的新一维速度模型与现有华南速度模型的对比, 讨论了新一维速度模型在福建地震观测台网的适用性. 理论走时分析结果表明, 尽管两个速度模型差异明显, 但震中距在 0—100 km 范围内的震相理论走时相差较小, 一定程度上说明两速度模型所给出的本区域地壳平均速度差异较小. 对利用 18 次人工定点爆破记录的地震定位结果的分析表明: 当震源深度不受约束时, 应用华南速度模型的定位结果精度稍优于新一维速度模型; 将震源深度固定为 0 km 后, 应用新一维速度模型的定位结果精度则明显优于华南模型. 对 19 个仙游震群序列事件进行定位的结果显示, 由于华南地区速度结构的横向变化较小, 应用两模型的地震定位精度结果基本相当, 但新一维速度模型定位的发震时刻较华南速度模型普遍早 0.61 s 左右, 因此使得事件定位残差显著增大.

关键词 福建及台湾海峡地区 一维速度模型 华南速度模型 理论走时 定位残差
doi: 10.11939/jass.20190121 中图分类号: P315.61 文献标识码: A

Applicability of the new one-dimensional velocity model in Fujian and Taiwan strait region

Zhang Hongcai^{1,2), †} Shao Pingrong¹⁾ Duan Gang¹⁾ Liao Shirong¹⁾ Chen Zhiyong^{1,2)}

1) *Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China*

2) *Institute of Xiamen Marine Seismology, China Earthquake Administration, Fujian Xiamen 361000, China*

Abstract: Based on the new one-dimensional velocity model in Fujian and Taiwan strait region, we analyzed the applicability of this model used for Fujian seismic monitoring network by compared with the existing South China velocity model. Theoretical travel time comparison shows that small difference appeared within 100 km of the epicentral distance although the two velocity models seem obviously different. To some extent, this reflects the mean velocity of this region given by these two models are consistent. By choosing 18 man-made explosion events, we test the location results based on these two models. If without constrain on focal

* 基金项目 地震科技星火计划(XH20028Y)和福建省地震局科技攻关项目(2019G07)共同资助.

收稿日期 2019-07-12 收到初稿, 2019-10-18 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: zhanghc@fjea.gov.cn



depth, location results by using the South China velocity model are slightly better than the new one-dimensional velocity model, but when we set focal depth as 0 km, precision of location results are much better for one-dimensional velocity new model. As for 19 natural earthquake events of Xianyou earthquake sequence, as a result of small velocity variation in horizontal dimension for South China region, earthquake location precision by using both models are quite close. The origin times of the events estimated by the new one-dimensional velocity model are usually 0.61 s ahead, which also result in the residuals of location error significantly higher than those by using the South China velocity model.

Key words: Fujian and Taiwan strait region; one-dimensional velocity model; South China velocity model; theoretical travel time; residuals of location error

引言

区域地球速度模型一直是地震学界关注的热点,精确的速度模型对于区域内的地震活动性、震源物理、地震预测等方面的研究颇为重要.福建及台湾海峡地区由于受到菲律宾板块与欧亚板块的共同作用,一直是我国华南沿海地震活动性最高、灾害最严重的区域.为获得该区域较可靠速度模型而开展的系列研究采用的方法包括:人工地震测深(陈祥雄等, 2005; 朱金芳等, 2005; 邓阳凡等, 2011; 邱毅等, 2014; 蔡辉腾等, 2015; 金震等, 2018)、体波及面波层析成像(黄金莉等, 2007; 袁丽文, 郑斯华, 2009; 李军等, 2011)、远震接收函数反演(黄晖等, 2010).自 2013 年起,福建省地震局开始组织实施“福建及台湾海峡地区地壳三维结构探测”工程,采用陆地水库气枪和海上震源船作为激发震源,在省内布设密集流动观测站进行记录.经过两期(6 年)工程实施,积累了大量观测数据,并获得了福建及台湾海峡地区一维(蔡辉腾等, 2015; 金震等, 2018)及三维(蔡辉腾, 2015; 金震, 2018)地壳速度模型.为了研究不同速度模型间的差异,本文即以该工程产出的福建及台湾海峡地区平均一维速度模型(金震等, 2018)为研究对象(以下简称为“新一维速度模型”),通过与现有华南速度模型进行对比,讨论该模型在福建地区地震监测台网日常产出工作中的可靠性和适用性.

1 华南速度模型与新一维速度模型的对比

目前,福建台网地震速报、地震定位、地震编目等日常工作中均使用范玉兰等(1990)采用双层平均地壳模型拟合得到的华南速度模型,该模型将地壳分为两层,第一层层深为 21.40 km,第二层莫霍面深度为 32.40 km, $v_p=7.98$ km/s.相较于该模型,新一维速度模型对于地壳速度结构刻画得更为精细,将地壳划分为五层:上地壳顶部结晶基底层分为两层,层界面深度分别为 0.23 km 和 2.82 km;上地壳下部分为两层,层界面深度分别为 6.44 km 和 18.8 km;下地壳为单层,莫霍面深度为 30.42 km, $v_p=8.08$ km/s, $v_s=4.53$ km/s(金震等, 2018).华南速

表 1 华南速度模型与新一维速度模型参数对比

Table 1 Comparison between south China velocity model and new 1D velocity model

模型	层厚/km	$v_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$
华南速度模型 (范玉兰等, 1990)	21.40	6.01	
	11.00	6.88	
	0.23	5.04	2.93
新一维速度模型 (金震等, 2018)	2.59	5.44	3.37
	3.62	6.06	3.47
	12.37	6.16	3.55
	11.61	6.39	3.66

度模型和新一维速度模型中相同深度处的 P 波速度存在明显差异. 新一维速度模型还给出了每层的 S 波速度, 而华南速度模型各层的 S 波速度按 $v_P/\sqrt{3}$ 计算而得. 两模型对比见表 1 和图 1.

基于上述两速度模型, 可分别计算得到一定震源深度处不同震相的理论走时曲线. 两模型下 Pg, Sg, Pn 和 Sn 等 4 组震相在 10, 20 和 30 km 震源深度处的理论走时偏差(新一维速度模型-华南速度模型)如图 2 所示. 对比可见, 当震源深度较浅或震中距较小时, 两模型的各震相理论走时差较小. 以

Pg 震相为例, 当震源深度为 10 km 时, 震中距在 0—100 km 时, 二者理论走时差均小于 0.2 s;

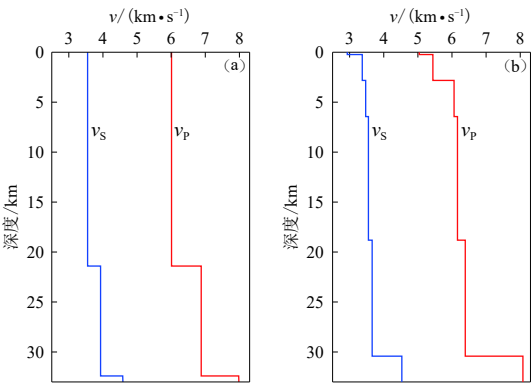


图 1 华南速度模型(a)与新一维速度模型(b)

Fig. 1 South China velocity model (a) and new 1D velocity model (b)

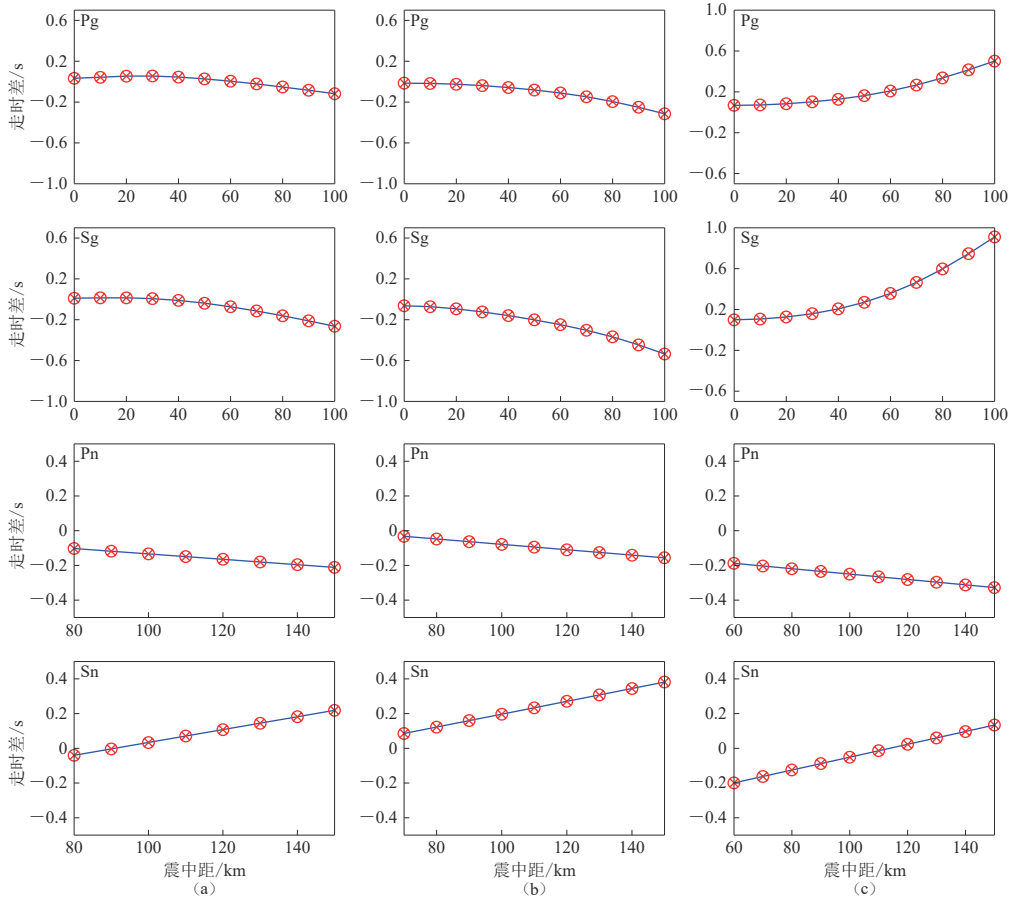


图 2 震源深度分别为 10 km (a), 20 km (b) 和 30 km (c) 时两模型中 4 组震相的理论走时差

Fig. 2 Theoretical travel time error of two 1D velocity models for four seismic phases with focal depths 10 km (a), 20 km (b), 30 km (c)

随着震源深度和震中距的增加，二者间的走时差逐渐增大，当震源深度增至 30 km 时，震中距在 100 km 处的 Pg 震相走时差为 0.50 s，Sg 震相走时差接近 1.0 s，说明新一维速度模型中的 S 波速度与华南速度模型存在一定差异。相较于震相 Pg 和 Sg，震相 Pn 和 Sn 的理论走时差变化范围较小，且呈现出明显的线性规律，两模型得出的地壳平均速度差异并不明显。

以 PCNP 台站对 2013 年 9 月 4 日 6 时 23 分 26.77 秒发生在福建仙游的 $M_L4.8$ 地震(震中位置: 118.752°E, 25.629°N; 震源深度为 11 km)的记录(台站震中距为 254 km)为例，分别应用华南速度模型和新一维速度模型计算得到 Pn, Pg, Sn 和 Sg 四组震相的理论到时，并与人工编目中拾取的震相到时进行对比，其中理论到时计算中的震源位置和发震时刻信息均依据人工正式编目给出的目录信息。如图 3 所示，应用新一维速度模型的理论震相到时更接近于人工编目结果，且 Pn 和 Pg 两组震相的理论到时与人工编目到时之间的差异更小，这是由于这两组震相信噪比更高、更容易拾取所致，也表明两模型中的 P 波速度更为精确。

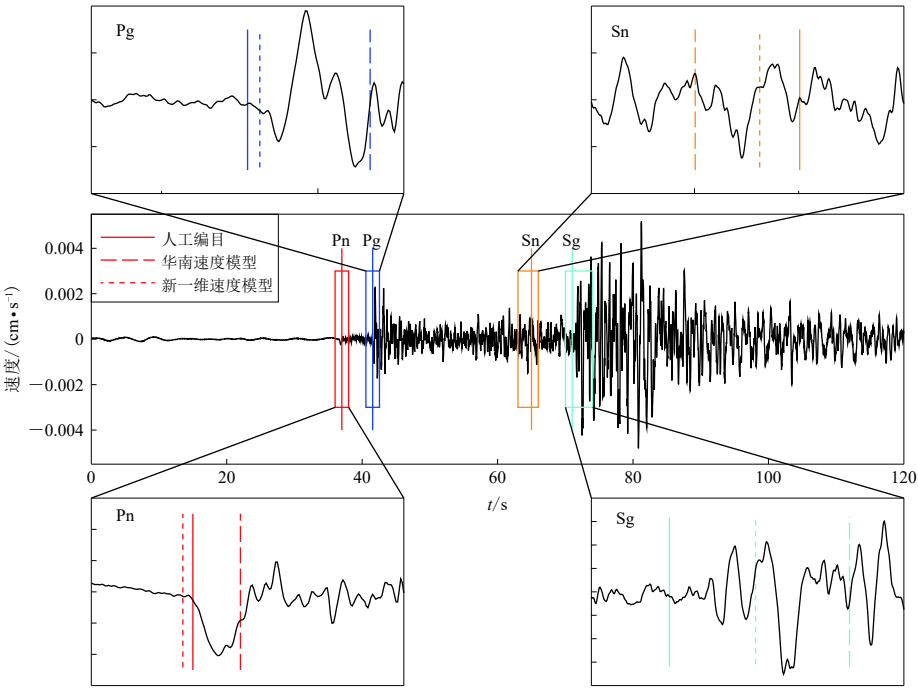


图 3 PCNP 台测得的 2013 年 9 月 4 日福建仙游 $M_L4.8$ 地震的 4 组震相应用于两速度模型的理论到时与人工编目拾取到时对比

Fig. 3 Comparison of theoretical phase arrival times calculated based on the two velocity models with catalog phase arrival times of four phases from the station PCNP in $M_L4.8$ Xianyou, Fujian, earthquake on September 4, 2013

2 应用人工定点爆破的速度模型定位精度

地震定位是一维速度模型在地震台网中最基础、最重要的应用之一。影响定位结果可靠性的因素主要包括震源的不确定性、速度模型的可靠性、震相拾取的精度以及定位方法的适用性等。为了更精准地获得华南速度模型与新一维速度模型间的差异，首先以 2010—2012 年福建省内开展的 18 次人工定点爆破事件为参考，依据人工编目拾取的 Pg 和 Sg 震相到时信

息, 采用 HYPOSAT 算法 (Schweitzer, 2001), 分别应用华南速度模型和新一维速度模型进行地震定位, 进而讨论两模型的定位精度. 由于本文选用了有精确激发时间、爆破位置等信息的人工定点爆破事件, 参与地震定位的震相和使用的定位方法也完全一致, 仅应用的速度模型不同, 因此可认为定位结果的差异仅源于模型差异, 可据此讨论不同速度模型的定位精度. 本文所用 18 次人工定点爆破事件的信息列于表 2.

基于两个速度模型应用 HYPOSAT 定位算法得到的 18 次人工爆破事件定位结果与实际结果间的震中位置偏差和发震时刻偏差如图 4 所示. 可以看出, 由于人工爆破事件均发生于地表, 事件理论深度应为 0 km, 而在未预先

表 2 本文采用的 18 次人工定点爆破事件

事件序号	爆破时间		爆破位置	
	年-月-日	时: 分: 秒	北纬/°	东经/°
1	2010-09-01	01:00:13.111	25.3967	119.7143
2	2010-09-01	01:10:14.752	25.6214	119.1688
3	2010-09-11	01:00:13.284	25.0636	118.5620
4	2010-09-11	01:10:14.472	25.4707	118.0392
5	2011-08-23	01:00:16.382	25.9200	117.6387
6	2011-08-23	01:10:14.631	26.5765	118.9839
7	2011-08-28	01:00:16.746	26.8172	118.5279
8	2011-08-28	01:10:15.000	27.2877	117.6942
9	2011-08-28	04:10:14.514	25.0417	117.3357
10	2012-07-18	01:00:20.181	25.2452	117.3357
11	2012-07-18	01:10:16.253	25.7110	116.8243
12	2012-07-23	01:00:21.079	26.1632	117.6419
13	2012-07-23	01:10:17.263	26.1632	116.2853
14	2012-07-23	01:20:15.423	26.3954	115.9158
15	2012-07-29	01:00:15.499	24.0390	116.8733
16	2012-07-29	01:20:15.866	24.9327	119.7143
17	2012-07-29	04:20:15.875	25.1793	119.1688
18	2012-08-08	01:00:21.000	24.6020	118.5620

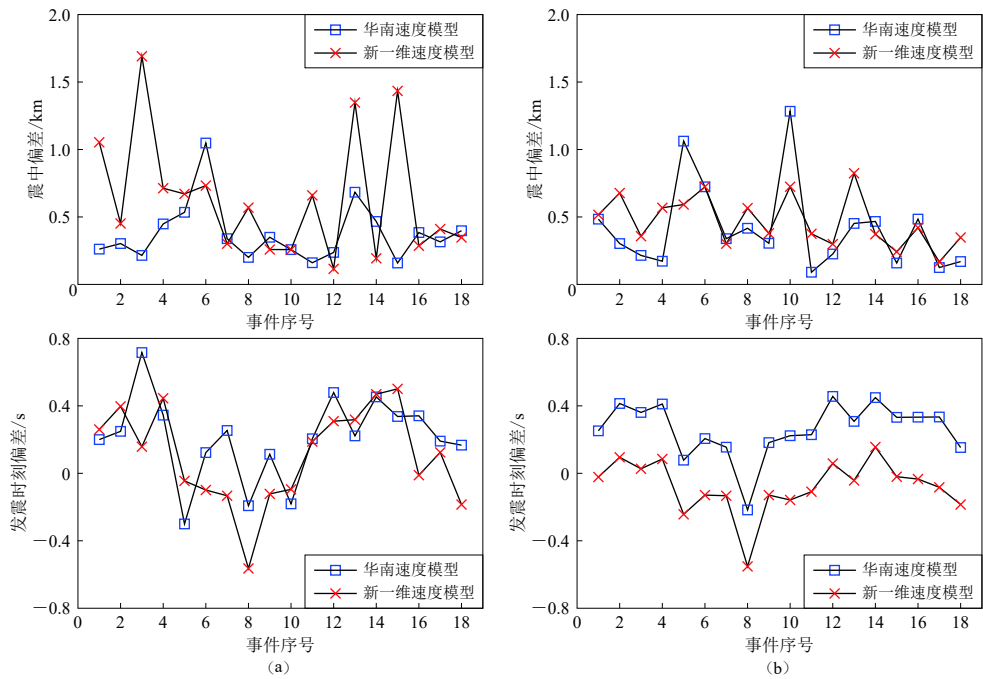


图 4 基于两速度模型的人工爆破事件定位震中及发震时刻偏差
(a) 不约束震源深度; (b) 震源深度固定为 0 km

Fig. 4 Epicenter location error and event origin time error by using two velocity models
(a) No focal depth constrain is applied; (b) Focal depth is set as 0 km

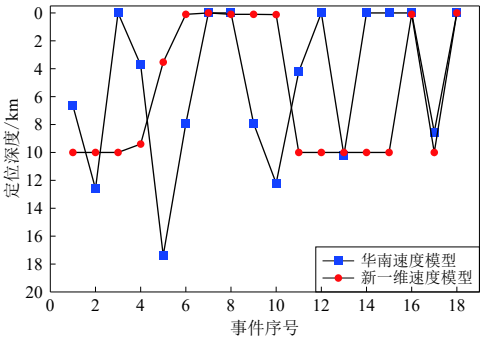


图 5 应用两速度模型所获的定位深度
Fig. 5 Focal depth estimated by two velocity models

减小为 (0.26 ± 0.16) s 和 (-0.08 ± 0.16) s, 震中水平位置的定位误差分别为 (0.41 ± 0.32) km 和 (0.47 ± 0.19) km. 综上, 固定震源深度时, 应用新一维速度模型的定位结果明显优于华南速度模型, 定位的发震时刻与实际爆破时间更一致.

对于水平分层的新一维速度模型, 若不考虑层间速度梯度的影响, 理论地震射线路径与实际地震射线路径存在着较大差异, 尤其是对于仅以两层划分的华南速度模型而言. 对于震源位于地表的人工爆破事件, 应用华南速度模型的初至震相射线路径仅沿地表, 而在复杂的新一维模型下初至震相射线路径则是在浅部各层中依次滑行(图 6), 射线形态更符合速度随深度梯度增加的实际情况. 仅就此方面而言, 新一维速度模型可能更好地反映了本区域速度结构的真实情况.

3 天然地震对速度模型适用性分析

为了进一步比较两模型在福建地震观测台网日常应用中的可靠性, 本文以福建仙游震群序列为研究对象, 收集 19 次 $M_L \geq 3.0$ 事件, 分别应用华南速度模型和新一维速度模型进行地震定位分析. 仙游震群周围的观测台站较为密集, 不同震中距和方位均分布有一定数量的观测台站, 仅筛选震中距在 100 km 范围内的观测台站参与地震定位(图 7), 定位过程中主要选择清晰、尖锐的 Pg 和 Sg 震相, 且避免使用 Pn 和 Sn 等初动较弱的震相. 同样, 每次事件中参与地震定位的台站、震相及定位方法(HYPOSAT)完全一致. 然而由于天然地震事件的实际震源位置未知, 因此定位结果差异除了速度模型的影响, 还需考虑震源不确定性造成的影响.

两模型的事件定位精度结果列于表 3. 可见: 应用华南速度模型的定位精度结果明显优

约束震源深度的条件下, HYPOSAT 方法反演得到的震源深度多数不为 0 km, 这也将进一步影响水平位置偏差和发震时间偏差(图 5), 因此需采用固定震源深度(0 km)的方式重新进行地震定位. 由图 4 可见, 在对震源深度不作约束时, 两模型的定位结果精度总体相当, 应用华南速度模型和新一维速度模型的震中定位误差分别为 (0.38 ± 0.22) km 和 (0.64 ± 0.46) km, 发震时刻误差分别为 (0.21 ± 0.25) s 和 (0.11 ± 0.28) s, 显然应用华南速度模型的定位结果更优. 当震源深度固定为 0 km 时, 应用两个模型的定位结果均发生了变化, 发震时刻误差分别

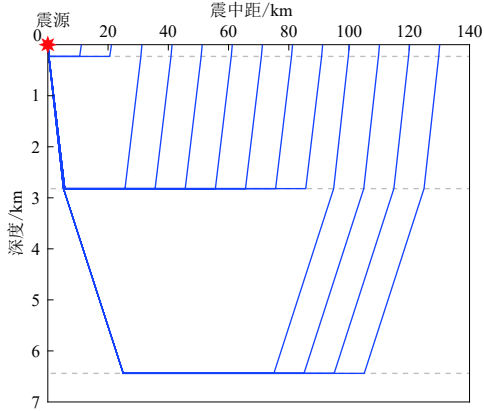


图 6 新一维速度模型下震源位于地表的初至震相射线路径

Fig. 6 Ray path of the first arrival phase when the source is set to surface for the new 1D velocity model

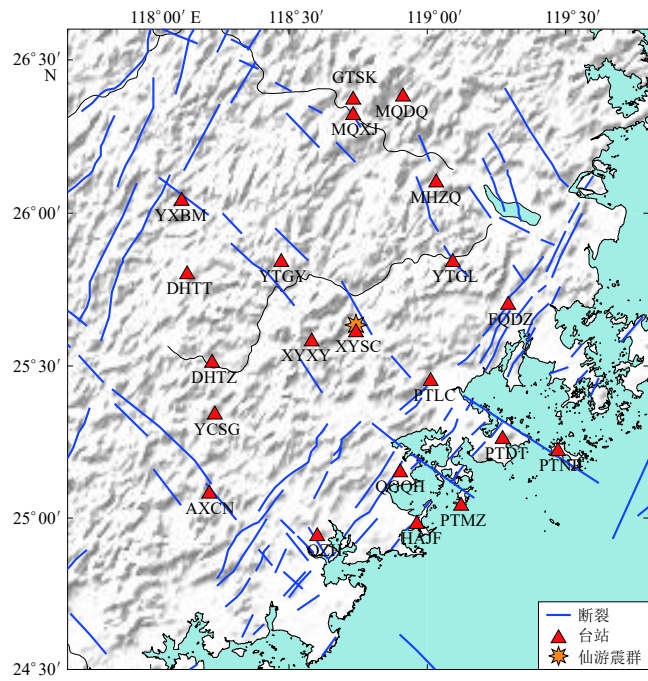


图 7 参与仙游震群定位的台站分布

Fig. 7 Stations used for Xianyou earthquake sequence location

表 3 两个模型对 19 次天然地震事件的定位结果

Table 3 List of location results for 19 earthquakes by using two velocity models

序号	M_s	发震日期	华南速度模型结果						新一维速度模型结果					
			发震时刻	震中位置		震源深度 /km	残差	发震时刻	震中位置		震源深度 /km	残差		
				年-月-日	时:分:秒				东经 $^{\circ}$	北纬 $^{\circ}$			时:分:秒	东经 $^{\circ}$
1	3.8	2012-11-25	07:48:49.5	118.75	25.63	10.4	0.132	07:48:48.7	118.74	25.64	9.0	0.586		
2	3.4	2012-11-25	17:42:39.1	118.75	25.63	18.3	0.065	17:42:38.2	118.75	25.64	19.4	0.941		
3	3.3	2012-11-30	14:59:13.7	118.75	25.63	11.4	0.090	14:59:13.0	118.74	25.64	6.9	0.319		
4	4.2	2013-08-03	02:43:56.5	118.75	25.63	8.1	0.088	02:43:55.5	118.74	25.63	12.8	0.240		
5	3.1	2013-08-09	13:37:07.5	118.75	25.62	13.5	0.105	13:37:07.0	118.75	25.64	9.9	0.305		
6	3.5	2013-08-09	13:38:41.0	118.75	25.63	6.9	0.064	13:38:40.0	118.75	25.63	12.7	0.250		
7	3.8	2013-08-19	17:36:20.0	118.75	25.63	6.3	0.086	17:36:18.9	118.74	25.63	11.0	0.321		
8	4.5	2013-08-23	05:02:01.3	118.75	25.63	8.0	0.076	05:02:00.3	118.71	25.65	6.6	0.300		
9	3.1	2013-08-24	00:49:57.4	118.75	25.63	7.0	0.083	00:49:56.3	118.74	25.64	10.8	0.304		
10	5.0	2013-09-04	06:23:26.7	118.75	25.63	12.9	0.071	06:23:26.2	118.75	25.63	9.0	0.309		
11	3.4	2013-09-14	02:59:50.8	118.76	25.62	6.6	0.093	02:59:49.8	118.75	25.62	10.9	0.291		
12	3.3	2013-10-18	14:05:23.5	118.75	25.63	7.2	0.091	14:05:22.4	118.72	25.64	10.7	0.281		
13	4.5	2013-10-30	01:50:12.3	118.75	25.62	9.4	0.097	01:50:11.4	118.73	25.63	7.9	0.229		
14	3.2	2013-11-19	03:03:59.0	118.76	25.62	6.3	0.080	03:03:58.2	118.76	25.64	9.8	0.301		
15	3.1	2013-12-16	19:01:36.0	118.75	25.64	5.6	0.071	19:01:35.2	118.74	25.65	10.7	0.347		
16	3.1	2014-01-27	13:50:18.8	118.74	25.64	6.4	0.093	13:50:17.9	118.73	25.65	10.7	0.278		
17	3.8	2014-03-14	19:53:36.1	118.75	25.63	7.0	0.153	19:53:35.0	118.74	25.64	10.4	0.230		
18	3.0	2014-05-12	18:24:00.0	118.74	25.64	7.6	0.088	18:24:18.5	118.73	25.64	11.0	0.333		
19	3.3	2014-07-19	01:50:16.0	118.74	25.64	5.8	0.111	01:50:15.1	118.73	25.65	8.7	0.312		

于新一维速度模型, 华南速度模型的事件定位残差多数小于 0.1, 而新一维速度模型的事件定位残差则多数大于 0.3, 也间接说明震相拾取是准确的. 定位精度结果对比分析表明, 应用两模型定位的震中水平位置较为一致, 震源深度测定结果差异较小, 仅个别事件存在明显

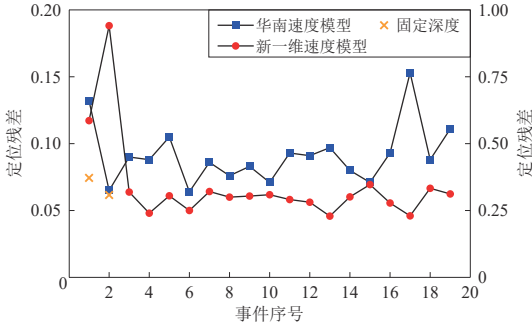


图 8 华南速度模型与新一维速度模型的定位残差
Fig. 8 Location residuals by using the South China velocity model and the new 1D velocity model

年震中周围 XYSC 和 XYXY 等观测台站陆续建成并投入运行, 应用两模型的定位深度更趋于一致, 均介于 6—13 km 之间. 李强等(2015)、秦双龙等(2015)和段刚(2016)的研究结果均表明, 仙游震群的震源深度介于 9—12 km 之间, 也验证了本文两模型定位结果的可靠性.

对表 3 中事件发震时刻的分析表明, 应用新一维速度模型的定位发震时刻普遍早于应用华南速度模型, 约超前 0.61 s (图 9). 由于应用两模型定位的震中水平位置和震源深度均较为一致, 且震相理论走时差异并不显著, 因此认为对于分层较为复杂的区域一维速度模型, HYPOSAT 定位方法可能并非最优的选择, 定位方法可能是造成新一维速度模型定位残差显著高于华南速度模型定位残差的主要因素.

如前文所述, 对于天然地震事件, 震源参数具有不确定性, 应用不同速度模型的定位结果也会存在一定的随机误差. 吕作勇等(2016)分析认为, 对于速度结构横向变化较小的区域(如华南地区), 当一维速度模型基本合理时, 使用不同定位方法均可得到较准确的震中位置, 但震源深度对速度模型的依赖性较大. 基于一维速度模型的地震定位, 应优先选择人工地震测深的速度模型. 此外, 随着一维速度模型的精细化, 不同震相的理论走时计算将更为准确, 这将有助于提升区域天然地震事件的分析精度.

差别. 综上表明, 两模型的定位精度总体相当.

对 2012 年震源深度定位存在明显差异的两次事件(事件序号为 1 和 2)而言, 由于其震中附近缺少必要的观测台站, 定位震源深度产生了较大差异, 新一维速度模型的定位深度甚至接近于莫霍面, 定位结果残差显著增大. 以华南速度模型定位结果的震源深度为参考, 采用固定震源深度的方式重定位, 定位结果残差随之降至 0.3 (图 8), 与其它事件的定位精度相当. 随着 2013

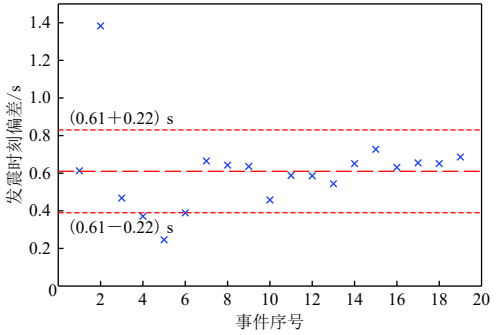


图 9 华南速度模型与新一维速度模型的发震时刻偏差

Fig. 9 Event origin time biases between South China velocity model and new 1D model

随着 2013 年震中周围 XYSC 和 XYXY 等观测台站陆续建成并投入运行, 应用两模型的定位深度更趋于一致, 均介于 6—13 km 之间. 李强等(2015)、秦双龙等(2015)和段刚(2016)的研究结果均表明, 仙游震群的震源深度介于 9—12 km 之间, 也验证了本文两模型定位结果的可靠性.

4 讨论与结论

本文通过理论走时计算分析并利用 18 次人工定点爆破事件和 19 次天然地震事件, 分别获得了华南速度模型和新一维速度模型的地震定位结果, 主要讨论了新一维速度模型在福建台网日常工作的准确性和适用性, 所得主要结论如下:

1) 福建所处的华南地区速度结构横向变化较小, 分别应用华南速度模型和新一维速度模型的地震定位结果精度总体相当, 但应用更精细的新速度模型有助于提升区域地震分析的精度。

2) 震相理论走时计算结果表明, 随着震源深度和震中距的增加, 由两模型计算得到的震相走时差逐渐加大, 说明对于本区域内的中深源地震事件, 两个模型的定位结果有可能存在明显差异。

3) 对 18 次人工定点爆破事件的分析结果表明, 在合理设置震源深度的前提下, 应用新一维速度模型确定的震中位置及发震时刻与实际爆破参数间的一致性更好, 证明新一维速度模型的定位精度更高。

4) 关于 19 次天然地震事件的分析结果表明, 定位方法对定位结果也会造成一定的影响。对于新一维速度模型, 本文使用的 HYPOSAT 算法可能并不是最佳选择, 这使得其事件定位残差显著高于华南速度模型。后续也将应用其它方法继续开展相关研究, 以论证本文推测的合理性。

尽管新一维速度模型的定位结果并未显著优于华南速度模型, 但本文基于实际观测数据的验证结果至少表明该速度模型在地震定位应用中具有较好的适用性, 定位结果也有较高的可靠性。因此, 作者认为新一维速度模型可以在日常地震速报、编目中逐步推广应用。由于该模型的获取具备更坚实的物理解释基础, 因而有望在应用过程中解决以往难以理解或者被忽视的一些实际问题, 如震源深度测定、发震断层判定等。

参 考 文 献

- 蔡辉腾. 2015. 福建地区地壳上地幔三维 P 波速度结构研究 [D]. 福州: 福州大学: 53-78.
- Cai H T. 2015. *Three-Dimensional P-Wave Velocity Structure of the Crust and Upper Mantle in Fujian Region* [D]. Fuzhou: Fuzhou University: 53-78 (in Chinese).
- 蔡辉腾, 金星, 王善雄. 2015. 基于人工地震测深数据建立地壳一维速度结构 [J]. 大地测量与地球动力学, **35**(2): 267-272.
- Cai H T, Jin X, Wang S X. 2015. *Establishment of crust 1D velocity structure based on artificial earthquake sounding data* [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **35**(2): 267-272 (in Chinese).
- 陈祥熊, 林树, 李祖宁, 鲍挺, 周峥嵘. 2005. 福建-台湾地区一维地壳速度结构的初始模型 [J]. 地震, **25**(2): 61-68.
- Chen X X, Lin S, Li Z N, Bao T, Zhou Z R. 2005. Preliminary 1-D model of crust velocity structure in Fujian-Taiwan region [J]. *Earthquake*, **25**(2): 61-68 (in Chinese).
- 邓阳凡, 李守林, 范蔚茗, 刘佳. 2011. 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, **54**(10): 2560-2574.
- Deng Y F, Li S L, Fan W M, Liu J. 2011. Crustal structure beneath South China revealed by deep seismic soundings and its dynamics implications [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(10): 2560-2574 (in Chinese).
- 段刚. 2016. CAP 方法反演福建仙游 $M_L 5.0$ 、 $M_L 4.5$ 级地震震源机制解 [J]. 地球物理学进展, **31**(4): 1432-1437.
- Duan G. 2016. Inversion of the focal mechanisms of the $M_L 5.0$ and $M_L 4.5$ earthquake in Xianyou, Fujian using the CAP methods [J]. *Progress in Geophysics*, **31**(4): 1432-1437 (in Chinese).

- 范玉兰, 林纪曾, 胡瑞贺, 罗振暖. 1990. 华南地区近震走时表的研制[J]. 华南地震, **10**(2): 1–16.
- Fan Y L, Lin J Z, Hu R H, Luo Z N. 1990. The development of travel timetable for near earthquakes in South China[J]. *South China Journal of Seismology*, **10**(2): 1–16 (in Chinese).
- 黄晖, 米宁, 徐鸣洁, 王良书, 李华, 于大勇. 2010. 福建地区地壳上地幔 S 波速度结构与泊松比[J]. *高校地质学报*, **16**(4): 465–474.
- Huang H, Mi N, Xu M J, Wang L S, Li H, Yu D Y. 2010. S-wave velocity structures of the crust and uppermost mantle, and Poisson's ratios in Fujian Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, **16**(4): 465–474 (in Chinese).
- 黄金莉, 李祖宁, 林树, 蔡晋安, 陈祥熊, 鲍挺. 2007. 福建及台湾地区三维 P 波地壳速度结构[C]//中国地球物理学会第二十三届年会论文集. 青岛: 中国海洋大学出版社: 393.
- Huang J L, Li Z N, Lin S, Cai J A, Chen X X, Bao T. 2007. 3D P-wave crustal velocity structure in Fujian and Taiwan[C]//The 23rd Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Qingdao: China Ocean University Press: 393 (in Chinese).
- 金震. 2018. 福建及台湾海峡中南部三维地壳结构研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 41–69.
- Jin Z. 2018. *Study on Three-Dimensional Crustal Structure in the Central and Southern Fujian Strait and Taiwan Strait*[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration: 41–69 (in Chinese).
- 金震, 李山有, 蔡辉腾, 李培, 李海艳, 徐嘉雋. 2018. 福建及台湾海峡西侧地壳一维速度结构研究[J]. 地震工程与工程振动, **38**(3): 81–93.
- Jin Z, Li S Y, Cai H T, Li P, Li H Y, Xu J J. 2018. Inversion for the 1D velocity model of onshore-offshore in Fujian area[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **38**(3): 81–93 (in Chinese).
- 李军, 金星, 鲍挺, 林树, 韦永祥, 张红才. 2011. 利用噪声记录估计福建地区中上地壳体波速度结构[J]. 中国地震, **27**(3): 226–234.
- Li J, Jin X, Bao T, Lin S, Wei Y X, Zhang H C. 2011. The wave velocity structure of upper shell in Fujian estimated by the noise records[J]. *Earthquake Research in China*, **27**(3): 226–234 (in Chinese).
- 李强, 李军, 袁丽文, 邱毅, 李锋, 秦双龙, 曹轶. 2015. 福建仙游震群序列 $M_L \geq 4.0$ 事件震源机制与序列活动特征[J]. 地震, **35**(4): 147–156.
- Li Q, Li J, Yuan L W, Qiu Y, Li F, Qin S L, Cao Y. 2015. Focal mechanisms and activity of $M_L \geq 4.0$ events in the 2013 Xianyou earthquake swarm sequence in Fujian Province[J]. *Earthquake*, **35**(4): 147–156 (in Chinese).
- 吕作勇, 叶春明, 房立华. 2016. 不同一维速度模型的地震定位效果比较: 以小江断裂带为例[J]. 华南地震, **36**(3): 43–50.
- Lü Z Y, Ye C M, Fang L H. 2016. Comparison of earthquake location effect of different 1D velocity model: Application to Xiaojiang fault zone[J]. *South China Journal of Seismology*, **36**(3): 43–50 (in Chinese).
- 秦双龙, 李强, 邱毅, 廖丽霞, 陈莹. 2015. 福建仙游震群重定位及序列特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, **36**(3): 67–71.
- Qin S L, Li Q, Qiu Y, Liao L X, Chen Y. 2015. Relocation and sequence analysis for Xianyou earthquake swarm in Fujian Province[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **36**(3): 67–71 (in Chinese).
- 邱毅, 金星, 蔡辉腾, 康兰池, 陈惠芳. 2014. 利用人工地震研究福建地壳一维速度结构[J]. 地震工程与工程振动, **34**(增刊1): 1071–1076.
- Qiu Y, Jin X, Cai H T, Kang L C, Chen H F. 2014. 1-D crust velocity structure in Fujian region using artificial earthquakes[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **34**(S1): 1071–1076 (in Chinese).
- 袁丽文, 郑斯华. 2009. 用远震接收函数反演福建地区宽频带台站下方莫霍界面深度[J]. 华南地震, **29**(3): 85–97.
- Yuan L W, Zheng S H. 2009. Moho depths beneath broad-band stations in Fujian area inverted by teleseismic receiver function[J]. *South China Journal of Seismology*, **29**(3): 85–97 (in Chinese).
- 朱金芳, 徐锡伟, 张先康, 黄宗林, 陈祥熊, 方盛明, 刘保金, 郑荣章. 2005. 福州盆地及邻区地壳精细结构的深地震反射与高分辨率折射及宽角反射折射联合探测研究[J]. 中国科学: D 辑, **35**(8): 738–749.
- Zhu J F, Xu X W, Zhang X K, Huang Z L, Chen X X, Fang S M, Liu B J, Zheng R Z. 2005. Joint exploration of crustal structure in Fuzhou basin and its vicinities by deep seismic reflection and high-resolution refraction as well as wide-angle reflection/refraction[J]. *Science in China: Series D*, **48**(7): 925–938.
- Schweitzer J. 2001. HYPOSAT: An enhanced routine to locate seismic events[J]. *Pure Appl Geophys*, **158**(1): 277–289.