

张丽娜, 巫立华, 段刚, 等. 利用NLLoc方法对新疆精河地震的定位研究[J]. 华南地震, 2021, 41(3): 110-115. [ZHANG Lina, WU Lihua, DUAN Gang, et al. Study on the Location of Jinghe Earthquakes in Xinjiang by Using the NLLoc Method[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(3): 110-115]

利用NLLoc方法对新疆精河地震的定位研究

张丽娜, 巫立华, 段 刚, 戴丽金

(福建省地震局, 福州 350003)

摘要: 利用非线性定位方法NLLoc, 对新疆精河地区2017年8月9日至9月30日期间 $M \geq 3.0$ 级的22个地震进行重新定位, 并与中国地震台网中心正式目录结果进行对比, 讨论了NLLoc方法在速度模型复杂的新疆地区定位的可行性。研究表明, NLLoc方法重定位新疆精河地震事件中, 在发震时刻、震中方面误差较小, 满足定位精度要求, 但深度值上相差较大。NLLoc方法定位结果相对较为集中, 主要分布于14~21 km, 与CAP反演的深度分布为12~21 km, 平均深度17 km, 主震的震源深度21 km结果相符合, 且与新疆地区的平均震源深度 21 ± 10 km和北天山地震带的平均震源深度19 km的结论相符。结果显示: NLLoc方法可用于地壳速度结构变化大、分布复杂地区的新疆地震定位, 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, 地震定位, 新疆精河, 发震时刻误差, 震中误差, 深度误差

中图分类号: P315.7

文献标示符: A

文章编号: 1001-8662(2021)03-0110-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.03.15

Study on the Location of Jinghe Earthquakes in Xinjiang by Using the NLLoc Method

ZHANG Lina, WU Lihua, DUAN Gang, DAI Lijin

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China)

Abstract: By using the non-linear location method NLLoc, the paper relocates 22 earthquakes with $M \geq 3.0$ in the Jinghe area of Xinjiang from August 9th to September 30th, 2017, compares them with the official catalog results of the China Earthquake Network Center, and discusses the feasibility of NLLoc method in Xinjiang region where the velocity model is complicated. The results show that the Jinghe earthquake events in Xinjiang relocated by using the NLLoc method has relatively small errors in the time of occurrence and epicenter, which meets the positioning accuracy requirements, but the depth value is quite different. The positioning results of the NLLoc method are relatively concentrated, which are mainly distributed during 14~21 km, and is consistent with the results obtained by the CAP inversion with a depth of 12~21 km, an average depth of 17 km, and a focal depth of 21 km of the main shock. It is also consistent with the conclusion that the average focal depth of the Xinjiang region is $21 \pm$

收稿日期: 2020-12-18

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: zhangln@fjea.gov.cn

10 km and the average focal depth of the northern Tianshan seismic belt is 19 km. In summary, the NLLoc method can be used to locate earthquakes in Xinjiang with large changes in crustal velocity structure and complex distribution, and it helps to better solve the problem of focal depth determination and improve the accuracy of earthquake positioning.

Keywords: NLLoc; Seismic Location; Jinghe, Xinjiang; Original time error; Epicenter error; Depth error

0 引言

地震定位是地震学中最经典、最基础的问题之一,定位结果对于活动构造和地壳应力场分析、震源几何构造的研究等具有重要的意义^[1]。同时,准确快速的地震定位产出及地震速报,应用于地震应急救援、震后减灾和救灾及震后地震趋势预测等方面显得至关重要^[2]。地震定位实质上是根据台站的观测资料确定震源的空间坐标和发震时刻,并对定位结果作出适当的评价。然而,定位结果受到台网布局、可用定位震相,到时震相读取的精度、地壳速度模型等诸多方面的影响^[3-4]。因此,研究学者们不断发展新的定位方法,改进地震定位方法,进而提高地震定位精度^[5]。

地震定位方法早期主要是几何作图法,现如今已形成多种经典的定位方法。1912年德国物理学家Geiger提出计算定位,其实质是将非线性方程组线性化,并通过最小二乘原理求解^[6]。随着计算机技术的飞速发展和广泛应用,许多定位方法得到发展,如:Powell法^[7]、联合定位法JHD^[8]、双差定位法DDA^[9]等,随着多学科的相互交流与渗透,其它学科的最优化方法也应用于地震定位,如遗传算法和模拟退火法^[10]等,特别是近年来基于现代数字地震观测技术和科学计算以及计算机技术的智能化数值自动定位方法得到了迅速发展,并业已成为当前地震定位的主流方法。随着全球及区域速度结构三维层析成像的研究,在此基础上应用三维结构的地震定位已经被人们所关注,如美国哈佛大学一直将提高定位精度列为主要的研究方向^[11]。目前,三维地震定位也被应用于日常地震定位。

研究学者Lomax开发的三维非线性定位方法NLLoc (<http://alomax.free.fr/nlloc/>)使用系统网格搜索或Metropolis-Gibbs随机采样方法或八叉树法,生成一个关于震源空间位置(x, y, z)的“欠拟合”方程、“优化”震源位置和后验概率密度方程(PDF)。NLLoc^[12]中的定位算法遵循了Tarantola等^[13]的反演方法以及Tarantola等^[13]、T.J.Moser等^[14]和Wittlinger等^[15]的地震定位方法。到时观测误差(震相拾取误差)和理论走时均假定符合高斯分布。

这一假设能够在已知观测台站和空间网格点之间的观测到时和理论走时的情况下计算发震时刻的最大概率。从而,4D的地震定位转化为3D的网格搜索问题^[16]。

张丽娜等^[17]利用三维非线性NLLoc定位方法对福建地区22次人工爆破事件和福建仙游震群序列 $M \geq 1.5$ 级共88个天然地震重新定位,并与Hyposat、HYP2000、LocSAT和单纯型等四种常用定位算法进行对比,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福建地区现有定位方法结果,尤其是在震源深度确定方面NLLoc算法优势明显。由于福建地区速度模型差异性不大,故将NLLoc定位方法应用于地壳速度结构变化大、分布复杂的新疆地区,讨论该方法在地壳复杂地区的定位效果。

本文利用NLLoc定位方法,其搜索法选取八叉树法对新疆精河地区2017年8月9日至9月30日期间 $M \geq 3.0$ 级的22个地震进行重新定位,并对其定位结果作分析。

1 资料选取

选取新疆台网2017年8月9日至9月30日期间 $M \geq 3.0$ 级的精河地震作为样本,以中国地震台网中心正式目录结果为标准。震相到时文件均从中国地震台网中心正式报中下载。由于新疆台网台站分布稀疏^[18],200 km以后的台站出现部分震相不清晰,无法确定到时,故台站布局在包围震中且间隙角较小的情况下,统一选用200 km以内的台站参与定位。NLLoc定位方法所采用的速度模型^[19]3400走时表,如表1。

表1 3400走时表

Table 1 Travel time table of 3400

地壳分层	速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)		深度/km
	P	S	
第1层	5.96	3.573	22
第2层	6.302	3.582	57
莫霍面	8.364	4.83	

2 定位结果对比

本文采用的NLLoc定位结果与中国地震台网中

心正式目录对比, 如表2。与台网中心正式目录对比误差结果见图1, 定位结果的偏差分析见表3, NLLoc定位结果与中国台网中心正式目录的地震分布图如图2。

表 2 NLLoc 定位结果和台网中心正式目录
Table 2 Comparison of NLLoc positioning results with the official catalog of China Earthquake Network Center

序 号	台网中心正式目录					NLLoc 定位结果			
	发震时刻 年-月-日 h:min:s	经度 /(°)	纬度 /(°)	深度 /km	震级 <i>M</i>	发震时刻 年-月-日 h:min:s	经度 /(°)	纬度 /(°)	深度 /km
1	2017-08-09 07:27:52.000	82.890	44.270	11	6.6	2017-08-09 07:27:52.253	82.856	44.305	20
2	2017-08-09 07:31:06.300	82.812	44.283	11	4.2	2017-08-09 07:31:06.198	82.806	44.276	17
3	2017-08-09 07:32:51.670	82.746	44.289	15	4.1	2017-08-09 07:32:51.450	82.729	44.284	17
4	2017-08-09 07:35:02.110	82.871	44.317	12	3.2	2017-08-09 07:35:03.316	82.910	44.296	14
5	2017-08-09 07:36:27.620	82.742	44.289	11	3.3	2017-08-09 07:36:27.304	82.733	44.287	15
6	2017-08-09 07:39:18.500	82.740	44.290	12	4.5	2017-08-09 07:39:18.915	82.734	44.294	20
7	2017-08-09 07:44:31.400	82.770	44.300	12	4.8	2017-08-09 07:44:31.737	82.730	44.288	19
8	2017-08-09 08:22:37.960	82.729	44.314	11	4.0	2017-08-09 08:22:37.579	82.728	44.314	17
9	2017-08-09 08:27:26.030	82.705	44.271	13	3.1	2017-08-09 08:27:26.422	82.690	44.287	19
10	2017-08-09 08:40:23.320	82.606	44.287	13	3.6	2017-08-09 08:40:23.182	82.610	44.279	20
11	2017-08-09 08:51:02.560	82.740	44.293	13	3.0	2017-08-09 08:51:02.184	82.732	44.281	20
12	2017-08-09 08:52:34.190	82.727	44.308	12	3.2	2017-08-09 08:52:34.379	82.710	44.293	20
13	2017-08-09 08:54:32.390	82.691	44.280	19	3.1	2017-08-09 08:54:32.476	82.690	44.282	18
14	2017-08-09 13:22:40.400	82.790	44.290	12	4.3	2017-08-09 13:22:41.258	82.738	44.280	21
15	2017-08-09 18:02:09.270	82.854	44.297	6	3.2	2017-08-09 18:02:09.688	82.846	44.306	19
16	2017-08-09 23:47:52.100	82.796	44.324	7	3.3	2017-08-09 23:47:52.588	82.752	44.313	19
17	2017-08-10 01:14:12.790	82.744	44.288	13	3.3	2017-08-10 01:14:13.365	82.697	44.288	21

(转下表)

(接表2)

序 号	台网中心正式目录					NLLoc 定位结果			
	发震时刻 年-月-日 h:min:s	经度 /(°)	纬度 /(°)	深度 /km	震级 M	发震时刻 年-月-日 h:min:s	经度 /(°)	纬度 /(°)	深度 /km
18	2017-08-10 08:10:22.900	82.739	44.253	11	3.2	2017-08-10 08:10:23.406	82.679	44.267	21
19	2017-08-12 02:20:14.540	82.717	44.281	15	3.1	2017-08-12 02:20:14.550	82.716	44.289	18
20	2017-08-12 06:19:06.920	82.709	44.288	15	3.3	2017-08-12 06:19:06.571	82.707	44.274	20
21	2017-08-18 17:19:24.770	82.771	44.293	11	3.4	2017-08-18 17:19:25.332	82.727	44.285	20
22	2017-08-24 04:18:06.830	82.723	44.293	18	3.1	2017-08-24 04:18:06.653	82.742	44.295	21

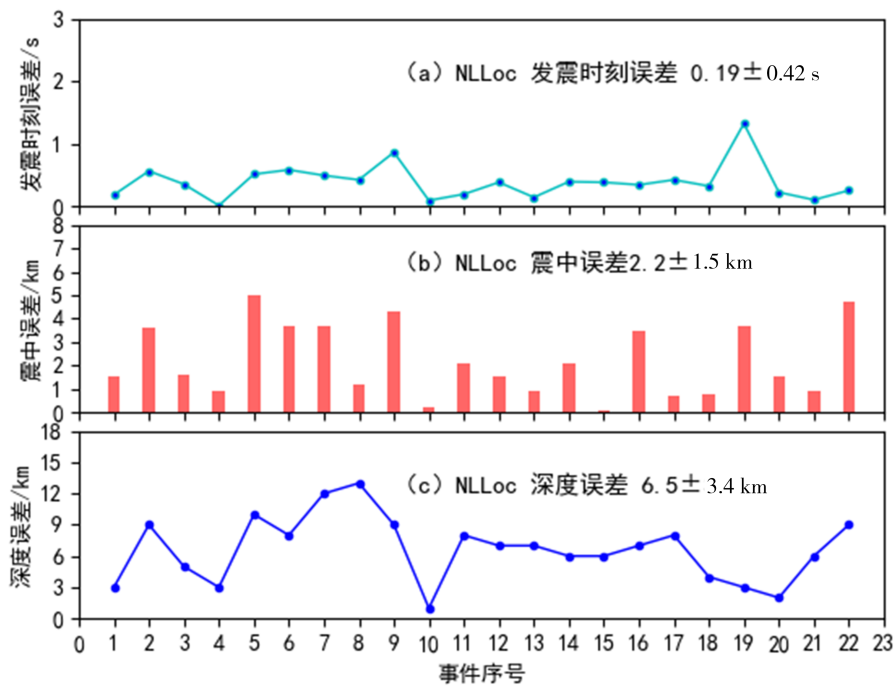


图1 与台网中心正式目录对比误差图

Fig.1 Error map of NLLoc positioning results compared with the official catalog of China Earthquake Network Center

表 3 NLLoc 定位结果震源偏差分析

Table 3 Deviation analysis of the seismic source located by NLLoc method

发震时刻误差/s		震中误差/km		震源深度误差/km	
平均偏差	标准偏差	平均偏差	标准偏差	平均偏差	标准偏差
0.19	0.42	2.2	1.55	6.53	3.41

注:与台网目录对比

3 结果分析

(1)NLLoc 定位结果中的发震时刻误差在 1 s 附

近波动, 偏差小, 满足定位精度要求。
(2)在确定震中经纬度方面, NLLoc 定位的震中误差在 5 km 以内, 且平均偏差 2.2 km, 标准偏

差 1.55 km (见表3), 表明 NLLoc 定位震中结果稳定。如图2的地震目录分布图也表明了 NLLoc 定位震中结果较集中。

(3)在定位震源深度上, NLLoc 定位震源深度误差最大为 13.11 km, 最小为 0.723 km, 其平均偏差为 6.53 km, 标准偏差为 3.41(见表3)。

4 结果讨论

NLLoc 定位震源深度与台网中心正式目录的深度上偏差分析, 可能原因:

(1)中国地震台网中心正式目录中的深度均值为: 12.41 km, 标准差为 3 km, NLLoc 定位结果目录中的震源深度均值为: 19.01 km, 标准差为 1.78

km。仅从数值上分析, 台网中心正式目录偏离均值较大, 而 NLLoc 定位结果中的深度相对较集中, 如图3。

(2)地震定位精度是受到台站布局、到时震相读取误差、走时误差、震相类型及数量、定位算法等多种影响。中国地震台网中心正式目录中所使用的定位方法可能是单纯型、HypoSAT 和 LocSAT 相结合, 根据图3分析, 中国地震台网中心正式目录中的深度分布 10~15 km、5~8 km 和 15~20 km 三个分段的深度, 由于所用定位方法不同, 受复杂速度模型等影响其定位结果有所不同, 造成深度值较为离散。本文所采用的 NLLoc 方法对于定位新疆精河地震的深度值相对较为集中, 主要分布于 14~21 km, 说明此方法对于同一地震序列更能得出较为一致的深度值。

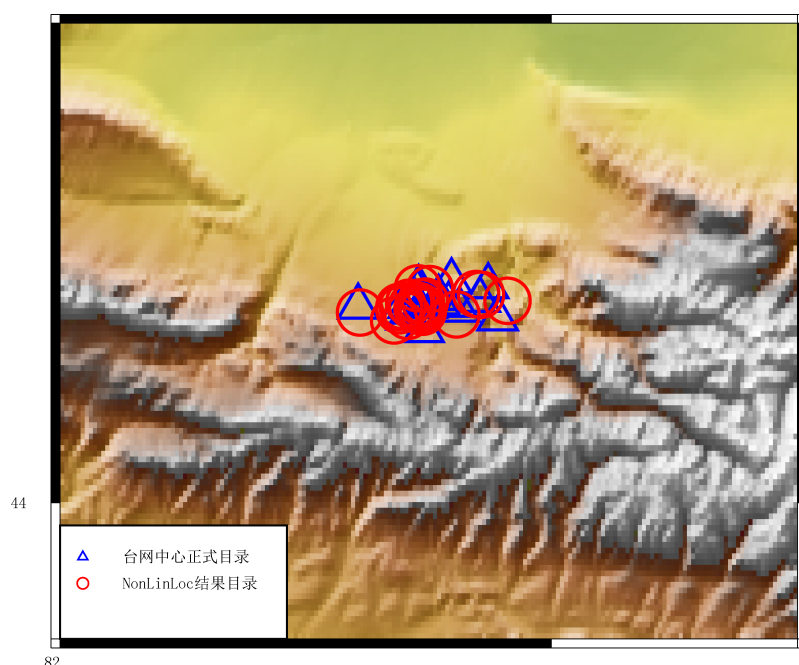


图2 地震目录分布图

Fig.2 Distribution map of earthquake catalog

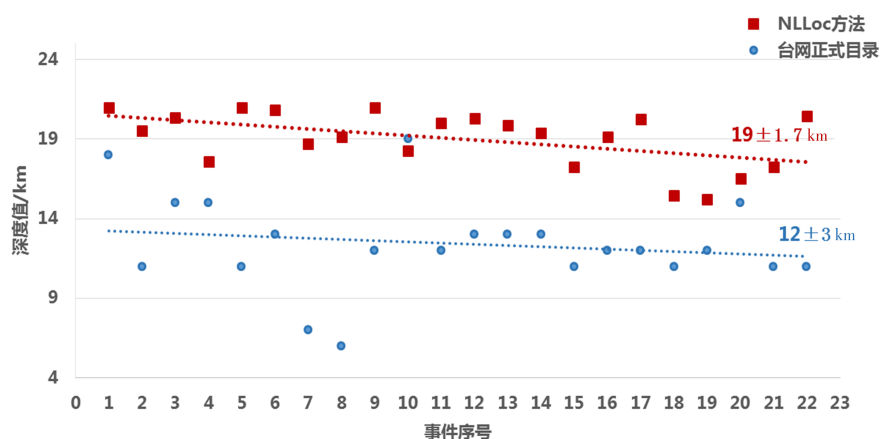


图3 震源深度分布图

Fig.3 Distribution map of focal depth

(3)李艳永,王成虎^[20]反演新疆精河 M_s 6.6地震序列震源机制解的探究结果表明:CAP反演的深度分布为12~21 km,平均深度17 km,深度大部分大于台网中心正式目录结果主震的震源深度21 km。本文NLLoc定位结果深度分布14~21 km与上述结果相符合,且与新疆地区的平均震源深度 21 ± 10 km和北天山地震带的平均震源深度19 km的结论相符^[21]。

此外,还存在一些需要进一步讨论和研究的细节。首先,本文所用的数据有限,并且选取震中距200 km以内的台站作为定位事件的界限,仅仅是根据200 km震相清晰且震相识别较为准确的经验来确定,具有局限性。第二,对于速度结构复杂地区的网缘(网外)地震的定位问题尚未涉及。本文的22次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。

NLLoc定位方法提供了一种可行的定位方法,在地壳速度结构变化大、分布复杂的精河序列中,可以得出较为可靠的震源位置,如果结合较为精确的三维速度模型,可以得出更加可靠的深度值。在下一步的研究中,将此方法应用到更多的区域,同时将对比其他多种方法对比震源深度值,力求在解决震源深度计算这一难题上提供一种行之有效的方法。

致谢:震相到时观测报告、波形数据来自中国地震局,图件使用GMT软件包绘制,感谢新疆地震局张志斌的指导和帮助。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 田玥,陈晓非. 地震定位研究综述[J]. 地球物理学进展,2002,3(1):147-155.
- [4] 孔祥艳,陈向军,赵石柱,等. 新疆数字测震台网“九五”与“十五”运行期间震源深度对比分析[J]. 地震地磁观测与研究,2016,37(2):67-71.
- [5] 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):59-66.
- [6] Geiger L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only [J]. Bull.St.Louis. Univ,1912(8):60-71.
- [7] M.J.Powll. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. [J]. Computer,1964,7(2),155-162.
- [8] A.DOUGLAS. Joint epicenter determination [J]. Nature,1967(215):47-48.
- [9] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault, California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2000,0(6):1353-1368.
- [10] Stephen D B, Kennett B L N, Sambridge M S. Hypo-center location: genetic algorithm incorporating problem-specific information [J]. Geophys.J.Int., 1994,118:693-706.
- [11] 陈棋福,张跃勤,周静. 数字观测时代的全球三维结构与地震定位研究[J]. 地震,2001,21(2):29-40.
- [12] Lomax A J, Virieux P, Volant, et al. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations[M]//Thurber C. H., N. Rabinowitz, KJuwier, Amsterdam. Advances in Seismic Event Location. Berlin: Springer,2000:101-134.
- [13] Tarantola A, Valette B. Inverse problems=quest for information[J]. Journal of Geophysics, 1982(50):159-170.
- [14] T.J. Moser, Nolet G, Snieder R. Ray bending revisited[J]. Bull. Seism. Soc. Am.,1992(82):259-288.
- [15] Wittlinger, G., Herquel G., Nakache T. Earthquake location in strongly heterogeneous media[J]. Geophys.J.Int., 1993(115):759-777.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 孔祥艳,彭笑梅,陈向军. 新疆测震台网常用地震定位方法对比[J]. 地震地磁观测与研究2015,36(3):72-76.
- [19] 陈向军,上官文明,宋秀青,等. 新疆全区和分区地壳速度模型的分析[J]. 中国地震,2014,30(2):178-187.
- [20] 李艳永,王成虎. 2017年8月9日精河 M_s 6.6地震序列震源机制解及震源处应力场特征[J]. 地震工程学报,2019,41(5):1280-1289.
- [21] 王海涛,李志海,赵翠萍,等. 新疆北天山地区 $M \geq 2.0$ 地震震源参数的重新测定[J]. 中国地震,2007,23(1):47-55.