

胡文灼, 马晓静. 单台初至 P 波震级计算方法在广东河源地区的应用[J]. 华南地震, 2015, 35 (3): 82-89. [HU Wenzhuo, MA Xiaojing. The Application of Magnitude Calculation by Using P Waveform Recorded by Single Station in Heyuan[J]. South china journal of seismology, 2015, 35(3): 82-89.]

## 单台初至 P 波震级计算方法在广东河源地区的应用

胡文灼<sup>1, 2, 3</sup>, 马晓静<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070;  
3. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070)

**摘要:** 利用广东数字化地震台网 70 个  $M_L$  2.5~5.2 的广东河源水库地区地震事件, 选取震中距小于 100 km 台站的垂直向地震波形记录, 通过函数形式  $Bt \cdot \exp(-At)$  来分别拟合单台初至 P 波前 1 s、2 s、3 s 时间窗内数据的包络线, 采用最小二乘法求出参数  $B$ , 经回归分析得到了震级与包络参数  $B$ 、P 波速度记录最大值之间的统计关系。结果显示估算震级结果比较可靠, 使用三种时间窗分别计算, 得到的平均震级偏差都在 0.4 级以内, 单台震级偏差 70% 以上在 0.5 级以内, 可有效用于预警震级计算, 减少预警数据处理时间。

**关键词:** 单台; P 波; 震级估算; 包络线

中图分类号: P315.62

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2015) 03-0082-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.03.013

## The Application of Magnitude Calculation by Using P Waveform Recorded by Single Station in Heyuan

HU Wenzhuo, MA Xiaojing

(1. *Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China*; 2. *Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, CEA, Guangzhou 510070, China*;  
3. *Key Laboratory of Guangdong Province Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Projects, Guangzhou 510070, China*)

**Abstract:** Based on vertical waveforms of 70 earthquakes (with  $M_L$  2.5~5.2 and  $\Delta < 100$  km) recorded by Guangdong seismic network, the paper fits the envelop of 1s, 2s and 3s waveform after P arrival and calculates the parameter  $B$  with least square method by using function  $Bt \cdot \exp(-At)$ . Then the paper analyzes the relationship of magnitude and  $B$ ,  $P_{max}$  by using regression analysis. The estimated magnitudes are quite near to the original magnitudes. The average magnitude offsets are less than 0.4, and 70% of the offset for single station are less than 0.5, which indicates that the method may be useful for early warning and lessen the time in data calculation.

**Keywords:** Single station; P wave; Magnitude estimate; envelop

收稿日期: 2014-11-17

作者简介: 胡文灼 (1979-), 男, 工程师, 主要从事地震监测和研究工作。

E-mail: huwzhuo@163.com.

0 引言

地震预警是在监测到地震信号后快速确定地震参数并且进行震害快速评估,经过决策后启动的应急警报。我国是一个多震的国家,地震给我国造成了重大的经济损失和人员伤亡,预警系统的建设也已经得到国家的重视和大力发展。地震预警系统包括地震预警定位、地震震级的估算、预警目标区烈度的估计和预警信息发布等几个部分。其中震级估算是地震预警中一个十分重要的基本问题,震级测定的准确度对后续目标地区的地震动场估计与灾害快速评估影响很大。

目前学者们对预警震级计算已提出和实验过各种方法,其中一些结果比较可靠的已经投入预警系统使用,主要包括  $\tau_c$  方法<sup>[1-2]</sup>、 $\tau_{P_{max}}$  方法<sup>[3]</sup>、 $P_d$  方法<sup>[4]</sup>、 $M_{L10}$  方法<sup>[5]</sup>等。

从技术方面上考虑,判断一种震级计算方法两个基本标准,一是能否对地震震级进行准确的测定,即估算震级与实际震级的偏差要小;二是能否满足预警的时效性,即最大程度的减少数据处理时间,缩小预警盲区,这样才能最有效的减轻地震所带来的灾害。

1 震级测定原理与方法

本文的震级计算方法基于 Odaka 在 2003 年提出的波形包络算法<sup>[6]</sup>,利用  $f(t) = Bt \cdot \exp(-At)$  的函数形式对垂向速度记录的 P 波段波形的包络线进行拟合,式中  $B$  和  $A$  的值由最小二乘法确定,其中  $B$  值代表 P 波到来后地震动幅值的增长率。有学者<sup>[8-11]</sup>对大量的地震数据记录研究分析后得到  $\lg B$  与震中距  $\lg \Delta$  成线性负相关的关系,而与震级的大小无关。因此可以通过计算 P 波初至阶段振

幅的增长率  $B$  来估算出震中距,进而通过经验公式确定地震震级:

$$M = a \lg P_{max} + b \lg \Delta + c$$

(1)

式(1)中的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  是可以通过最小二乘法确定的常数。通过大量的地震数据统计分析得到  $B$  值和速度峰值与震级的相关关系。因此,当 P 波到达后,我们能够在给定的很短的时间内,通过完全经验震级关系,快速从观测到的最大振幅和作为参数的  $B$  值估算出震级。

苗庆杰<sup>[7]</sup>对震级计算进行了优化,提出三种绘制包络线的方法,使震级精度更高,本文使用了苗庆杰提供的程序进行数据处理,并在此基础上做了适当改进,使计算更加方便。

首先对原始垂直向速度进行适当的处理和变换。对原速度记录做零线调整,并对调整后的结果取绝对值;设时间窗内(含  $n$  个样点)的  $y$  坐标值为向量  $D = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_n]$ , 设另一向量为  $M = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_n]$ , 若时间窗内样点的最大值对应的点数为  $i = \max$ , 则  $M$  表示为:  $M(i) = \max(d_1, d_2, \dots, d_i)$  (当  $i \leq \max$ ),  $M(i) = \max(d_i, d_{i+1}, \dots, d_n)$  (当  $i > \max$ ); 依次连接  $M$  向量的相邻极值点,得到的曲线即为包络线。

2 研究范围及数据选取

广东省河源新丰江水库地区的地震资料比较丰富,地震频发而且密集,台站监测能力也较高,所以我们选取该地区作为研究样本。剔除双震情况,2009 年 1 月至 2014 年 12 月间,广东数字地震台网在新丰江水库地区记录到 70 个  $M_L 2.5 \sim 5.2$  地震事件,其发震时刻、震中位置和震级等详细资料如表 1 和图 1 所示。

表 1 选用河源地区地震资料  
Table 1 Basic information of earthquakes chosen in Heyuan region

编号	发震时间	纬度/°	经度/°	震级/ $M_L$
1	2009-04-24 15:15:02.6	23.734	114.624	2.7
2	2009-11-19 14:54:54.3	23.677	114.657	2.6
3	2010-06-21 16:36:15.7	23.473	115.090	2.7
4	2010-11-19 03:36:06.6	23.772	114.603	2.6
5	2010-12-10 10:31:01.5	23.718	114.653	3.1
6	2011-03-04 07:37:30.6	23.802	114.573	2.6
7	2011-12-16 11:40:36.0	23.911	114.475	2.6
8	2011-12-22 11:49:38.4	23.906	114.47	2.5
9	2012-01-06 12:02:44.3	23.798	114.585	2.5

转下表

接表 1

编号	发震时间	纬度/°	经度/°	震级/ $M_L$
10	2012-01-19 03:07:00.4	23.749	114.630	2.6
11	2012-02-16 02:34:23.4	23.906	114.473	5.2
12	2012-02-16 02:49:35.6	23.912	114.474	2.6
13	2012-02-17 19:26:55.0	23.911	114.473	4.2
14	2012-02-23 21:25:25.4	23.910	114.473	2.5
15	2012-03-12 03:21:37.2	23.907	114.478	2.8
16	2012-03-16 18:15:52.2	23.909	114.476	3.0
17	2012-03-31 09:57:06.8	23.910	114.475	2.5
18	2012-06-19 00:18:21.4	23.796	114.590	2.6
19	2012-06-28 05:43:57.3	23.726	114.617	2.9
20	2012-07-02 00:12:41.2	23.795	114.588	3.4
21	2012-07-22 07:08:27.6	23.780	114.535	2.7
22	2012-08-31 13:52:12.7	23.752	114.635	4.5
23	2012-09-01 23:22:26.9	23.752	114.628	2.8
24	2012-09-02 03:17:50.4	23.752	114.634	4.2
25	2012-09-03 03:23:43.0	23.757	114.633	2.8
26	2012-09-08 03:54:18.4	23.752	114.637	2.7
27	2012-09-17 18:48:25.1	23.907	114.480	2.8
28	2012-09-30 13:36:42.3	23.908	114.481	3.0
29	2012-11-28 20:31:42.9	23.782	114.351	2.9
30	2012-12-21 06:16:33.4	23.749	114.612	2.8
31	2013-01-06 07:34:17.4	23.729	114.619	3.8
32	2013-01-23 22:11:24.1	23.722	114.624	3.2
33	2013-02-11 06:39:14.2	23.733	114.621	2.8
34	2013-02-12 04:18:14.8	23.716	114.662	2.9
35	2013-02-13 05:12:42.6	23.723	114.623	2.7
36	2013-02-22 11:34:12.8	23.904	114.481	5.1
37	2013-04-24 10:55:10.6	23.905	114.495	2.9
38	2013-05-17 01:56:32.6	23.744	114.615	2.7
39	2013-06-03 23:34:41.8	23.759	114.625	2.5
40	2013-07-04 05:26:02.9	23.731	114.617	2.5
41	2013-07-11 11:45:06.8	23.722	114.622	2.7
42	2013-08-19 18:51:37.7	23.752	114.628	2.9
43	2013-09-15 09:12:24.0	23.773	114.547	2.9
44	2013-09-16 13:28:29.7	23.770	114.542	2.7
45	2013-09-16 14:19:25.7	23.772	114.547	3.0
46	2013-09-16 17:20:31.2	23.777	114.545	2.8
47	2013-09-17 17:20:58.1	23.764	114.547	3.1
48	2013-09-17 17:22:07.2	23.770	114.547	3.4
49	2013-10-01 13:55:52.4	23.907	114.464	2.7
50	2013-10-04 05:20:46.8	23.903	114.462	2.9
51	2013-10-07 18:21:27.7	23.767	114.550	2.9
52	2013-10-15 22:59:16.1	23.747	114.637	2.5
53	2013-10-30 02:46:22.0	23.900	114.488	3.2
54	2013-10-30 02:55:24.4	23.901	114.487	3.0
55	2013-10-30 02:57:28.4	23.906	114.493	3.1
56	2013-12-14 07:02:17.3	23.908	114.462	2.8

转下表

接表 1

编号	发震时间	纬度/°	经度/°	震级/ $M_L$
57	2014-02-18 20:27:40.2	23.754	114.638	2.6
58	2014-04-18 13:50:17.5	23.972	114.583	2.7
59	2014-04-25 16:07:10.6	23.908	114.476	4.4
60	2014-04-26 21:39:30.1	23.905	114.477	2.5
61	2014-05-24 12:33:04.5	23.748	114.632	3.3
62	2014-06-20 05:30:45.7	23.715	114.704	3.0
63	2014-07-11 02:25:48.8	23.717	114.71	3.0
64	2014-07-11 13:43:24.2	23.901	114.465	4.5
65	2014-07-13 07:02:55.3	23.902	114.466	2.9
66	2014-07-21 14:28:25.0	23.721	114.601	2.5
67	2014-07-22 15:23:58.6	23.910	114.477	3.5
68	2014-08-10 14:38:48.4	23.713	114.713	2.9
69	2014-09-12 19:47:58.4	23.829	114.615	2.6
70	2014-09-22 21:00:40.0	23.912	114.472	2.7

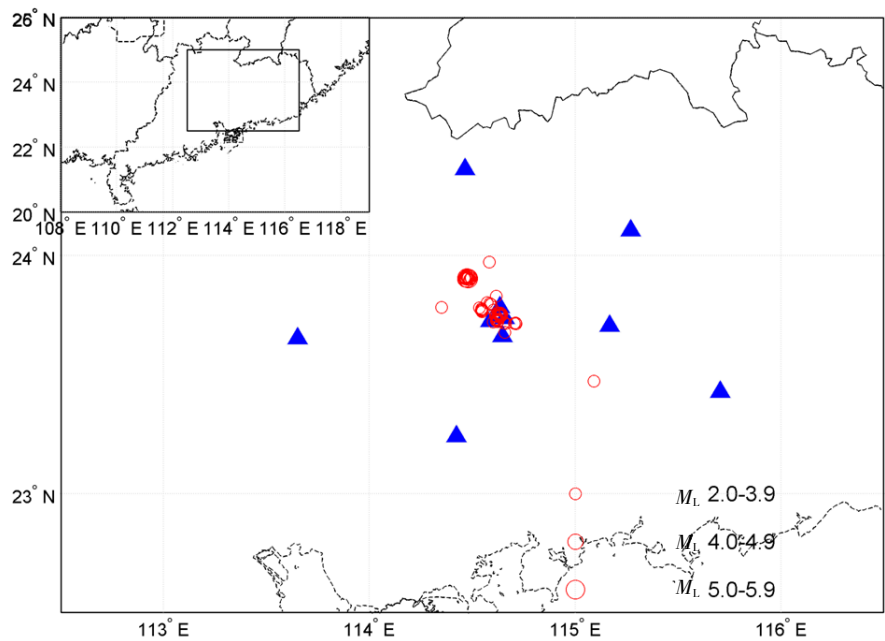


图 1 所用地震事件的震中及台站分布

Fig.1 The distribution of earthquake events and stations

由于地震预警系统对时效性要求较高，需用震中距较近、传播时间较短的台站；且经验分析表明，震中距超过 100 km，由于折射、反射等原因，地震震相变得非常复杂，首先到达的不一定是 Pg 震相，不容易提取特征参数，震级的估算也会产生较大的误差。因此研究仅使用震中距在 100 km 内的地震台站波形记录进行计算，以保证震级估计结果的准确性和可靠性。

使用所选地震的垂直向波形记录进行分析。为避免地动噪声和其他信号的干扰，去除 P 波触发后 2 s 时间内信噪比小于 3 的波形，最终对 70

个地震事件共选出 550 条垂直向地震速度记录参与计算，共使用了 10 个台站的数据记录，台站分布见图 1，震中距及震级分布图见图 2。

为了研究这种单台 P 波震级算法在新丰江地区的实用性，我们分别选取 P 波到达后 1 s、2 s、3 s 时间长度的波形数据，对计算得到的震级做统计分析。

### 3 数据处理及研究结果

为了解P 波事件窗长不同对震级计算的影响，

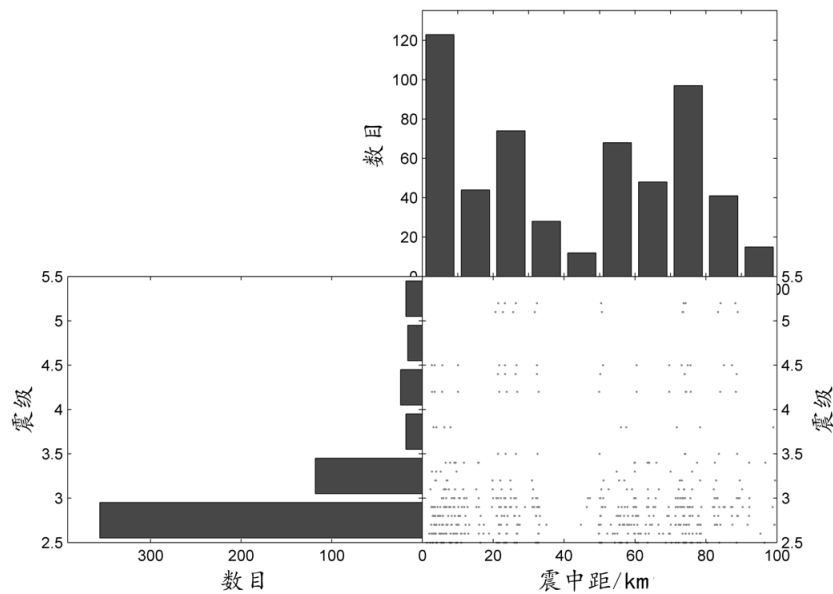


图 2 所用地震事件的震中距及震级分布

Fig.2 Distribution of epicentral distance and magnitude of the earthquake events

我们分别对 P 波到达后 1 s、2 s、3 s 内的波形分别进行拟合求  $B$  值，再对这些记录的  $B$  值、速度峰值和实际编目震级做线性回归，求出回归方程，然后反演出估算震级，并统计震级偏差情况。

首先用前述绘制包络线的方法对垂直向 P 波

段速度记录进行包络拟合，然后用  $f(t) = Bt \cdot \exp(-At)$  形式的函数对包络线上的点进行拟合，求出系数  $B$ ，即拟合曲线在 P 波到时点的斜率。如图 3 为 HYJ 台地震记录做出的包络线和拟合曲线及计算出的相关特征参数。

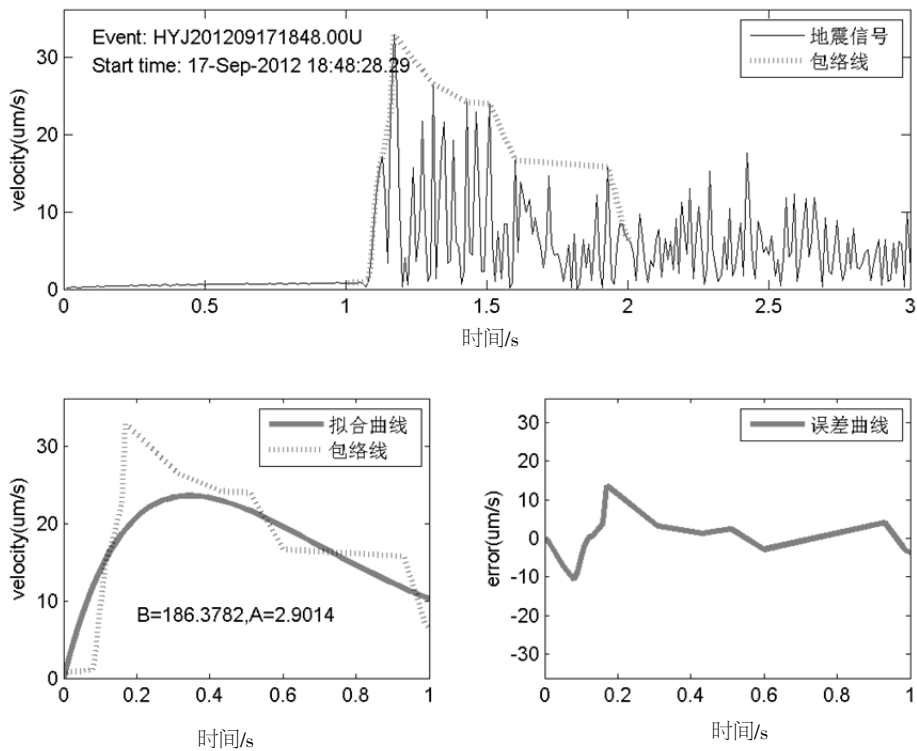
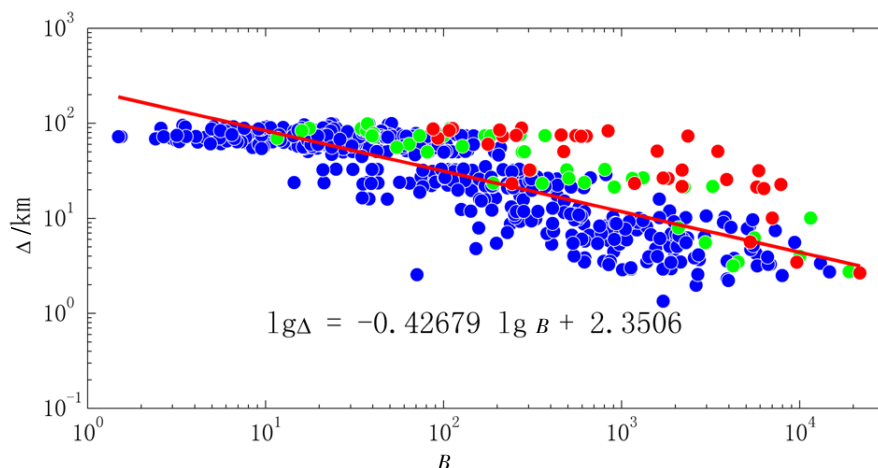


图 3 记录 HYJ201209171848.00U 在 P 波到达后 1 s 内的包络线和拟合曲线及计算出的特征参数

Fig.3 The envelope, fitting curves and calculated characteristic parameters of record HYJ201209171848.00U within one second after the P-wave arrival

然后对  $B$  值与震中距的相关关系进行验证。对所选取的 70 个  $M_L$  大于等于 2.5、震中距小于 100 的垂直向 P 波记录共 550 条全部进行反演,得到  $B$  值,与震中距  $\Delta$  的关系如图 4 所示。结果证

实  $\lg B$  与  $\lg \Delta$  存在近似线性关系,因此可以把  $\lg \Delta$  换成  $\lg B$ ,地震震级可以由 P 波时间窗内振幅绝对值的最大值和参数  $B$  通过经验公式  $M = a \lg P_{\max} + b \lg B + c$  来进行确定。



蓝色、绿色、红色分别代表  $M_L$  在 2.5~3.5、3.5~4.5、4.5~5.5 之间的事件

图 4 P 波段 1s 数据计算得的参数  $B$  与震中距  $\Delta$  的经验关系

Fig.4 The relationship of parameter  $B$  and the epicentral distance  $\Delta$  by using 1 second waveform after P arrival

对全部地震记录的特征参数做线性回归。最终用三种 P 波窗长得到的估算震级计算公式为:

P 波段 1s 的数据得到  $a=1.116$ ,  $b=-0.811$ ,  $c=3.298$ , 预警震级估计公式:

$$M_{\text{est}} = 1.116 \lg P_{\max} - 0.811 \lg B + 3.298 \quad (3)$$

P 波段 2s 的数据得到  $a=0.322$ ,  $b=-0.100$ ,  $c=2.767$ , 预警震级估计公式:

$$M_{\text{est}} = 0.322 \lg P_{\max} - 0.100 \lg B + 2.767 \quad (4)$$

P 波段 3s 的数据得到  $a=0.392$ ,  $b=-0.150$ ,  $c=2.730$ , 预警震级估计公式:

$$M_{\text{est}} = 0.392 \lg P_{\max} - 0.150 \lg B + 2.730 \quad (5)$$

分别用三种震级估计公式估算出这些地震记录的震级,并计算误差(图 5、6、7、8)。由图 7 可见,对 P 波段前 1s、2s、3s 波形数据计算的震级平均偏差分别为 0.383 81、0.399 81、0.400 85,三种结果十分接近,70%以上的单台震级与实际震级偏差在 0.5 级以内,由 P 波段 1s 数据计算的震级误差稍小于 P 波段 2s 和 3s。

## 4 结语

根据广东新丰江水库地区 70 个地震的 550 条垂直向地震记录,我们计算了初至 P 波段前 1s、2s、3s 时间窗的包络曲线和拟合参数  $B$  值,并通

过分析验证了  $\lg B$  与  $\lg \Delta$  存在近似线性关系。因此对  $B$  值、时间窗内最大振幅  $P_{\max}$  及实际震级做线性回归,得到估算震级  $M_{\text{est}}$  的经验关系。

经过分析比较后,发现由三种不同 P 波段窗长计算的震级差别不大,平均震级偏差在 0.4 级以内,单台估算震级偏差 70%以上在 0.5 级以内。由 P 波段 1s 数据计算的震级误差稍小于 P 波段 2s 和 3s,推测可能是因为我们研究地区的近台记录较多,S-P 到时差很小,使用 2s 和 3s 时窗做包络拟合时可能把部分 S 波形也包括了在内,因此对结果造成了一定的影响。

综上,当广东新丰江水库地区再次发生地震时,最快可用近台记录到的 P 波到达后 1s 内的数据快速求得参数  $B$ ,并根据经验公式估算出震级,计算方便快捷,可以有效增加预警时间,缩小预警盲区。

## 参考文献:

- [1] Xu Y, Wu Z L, Jiang C S, et al. Estimating the size of an earthquake using short-period seismograms of the first three seconds: a simulated experiment using the 1999 Chi-Chi earthquake sequence [J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 21 (2): 139-147.
- [2] Peng H S, Wu Z L, Wu Y M, et al. Developing a

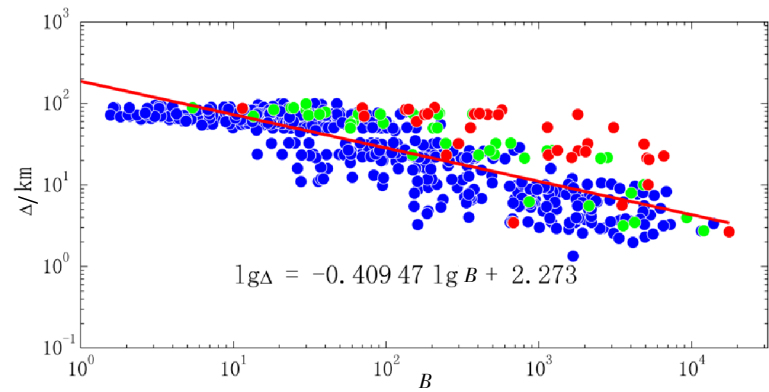


图 5 P 波段 2 s 数据计算得的参数  $B$  与震中距  $\Delta$  的经验关系

Fig.5 The relationship of parameter  $B$  and the epicentral distance  $\Delta$  by using 2 second waveform after P arrival

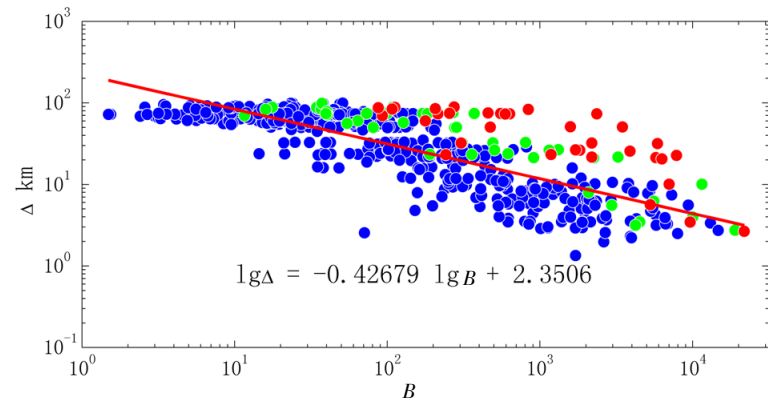


图 6 P 波段 3 s 数据计算得的参数  $B$  与震中距  $\Delta$  的经验关系

Fig.6 The relationship of parameter  $B$  and the epicentral distance  $\Delta$  by using 3 second waveform after P arrival

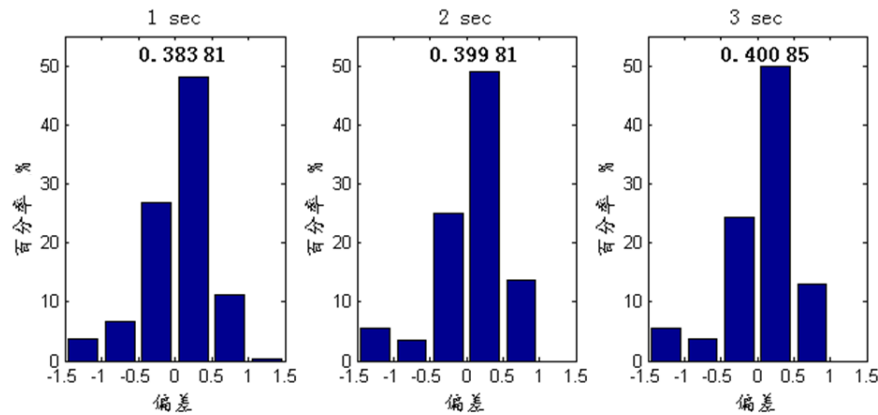


图 7 P 波段 1s、2s、3s 震级的误差分布直方图

Fig.7 Histogram of the magnitude errors of 1s, 2s and 3s data after P arrival

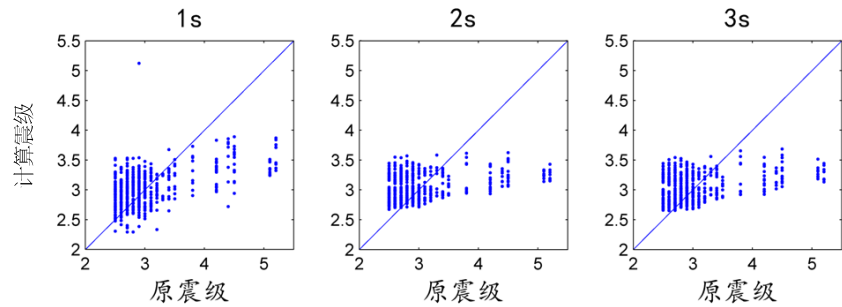


图 8 原震级与估算震级的对应关系

Fig.8 Correspondence of the original magnitudes and estimated magnitudes

- prototype earthquake early warning system in the beijing capital region [J]. Seismological Research Letters, 2011, 82 (3): 394–403.
- [3] Park Y, Park S C, Kim K H, et al. Magnitude scaling relationships from the first 3s of P-wave arrivals in South Korea[J]. Journal of Seismology, 2010, 14 (4): 761–768.
- [4] Zollo A, Lancieri M, Nielsen S. Reply to comment by P. rydeleketal. on “earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records” [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34: L20303.
- [5] Wu, Y.M., T.C.Shin, Y. B. Tsai. Quick and reliable determination of magnitude for seismic early warning, bull [J]. Seism.Soc. Am., 1998, 88: 1 254–1 259.
- [6] Odaka T, Ashiya K, Tsukada S, et al. A New method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93 (1): 526–532.
- [7] 苗庆杰, 刘希强, 崔鑫. 基于单台初至 P 波快速测定震级方法及应用[J]. 地震工程学报, 2015, 37 (1): 548–554.
- [8] 宋晋东. 地震预警中地震波到时自动识别和震级快速估算研究[D]. 中国地震局工程力学研究所, 2007.
- [9] 周彦文. 基于单台 P 波记录的早期地震预警方法研究 [D]. 中国地震局兰州地震研究所, 2008.
- [10] 马亮. 用于地震预警的单台定位技术研究[D]. 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- [11] 宋晋东. 高速铁路运行控制用地震动参数及单台地震预警技术研究[D]. 中国地震局工程力学研究所, 2013.