

洪玉清, 杨选, 龚萱, 等. 广西北流 5.2 级地震及前震的矩震级测定 [J]. 华南地震, 2020, 40 (2): 26-31. [HONG Yuqing, YANG Xuan, GONG Xuan, et al. The Moment Magnitudes Measurement of Beiliu-Huazhou  $M_s$  5.2 Earthquake and Its Foreshock in the Junction of Guangxi and Guangdong [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (2): 26-31]

## 广西北流 — 广东化州 5.2 级地震及 前震的矩震级测定

洪玉清<sup>1,2,3</sup>, 杨选<sup>1,2,3</sup>, 龚萱<sup>1,2,3</sup>, 马晓静<sup>1,2,3</sup>, 蒋策<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:** 利用理论波形与实际波形拟合方法, 测定了发生于 2019 年 10 月 12 日 22 时 55 分 26 秒和 24 秒的广西北流—广东化州  $M_s$  5.2 级地震 (主震) 及其  $M_L$  4.2 级前震的矩震级, 得到主震矩震级为  $M_w$  4.7、前震矩震级为  $M_w$  4.2。

**关键词:** 重叠地震; 矩震级; 地震波; 波形拟合

中图分类号: P315.7 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662 (2020) 02-0026-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.02.04

## The Moment Magnitudes Measurement of Beiliu-Huazhou $M_s$ 5.2 Earthquake and Its Foreshock in the Junction of Guangxi and Guangdong

HONG Yuqing<sup>1,2,3</sup>, YANG Xuan<sup>1,2,3</sup>, GONG Xuan<sup>1,2,3</sup>, MA Xiaojing<sup>1,2,3</sup>, JIANG Ce<sup>1,2,3</sup>

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

**Abstract:** On October 12<sup>th</sup>, 2019,  $M_L$  4.2 and  $M_s$  5.2 earthquakes occurred successively in Beiliu, Guangxi and Huazhou, Guangdong at 22:55:24 and 22:55:26. In this paper, the fitting approach of theoretical waveform and actual waveform is employed for measuring the moment magnitudes of  $M_L$  4.2 and  $M_s$  5.2 earthquakes. Finally, the moment magnitudes of main shock and foreshock are  $M_w$  4.7 and  $M_w$  4.2.

**Keywords:** Overlap earthquake; Moment magnitude; Seismic wave; Waveform fitting

收稿日期: 2020-02-01

基金项目: 广东省防震减灾科技协同创新中心重点任务“地震预警关键技术研究及系统研制”(2018B020207011)

作者简介: 洪玉清 (1986-), 男, 工程师, 主要从事地震监测研究。

E-mail: 594706459@qq.com

通信作者: 杨选 (1978-), 男, 高级工程师, 主要从事地震观测研究工作。

E-mail: 27960687@qq.com

## 0 引言

2019 年 10 月 12 日 22 时 55 分在广东化州与广西北流交界发生由两个事件相互重叠构成典型的同源重叠地震。广东地震台网速报结果为:前震  $M_L$  4.2 发生于 24.59 秒纬度  $22.26^\circ$  经度  $110.54^\circ$  深度是 13 km, 主震  $M_S$  5.2 发生于 26.66 秒纬度  $22.15^\circ$  经度  $110.52^\circ$  深度是 10 km, 地点为广东化州。速报地震工作中依据《地震速报技术管理规则》被统一命名为广西北流 5.2 级地震, 之后正式编目时修定为:前震  $M_S$  4.6 发生于 24.59 秒纬度  $22.155^\circ$  经度  $110.535^\circ$  深度是 13km, 主震  $M_S$  5.1 发生于 26.66 秒纬度  $22.149^\circ$  经度  $110.541^\circ$  深度是 9 km, 参考地名修改为广西北流、广东化州交界。

对于发震时刻接近的两个或多个事件, 台站记录波形相互叠加, 对每个地震事件的参数测定带来较大影响。王登伟<sup>[1]</sup>对重叠地事件进行了分类, 给出了同源重叠事件的主要识别依据; 冯雪玲等<sup>[2]</sup>利用小波包变换识别地震波形叠加的起始时刻, 从而实现叠加地震事件的分离; 李璐等<sup>[3]</sup>、谭毅培等<sup>[4]</sup>、马晓静等<sup>[5]</sup>利用匹配滤波技术, 以历史地震事件为模板, 在叠加波形中搜寻与模板相识的事件, 该方法在处理余震系列和震群时具有较大优势, 且能提高震相到时的拾取精度, 特别是使用张淼等<sup>[6]</sup>的匹配滤波技术能同时匹配定位确定地震大小, 但是由于前震和主震两个地震仅差约 2s, 这种高度重叠事件震幅相互叠加, 尤其影响后面地震的震级测量精度。本文将以此次重叠事件为例, 尝试通过理论地震波在台站端叠加后与实际地震波形进行比较来确定前震及主震的标量地震矩, 进而确定矩震级, 以此来探索重叠地震震级的测定问题。

## 1 原理方法

若  $u_{i1}(t)$  前震  $t$  时刻在  $i$  台的位移,  $u_{i2}(t)$  主震  $t$  时刻在  $i$  台的位移, 则依据地震波的可叠加原理, 前震与主震传播到台站  $i$  的等效位移  $u_i(t)$  可按 (1) 式获得。

$$u_i(t) = u_{i1}(t-t_0) + u_{i2}(t) \quad (1)$$

其中  $t_0$  为主震与前震的发震时间差。再用巴特沃斯滤波器把实际波形与叠加获得的理论

波滤波到同一频段, 截取一定长度的实际波形段, 按 (2) 式计算该波形段与对应理论波形段的偏差和  $e_i$ 。

$$e_i = \sum_{t=t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} \|u_{i\text{实际}}(t_{\text{start}}:t_{\text{end}}) - u_{i\text{理论}}(t_{\text{start}}-\Delta t:t_{\text{end}}-\Delta t)\| \quad (2)$$

上式中  $t_{\text{start}}$  和  $t_{\text{end}}$  分别为截取波形段的起止时间,  $\Delta t$  为理论波形段和实际波形段互相关确定的时间平移。

在震源的走向、倾向和滑动角已知时, 按 (3) 式确定地震矩  $M_0$ , 合成不同矩震级对应的理论波形, 计算对应的偏差  $e_i$ , 搜索  $e_i$  极小值对应的矩震级, 即为第  $i$  台的矩震级  $M_{iw}$ , 各台站矩震级的算术平均值即为此地震矩震级  $M_w$ 。

$$M_w = \frac{2}{3} (\lg M_0 - 9.1) \quad (3)$$

## 2 资料

### 2.1 实际观测波形数据预处理

本文选取重叠地震震相记录简单清晰且信噪比较高的 16 个近台 (见图 1) 实际波形进行预处理, 去除倾斜和均值, 再扣除仪器响应, 然后积分为位移记录, 滤波后通过坐标变换将  $E$ 、 $N$  分量数据转换为径向 ( $R$ ) 和切向 ( $T$ ) 数据。考虑到波形的长周期部分受背景噪声影响相对较小, 应该选用长周期部分进行震级搜索, 但同时考虑到前震和主震发震时刻不足 2 s, 因此在滤波器的选取上, 决定采用频带为 0.02~0.5 Hz 的 5 阶巴特沃斯带通滤波器滤波, 既可以滤除大部分噪声, 又可以保留能反映出两个地震相互叠加这个信息。

### 2.2 震源机制

前震初动较易读取, 共获得 64 个分布较好较为可靠的初动方向, 运用 FOCMEC 方法获得其震源机制解, 见表 1。主震由于受前干扰初动不易读取, 通过比较 XNY、GAZ 等近台的初动, 初步认为两个地震的震源机制相同<sup>[7]</sup>。

表 1 前震震源机制解  
Table1 Focal mechanism solutions of foreshocks

节面	倾角 / ( $^\circ$ )	走向 / ( $^\circ$ )	滑动角 / ( $^\circ$ )
节面 I (O)	70.89	356.13	-8.87
节面 II (O)	81.62	89.06	-160.68

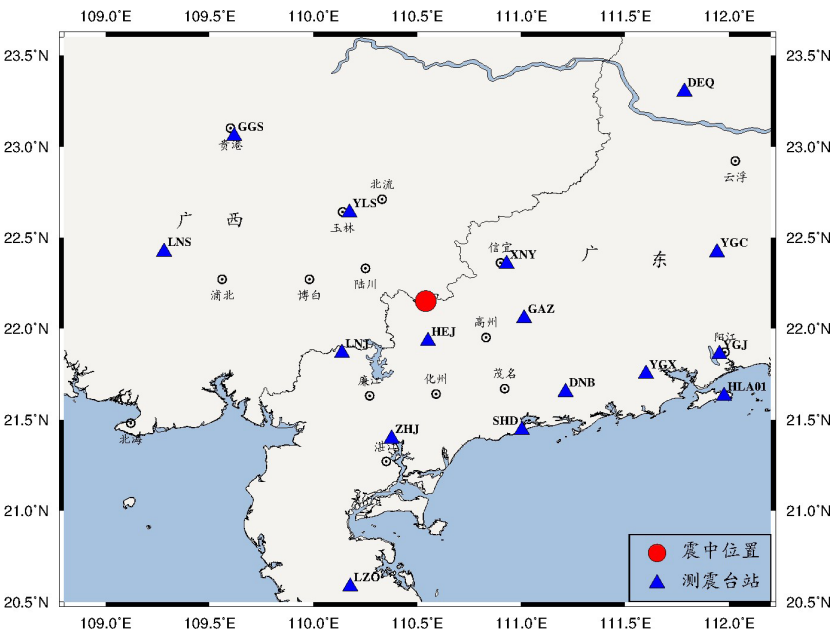


图 1 震中及台站分布图  
Fig.1 Distribution map of epicenters and stations

2.3 速度模型及理论波形

本文采用汪荣江等开发的 Qseis2006b 程序<sup>[8-9]</sup>合成理论波形。程序中使用的速度模型为带有沉积层的 crust2.0 模型（表 2），震源机制解

为运用 F0CMEC 方法计算得到的震源机制解（表 2），地震位置参数采用广东省地震台网中心统一编目结果。

表 2 速度模型  
Table 2 Velocity modle

序号	层厚 /(km)	P 波速度 /(km·s <sup>-1</sup> )	S 波速度 /(km·s <sup>-1</sup> )	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )
1	0.0 ~ 1.0	2.5	1.2	2.1
2	1.0 ~ 11.0	6.0	3.4	2.7
3	11.0 ~ 20.0	6.6	3.7	2.9
4	22.0 ~ 32.0	7.2	4.0	3.1
5	32.0+	8.2	4.7	3.4

3 前震矩震级测定

根据地震编目结果可知前震和主震发震时刻相差 2.07 s；但是通过读取震相清晰台站的初至到时发现两个地震初至 P 波到时差为 1.77 s，此到时差基本不随震中距离变化，其它的同组震相也具有此特征，这是同源重叠地震的典型特征之一。因此确定各台站从初至波到达开始 1.7 s 的波形数据只与前震有些关系，选择理

论 P 波初至开时长 1.70s 的信号，分别与实际 P 波初至前后 0.5s 的实际波形做互相关，相关系数最大时，利用（2）式求取该台站该震级对应理论波形 P 波段和实际波形 P 波段的偏差和。以矩震级  $M_w$ 3.80~4.80 为搜索范围，0.02 级为搜索步长，得到搜索范围内各矩震级对应的偏差和，拟合偏差和，呈现抛物线状，抛物线最小值点对应矩震级，即为该台站的矩震级。

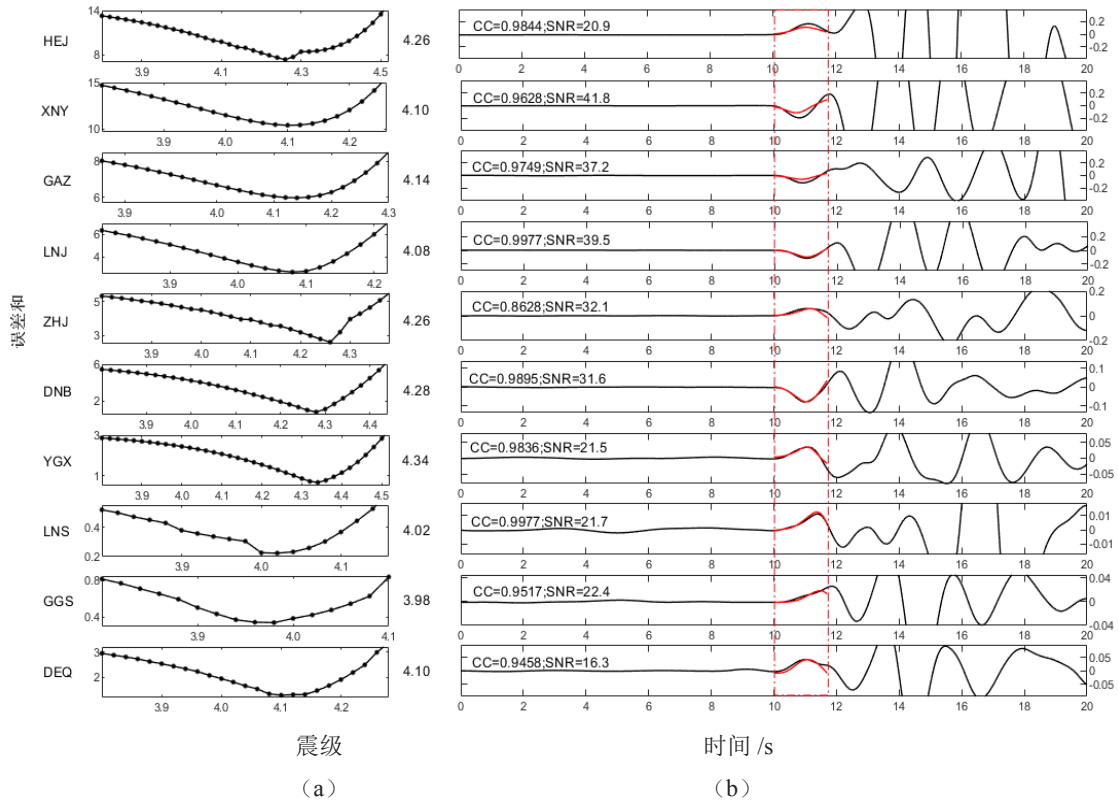


图 (a) 左侧标注了台站代码; 图 (a) 为该台站最小二乘误差和拟合曲线; 图 (a)、(b) 中间数值为该台站搜索到的矩震级值;  
图 (b) 为该台站波形拟合图, 黑色代表实际波形, 红色为理论波形。  
每个台站波形拟合图左上角标注的 CC 代表搜索到的矩震级值时理论波形 P 波段和实际波形 P 波段的相关系数,  
SNR 代表滤波后实际波形 P 波段的信噪比。

图 2 前震震级测定时各台站理论波形与实际波形拟合误差曲线及各台站测定矩震级时的波形拟合图  
Fig.2 The fitting error curve of theoretical waveform and actual waveform of each station and the waveform fitting diagram of moment magnitude measurement of each station when the foreshock's magnitude is measured

我们选择相关系数大于 0.85、信噪 3 倍以上的台站, 同时查看波形拟合图, 去除互相关时产生错误的高互相关系数, 但实际上理论波

形和实际波形相似程度不高的台站, 得到 HEJ 等 10 个台站 (见图 2), 读取每个台站矩震级 (见表 3), 平均为 4.16, 前震矩震级  $M_w$  为 4.2。

表 3 各台站测定的前震矩震级  
Table 3 The foreshock's magnitude measured by each station.

台站代码	HEJ	XNY	GAZ	LNJ	ZHJ	DNB	YGX	LNS	GGs	DEQ	平均
震中距	0.225	0.415	0.455	0.469	0.771	0.805	1.067	1.191	1.234	1.621	-
方位角	176.32	61.53	102.60	232.00	191.07	128.48	111.98	283.04	316.77	45.15	-
最大相关系数	0.9844	0.9623	0.9749	0.9977	0.8628	0.9895	0.9836	0.9977	0.9517	0.9458	-
偏差 $e$	7.337	10.416	5.982	2.664	2.599	0.796	0.663	0.224	0.343	1.291	-
对应矩震级	4.26	4.10	4.14	4.08	4.26	4.28	4.34	4.02	3.98	4.10	4.2

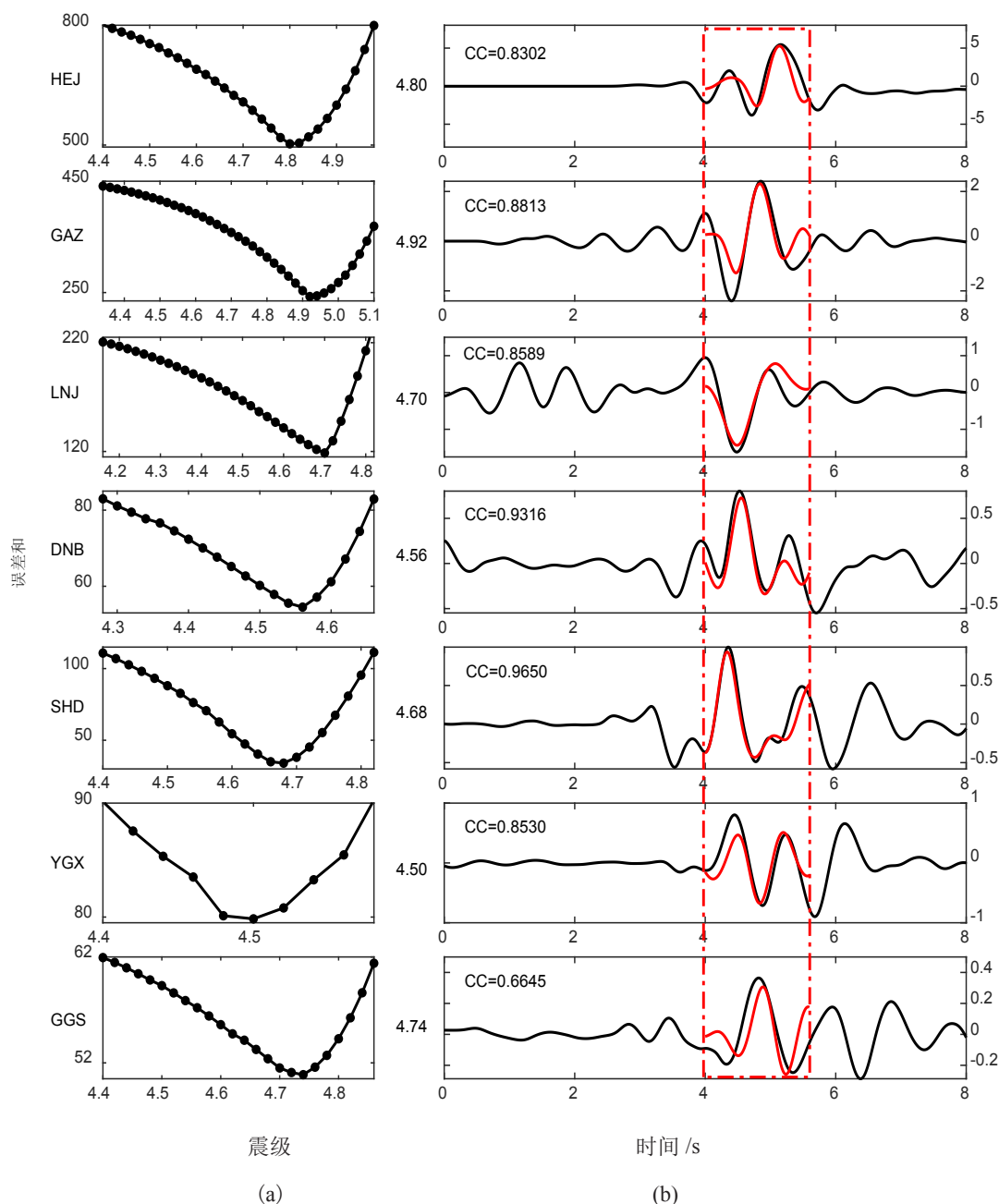
## 4 主震矩震级测定

上一步已确定的前震理论波形, 分别与不同矩震级对应的主震理论波形按 1.77 s 到时差叠加, 从而获取前震与主震相互叠加的合成理论波

形。因为初至 S 波很难提取准确, 所以改为截取的合成理论 S 波中最大幅值前后各 2 s 的波形, 与实际波形最大幅值处前后各 2 s, 在实际最大 S 波幅值前后滑移, 并分别做互相关, 相关系数最大时, 按 (2) 式求取偏差和。由于从波形

就直观显示主震震级要大于前震震级, 因此选择主震矩震级搜索范围为每个台站前震矩震级开始到  $M_w 5.10$  截止, 仍以 0.02 级为搜索步长,

拟合偏差和, 曲线呈现抛物线状, 抛物线最小值点对应震级矩, 即为该台站的矩震级。



注: 图 (a) 左侧标注了台站代码; 图 (a) 为该台站最小二乘误差和拟合曲线; 图 (a)、(b) 中间数值为该台站搜索到的矩震级值; 图 (b) 为该台站波形拟合图, 黑色代表实际波形, 红色为理论波形。

每个台站波形拟合图左上角标注了搜索到的矩震级值时, 理论波形 P 波段和实际波形 P 波段的相关系数。

图 3 主震震级测定时各台站理论波形与实际波形拟合误差曲线及各台站测定矩震级时的波形拟合图

Fig.3 The fitting error curve of theoretical waveform and actual waveform of each station and the waveform fitting diagram of moment magnitude measurement of each station when the main shock's magnitude is measured

我们选择相关系数大于 0.60、信噪比 3 以上的台站, 同时查看波形拟合图, 去除互相关时产生错误的高互相关系数, 实际上理论波形

和实际波形相似程度不高的台站, 得到 HEJ 等 7 个台站 (见图 3), 读取每个台站矩震级 (见表 4), 平均为 4.70, 主震矩震级  $M_w$  为 4.7。



表 4 各台站测定的主震矩震级  
Table 4 The main shock's magnitude measured by each station.

台站代码	HEJ	XNY	GAZ	LNJ	ZHJ	DNB	YGX	LNS	GGs	DEQ	平均
震中距	0.225	0.415	0.455	0.469	0.771	0.805	1.067	1.191	1.234	1.621	-
方位角	176.32	61.53	102.60	232.00	191.07	128.48	111.98	283.04	316.77	45.15	-
最大相关系数	0.9844	0.9623	0.9749	0.9977	0.8628	0.9895	0.9836	0.9977	0.9517	0.9458	-
偏差 $e$	7.337	10.416	5.982	2.664	2.599	0.796	0.663	0.224	0.343	1.291	-
对应矩震级	4.26	4.10	4.14	4.08	4.26	4.28	4.34	4.02	3.98	4.10	4.2

5 结语

（1）前震矩震级为  $M_w4.2$ ；在测定过程中，震源机制以及使用的波形资料都是没受主震干扰，其结果应该可靠的。在考虑消除前震影响后，主震的矩震级测定为  $M_w4.7$ ，比前震大 0.5 级。

（2）通过理论波形的叠加，再利用理论波形与实际波形拟合方法，可以将重叠地震区分，震级测定时消除相互影响，从而使地震的大小得到更加准确。

（3）为了保留能反映两个地震相互叠加的信息，选用的巴特沃斯带通滤波器高频端使用到了 0.5 Hz，由于高频成份对速度结构、衰减因子、地表地形起伏等因素都较为敏感，这些因素在震级测定时具体定量影响还值得进一步研究。

**致谢：**计算理论地震波形时使用了德国波茨坦地学研究中心（GFZ）汪荣江研究员的 Qseis2006 软件，在此表示感谢！

参考文献：

[1] 王登伟. 遥测地震台网中的地震叠加问题 [J]. 地震地磁观测与研究, 2007, 28 (2) : 47-49.

[2] 冯雪玲, 李志海, 潘振生, 等. 基于小波包变换的重叠地震波分离 [J]. 地震地磁观测与研究, 2013, 34 (1) : 66-70.

[3] 李璐, 王宝善, 侯金欣. 模版匹配滤波技术在地震数据处理中的应用 [J]. 中国地震, 2017, 33 (1) : 14-22.

[4] 谭毅培, 曹井泉, 刘文兵, 等. 2013 年 3 月涿鹿微震群遗漏地震事件检测和发震构造分析 [J]. 地球物理学报, 2014, 57 (6) : 1847-1856.

[5] 马晓静, 吕作勇, 龚萱, 等. 河源地区小震群的检测与定位 [J]. 华南地震, 2018, 38 (1) : 39-46.

[6] 张淼. 地震定位与检测 [D]. 合肥: 中国科技大学, 2015.

[7] 广东地震台网中心. 2019 年 10 月 12 日广西北流 5.2 级地震图集 [R]. 广州: 广东省地震局, 2019.

[8] Wang R. A Simple Orthonormalization Method for Stable and Efficient Computation of Green's Functions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89 (3) : 733-741.

[9] Wang R, Heimann S, Zhang Y, et al. Complete synthetic seismograms based on a spherical self-gravitating Earth model with an atmosphere-ocean-mantle-core structure[J]. Geophysical Journal International, 2017, 210: 1739-1764.