

用双子地震相干函数法对常熟震群进行精确相对定位

梅卫萍¹, 李清河¹, 丁页岭¹, 缪发军¹, 胡新亮²

(1. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014; 2. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要:采用双子地震相干函数分析法利用江苏区域遥测地震台网数字化资料对2001年11月3—14日发生在江苏省常熟—张家港间的震群进行精确相对定位。主参考地震用区域地壳结构重新定位。结果表明:(1)主参考地震与区域遥测地震台网的定位相比偏离了10.61 km;(2)震群中地震的平面位置更集中;(3)各次地震的震源深度体现了震群特征。本文还对震群与构造的关系进行了分析,推测可能与顾山—虞山断裂有关。

关键词:常熟震群; 双子地震; 相干函数法; 相对定位

中图分类号: P553; O224

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2007)02-0123-06

Accurate Relative Relocation of Changshu Earthquake Swarm by Using the Seismic Doublet Coherence Function Method

MEI Wei-ping¹, LI Qing-he¹, DING Ye-ling¹, MIAO Fa-jun¹, HU Xin-liang²

(1. Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China;

2. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: During Nov. 3—14, 2001, a earthquake swarm with $M1.5 \sim 3.7$ occurred between Changshu city and Zhangjiagang city, in Jiangsu province. Based on the digital data recorded by the telemetered seismic network of Jiangsu province, using the Seismic Doublet Coherence Function Method (DCFM), this swarm is relatively relocated in this paper. The main event of the swarm is relocated by local crust model travel time table. The results demonstrate: (1) The main event is separated 10.61 km from the original one; (2) The swarm's epicenters are more close each other than the original distribution. (3) The focus depths are 16.5~17.5 km, which can not be determined in original way. The relationship between relocated swarm and tectonics is discussed also.

Key words: Changshu earthquake swarm; Seismic doublet; Coherence function method; Relative relocation

0 引言

地震定位是地震学最基本的问题之一。地震学家不断研究准确定位和提高精度,产生了诸如 HY-PO71, HYPOINVERSE, HYPOCENTER, 联合定位, 双差定位, 相对定位等方法。近年来形成了现代地震定位法,即基于波形互相关的双差法和基于多

事件的地球结构与地震定位的联合反演方法^[1]。

相对定位法由 JED 法(联合地震定位)^[2]发展而来,Spence 给出了该理论的详细阐述^[3]。其基本原理是选定一震源位置较为精确的主事件,计算发生在其周围的一群事件相对于它的位置,进而计算

收稿日期:2006-11-08

基金项目:国家自然科学基金(40374033)

作者简介:梅卫萍(1972—),女(汉族),湖北黄梅人,副研究员,主要从事地震监测和数字地震波应用研究。

这群事件的震源位置。相对定位法通过引入到时差,计算“相对位置”而消除了速度结构模型引起的误差,有着独特的优点。该方法所得相对位置与相对到时的误差比经典方法小30%,但绝对位置与绝对到时依赖于主事件。相对定位所得的震源相对位置精度较高,对于主事件可以利用改进后的经典方法进行单事件定位。二者结合可以得到较好的定位结果。

相对定位法中的关键问题是计算到时差和参考地震的选取。高景春等^[4]读取P波的到时计算P波的到时差,用相对定位法精细测定张北地震序列的时空参数。该方法的适用地震范围相对较广,对波形没有严格要求,但到时差精度不高。周仕勇等^[5]对该方法作了较大改进:定位中避开发震时刻的直接求解,在确定震源后根据地震波的传播速度和距离计算,并且采用首波到时资料专门确定深度,但也采用了P波和S波的到时计算到时差。用这种方法计算出来的到时差精度依赖于主事件和待定事件的到时读数误差。

双差定位法是近年来发展较快、应用较广的另一种相对定位方法,它反演的是一组丛集的地震中的每个地震相对于该丛集的矩心的相对位置,不需要主事件,丛集的空间跨度可较大。使用波形互相关法提高相对到时读数精度可以进一步提高该方法定位的精度^[6-8]。

影响地震定位精度的因素很多,提高地震波到时精度是关键因素之一。如果两个地震的震源机制相近且震源位于同一位置,由于射线路径上的速度不均匀性引起的信号的离散很小,那么这两个地震产生的地震波形在同一个台站是相似的,称这样的地震为双子地震(doublet)^[9]。在频率域或时间域应用波形的相似性获得精确的时间偏移精度可达0.1~1 ms(通常读数拾取震相初至的精度约0.1~0.2 s),由此计算地震之间的相对位置误差只有几米到几十米^[10]。用双子地震进行地震相对定位实际上是波形互相关的特例,是精度更高的波形互相关^[11]。

常熟地区位于江苏省东部,中小地震活动频繁,1990年2月10日在常熟—太仓之间发生了 $M_s 5.1$ 地震,造成了较大损失和人员伤亡。此后于1997年3月、2001年11月和2002年3月发生震群。对此震群进行精确相对定位,有助于我们研究震源区的震源性质,对获取该地区的地震构造和地震学信息有一定的意义。

本文采用双子地震相干函数分析法利用数字化地震波资料对2001年11月的常熟震群进行精确相对定位,结果的误差大为减小,震群中地震间的相对位置的精度很高。

1 双子地震相干函数法与相对定位

1.1 双子地震相干函数法

图1所示为在常熟台观测到的发生于2001年11月5日20时37分10.9秒 $M_L 1.8$ 和11月4日03点42分20.8秒 $M_L 2.1$ 双子地震的波形图。在频率域计算相干函数得到双子波的P波到时差的方法称为相干函数分析法(Coherence Function Analysis Method)^[10,12-13],以下简要介绍该方法原理。

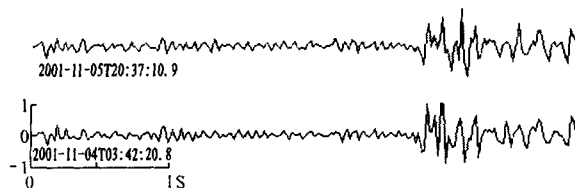


图1 常熟台观测到的双子波的波形

Fig. 1 Doublet waveforms recorded in Changshu station.

假设有信号A和B,其离散时间序列分别为 $f_a(t)$ 和 $f_b(t)$,定义信号A和B的互功率谱 $S_c(f)$ 为

$$S_c(f) = \frac{F_a(f) \cdot F_b(f)^*}{T} = K(f) - iQ(f) \quad (1)$$

这里 $F_a(f)$ 和 $F_b(f)$ 分别表示 $f_a(t)$ 和 $f_b(t)$ 的傅氏变换,*表示傅氏变换的共轭; T 是时间窗的长度; $K(f)$ 和 $Q(f)$ 代表互谱的实部和虚部,分别给出余谱和求积谱。相干函数 Coh^2 和相位谱 $\varphi(f)$ 可用以下方程来计算:

$$\begin{aligned} \text{Coh}^2(f) &= \frac{|S_c(f)|^2}{S_a(f) \cdot S_b(f)}; \\ \varphi(f) &= \tan^{-1} \frac{Q(f)}{K(f)}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $S_a(f)$ 和 $S_b(f)$ 分别代表信号A和B的自功率谱。

相干函数和相位谱可用下面的公式来计算:

$$\begin{aligned} \text{Coh}^2(f) &= \frac{K^2(f) + Q^2(f)}{S_a(f) \cdot S_b(f)} \\ \varphi(f) &= 2\pi f\tau \end{aligned} \quad (3)$$

$\text{Coh}(f)$ 表征信号 $f_a(t)$ 和 $f_b(t)$ 之间的相似程度。相位谱 $\varphi(f)$ 对频率的斜率给出了信号A和B的时间差。因为相位谱 $\varphi(f)$ 是频率的连续函数,所以用这种方法可以求出小于数字化采样间隔的时间差。

对所有台站记录的两地震信号从P波初动开

始取 2^n 个样本点单独进行快速傅立叶变换。两事件的信号均在频率域用汉宁窗平滑后计算互功率谱和自功率谱。用式(3)对图 1 的双子波进行计算的结果如图 2 所示。只对两信号的相干函数大于 0.5 频段的相角用最小二乘法进行拟合,两信号的时间差可通过频率域的相位谱斜率来计算。例如图 2 中, τ 为 0.15 ms,这意味着图 1 中上面的事件比下面的事件早到 0.15 ms。

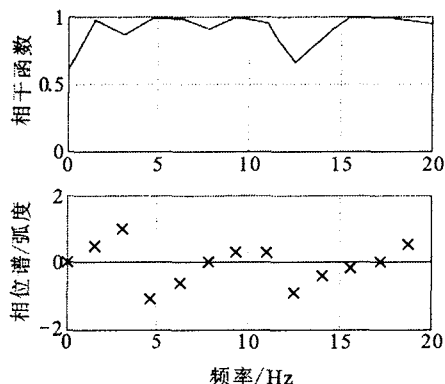


图 2 常熟台双子波的凝聚函数和相位谱
Fig. 2 The coherence function and phase spectrum of the doublet waveforms in Fig. 1.

1.2 确定相对震中

1.2.1 计算两事件台站到台站的到时差值

参考事件 M 和待定事件 K 在台站 i 的 P 波初动到时 P_{mi} 和 P_{ki} 可表示如下:

$$\begin{aligned} P_{mi} &= O_m + T_{mi} + d_i; \\ P_{ki} &= O_k + T_{ki} + d_i \end{aligned} \quad (4)$$

其中 O_m 、 O_k 分别为 M 事件和 K 事件的发震时刻; T_{mi} 、 T_{ki} 分别为事件 M 和 K 的 P 波到 i 台的走时; d_i 为 i 台仪器响应的总误差。同一个台站记录的两个事件使用的是同一套观测系统,因此(4)式中的 d_i 是相同的,在到时差中可以被消去。事件 M 和事件 K 在 i 台和 j 台的到时差 $\Delta\tau_{ij}$ 为

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{ij} &= \tau_{mki} - \tau_{mkj} \\ &= (T_{mi} - T_{ki}) - (T_{mj} - T_{kj}) \end{aligned} \quad (5)$$

因此 $\Delta\tau_{ij}$ 完全是由事件 M 和事件 K 的震中变化引起的。

有四个独立的台站记录的双子波的到时差,可以计算出 6 个台站之间不同的到时差差值 $\Delta\tau_{ij}$ 。

1.2.2 根据走时方程确定相对震中

地震震群序列一般都发生在一个较小的区域内,地震之间的距离远小于地震到台站的距离,故可认为不同地震到同一台站的地震波射线路径基本相似,这样两个地震的走时差是由震源位置的变化引

起的,只需要考虑震源区附近小区域内的地壳精细结构。而在较小的震源区内地壳速度是均匀的,故可取一个单一的速度结构 V_p 。事件 M 和事件 K 到 i 台的基本走时方程为

$$\tau_{mki} V_p = R_{mi} - R_{ki} \quad (6)$$

R_{mi} 、 R_{ki} 分别是事件 M 和事件 K 到 i 台的震源距。

取震群中一个震源位置已经测定的地震(一般要求该地震的震源位置较精确)为参考地震 M ,取其震源位置为坐标系原点;在三维直角坐标系中设待定事件 K 的位置,震源距 R 对三维坐标的偏导数构成台站相对主地震的方向系数,六个台站间方向系数差构成系数矩阵 A ,六个不同台站间的到时差构成到时差差值数据矩阵 B ,对方程(7)有

$$AX = B \quad (7)$$

用最小二乘法或奇异值矩阵法求解,可求出矩阵方程 X 的解,即待定位地震事件的相对坐标。

2 常熟震群的精确定位

本文选用了小地震频次高,时间上密集,记录清晰,地震波资料丰富的 2001 年 11 月的常熟地震序列作为研究对象。此次震群共记录到 19 个地震。

2.1 主震重新定位

造成江苏省区域遥测地震台网原定位有一定误差的主要原因是到时读数精度不高和使用全球通用的走时表。我们选择震群序列中震震级最大的 2001 年 11 月 3 日 17 时 02 分 18.2 秒的 $M_L 3.7$ 地震作为主震,使用江苏省区域遥测地震台网 7 个台的数字化资料重新读取震相到时,采用景天永研制的华东地区地壳模型^[14],利用 BLOC91 地震定位程序重新进行定位。重新定位的结果见表 1,与区域遥测台网的定位结果相比偏移了 10.61 km(图 3)。

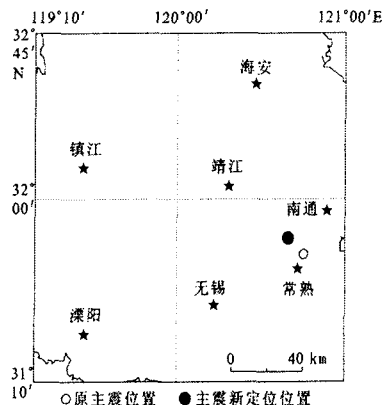


图 3 常熟震群主震新定位位置及台站分布
Fig. 3 The relocated epicenter of main event in Changshu earthquake swarm and distribution of stations.

表 1 2001 年 11 月 3 日常熟主震定位结果

	发震时刻	震源位置			水平误差/km	垂直误差/km	走时残差/s	近台震中距/km	定位台数	定位质量
		纬度	经度	深度/km						
台网定位	17:02:15.30	31°46'	120°45'	20						
重新定位	17:02:15.30	31°49.2'	120°39.4'	17.2	0.5	1.0	0.11	15.90	7	1 类

台站分布较好,震相到时精确,合适的地壳速度模型,保证了主地震重新定位的精确性。

2.2 震群的相对定位

首先通过目测 P 波初动的波形,比较相似的组成一组。由于震中距很近,为确保波形不受畸变,从 P 波初动开始选取 2⁵ 个样本点,计算组内两个地震的相干函数。相干函数值较低的地震调整到其他

组再重新计算。本研究分为四组,图 4 为 B 组记录波形。在每组中选一个与主震波形最相似的地震作为每组的主震,每组的主震以震群的主震为参考地震先求出相对位置;每组内的地震以该组的主震为参考地震。地震计的频率响应为 0.05~20 Hz,用带通滤波滤去高频成分。为了消除截断数据引起的畸变,用汉宁窗处理数据,再作傅立叶变换。

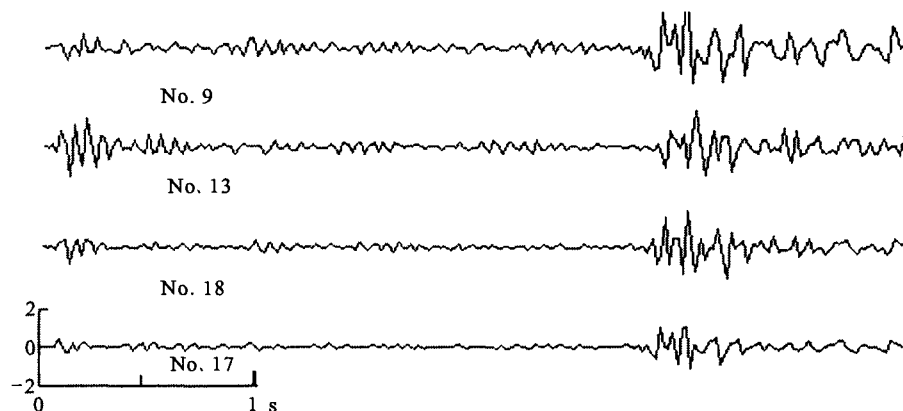


图 4 常熟台 B 组相似地震波形图

Fig. 4 Similar seismograms in B group recorded at Changshu station.

由于天然地震传播路径的复杂性和偶然性以及背景噪声的影响,双子波地震并不是在四个台站记录的 P 波初动均完全相同。在实际计算中,不同的双子波在同一个台站的相干函数值大于 0.5 的频段会有些差异,同组的波形更相似,故差别较小。组与组之间的波形相比组内差别相对大些,但仍很相似。震群相对定位结果见图 5 和表 2。图 5(a)为震群原

定平面位置和新定位位置对比图,图 5(b)为新定位震群分布图,是图 5(a)方框中放大的平面图形,图 6 为震群震源深度图。从表 2 可以看出,除 No. 9 地震外,震群分布在主震周围直径 350 m 范围内,深度在 16.5 km 至 17.5 km 之间。

3 结论与讨论

本文采用双子地震相干函数分析法和相对定位法,利用数字化资料对 2001 年 11 月的常熟震群 19 个地震进行精确相对定位。主参考地震用区域地壳结构重新定位,结果为:主事件与区域遥测台网的定位结果偏离 10.61 km;震群事件均聚集在主事件周围 350 m 的范围内,说明他们是同一震源散射的地震波,改变了原来相距约 5 km 的分散图像,定位精度大为提高;原来定位方法无法确定震源深度,新方法确定其震源深度分布在 16.5~17.5 km 之间。

1990 年 2 月 10 日在常熟—太仓间曾发生 M_s5.1 地震,其主要参数为:震中 31°41'N,121°00'E,深度 15 km。此次地震的发震断层还有争议。

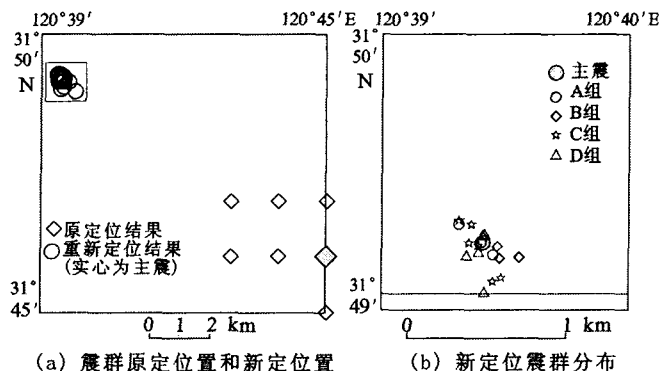


图 5 重新定位后的常熟震群位置

Fig. 5 The relocated positions of Changshu earthquake swarm.

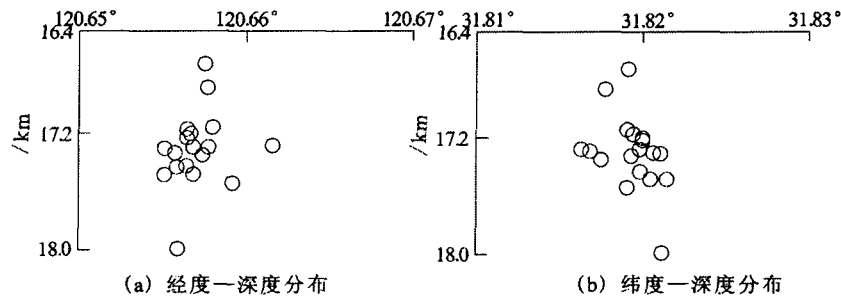


图 6 常熟震群深度分布剖面图

Fig. 6 Sections of depth distribution for Changshu earthquake swarm.

表 2 常熟震群遥测台网定位结果与相对定位法结果

序号	时刻	震级 M_L	遥测台网定位结果			相对定位法结果		
			经度(E)	纬度(N)	深度 /Km	经度(E)	纬度(N)	深度 /Km
1	11-03,11:23:26.5	1.7	120°45'	31°47'		120°39.41'	31°49.24'	17.31
2	11-03,15:34:56.7	2.2	120°45'	31°45'		120°39.46'	31°49.07'	16.88
3	11-03,16:07:05.6	2.6	120°45'	31°46'		120°39.39'	31°49.17'	17.17
主震	11-03,17:02:15.3	3.7	120°45'	31°46'	20	120°39.4'	31°49.2'	17.20
5	11-03,17:08:13.5	2.0	120°44'	31°46'		120°39.35'	31°49.21'	17.43
6	11-03,18:23:43.9	1.8	120°45'	31°46'		120°39.31'	31°49.27'	17.31
7	11-03,19:05:25.0	2.2	120°43'	31°47'		120°39.45'	31°49.15'	16.73
8	11-04,03:29:29.8	2.2	120°45'	31°47'		120°39.41'	31°49.23'	17.48
9*	11-04,03:42:20.8	2.1	120°45'	31°46'		120°39.69'	31°48.98'	17.28
10	11-04,04:57:34.4	1.9	120°45'	31°46'		120°39.44'	31°49.05'	17.34
11	11-04,11:37:19.8	2.0	120°45'	31°46'		120°39.36'	31°49.28'	17.99
12	11-04,16:34:48.3	2.0	120°45'	31°46'		120°39.38'	31°49.19'	17.43
13	11-04,18:56:28.4	1.6	120°45'	31°46'		120°39.46'	31°49.19'	17.28
14	11-05,20:37:10.9	1.8	120°44'	31°47'		120°39.31'	31°49.29'	17.48
15	11-11,05:15:22.4	2.4	120°45'	31°47'		120°39.41'	31°49.01'	17.30
16	11-11,07:37:40.6	1.8	120°45'	31°46'		120°39.4'	31°49.21'	17.23
17	11-14,01:16:53.2	1.7	120°43'	31°46'		120°39.55'	31°49.15'	17.53
18	11-14,01:26:58.3	2.2	120°45'	31°47'		120°39.48'	31°49.14'	17.15
19	11-14,02:04:27.6	2.6	120°45'	31°47'		120°39.34'	31°49.16'	17.32

注:带*为三台定位结果。

在此处有三条较大的断层通过: NE 向的湖州—苏州断裂, NW 向的太仓—奉贤断裂, NEE 向的无锡—崇明断裂, 此外还有 NW 向的次级断裂沙溪—藕渠断裂等, 这些断裂地表露头均不明显。由于这次地震为孤立型地震, 余震很少, 难以从余震分布看出破裂方向。谢华章等认为发震断层的走向 111°, 倾向 201°, 倾角 65°^[15-16]; 江苏省地震工程研究院认为此次地震发生在湖州—苏州断裂、太仓—奉贤断裂和沙溪—藕渠断裂的交汇处。图 7 为本区主要构造、地震分布及本文重新定位后的震群位置, 是基于 1:20 万江苏省基岩地质图, 结合江苏省地震工程研究院对苏州—南通长江公路大桥地震安全性评价工作的结果改绘而成。

小震震群的成因还难于确定, 既可能是断层活动, 也可能是其他原因。本震群与 1990 年常熟—太

仓 5.1 级地震相距约 40 km, 看来两者没有必然联系。在震群附近有凤凰山—塔山断裂, 梅李—董浜断裂, 北溇—南丰断裂, 顾山—虞山断裂, 苏州—无锡—宿迁断裂等。震群走向以 NW 向为主, 如果认为与断层活动有关, 我们推测可能与顾山—虞山断裂有关。本次震群距该断裂约 14 km, 震源深度在 17 km, 视倾角约 50°。

双子地震相干函数分析法对波形的相似性要求较高, 并且两个地震的震源之间的距离需小于地震到台站的距离, 这一点限制了该方法的适用范围, 只能适用于发生在同一个断层的震源机制相似的震群或余震系列。本研究中将 19 个地震分为 4 组, 每组内波形很相似, 组间有些差别, 这会一定程度影响定位结果。但由于台网原定位这 19 个地震位置就很相近, 且组间波形相似差别并不很大, 只是组内更

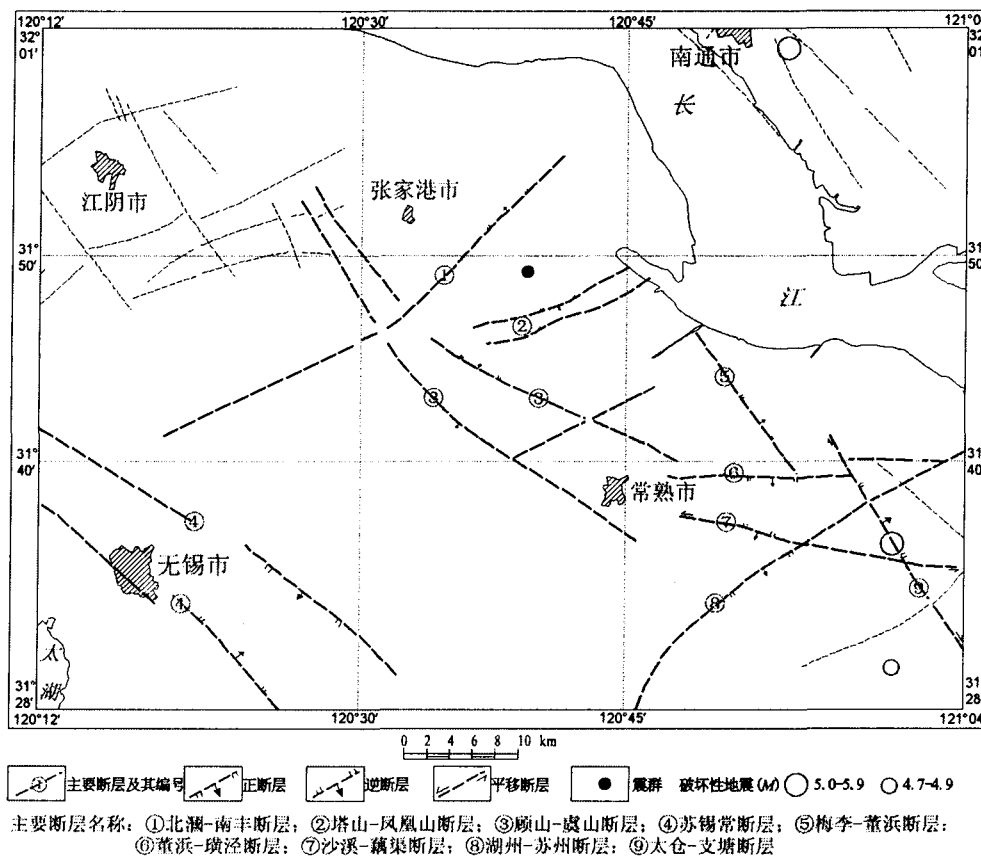


图7 区域主要构造、地震分布及重新定位的震群位置

Fig. 7 Distribution of main faults, epicenters and relocated swarm of research region.

相似,故本研究结果精度虽受影响,但影响不大。

致谢:感谢李丽梅副研究员在图件绘制中给予的帮助。

[参考文献]

- [1] Richards P G, Waldhauser F, Schaff D P, et al. The Applicability of Modern Earthquake Location[J]. Pure Appl. Geophys., 2006, 163: 351-372.
- [2] Douglas A. Joint epicenter determination[J]. Nature, 1976, 215: 45-48.
- [3] Spence W. Relative epicenter determination using P-wave arrival-time differences[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1980, 70(1): 171-183.
- [4] 高景春, 胡斌, 张从珍. 用相对定位法精细测定张北地震序列的时空参数[J]. 华北地震科学, 1999, 17(1): 42-46.
- [5] 周仕勇, 许仲淮, 韩京. 主震定位法分析以及1997年新疆伽师强震群高精度定位[J]. 地震学报, 1999, 21(3): 258-265.
- [6] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double-difference earthquake location algorithm; Method and application to the Northern Hayward fault, California[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 2000, 90: 1353-1368.
- [7] 杨智娴, 陈运泰, 张宏志. 张北-尚义地震序列的重新定位和发震构造[J]. 地震学报, 2002, 24(4): 366-367.
- [8] 杨智娴, 陈运泰, 郑月军, 等. 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[J]. 中国科学, 2003, 33(增刊): 129-136.
- [9] Poupinet G, W L Ellsworth, J Frechet. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets; an application to the Calaveras fault, California[J]. J. Geophys. Res., 1984, 89: 5719-5731.
- [10] Akihiko Ito. High Resolution Relative Hypocenters of Similar Earthquakes by Cross-Spectral Analysis Method[J]. J. Phys. Earth., 1985, 33: 279-294.
- [11] Haijiang ZHANG, Clifford H Thurber. Double-Difference Tomography; The Method and Its Application to the Hayward Fault, California[J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 2003, 93(5): 1875-1889.
- [12] 李清河, 闵祥仪, 郭建康, 等. 爆源地震效应的分析方法[J]. 西北地震学报, 1988, 10(1): 44-51.
- [13] 李清河, 郭建康, 付印发, 等. 迭部5.9级地震爆破地震波动力学特性的变化[J]. 地震研究, 1989, 12(4): 314-327.
- [14] 景天永, 田建明, 薛军蓉, 等. 华东地区走时表(1988)的研究, 全国各分区走时表[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [15] 张裕中, 顾瑾平, 杨彩霞, 等. 常熟-太仓地震的震源参数[J]. 地震学刊, 1990(1): 81.
- [16] 江苏省地震局分析预报中心. 常熟-太仓5.1级地震的综合监测预报过程[J]. 地震学刊, 1990(4): 14-23.