

邹振轩、李俊、周新民等, 2012, 浙江及邻区地震精定位及应用研究, 中国地震, 28(4), 434 ~ 440。

# 浙江及邻区地震精定位及应用研究

邹振轩 李俊 周新民 王政 李金龙

浙江省地震局, 杭州市古荡湾塘苗路 7 号 310013

**摘要** 对 2006 年 2 月 ~ 2010 年 4 月浙江数字地震台网所有记录到的浙江及邻区范围内 437 个地震事件重新进行震相识别及定位, 筛选出震相清晰且有 4 个台站记录的 291 个地震事件后, 用双差地震定位法进行精确定位, 得到多个事件内部相关事件之间的距离。结果表明, 重新定位后地震震源的相对位置比常规地震定位方法得到的结果更加精确。此外本文得到了该区域内多个地震序列的精确活动图像, 并根据新的定位结果讨论了地震分布、发震与断裂构造的关系, 结果显示出较好的一致性。

**关键词:** 浙江及邻区 地震精定位 双差定位法

[文章编号] 1001-4683(2012)04-0434-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

为了研究大地构造的活动过程、地震重复性和地震相互作用, 了解地震活动与断层活动的关系, 需要深入分析地震的时空分布特征, 并了解震源之间的相互位置关系。

根据前人研究, 震源绝对位置的精度主要受几个因素的影响, 包括台网分布的几何形状、可得到的震相、到时读取的精度、对地壳结构的了解程度 (Pavlis, 1986; Gomberg et al, 1990) 和定位方法的选取等。本文通过探讨影响震源绝对位置的精度因素, 在考虑了 Hypo2000 定位方法、单纯形法、双差法的基础上得到浙江及邻区数字地震精定位结果。

浙江省数字地震记录始于 1996 年 2 月, 同时开始地震编目, 本文对浙江省地震台网记录到的本省及邻区地震数据进行梳理, 在充分利用到时数据的前提下, 统一用基于单事件的 Hypo2000、单纯形法重新定出地震震中位置, 再用基于多事件的双差法重新定位, 以期得到地震活动图像, 并根据新的定位结果进一步讨论地震的分布及其与活动断裂的关系。

## 1 地震事件及定位方法

浙江地震台网包括国家台、区域台和水库流动台共 47 个子台, 对全省基本实现了网格化覆盖 (图 1)。

为完成对浙江及邻区地震的精定位, 笔者对 2006 年 2 月 ~ 2010 年 4 月浙江台网记录到

[收稿日期] 2011-11-08

[项目类别] 本研究得到浙江省级科技计划 (2010C33079) 资助

[作者简介] 邹振轩, 男, 1976 年生, 工程师。主要从事地震监测、数字地震学研究工作。E-mail: zouzhenxuan@

163.com

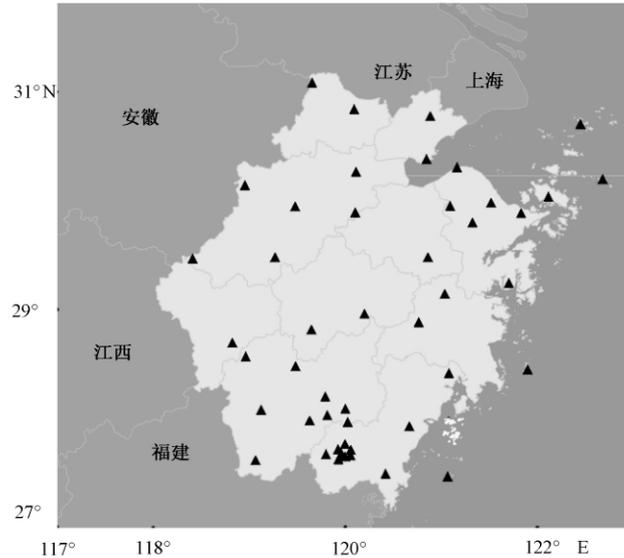


图1 浙江测震台站分布图

的浙江及邻区范围内有 4 个台站记录的共 437 个地震事件的直达波 Pg、Sg 震相进行重新识别,筛选出震相清晰且有 4 个台站记录的 291 个地震事件,共得到 4624 条到时数据,事件筛选出率为 66.59%。

震相到时的精度对于地震的精定位非常重要,本文所用地震数据采集器的时间服务准确到毫秒,现在通用的数字化地震波形记录采样率为 100Hz,即数字化波形的时间分辨率为 0.01s。2009 年 1 月以前地震目录震相到时数据、发震时刻精确到 0.1s,震源深度精确到 1km,地震记录可达到的准确度没有充分利用,本次计算震相到时数据全部精确到 0.01s。

地震波速度模型对地震定位精度影响较大。对地壳结构认识越精细,地震定位精度就越高。本文中采用的是华南地区的 5 层速度模型(表 1)。

现用于地震定位的地震台网分析软件(MSDP)对于以盖革法(Geiger, 1912)为基础的 Hypo2000 定位程序,

表 1 双差定位使用的速度模型

界面深度(km)	0.0	0.5	5.3	26.0	35.7
P波速度(km/s)	3.02	4.52	5.95	7.03	8.00

可完成基于协方差矩阵的定位结果进行误差估计,给出震源位置的水平误差和垂直误差。而采用单纯形法不计算走时空间偏导数的搜索类算法的地震定位程序中,只给出到时残差的均方根值,不能明确给出震源位置的水平误差和垂直误差,只能以此均方根值加上对地震台网的简单描述如使用的台站个数、最近台站的震中距以及反映台网覆盖震中情况的台站空隙角等来评定定位结果的误差等级。

目前在地震目录中,由于采用的地震定位程序不同,对不同地区甚至同一地区的不同地震,在估计其定位误差时,可能采用不同的参数,误差的表达方式也可能不同。这给客观估计不同地区的地震定位能力带来困难,特别是影响了对所得到地震目录的合理利用和同一地区不同地震目录的融合。对于同一地区,也不能根据不同程序对一组地震的定位结果的误差来判断所用程序的优劣。

双差地震定位法消除了震源至地震台站共同的传播路径效应,这种定位法将每个台站观测的事件都与台站组成台站-事件对,使地震对的观测和理论走时之差的残差最小,故称为双差(F. Waldhauser et al,2003)。使用双差地震定位法进行重新精确定位,使我们能够得到多重事件内部相关事件之间的距离,所确定的地震震源的相对位置比常规地震定位方法得到的结果更精确。这种算法已得到验证,并曾应用于加州北海沃德断层上的两个地震丛的定位中(F. Waldhauser et al,2000)。杨智娴等(2002、2003)把该方法应用到张北-尚义地震序列及我国中西部地区地震的重新定位,朱艾澜等(2005)把该方法应用到首都圈地区小震的重新定位,取得了有益的进展。据国内已发表的一些文章(陈翰林等,2009;卢显等,2010),在对定位结果的估计中给出了百米量级的水平误差和垂直误差。

双差地震定位是一种相对定位方法,需要利用地震波的走时差反演震源位置。本文在定位实践中,用 Hypo2000 进行网内地震定位,用单纯形法进行网缘地震定位(谢辉等,2011),统一定位程序,利用其结果精确计算 Pg、Sg 震相走时差,在此基础上使用双差定位法对研究区的地震进行精确定位。

## 2 定位结果

对绝大多数网内地震来说,震相简单且易于辨别,震相读数精度可达 0.01~0.02s。走时读数对 P 波震相赋予 1.0 的权重,相应的 S 波震相走时读数赋予 0.9 的权重。由于定位是在一定半径范围内将每个地震与其相邻的地震配对建立连接作相对定位,使用不同的搜索半径得到不同的定位精度和地震数目,没有定出来的地震主要是因为反演迭代过程中重新加权时与其它地震完全失去连接(Waldhauser et al,2003)。为研究地震的整体活动特征需要绝大部分的地震资料,为此,我们用多个搜索半径,发现以 8km 作搜索半径,用共轭梯度算法(LSQR)解方程时,重新定位后得到的地震数最多,每次迭代时对震源位置和发震时刻的修正量、残差平方和均变化不大,并且对上次迭代之后数据发生变化的比例也比较稳定。定位结果对比见图 2。

291 个地震中有 244 个地震被重新定位,重新定位率为 83.85%,重新定位后走时均方根残差的平均值由 0.34s 降为 0.24s。定位前由 Hypo2000 给出震源位置的平均水平误差为 0.86km,垂直误差为 2.23km,定位后震源位置的测定误差(2 倍标准偏差)在 E-W 方向平均为 0.52km,在 N-S 方向平均为 0.60km,在垂直方向平均为 0.62km。通过精确定位给出了地震序列的精确分布(图 2)。从重新定位结果来看,重新定位前地震序列分布相对较散,而重新定位后发现震群活动沿着活动断层或断层活动段较明显呈条带状分布,可见定位结果更加可靠。

重新定位后震源深度分布见图 3,平均深度为 6.65km,震源的峰值深度段为 4~9km,地震最大深度为 23.28km。定位前后震源深度随震级的变化见图 4,重新定位前地震源深度全部在 15km 以内,重新定位后,有 94% 的地震发生 15km 以内,其余的震源深度超过 15km,表明了研究区的发震层位于地壳的中上部,但 15~24km 深处也有少量地震发生,但多数为 2.0 级左右的地震,且深度分布有一定的连续性。

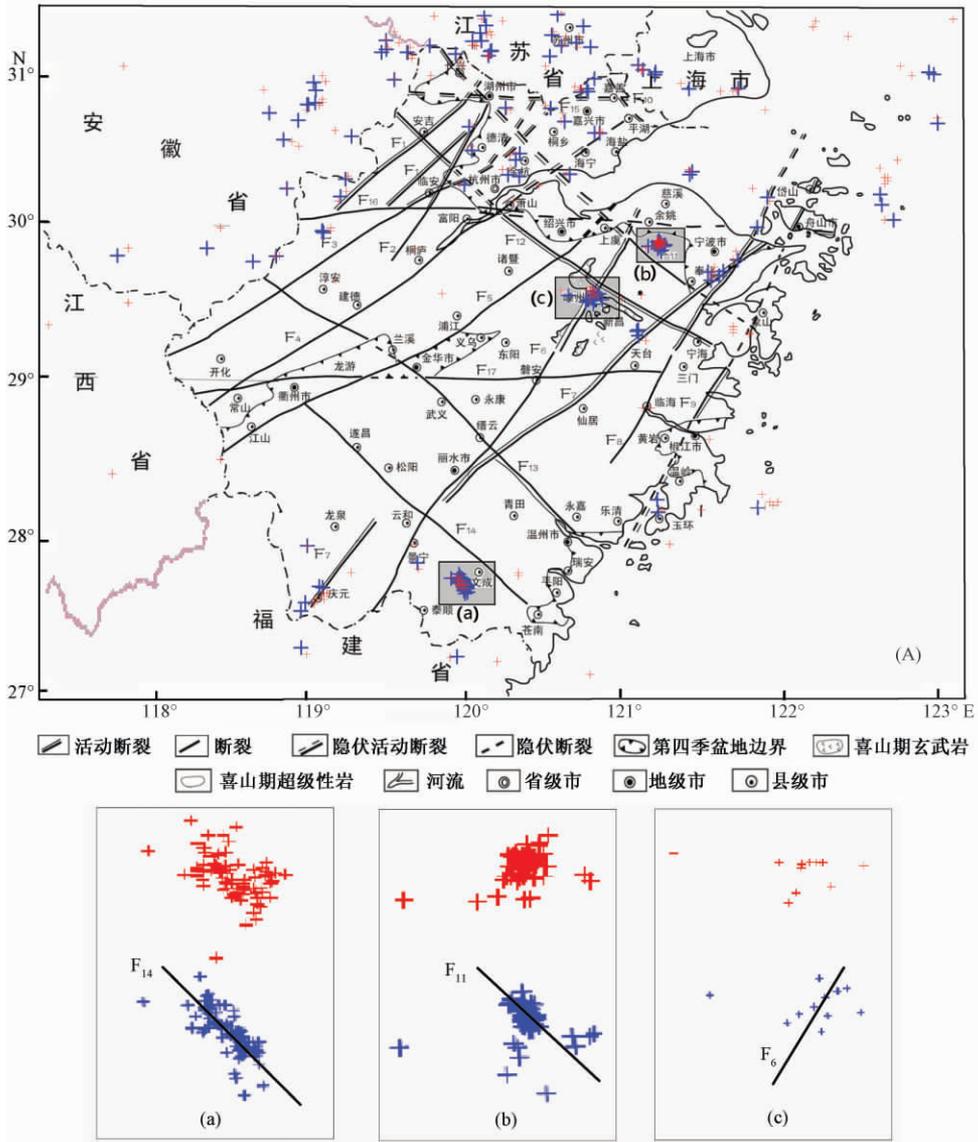


图 2(A) 浙江及邻区地震定位前(红色)后(蓝色)的震中分布及浙江省断裂  
(a)、(b)、(c) 分别为(A)图中相应局部区域的放大图

F<sub>1</sub> 江苏-安吉活动断层带; F<sub>2</sub> 湖州-临安活动断层带; F<sub>3</sub> 马金-乌镇活动断层带; F<sub>4</sub> 萧山-球川活动断层带;  
 F<sub>5</sub> 江山-绍兴断层带; F<sub>6</sub> 余姚-丽水活动断层带; F<sub>7</sub> 丽水-奉化活动断层带; F<sub>8</sub> 镇海-宁海活动断层带;  
 F<sub>9</sub> 岱山-黄岩活动断层带; F<sub>10</sub> 无锡-苏州活动断层带; F<sub>11</sub> 长兴-奉化活动断层带; F<sub>12</sub> 孝丰-三门湾  
 活动断层带; F<sub>13</sub> 淳安-永嘉活动断层带; F<sub>14</sub> 衢州-苍南断层带; F<sub>15</sub> 湖州-嘉善活动断层带;  
 F<sub>16</sub> 昌化-普陀断层带; F<sub>17</sub> 衢州-天台断层带

### 3 地震精定位成果的应用

浙江省地域由陆地和海洋组成。陆地部分的新构造运动主要表现为陆壳破裂、夷平和差异升降运动。以大别山-杭州湾差异形变带为界,可分为南部稳定隆起区和北部中等活动拗隆区。南部地区新构造运动总体活动性不强,地震也较少。北部地区新构造运动以来活动性比较明显,表现为大范围断陷和拗陷,而且北北东向和北西向断裂有明显活动。

浙江省境内主要有共 17 条断裂(图 2)。按断裂走向可分为北东及北北东、北西及北北西和近东西向 3 组。其中有 13 条为断裂的主体或局部自晚更新世以来有过活动,整个浙江省境内未见全新世活动断裂,其余为第四纪有过活动的断裂。区域内发生的中等地震大多受这些断裂控制。断裂的几何形态、年代学特征、运动规律及动力学特征是划分近期有可能发生中等地震危险区的重要依据。浙江省的大地构造格局以江山-绍兴断裂为界,其东南为华南褶皱系,其断裂带西北为扬子准地台。

#### 3.1 珊溪水库地震

2006 年 2 月在温州珊溪水库发生 4 级左右的震群,造成直接经济损失近亿元。浙江数字地震观测台网监测到该次地震序列的全过程,为深入研究该次序列的过程提供了难得的资料。根据地质调查及野外采样点样品测年数据发现,地震活动与双溪-焦溪垟断裂有关(钟羽云等, 2010):该断裂走向  $N50^{\circ}W$ ,倾向  $30^{\circ}$ ,倾角  $70^{\circ}$ ,为一逆冲断层,该断层主要沿库区分布。图 2(a)中,重新定位前地震序列分布相对较分散,重新定位后余震震群活动呈明显的北西向条带状分布。

#### 3.2 皎口水库地震

皎口水库位于浙江宁波鄞州区密岩村樟溪上游,距宁波市 37km。该水库于 1975 年 1 月建成蓄水。水库附近自 1993 年 2 月~1994 年 7 月间连续发生逾百次地震,1995 年、1996 年又有零

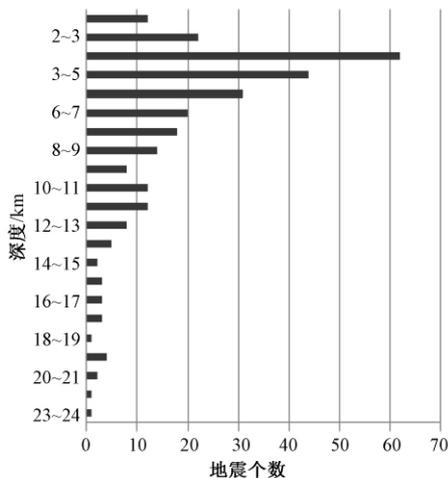


图 3 重新定位后震源深度分布

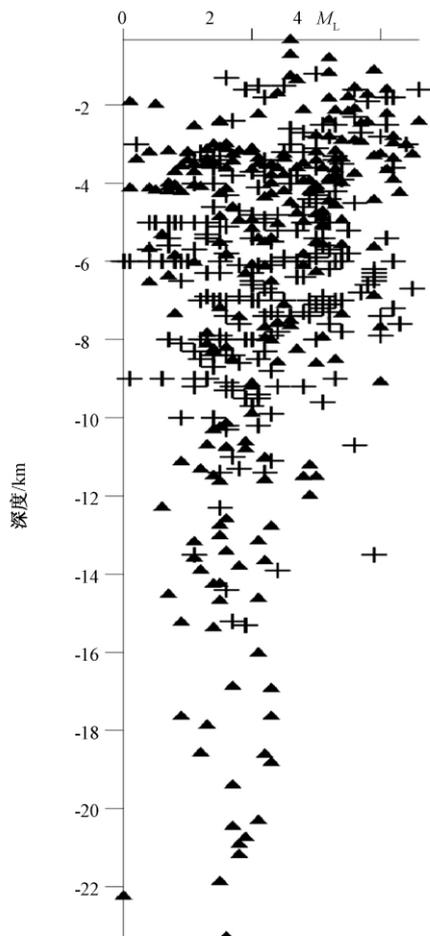


图 4 震源深度随震级  $M_L$  定位前 (+) 后 (▲) 的地震震源深度分布

星地震发生,浙江台网记录到 1996 年以来发生的地震序列(图 2(b))。重新定位前看不出地震序列的优势分布方向,而重新定位后发现震中呈明显的北西向条带状分布。这与钱祝等(1997)确定的 1994 年 9 月 7 日  $M_L 4.7$  皎口地震等震线长轴方向(北西西向)比较一致。

### 3.3 嵊州地震

图 2(c)表明,重新定位前的嵊州地震序列分布相对离散,而重新定位后震中较明显地沿北东向的余姚-丽水断裂呈条带状分布。

统计资料表明世界上几乎所有发生过强烈破坏性( $M \geq 7.0$ )地震的断裂自全新世以来都发生过地震,目前掌握的资料说明浙江省基本不具备发生  $M \geq 7.0$  地震的构造条件。浙江省已有记载的中等地震均发生在被热释光测年证实在中更新世至晚更新世间有过活动的断裂带上,这些断裂带都不存在现代地表断错现象,有的断裂带上只有明显的小震丛集现象。

在第四纪覆盖区及隐伏活动构造区,中小地震的成带性和成丛性活动是揭示地壳现代活动轨迹的证据。浙江省区域内的地震沿着活动断层或断层活动段分布或密集成带(图 2),如沿着马金-乌镇活动断层北段、萧山-球川活动断层北段、余姚-丽水活动断层中段、镇海-宁海活动断层北段分布;浙江省内地震多发生在现代地貌上的沉降区内,如杭嘉湖平原及周边地区、宁波盆地周边等;区域中小地震相对密集或成带分布;浙江省绝大部分现代隆起区,很少或几乎没有中小地震活动。

## 4 讨论与结论

本文对 2006 年 2 月~2010 年 4 月浙江数字地震台网所记录的地震事件重新进行震相识别,用双差地震定位法对浙江及邻区地震进行精确定位,通过对 3 个典型地震序列重新定位分析了地震活动与构造的关系,得到如下结论:

- (1) 对到时数据重新判读,统一定位方法,可提高地震数据质量;
- (2) 在单事件定位结果的前提下应用多事件的双差定位法进行地震定位,精度得到了提高,到时残差的均方根平均值为 0.24s;
- (3) 用双差地震定位法比常规地震定位方法得到的定位结果更精确;
- (4) 地震序列的重新定位结果显示震中位置与震源深度更靠近断裂带,表明地震与已知断裂构造密切相关。

浙江省现有测震台网局部地区台间距(如水库流动台)只有数公里,即使在充分利用到时数据的前提下,对于以盖革法为基础的 Hypo2000 等定位程序,定位能力在数百米,对单一事件定位来说已经到了极限。而使用双差地震定位法的好处是可以得到多重事件内部相关事件之间的距离,不但对分布较密集的地震序列,即使对台站少、台间距大的地震事件也有良好的约束,结果显示用双差地震定位法定位后的地震震源的相对位置较常规地震定位方法得到的结果更加精确。本文据此研究精确定位结果和附近断裂构造之间的关系,以期给地震预测提供一种新的途径,为判断余震趋势和地震的时空演化提供借鉴意义。

### 参考文献

陈翰林、赵翠萍、修济刚等,2009,龙滩水库地震精定位及活动特征研究,地球物理学报, 52(8), 2035~2043。

- 卢显、张晓东、周龙泉等,2010,紫坪铺水库库区地震精定位研究及分析,地震,30(2),129~134。
- 钱祝、虞雪君、孙士宏等,1997,皎口地震趋势的跟踪预测研究,地震学刊,1997,(3),3~16。
- 谢辉、金春华、蔡新华等,2011,MSDP 单纯型和 HYP2000 定位方法对比研究,地震地磁观测与研究,32(5),15~19。
- 杨智娴、陈运泰、张宏志,2002,张北-尚义地震序列的重新定位和发震构造,地震学报,24(4),366~377。
- 杨智娴、陈运泰、郑月军等,2003,双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用,中国科学,33(增刊),129~134。
- 钟羽云、张震峰、阚宝祥,2010,温州珊溪水库地震重新定位与速度结构联合反演,中国地震,26(3),265~272。
- 朱艾斓、徐锡伟、周永胜等,2005,川西地区小震重新定位及其活动构造意义,地球物理学报,48(3),629~636。
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2003, 双差地震定位算法:方法和在加州北海沃德断层上的应用,世界地震译丛,(4),34~53。
- Geiger L, 1912, Probability method for the determination of earthquake epicenters from arrival time only, Bull. St. Louis. Univ, 8, 60~71.
- Gomberg J S, Shedlock K M, Roecker S W, 1990, The effect of S-wave arrival times on the accuracy of hypocenter estimation, Bull Seism Soc Amer, 80, 1605~1628.
- Pavlis G L, 1986, Appraising earthquake hypocenter location errors: a complete, practical approach for single-event locations, Bull Seism Soc Amer, 76, 1699~1717.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California, Bull Seism Soc Amer, 90(6), 1353~1368.

## The digital seismic fine positioning and its application in Zhejiang and its adjacent areas

Zou Zhenxuan Li Jun Zhou Xinmin Wang Zheng Li Jinlong

Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China

**Abstract** 437 digital seismic events recorded by the Zhejiang Digital Seismic Network in Zhejiang and its adjacent area from February 2006 to April 2010 underwent a shock acquaintance and positioning. 291 events with clear phases recorded by 4 stations were screened out through the double difference earthquake location method for accurate positioning and multiple event internal distance between events was obtained. The results show that the repositioning of seismic source relative position is more accurate than conventional seismic location method. In addition this paper obtains accurate moving images of regional earthquake sequences, and according to the new positioning results discusses the distribution of earthquake and relationship between seismogenic structure and fracture. The conclusion shows a good consistency.

**Key words:** Zhejiang and its adjacent area Seismic fine positioning Double difference location method