

马起杨, 朱新运. 2016. 浙江珊溪水库地震震源参数特征研究. 地震学报, 38(6): 835–846. doi:10.11939/jass.2016.06.003.
Ma Q Y, Zhu X Y. 2016. Characteristics of source parameters of the Shanxi Reservoir earthquakes in Zhejiang region. Acta Seismologica Sinica, 38(6): 835–846. doi:10.11939/jass.2016.06.003.

浙江珊溪水库地震震源参数特征研究^{*}

马起杨^{*} 朱新运

(中国杭州 310013 浙江省地震局)

摘要 利用 2014 年 1 月—2015 年 12 月浙江省区域数字地震台网记录的 1360 次珊溪水库 M_L 0.5—4.4 地震资料, 采用 Brune 模式, 将台站获取的速度记录进行几何扩散校正、介质衰减校正及仪器校正后得到速度谱, 对速度谱在频率域进行傅里叶积分得到震源位移谱, 之后使用遗传算法计算得到拐角频率和震源位移谱零频极限值, 进而计算出该区的地震矩为 10^{10} — 10^{14} N·m, 震源破裂半径为 33—550 m, 拐角频率为 2.4—39.7 Hz, 地震应力降为 0.04—6.74 MPa, 视应力为 0—2.75 MPa. 在此基础上, 对各参数特征及其关系进行系统性分析, 结果表明: 各震源参数之间表现出一定的对数线性或半对数线性关系; 空间上, 应力降和拐角频率在库区西北段较高, 东南段较低; 应力降与地震矩在空间上呈反向关系, 拐角频率与破裂半径在空间上呈负相关.

关键词 水库地震 震源参数 拐角频率 时空分布

doi:10.11939/jass.2016.06.003 中图分类号: P315.3⁺3 文献标志码: A

Characteristics of source parameters of the Shanxi Reservoir earthquakes in Zhejiang region

Ma Qiyang^{*} Zhu Xinyun

(Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China)

Abstract: According to the seismic data of 1360 earthquakes with M_L 0.5—4.4 occurred in Shanxi Reservoir from January of 2014 to December of 2015, which were recorded by the Regional Digital Seismic Network of Zhejiang Province, this paper obtains the source displacement spectra by using Fourier integration of velocity spectrum in the frequency field based on the Brune's model, after the geometrical diffusion correction, medium attenuation correction and instrument correction of the velocity records from the stations, and then the corner frequency and the source displacement spectra at the zero frequency are acquired with the genetic algorithm. And then the radius of the epicenter, the seismic moments and other small local earthquake source parameters are calculated. Furthermore, this paper systematically analyzes the characteristics of the source

^{*} 基金项目 中国地震局星火计划攻关项目(XH12023)和公益技术研究社会发展项目(2014C33050)共同资助.

收稿日期 2016-02-29 收到初稿, 2016-04-06 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: mqyang61@126.com



parameters and the relationship among the parameters. The results show that: seismic moment ranges 10^{10} — 10^{14} N·m, the range of source radius is 33—550 m, the corner frequency ranges 2.4—39.7 Hz, seismic stress drop is in the range of 0.04—6.74 MPa, and apparent stress is in the range of 0—2.75 MPa. The result also show that there is some log-linear or semi-logarithmic linear relationships among the seismic moment, corner frequency, Richter magnitude, moment magnitude and other source parameters. In the space domain, the stress drop and the corner frequency are higher at northwest section of Shanxi Reservoir area and lower at southeast section. In addition, there is opposite relationship between the stress drop and the seismic moment in space, meanwhile the corner frequency is negatively correlated to the source radius in space.

Key words: reservoir earthquake; seismic source parameter; corner frequency; spatio-temporal distribution

引言

库区地震是浙江省地区比较显著的地震事件,近年来,珊溪水库库区发生多次地震,引起了各方的关注.珊溪水库库区的断裂构造较为复杂,库区范围内约有 14 条断裂,断裂一般长达 10 余千米,断裂带宽约 20—30 m,位于 5 km 深度以上.出露的断裂主要有 NE 向和 NW 向两组:NE 向断裂的走向为 $NE40^{\circ}$ — 60° ,倾向以 NW 为主,倾角为 60° — 80° ,多为逆走滑断层;NW 向断裂的走向为 $NW40^{\circ}$ — 50° ,倾向以 NE 为主,倾角为 60° — 70° ,多为逆断层和逆走滑断层,未发现 NW 向断裂切错水系的现象.

珊溪水库于 2000 年 5 月开始蓄水,2002 年 7 月库区开始发生地震,截至目前一直有强弱不等的地震发生,其中最显著的高密度震群活动有 3 组:2002 年 7—10 月为第一组,最大为 $M_L 3.7$ 地震;2006 年 2—11 月为第二组,最大为 $M_L 4.6$,期间 2—5 月发生密集的震群活动,之后出现长达 8 年的 $M_L \geq 3.0$ 地震平静;2014 年 9 月—2015 年 4 月为第三组,期间 2014 年 9—12 月发生密集的震群活动,对比朱新运等(2010)定位第一、二组地震震中位置结果可知,本组地震填充了之前该库区地震活动的弱活动段,共发生 $M_L \geq 2.0$ 地震 258 次,最大地震为 $M_L 4.4$,震中为($119.949^{\circ}E$, $27.704^{\circ}N$),震源深度为 3 km.

浙江省地震局在珊溪水库地震发生期间建成了子台密度较大的数字地震台网,包括新浦、联云、包垵、云湖、泰顺、珊溪、黄坛等台站;这些台站近距离记录了大量地震资料,为计算震源参数以及分析各参数之间的拟合关系提供了详实的数据支持.针对本区域水库地震的前期地震已进行了大量研究工作,包括拐角频率对地震序列的依赖性研究(朱新运等,2004)、库区介质衰减研究(张帆等,2013)、震源参数研究(钟羽云等,2004;于俊谊,朱新运,2008)等.这些研究为该区域地震的发生发展提供了合理完整的理论解释.2014 年 9 月震群再次活动,其强度和频度基本接近于该区域前期的地震活动水平.本文拟利用这些地震的数字地震波资料研究其震源参数,对该区域前期地震的孕育过程进行必要补充,以期结合震源参数空间分布规律和震例,深刻认识水库区域地震的发生规律.

1 原理与方法

台站记录中包含了地震震源、地震波的传播途径及场地响应等信息,通过有效简化或

扣除台站记录中的非震源信息, 基于震源谱理论模型获得震源参数, 这是震源参数提取的有效手段(Aaron *et al*, 2000; Bindi *et al*, 2001; Giampiccolo *et al*, 2007).

台站记录到的观测谱可以表示为

$$S_{\text{obs}}(f) = O_{\text{obs}}(f)P(f)G(f)I(f), \quad (1)$$

式中, $S_{\text{obs}}(f)$ 为台站观测谱, $O_{\text{obs}}(f)$ 为地震震源谱, $G(f)$ 为场地响应, $I(f)$ 为仪器响应, $P(f) = R_0^{-1} \exp[-\pi R_0 f / (Q(f)v_s)]$ 为路径效应, R_0 为震源距, f 为频率, $Q(f)$ 为衰减系数, v_s 为横波速度.

取 EW 向和 NS 向均具有较高信噪比的 S 波记录数据计算傅里叶谱. 计算中使用体波数据, 几何衰减使用 r^{-1} 校正, 设定 S 波的非弹性、非均匀性衰减与其本身的尾波衰减相一致(Rautian, Khalturin, 1978; Aki, 1980; Herrmann, 1980; Matsunmni, Nakamura, 2004), 介质非均匀性衰减采用朱新运和张帆(2006)通过尾波衰减所获取的参数进行校正, 场地效应采用朱新运和陈运泰(2007)利用反演获得的结果进行校正.

为了保证地震波谱数据的稳定性, 在计算傅里叶谱时采用 Chael(1987)提出的延时窗技术, 即将 S 波段分割为包含 n 个点的小数据段计算傅里叶谱, 之后以 $1/2$ 数据段前移, 前次计算数据段的一半被重叠, 对 S 波重新分割后的 n 个小数据段进行第二次计算, 依次类推, 这样就获得了整个数据段分割、重叠的 n 段谱数据, 用下式将 n 小段数据归算为全部 S 波段的谱数据:

$$O(f) = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2(f) \frac{T}{nt}}, \quad (2)$$

式中: $O(f)$ 为观测位移谱; n 为数据段总数, 这里取 $n=256$; T 为整段 S 波窗长; t 为数据分段窗长. 使用速度记录进行谱计算时乘以系数 $1/(2\pi f)$ 将其转换为位移谱. 使用式(2)分别计算 EW 分量和 NS 分量的震源谱, 并根据下式合成最终震源观测谱(Aaron *et al*, 2000):

$$O_{\text{obs}}(f) = \sqrt{[O_{\text{EW}}(f)]^2 + [O_{\text{NS}}(f)]^2}, \quad (3)$$

式中, $O_{\text{EW}}(f)$ 和 $O_{\text{NS}}(f)$ 分别为 EW 向和 NS 向的震源谱, $O_{\text{obs}}(f)$ 为单个台站对一个地震记录的震源谱. 计算 S 波震源谱结果, 舍弃低信噪比的地震波记录, 将多台对同一地震记录的振幅谱均值作为该地震的有效振幅谱.

根据 Brune(1970)的 ω^2 模型(Shi *et al*, 1998), 理论震源位移谱可表示为

$$|O_{\text{theo}}(f)| = \Omega_0 \left[1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (4)$$

式中, $O_{\text{theo}}(f)$ 为理论震源位移谱, Ω_0 为震源谱低频极限值, f_0 为拐角频率. 以 Ω_0 和 f_0 为独立变量, 利用遗传算法或最小二乘法, 使 $O_{\text{obs}}(f)$ 与 $O_{\text{theo}}(f)$ 具有最小残差, 从而确定参数 Ω_0 和 f_0 .

本文采用遗传算法, 确定下式为目标函数(朱新运, 于俊谊, 2008). 根据仪器性能和采样率, 在 1—18 Hz 时, 仪器响应的振幅稳定且相位较低, 所以限定在 1—18 Hz 范围内搜索频率, 使目标函数最小, 进而获得 Ω_0 和 f_0 .

$$\epsilon = \sum_{k=1}^m \frac{[O_{\text{obs}}(f_k) - O_{\text{theo}}(f_k)]^2}{\sqrt{O_{\text{obs}}(f_k)O_{\text{theo}}(f_k)}}, \quad (5)$$

式中, m 为频率点数, ϵ 为目标值, O_{obs} 为同一地震的波谱转化为震源位移谱后的多台平均

值, O_{theo} 为根据 ω^2 模型计算所得的震源谱, k 为频率点序号.

以 2014 年 10 月 25 日库区发生的 $M_L 4.4$ 地震为例, 计算泰顺台的单台位移谱、多台站位移谱平均值以及拟合得到的理论震源谱, 如图 1 所示.

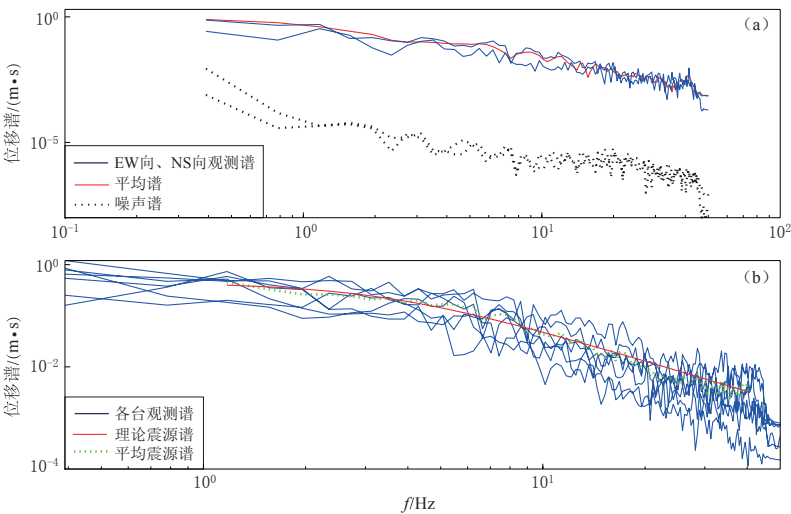


图 1 2014 年 10 月 25 日珊溪水库 $M_L 4.4$ 地震的位移谱计算过程实例
(a) 单台(泰顺台)震源谱与噪声谱比较; (b) 多台站震源谱及其平均值和多台数据拟合结果
Fig. 1 An example for calculating the seismic displacement spectra of the $M_L 4.4$ earthquake occurred in Shanxi Reservoir on 25 October 2014

- (a) Comparison of the source spectrum recorded by Taishun station with noise spectrum. Blue line represents north-south and east-west observation spectra in NS and EW direction; red line represents the average observation spectra, black dotted line indicates the noise spectrum.
- (b) Source spectra (blue lines) and their average spectrum (green line) as well as data fitting of spectra of a series of stations by using the ω^2 model (red line)

确定低频极限值 Ω_0 和拐角频率 f_0 后, 即可由下式获取地震矩 M_0 , 破裂半径 r_0 , 应力降 $\Delta\sigma$ 和视应力 σ_{app} (Brune, 1970):

$$M_0 = b\Omega_0, \quad b = 4\pi v_s^3 \rho [R_s(\varphi, \theta) R_e]^{-1}, \quad r_0 = \frac{2.34 v_s}{2\pi f_0},$$
$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r_0^3}, \quad \sigma_{\text{app}} = \frac{2\mu R_s(\varphi, \theta) \Omega_0 (\pi f_0)^2}{v_s^2}, \tag{6}$$

式中, $R_s(\varphi, \theta)$ 为辐射方向性因子, R_e 为自由表面反射系数. 2014 年 10 月 25 日珊溪水库 $M_L 4.4$ 地震震源参数的计算结果为: 拐角频率为 3.5, 地震矩为 $5.73 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$, 震源破裂半径为 386 m, 应力降为 4.34 MPa, 矩震级为 3.8, 视应力 1.77 MPa.

2 数据与计算结果

本文所用资料来源于 55 个台站记录到的 2014 年 1 月—2015 年 12 月珊溪水库库区 (119.758—120.393°E, 27.452—29.218°N) 发生的 1360 次 $M_L 0.5—4.4$ 地震, 其中 $1.0 \leq M_L \leq 1.9$ 地震 846 次, $2.0 \leq M_L \leq 2.9$ 地震 207 次, $3.0 \leq M_L \leq 3.9$ 地震 43 次, $4.0 \leq M_L \leq 4.9$ 地震 8 次; 最大地震为 $M_L 4.4$, 震中为 (119.949°E, 27.704°N), 震源深度为 3.0 km. 所用仪器为 BBVS-60 型、FBS-3B 型宽频带地震计和 FSS-3B 短周期地震计, 仪器对频率

响应的平坦段在 1 Hz 以下, 采样频率为 100 Hz 的仪器对频率响应的高段可达 40 Hz, 系统动态范围优于 120 dB. 震中与台站分布如图 2 所示.

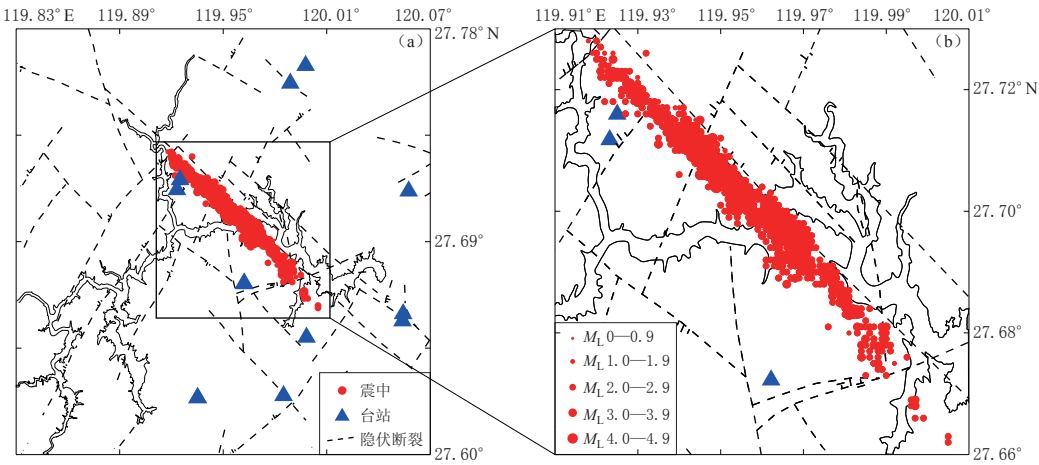


图 2 珊溪水库库区地震震中与台站的分布, 图(b)为图(a)中方框的放大图

Fig. 2 Distribution of earthquake epicenters (dots) and stations (triangles) in Shanxi Reservoir
Fig. (b) is amplification of the square in Fig. (a)

计算中取 $R_s = \sqrt{2/5}$, 自由表面校正系数 $R_c = 2.0$, $v_s = 3.5 \text{ km/s}$, $\rho = 2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 采用朱新运等关于浙江及邻省区尾波 Q 值的研究结果(朱新运, 张帆, 2006; 朱新运, 陈运泰, 2007; Zhu, 2014)对台站所记录的地震波资料进行场地响应等校正后, 使用遗传算法计算每次地震的拐角频率和震源位移谱零频极限值, 进而根据理论公式计算出各震源参数为: 地震矩 $M_0 = 10^{10} \text{--} 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$, 震源破裂半径 $r_0 = 33 \text{--} 550 \text{ m}$, 拐角频率 $f_0 = 2.4 \text{--} 39.7 \text{ Hz}$, 应力降 $\Delta\sigma = 0.04 \text{--} 6.74 \text{ MPa}$, 视应力 $\sigma_{app} = 0 \text{--} 2.75 \text{ MPa}$.

3 结果分析

研究结果表明地震矩 M_0 , 震源破裂半径 r_0 , 应力降 $\Delta\sigma$, M_w 以及 M_L 之间呈一定的相关关系, 这种地震震源参数之间的关系被称为定标关系.

3.1 M_L 与 M_w 及 M_L 与 M_0 的定标关系

震级是用来衡量地震相对大小的物理量, 本文基于地震事件和震级数据, 使用最小二乘法拟合出 M_L 与 M_w 的关系为

$$M_w = 0.708M_L + 0.732. \tag{7}$$

地震矩 M_0 是对断层滑动引起的地震强度的直接测量, 反映了震源处破裂的大小, 所计算地震的震级范围为 $M_L 0.5 \text{--} 4.4$, 相对应的地震矩范围为 $10^{10} \text{--} 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$. 作为另一个描述地震绝对大小的力学量, M_0 与 M_L 的关系如图 3 所示, 可以看出 M_0 的对数与 M_L 之间呈很好的线性关系, 其表达式为

$$\lg M_0 = 1.052M_L + 10.16. \tag{8}$$

结合式(7)和式(8), 可得 M_0 与 M_w 的关系为

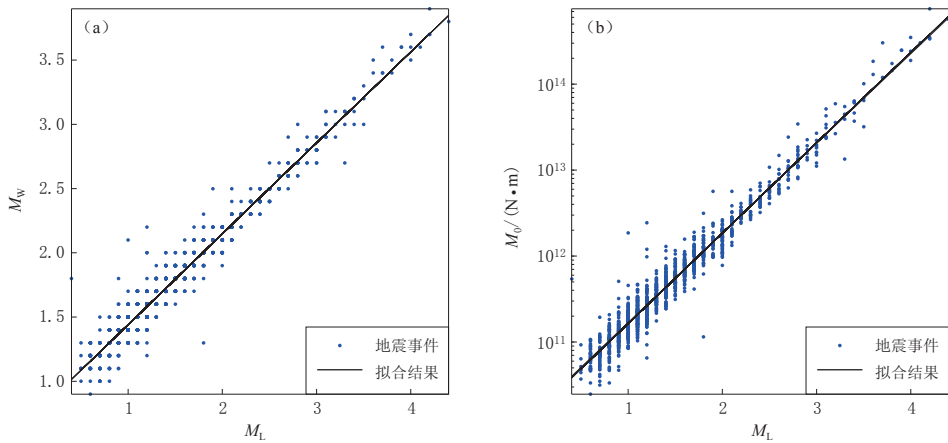


图 3 (a) M_w 与 M_L 拟合的定标关系; (b) M_0 与 M_L 拟合的定标关系

Fig. 3 (a) Scaling relation between M_w and M_L ; (b) Scaling relation between M_0 and M_L

$$M_w = 0.67 \lg M_0 - 6.089, \quad (9)$$

这与 Kanamori(1977)给出的 M_0 与 M_w 之间的关系

$$M_w = \frac{2}{3} \lg M_0 - 6.07 \quad (10)$$

极为相近.

3.2 M_0 与 r_0 及 M_0 与 f_0 的定标关系

库区内的震源破裂半径 $r_0 = 33\text{—}550$ m, 其中 $r_0 = 33\text{—}75$ m 范围内的地震有 744 次, $r_0 = 75\text{—}135$ m 范围内的有 401 次, 大部分地震的破裂半径尺度较小. 图 4a 给出了破裂半径的分布直方图, 可以看出, 地震次数 N 随着 r_0 的增大而迅速减小; 图 4b 给出了 M_0 与 r_0 的定标关系, 总体上看 M_0 越大, r_0 越大, 最小二乘拟合后 M_0 与 r_0 的定标关系为

$$\lg M_0 = 2.195 \lg r_0 + 7.471. \quad (11)$$

图 4c 给出了拐角频率 f_0 的分布直方图, 可以看出, $f_0 = 2.4\text{—}39.7$ Hz, 其中: $f_0 = 2.4\text{—}10$ Hz 范围内的地震有 221 次; $f_0 = 10\text{—}25$ Hz 范围内有 881 次, 占总数的 64.8%; $f_0 = 25\text{—}40$ Hz 的有 258 次. 一般而言, 震级愈大, 地震震源破裂半径愈大, 拐角频率越小. 本文对拐角频率和震源破裂半径进行统计的结果显示, 破裂半径小的地震次数多, 这与序列中大小地震次数关系呈正相关, 但拐角频率却出现了有意义的变化. 通常地震震级越小, 拐角频率愈大, 按照地震频度 G-R 关系, 拐角频率与频度的关系应该与震源破裂半径与频度的关系相反, 但本文所计算的拐角频率却表现为类正态分布(图 4c), 主要集中在 10—25 Hz 之间. 按照下式(Brune, 1970, 1971)

$$f_0 = \frac{2.34}{2\pi} \frac{v_s}{r} \quad (12)$$

可知, 在横波速度稳定的情况下, f_0 与 r 成反比关系, 这说明区域内 v_s 在地震时有过较大扰动. 由于地震时 v_s 降低, 使得大部分地震的 f_0 并未集中在其高段. 图 4d 给出了地震矩 M_0 与拐角频率 f_0 的关系, 可以看出, M_0 越大, f_0 越小, 其拟合关系式为

$$\lg f_0 = -0.221 \lg M_0 + 3.779. \quad (13)$$

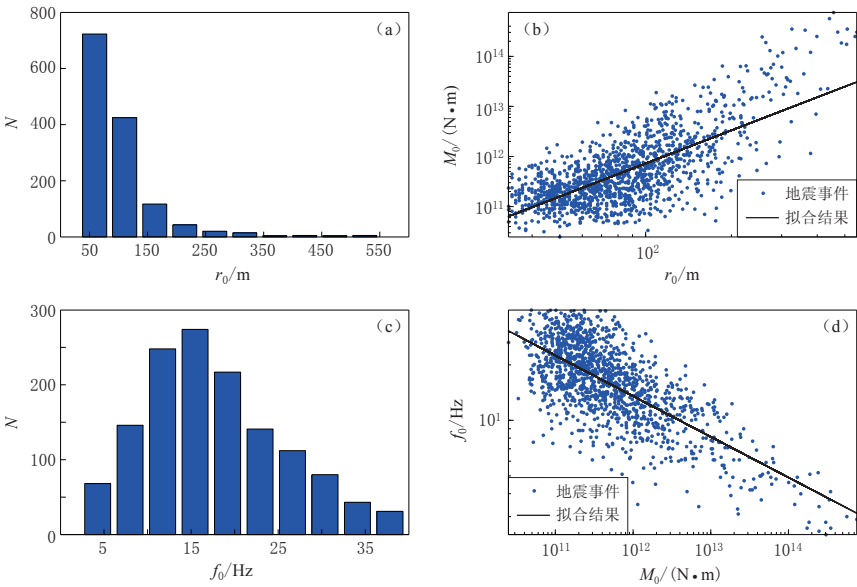


图4 破裂半径 r_0 、拐角频率 f_0 的分布直方图以及地震矩 M_0 与 r_0 和 f_0 的定标关系
(a) r_0 分布直方图；(b) M_0 与 r_0 拟合的定标关系；(c) f_0 分布直方图；(d) f_0 与 M_0 拟合的定标关系

Fig. 4 Histograms of source radius r_0 and corner frequency f_0 as well as scaling relation between M_0 , r_0 and f_0
(a) Histogram of r_0 ; (b) Scaling relation between M_0 and r_0 ;
(c) Histogram of f_0 ; (d) Scaling relation between f_0 and M_0

3.3 $\Delta\sigma$ 与 M_0 的定标关系

图 5a 给出了 $\Delta\sigma$ 与 M_0 的定标关系，图 5b 给出了珊溪水库库区 $\Delta\sigma$ 的分布直方图，可以看出，库区内 $\Delta\sigma=0.04\text{--}6.74\text{ MPa}$ ，其中： $\Delta\sigma=0\text{--}0.5\text{ MPa}$ 的地震有 802 次； $\Delta\sigma=0.5\text{--}1.0\text{ MPa}$ 的有 299 次，约占地震总数的 81%；其余 258 次分布在 $\Delta\sigma=1.0\text{--}7.0\text{ MPa}$ 范围内，整组地震的应力降均值约为 0.87 MPa. 图 5c 给出了珊溪水库库区视应力 σ_{app} 的分布直方图，可以看出， $\sigma_{\text{app}}=0.0002\text{--}2.75\text{ MPa}$ ，其中： $\sigma_{\text{app}}=0\text{--}0.5\text{ MPa}$ 的地震有 1184 次； $\sigma_{\text{app}}=0.5\text{--}1.0\text{ MPa}$ 的有 124 次，约占地震总数的 95%；其余分布在 1.0—2.75 MPa 之间；整组地震的视应力均值约为 0.37 MPa. 水库库区低 $\Delta\sigma$ 和低 σ_{app} 说明震群属于低应力背景下的地震活动，其 f_0 较低，这与陈培善和 Duda(1993)的研究结果“若地震发生在低背景应力条件下，地震震源脉冲低而宽，相应的高频成分少，拐角频率小”相一致.

水库区地震的应力降的对数与地震矩的对数具有较显著的线性正相关关系，拟合得到的定标关系式为

$$\lg\Delta\sigma = 0.332\lg M_0 + 1.667. \tag{14}$$

此外，珊溪水库库区重复发生的小地震，其应力降 $\Delta\sigma$ 随时间的推移呈系统性的变化. 如图 6 所示， $\Delta\sigma$ 随时间的变化与 M_0 随时间变化呈现出较为一致的变化，这与陈运泰等 (2000) 持有的“对于不同地震矩的小地震，应力降的大小随地震的增大而增大”的观点相一致.

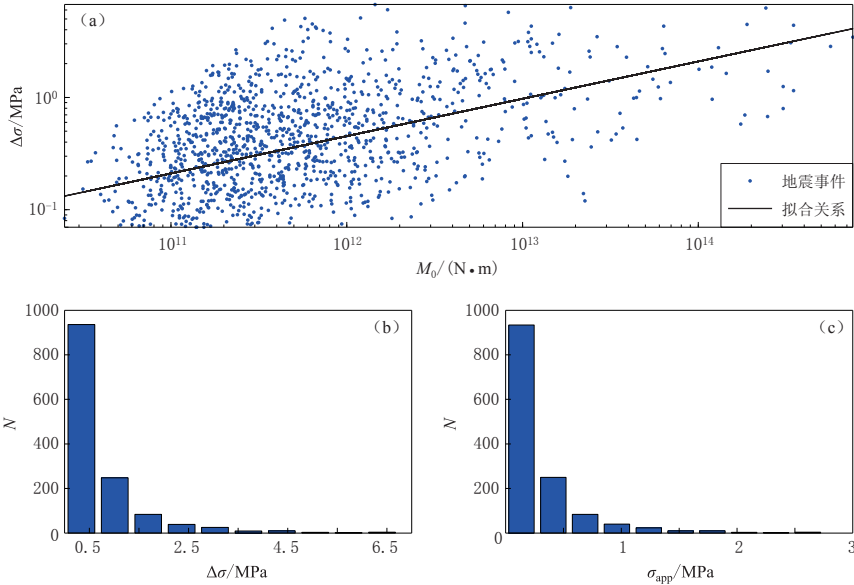


图 5 应力降 $\Delta\sigma$ 与地震矩 M_0 的定标关系及 $\Delta\sigma$ 和 σ_{app} 分布直方图

(a) $\Delta\sigma$ 与 M_0 拟合的定标关系; (b) $\Delta\sigma$ 分布直方图; (c) σ_{app} 分布直方图

Fig. 5 Distribution of stress drop $\Delta\sigma$, seismic moment M_0 and apparent stress σ_{app}

(a) Scaling relation between $\Delta\sigma$ and M_0 ; (b) Histogram of $\Delta\sigma$;
(c) Histogram of σ_{app}

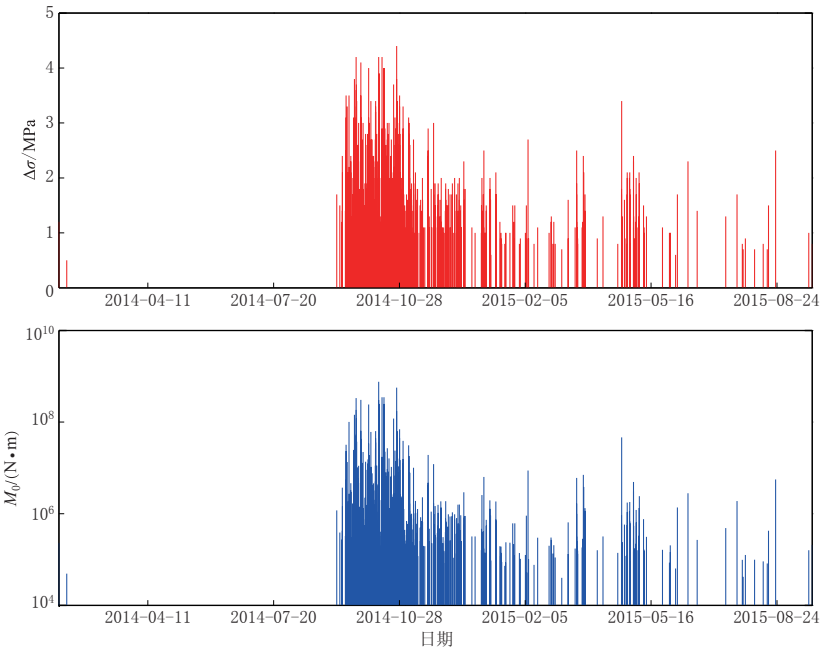


图 6 应力降 $\Delta\sigma$ (a)和地震矩 M_0 (b)随时间的变化

Fig. 6 Variation of stress drop $\Delta\sigma$ (a) and seismic moment M_0 (b) with time

3.4 $\Delta\sigma$ 与 r_0 及 $\Delta\sigma$ 与 f_0 之间的关系

如图 7 所示， $\Delta\sigma$ 与 r_0 及 $\Delta\sigma$ 与 f_0 的对数拟合后均无明显的线性关系。

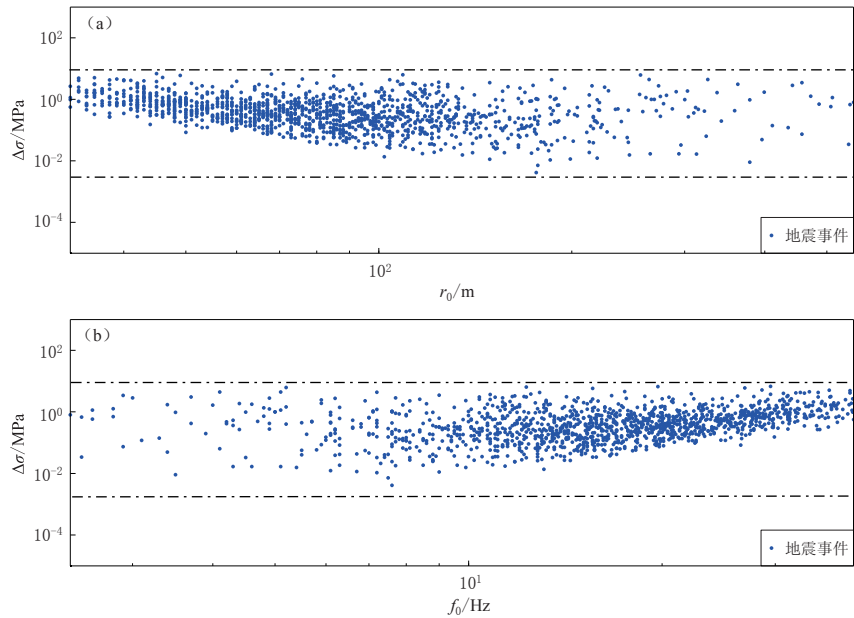


图 7 应力降 $\Delta\sigma$ 与破裂半径 r_0 (a) 和拐角频率 f_0 (b) 的关系

Fig. 7 Distribution of data fitting between stress drop $\Delta\sigma$ and source radius r_0 (a) and $\Delta\sigma$ and corner frequency f_0 (b)

3.5 震源参数空间分布特征

将 2014—2015 年共计 1 360 次地震的震源参数按照 400 m×400 m 进行网格化，绘出震源参数的空间分布，如图 8 和图 9 所示. 由图 8a 可以看出：研究区域应力降空间分布的范围为 0.033—2.61 MPa，大部分区域应力降集中在 0.5—1.0 MPa 范围内变化，应力降最大区域位于库区东南部，并且其附近应力降均高于均值；应力降沿双溪—焦溪垸断裂分布不均匀，总体上靠近断裂且位于水库淹没区西北段的应力降较小，靠近断裂且位于水库

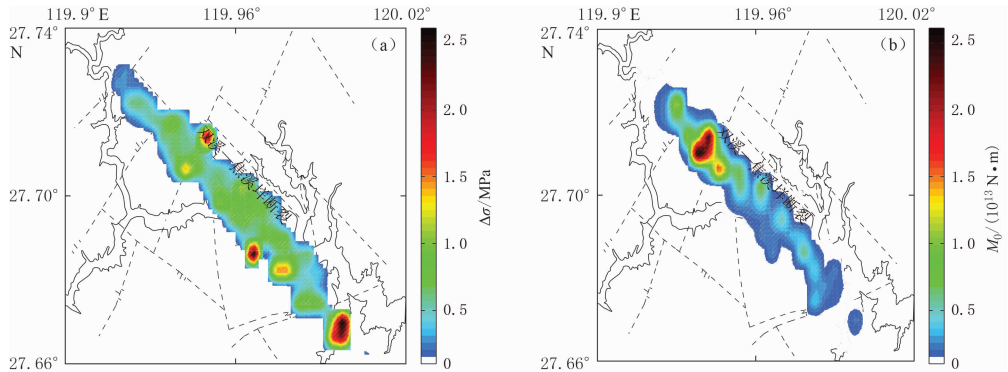


图 8 珊溪水库库区应力降 $\Delta\sigma$ (a) 和地震矩 M_0 (b) 空间分布图

Fig. 8 Distribution of stress drop $\Delta\sigma$ (a) and seismic moment M_0 (b) in the Shanxi Reservoir region

淹没区东南段的较大. 另一方面, 应力降的变化与震中位置有关, 在研究区域西北段发生地震较多, 震级较大, 该段地区应力降处于均值范围内; 东南段发生地震较少, 应力降较大. 例如, 珊溪水库 2014 年 9—12 月地震主要发生在双溪—焦溪垴断裂带淹没区西北段. 如图 8b 所示, 水库库区的地震矩范围为 $3 \times 10^{10} \sim 2.5 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}$, 库区西北段的地震矩数值较大, 这与该区多次发生较大地震有关, 而在库区东南段地震矩数值较小, 大部分处于 $1 \times 10^{10} \sim 5 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{m}$ 之间.

在空间上, 珊溪水库库区应力降与地震矩存在负相关关系, 即地震矩小的区域(库区东南段)应力降大, 地震矩大的区域(库区西北段)应力降小; 应力降与地震矩在空间上的这种负相关关系, 可能与该地区的地震活动情况有关. 库区西北段发生地震、释放应力后, 应力水平较低, 相应的应力降较低, 而地震活动较低的西南段应力水平较高, 应力降也相对较高. 应力降与地震矩在数值上表现为正相关, 而在空间上呈负相关关系, 因此应力降较高的库区东南段也是未来可能发生较大地震的重点监测区域.

如图 9 所示, 震源区的地震拐角频率 f_0 为 2.4—39.7 Hz, 表现为西北段较大, 东南段较小, 基本呈北低南高的特点; 破裂半径 r_0 为 33—550 m. 可以看出, f_0 与 r_0 在空间上呈明显的负相关.

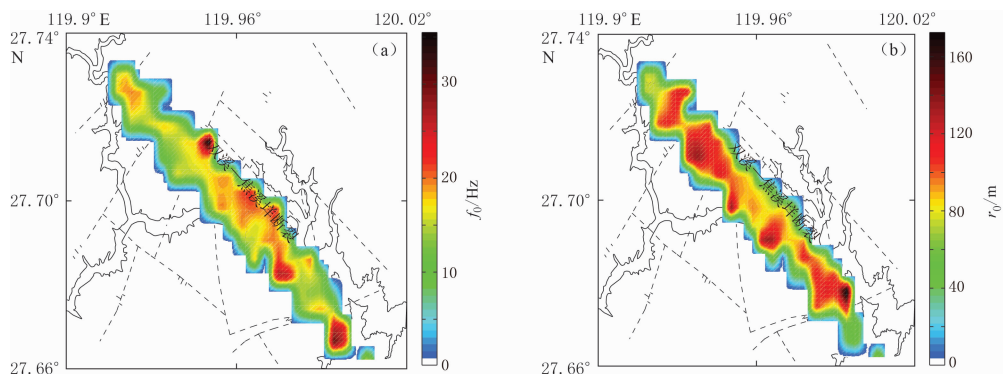


图 9 珊溪水库库区拐角频率 f_0 (a) 和破裂半径 r_0 (b) 的空间分布

Fig. 9 Distribution of corner frequency f_0 (a) and source radius r_0 (b) in the region of Shanxi Reservoir

4 讨论与结论

本文基于 Brune(1970)提出的小震震源模型, 使用经验公式计算浙江省珊溪水库 1360 次 $M_L 0.5 \sim 4.4$ 地震的震源参数. 由于这些经验公式本身具有一定的偏差, 计算处理单次地震时利用多个近台结果平均得到该地震的震源参数, 这样使得单次地震的震源参数误差更小, 此外还通过统计大量的中、小地震震源参数减小计算结果误差所带来的影响. 在此基础上, 进一步研究各震源参数之间的标定关系, 得到的主要结论如下:

1) 珊溪水库库区地震的地震矩对数与破裂半径对数呈较显著的线性正相关, 而与拐角频率的对数呈显著的线性负相关; 地震应力降与地震矩表现出正相关关系, 而与震源破裂半径未呈明显的相关. 此外, 应力降与地震矩在时间上呈正相关.

2) 于俊谊和朱新运(2008)使用本区域第一、二组地震中 $M_L \geq 2.0$ 地震资料进行震源参数研究. 本研究与其标定关系(表 1)相差不大, 这说明在同一区域不同时间尺度上、不

表 1 本文与于俊谊和朱新运(2008)关于珊溪水库库区震源参数拟合定标关系结果对比

Table 1 Comparison of fitting scaling relations of source parameters in the Shanxi Reservoir between this paper and Yu and Zhu (2008)

关系式	k_1		k_2	
	本文	于俊谊和朱新运(2008)	本文	于俊谊和朱新运(2008)
$M_W=k_1M_L+k_2$	0.708	0.74	0.732	0.70
$\lg M_0=k_1M_L+k_2$	1.052	1.11	10.16	10.11
$\lg M_0=k_1\lg r_0+k_2^*$	2.195		7.471	
$\lg M_0=k_1r_0^*$		0.0061		11.71
$\lg f_0=k_1\lg M_0+k_2$	-0.221	-0.26	3.779	3.97
$\lg \Delta\sigma=k_1\lg M_0+k_2$	0.332	0.281	1.667	2.158

* 关于 M_0 与 r_0 的定标关系, 于俊谊和朱新运(2008)采用 M_0 对数与 r_0 拟合, 本文采用 M_0 对数与 r_0 对数拟合; 若采用 M_0 对数与 r_0 拟合, 本文所得结果为 $k_1=0.0071$ 和 $k_2=10.967$, 与于俊谊和朱新运(2008)结果近似。

同震级范围的地震震源参数不随地震序列的发展而变化。

3) 珊溪水库库区的地震震源破裂半径 $r_0=33\text{—}550\text{ m}$, 大部分地震的 r_0 较小, 地震次数随着 r_0 的增大而迅速减小; 拐角频率 $f_0=2.4\text{—}39.7\text{ Hz}$, 地震次数与 f_0 并未呈现出正相关关系, 而是大部分处于拐角频率中段 $10\text{—}25\text{ Hz}$; f_0 与 r_0 未成反比关系, 说明区域内地震波横波速度在地震时有较大扰动。

4) 珊溪水库库区的应力降 $\Delta\sigma=0.04\text{—}6.74\text{ MPa}$, 均值为 0.87 MPa , 小震的应力降集中分布在 $0\text{—}0.5\text{ MPa}$; 视应力 $\sigma_{\text{app}}=0.0002\text{—}2.75\text{ MPa}$, 均值约为 0.37 MPa , 说明该震群属于低应力背景下的地震活动。

5) 应力降和拐角频率在水库库区东南段较高, 西北段较低, 而地震矩和破裂半径在水库库区东南段较低, 西北段较高; 应力降与地震矩在空间上呈反向关系, 这与二者在数值大小上的关系并不一致; 拐角频率和破裂半径在空间上呈负相关。从地震分布的角度看, 本组地震填补了朱新运等(2010)一文中所提到的空段, 而本组地震应力释放较大的地方也正是第一、二组地震应力释放不充分的区段。

参 考 文 献

陈培善, Duda S J. 1993. 峰值速度和加速度对环境剪应力的依赖性[J]. 地震学报, **36**(2): 185-194.
Chen P S, Duda S J. 1993. Dependence of peak acceleration and peak velocity on the environment shear stress[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(2): 185-194.
陈运泰, 吴忠良, 王培德, 许力生, 李鸿吉, 牟其铎. 2000. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社: 1-172.
Chen Y T, Wu Z L, Wang P D, Xu L S, Li H J, Mu Q D. 2000. *Digital Seismology*[M]. Beijing: Seismological Press: 1-172 (in Chinese).
于俊谊, 朱新运. 2008. 浙江珊溪水库地震震源参数研究[J]. 中国地震, **24**(4): 379-387.
Yu J Y, Zhu X Y. 2008. Hypocentral parameters research of the Shanxi reservoir area in Zhejiang[J]. *Earthquake Research in China*, **24**(4): 379-387 (in Chinese).
张帆, 朱新运, 钟羽云. 2013. 珊溪水库地震小震震源机制解特征研究[J]. 地震工程学报, **35**(3): 684-691.
Zhang F, Zhu X Y, Zhong Y Y. 2013. Study on the characteristic of focal mechanism solutions of the Shanxi reservoir earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(3): 684-691 (in Chinese).
钟羽云, 朱新运, 张震峰. 2004. 温州珊溪水库 $M_L3.9$ 震群震源参数特征[J]. 地震, **24**(3): 107-114.
Zhong Y Y, Zhu X Y, Zhang Z F. 2004. Source parameter characteristics of $M_L3.9$ earthquake swarm occurred in Shanxi reservoir, Wenzhou, Zhejiang Province[J]. *Earthquake*, **24**(3): 107-114 (in Chinese).

- 朱新运, 钟羽云, 张震峰. 2004. 地震波拐角频率对地震序列的依赖性研究[J]. 西北地震学报, **26**(2): 131–136.
- Zhu X Y, Zhong Y Y, Zhang Z F. 2004. Study on seismic wave corner frequency depending on earthquake sequences[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **26**(2): 131–136 (in Chinese).
- 朱新运, 张帆. 2006. 浙江及邻区尾波 Q 值研究[J]. 西北地震学报, **28**(2): 108–113.
- Zhu X Y, Zhang F. 2006. Research on coda Q value in Zhejiang Province and neighbouring areas[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **28**(2): 108–113 (in Chinese).
- 朱新运, 陈运泰. 2007. 用 Lg 波资料反演场地效应与地震波衰减参数[J]. 地震学报, **29**(6): 569–580.
- Zhu X Y, Chen Y T. 2007. An inversion of site response and Lg attenuation using Lg waveform[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(6): 569–580 (in Chinese).
- 朱新运, 于俊谊. 2008. 基于 MATLAB 的小震震源参数计算软件研制[J]. 西北地震学报, **30**(4): 380–384.
- Zhu X Y, Yu J Y. 2008. The data processing software of source parameters for middle or small earthquakes based on MATLAB[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **30**(4): 380–384 (in Chinese).
- 朱新运, 张帆, 于俊谊. 2010. 浙江珊溪水库地震精细定位及构造研究[J]. 中国地震, **26**(4): 380–390.
- Zhu X Y, Zhang F, Yu J Y. 2010. Study on precise positioning and structure of the Shanxi reservoir earthquake, Zhejiang Province[J]. *Earthquake Research in China*, **26**(4): 380–390 (in Chinese).
- Aaron M, Jorge A, Kojiro I. 2000. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(4): 977–992.
- Aki K. 1980. Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **21**(1): 50–60.
- Bindi D, Spallarossa D, Augliera P, Cattaneo M. 2001. Source parameters estimated from the aftershocks of the 1997 Umbria Marche (Italy) seismic sequence[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **91**(3): 448–455.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **75**(26): 4997–5009.
- Brune J N. 1971. Correction[J]. *J Geophys Res*, **76**(20): 5002.
- Chael E P. 1987. Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **77**(2): 347–365.
- Giampiccolo E, D'Amico S, Patanè D, Gresta S. 2007. Attenuation and source parameters of shallow microearthquakes at Mt. Etna Volcano, Italy[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(1B): 184–197.
- Herrmann R B. 1980. Q estimates using the coda of local earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **70**(2): 447–468.
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **82**: 2981–2987.
- Matsunmni K, Nakamura M. 2004. Seismic attenuation in a nonvolcanic swarm region beneath Wakayama, southwest Japan[J]. *J Geophys Res*, **109**(B9): B09302.
- Rautian T G, Khalturin V I. 1978. The use of the coda for determination of earthquake source spectrum[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **68**(4): 923–948.
- Shi J H, Kim W Y, Paul G R. 1998. The corner frequencies and stress drops of intraplate earthquakes in the northeastern United States[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **88**(2): 531–542.
- Zhu X Y. 2014. An inversion of Lg-wave attenuation and site response from seismic spectral ratios in the eastern China region[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **104**(3): 1389–1399. doi: 10.1785/0120120359.