

吕作勇, 叶春明, 房立华. 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, 2016, 36(3): 43–50. [LYU Zuoyong, YE Chunming, FANG Lihua. Comparison of Earthquake Location Effect of Different 1D Velocity Model: Application to Xiaojiang Fault Zone[J]. South china journal of seismology, 2016, 36(3): 43–50.]

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

吕作勇¹, 叶春明¹, 房立华²

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 利用小江断裂带流动地震台阵的观测数据, 使用三维速度模型对 59 个地震参考事件进行绝对定位。使用 Hyposat 和 Hypoinverse 两种地震定位方法以及三种一维速度模型进行了地震定位试验。试验结果表明: 对于速度结构横向变化较小的区域, 当一维速度模型基本合理时, 两种定位方法都能得到比较准确的震中位置。与震中位置相比, 震源深度对速度模型的依赖更大。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。对于地震资料丰富的区域, 使用“最小一维速度模型”方法确定的速度模型也可以提高地震定位的精度。

关键词: 地震参考事件; 地震精定位; 一维速度模型; 小江断裂带

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2016) 03-0043-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.03.006

Comparison of Earthquake Location Effect of Different 1D Velocity Model: Application to Xiaojiang Fault Zone

LYU Zuoyong¹, YE Chunming¹, FANG Lihua²

(1. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China;

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: By using data recorded by dense temporary earthquake stations installed in the Xiaojiang fault zone, 59 earthquake reference events were absolutely located by 3D velocity model. This paper used Hyposat and Hypoinverse earthquake location methods and three kinds of 1D velocity model to do earthquake location tests. Results reveal that: when the 1D velocity model is reasonable in the regions with smaller lateral variations of velocity structure, the two methods can obtain the exact epicenter. Compared with the epicenter, the depth of the

收稿日期: 2015-07-29

基金项目: 地震行业科研专项“全国统一编目系统及其相关体系研制”(201308008)资助

作者简介: 吕作勇(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震监测工作。

E-mail: lzy@gddsn.org.cn.

通讯作者: 房立华(1981-), 男, 副研究员, 主要从事地震定位和深部结构研究

E-mail: flh@cea-igp.ac.cn.

source is more dependent on the velocity model. The application of currently earthquake location methods based on 1D velocity model, we should try to choose the result of active source detection. By the Kissling method to obtain the “minimum 1D velocity model” in the region with rich seismic data, it can improve the accuracy of earthquake location.

Key words: Earthquake reference event; Accurate earthquake location; One dimensional velocity model; Xiaojiang fault Zone

0 引言

地震定位是地震学中的基本问题之一,科学家们也一直致力于提高地震定位精度的研究工作中。速度模型是影响地震定位结果的关键因素之一^[1]。虽然许多研究^[2,3]表明应用三维速度模型能够有效提高地震定位精度,但是基于一维速度模型的地震定位,在精度允许的情况下具有低成本、高效率等优势,且目前大多数常用地震定位程序都采用一维速度模型。一维速度模型是区域地震构造研究的重要基础。因此,在地震精定位等研究工作中,建立较为准确的一维速度模型是地震定位的重要步骤之一。

通常收集先验的速度模型作为研究所需的一维速度模型,该一维速度模型可以从人工地震探测结果、全球地壳模型和其他方面的研究结果中获得。不同方法确定速度模型都有各自的优缺点,其中人工地震测深结果准确,但分布稀疏,地震层析成像的结果深度分辨率较低,而接收函数给出的是S波速度,存在界面和速度的折衷等。Kissling等人^[4]在研究震源位置和速度模型耦合问题中提出了一种确定最佳一维速度模型的方法,该方法广泛地应用于地震精定位和地震走时层析成像等初始速度模型的确定。

考虑到速度模型在地震定位等工作中的重要性,为了测试不同一维速度模型对定位结果的影响,本文挑选了小江断裂带区域定位精度较高的地震作为参考事件,采用不同的一维速度模型和定位方法来进行地震定位试验,将重定位后的震源位置和参考事件的位置进行对比,从而评估不同速度模型和定位方法的定位效果,并进一步探讨了地震定位中一维速度模型的选取策略,为今后地震精定位等工作提供参考。

1 资料与方法

2008年12月至2010年12月,我们在小江断

裂带布设了50个流动地震台站^[5]。台站平均间距约30 km,台站分布如图1所示。观测期间共记录到1 600多个近震。在对震相进行精确拾取后,使用川滇走时表三维定位软件^[6-8],对这些地震进行了定位。为了评估速度模型对地震定位的影响,我们选取定位精度较高的地震作为地震参考事件。参考Bondár等人^[9]以及吕作勇等人^[10]研究给出的近震台网定位精度的“Ground Truth”准则,按以下条件来选取地震参考事件:①震级 $M_L \geq 1.5$,记录台站数至少7个,震中距10 km以内至少有1个台站;②定位空角小于 110° ;③水平定位误差小于2 km,深度误差小于3 km。最后共挑选出59个地震作为参考事件,其分布如图1。

根据已有地下结构信息,一维速度模型通常可以从人工地震探测结果、全球地壳模型CRUST2.0^[11]和Kissling提出的方法来获得。Kissling方法是利用地震观测走时数据,联合反演震源位置和一维速度模型来获取研究区“最小一维速度模型”,该模型的各层速度是以射线长度为权重的三维速度模型的加权均值,能使地震重定位后走时残差最小。根据上述一维速度模型的不同来源,分别开展地震定位试验,探讨一维速度模型和定位方法对定位结果的影响。

对于同一个地震,不同定位方法给出的定位结果可能会存在差异。Hyposat^[12]和Hypoinverse^[13]是国内外常用的基于一维速度模型的定位方法。Hyposat能对近震和远震定位,其特点是能使用震相走时、震相到时差以及方位角数据来进行定位。Hypoinverse只能对近震定位,其特点是能使用多个速度模型来进行定位。为了更加全面分析速度模型对定位结果的影响,我们采用Hyposat和Hypoinverse两种方法对参考事件进行重新定位,将重定位后的震源位置和地震参考事件的位置进行比较,从而评估不同速度模型和定位方法的定位效果。

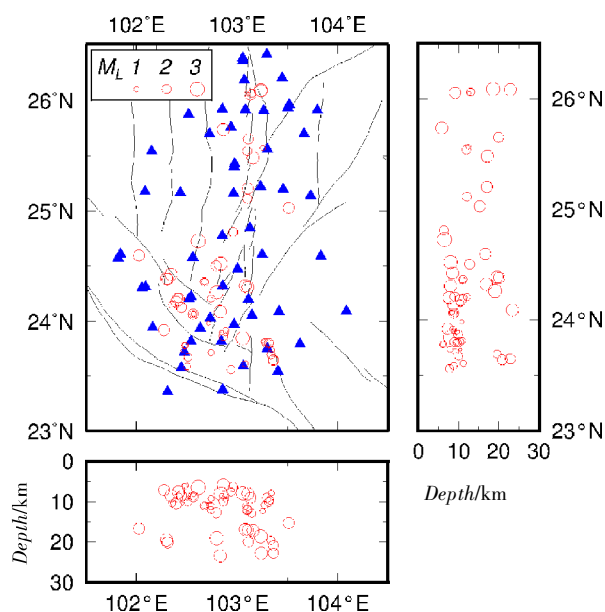


图1 小江断裂带流动地震台阵与参考事件分布图

Fig.1 Distribution of Xiaojiang fault zone temporary seismic array and reference events

2 模型

参考小江断裂带及其周边已有的P波速度结构模型,分别用三种一维速度模型来进行试验:①模型1:全球地壳模型CRUST2.0;②模型2:穿过研究区的孟连-马龙宽角反射剖面解释结果^[4];③模型3:Kissling方法获取的“最小一维速度模型”。这三种一维P波速度模型如图2所示,S波速度根据P波与S波的波速比确定。根据小江断裂带附近的接收函数研究结果,该区域的波速比平均值为1.75^[5]。

“最小一维速度模型”方法是Kissling在1994年提出的,该方法被广泛应用于地震精定位和地震走时层析成像等初始速度模型的确定。我们在模型2的基础上,利用59个参考地震的走时资料,采用“最小一维速度模型”方法得到了模型3。研究用地震及台站分布如图1,Pg震相观测走时曲线如图3。在反演中,根据Kissling的做法设置了震源位置的阻尼系数为0.01,速度参数的阻尼系数为0.1,经过5次迭代反演后获得了稳定的结果,且与研究区已知的地下结构信息一致,最终获得了最优一维P波速度模型。参考Kissling方法的做法,为了检验结果的稳定性,在Kissling方法获得的最优模型的基础上,分别增加和减小10%的速度值作为两种不同的初始速度模型,利用上述相同的数据和方法来进行反演,最后对结果

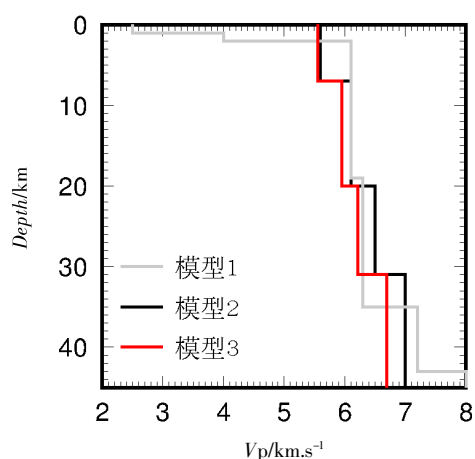


图2 三种一维P波速度模型

Fig.2 Three kinds of one dimensional P velocity model

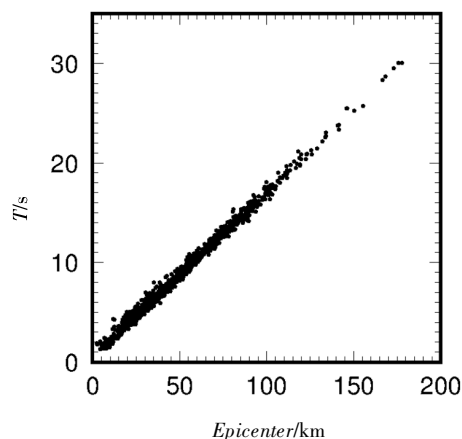


图3 Pg震相走时曲线

Fig.3 Travel time curve of Pg phase

进行比较,从而检验结果的稳定性。图 4 给出了最小一维 P 波速度模型的检验结果,蓝色和黑色实线分别表示增加和减小 10% 的两种不同的速度模型,而对应的蓝色和黑色虚线分别表示反演后获得的速度模型。检验结果中两种不同初始速度模型的反演结果都接近于上述获得的最优模型 3 (图 2 或图 4 中的红色实线),表明反演获得的最优模型 3 是稳定的。

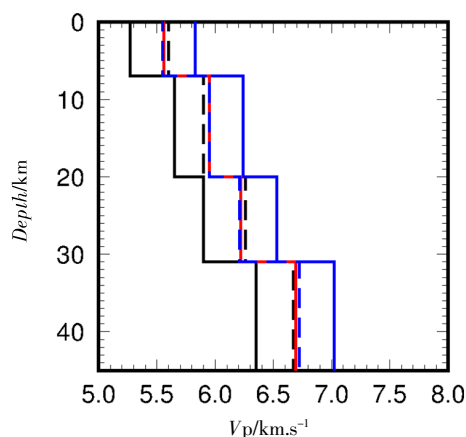


图 4 一维 P 波速度模型稳定性检验

Fig.4 Stability test for one dimensional P velocity model

3 结果

利用 Hyposat 和 Hypoinverse 两种常用地震定位方法以及上文给出的三种定位速度模型,分别进行了两组地震定位试验。第一组是观测条件较好的情况,用 59 个地震参考事件的所有数据来进行地震定位试验;第二组是模拟观测条件较差的情况,即对地震参考事件删除了震中距 < 40 km 的数据以及删除了一些台站的数据使地震的空隙角 > 110°,并保证每个地震至少有 4 个台站的数据。删除台站数据使地震空隙角 > 110°的方法是,首先计算地震的次空隙角,如果它 > 110°,则删除次空隙角所夹的台站并结束,反之则循环删除次空隙角所夹的台站,直到该地震的空隙角 > 110°。

图 5 给出了第一组试验的对比结果。在观测条件较好的情况下,图中显示两种定位方法与三种速度模型的组合定位试验,都能较为准确的确定参考事件的震中位置,而确定参考事件的深度时却有一些差别,更高精度的一维速度模型(模型 3)能够提高地震定位精度。图 6 给出了第二组试验的对比结果,在观测条件较差的情况下,即地震的空隙角 > 110°且无近台资料(震中距 ≤ 40

km) 的情况下,定位结果与参考位置相差较大,说明在观测条件不佳时,地震定位具有较大的不确定性。

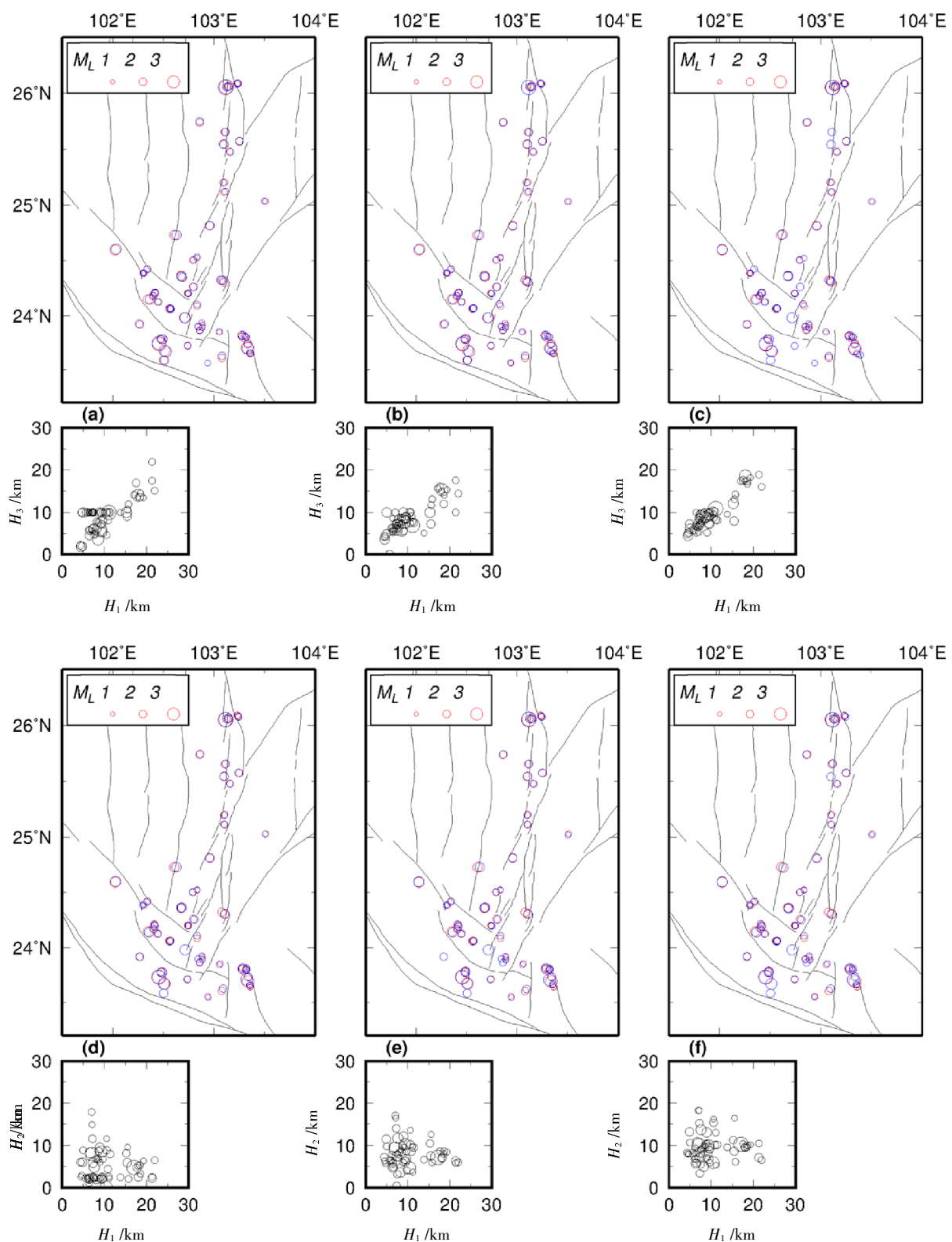
图 7 和图 8 分别给出了在观测条件较好和较差的情况下,定位试验结果偏差的统计直方图。在观测条件较好时(图 7),定位试验的震中结果与参考位置的偏差都小于 5 km,震源深度的偏差个别较大,这表明观测条件好时,与震源深度相比,震中位置几乎不依赖速度模型。在观测条件较差时(图 8),约 90% 的震中偏差小于 5 km,而震源深度的不确定性更大,定位程序甚至不能给出震源深度而固定深度为初始值(比如,10 km)。

Lomnitz^[6]提出的地震定位的三条原理中指出不需要走时表(速度模型)也可以测定出地震震中,即震中确定不依赖速度模型,这与本文的定位试验结果一致。

4 讨论

上述试验结果及分析表明,在观测条件较好时,利用 Hyposat 和 Hypoinverse 两种常用的地震定位方法进行地震定位时,特别是在确定地震的震源深度方面,区域速度模型优于全球速度模型,而在速度模型基本合理的情况下,Hyposat 和 Hypoinverse 两种定位方法定位效果相当,都能给出可靠的震中位置,但是使用全球地壳模型 CRUST2.0 时,Hypoinverse 定位方法不能给出合理的震源深度;由于全球地壳模型 CRUST2.0 的速度模型主要来源于面波层析成像反演得到的 S 波速度,对体波走时不敏感,从而导致利用该模型不能较好的确定震源深度;通过利用 Kissling 提出的方法进一步获取精确的一维速度模型(模型 3)能够提高地震定位的精度。在观测条件较差时,地震定位具有较大的不确定性。因此在台站分布不好时,应该尽可能使用更加合理的速度模型,从而降低地震定位的误差。

Lomnitz^[6]指出地震定位的问题是一个病态问题,速度模型的不精确会加剧地震定位的不确定性。在进行地震精定位研究工作中,选取精确的速度模型是至关重要的一个步骤,因此在利用目前常用的基于一维速度模型的地震定位方法进行精定位工作时,一维速度模型应尽可能选择人工地震测深的结果,在研究区能够收集足够的地震走时资料时,利用 Kissling 提出的方法获取研究区“最小一维速度模型”能够进一步提高地震定位的精度。

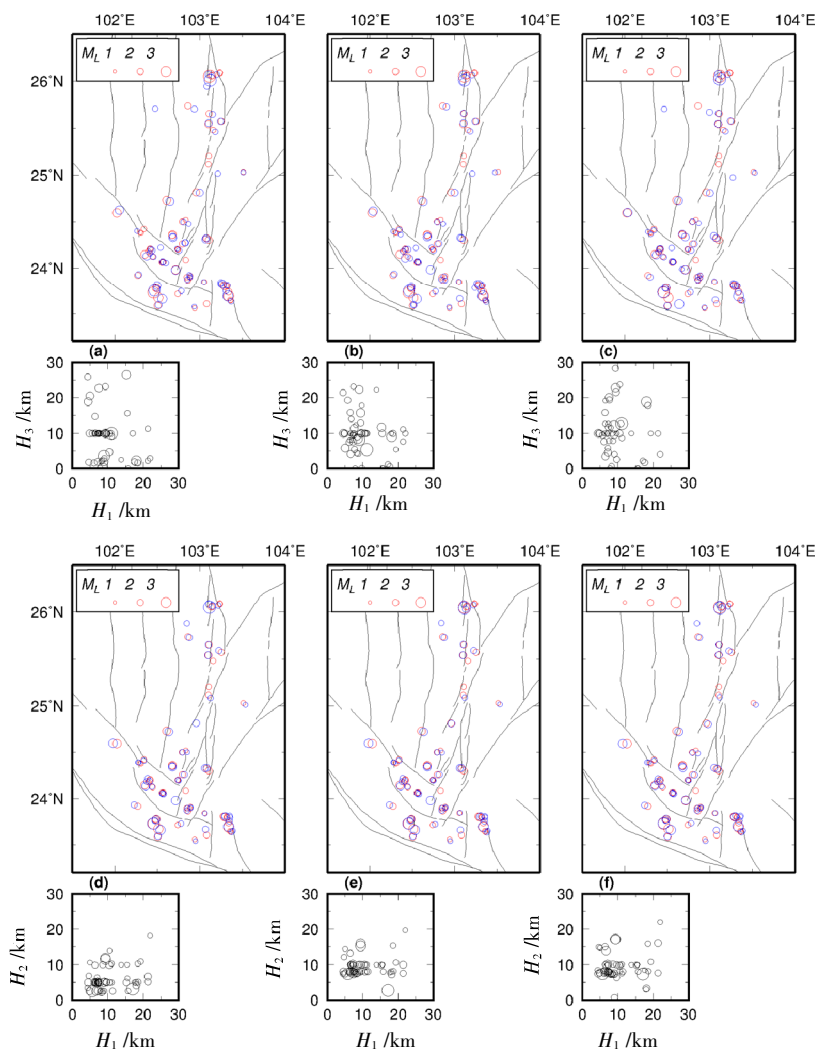


灰色线表示断层, 红色圆圈表示地震参考事件位置, 蓝色圆圈表示定位试验的结果

(a) Hyposat+模型 1; (b) Hyposat+模型 2; (c) Hyposat+模型 3; (d) Hypoinverse+模型 1; (e) Hypoinverse+模型 2;
(f) Hypoinverse+模型 3; H_1 为参考事件的震源深度; H_2 为 Hypoinverse 计算的震源深度; H_3 为 Hyposat 计算的震源深度

图5 第一组地震定位试验对比结果

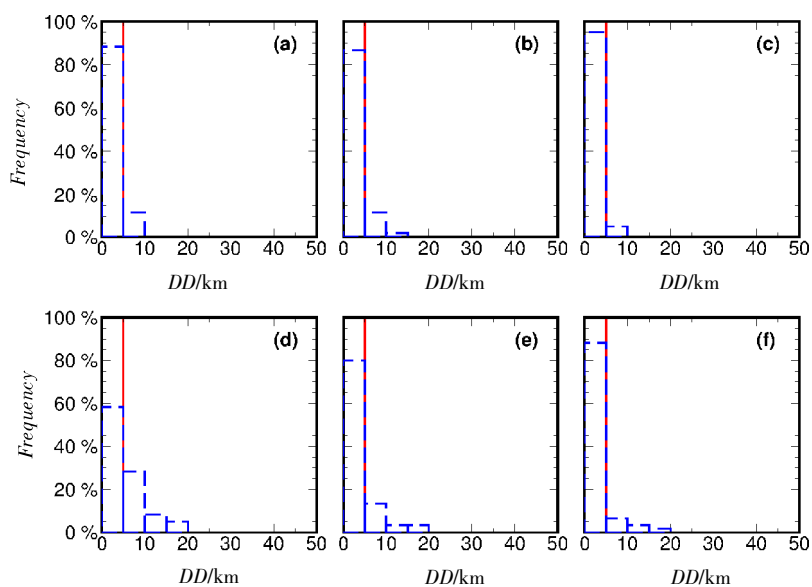
Fig.5 The comparison of earthquake location test of the first set



(图例说明如图 5)

图 6 第二组地震定位试验对比结果

Fig.6 The comparison of earthquake location test of the second set

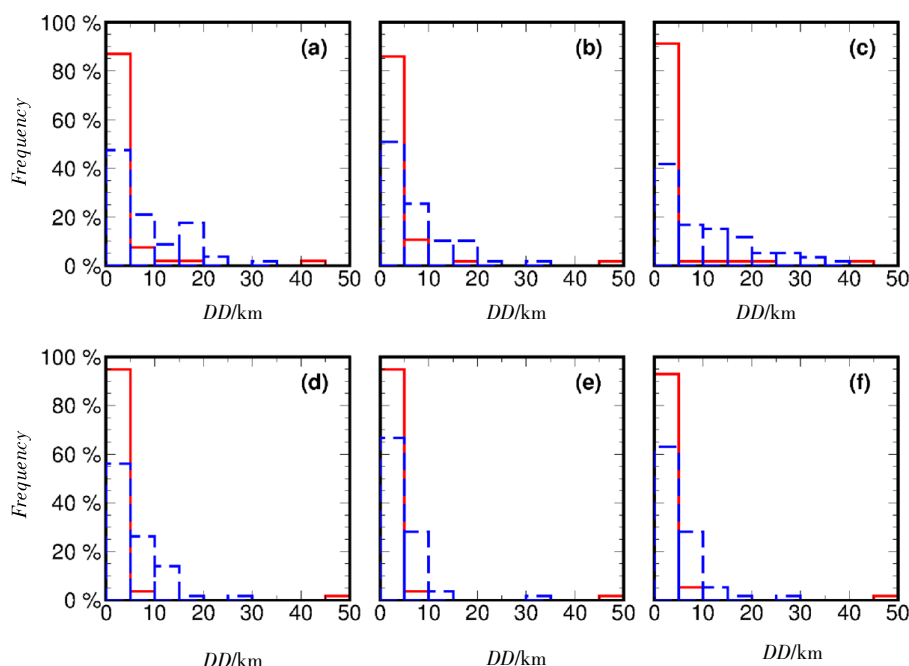


红色实线为震中偏差的直方图, 蓝色虚线为震源深度偏差的直方图, DD 为震中/震源深度偏差

(a)Hyposat+模型 1;(b)Hyposat+模型 2;(c)Hyposat+模型 3;(d)Hypoinverse+模型 1;(e)Hypoinverse+模型 2;(f)Hypoinverse+模型 3

图 7 第一组试验定位偏差统计直方图

Fig.7 The histogram of location deviation of the first set



(图例说明如图7)

图8 第二组试验定位偏差统计直方图

Fig.8 The histogram of location deviation of the second set

5 结语

本文利用小江断裂带流动地震台阵观测到的59个地震参考事件,比较了不同方法和速度模型的定位效果,获得了以下几点认识:

(1) Hyposat 和 Hypoinverse 两种方法的定位效果相当,使用人工地震测深速度模型的定位效果优于全球速度模型。因此,定位速度模型应尽量选择人工地震测深的结果。在研究区能够收集足够的地震走时资料时,利用 Kissling 提出的方法获取研究区“最小一维速度模型”能够进一步提高地震定位的精度。

(2) 在速度结构横向变化较小以及观测条件较好时, Hyposat 和 Hypoinverse 定位方法确定震中位置对速度模型的依赖较少,而震源深度却较为依赖速度模型。

(3) 在观测条件较差时,即定位空隙角大于 110° 且无近台(震中距小于 40 km)参与定位时,不同方法给出的定位结果误差变大。因此,在使用这种定位结果时,应根据研究需要对地震目录进行必要的筛选。

参考文献:

- [1] 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, 18 (5): 59-67.
- [2] Wu Y. M., Chang C. H., Hsiao N. C., et al. Relocation of the 1998 Rueyli, Taiwan, earthquake sequence using three -dimensions velocity structure with stations corrections [J]. Terre. Atmos. Oceanic Sci., 2003, 14 (4): 421-430.
- [3] Chen H., Chiu J. M., Pujol J., et al. A simple algorithm for local earthquake location using 3D Vp and Vs models: test example in the central United States and in central eastern Taiwan[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2006, 96 (1): 288-305.
- [4] Kissling E., Ellsworth W.L., et al. Initial reference models in local earthquake tomography [J]. J. Geophys. Res., 1994 (99): 19 635-19 646.
- [5] 吴建平, 杨婷, 王未来, 等. 小江断裂带周边地区三维 P 波速度结构及其构造意义[J]. 地球物理学报, 2013, 56 (7): 2 257-2 267.
- [6] 吴建平, 黄媛, 张天中, 等. 汶川 8.0 级地震余震分布及周边区域 P 波三维速度结构研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52 (2): 320-328.
- [7] Fang L. H., Wu J. P., Wang W. L., et al. Relocation of the mainshock and aftershock sequences of $M_s 7.0$ Sichuan Lushan earthquake[J]. Chin Sci Bull, 2013, 58: 3 451-3 459.

- [8] Fang L. H., Wu J. P., Liu J., et al. Preliminary Report on the 22 November 2014 M_w 6.1/ M_s 6.3 Kangding Earthquake, Western Sichuan, China. *Seismol [J]. Res. Lett.*, 2015, 86 (6): 1 603–1 613.
- [9] Bondár I., Myers S. C., Engdahl E. R., et al. Epicentre accuracy based on seismic network Criteria. *Geophys[J]. J. Int.*, 2004, 156: 483–496.
- [10] 吕作勇, 杨传成, 房立华. 广东地震台网近震定位精度的经验性 GT 准则[J]. 震灾防御技术, 2014, 9 (增刊): 149–158.
- [11] Laske, G., Masters., G., Ma, Z. et al. Update on CRUST2.0 – A new global crustal model at 2x2 degrees [EB/OL] . [2013 –03 –02] . [Http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html](http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html).
- [12] Schweitzer J. HYPOSAT—an enhanced routine to locate seismic events [J] . *Pure Appl. Geophys.*, 2001, 158 (1–2): 277–289.
- [13] Klein F. W. User's Guide to HYPOINVERSE–2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes[R]. Reston, Virginia: U.S.GS, 2002.
- [14] 张中杰, 白志明, 王椿庸, 等. 冈瓦纳型和扬子型地块地壳结构: 以滇西孟连–马龙宽角反射剖面为例[J]. 中国科学 D 辑–地球科学, 2005, 34 (5): 387–392.
- [15] 李永华, 吴庆举, 田小波, 等. 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, 2009, 52 (1): 67–80.
- [16] Lomnitz C. The theorems of earthquake location[J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2006, 96 (1): 306–312.