

张丽娜, 张红才, 巫立华, 等. NLLoc 定位方法在福建地区的适用性探究[J]. 华南地震, 2021, 41 (1):34-43. [ZHANG Lina, ZHANG Hongcai, WU Lihua, et al. Preliminary Study on the Applicability of NLLoc Method in Fujian Area [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(1):34-43]

NLLoc 定位方法在福建地区的适用性探究

张丽娜, 张红才, 巫立华, 段 刚, 戴丽金, 廖诗荣

(福建省地震局, 福州 350003)

摘要: 利用非线性定位方法 NLLoc, 对 22 次人工定点爆破事件和 88 次福建仙游震群序列 $M \geq 1.5$ 级地震事件进行重新定位, 并与福建台网日常定位方法进行对比, 讨论了 NLLoc 方法在台网日常业务应用中的可行性。研究表明, NLLoc 算法无论是人工爆破还是天然地震, 其定位结果在发震时刻误差、震中误差和震源深度误差等方面都优于现有定位方法结果, 尤其是在震源深度确定方面 NLLoc 算法优势明显。该方法定位仙游序列活动初期深度较浅与 CAP 反演 2012 年 4 月 15 日 M_L 4.1 级地震的震源深度一致, 地震序列活动中后期深度均值略小于理论估值; 而正式目录的地震序列活动初期深度较深, 震源深度差值较大, 地震序列活动中期深度均值大于理论估值。NLLoc 方法可用于台网日常地震定位, 且有助于更好地解决震源深度测定问题, 提高地震定位精度。

关键词: NLLoc 方法; 地震定位; 发震时刻误差; 震中误差; 深度误差

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2021)01-0034-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.01.05

Preliminary Study on the Applicability of NLLoc Method in Fujian Area

ZHANG Lina, ZHANG Hongcai, WU Lihua, DUAN Gang,

DAI Lijin, LIAO Shirong

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China)

Abstract: By using the nonlinear location method NLLoc, the paper relocated 22 explosion events and the 88 events of Xianyou earthquake swarm sequence with $M \geq 1.5$ in Fujian, compared with the daily location methods of Fujian network, and discussed the feasibility of the NLLoc method in the daily application of the network. The results show that the NLLoc method is superior to the common location methods in terms of origin time error, epicenter error and depth error, and especially the NLLoc algorithm has obvious advantages in determining the focal depth. The initial depth of Xianyou sequence activity is shallow, which is consistent with the depth of the event M_L 4.1 retrieved by CAP occurred On April 15th, 2012, and the average depth of the seismic sequence

收稿日期: 2020-06-10

基金项目: 福建省地震局局科技基金项目(SF202011)

作者简介: 张丽娜(1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事地震观测、三维定位等方面研究

E-mail: 171070216@qq.com

activity in the middle and late periods is slightly smaller than the theoretical estimation. While the seismic sequence activity in the official catalogue has a deeper initial depth and a large difference in focal depth, and the average mid-term depth of seismic sequence activity is greater than the theoretical estimation. In summary, the NLLoc method can be used for daily earthquake location of the network, which is better to solve the problem of focal depth measurement and expected to improve seismic location accuracy.

Keywords: NLLoc method; Seismic location; Original time error; Epicenter error; Depth error

0 引言

地震定位是地震学中基础问题之一,也是地震台网的基本任务之一。地震定位结果对于震源几何构造的研究、地壳应力场分析等具有重要的意义。快速准确的地震速报并产出地震目录,也可为地震应急救援、震后减灾和救灾及震后地震趋势预测等提供基础数据^[1]。地震定位包括确定震源位置和发震时刻,其精度受到定位方法、地壳速度模型等诸多因素的影响。地震定位方法研究及地震定位精度的提高,一直是地震学研究的基本课题。

2000 年, Lomax 等^[2]研究学者提出一种非线性搜索定位方法 NLLoc, 并开发了地震定位程序 NonLinLoc (<http://alomax.free.fr/nlloc/>)。Stephan^[3]利用 NLLoc 定位方法对中国台湾黄石国家公园地区的 25 267 个地震事件重新定位, 与原始地震位置相比, 重新定位的位置条带状分布特征更明显。Yavor 等^[4]采用 NLLoc 定位方法对加利福尼亚南部地震事件进行定位, 进而对该地区活动断层特性等进行探索。Theunissen^[5]等研究指出三维速度模型能够更好地解决深度定位问题, 尤其是在台网边界地区 (如间隙角大于 180°和首台距离大于 15 km), 并且采用等时差 EDT 的 NLLoc 定位方法, 给出震源参数及其误差分析。Antonino^[6]应用 NLLoc 方法分析了台站位置分布对定位震源位置质量的影响, 指出 NLLoc 方法是一个快速有效的自动定位方法, 即使使用较少的地震震相, 定位结果仍然可靠有效, 且该算法对到时中的噪声影响并不敏感。区别于标准的三维线性迭代法, NLLoc 方法还给出了位置不确定性分析和解析度信息。韩雪君^[7-8]也简要介绍了 NLLoc 定位方法, 并将八叉树搜索方法应用于预警的三维实时定位中, 能够快速给出震源在三维空间的可能位置。可见, 该方法有望大幅改善地震定位精度。

本文利用“福建及台湾海峡深部构造海陆联测”项目实施的 22 次人工爆破事件记录和 88 次福建仙游震群序列 $M \geq 1.5$ 级地震事件记录, 应用 NonLinLoc 地震定位程序重新定位, 检验 NLLoc 方法在福建台网地震定位中的适用性。为方便与现有定位算法进行对比, 本文定位中同样采用华南地区一维速度模型^[9], 如表 1, 并将其网格化为三维速度模型进行使用, 输入相关震相文件, 进行重定位, 将其重定位结果与台网常用定位方法 (Hyposat、HYP2000、LocSAT 和单纯型) 作对比, 并对该方法定位结果的可靠性进行分析。

表 1 华南模型

Table 1 South China model

层深/km	速度/(km·s ⁻¹)	
	P	S
0	6.01	3.55
21.4	6.88	3.93
32.4	7.98	4.58

1 定位方法简介

1.1 NLLoc 方法及主要算法

地震定位方法 NLLoc 是一种基于三维速度模型的非线性搜索定位方法, Lomax 开发的定位软件 NonLinLoc 能够产出欠拟合函数、震源位置和边际后验概率密度函数估计 (如式 (1))。该程序基于 Tarantola 等^[10]的反演方法以及 Tarantola 等^[10]、T.J. Moser 等^[11]和 Wittlinger 等^[12]的地震定位方法。假设震相到时观测误差 (震相拾取误差) 和理论走时误差符合高斯分布, 在给定的观测到时和由观测台站和空间网格点计算出的理论走时, 这个假设能够计算发震时刻的最大概率值。四维的地震定位问题就转化为三维空间的网格搜索问题。

$$Q(m) = k \cdot p(m) \int_D \frac{p(d)F(d, m)}{\mu(d, m)} dd \quad (1)$$

式(1)中, k 为归一化常数, D 为数据空间, $d \in D$, $p(d)$ 为概率密度函数, $p(m)$ 代表震源位置参数向量 m 的先验概率密度函数, $F(d, m)$ 为正演问题的概率密度函数, $\mu(d, m)$ 通常设为均匀分布。该式的积分项一般称作似然函数, 记为 $L(m)$ 。假设观测数据的概率密度函数 $p(d)$ 为高斯分布, 均值为 d_0 和协方差矩阵为 C_d , d 和 m 的不确定性是可忽略的且是相互独立的, 则 $\mu(d, m) = \mu(d) \cdot \mu(m)$, 其中 $\mu(d)$ 通常被认为是常数。通过简化, 似然函数可定义为:

$$L(m) = \exp\left\{-\frac{1}{2} [d_0 - f(m)]^T C_d^{-1} [d_0 - f(m)]\right\} \quad (2)$$

NLLoc 方法中采用等时差(EDT)格式^[13-14]的似然函数, 当出现异常值时, 该格式是稳健的。在等时差情况下, 该似然函数可简化为:

$$L(x) = \left[\sum_{a,b} \frac{1}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}} \exp\left(-\frac{\{[T_a^0 - T_b^0] - [TT_a^c(x) - TT_b^c(x)]\}^2}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2}\right) \right]^N \quad (3)$$

式(3)中, X 是 m 的空间上分量; 对于两个观测台站, T_a^0 和 T_b^0 是观测到时, TT_a^c 和 TT_b^c 是理论走时; σ_a 和 σ_b 是观测到时和理论走时的标准差。

式(3)中, $[T_a^0 - T_b^0]$ 和 $[TT_a^c(x) - TT_b^c(x)]$ 分别为 a 和 b 两个台站的观测到时差和理论走时差。当这两项差值相等时, 该指数达到最大值为 1, 称为“等时差”法(EDT)。指数非零情况下, 满足指数最大值为 1 的点 x 在三维空间中形成一个“胖”曲面。由于该式中指数外求和, 如果出现异常观测数据时, 该式比其它范数更稳健。从式(3)可知, 似然函数无需计算发震时刻, 从而反演问题转化为搜索三维的参数问题, 进而提高了 EDT 方法的鲁棒性。概率的定位求解问题(1)式就转化为求一个边际后验概率密度函数 PDF(x):

$$PDF(x) \propto k \cdot p(x) \cdot L(x) \quad (4)$$

1.2 八叉树搜索算法

NonLinLoc 程序中, 其搜索方法有多种选择, 如八叉树法、网格搜索法等, 本文选择八叉树搜索法进行定位。八叉树搜索法在三维空间中使一种准确、高效的全局搜索法, 对产生的样本细胞不断递归细分。首先, 初始化一个给定的空间, 计算每个网格中心点的概率值, 将其概率值放置有序列表 L_p 中, 接着将概率值最大的点剖分成 8 个子细胞, 计算 8 个子细胞的概率值并继续放入概率列表 L_p 中, 然后, 从列表中选出概率最大点

再次剖分, 再次循环, 直到满足给定的终止法则。这是一个快速收敛的递归过程, 比网格搜索法快, 比模拟退火法和遗传算法更具有全局性, 但缺点是依赖于初始网格大小和初始点。

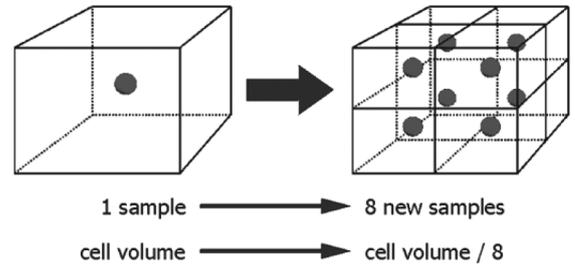


图1 八叉树搜索采样单元 (<http://alomax.free.fr/nlloc/>)

Fig.1 Oct-tree searching method sampling cell

每个细胞中震源位置的概率计算近似如下:

$$PDF(x) \propto k \cdot p(x) \cdot L(x) \quad (5)$$

式(5)中, V_i 是单元体积, x_i 是细胞中心坐标。

1.3 NonLinLoc 主程序简介

NonLinLoc 主程序定位流程图如图 2(此流程图仅示意 NonLinLoc 部分产出结果), 首先, 输入一维(1D)速度模型或三维(3D)速度模型生成一个三维网格速度文件, 进而计算三维网格走时文件; 走时文件可产出走时图, 亦可对给定的震源位置 Time2EQ 模块计算预测走时; 输入事件的震相应用 NLLoc 模块定位, 即可寻找最优的震源位置和发震时刻, 并产出结果文件和结果展示图。

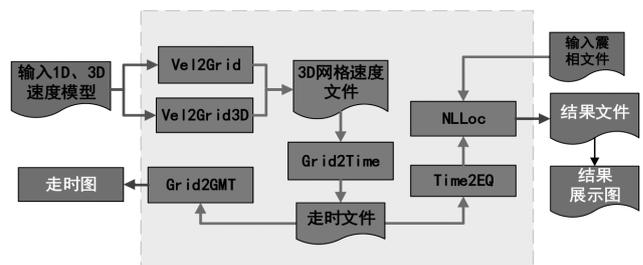


图2 NonLinLoc 主程序流程图

Fig.2 The flow chart of NonLinLoc main program

1.4 福建台网常用定位方法

福建台网中心目前采用 Jopens 系统 MSDP 软件作为地震定位软件, 进行台网地震速报和地震编目等工作。福建省常用的网内及网缘事件定位方法为: 单纯型、Hyposat、HYP2000 和 LocSAT 等方法。

单纯型是利用基础数学上的单纯形搜索极值,

达到终止法则如残差最小的理论模型作为震源位置,该方法在极值附近收敛较慢,对初始值比较敏感^[5],适用于地方震、近震和远震的定位程序。

HYP2000 和 Hyposat 都采用传统 Geiger 法的基本思路,即观测方程组降维后直接用奇异值分解最小二乘法方程组,实际计算中采用多种数据加权^[6]。HYP2000 可采用分区水平分层速度模型,可以为每个地震台站指定不同的速度模型,定位起始位置均采用近台初值,该法适用于网内震。而 Hyposat 不仅可定位地方震和近震,也可以定位远震,其定位效果也相对较好。

LocSAT 采用传统 Geiger 法的基本思路,应用

阻尼最小二乘法,即将观测方程组化为正规方程组后用主元素消去法求解。该法无法加权,为了计算初值,采用水平分层速度模型^[7]。该方法对于地方震、近震及远震均可定位。

2 研究使用数据情况

2.1 22 次人工爆破事件

2010 年至 2014 年,福建省地震局“福建及台湾海峡深部构造海陆联测”项目实施期间,共进行 22 次人工爆破激发实验,激发时刻及震中位置信息见表 2。

表 2 22 次人工爆破信息
Table 2 The catalogs of 22 explosions

序号	发震时刻/(年-月-日 h:min:s)	经度/(°)	纬度/(°)	深度/km	地名
1	2010-09-01 01:00:13.1	117.87	24.68	0	漳州市长泰陈巷镇林场
2	2010-09-01 01:10:14.8	116.58	25.40	0	龙岩市连城县新泉镇新罗村
3	2010-09-11 01:00:13.3	116.07	25.62	0	龙岩市长汀县四都镇红寮村
4	2010-09-11 01:10:14.5	117.23	25.06	0	龙岩市漳平市永福镇林场
5	2011-08-23 01:00:16.4	119.71	25.47	0	平潭县北厝
6	2011-08-23 01:10:14.6	119.16	25.92	0	闽侯县南屿镇九都村
7	2011-08-28 01:00:16.7	118.56	26.58	0	南平市延平区巨口镇半岭村
8	2011-08-28 01:10:14.6	118.04	26.82	0	南平市延平区峡阳镇江杜溪村
9	2011-08-28 04:10:14.5	117.64	27.29	0	邵武市吴家塘镇铁罗村
10	2012-07-18 01:00:20.2	118.98	25.04	0	惠安净峰镇松村
11	2012-07-18 01:10:16.3	118.53	25.25	0	南安市乐峰镇印山林场
12	2012-07-23 01:00:21.1	117.69	25.71	0	三明市大田县上京镇东边坑村
13	2012-07-23 01:10:17.3	117.34	26.16	0	三明市永安市大湖镇新洋村
14	2012-07-23 01:20:15.4	116.82	26.40	0	三明市宁化县湖村镇中坑村
15	2012-07-29 01:00:15.5	117.64	24.04	0	漳州市漳浦县霞美镇梅田村
16	2012-07-29 01:20:15.9	116.29	24.93	0	龙岩市武平县岩前镇宁洋村
17	2012-07-29 04:20:15.9	115.92	25.18	0	龙岩市武平县东留乡兰畚村
18	2012-08-08 01:00:20.8	116.87	24.60	0	龙岩市永定县下洋镇多兴村
19	2014-06-16 01:00:16.1	116.08	25.51	0	福建省长汀县洪山乡
20	2014-06-16 01:10:14.3	117.40	24.58	0	福建省南靖县龙山乡
21	2014-06-18 01:00:14.8	117.78	24.26	0	福建省漳浦县赤岭乡
22	2014-06-23 01:00:17.5	117.57	24.80	0	福建省华安县沙建乡

本文利用这些人工爆破记录资料,首先采用 MSDP 软件进行分析。由于震中距大于 150 km 后大部分 Pn 震相比较弱,到时位置拾取误差较大,因

此本文拾取震中距 150 km 内的清晰震相(主要震相为 Pn、Pg 和少量 Sg),并剔除存在时钟误差的台站的震相数据。随后,分别采用目前福建台网

常用的 Hyposat、HYP2000、LocSAT 和单纯型等四种定位程序及 NLLoc 定位程序进行地震定位。福建台网常用定位方法和 NLLoc 定位程序采用的速度模型均为华南模型。在定位事件时，Hyposat 定位可以设置自定义初始化选择和深度反演类型；该初始化选项中，初始化深度设置为 10 km，初始深度误差设置为 10 km，深度计算设置为“同时”；LocSAT 设置选项中，初始深度设置为 10 km，深度计算设置为“同时”，迭代次数为：40。

2.2 88 次 $M \geq 1.5$ 级仙游地震序列事件

本文选取 2010-01-01—2019-09-01 福建仙游震群序列 $M \geq 1.5$ 级天然地震共 88 个，拾取震中距 150 km 内的清晰震相，并剔除存在时钟误差、断记等震相数据，利用 NLLoc 方法进行重定位，检验其定位天然地震事件的可靠性。

3 定位结果分析

3.1 22 次人工爆破重定位结果分析

3.1.1 定位震中误差分析

MSDP 自带的定位方法 Hyposat、HYP2000、

LocSAT、单纯型和 NLLoc 方法均使用华南模型，得到的地震定位结果震中分布如图 3。从表 3 可见，5 种定位方法中，NLLoc 方法定位震中误差为 0.38 ± 0.19 km，结果最优；使用 Hyp2000 方法震中误差均值 0.72 ± 1.09 km，定位效果较差。而单纯型和 LocSAT 定位震中误差结果介于二者之间。

3.1.2 发震时刻误差分析

如图 4 所示，NLLoc 方法发震时刻误差较小，为 0.35 ± 0.13 s。除了 HYP2000 定位法有 45.45% 的事件发震时刻误差超过 1s，福建台网日常定位的其它方法发震时刻误差均值均在 1s 以内。

3.1.3 深度值分析

如图 5 所示，采用华南模型的 NLLoc 方法深度误差最小： 0.75 ± 1.62 km。而 MSDP 自带的定位方法 Hyposat、HYP2000、LocSAT 和单纯型中，其深度误差均值均超过 2 km。NLLoc 方法定位深度误差优于其它方法，也表明该方法在定位事件深度上具有明显的优势。

3.2 88 次 $M \geq 1.5$ 级仙游地震序列重定位结果分析

通常天然地震震源深度比人工地震要深得多，天然地震波所通过的路径也复杂得多，而人工爆

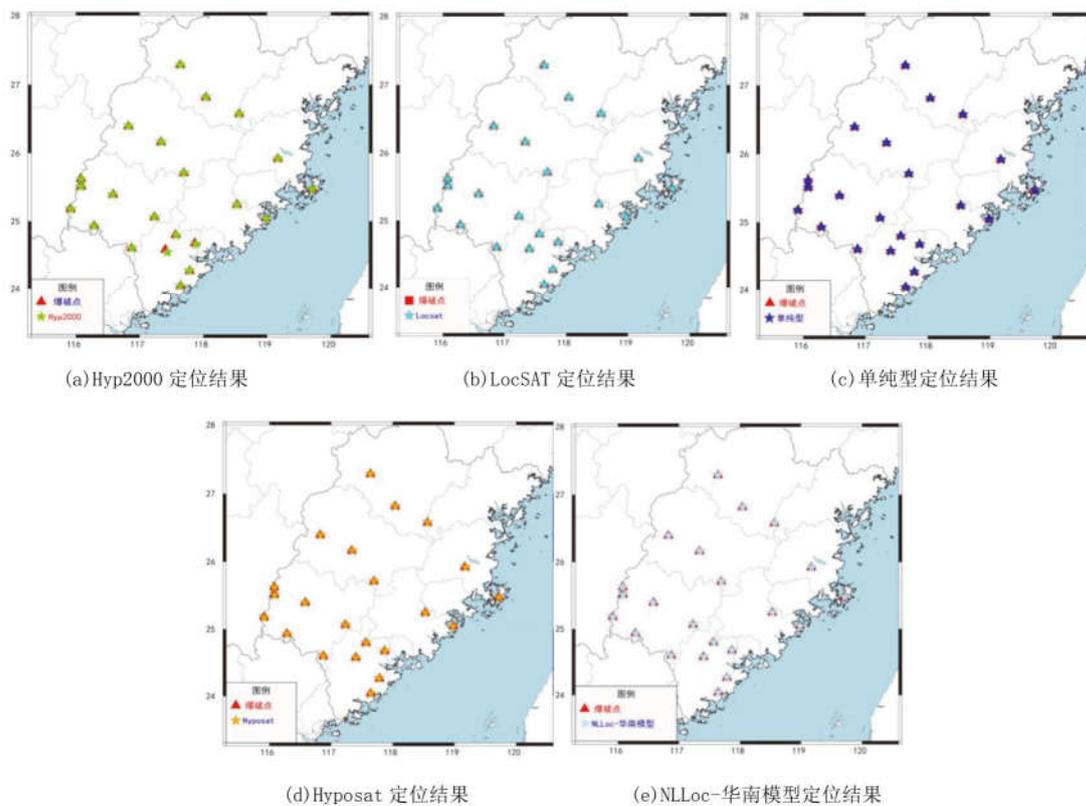


图 3 5 种定位方法的震中位置图

Fig.3 Epicenter location maps of the 5 location methods

表 3 震中误差值 (单位: km)
Table 3 Errors of the located epicenters by 5 location methods (unit: km)

序号	单纯型	Hyp2000	LocSAT	Hyposat	NLLoc
1	0.35	2.19	0.18	0.26	0.40
2	0.65	0.76	0.68	0.62	0.73
3	0.79	0.21	0.27	0.30	0.34
4	0.56	0.41	0.49	0.17	0.14
5	1.47	0.57	0.88	0.77	0.75
6	0.93	0.34	0.32	0.83	0.43
7	0.48	0.17	0.70	0.55	0.59
8	0.16	0.03	0.29	0.18	0.35
9	0.13	0.22	0.78	0.13	0.10
10	0.23	0.29	0.69	0.69	0.09
11	0.34	0.37	0.57	0.14	0.22
12	0.69	0.18	0.85	0.34	0.29
13	0.55	0.60	0.43	0.57	0.39
14	0.18	0.54	0.52	0.31	0.28
15	0.39	0.40	0.49	0.46	0.37
16	1.08	0.22	0.93	0.48	0.56
17	0.46	0.41	0.61	0.49	0.30
18	0.54	0.39	0.47	0.32	0.48
19	0.39	0.76	0.66	0.77	0.09
20	0.48	5.19	0.38	0.34	0.46
21	0.52	0.72	0.83	0.86	0.63
22	0.30	0.86	0.50	0.35	0.42
均值	0.53	0.72	0.57	0.45	0.38
标准差	0.32	1.09	0.21	0.23	0.19

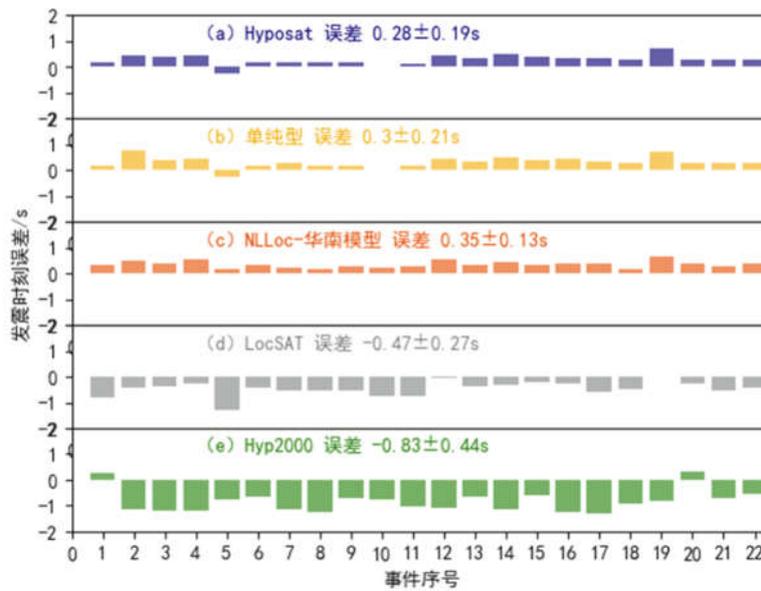


图 4 发震时刻误差图

Fig.4 Errors map of the origin time

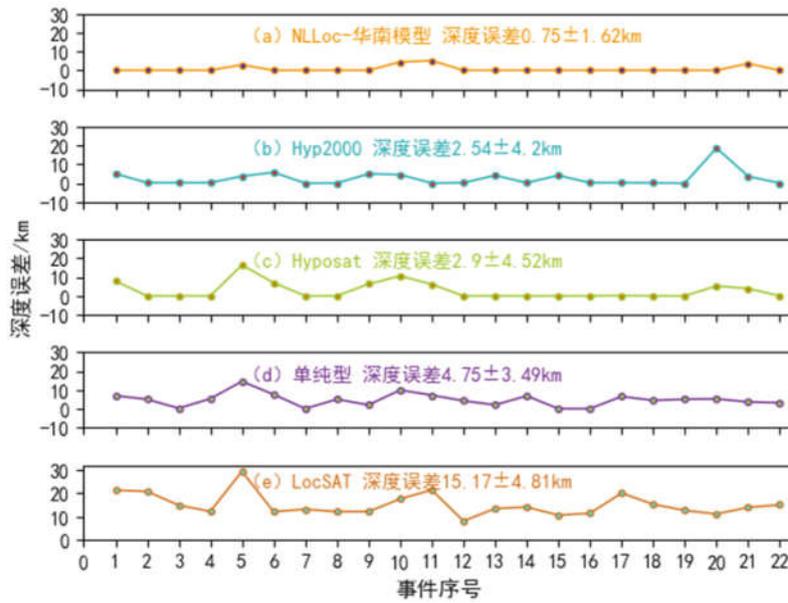


图5 深度误差对比图

Fig.5 Comparison of the depth errors

破深度大多数为几米至几百米，在地表岩层进行，其介质密度低，爆破源是作用时间很短的点源瞬时膨胀力，震源体积也相对小很多。基于这些不同特征，本文利用 NLLoc 方法对 88 次 $M \geq 1.5$ 级仙游地震序列重定位结果分析，检验其定位天然地震事件的可靠性。

3.2.1 定位震中误差分析

如图 6，截止至 2019-09-01，序列活动在时间上存在丛集-平静的特征。利用 NLLoc 方法重定位，仙游序列空间分布如图 7，II、III 和 IV 三个时段地震主要呈北西向线性展布，地震活动空间主体存在自北西向东南方向迁移特征，V 时段地震向西扩散，主要分布在北西向线性展布。该方法定位空间整体分布与袁丽文等^[18]、许振栋等^[19]研究结果较一致。

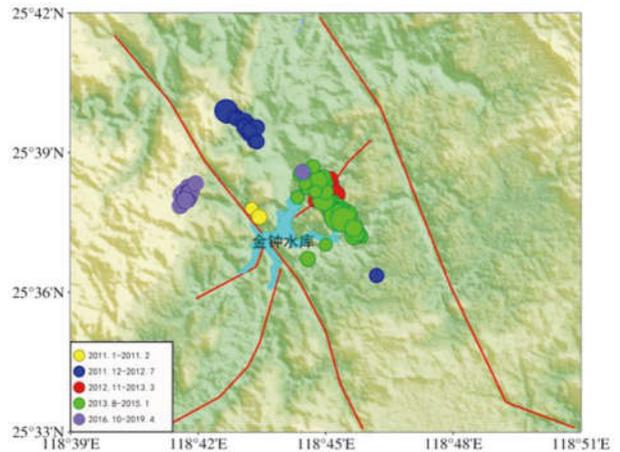


图7 仙游震群序列 $M \geq 1.5$ 空间分布

Fig.7 Distribution map of Xianyou earthquake swarm sequence with $M \geq 1.5$

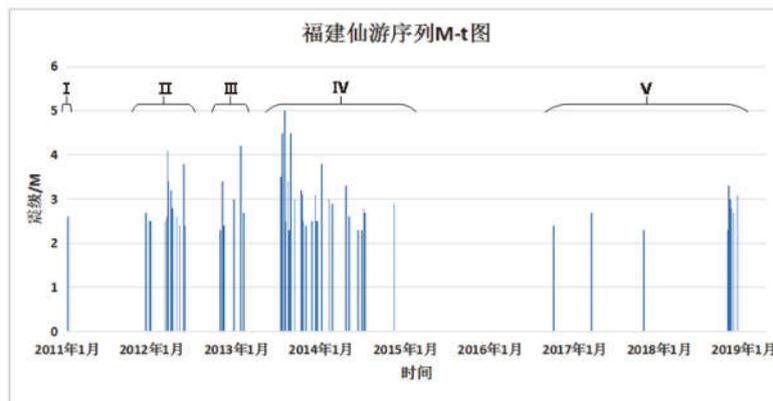


图6 福建仙游序列 $M \geq 1.5$ 级 $M-t$ 图

Fig.6 $M-t$ diagram of Xianyou earthquake sequence with $M \geq 1.5$

利用 NLLoc 方法重定位结果与采用 Hyposat 或单纯型定位的中国台网正式目录对比, 如图 8, 震中误差为: 0.66 ± 0.37 km, 有 2 个地震事件误差超过 1.5 km, 分析这两个事件均为多个事件重叠, 清晰震相少且台数少, 定位效果不佳。

3.2.2 发震时刻误差分析

重定位的发震时刻误差为: 0.16 ± 0.15 s, 误差小。

3.2.3 深度值分析

在震源深度方面如表 4, 利用 NLLoc 方法重定

位结果中, 地震序列活动初期深度较浅 5 km 左右, 与李强等^[20]利用 CAP 反演 2012 年 04 月 15 日 4.1 级地震的震源深度 4 km 一致, 但正式目录中, 地震序列活动初期深度较深, 均值 15 km 左右, 与 CAP 反演震源深度差值较大。2012.11–2013.3 逐渐加深趋势, 深度均值 7.4 km, 2013 年 8 月 4.2 级地震发生后, 地震震源深度分布稳定, 集中分布在 9 km 左右(如图 9)。

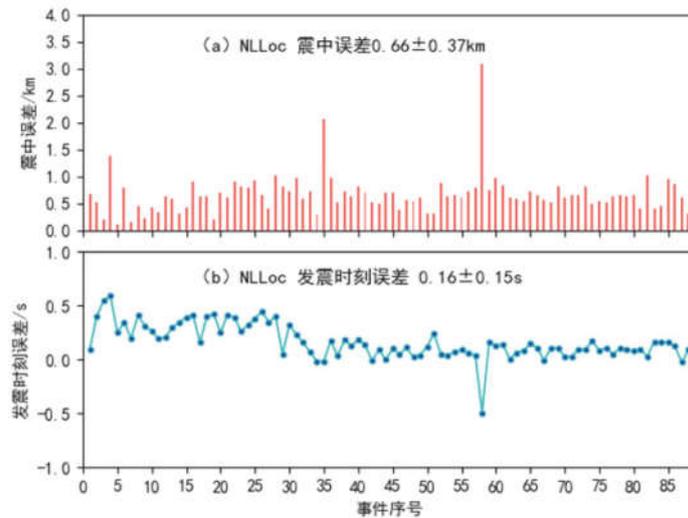


图 8 福建仙游震群序列 $M \geq 1.5$ 震中误差和发震时刻误差图

Fig.8 The epicenter error and origin time error of Xianyou earthquake swarm sequence with $M \geq 1.5$ in Fujian

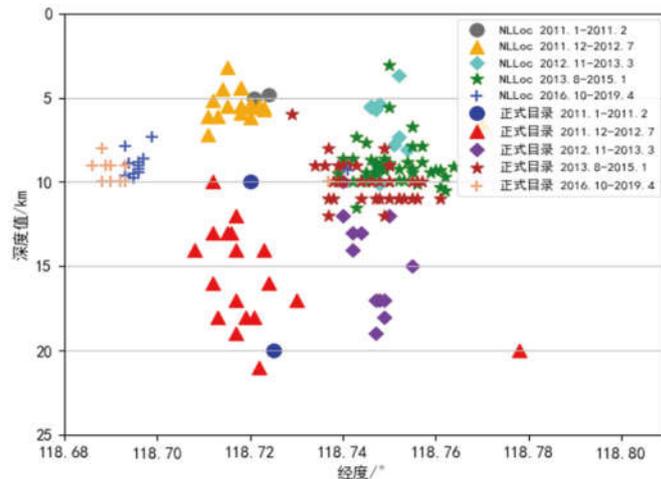


图 9 仙游地震序列 $M \geq 1.5$ 深度时序图

Fig.9 The depth sequence diagram of Xianyou earthquake swarm sequence with $M \geq 1.5$

表 4 深度均值和标准差 (单位: km)

Table 4 the mean and standard deviation of depth (unit: km)

深度均值和标准差/km	2011-01—2011-02	2011-12—2012-07	2012-11—2013-03	2013-08—2015-01	2016-09—2019-04
NLLoc	5.0±0.17	5.5±0.9	7.4±2.14	9.0±1.04	9.0±0.66
正式目录	15.0±7	15.7±3	14.7±2.83	10.0±1.2	8.4±0.63

4 讨论

本文利用三维非线性 NLLoc 定位方法对“福建及台湾海峡地壳深部构造海陆联测”项目实施期间的 22 次人工爆破事件重新定位,并与 Hyposat、HYP2000、LocSAT 和单纯型这四种常用定位算法进行对比,讨论了福建台网应用 NLLoc 程序测定人工爆破事件参数的精度问题。研究结果表明, NLLoc 方法定位结果在发震时刻误差、震中误差和震源深度误差等方面都优于现有定位方法结果,尤其是在震源深度确定方面 NLLoc 方法优势明显。随后,选取 2010 年 1 月至 2019 年 09 月福建仙游震群序列 $M \geq 1.5$ 级共 88 个天然地震,利用 NLLoc 方法重定位,与中国台网正式目录对比,结果显示:深度方面,地震序列活动初期深度较浅,逐渐加深趋势,集中在 9 km 左右,震中位置呈北西向线性展布;但地震序列活动正式目录的深度初期较深,与 CAP 反演震源深度差值较大。

在震源深度方面,如果某一台距离震中较近或就在震中区,则该台震源距与震源深度相近^[21],根据震源距公式 $D = V_{\phi} \times \Delta t$,其中 V_{ϕ} 为虚波速度, $V_{\phi} = (V_p * V_s) / (V_p - V_s)$, Δt 为该台的 S 波与 P 波到时差。福建仙游序列事件中能记录到的最近台站为“福建仙游石苍台 (25.62°N, 118.74°E)”,震中距大约 0.02°,该台的震源距可近似为震源深度。统计该台的观测记录,获得到时差约为 1.2s,结合表 1,推算该台震源距为 10.4 km,则震源深度应略小于 10.4 km,如图 9 所示,利用 NLLoc 方法定位的震源深度略小于理论估值。因此,本文研究认为无论是人工爆破还是天然地震, NLLoc 方法有助于更好地确定事件深度,有望提高台网定位精度。

此外,还存在一些需要进一步讨论和研究细节。首先,拥有已知发震时刻和绝对位置的爆破的数据量有限,并且选取震中距 150 km 以内的台站作为定位事件的界限仅仅是根据经验来确定:震中距在 150 km 内,震相较清晰,参与定位台站数较多;远台震相不清晰,参与定位残差较大,有可能会影响 NLLoc 定位效果。第二,对于网缘(网外)地震的定位问题尚未涉及。本文的 22 次爆破和福建仙游震群序列 $M \geq 1.5$ 事件均为陆上网内事件,震中包围相对较好,定位效果较好。今后将有针对性研究网外事件,进一步探讨该定位程序对该类事件的定位效果。第三,该定位方法输入三维速度模型时,存在依赖于初始值的局限性,

初始值偏离震中位置较远,定位效果不佳。若今后使用三维速度模型定位,将解决依赖初始值的问题。

5 结语

通过本文研究结果表明, NLLoc 算法无论是人工爆破还是天然地震,其定位结果在发震时刻误差、震中误差和震源深度误差等方面都优于现有定位方法结果,尤其是在震源深度确定方面 NLLoc 算法优势明显。该法可用于台网日常地震定位,有助于更好地解决震源深度测定问题,提高地震定位精度。今后,将进一步探究网缘(网外)人工爆破和天然事件的定位效果;该方法为“福建及台湾海峡深部构造海陆联测”项目获取闽台三维地壳速度模型提供地震定位方法。

参考文献

- [1] 杨文东,金星,李山有,等.地震定位研究及应用综述[J].地震工程与工程振动,2005,25(1):14-25.
- [2] Lomax A, Jean Virieux. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: introduction of a metropolis-gibbs method and comparison with linear locations[J]. Advances in Seismic Event Location Thurber Thurber C.H.,and N. Rabinowitz,KJuwer,Amsterdam,2000: 101-134.
- [3] Stephan Husen, Robert B.Smith. Probabilistic earthquake relocation in three-dimensional velocity models for the yellowstone national park region[J].Wyoming, Bull. Seism. Soc. Am.,2004,94(3):880-896.
- [4] Yavor Kamer,Edi Kissling,Tuve T,et al. KaKIOS-16: A probabilistic, nonlinear, absolute location catalog of the 1981-2011 southern california seismicity [J].Bull. Seism. Soc. Am.,2017,107(5):1994-2007.
- [5] T.Theunissen, S.Chevrot, Sylvander M, et al. Absolute earthquake locations using 3-D versus 1-D velocity models below a local seismic network: example from the Pyrenees[J]. J.Geophys., ,2018,212:1806-1828.
- [6] Antonino Mostaccio, Tuve T, D patane, et al. Improving seismic surveillance at Mt. Etna volcano by probabilistic earthquake location in a 3D model [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2013,03(4):2447-2459.
- [7] 韩雪君. 三维复杂介质中实时定位方法的初步研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2011.
- [8] 韩雪君,马延路,刘瑞丰.用于预警的三维实时定位方法[J].地震地磁观测与研究,2012,33(2):32-39.
- [9] 范玉兰,林纪曾,胡瑞贺,等.华南地区近震走时表的研制[J].华南地震,1990,10(2):1-16.
- [10] Tarantola A, Valette B. Inverse problems =quest for

- information [J]. *Journal of Geophysics*, 1982(50): 159-170.
- [11] T.J. Moser, Nolet G, Snieder R. Ray bending revisited [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1992(82): 259 - 288.
- [12] Wittlinger, G., Herquel G., Nakache T. Earthquake location in strongly heterogeneous media [J]. *Geophys. J. Int.*, 1993, 115: 759-777.
- [13] Zhou H. Rapid 3-D hypocentral determination using a master station method [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 15439 - 15455.
- [14] Lomax A. A reanalysis of the hypocentral location and related observations for the great 1906 California earthquake [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2005, 91: 861 - 877.
- [15] 杨选, 康英, 沈玉松, 等. 用爆破事件测试 JOPENs—MSDP 中 4 种定位算法的稳定性 [J]. *地震地磁观测与研究*, 2018, 39(4): 78-87.
- [16] 段刚, 张丽娜, 蔡杏辉. JOPENs 常用定位方法对台湾中深源地震定位差异分析 [J]. *地震工程学报*, 2014, 36(4): 1087-1092.
- [17] 马建新, 陈继锋, 万玉杰. LocSAT 与 Hyposat 方法在青海地区地震定位结果的对比分析 [J]. *高原地震*, 2015, 27(1): 42-46.
- [18] 袁丽文, 李强. 福建仙游地震序列活动特征研究 [J]. *防灾减灾学报*, 2016, 32(2): 97-100.
- [19] 许振栋, 杨贵, 李强, 等. 2019 福建仙游震群活动发展趋势初步分析和讨论 [J]. *科学技术创新*, 2019(18): 1-4.
- [20] 李强, 李军, 袁丽文, 等. 福建仙游震群序列 $M_1 \geq 4.0$ 事件震源机制解与序列活动特征 [J]. *地震*, 2015, 35(4): 147-156.
- [21] 曲均浩, 刘瑞峰, 李金, 等. CAP 反演 2014 年山东乳山 $M4.2$ 、 $M4.0$ 地震震源机制解 [J]. *地震工程学报*, 2014, 36(4): 1076-1080.