

王宇玺, 宫悦. 木里地区地震震源参数特征研究[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 85-90. [WANG Yuxi, GONG Yue. Study on the Characteristics of Seismic Source Parameters in Muli Area[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 85-90]

木里地区地震震源参数特征研究

王宇玺, 宫悦

(四川省地震局, 成都 610041)

摘要: 选取了2011年9月至2016年9月地震数据及资料, 研究了水库水位与地震时空活动特征, 计算了168次 $M_L \geq 3.0$ 级以上地震的震源参数。结果显示: 区域视应力值随震级的增大而增大, 反映了不同震级地震在应力水平积累等方面的差异; 视应力有随地震矩增大而增大的趋势, 意味着人类活动可能为该地区地震活动的主要因素; 拐角频率与震级的关系可分为两段来看, 当震级范围为 $M_L 3.0 \sim 3.5$ 时, 拐角频率随震级增大而降低的现象并不明显, 当震级范围为 $M_L 3.5 \sim 4.4$ 时, 拐角频率随震级增大而降低, 表明震级越大, 库区破裂尺度在增大, 反应了区域应力积累, 应力水平有所增强; 视应力时空分布特征显示, 视应力随时间变化与频次存在着一定的相关性, 且整体视应力水平逐渐增高, 且最大地震发生在大坝附近, 这些现象都可能为水库蓄水导致区域构造环境发生变化而造成。

关键词: 木里地区; 震源参数; 水库诱发地震; 应力

中图分类号: P315.63

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0085-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.11

Study on the Characteristics of Seismic Source Parameters in Muli Area

WANG Yuxi, GONG Yue

(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper selects the seismic data from September 2011 to September 2016, studies the relationship between reservoir water level and the temporal and spatial characteristics of earthquakes, and calculates the source parameters of 168 earthquakes with $M_L \geq 3.0$. The results shows: the value of regional apparent stress increases with the increase of magnitude, which reflects the difference of stress level accumulation of earthquakes with different magnitudes; the apparent stress tends to increase with the increase of seismic moment, which means that human activity may be the main factor of seismicity in this area; the relationship between corner frequency and magnitude can be divided into two sections. When the magnitude range is $M_L 3.0 \sim 3.5$, it is not obvious that the corner frequency decreases with the increase of magnitude. When the magnitude range is $M_L 3.5 \sim 4.4$, the corner frequency decreases with the increase of magnitude, which indicates that the larger the earthquake magnitude is, the larger

收稿日期: 2020-10-30

基金项目: 四川省科技计划项目(2020YJ0475); 四川省地震局地震科技专项(LY2001)联合资助。

作者简介: 王宇玺(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水库地震研究分析、台网建设运维等工作。

E-mail: 3505010@163.com

the fracture scale is, reflecting that the regional stress accumulation and the stress level has increased. The spatial and temporal distribution of apparent stress shows that there is a certain correlation between the variation of apparent stress with time and frequency, and the overall apparent stress level gradually increases, and the largest earthquake occurs near the dam. These phenomena may be caused by the change of regional tectonic environment caused by reservoir impoundment.

Keywords: Muli area; Focal parameters; Reservoir induced earthquake; Sress

0 引言

水库诱发地震是一类特殊的地震活动,与水库蓄水动态过程关系复杂,曾经在世界上多次导致破坏性后果。观测研究表明,部分水库蓄水后的地震活动水平和活动特征都与蓄水前有明显的差异,许多大型水库蓄水后都伴有地震活动异常,尤其是高坝大库,且巨大水库还可能影响库区周围较大范围的原有平衡状态(包括应力状态和介质状态),从而有可能加速库区附近断层的应力积累进程并触发大震。

木里县位于四川省西南边缘的凉山州,是云贵高原与青藏高原的过渡地带。该地区的地质结构复杂,地跨多条断裂带,包括小金河断裂带、鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带,具备了发生中强构造地震的条件。同时雅砻江贯穿于此,流域内建设有一座大型梯级水电站,该水电站具有高坝大库、规模巨大、库坝区地质条件复杂等特点,因此该地区除了本身具备发生中强构造地震的背景外,还具备了发生水库诱发地震的条件。2013年7月之后该地区地震活动频次较之前陡然增多(图1),这与雅砻江流域水库的蓄水有着密切的关系。

水库诱发地震在震源参数,震源机制解,序列特征等诸多方面与构造地震相比较,有其自己的特征。随着数字地震观测技术的发展,通过对水库地震数字波形资料的精细分析,在水库诱发地震与构造地震震源特征的差异方面也取得了一

定的进展^[1-3],推进了对水库诱发地震发生环境的认识。由于地震的应力降、拐角频率等震源参数携带了震源处应力场的变化信息^[4-5],能反映震源破裂的一些特征,因此,震源参数特征是研究水库地震的一个重要方向;且震源参数的计算比较简单,这方面的研究也比较成熟^[6-9],故本文试图从震源参数的角度出发,分析其在蓄水前后的特征,讨论水库地震与构造地震震源参数特征差异,试图对水库地震发生时介质和应力状态等构造条件和发生环境做一些初步分析。

1 研究区域地震活动情况

选取资料范围为 $100.8^{\circ} \sim 102.2^{\circ} \text{E}$, $27.4^{\circ} \sim 28.4^{\circ} \text{N}$,时段为2011年9月至2016年9月,共计94 640次 $M_L \geq 0$ 地震。2011年9月至2013年6月期间,区域地震活动较弱,共记录 $M_L \geq 0$ 地震1349次,其中 $M_L \geq 3.0$ 级以上地震仅21次。2013年6月随着该地区水库蓄水,区域地震活动情况发生了明显的变化,地震频次陡然增加,且以小震为主。截止2016年9月区域共记录地震93 291次,其中 $M_L \geq 3.0$ 级以上地震214次。2014年1月至6月水位逐步下降至1800 m,区域地震频次也相应有所下降,2014年6月之后水库再次蓄水,地震活动频次也再次增加。从图1可以看出区域内地震活动情况跟水位变化有着较好对应性。说明水库蓄水是导致木里盐源地震区地震活动情况发生变化的主要原因。

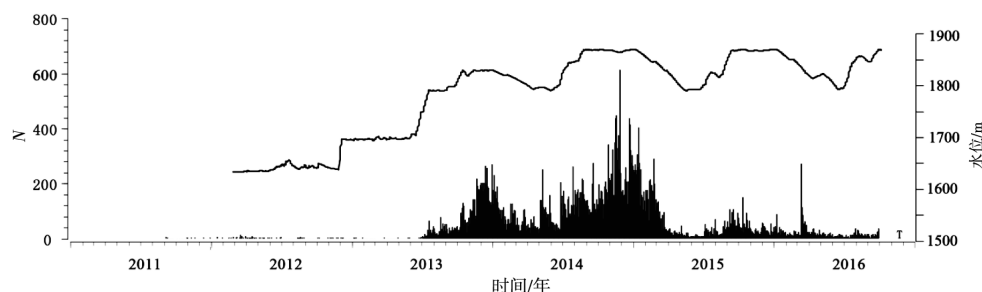


图1 地震活动频次及水位图

Fig.1 Seismicity frequency and water level

从地震分布图来看,2013年6月之前,地震主要分布在小金河断裂北段、木里西侧锦屏山断裂带上以及东侧的金河—箐河断裂带上,总体来看地震分布较为离散,以断裂带为主。2013年6月在水库蓄水之后,区域地震明显增多,且呈现出较为明显的丛集性,主要分为两丛,一丛是库坝附

近,该区域蓄水之前地震活动较弱,蓄水之后地震活动激增,日频次多次超过300,最高值达600余次,可以推断该区域地震活动以诱发地震为主。二是库区西侧宁蒗-盐源交界处,该区域一直以来都有地震发生,在蓄水之后表现更为活跃,可能为蓄水引起区域应力变化所致。

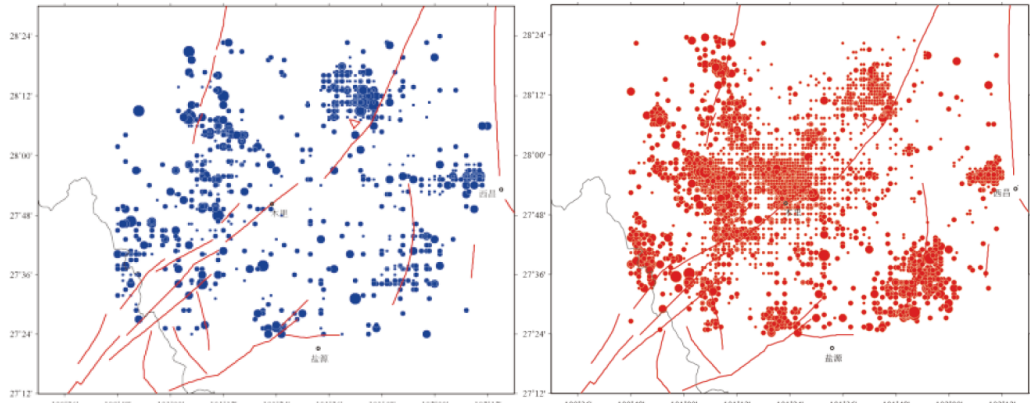


图2 木里地区水库蓄水前后震中分布图(左:2013年6月以前;右:2013年6月以后)

Fig.2 Epicenter distribution before and after reservoir impoundment in Muli area

2 资料选举及计算方法

计算选取数据为研究时间段区域内38个台站有效清晰记录的168次 $M_L3.0$ 级以上地震波形,通过相同的程序方法计算库区蓄水前后地震的地震矩、应力降、视应力及拐角频率等震源参数,分析其在蓄水前后的特征,讨论水库地震与构造地震震源参数特征差异,试图对水库地震发生时介质和应力状态等构造条件和发生环境做一些初步

分析。所选区域地震及台站分布如图3所示。
数据处理中,为了保证准确性与可靠性,首先要在时间域中对原始数据进行处理,包括去除零点漂移,带通滤波(频带为1~20 Hz),以保证用于分析的记录具有较高的信噪比;为了扣除仪器对地面运动的放大因素,再对带通滤波后的数据,经过快速傅里叶变换将信号转换到频率域后,扣除仪器幅频特性,以得到真实的地面运动记录;最后,回到时间域,选取S波段数据,根据以下不同公式,计算得到各震源参数。

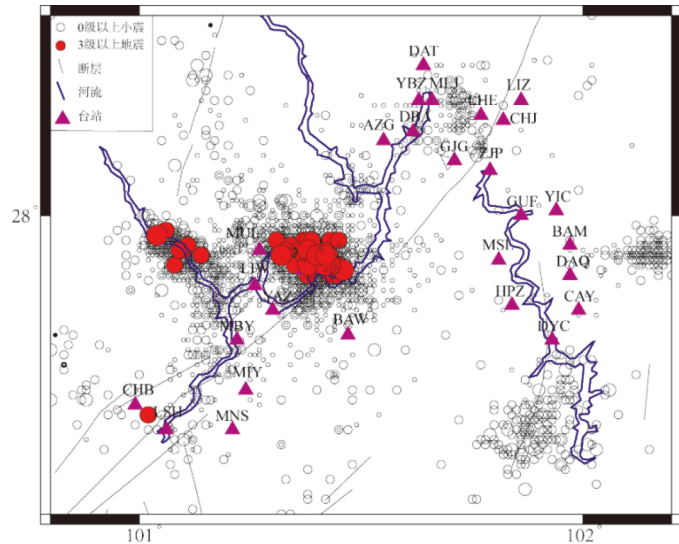


图3 地震及台站分布图

Fig.3 Distribution map of earthquakes and stations

$$\text{拐角频率: } f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{S_v}{S_D}} \quad (1)$$

$$\text{地震矩: } M_0 = 4 \sqrt{\frac{5}{2}} \pi \rho \beta^3 \Omega_0 \quad (2)$$

$$\text{视应力: } \sigma_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0} = \frac{E_s}{DS} \quad (3)$$

$$\text{应力降: } \Delta \sigma_{app} = \frac{7M_0}{16r^3} \quad (4)$$

式(1)、(2)中, S_D 代表地动位移功率谱, S_v 代表速度功率谱, Ω_0 代表零频极限, β 代表波速, E_s 代表辐射能量; 式(3)中, μ 为震源区介质剪切模量, 通常取 $\mu=3.0 \times 10^4$ MPa; S 为断层面面积; D 为断层面平均错距, E_s 和 M_0 分别为地震波辐射能量和标量地震矩, 可通过地震波形的分析和反演得

到, 二者之比即表示单位地震矩辐射出的地震波能量, 故式(3)反应了地震视应力^[10]的物理意义为单位地震矩辐射出的地震波能量与震源区介质的剪切模量的积, 是单位位错辐射的地震波能量的量度, 因此可用视应力对一个地区的绝对应力水平进行间接估算, 视应力越高, 表示震源区应力水平越高, 反之, 震源区应力水平则越低。式(4)中, M_0 为地震矩, 是地震强度的量度, r 为震源半径, 与 S 波速度和拐角频率有关, 而应力降的物理意义即为, 地震前后断层面上的应力差值, 应力降越大, 震源区应力释放越充分, 反之亦然。

研究所选用的波形来自水库台网宽频带地震记录, 地震计型号为RSFS—1A, 幅频特性如图4所示, 显示在2~40 Hz之间平坦。

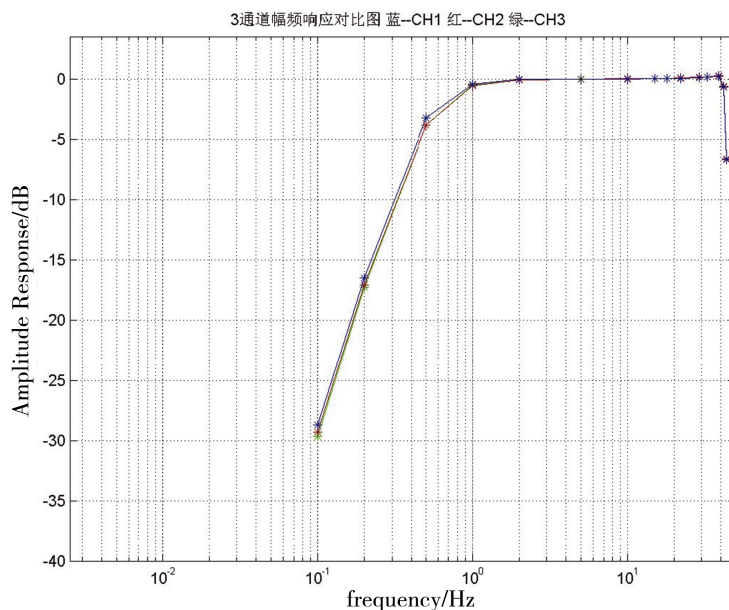


图4 台站幅频特性

Fig.4 Amplitude frequency characteristics of stations

3 结果分析

3.1 视应力、应力降与震级的关系

图5为库区视应力与震级的拟合曲线图, 由图可见视应力分布在0.008~1 MPa之间, 与震级成正比关系, 随其增大而增大。这表明越大的地震其单位地震矩所释放的能量更多^[11], 同时反映了不同震级地震在破裂速度等方面的差异^[12]。下式为所选区域视应力与震级的拟合关系:

$$\ln \sigma_{app} = 1.87M - 8.11, R = 0.72 \quad (5)$$

由于视应力随震级增大而增大, 在对结果的分

析中, 为了消除震级对视应力的影响, 采用下式:

$$\Delta \sigma'_{app} = \sigma_{app} - \sigma'_{app} \quad (6)$$

得到归准化视应力 $\Delta \sigma'_{app}$, 其中 σ_{app} 表示实际视应力值, σ'_{app} 为根据拟合公式(5)得到的视应力值。

3.2 视应力与地震矩的关系

我们还分析了地震矩和视应力的关系, 从图6中可以看出, 视应力有随地震矩增大而增大的趋势, 相对较离散的视应力分布范围为: 0.5~3.0 MPa之间。地震矩是指受构造应力影响使断裂面突然滑移的力学模型, 由于视应力随地震矩的变化关系复杂, 受诸如破裂过程、滑动类型等因素影响,

故理论上视应力随地震矩的变化应该不显著^[13],而图6所显示的现象,可能的解释为:由于人类活动为该区域地震活动的主要因素,这种因素造成了该区域震源破裂方式单一,主要为整体岩石断裂,由

于整块岩石断裂,断面阻力迅速减小,产生更多的地震能量辐射,表现为地震辐射效率的提高,故该区域表现为视应力随着地震矩的增大而增大。

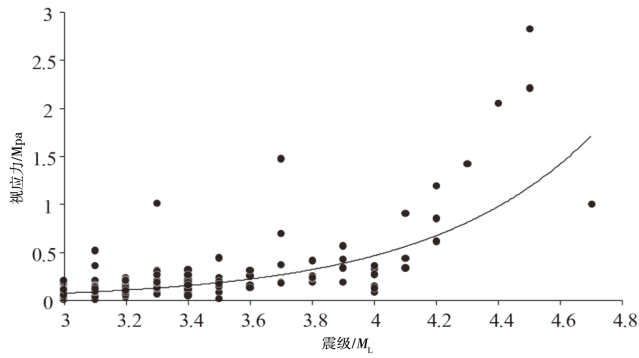


图5 视应力与震级关系

Fig.5 Relationship between apparent stress and magnitude

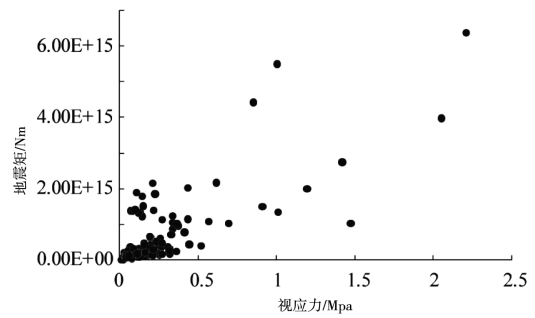


图6 视应力与地震矩的关系

Fig.6 Relationship between apparent stress and seismic moment

3.3 拐角频率与震级的关系

图7给出了区域地震拐角频率与震级之间的关系,以往研究认为,拐角频率与震源破裂尺度有密切关系,震源破裂尺度与拐角频率成反比关系,拐角频率一般随着震级的增大而降低^[14],当震级范围为 $M_L 3.0 \sim 3.5$ 时,拐角频率随震级增大而降低的现象并不明显,当震级范围为 $M_L 3.5 \sim 4.4$ 时,该区域拐角频率随震级的这种变化趋势符合这种理论,说明蓄水以来库区破裂尺度在增大,或许反应了区域应力积累,应力水平较蓄水之前有所增强。

3.4 视应力随时间关系

为了消除震级对视应力的影响,我们采用经式(6)处理后的归一化视应力作为研究对象。从整

个区域归准化视应力随时间的分布特征来看(图8),2013年11月22日视应力上升到一个极高值,之后,视应力随时间的变化曲线涨落现象较明显,在有起伏的上升-回落过程中,于2014年底达到一个极低值,对应频次图来看,此阶段频次逐渐升高,于2014年达到日频次的最高值;之后,视应力值相对平稳,此阶段频次有一个趋势性的降低,2016年4月开始,视应力值开始大幅上升,区域应力水平增加,此时间段内,地震活动增加,频次有所升高,空间分布图来看(图9),归一化视应力的最高值发生在a区,为最靠近大坝的区域,且2014年12月21日的 $M_L 4.7$ 级地震(区域最大地震)就发生在a区,视应力最低值发生在b区,该区仅发生过一次 $M_L 4.0$ 级地震,故该区域视应力水平或许反映了水库蓄水对应力场的调整。

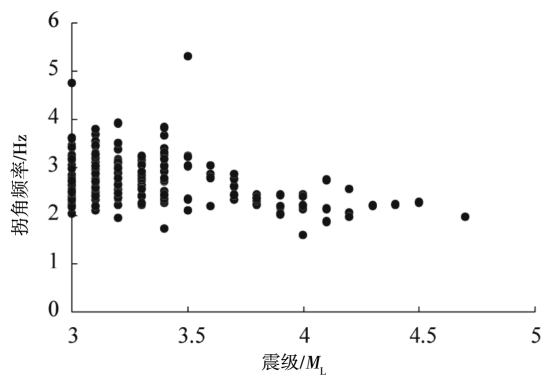


图7 拐角频率与震级的关系

Fig.7 The relationship between corner frequency and magnitude

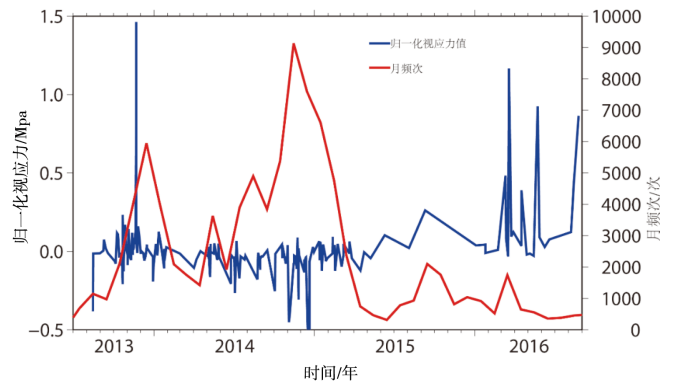


图8 2013年以来木里地区归一化视应力及日频次随时间变化图

Fig.8 Daily frequency map of earthquakes in Muli area since 2013

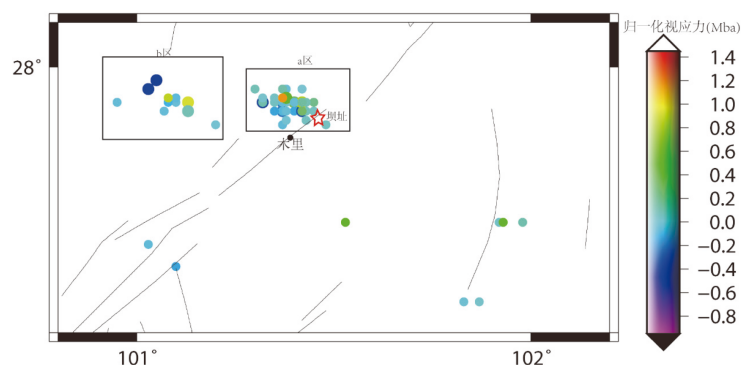


图9 视应力空间分布

Fig.9 Spatial distribution of apparent stress

4 结论

本文选取木里地区 2013~2016 年间 168 次 $M_L 3.0$ 级以上地震波形, 计算库区蓄水前后地震的地震矩、应力降、视应力及拐角频率等震源参数, 结合蓄水资料、频次变化对区域震源参数特征进行分析, 得到的结果如下:

(1) 从木里地区 2011 年 9 月至 2016 年 9 月地震频次及震中分布来看, 在该地区水库蓄水之后, 中小地震频次明显增加, 发震地点也集中在库坝附近区域, 说明水库蓄水导致该区域地震活动水平发生了较为明显的变化。

(2) 区域视应力值随震级的增大而增大, 二者时间的关系为: $\ln \sigma_{app} = 1.87M - 8.11$, $R = 0.72$, 反映了不同震级地震在应力水平积累等方面的差异。

(3) 地震矩与视应力的关系显示, 视应力有随地震矩增大而增大的趋势, 意味着人类活动可能为该区域地震活动的主要因素。

(4) 拐角频率与震级的关系可分为两段来看, 当震级范围为 $M_L 3.0 \sim 3.5$ 时, 拐角频率随震级增大而降低的现象并不明显, 当震级范围为 $M_L 3.5 \sim 4.4$ 时, 拐角频率随震级增大而降低的现象较为明显, 说明震级越大, 库区破裂尺度在增大, 反应了区域应力积累, 应力水平有所增强。

(5) 利用 $\Delta \sigma'_{app} = \sigma'_{app} - \sigma'_{app}$, 得到消除震级影响的归一化视应力值, 其时空分布特征显示, 归一化视应力随时间变化与频次存在着一定的相关性, 整体水平逐渐增高, 且最大地震发生在大坝附近, 这些现象都可能为水库蓄水导致区域构造环境发生变化而造成。

参考文献

- [1] 于海英, 公茂盛, 金波, 等. 水库地震的地震动特性[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 188-193.
- [2] 王墩, 姚运生, 薛军蓉, 等. 三峡水库重点监视区蓄水前后震源机制研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(5): 103-107.
- [3] 华卫, 陈章立, 郑斯华, 等. 水库诱发地震与构造地震震源参数特征差异性研究—以龙潭水库为例[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 924-935.
- [4] Mandal P, Rastogi B K, Sarma C S P. Source parameters of Koyna earthquakes, India[J]. Bull Seismol Soc Am, 1998, 88(3): 883-842.
- [5] 赵翠萍, 陈章立, 华卫, 等. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(6): 1478-1489.
- [6] Brune JN. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. JGR, 1970(75): 4997-5009.
- [7] Moya C A, Aguirre J, Ifikura K. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. BSSA, 2000, 90(4): 977-992.
- [8] Bindi D, Spallarossa D, Augliera P, et al. Source parameters estimated from the aftershocks of the 1997 Umbria-Marche (Italy) seismic sequence[J]. BSSA, 2001(91): 448-455.
- [9] Giampiccolo E, Amico S D', Domenico Patanè, et al. Attenuation and source parameters of shallow microearthquakes at Mt. Etna volcano, Italy[J]. BSSA, 2007(97): 184-197.
- [10] Max Wyss, James N. Brune. Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region[J]. Geophys. Res., 1968(73): 4681-4694.
- [11] 华卫, 陈章立, 郑斯华, 等. 三峡水库地区震源参数特征研究[J]. 地震地质, 2010, 32(4): 533-541.
- [12] 华卫, 陈章立, 郑斯华, 等. 水库诱发地震与构造地震震源参数特征差异性研究—以龙潭水库为例[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 924-935.
- [13] 宫悦, 龙锋, 乔慧珍, 等. 川东南地区地震视应力时空分布特征[J]. 地震地磁观测与研究, 2015(2): 6-12.
- [14] 陆丽娟, 黄树生, 张帆, 等. 广西龙滩库区地震拐角频率时空差异性特征[J]. 地震研究, 2015, 38(03): 352-358+517.