

钟天任, 陈大庆, 刘吉平, 等. 广东区域VP型垂直摆和JQY-1型垂直摆同震响应特征分析——以2025年6月23日广东清远 $M_s4.3$ 地震为例[J]. 华南地震, 2026, 46(2): 59-64. [ZHONG Tianren, CHEN Daqing, LIU Jiping, et al. Coseismic Response Analysis of VP-Type Vertical Pendulum and JQY-1-Type Vertical Pendulum in Guangdong Region—A Case Study of Qingyuan $M_s4.3$ Earthquake in Guangdong on June 23, 2025 [J]. South China journal of seismology, 2026, 46(2): 59-64]

广东区域VP型垂直摆和JQY-1型垂直摆同震响应特征分析——以2025年6月23日 广东清远 $M_s4.3$ 地震为例

钟天任, 陈大庆, 刘吉平, 谭争光, 王宇龙

(广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 以2025年6月23日广东清远 $M_s4.3$ 地震为例, 对广东区域内VP垂直摆和JQY-1垂直摆记录到的同震响应资料进行分析, 对比分析了二者的同震响应特征, 结果表明, 两种型号垂直摆倾斜仪记录的最大响应幅度、初动时间、响应持续时间和同震形态具有一定规律和差异性。利用S变换方法研究了整个同震时段的频谱动态演化过程, 结果显示, JQY-1垂直摆同震波的频带处于0.01~0.03 Hz, 能量集中在0.02 Hz附近; VP垂直摆则处在0.01~0.03 Hz和0.35~0.45 Hz, 能量集中在0.02 Hz和0.4 Hz附近, 频域比前者要宽。

关键词: 清远 $M_s4.3$ 地震; 垂直摆; 同震响应; S变换

中图分类号: P315.726

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2026)02-0059-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2026.02.08

Coseismic Response Analysis of VP-Type Vertical Pendulum and JQY-1-Type Vertical Pendulum in Guangdong Region—A Case Study of Qingyuan $M_s4.3$ Earthquake in Guangdong on June 23, 2025

ZHONG Tianren, CHEN Daqing, LIU Jiping, TAN Zhengguang, WANG Yulong
(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Taking the Qingyuan $M_s4.3$ earthquake in Guangdong on June 23, 2025 as an example, the coseismic response data recorded by VP vertical pendulum and JQY-1 vertical pendulum in the Guangdong region were analyzed, and the coseismic response characteristics of the two were compared and analyzed. The results show that the maximum response amplitude, initial movement time, response duration, and coseismic morphology recorded by the two types of vertical pendulum inclinometers have certain regularity and differences. The spectral dynamic evolution process of the entire coseismic period was studied using the S-transform method. The results show that the frequency band of the JQY-1 vertical pendulum coseismic wave is between 0.01 and 0.03 Hz, and the energy is

收稿日期: 2025-08-07

作者简介: 钟天任(1984-), 女, 工程师, 主要从事地震监测预报工作。

E-mail: tcbychung@163.com

concentrated around 0.02 Hz. The VP vertical pendulum is located at 0.01–0.03 Hz and 0.35–0.45 Hz, with energy concentrated around 0.02 Hz and 0.4 Hz, and the frequency domain is wider than the former.

Keywords: Qingyuan $M_s4.3$ Earthquake; Vertical pendulum; Coseismic response; S transform

0 引言

据中国地震台网正式测定, 2025年6月23日18时48分50秒广东清远市清城区(北纬23.62°, 东经113.17°)发生4.3级地震, 震源深度10 km, 震源机制解结果显示此次地震为一次走滑型地震破裂事件。离震中最近的断裂为佛冈—丰良断裂, 约4 km, 该断裂为一条近东西向的断裂, 该断裂历史上及现代仪器记录的小震较少, 历史地震活动稀少, 自上世纪70年代以来少有显著地震记录。地震发生后, 广东省地震局第一时间对现有地球物理观测资料数据进行梳理, 发现广东区域内VP型垂直摆和JQY-1型垂直摆均记录到显著的同震变化。但通过对比不同台站不同型号垂直摆的同震响应形态特征, 发现它们之间存在较大差异。近年来, 一些专家学者依据面波震级, 最大振幅比可大致确定震源机制, 利用同震倾斜形变阶跃可给出地震的震源机制^[1-2]; 另外, 对不同地震台站同类仪器对强震的同震响应作对比分析, 分析了不同仪器记录的同震响应随震级、震中距及震源深度变化的特性^[3-6]。本文针对清远 $M_s4.3$ 地震, 选取广东区域内两种型号的垂直摆仪器记录到的同震响应资料, 利用时频分析方法, 对比两种型号垂直摆的同震响应特征, 研究同震应变波在形变仪器中的反应形式, 为将来地球物理台网布设方案提供参考依据。

1 地质构造背景

清远市清城区位于珠江三角洲平原与粤北山区交接地带, 三水盆地北缘。清城区在大地构造单元中属于羌塘—扬子—华南板块中的武夷地块, 地层出露较齐全, 主要出露震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系、白垩系及第四系。区域内断裂走向以北东和近东西向为主, 主要包括位于近东西向佛冈—丰良断裂带内的东西向长滩—濠江断裂组、狮形山断裂组, 吴川—四会断裂带内的龙塘断裂组、麦岗断裂组和飞来峡断裂组, 及其旁侧低次序断裂组和次一级规模较小断裂构造, 此外, 还有北西向的断裂构造发育, 对早期北东、北东和近东西向断裂造成规模不一的断错^[7-8]。

2 广东区域垂直摆观测仪器概况

目前广东地球物理台网的垂直摆仪器包括VP型垂直摆和JQY-1型垂直摆, 每种类型各4套, 每套仪器包含NS和EW两测项, 均为秒采样仪器, 秒采样数据比分采样更能显示完整和规则的波形记录。VP垂直摆分布在粤东汕头和潮州、粤西信宜和粤北韶关, 该4套仪器已运行多年, 连续率高, 数据可靠, 固体潮曲线清晰规则, 年变化周期良好; JQY-1型垂直摆则集中在广州市内的南沙街、良口镇、宁西街和增江, 均是2025年年初新增的仪器, 自安装运行以来运行状况良好, 除增江台因地震期间发生故障不纳入分析, 其余3套仪器观测资料连续稳定, 数据质量良好, 空间分布如图1所示。潮州VP垂直摆由于仪器参数设置的问题, 记录的是分采样数据, 本文为了数据采样率的一致性, 该套仪器也不纳入分析。

3 广东清远 $M_s4.3$ 地震引起的垂直摆同震变化特征

同震响应作为一种随时间变化的高频干扰, 能够反映仪器的响应特性, 同震响应研究有助于揭示地壳介质对应力-应变过程的响应^[9-10]。近年来, 利用同震响应, 很多学者开展了一些关于形变仪器同震响应特征的研究, 和地震波对形变观测的影响, 研究发现, 同震响应幅度、响应延迟时间、响应持续时间与震级、震中距、震源深度、仪器自身特性等之间具有一定的相关性^[11-12]。

此次清远 $M_s4.3$ 地震, 广东省内所有垂直摆都记录到了明显的同震响应, 为了充分展示同震响应过程, 只给出震后3~6分钟内的秒值变化过程, 见图2, 并统计了初动时间、震中距、持续时间、波动幅度和同震响应特征, 见表1。JQY-1垂直摆均布设在广州市内, 因此震中距都在100 km以内, 同震形态有震荡型和阶跃型两种, 持续时间都保持在1分钟以内, 波动幅度在100~350 ms之间; VP垂直摆分布在粤东、粤西和粤北地区, 所以震中距都在130 km以上, 同震特征形态均为震荡型, 且持续时间都在2~3分钟, 持续时间是JQY-1垂直

摆的2倍以上,波动幅度也略微比JQY-1垂直摆要大一些。这些差异可能是观测点介质的各向异性造成了观测点场地局部的应变差异,还有测点间介质的传导条件差异,这些差异与很多研究学者观测得出的结论一致^[13-16],初动时间最早的是良

口,紧接着是宁西,最后是汕头,它与地震波的传播速度及震中距离有关,地震波在岩石中传播的时间与其传播的距离成正比,初动时间的前后反映震中距的大小。

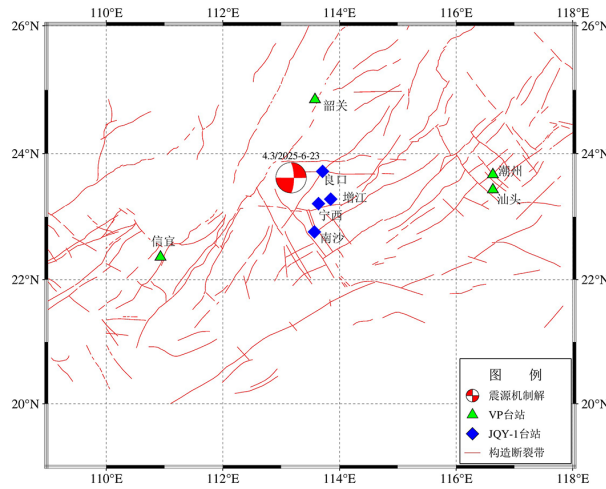


图1 垂直摆空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of vertical pendulum

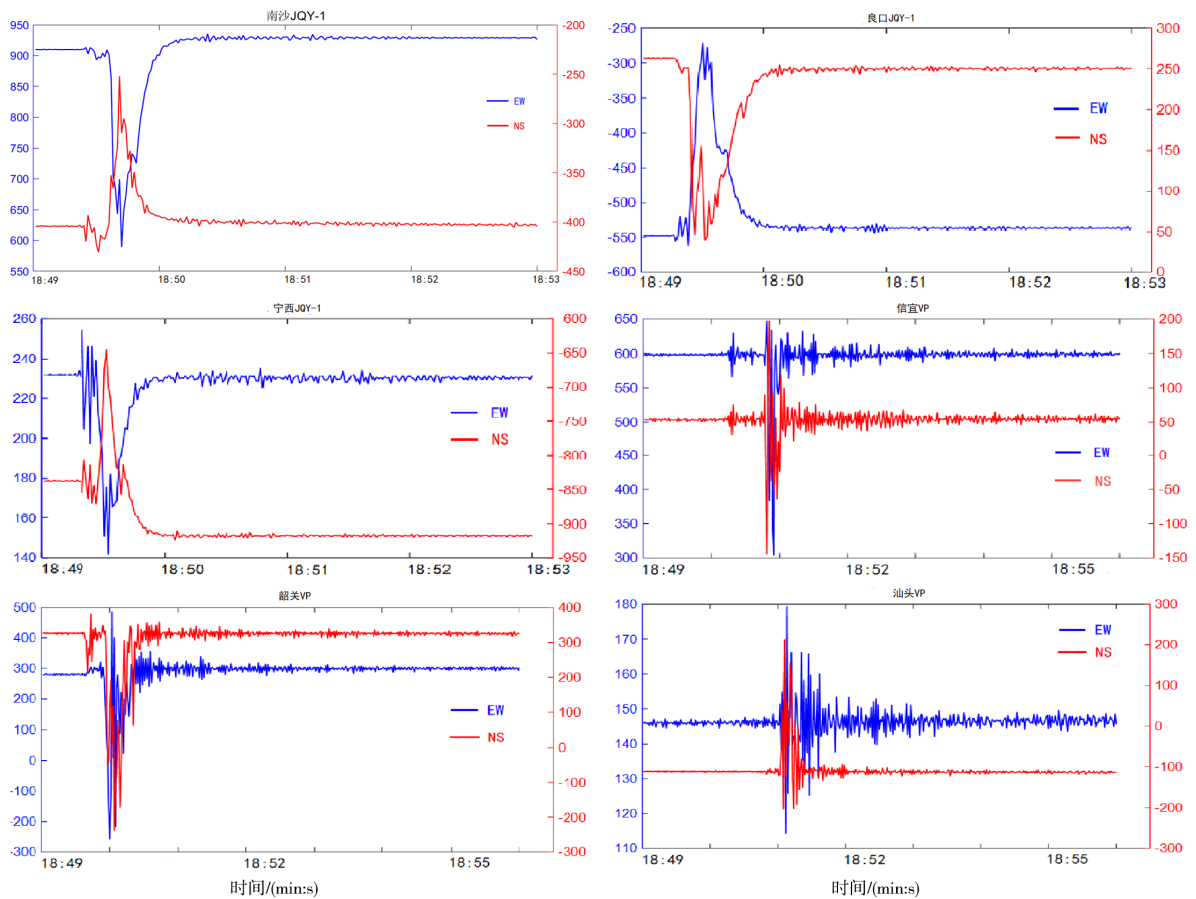


图2 同震响应曲线

Fig.2 Coseismic response curves

表1 同震响应特征分析

Table1 Analysis of coseismic response characteristics

型号	台站名称	初动时间/(min:s)	震中距/(km)	持续时间/(s)	波动幅度/(ms)	同震响应特征	测项分量
JQY-1	良口	49:16	58	52	223.56	向下阶跃	NS
					290.24	向上阶跃	EW
	宁西	49:19	66	47	278.28	向下阶跃	NS
					112.51	震荡	EW
南沙	49:24	98	52	178.58	震荡	NS	
				346.33	向上阶跃	EW	
VP	韶关	49:38	131	138	143.75	震荡	NS
					743.37	震荡	EW
	信宜	50:14	277	160	341.2	震荡	NS
					342.27	震荡	EW
汕头	50:53	381	149	414.73	震荡	NS	
				64.9	震荡	EW	

从表1可见,两种垂直摆仪器引起的同震变化形态不同,分为震荡型和阶变型。

(1)震荡型:由地震波引起的快速高频振荡、随后快速高频衰减,持续时间及幅度与震级有关,持续时间为几分钟至几小时^[13]。此次清远 $M_s4.3$ 地震VP垂直摆都表现为震荡型,可能与仪器特征有关。汕头VP摆的EW向波动幅度最小,只有64.9ms,而韶关VP摆的EW向波动幅度最大,为743.37ms,与震中距成正比。

(2)阶变型:同震阶变是仪器记录到的地震期间地球应变场的一种准静态调整,地震发生时,孕震体释放能量,使得应变场发生调整,故仪器记录到的正是这种应变调整,即同震阶变^[17-18]。持续时间及幅度与震级有关,持续时间为几分钟至几小时,有时甚至产生永久性的应变阶变^[19-20]。清远 $M_s4.3$ 地震引起的垂直摆观测的向上阶变变化特征及向下阶变变化特征如图2所示,每套仪器都分别表现出了不同的变化特征,南沙JQY-1垂直摆NS向为震荡,EW向为向上阶跃;良口的NS向和EW向出现同步反向变化形态,NS向表现为向下阶变,EW向为向上阶变;宁西的NS向为向下阶跃,EW向则为震荡。良口及宁西的NS向都为向下阶变,良口和南沙的EW向则都为向上阶变,这种有一致性又有差异性的特征可能与震源方位、地震波的传播路径、台站地质环境及仪器分量方向有关^[21]。

4 S变换时频分析

形变观测会受到各种因素的影响,其连续数据

记录从数学本质上可以看成是由不同因素引起的具有不同频率、不同幅度的信号组分的综合叠加结果。因此,可以利用数字信号处理方法对连续观测记录进行分析研究^[22-24]。常用的时频类方法有:短时傅立叶变换(STFT)、Gabor展开、小波变换(CWT)、wigner-ville分布、Cohen类分布和S变换(Stockwell Transform)等方法,本文选用S变换方法^[25],研究这两种型号的观测仪器记录的响应特征。S变换具有较好的时频聚集性和时频分辨率,结合了短时傅里叶变换(STFT)和连续小波变换的特点,采用了尺度可以变换的局部高斯窗,其时频分辨率会随频率发生变化,能很好地记录高频频段信息。S变换的公式:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \omega(\tau - t, f) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

式(1)中 τ 是时间变量,是时间轴上高斯窗的位置, f 是频率变量, t 为观测时间, $\omega(\tau - t, f)$ 是与频率相关的高斯窗函数,高斯窗函数为:

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2}} \quad (2)$$

基于(1)式和(2)式,分别选取2种型号垂直摆各1套仪器在清远 $M_s4.3$ 地震前后1小时的数据,进行同震变化时段的时频曲线绘制,两套仪器各观测分量在整个同震时段的频谱演化整体特性结果见图3。两种仪器对应的S变换时频域结果显示,在地震波传播到达时,仪器各分量记录到的高频信号组分突然增强,且覆盖频带较宽,随着时间推移,地震波衰减,高频能量开始逐渐衰减,在时间变化的过程中表现出了较好的一致性,尽管仪器型号不

同,但地震波的时频特征在形变仪器中具有相似的动态演化特征,EW向的能量都比NS向稍高。但是,两种垂直摆对地震的响应特征也存在着差别,JQY-1垂直摆在图中仅表现出近似竖线状,优势频

率集中在0.01~0.03 Hz,能量集中在0.02 Hz附近;VP垂直摆的优势频率集中在0.01~0.03 Hz和0.35~0.45 Hz,能量集中在0.02 Hz和0.4 Hz附近,频域比JQY-1垂直摆要宽。

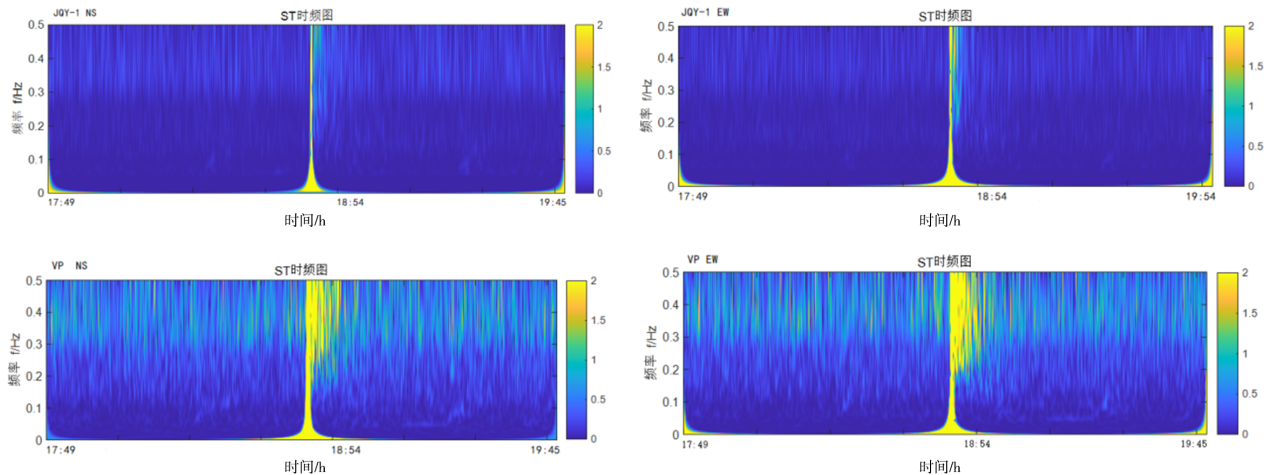


图3 JQY-1垂直摆和VP垂直摆同震时段S变换

Fig.3 S-transform of data recorded by JQY-1 vertical pendulum and VP vertical pendulum during coseismic period

5 结论

通过对广东区域内VP型垂直摆和JQY-1型垂直摆记录的清远 $M_s4.3$ 地震的同震响应特征进行分析,初步得到以下结论:

(1)由于震级小,能量释放引起的地震动较弱,同震响应时间持续时间较短,JQY-1型垂直摆的持续时间在1分钟内,VP垂直摆的持续时间长在2~3分钟,相比与前者,VP能记录到更多同震信息。

(2)两种型号垂直摆所表现的同震形变波不同,JQY-1型垂直摆同震变化形态有震荡型和阶跃型,而VP垂直摆只有震荡型,可能与震源方位、地震波的传播路径、观测仪器周边的构造环境以及仪器自身性能有关。

(3)垂直摆仪器的初动时间与震中距成正比,震中距越大,初动时间越晚。

(4)利用S变换方法,两种垂直摆都能有效地反映清远 $M_s4.3$ 地震整个同震时段的频谱动态演化特征。两种垂直摆的NS向和EW向都能清楚记录到高频同震应变信号,频率随时间变化的过程中也表现出较好的一致性,符合地震波衰减规律。从频谱分析结果来看,JQY-1垂直摆同震波的频带处于0.01~0.03 Hz,能量集中在0.02 Hz附近,VP垂直摆则处在0.01~0.03 Hz和0.35~0.45 Hz,能量集中

在0.02 Hz和0.4 Hz附近。

总体上,两种仪器型号都有各自的自身特性,在持续时间,波动幅度、同震变化形态都存在一定的差异,造成差异的具体原因尚需未来进行深入研究。

参考文献

- [1] 牛安福,张晶,吉平. 强地震引起的同震形变响应[J]. 内陆地震,2005(01):1-7.
- [2] 周克昌,吴翼麟. 由同震倾斜阶跃应用反演方法研究震源机制[J]. 地壳形变与地震,1990(01):13-20.
- [3] 牛安福,吉平,高福旺,等. 印尼强地震引起的同震形变波[J]. 地震,2006(01):131-137.
- [4] 胡宝慧,常金龙,姜博,等. 鹤岗地震台水管、垂直摆倾斜仪同震响应对比[J]. 地震地磁观测与研究,2016,37(03):91-95.
- [5] 钟天任,严兴,刘吉平,等. 广东形变观测台网垂直摆倾斜仪同震响应特征[J]. 地震地磁观测与研究,2016,37(03):96-101.
- [6] 郭昱琴,付国超,孙三健,等. 五指山台DSQ水管倾斜仪和VP垂直摆观测数据质量对比分析[J]. 地震科学进展,2022,52(05):232-237.
- [7] 王金秋,丘嘉荣,黄利兵. 清远市清城区飞来峡镇地质灾害孕灾地质条件分析及防治措施[J]. 资源信息与工程,2024,39(06):73-78.
- [8] 刘曼,温汉辉,金昌,等. 广东省清远市清城区城市地质特点与地质环境问题研究[J]. 矿产勘查,2023,14(12):2516-

- 2528.
- [9] 邱永平. 宁波台动水位与垂直摆对印尼 8.9 和日本 9.0 级地震的同震响应[J]. 国际地震动态, 2011(04): 28-33.
- [10] 中国地震局监测预报司. 2004 年印度尼西亚苏门答腊 8.7 级大地震及其对中国大陆地区的影响 [M]. 北京: 地震出版社, 2005.
- [11] 包宝小, 王慧, 席文雅, 等. 乌兰浩特地震台水管倾斜仪、垂直摆倾斜仪测值同震响应差异[J]. 地震地磁观测与研究, 2024, 45(04): 62-67.
- [12] 曾智辉, 张辉, 安一凡, 等. 宜昌地震台 VP 型宽频带倾斜仪和 DSQ 型水管倾斜仪同震响应对比分析[J]. 科学技术创新, 2020(06): 7-8.
- [13] 樊俊屹, 刘高川. 3 种钻孔应变仪记录的玛多 $M_s7.4$ 地震同震响应特征对比分析[J]. 中国地震, 2021, 37(03): 564-573.
- [14] 陈丽君, 闫勋, 苏小芸, 等. 高台 YRY 钻孔应变仪与 BBVS-120 地震仪青海玛多 $M_s7.4$ 地震同震对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(05): 539-544.
- [15] 苏维刚, 马震. 门源 $M_s6.4$ 地震形变同震响应特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(03): 117-121.
- [16] 郭明瑞, 郭昱琴, 胡久常, 等. 琼中地震台重力仪记录同震响应特征分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(03): 698-701.
- [17] Sacks I S, Suyehiro S, Evertson D W, et al. Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps[J]. *Pap Meteorol Geophys*, 1971, 22(3-4): 195-208.
- [18] 岳冲, 孙玺皓, 牛安福, 等. 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震同震应力场与形变台站同震阶变分布关系探讨[J]. 中国地震, 2022, 38(02): 189-198.
- [19] 李兰生, 刘建华. 同震阶变异常的特征与机制分析[J]. 地壳形变与地震, 1992(03): 81-87.
- [20] 马栋, 冯向东, 张素欣, 等. 河北易县 $M_L3.8$ 、 3.3 地震同震形变响应及其震源机制[J]. 西北地震学报, 2011, 33(04): 386-391.
- [21] 章鑫, 叶青. 闽粤地区同震形变波记录序列分析及小波能谱特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(12): 1302-1307.
- [22] 刘琦, 张晶, 池顺良, 等. 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震前后姑咱台四分量钻孔应变时频特征分析[J]. 地震学报, 2014, 36(05): 770-779+980.
- [23] 刘琦, 张晶. S 变换在汶川地震前后应变变化分析中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(04): 6-9.
- [24] 刘琦, 张晶, 晏锐, 等. 高采样率四分量钻孔应变同震响应分析[J]. 中国地震, 2013, 29(01): 57-67.
- [25] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998-1001.