

上海数字地震台网监测能力评估*

尹继尧^{1,2}, 朱元清^{2,1}

(1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 上海市地震局, 上海 200062)

摘要: 利用近震震级公式, 分别对上海数字地震台网监测能力、上海佘山地震台阵作为一个加强台站与上海数字地震台网联合定位的监测能力进行估算并比较两者的评估结果, 同时利用上海台网的地震记录对评估结果进行检验。结果显示, 把台阵作为加强台站加入台网进行联合定位时, 台网的监测能力明显提高, 本次评估结果基本符合实际上海数字地震台网真实地震监测能力。

关键词: 监测能力; 数字地震台网; 地震台阵; 联合定位; 上海

中图分类号: P315.78

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)04-0476-06

0 引言

地震台网的监测能力是衡量台网质量的重要指标。台网监测能力与各个台站记录最小地震的能力有关, 而这一能力又主要取决于技术系统的仪器响应灵敏度、仪器的观测动态范围和台址的地脉动噪声平均水平。

评估地震台网监测能力的方法有多种, 如: 用平均可视分辨法估算地震台网的监测能力(王炎等, 2001), 利用 Bungum 和 Husebye 的方法分析地方地震台网的检测能力和可靠性(Qaisar *et al.*, 2003)等。目前, 国内比较常用的方法是根据近震震级公式, 通过确定振幅比, 用量规函数反推单台控制距离的方法, 以4个台站共同控制的区域来估算台网的监测范围。如张有林等(2005)对安徽省地震台网监测能力和监控范围进行了估算; 王俊等(2007)对云南区域数字地震台网的监测能力与振幅问题进行了研究; 郝春月等(2006)对中国数字地震台网(CDSN)和IMS/PS台阵的监测定位能力进行了评估; 李雪英等(2005)对河北省数字遥测地震台网的监测能力进行了分析; 孟智民等(2002)对陕西数字地震台网的监测能力进行了分析; 洪星和杨贵(2005)分析福建数字地震台网对泉州地震的监测能力; 张黎珍等(2002)对赣南遥测数字地震台网监测能力进行了估算; 李涌等(2007)对阿坝州数字

地震台网的动态范围与台网监控能力进行了计算。

笔者旨在对上海地震台网目前的定位能力进行计算与分析, 并对上海地震台阵作为加强台站加入上海数字地震台网进行联合定位时的监测能力进行计算和评价, 这对今后的台阵与台网联合定位具有一定的指导意义。

1 上海佘山台阵和台网简介

1.1 上海地震台阵

地震台阵, 是按一定的几何形状有规则地排列且安装有若干地震计的地震观测系统, 该系统采用独特的地震数据处理方法, 以达到压低干扰背景, 提高信噪比, 突出和加强地震信号的目的, 获取比现有地震台网更多的有关震源和地球内部结构的信息。

上海地震台阵位于上海西部松江区的佘山地区, 佘山是上海仅有的岩石出露地区。根据地质调查, 整个佘山地区由火成岩构成, 具有完整稳定的构造块体, 且又远离闹市区, 环境安静, 区域内无明显工业和人文干扰, 从而保证了建设台阵的最基本条件, 即台阵各子台信号有高度相似性、地震背景噪声低的特点。上海地震台阵为小尺度台阵, 孔径约为3 km, 由16个子台组成, 子台呈“H”形北东向分布(图1)。各子台的间距约为600 m, 为避免温度变化对地震计的影响, 所有子台均建在地面以下2.5 m处, 各子台基本上处于同一海拔高度。每个子台均安装宽频带地震计

* 收稿日期: 2011-01-05.

基金项目: 地震科学联合基金(C08036)和地震科技星火计划项目(XH 12017Y)资助.

和高精度 24 位数据采集器，笔者对地震计接收到的地震信号，数据采集器采用采样（256 点/s）技术，通过二次滤波从中抽取到 200 点/s，并通过专用基带 MODEM，由电缆将地震数字信号从各子台实时传输到余山数据中心。

上海地震台阵数据处理主要包括：波形聚束、F-K 分析、波阵面法定位、滤波、仿真及功率谱分析等。台阵自 2001 年 5 月运行以来，记录了大量地震，上海地震局利用台阵在地震精定位等方面进行了大量研究（于海英等，2005；寿海涛等，2007；赵镇岭，朱元清，2002；任隽等，2002）。

1.2 上海数字地震台网

上海数字地震台网经过几十年的台站改造和新建，特别是经过“十五”期间的建设，台站在数量和仪器性能上都有了大幅的提高，目前台网共拥有 17 个子台，其中大洋山台（DYS）、八角亭台（BJT）、余山岛台（SSD）为海岛台，台站

具体情况见表 1。

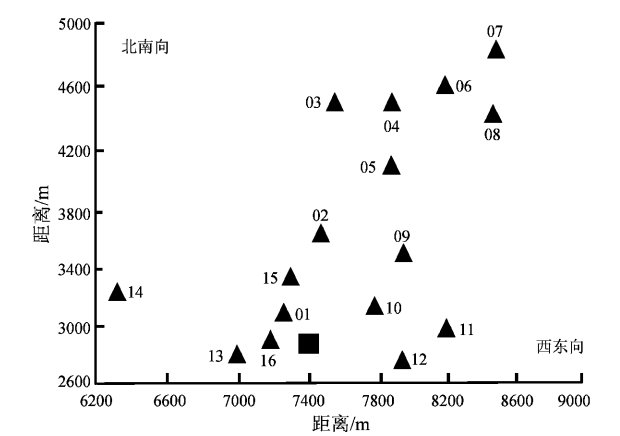


图 1 上海地震台阵子台布局示意图
(实心三角形：子台位置，实心正方形：余山数据中心)
Fig. 1 Schetch of Shanghai seismic array
(solid triangle: sub-stations of Shanghai seismic array, solid square: Shenshan data center)

表 1 上海数字化地震台网台站参数

Tab. 1 Parameters of the sub-stations of the Shanghai Seismological Network

台名	台站 代码	高程 /m	地震计	数采型号（采样率 除 HOQ 外，均为 100 Hz）	系统频带 范围/Hz
余山	SSE	9.5	KS-2000	TDE-324C	0.008 3~50
天平山	TPS	39	CMG-3ESPC	TDE-324CI	0.01~50
横湖	HUH	18	KS-2000M	TDE-324CI	0.008 3~50
秦皇山	QHS	13	CMG-3ESPC	TDE-324CI	0.01~50
天马山	TMS	26	KS-2000M	TDE-324CI	0.008 3~50
小昆山	XKS	30	KS-2000M	TDE-324CI	0.008 3~50
大洋山	DYS	15	CMG-3ESPC	TDE-324CI	0.01~50
张江	ZHJ	0.1	KS-2000M	TDE-324CI	0.008 3~50
余山岛	SSD	20	KS-2000M	TDE-324CI	0.008 3~50
戏剧学院	SHX	-370	FSS-3DBH	EDAS-24IP	0.5~50
竹园	ZHY	-600.24	CMG-3TB	CMG-D24B3H	0.008 3~50
南汇	NAH	-511.93	JDF-2	TDE-324CI	0.05~20
崇明东滩	DOT	421	FSS-3DBH	TDE-324CI	0.5~50
大新中学	DAX	-375	FSS-3DBH	EDAS-24IP	0.5~50
金泽	JIZ	-305	FSS-3DBH	EDAS-24IP	0.5~50
八角亭	BJT	-780	JDF-1	TDE-324CI	0.5~50
虹桥	HOQ	-651.37	768	EDAS-16	1~20

2 资料处理及计算方法

笔者对所选资料在 1~20 Hz 范围内进行计算，除虹桥台的“768”测震仪以外，所有台站（包括

台阵）的仪器平坦范围都覆盖该范围，整个系统的截止频率也覆盖此频率范围（表 1）。而虹桥台的“768”测震仪频带范围为 1~20 Hz，由于只有垂直向分量，不参加定震级。为获取台站真实的最大地动噪声，笔者选取在无震、无干扰情况下，

数字地震监测台站记录的背景噪声, 取其高水平噪声中午 12 时内 18 000 个采样点作为地动噪声样本。数字地震台站记录的是数字数 (count), 需对其进行转化和处理, 得到地动噪声的速度值, 最后利用近震震级公式得到量规函数反推单台控制的距离。具体过程如下:

(1) 计算地动噪声记录的有效值 e (RMS) 为

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - a)^2}{N}} \quad (1)$$

式中, e 为以 count 为单位的地动噪声有效值记录数据; X_i 为第 i 个采样点的数字数; N 为采样点数; a 为所选取的采样点的均值。由于地动噪声的振动性质, 在分析地动噪声水平时去掉所量取的噪声幅度的均值, 这一平均值由于在地震观测系统中存在的偏移 (直流分量), 在分析地动噪声水平时应予去掉。

(2) 根据地动噪声有效值 e 计算地动噪声速度

$$V = \frac{e \times P}{S \times G \times 2^M} \quad (2)$$

式中, V 为地动速度有效值; S 为地震计的速度灵敏度, 单位为 $V \cdot s/m$; P 为数据采集器输入允许峰一峰电压值, 单位是 V ; G 为数据采集器的设置放大倍数; M 为数据采集器的位数, 上海数字地震台网目前全部为 24 位。

(3) 根据地动噪声速度计算量规函数
对近震震级进行改写, 得到量规函数

$$R(\Delta) = M_L - \log\left(\frac{V_{NS} \times T_{NS} + V_{EW} \times T_{EW}}{2 \times 2 \times \pi}\right) - S \quad (3)$$

式中, $R(\Delta)$ 为量规函数; M_L 为里氏震级; V_{NS} 、 V_{EW} 、 T_{NS} 、 T_{EW} 分别为南北向地动噪声速度、东西向地动噪声速度值、南北向最大速度周期、东西向最大速度周期。 S 为台站校正值, 由于台站校正值一般很小, 本文中近似取 S 为零。最后通过 $R(\Delta)$ 值查表得到相应震级单台控制的范围。

(4) 台网监测能力计算

笔者认为当近震 P 波震相的振幅是背景噪声振幅的两倍时, 便可以清晰地识别 P 波震相, 而 S

波振幅一般为 P 波振幅的 3 倍。因此, 当记录到的地震 S 波取为 6 倍地动背景噪声值时, 可有效地识别地震事件。

台网监测能力是指台网能准确测定地震震中位置、发震时刻和震级等基本参数, 以及满足一定精度要求下的台网控制面积。理论上, 1 个三分向地震台即可粗略地定出地震参数, 地震台数 $N \geq 3$ 可得出一定精度的地震参数, $N \geq 4$ 可求出震源位置的观测误差。一般情况下, 台网的设计都取用 $N \geq 4$, 故凡能被 4 个以上地震台站观测到地震活动的地方就称为地震的可监测点。考虑到发震时, 可能会有台站数据传输等客观问题造成台站资料缺失, 笔者分别选取 $N \geq 4$ 和 $N \geq 5$ 进行比较分析, 评估上海数字地震台网和地震台阵的监测能力。以每个台站的最大监测距离为半径画圆, 台站所围区域为监测范围。

地震台阵, 有其自己的检测定位地震的能力, 在这里作为一个加强台站加入到上海数字地震台网中, 地震台阵的增益水平一般在 $N^{1/2}$ 左右, 也就是压低噪声的能力, N 为子台数。上海地震台阵有 16 个子台, 那么其压低噪声的能力为 4 倍左右, 所以佘山台阵作为一个特殊的台站, 可以把背景噪声压低 4 倍左右。

3 计算结果和检验

3.1 计算结果

根据上述计算公式和方法, 笔者分别对上海数字地震台网和地震台阵作为加强台站加入该地震台网时的监测能力进行计算, 计算结果如图 2 所示。图 2 中细实线为上海市台网地震监测能力等值线, 粗实线为上海地震台阵作为加强台站加入该台网中得到的台网监测能力等值线图, 实心三角形为台站位置。图 2a 为选取 $N \geq 4$ 时的地震监测能力图, 图 2b 为选取 $N \geq 5$ 时的地震监测能力图。从图 2 中可以看出:

(1) $N \geq 4$ 时的地震监测能力: 除了崇明北部, 上海数字地震台网基本上能监测上海市行政区域 $M_L \geq 1$ 地震, 同时也覆盖了上海市西部及邻区 30 km 范围, 可以监测到上海市的监视区域 ($29^\circ \sim 33^\circ N$; $119^\circ \sim 123^\circ E$) 内 $M_L \geq 2$ 地震。把上海地震台阵作为加强台站加入上海数字地震台网后, 从图 2a 可以看出, 台网的监测范围特别是对

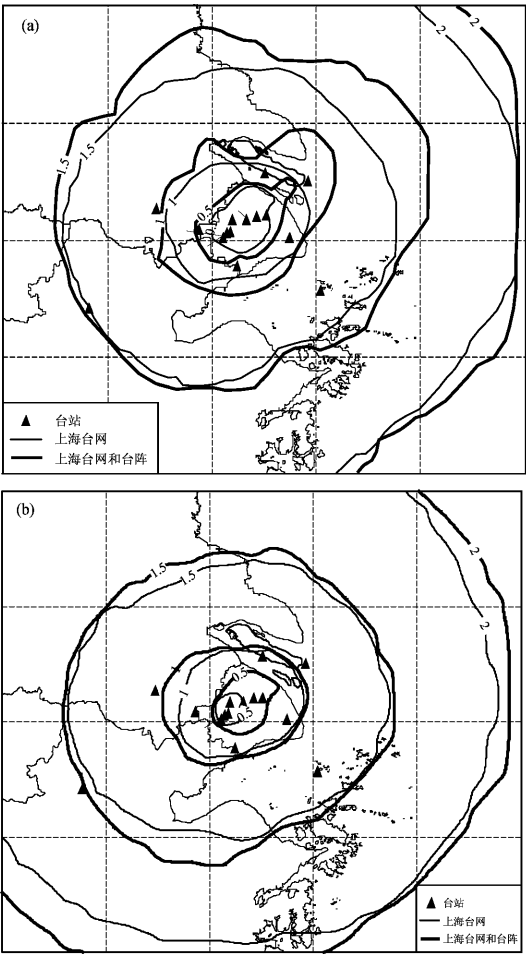


图2 上海数字地震台网联合台阵和未联合台阵的监测能力比较图

(a) $N \geq 4$ 时的监测能力等值线；(b) $N \geq 5$ 时的监测能力等值线（细实线为上海市台网地震监测能力等值线；粗实线为上海市台阵作为加强台站加入台网后得到的地震监测能力等值线；实心三角形为台站位置）

Fig. 2 Compare of seismic network and seismic array about monitoring ability

(a) Contour lines of monitoring ability with $N \geq 4$; (b) Contour lines of monitoring ability with $N \geq 5$ (thin solid line: monitoring ability contour lines of Shanghai seismic network, heavy line: monitoring ability contour lines of Shanghai Digital Seismological Network includes Shanghai seismic array as a strengthening station, triangle: position of seismic station)

于上海行政区内微弱地震的监测能力和范围明显提高，除了崇明岛和上海陆域东部南汇区、浦东新区东部、奉贤区东部、金山区南部外，其它地区监测能力达到 $M_L \geq 0.5$ 地震。相比加入台阵前台网监测能力，还可以监测到个长江口 $M_L \geq 1$ 地震。

(2) $N \geq 5$ 时的地震监测能力：上海数字地震

台网对 $M_L \geq 0.5$ 的监测能力缩小至上海中西部区域，而对于 $M_L \geq 1$ 的地震监测能力，和 $N \geq 4$ 时相差不多，对崇明地区的覆盖略微收缩。把上海地震台阵作为加强台站加入上海地震台网后，台网的监测能力略微提高，相比 $N \geq 4$ 情况，监测能力提高程度明显降低；对于 $M_L \geq 2$ 地震监测范围，仍能覆盖上海市的监视区域（ $29^\circ \sim 33^\circ \text{N}$ ； $119^\circ \sim 123^\circ \text{E}$ ）。

3.2 监测能力检验

利用上海地震台网记录的 1970 ~ 2010 年近震事件，对 $N \geq 4$ 时理论计算得到的监测能力进行实例检验，根据计算的监测能力结果，分别挑选 0.5 级、1.0 级、1.5 级三档对其相应监测范围进行检验，如图 3 所示。图 3 中细实线为上海地震台网监测能力等值线，粗实线为上海地震台阵作为加强台站加入上海地震台网后的监测能力等值线。其中，图 3a、b、c 中的空心圆点分别为上海市台网所记录到的 0.5 级、1.0 级、1.5 级地震分布。从图 3 可以看出， $M_L 0.5$ 以下的微震全部发生在上海市台网理论监测能力 $M_L 0.5$ 的等值线范围内。 $M_L 1.0$ 以内的微弱震基本发生在理论监测能力 $M_L 1.0$ 等值线内和周边。和实际的地震监测相比，理论监测范围略小，只监测到 2001 年 7 月 21 日在长江口以东发生的 0.9 级地震，偏离等值线较远。此外，从图 3c 中可以看出， $M_L 1.5$ 以下的微弱震基本发生在理论监测能力 $M_L 1.5$ 的等值线内和边缘。综合上述分析，上海数字地震台网理论地震监测能力计算结果基本上是符合实际情况的。

4 结论和讨论

笔者主要利用近震震级公式对上海数字地震台网地震监测能力和上海地震台阵作为加强台站加入地震台网后的监测能力分别进行理论计算和评估，最后用上海数字地震台网实际记录的地震目录对本文结果进行检验。得到如下结论：

(1) 对于上海数字地震台网，当 $N \geq 4$ 时，基本上能监测到上海市行政区域 $M_L \geq 1.0$ 的地震，对于整个上海监视区，可以达到 $M_L \geq 2.0$ 的地震监测能力；当 $N \geq 5$ 时，上海市地震数字台网对 $M_L \geq 0.5$ 的地震监测能力缩小至上海中西部区域，而对 $M_L \geq 1.0$ 的地震监测能力，基本上和 $N \geq 4$ 相差不多，对崇明地区的覆盖略微收缩。

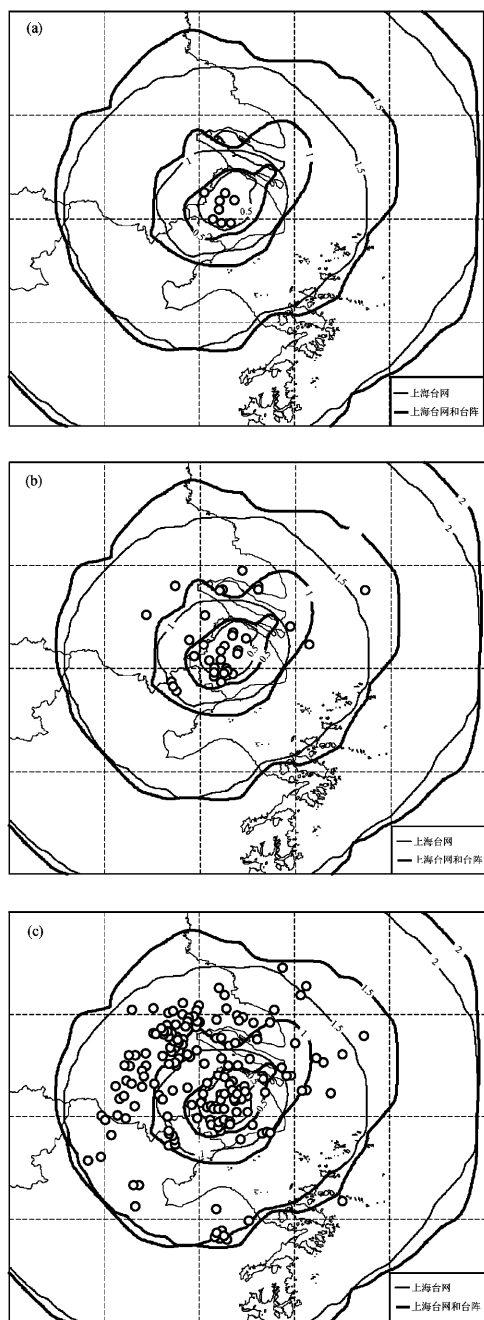


图3 上海市地震理论监测能力实例检验
(a) 0.5级以下地震检验; (b) 1级以下地震检验; (c) 1.5级以下地震检验 (细实线: 上海台网地震监测能力等值线, 粗实线: 上海台阵作为加强台站加入台网后得到的监测能力等值线, 空心圆: 地震分布)

Fig. 3 Test of the monitoring ability of Shanghai Seismic Network

(a) Test of earthquakes lower than $M0.5$; (b) Test of earthquake lower than $M1.0$; (c) Test of earthquakes lower than $M1.5$ (thin solid line: the monitoring ability contour lines of Shanghai seismic network, heavy solid line: the monitoring ability contour lines of Shanghai digital seismological network includes Shanghai seismic array as a strengthening station, circle: position of earthquake)

(2) 上海地震台阵作为加强台站加入上海地震台网后, 当 $N \geq 4$ 时, 台网的监测能力特别是对于上海行政区内微弱震的监测能力和范围明显提高; 当 $N \geq 5$ 时, 台网的监测能力较未加入时略微提高, 相比 $N \geq 4$ 情况, 监测能力提高程度明显降低。

(3) 利用上海市地震局 1970 ~ 2010 年记录的微弱震对 $N \geq 4$ 时计算所得的 0.5 级、1.0 级、1.5 级理论地震监测能力进行检验, 结果显示本文计算结果基本符合上海数字地震台网目前真实地震监测水平, 表明本研究中对上海地震台网监测能力的评估是可行和符合实际的。

综上所述, 笔者把上海地震台阵作为一个加强台站加入到上海数字地震台网, 结果显示, 台网和台阵的联合定位使得台网的监测能力明显提高。台阵作为现在国际上流行的地震监测技术, 正受到各国广泛重视, 台阵与现有台网联合定位也是目前地震定位今后的一种发展趋势。

参考文献:

- 郝春月, 郑重, 郭燕平, 等. 2006. 中国数字地震台网 (CDSN) 和 IMS/PS 台阵的监测定位能力评估 [J]. 地震地磁观测与研究, 27 (2): 56 ~ 63.
- 洪星, 杨贵. 2005. 福建数字地震台网对泉州地震的监测能力 [J]. 地震地磁观测与研究, 25 (2): 89 ~ 96.
- 李雪英, 张新东, 胡斌. 2005. 河北省数字遥测地震台网的监测能力 [J]. 山西地震, (2): 22 ~ 25.
- 李涌, 张艺, 戴仕贵. 2007. 阿坝州数字地震台网的动态范围与台网监控能力计算 [J]. 四川地震, (4): 37 ~ 41.
- 孟智民, 王卫东, 李大伟. 2002. 陕西数字地震台网的监测能力 [J]. 西北地震学报, 24 (2): 178 ~ 182.
- 任隽, 朱元清, 潘纪顺, 等. 2002. 上海地震台阵与台网的定位及视慢度研究 [J]. 地震研究, 25 (4): 335 ~ 340.
- 寿海涛, 朱元清, 黄耘, 等. 2007. 利用上海台阵对常熟 2001 年 2002 年震群的精定位 [J]. 地震地磁观测与研究, 28 (3): 27 ~ 33.
- 王俊, 蔡舒梅, 崔谷谷. 2007. 云南区域数字地震台网的监测能力与振幅问题 [J]. 地震地磁观测与研究, 28 (1): 84 ~ 89.
- 王炎, 赵淑珍, 金文臣. 2001. 用平均可视分辨率估算山西大同数字遥测地震台网的遥测能力 [J]. 山西地震, (4): 8 ~ 10.
- 于海英, 朱元清, 王小平, 等. 2005. 上海地震台阵对 2004 年 12 月 26 日印度洋地震的精确定位 [J]. 地震地磁观测与研究, 26 (2): 8 ~ 13.
- 张黎珍, 胡翠娥, 李传江. 2002. 赣南遥测数字地震台网监测能力估算 [J]. 华南地震, 22 (4): 34 ~ 38.
- 张有林, 戚浩, 王敏坤, 等. 2005. 安徽省地震台网监测能力和监控范围估算 [J]. 地震地磁观测与研究, 26 (6): 56 ~ 59.
- 赵镇岭, 朱元清. 2002. 上海地震台阵的地震定位方法 [J]. 地震地磁观测与研究, 23 (2): 85 ~ 96.
- Qaisar M, Mahmood T, Khan S A. 2003. 巴基斯坦地方地震台网的检测能力和可靠性分析 [J]. 地震学报, 25 (1): 55 ~ 61.

Estimation of Locating Ability of the Shanghai Digital Seismological Network

YIN Ji-yao^{1,2}, ZHU Yuan-qing^{2,1}

(1. *School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

(2. *Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China*)

Abstract

Using the formula to calculate the local earthquake’s magnitude, we estimate the locating ability of the Shanghai Digital Seismological Network and the locating ability of Shanghai Digital Seismological Network plus Shanghai Seismic Array respectively. We find that the locating ability of Shanghai Seismological Network will be noticeably improved when it takes in Shanghai Seismic Array as a strengthening station. Comparing the estimated result with the earthquake catalogue provided by the Shanghai Seismological Network, we find that the results generally accord with the real monitoring ability of Shanghai Digital Seismological Network.

Key words: monitoring ability; seismic network; seismic array; coordinate location; Shanghai