

段刚.利用 sPL 震相测定福建顺昌地区地震震源深度[J].地震工程学报,2019,41(3):745-749.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.745

DUAN Gang.Determination of the Focal Depths of Earthquakes in Shunchang,Fujian Using the sPL Phase[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(3):745-749.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.745

利用 sPL 震相测定福建顺昌地区地震震源深度

段 刚

(福建省地震局, 福建 福州 350003)

摘要: 选用福建数字地震台网宽频带记录,利用 sPL 震相测定顺昌地区 2007 年至 2017 年间 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源深度。基于地震的震源机制解,结合本地区的速度模型,利用频率-波数法(F-K 方法),先计算出相应震中距上不同深度的格林函数,再进一步得到 sPL 震相在不同深度上的理论波形;根据 sPL 震相的特点,选用震中距 30~50 km 范围的宽频带台站记录,经过去仪器响应、滤波、旋转至传播路径后,将其和理论波形进行比对,找出波形最为相似的对应该深度。结果显示顺昌地区地震深度为 7 km 左右。

关键词: 震源机制解; F-K 算法; 理论地震图; sPL 震相; 震源深度

中图分类号: P315.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2019)03-0745-06
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.745

Determination of the Focal Depths of Earthquakes in Shunchang, Fujian Using the sPL Phase

DUAN Gang

(Earthquake Agency of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China)

Abstract: Based on the broadband records from Fujian Digital Seismic Network, the focal depths of $M_L \geq 3.5$ earthquakes in Shunchang area, Fujian Province, during 2007—2017 were determined using the sPL phase. Based on the focal mechanism solutions of these earthquakes, combined with the velocity model of the study area, the F-K method was used to calculate the Green's function at different depths in the corresponding epicentral distance; the theoretical waveform of sPL phase at different depths were then obtained. According to the characteristics of the sPL phase, the broadband records of stations within 30-50 km of the epicenter were selected and filtered. They were compared with synthetic seismograms, and the corresponding depth with the most similar waveform was found. The determination results showed that the focal depth was approximately 12 km.

Keywords: focal mechanism solution; F-K algorithm; synthetic seismogram; sPL phase; focal depth

0 引言

地震震源深度一直是地球科学家关注的问题,震源深度是地震危险性和强地面震动研究的重要参数。震源深度的研究对于地震孕育和发生的深部环境、地震能量集结、释放的活动构造背景以及地壳内

部构造变形及其动力学属性等都有非常重要的意义。同时,准确的震源深度对研究震源区内的应力状况、地震危害评价也具有重要意义^[1-2]。

许多国内外的研究表明,利用深度震相可以确定震源深度,通过近震深度震相 sPg、sPmP、sPn 与它们的参考震相 Pg、PmP、Pn 之间的到时差来确定震源深度。但上述这些震相在确定深度时受到震中距、震级等许多因素的制约,如 sPg 波在震中距 60~100 km 范围明显;sPmP 震相在 180~350 km 左右发育较好,具有高频特性;sPn 波在震中距 300 km 附近才出现,且震级偏小时不易识别。随着震中距的增加,这些深度震相又受到震源机制模式、传播介质因素、地壳速度梯度变化的影响而衰减,造成识别困难、与参考震相的到时误差增大^[3-7]。

在地球物理学界,对震源深度的研究从未停止,在 2010 年首次有研究者提出利用震中距 50 km 范围内发育的 sPL 震相来确定近震的震源深度^[1],经过部分学者的研究表明,此震相在确定震源深度方面是可行的,但在结构复杂、地表变化大的区域是否可行还有待证实^[1,8-10]。

1 sPL 震相特点

从震源出发的 SV 波入射到自由界面下方时,将有一部分能量转换为 P 波,当入射角大于等于临界角时,转换的 P 波将沿着自由表面传播,它的水平视速度和 P 波速度相等,著名地震学家安艺敬一将其定义为自由地表 P 波(surface P wave),传播路径如图 1 所示^[11]。崇加军等经过研究认为:在实际的地球模型中,由于需要考虑速度随深度变化的因素,不可能是单一地震射线单一震相,而是包含了多条射线经过反射、转换后的混合震相,这些复杂震相相互耦合产生了新的波列,并将其定义为 sPL 震相^[1]。sPL 震相由于在地表传播,能量衰竭较快,在震中距 30~50 km 较容易识别,在宽频带地震记录中,直达 P 波之后,S 波之前可以观测到,之后随震中距增加而快速衰减。在其优势震中距范围内,随震中距的变化不明显,而随震源深度的变化较为敏感。其振幅在径向分量最强,在垂直向和切向分量最弱;同时,由于其类似首波的性质,高频成分少,而

低频成分居多,具有长周期特点^[1]。

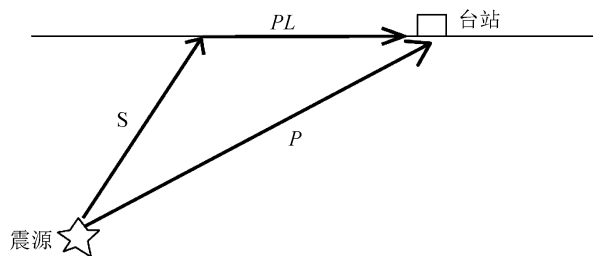


图 1 sPL 震相传播路径示意图

Fig.1 Propagation path diagram of sPL phase

2 理论地震图及 F-K 计算方法

2.1 理论地震图

理论地震图对于给定的介质模型和震源,用数学方法计算出来的理论的地球介质响应,随着地震学的发展和计算水平的进步,合成理论地震图方法已经成为研究地震学问题的主要手段。因其具有精度高、需要的记录资料少等优点,在确定震源机制时受到广泛重视^[12],同时在研究震源过程、地球内部结构、近场强地面运动等方面有广泛应用^[13]。

从地震波理论的弹性动力学方程出发,计算理论地震图实际上就是在特定介质模型和震源条件下求解方程获得介质中的位移场^[13]。当震源为点源时,地震点源所产生的位移场表示为:

$$U_n(x, t) = M_{ij} * G_{ni,j}(n, i, j = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中: U_n 是场点 n 方向上的质点地面位移; M_{ij} 是地震矩张量的分量; $G_{ni,j}$ 是格林函数 G_{ni} 对震源坐标 ξ_j 的微商。一个弹性动力学格林函数就是由单位脉冲集中力引起的位移场,它表示震源和台站之间介质的脉冲响应,它依赖震源位置与台站坐标以及速度模型。如果计算出格林函数,结合已知的地震震源机制解,在时间域中卷积运算就可以得出理论地震图^[14]。

2.2 F-K 方法计算格林函数

在地震波场的正演、反演中,格林函数起着重要作用。本文利用 F-K 方法(频率-波数法)计算格林函数^[15-17],F-K 方法采用了矩阵算法,得到格林函数的积分表达式,然后利用留数定理,得到横向各向同性介质中某一点(x_0, z_0)的二维 P、SV 波的格林函数^[18]:

$$G(\omega, x_0, z_0, k_x, z) = \frac{i \exp(ik_x x_0)}{\rho \omega^2} \left[\begin{pmatrix} k_x^2 & vk_x \\ vk_x & v^2 \end{pmatrix} \frac{\exp(iv\Delta z)}{-2v} + \begin{pmatrix} \eta^2 & -\eta k_x \\ -\eta k_x & k_x^2 \end{pmatrix} \frac{\exp(i\eta\Delta z)}{-2\eta} \right] \quad (2)$$

对于 SH 波,其格林函数表达式为^[18]:

$$G(\omega, x_0, z_0, k_x, z) = i \exp(ik_x x_0 + i\eta \Delta z) / (2\mu\eta) \tag{3}$$

上两式中; k_x 为波数的水平分量; ω 为角频率; μ 为拉梅常数; $i\upsilon, i\eta$ 为复变量; υ 为纵波速度; $\Delta z = |z_0 - z|$; $\eta = \sqrt{\left(\frac{\rho\omega^2}{\mu}\right) - k_x^2}$; ρ 为密度。

F-K 计算程序已经被学者开发成计算程序,广泛应用在地震震源理论反演理论地震图拟合研究中,同时有学者进行了并行计算优化,大大提高了计算速度^[19]。

3 资料选取与处理

实际观测得到的地震数据是震源激发后的地震信息经过一系列“调制”之后的产物,因此需要对观测资料进行各种校正。要得到实际的观测地震图,需要从地震仪记录的波形中经过去除台站响应、滤波去噪声、旋转数据至 r (径向) — t (切向) — z (垂向) 方向而得到。

3.1 资料选取

2007 年 3 月 13 日 10 时 22 分在福建顺昌 (26.71°N、117.75°E) 发生 M_L 4.9 地震,之后不到 30 s,又发生一次 M_L 4.7 地震,在 2012 年 5 月 4 日 13 时 2 分再次发生 M_L 3.9 地震。至 2017 年,共发生 163 个地震,其中 $M_L \geq 2.0$ 地震 14 个, $M_L \geq 3.5$ 地震 3 个。

在本文研究中,使用表 1 的速度模型,该模型是利用层析成像技术、人工地震、天然地震等大量研究结果得出的^[20]。 M_L 4.9、 M_L 4.7 地震的震源机制解使用 P 波初动及 P、S 波振幅比求解^[21], M_L 3.9 地震的震源机制解使用矩张量反演法得出,结果列于表 2。

表 1 福建地区地壳速度模型

Table 1 Crustal velocity model of Fujian area

地层 序号	深度 /km	v_P /(km · s ⁻¹)	v_S /(km · s ⁻¹)	密度 /(kg · m ⁻³)
1	0.0~4.0	5.6	3.23	2.4
2	4.0~12.0	6.1	3.52	2.75
3	12.0~18.0	6.0	3.46	2.6
4	18.0~25.0	6.4	3.70	2.9
5	25.0~30.0	6.9	3.98	3.1
6	30.0 ⁺	8.0	4.57	3.3

表 2 福建顺昌地震震源机制解

Table 2 Focal mechanism solutions of the earthquakes occurred in Shunchang, Fujian Province

地震 编号	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴	
	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	走向 /(°)	倾角 /(°)	滑动角 /(°)	方位角 /(°)	仰角 /(°)	方位角 /(°)	仰角 /(°)	方位角 /(°)	仰角 /(°)
M_L 4.9	351	70	-1	81	88	-160	308	15	214	12	86	70
M_L 4.7	350	68	-2	80	86	-161	307	18	212	10	87	69
M_L 3.9	343	68	-2	74	88	-158	306	19	211	8	89	67

根据 sPL 震相的特点,选取震中距为 30 ~ 50 km 内波形质量好、信噪比高的宽频带台站记录为研究对象,在此次地震研究中选取 NPKD (南平东坑) 台站,采用 CMG-3ESP-120 地震计,EDAS24-IP 数据采集器。为压制或消除地脉动噪音的影响,采用 1.5 Hz 的 Butterworth 低通滤波器滤波,这样还可以消除由速度积分到位移造成的长周期漂移;将观测记录数据旋转地震射线传播方向 r (径向) — t (切向) — z (垂向)。由于三次地震波形较为相似,且篇幅限制,本文仅展示了 M_L 3.9 地震 NPKD 台处理后的观测波形图(图 2)。

3.2 理论地震图计算

基于计算出的震源机制解、速度模型,利用 F-K 方法计算出格林函数,在时间域卷积计算合成出所研究台站的理论地震图^[14]。 NPKD (南平东坑) 台震中距 45 km,方位角 103.8°,理论波形见图 3。图中:0 s 开始的为 Pg 波、6 s 开始的为 Sg 波、Pg 与

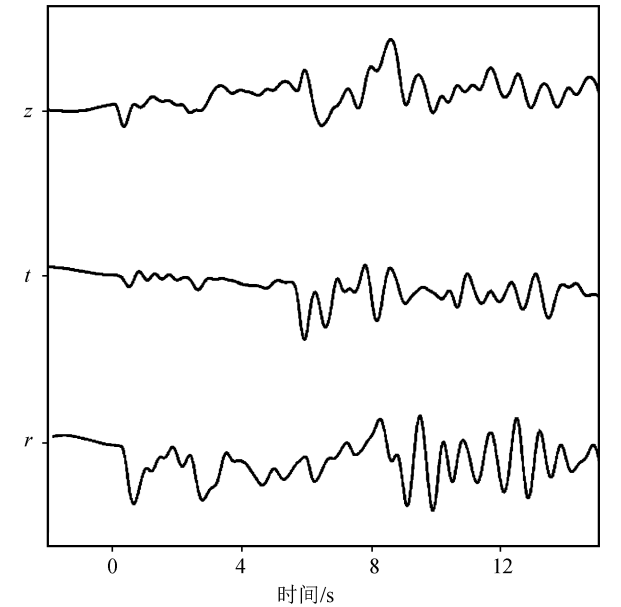


图 2 NPKD 台处理后的观测波形

Fig.2 Waveform observed at NPKD station after processing

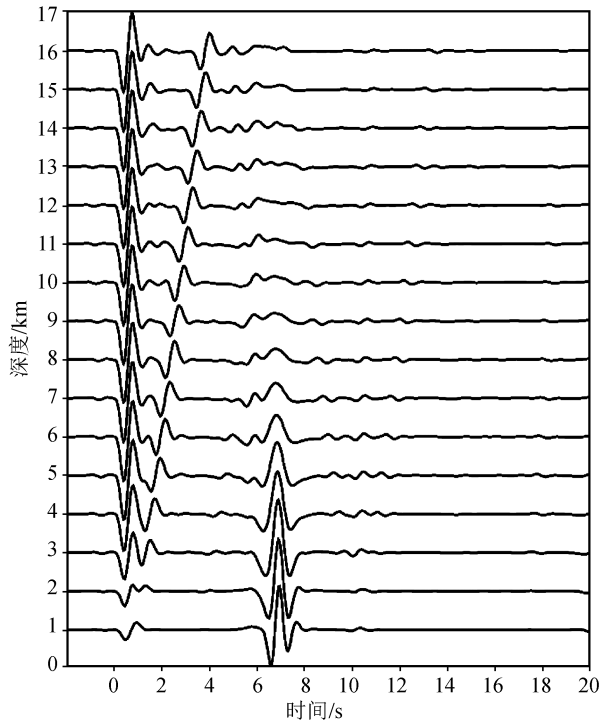


图3 震中距 45 km 处的径向理论地震波形
Fig.3 Theoretical radial waveform at 45 km from the epicenter

Sg 之间的震相为 sPL 震相,可以看出 sPL 震相出现的时间随震源深度有明显变化。

4 波形对比与结果

利用 sPL 震相进行震源深度判定,主要是将理论地震图与处理后实际地震观测图进行对比,找到波形最为相似接近时所对应的震源深度。基于上述计算处理得到的两种地震图,将其放在一起进行对比,对比图见图 4。

从图 4 可以看出,对于 NPKD 台而言,震源深度大于 10 km 时,波形吻合度较差,尤其是 sPL 震相出现的位置吻合度差;震源深度小于 5 km 时,波形吻合度也较差;在 6~9 km 区域内,波形吻合度较好。尤其是 6 km、7 km、8 km 时,实际观测波形和理论波形的 sPL 震相能够较好的吻合,从测定原理来看,利用 NPKD 台的 sPL 震相测得的此次地震的深度应该在 6~8 km 之间。

三次地震的震中位置相当接近,地震波形也比较一致,经过对另外两次地震的测算,其震源深度也在 7~8 km 之间。

5 讨论

对于此次地震,福建地震台网利用表 1 的速度

模型,使用 HypoSAT 定位程序^[22],得出的震源深度值是 8.0 km;中国地震台网最终地震编目测算的深度是 9 km;反演震源机制解时得出的最佳深度是 7.6~8.8 km^[21]。对比这三个深度值来看,误差有 1~2 km。震源机制解反演的是矩心深度,反映的是能量释放最大处的深度,而深度震相 sPL 测定的深度反映的是震源破裂起始点的信息,物理意义有一定的区别。对于浅源地震而言,破裂深度大于矩心深度^[23]。利用 sPL 震相测定的此次地震的深度符合这一认知规律。

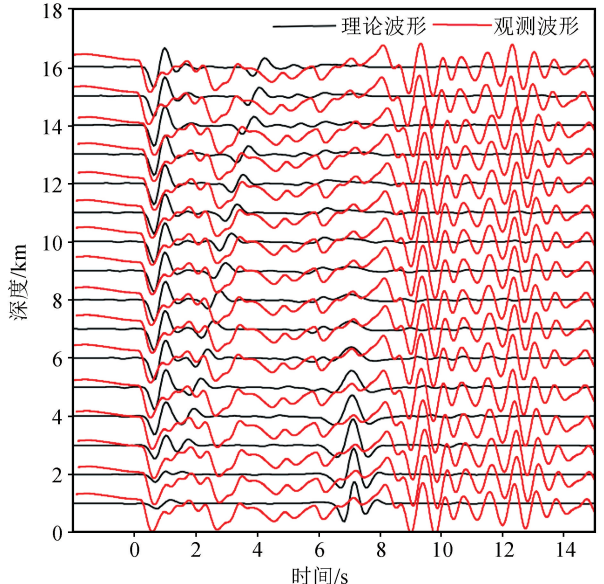


图4 NPKD 台径向理论波形与观测波形对比图
Fig.4 Theoretical radial waveform at NPKD station and comparison with observed waveform

在利用 sPL 震相来测定震源深度时,误差主要来源于震源机制解、计算格林函数所需要的速度模型^[8-9],同时,对 sPL 震相的识别也有误差。就此次地震的区域来看,有 sPL 震相发育并可以识别得到,但能量不强,这也造成在波形对比阶段产生误差。

如果有与震中相当近的台站时,使用直达波法可以获得较高精度的震源深度^[24],但对于台网布局稀疏的地方而言,利用 sPL 震相测定深度,开辟了一个新的理论路径。同时,也提供了一个震源深度值的参考与约束,但是否在福建的其他地区均能观测到 sPL 震相还需要利用其他地震资料作进一步研究。随着对地壳结构的进一步探知,在利用 sPL 震相进行深度测定时误差将会逐渐缩小。

致谢:Dr.Lupeizhu 提供 F-K 计算程序。

参考文献(References)

- [1] 崇加军,倪四道,曾祥方.sPL,一个近距离确定震源深度的震相[J].地球物理学报,2010,53(11):2620-2630.
CHONG Jiajun, NI Sidao, ZENG Xiangfang. sPL, An Effective Seismic Phase for Determining Focal Depth at near Distance [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(11): 2620-2630.
- [2] 张国民,汪素云,李丽,等.中国大陆地震震源深度及其构造含义[J].科学通报,2002,47(9):663-670.
ZHANG Guomin, WANG Suyun, LI Li, et al. Focal Depth of Continental Earthquakes in China and Its Seismotectonic Implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(9): 663-670.
- [3] LANGSTON C A. Depth of Faulting during the 1968 Meckering, Australia, Earthquake Sequence Determined from Waveform Analysis of Local Seismograms[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1987, 92(B11): 11561-11574.
- [4] BOCK G, GRUNTHAL G, WYLEGALLS K. The 1985/86 Western Bohemia Earthquakes: Modeling Source Parameters with Synthetic Seismograms[J]. Tectonophysics, 1996, 261: 139-146.
- [5] SAIKIA C A. Method for Path Calibration Using Regional and Teleseismic Broadband Seismograms: Application to the 21 May 1997 Jabalpur, India Earthquake ($M_w 5.8$) [J]. Curr. Sci., 2000, 79: 1301-1311.
- [6] MA S, ATKINSON M G. Focal Depths for Small to Moderate Earthquakes ($M_N \geq 2.8$) in Western Quebec, Southern Ontario, and Northern New York [J]. Bull Seism Soc Am, 2006, 96(2): 609-623.
- [7] 任克新,邹立晔,刘瑞丰,等.用 sPn 计算内蒙地震的震源深度[J].地震地磁观测与研究,2004,25(2):24-31.
REN Kexin, ZOU Liye, LIU Ruifen, et al. Application of sPn to Focal Depth Determination in Inner Mongolia [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2004, 25(3): 24-31.
- [8] 项月文,罗丽,肖孟仁,等.sPL 震相在九江—瑞昌 $M_s 5.7$ 地震序列震源深度测定中的应用[J].华北地震科学,2014,32(2):6-13.
XIANG Yuewen, LUO Li, Xiao Mengren, et al. Application of sPL Phase in Focal Depth Determination of the Jiujiang—Ruichang $M_s 5.7$ Earthquake Sequence [J]. North China Earthquake Sciences, 2014, 32(2): 6-13.
- [9] 詹小艳,朱升初,王恒知,等.sPL 震相在江苏高邮 $M_4.9$ 地震震源深度测定中的应用[J].地球物理学进展,2014,29(4):1609-1614.
ZHAN Xiaoyan, ZHU Shengchu, WANG Hengzhi, et al. The Application of the sPL Phase in Gaoyou $M_4.9$ Earthquake in Determination of Focal Depth [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(4): 1609-1614.
- [10] 彭利媚,赵韬,陈祥开,等.利用 sPL 震相确定海南儋州 2.6 级地震震源深度[J].地震地磁观测与研究,2017,38(4):21-25.
PENG Limei, ZHAO Tao, CHEN Xiangkai, et al. Determination of Focal Depth of Danzhou $M_{2.6}$ Earthquake in Hainan Province by sPL Seismic Phase [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38(4): 21-25.
- [11] AKI Richards. Quantitative Seismology (Second Edition). San Francisco, CA: University Science Books, 2002.
- [12] 张宏志,刁桂琴,赵英萍,等.邢台地区近年的震源机制[J].大地测量与地球动力学,2007,27(6):91-95.
ZHANG Hongzhi, DIAO Guiling, ZHAO Yingping, et al. Recent Focal Mechanism in Xingtai Region [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(6): 91-95.
- [13] 谢小碧,郑天愉,姚振兴.理论地震图计算方法[J].地球物理学报,1992,35(6):790-801.
XIE Xiaobi, ZHENG Tianyu, YAO Zhenxing. Methods of Synthetic Seismograms: A Review [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1992, 35(6): 790-801.
- [14] 赵志新,赵昭,徐纪人,等.用数值模拟格林函数方法合成近源地面运动地震图[J].科学通报,2006,51(18):2181-2188.
ZHAO Zhixin, ZHAO Zhao, XU Jiren, et al. Synthesis of Near Source Ground Motion Seismic Map by Numerical Simulation of Green Function Method [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(18): 2181-2188.
- [15] HASKELL N A. Radiation Pattern of Surface Waves from Point Sources in a Multi-medium [J]. Bull Seism Soc Am, 1964, 70: 1015-1036.
- [16] WANG C Y, HERRMANN R B. A Numerical Study of P, SV, and Sh-wave Generation in a Plane Layered Medium [J]. Bull Seism Soc Am, 1980, 70: 1015-1036.
- [17] ZHU L, RIVERA L A. A Note on the Dynamic and Static Displacements from a Point Source in Multi-layered Media [J]. Geophysical Journal International, 2002, 148(3): 619-627.
- [18] 何樵登,阎贫.横向各向同性介质二维格林函数的 F-K 算法[J].地球物理学报,1994,37(5):667-672.
HE Qiaodeng, YAN Pin. A F-K Domain Algorithm of 2-D Green's Function in TIM [J]. ACTA Geophysica Sinica, 1994, 37(5): 667-672.
- [19] 韩立波,郑勇,倪四道.理论地震图的 F-K 算法的并行实现[J].中国科学技术大学学报,2007,37(8):911-915.
HAN Libo, ZHENG Yong, NI Sidao. Parallelization of F-K Method of Synthetic of Seismograms [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(8): 911-915.
- [20] 张路.福建东南沿海盆地第四纪构造运动模式与动力学成因[D].北京:中国地震局地质研究所,2008.
ZHANG L. Coastal Basin in the Quaternary Tectonic Movement Model and Dynamics of Fujian Southeast [D]. Geological Research Institute of China Seismological Bureau, 2008.
- [21] 陈文明,杨贵,陈祥熊,等.福建顺昌 $M_4.9$ 级地震序列的精确定位、震源机制及其地震构造背景分析[J].华南地震,2011,31(2):37-44.
CHEN Wenming, YANG Gui, CHEN Xiangxiong, et al. The Accurate Location and Focal Mechanism of Shunchang $M_{4.9}$ Earthquake Sequence in Fujian Province and Its Structural Background [J]. South China Journal of Seismology, 2011, 31(2): 37-44.

研究[J].铁道运输与经济,2017,39(7):47-52.

ZHANG Baojun, SHI Jianping, MA Li. Study on On-line Management System of High-speed Railway On-board Earthquake Emergency Treatment Device[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(7): 47-52.

[12] 朱旭芳, 颜冰, 马剑飞. 基于序列相关检测法的地震波传播速度测量方法[J]. 海军工程大学学报, 2017, 29(3): 87-91.

ZHU Xufang, YAN Bing, MA Jianfei. Seismic Wave Propagation Velocity Estimation Method Based on Serial Correlation Detection[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(3): 87-91.

[13] 孟军红, 刘丹丹, 耿立明. 微机控制系统信号传输通道的抗干扰措施[J]. 电子测试, 2015(14): 98-100.

MENG Junhong, LIU Dandan, GENG Liming. The Anti-interference Method of Signal Transmission Channel in the Microcomputer Control System[J]. Electronic Test, 2015(14): 98-100.

[14] 向涯, 王彬, 杨润海, 等. 气枪主动源与天然地震信号的传播特征对比研究[J]. 地震研究, 2017, 40(4): 605-612.

XIANG Ya, WANG Bin, YANG Runhai, et al. Comparison of Propagation Characteristics of Signals Triggered by Air-gun Active Source and Natural Earthquakes[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(4): 605-612.

[15] 李寅, 王立夫, 孙怡. 数字化地震信号压缩方法研究[J]. 计算机工程, 2016, 42(9): 279-285.

LI Yin, WANG Lifu, SUN Yi. Research on Digital Seismic Signal Compression Method[J]. Computer Engineering, 2016, 42(9): 279-285.

[16] 吴茜, 程梁. 城际铁路信号系统与防淹门系统接口设计研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 173-176.

WU Xi, CHENG Liang. Research on Interface Design between Signal System and Flood Gate System in Intercity Railway[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(4): 173-176.

(上接第 749 页)

[22] SCHWEITZER J, HYPOSAT. An Enhanced Routine to Locate Seismic Events[J]. Pure Appl Geophys, 2001, 158(12): 277-289.

[23] 吴忠良, 黄静, 周公威. 震源深度与矩心深度的分布特征及其与震源机制类型之间的关系[J]. 中国地震, 2002, 18(4): 337-345.

WU Zhongliang, HUANG Jing, ZHOU Gongwei. Distribution of Hypocenter and Centroid Depths and its Focal Mechanism Dependence[J]. Earthquake Research in China, 2002, 18(4): 337-345.

[24] 申学林, 王秋良, 魏贵春, 等. 基于近台数据的 2017-06 巴东 M4.3 地震序列震源深度研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(1): 14-17.

SHEN Xuelin, WANG Qiuliang, WEI Guichun, et al. Study on Focal Depth of Badong M4.3 Earthquake Sequence in June 2017[J]. 2018, 38(1): 14-17.