

马晓静, 吕作勇. 广东地区重复地震识别及其在台网定位评价中的应用[J]. 华南地震, 2017, 37 (1): 22-28. [MA Xiaojing, LYU Zuoyong. Recognition of Repeating Earthquakes and Its Application in Network Location Evaluation in Guangdong Province[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(1): 22-28.]

# 广东地区重复地震识别及其在台网定位评价中的应用

马晓静<sup>1,2,3</sup>, 吕作勇<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(筹), 广州 510070)

**摘要:** 利用广东数字地震台网 2010 年 1 月至 2013 年 10 月的地震震相到时和波形资料, 首先对地震目录进行完整性分析, 选出在  $M_c$  震级 0 级以上的 3 969 个地震进行波形互相关分析。设定在至少三个台站记录的垂直分量波形相关系数大于 0.8 的两个事件为重复地震对, 共识别出广东地区的重复地震 1 612 个, 占总数的 41%。根据前人“重复地震震中位置间的差异约为四分之一优势波长”的研究成果, 将筛选出的重复地震对用于定量判断地震目录中的震相拾取误差和评估台网定位精度, 结果显示: 广东地震台网的震相拾取误差约 80% 在 0.3 s 内, 约 70% 在 0.2 s 内, 40% 多在 0.1 s 内; 内陆定位误差较小, 这与该地台站密集、方位分布较好有关, 而沿海定位误差相对较大。

**关键词:** 重复地震; 波形相关; 震相拾取精度; 定位评价; 地震台网

**中图分类号:** P315.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8662 (2017) 01-0022-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2017.01.004

## Recognition of Repeating Earthquakes and Its Application in Network Location Evaluation in Guangdong Province

MA Xiaojing, LYU Zuoyong

(Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** According to the complete magnitude analysis, the paper selects 3 969 earthquakes with magnitude larger than 0 from Jan 2010 to Oct 2013 in Guangdong Province and does the waveform cross-correlated analysis. Two events with correlation coefficient larger than 0.8 in no less than 3 stations' vertical waveforms are regarded as a repeat event pair, and 1 612 repeating events are recognized, being 41% of the whole events. According to the research result that the distance of a repeat pair is about a quarter of the dominant wavelength, seismic phase picking error and location accuracy is quantitatively evaluated. It is observed that 80% of the

**收稿日期:** 2015-12-09

**基金项目:** 中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20140316)

**作者简介:** 马晓静(1987-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地震监测工作。

**E-mail:** maxiaojing07@gmail.com.

phase picking errors are within 0.3 sec, 70% within 0.2 sec and 40% within 0.1 sec. The location error is smaller in the inland area than coast area, which is related to the dense and even distribution of seismic stations.

**Keywords:** Repeating earthquake; Waveform correlation; Phase picking error; Positioning evaluation; Seismic network

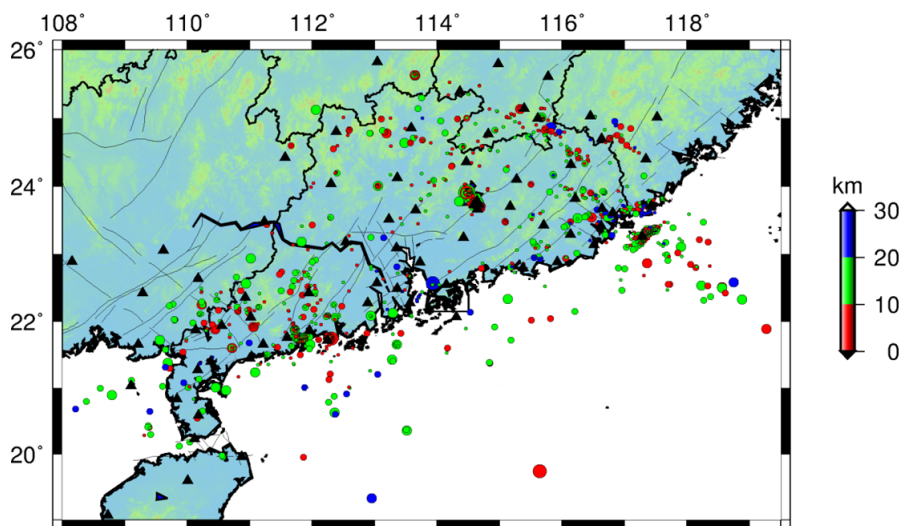
## 0 引言

重复地震的概念在上世纪 60 年代被提出,后来在全部震级范围和很多构造环境下发现了各种意义上的重复地震序列。典型的重复地震序列被认为是一组有着相同的震级、空间位置、波形、震源机制的事件<sup>[1]</sup>。中国大陆的重复地震约占统计总数的 10%<sup>[2]</sup>,这一比例在利用区域台网分析大震余震区内重复地震的研究中又明显增高<sup>[3]</sup>。重复地震的普遍性大大提高了它的应用价值。

近年来,重复地震广泛应用于断层活动性监测<sup>[4-5]</sup>、地壳介质时间变化<sup>[6]</sup>、地震台网定位精度的

评估<sup>[7-8]</sup>、地震目录中震相拾取误差的定量判断<sup>[9]</sup>、微震检测<sup>[10]</sup>等方面的研究,为地震预测预报研究提供了重要线索。

目前的地震定位精度受到台站分布、速度模型、震相拾取精度、定位算法等多种因素的影响,直接对地震波形进行相关分析,可以减少速度模型等因素的影响,既可以有效评估台网定位质量和震相拾取精度,又可以提高定位精度,加强小震检测能力,为地震数据自动处理提供思路。数字地震学的快速发展和板内重复地震的普遍性,大大提高了波形相关技术的应用价值和应用前景,尽快在广东省内开展波形相关技术和重复地震研



(黑色三角表示台站,圆圈表示地震事件,颜色和直径分别用来区分事件深度和大小。)

图1 地震与台站分布

Fig.1 Distribution map of earthquakes and stations

究,可以更好的利用台网数字地震资料,为深入开展数字地震数据处理工作打下基础。

## 1 研究范围及数据选取

本研究资料来自《广东省测震台网地震观测报告》(2010—2013年)。报告收录了广东台网“十五”期间建设的区域地震台站 44 个(其中 5 个为国家台、39 个为区域台)、地方台站 8 个、共享邻省地震台站 42 个。主要为宽频带地震计,少数为

甚宽频带和短周期地震计。台站分布见图 1。

初步选取观测报告中 2010 年 1 月至 2013 年 10 月、定位台站数不少于 3 个的天然地震,共 12 068 个事件。

首先对这些事件做震级完整性分析。由于地震台站空间分布的非均匀性、数据信噪比的变化、人为操作的误差等原因,台网监测水平具有不稳定性,所以,对地震目录的完整性震级  $M_c$  的科学分析,在地震活动和危险性研究中具有重要意义。而且小地震中有效记录的台站数量较少,在其中

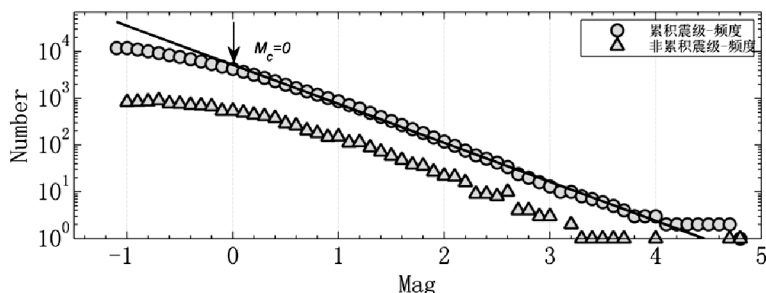


图 2 为累积和非累积的震级-频度分布以及理论拟合线

Fig.2 The cumulative and non-cumulative magnitude- frequency distribution and theoretical fitting line

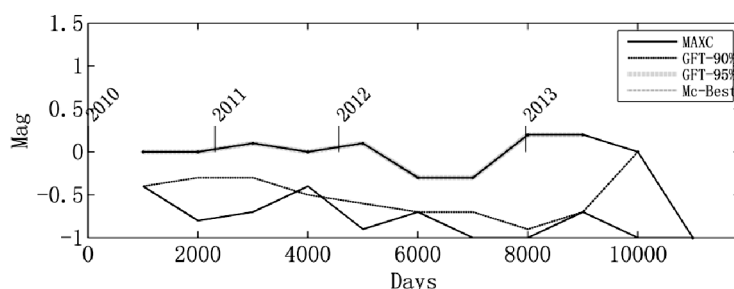


图 3 MAXC 和 GFT 方法得到的震级-时序变化。

Fig.3 The MC-time history calculated by MAXC and GFT method.

挑选连续波形识别样板地震的难度比较大, 剔去震级太小的事件也可以减少计算量。

根据 Gutenberg-Richter 经验公式<sup>[10]</sup>, 得到地震序列的  $G-R$  关系, 如图 2 所示。震级-频度分布图上震级小于  $M_c$  的地震事件数的减少被认为是由于地震目录的不完整引起的, 可以看出震级  $M$  在 0 级附近时  $G-R$  累积曲线开始向下弯曲。

另外使用 MAXC (最大曲率法 Maximum curvature method) 方法和拟合度分别为 90% 和 95% 的 GFT (goodness-of-fit test) 方法<sup>[12]</sup> 分别计算  $M_c$ 。使用固定为 1 000 个事件的窗口来选取数据并滑动计算, 得到  $M_c$  的时序变化 (图 3)。以优先级为  $GFT-95\% > GFT-90\% > MAXC$  的顺序, 选择三种计算结果中的一个作为最终结果, 选择后的  $M_c$  如图中标注为  $M_c-Best$  的灰色曲线所示。 $M_c$  整体比较稳定的保持在  $M_0$  级上下。

综上, 选取序列的最小完整性震级为 0 级, 并收集了  $M$  震级大于 0 的地震事件共 3 969 个, 事件分布见图 1。

## 2 数据处理

我们以观测报告中的震相和定位结果为依据, 对能同时记录到  $P_g$ 、 $S_g$  震相到时的事件对波形做互相关计算。采取 Bath 提出的互相关方法<sup>[13]</sup> (式

1), 作为重复地震识别依据并计算走时差校正。

$$\gamma = \frac{\sum [f_1(t) - \overline{f_1(t)}][f_2(t) - \overline{f_2(t)}]}{\sqrt{\sum [f_1(t) - \overline{f_1(t)}]^2} \sqrt{\sum [f_2(t) - \overline{f_2(t)}]^2}} \quad (1)$$

其中,  $f_1(t)$  和  $f_2(t)$  分别为用于计算的同一台站记录的两个地震事件选定波列,  $\overline{f_1(t)}$  和  $\overline{f_2(t)}$  分别是相应的平均值。

在实际操作中, 参与计算的波形窗、滤波方式对相关系数的计算都会产生影响。本文在预处理中对波形做 1~10 Hz 带通滤波, 截取用于互相关计算的波列时, 选取  $P_g$  到时起、4 倍  $S_g$  和  $P_g$  震相走时差长度的波列, 滑动时间取 -2 sec~2 sec, 步长 0.01 sec。对于区域地震记录, 这种经验性处理基本上既包含了包括体波、面波和尾波在内的全部波列, 又避免了后续噪声信号的混入。在实际计算中, 首先将波列固定为其  $P_g$  到时起至选定波列结束止, 波列与同窗长, 时间窗初始时刻自其  $P_g$  到时前 2 sec 至  $P_g$  到时后 2 sec 处每次滑动 1 个数据点, 分别计算相关系数, 并取极大值作为两波列的最终相关系数结果。

按照式 (1) 对波形数据进行互相关, 得到的  $\gamma$  最大值作为互相关系数, 并取相应的滑动时间作为时间差。

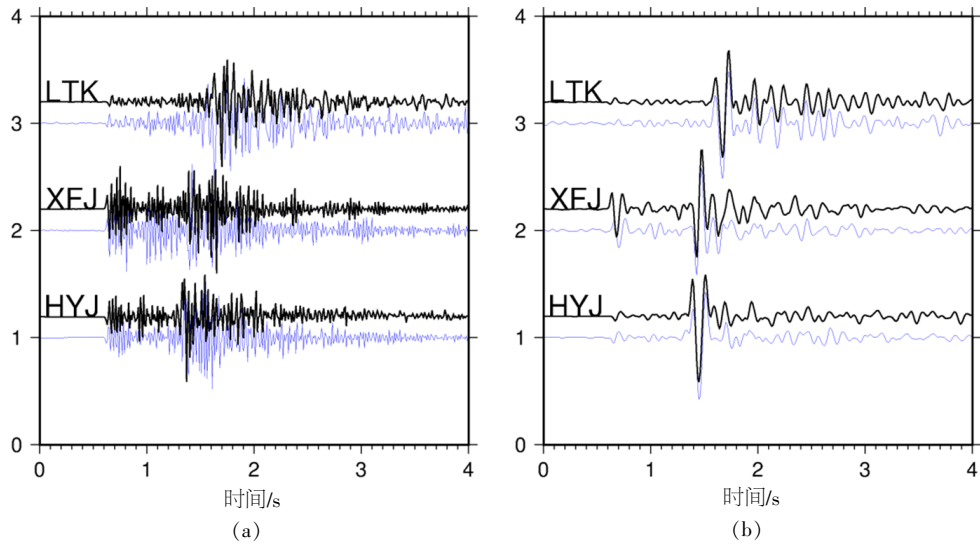


图 4 两个地震在 HYJ、XFJ、LTK 三个台站垂直分量原始波形(a)和经过滤波的波形(b)按照互相关系数最大时得到的时间差滑动后的结果。波形自 P 波前 0.6 s 起,互相关系数分别为 0.91、0.85、0.95。

Fig.4 Original waveform (a) and filtered l waveform (b) of vertical component of the two earthquakes recorded by HYJ, XFJ and LTK stations

如图 4 为 2010 年 11 月 22 日和 2013 年 10 月 12 日两个地震在 LTK、XFJ、HYJ 三个台站垂直分量波形记录的相关计算结果,包括原始波形、经过预处理和滤波的波形。

3 重复地震识别与分析

李宇彤对海城-岫岩地区地震做过三分量波形相关计算,结果表明,70%台站记录的地震对的垂直向相关系数小于水平向,在只选择一个方向的记录作相关计算时,垂直向的结果对于重复地震

的识别可信度最高<sup>[4]</sup>。因此本文选取重复地震事件的标准为:在至少三个台站的垂直分量波形相关系数大于 0.8 的两个事件为重复地震对。由此得到 6 360 个事件对,包含 1 612 个地震事件(图 5),占总数的 41%。

精确的地震定位是地震学研究的一项基础工作,各种地震学研究(地震活动性分析、三维速度结构模型反演等)也都依赖于地震观测报告。随着“十五”广东地震台网数字化改造完成以来,广东区域台网积累和产出了大量的地震观测报告,并

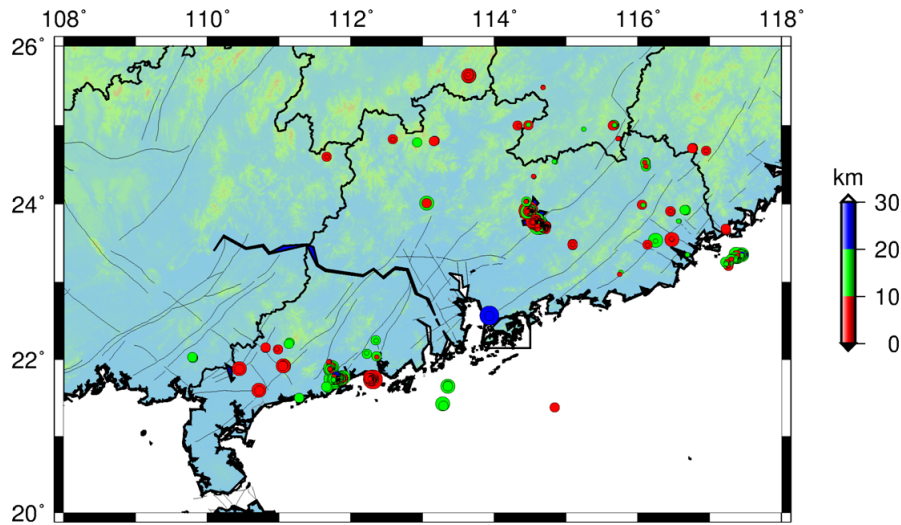


图 5 重复地震事件分布图(圆圈颜色和直径分别表示地震深度和大小)

Fig.5 Distribution map of the repeating earthquakes

且大多是用传统迭代反演方法和一维速度模型来获得地震事件的震源位置。由于地震定位的台站数量、分布不同以及震相拾取误差的存在,导致地震观测报告中定位精度必然存在差异。因此,对大量产出的地震观测报告中地震定位精度进行科学且合理的评估就显得尤为重要。

Geller 和 Mueller 研究认为重复地震水平间距小于优势震相频率波长四分之一<sup>[15]</sup>。Schaff 和 Richards 对中国大陆及邻区具有三个或以上台站 Lg 波记录的重复地震的重新相对定位结果显示,重复地震对间距确实在 1 km 范围内<sup>[9]</sup>。Baisch 等利用二维人工合成地震图模拟横向非均匀介质内波形的相似性与震源之间距离的关系,同样表明地震波形在限定窗长内的一定相关阈值条件下,合成

地震图和相似的实际地震间距满足四分之一优势波长准则<sup>[16]</sup>。考虑到本文使用的为优势震相频率较高的近台记录,可认为重复地震对在同一台站记录的同一震相的走时差即为观测报告中震相的拾取误差,即可通过走时差估计相应的定位误差。

对得到的 6 360 个地震对,进行统计分析。由图 6、7 可以看出,重复地震对之间的震级差在 2 级以内,且数量随震级差增大而减小。根据地震观测报告中的定位结果,重复事件对间的水平距离 90% 在 1.5 km 内,72% 在 1 km 内,垂直距离相对较大。根据前述四分之一优势波长理论,这表明地震观测报告中的水平定位结果比较准确,而震源深度的定位误差大约在 5 km 范围内。这也反映了现有的定位方法对震源深度的计算还有很大

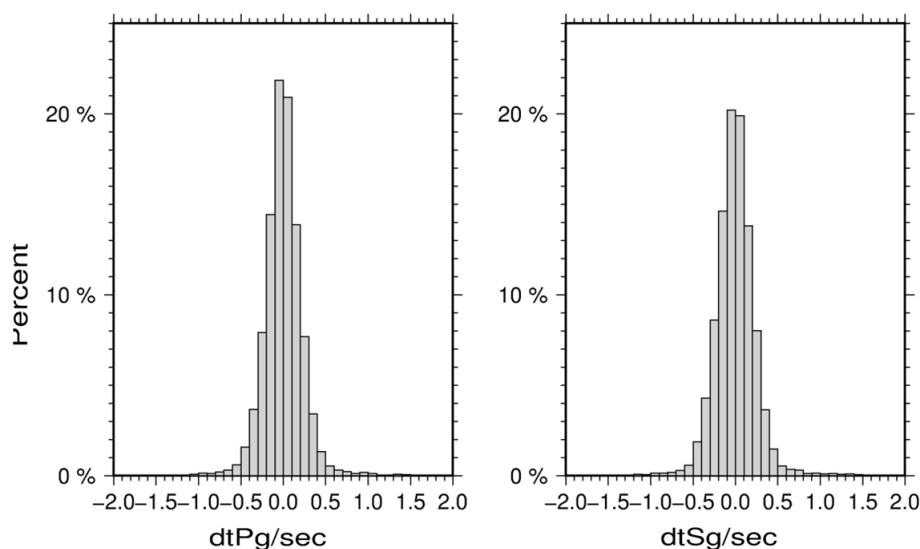


图 6 重复地震对的 Pg、Sg 到时差的柱状统计图

Fig.6 The histograms of the arrival time difference of Pg and Sg of the doublets

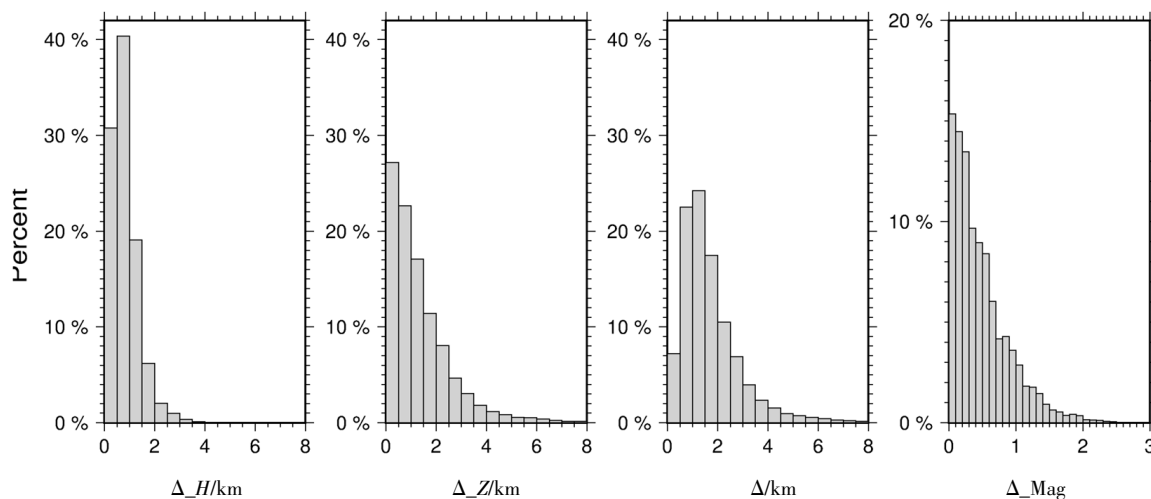


图 7 地震对水平间距、垂直间距、总间距、震级差的分布图

Fig.7 Distribution map of the horizontal, vertical and overall distance of the doublets and the magnitude difference

提高空间。

根据地震观测报告中的  $P_g$ 、 $S_g$  震相到时,剔除了权重为 0 的震相数据,将重复地震对的震相到时差做柱状统计图(图 6)。可以看出  $P_g$ 、 $S_g$  的走时差绝大多数分布在 0.5 s 以内,约 80% 在 0.3 s 内,约 70% 在 0.2 s 内,40% 多在 0.1 s 内。根据华南速度模型上地壳的  $P_g$  速度 6.01 km/s、 $S_g$  速度 3.55 km/s,以及重复地震对间距在 1 km 内的理论和经验前提,观测报告震相拾取误差大部分在理论所限的 0.17 s 和 0.28 s 内。

综上两点,广东地震台网观测报告中的震相拾取和水平定位比较精准,震源深度定位误差较大。

然后,将研究区域划分为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  为步长、以  $0.25^\circ$  为半边长寻找正方形区域中的地震对,并对其震中距取平均值,将结果表示在网格中心点,由此得到用重复地震对的距离表示的定位误差空间分布(图 8)。由于大部分地区地震较少,所以重复地震分布稀疏。地震较多的地区主要为河源、阳江、南澳海域等地,相对来说,河源定位误差最小,这与该地台站密集、方位分布较好有关。而沿海定位误差相对较大。

## 4 结语

本文利用互相关方法识别出广东地区的重复

地震 1 612 个,并根据“四分之一优势波长”理论,定量分析了地震目录中的震相拾取误差和台网定位精度,结果显示,广东地震台网的震相拾取误差和地震水平定位比较准确,震源深度定位误差较大,而这正是地震定位一直以来存在的问题,或许可以通过改进定位方法和精细化地壳速度模型来解决。从水平定位误差的空间分布来看,内陆地区误差较小,而沿海定位误差相对较大,这应与台站分布的密集程度和包围的方位是否严密有关。

综上所述,本文对广东地区的重复地震进行了初步研究,发现广东地震台网所记录到的大量中小地震中,重复地震所占的比例为 41%,大量的存在说明其具有很好的应用价值,当资料更加全面时,应能得出更精细的结果和更多方面的结论,这些还有待进一步的探索。

## 参考文献:

- [1] Rubin A M. Using repeating earthquakes to correct high-precision earthquake catalogs for time-dependent station delays[J]. Bull Seism Soc Amer, 2002, 92 (5): 1 647-1 659.
- [2] Schaff D P, Richards P G. Repeating seismic events in

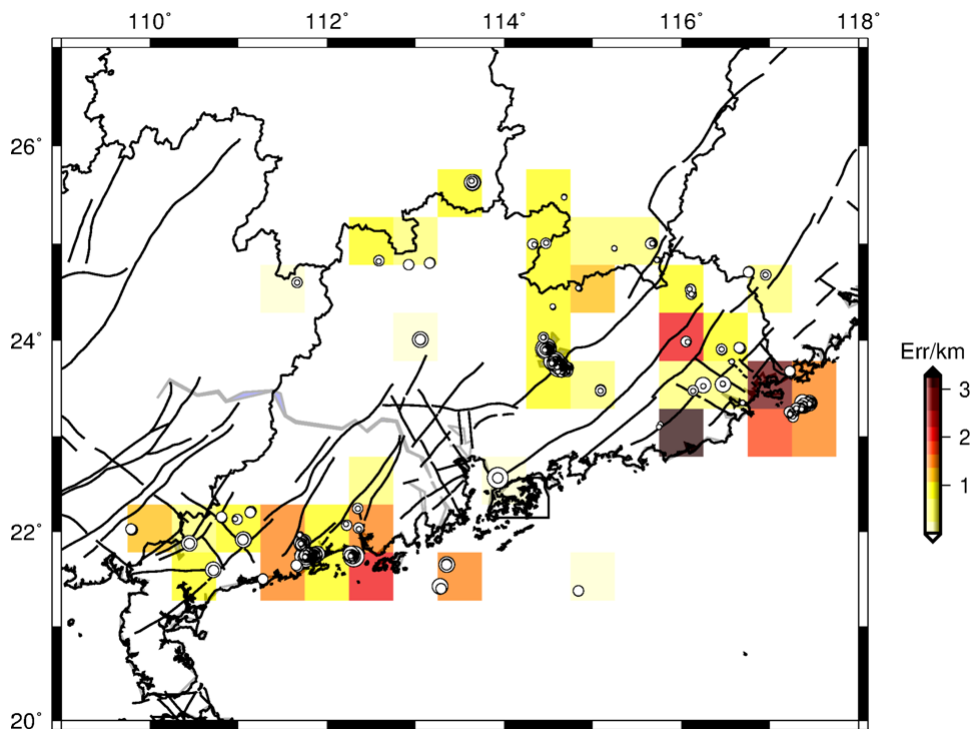


图 8 由重复地震对的震中位置水平距离表示的定位误差空间分布(颜色的深浅表示距离的大小)。

Fig.8 The distribution of the horizontal location errors given by the repeating doublets

- China[J]. Science, 2004, 303: 1 176–1 178.
- [3] Ma X J, Wu Z L, Jiang C S. ‘Repeating earthquakes’ associated with the WFS D -1 drilling site [J]. Tectonophysics, 2014, 619: 44–50.
- [4] 李乐, 陈棋福, 钮凤林, 等. 利用“重复地震”估算丽江–宁蒗断裂带的深部滑动速率[J]. 科学通报, 2008, 53 (23): 2 925–2 932.
- [5] Chen K H, Nadeau R M, Rau R J. Characteristic repeating earthquakes in an arc –continent collision boundary zone: The Chihshang fault of eastern Taiwan [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 276: 262–272.
- [6] 周龙泉, 刘桂萍, 马宏生, 等. 利用重复地震观测地壳介质变化[J]. 地震, 2007, 27 (3): 1–9.
- [7] 蒋长胜, 吴忠良. 由“重复地震”给出的中国地震台网的定位精度估计[J]. 中国地震, 2005, 21 (2): 147–154.
- [8] 蒋长胜, 吴忠良, 李宇彤. 首都圈地区“重复地震”及其在区域地震台网定位精度评价中的应用[J]. 地球物理学报, 2008, 51 (3): 817–827.
- [9] Schaff D P, Richards P G. Lg-wave cross correlation and double –difference location: application to the 1999 Xiuyan, China, sequence [J]. Bull Seism Soc Amer, 2004, 94: 867–879.
- [10] Zhang M, Wen L X. An effective method for small event detection: match and locate (M&L) [J]. Geophys J Int, 2015, 200: 1 523–1 537.
- [11] Gutenberg R, Richter C F. Frequency of earthquakes in California[J]. Bull Seism Soc Amer, 1944, 34: 185–188.
- [12] Wiemer S, Wyss M. Mapping spatial variability of the frequency–magnitude distribution of earthquakes[J]. Adv Geophys, 2002, 45: 259–302.
- [13] Båth M. Spectral analysis in geophysics[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1974.
- [14] 李宇彤. “重复地震”的若干地震学问题[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2012.
- [15] Geller R J, Mueller C S. Four similar earthquake in central California [J]. Geophys Res Lett, 1980, 10: 821–824.
- [16] Baisch S, Ceranna L, Harjes H –P. Earthquake cluster: what can we learn from waveform similarity?[J]. Bull Seism Soc Amer, 2010, 98: 2 806–2 814.