

广西龙滩库区地震拐角频率时空差异性特征^{*}

陆丽娟, 黄树生, 张帆, 周斌, 阎春恒

(广西壮族自治区地震局, 广西南宁 530022)

摘要: 采用2006年9月~2013年7月广西龙滩数字地震台网记录的1284次 $M_L \geq 1.0$ 地震波形资料, 利用Brune模型, 通过几何扩散校正、介质衰减校正、仪器校正等将速度记录谱归算为震源位移谱方法, 通过遗传算法计算拐角频率及零频极限, 最后计算出地震矩、震源破裂半径等震源参数。对拐角频率特征进行了研究, 结果表明: 广西龙滩水库库区地震拐角频率存在明显的局部差异性, 离坝首较近的坝首地震从地震的拐角频率与地震矩关系不明显; 离坝区越近, 拐角频率与水位变化关系在时间上的一致性更强, 负相关关系也越明显, 同时拐角频率也相对较低。2010年9月18日广西天峨与贵州交界的 $M_L 4.8$ 地震发生在拐角频率上升阶段, 此前1年多拐角频率的变化较为稳定。

关键词: 龙滩水库; Brune模型; 震源参数; 拐角频率

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)03-0352-07

0 引言

拐角频率是震源谱低频和高频趋势线的交点, 反映了震源谱高频和低频成分的比例, 对于研究频谱很有意义, 它主要反映地震波高低频能量的分布特征, 不仅与震源区应力状态有关同时也与发震过程相关。因此, 在研究一个地区的震源参数时, 拐角频率往往成为主要研究的一个基本参数, 如康英等(2005)分析2004年广东阳江 $M_s 4.9$ 地震震源参数时, 得出在拐角频率连续出现正值后的下降过程中发震的结论; 朱新运等(2004)对皎口、海城、陡和、浑源地震波拐角频率研究时, 认为一个地震序列的地震波拐角频率与该地区背景地震拐角频率的比值随地震序列的发展表现出一定的趋势性变化特征, 可用来判断未来地震序列的发展趋势; 张萍等(2006)研究辽宁岫岩5.4级地震前后拐角频率比的变化特征时认为, 在较大地震前, 纵、横波拐角频率比呈现出较明显的下降异常变化等。除此之外, 有诸多学者对水库地震的拐角频率等震源参数进行了深入研究, 得出了水库地震拐角频率的影响因素及水库地震与构造地震拐角频率的特征差异性等。笔者通过对广西龙滩水库区域拐角频率特征进行分析, 试图进一步认识龙滩水库区域的局部差异

性特征等。

龙滩水库位于珠江干流红水河上游的广西天峨县境内, 属于高山峡谷型高坝大库容水库, 是国内在建的仅次于长江三峡水库及金沙江溪洛渡电站的特大型水电工程。自2006年9月蓄水以来, 龙滩水库库区一带中小地震频繁发生, 截至2013年7月, 已记录4482次 $M_L \geq 0.0$ 地震, 其中 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 共11次, $M_L \geq 4.0$ 共3次, 最大为2010年9月18日广西天峨与贵州交界的 $M_L 4.8$ 地震, 极震区烈度达到VI度, 造成严重的经济损失和强烈的社会影响。

1 研究方法

根据Brune(1970)圆盘型地震破裂模式, 震源谱函数的谱形态拟合公式为

$$\Omega(\omega) = \frac{\Omega(0)}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2} \quad (1)$$

式中, ω 为圆频率 ($\omega = 2\pi f$); ω_c 为拐角频率 ($\omega_c = 2\pi f_c$); $\Omega(0)$ 为低频率水平时的位移谱值。

根据地震位移谱的低频部分确定零频谱值 $\Omega(0)$ 和由谱的高低频渐进线的交点确定频谱的拐角频率值 ($f_c = \omega_c/2\pi$)。地震矩 M_0 可表示为

^{*} 收稿日期: 2014-07-01.

基金项目: 桂科攻1298005-2项目和桂科攻12426001项目资助.

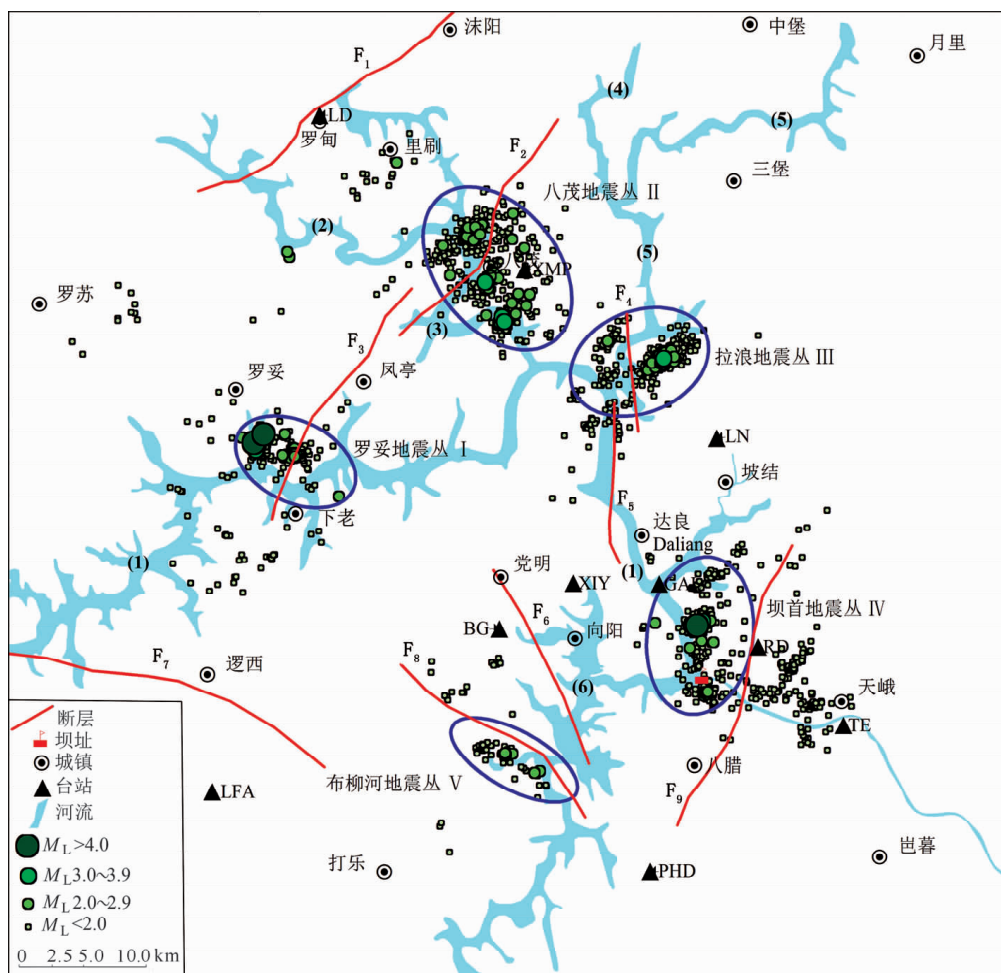
$$M_0 = b \cdot \Omega_0, \quad (2)$$

$$b = 4\pi\beta^3\rho \cdot [R_s(\varphi, \theta) \cdot R_e]^{-1}. \quad (3)$$

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, ρ 表示地壳介质密度, β 表示 S 波速度。本文研究中 S 波速度取 $3.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, ρ 取 $2.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $R_s(\varphi, \theta)$ 取 $\sqrt{2/5}$ 。在测算拐角频率等震源谱参数时, 要对台站记录的地震波资料进行场地响应、仪器响应等校正, 本研究中非弹性衰减 $Q(f) = Q_0 f^{-\mu}$ 及场地响应采用华卫等 (2012) 在研究龙滩库区得出 $Q(f) = 145.5 f^{0.794}$ 、场地响应结果进行校正; 由于地震震级不大, 仪器响应根据波形文件中得到的增益进行校正。

2 资料选取及计算结果

笔者使用了广西龙滩数字地震台网 12 个固定台站的记录波形资料,除天峨台配 CMG-3ESPC 型宽频带地震计(频带宽度为 0.03~40 Hz),其余台以 FSS-3B 地震计为主,数据采集器均采用 EDAS-24L,采样率均为 100 Hz。在精定位的基础上,笔者选用 2006 年 9 月~2013 年 7 月龙滩库区蓄水以来信噪比较高且三分向波形记录完整的 1 284 次 $M_L \geq 1.0$ 中小地震的波形资料(图 1),利用震源谱分析方法,计算震源参数,得出 936 个结果,拐角频率值介于 2.1~18 Hz,地震矩介于 $3.28 \times 10^{10} \sim 7.67 \times 10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。



(1) 红水河; (2) 濛江; (3) 油拉河; (4) 曹渡河; (5) 牛河; (6) 布柳河; F₁: 罗甸—望漠断裂; F₂: 高圩—八茂断裂; F₃: 凤亭—下老断裂; F₄: 马耳—拉浪断裂; F₅: 达恒—达良断裂; F₆: 党明—桂花断裂; F₇: 望漠—逻西断裂; F₈: 长里—八南断裂; F₉: 龙凤—八腊断裂; LD: 罗甸台; XMP: 小苗坡台; LN: 里纳台; XIY: 向阳台; GAL: 杠里台; BG: 八广台; RD: 仁顶台; TE: 天峨台; PHD: 坡阜洞台

图 1 龙滩库区 $M_L \geq 1.0$ 地震震中及台站分布图

Fig. 1 Distribution of epicenters of $M_L \geq 1.0$ earthquakes and seismic stations in Longtan Reservoir

3 拐角频率特征分析

3.1 拐角频率与地震矩的关系

在研究震源参数时,师海阔等(2010),钟羽云等(2004),李发等(2012)对拐角频率与地震矩的关系进行了表述,都得出拐角频率和地震矩

存在明显的依赖关系,即地震矩越大,拐角频率越小,这一规律在龙滩水库区域也是适用的,龙滩库区的拐角频率与地震矩总体上呈明显的负相关关系(图2a)。利用最小二乘法拟合拐角频率与地震矩之间的双对数关系为

$$\lg f_c = -0.13 \lg M_0 + 2.37. \quad (4)$$

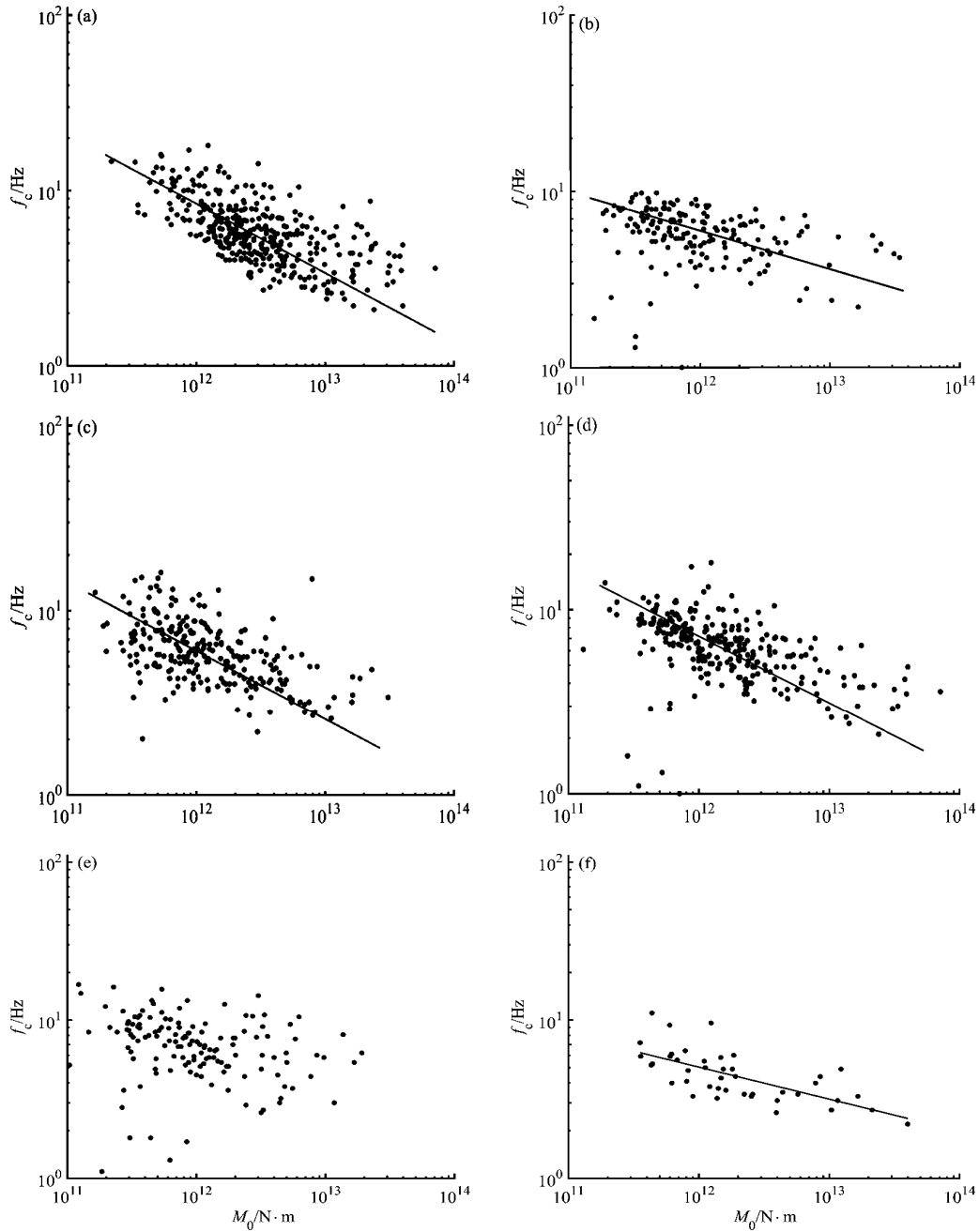


图2 龙滩库区拐角频率与地震矩关系

(a) 整个库区地震; (b) 罗妥地震丛; (c) 八茂地震丛; (d) 拉浪地震丛; (e) 坝首地震丛; (f) 布柳河地震丛

Fig. 2 The relationship between corner frequency and seismic moment in Longtan Reservoir

(a) earthquake in the whole area; (b) Luotuo earthquake cluster; (c) Bamao earthquake cluster; (d) Lalang earthquake cluster; (e) Bashou earthquake cluster; (f) Buliuhe earthquake cluster

陈翰林等(2009)对龙滩水库地震精定位及活动特征研究时发现龙滩库区的地震活动与水库蓄水过程密切相关,成丛分布的地震活动分别表现出对水库蓄水过程不同的响应过程和活动特征,表明龙滩库区在岩性特征、渗透条件、地质构造及应力场等方面存在局部差异性。为进一步掌握龙滩库区局部差异性特征,根据陈翰林等(2009)提出的龙滩库区5个地震丛,即罗妥地震丛、八茂地震丛、拉浪地震丛、坝首地震丛、布柳河地震丛(图1),进一步探讨各个地震丛的拐角频率与地震矩的关系(图2)。从图2b~f可看出,除坝首地震丛外,其他4个地震丛拐角频率与地震矩呈负相关关系。坝首地震丛打破了大多数研究结果中得到的拐角频率与地震大小的负相关关系,这一现象与张永久和乔慧珍(2011)研究结果一致,导致坝首地震丛拐角频率与地震大小的负相关关系不明显的原因是什么呢?刘特培和康英(2004)认为这可能与参与计算的地震震级范围有关;雷建设等(2009)研究认为可能与下地壳流体有关;钱晓东和秦嘉政(2005)分析认为是库区蓄水压力增加、岩体裂隙充水的影响;笔者分析认为应该与天峨主要的八腊断裂与天峨—谷金断裂两条断裂位于坝首地震丛附近有关,且坝首地震丛位于坝首,在库水的作用下,该区域岩体强度相对较弱,较丰富的岩体裂隙长期饱和,对部分频率有效吸收,从而导致拐角频率变化无规律。

3.2 拐角频率随时间的变化

目前在使用地震波频谱方法计算震源参数时,分析震前震源参数的变化,可以显示出发震区的应力状态和孕育过程。拐角频率是一个关键参数,它直接影响震源尺度、位错和应力降的计算结果,也影响到使用低于拐角频率的频谱值计算地震矩,这些震源参数正在被试用于地震预报工作中。它主要反映地震波高低频能量的分布特征,拐角频率不仅与震源区应力状态有关,同时也与发震过程相关。研究表明,拐角频率与震源破裂尺度有密切关系,一般是震源破裂尺度越小,拐角频率越大,这一规律在龙滩库区是成立的;拐角频率随震级的增大而减小,两者之间具有较强的依赖关系,龙滩库区地震拐角频率的对数与震级的拟合关系式为

$$\lg f_c = -0.068 \lg M_L + 0.902. \quad (5)$$

根据给定震级得到拐角频率的估计值与实测拐角频率 f_c 之差随时间的变化曲线绘于图3,从图3看出,在2010年9月18日广西天峨与贵州交界的 $M_L 4.8$ 地震发生前,拐角频率的变化较为稳定,地震发生在拐角频率上升阶段。

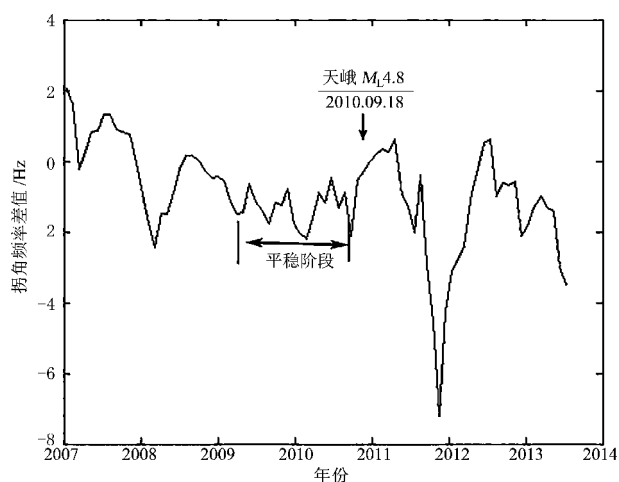


图3 拐角频率差值时序进程曲线

Fig. 3 Time sequence process curve of the corner frequency difference

3.3 拐角频率与水位的变化关系

2006年10月~2013年11月,龙滩水库共经历了7次水位上升过程,上升幅度最大为第1次蓄水,即2006年10月1日~12月13日,库水位从220 m急速上升到320 m,上升幅度达100 m;上升幅度最小为第4次,即2009年6月24日~8月14日,库水位从338 m上升到360 m,上升幅度仅22 m。7次蓄水上升平均值为45 m。

图4为滑动平均后绘制出的拐角频率与水位变化曲线。从图4a来看,龙滩水库区域拐角频率与水位的变化整体上呈明显的负相关关系,即水位上升时,拐角频率下降;水位下降时,拐角频率上升,在时间上有较好的一致性。拐角频率低值主要集中在出现水库水位大幅度上升后,这与张永久和赵翠萍(2009)、张永久和乔慧珍(2011)的研究结果一致。为更具体地掌握拐角频率的局部差异性特征,笔者分析各个地震丛的拐角频率与水位变化的关系。罗妥地震丛拐角频率与水位关系不明显,但在2010年9月18日广西天峨与贵

州交界的 M_L 4.8 地震发生时, 拐角频率有明显的下降趋势 (图 4b); 八茂地震丛拐角频率与水位变化关系无明显规律 (图 4c); 拉浪地震丛拐角频率变化虽有滞后于水位的变化, 但两者呈明显的负相关关系 (图 4d); 坝首地震丛、布柳河地震丛拐角频率变化与水位变化负相关关系不仅明显, 在

时间上也有很强的一致性。综上所述, 龙滩库区地震拐角频率与水位变化关系存在明显的局部差异性, 距坝区远近的不同负相关关系明显程度不同, 变化时间上的一致性也不尽相同; 离坝区越近, 变化时间上的一致性更强, 负相关关系也越明显 (图 4e、f)。

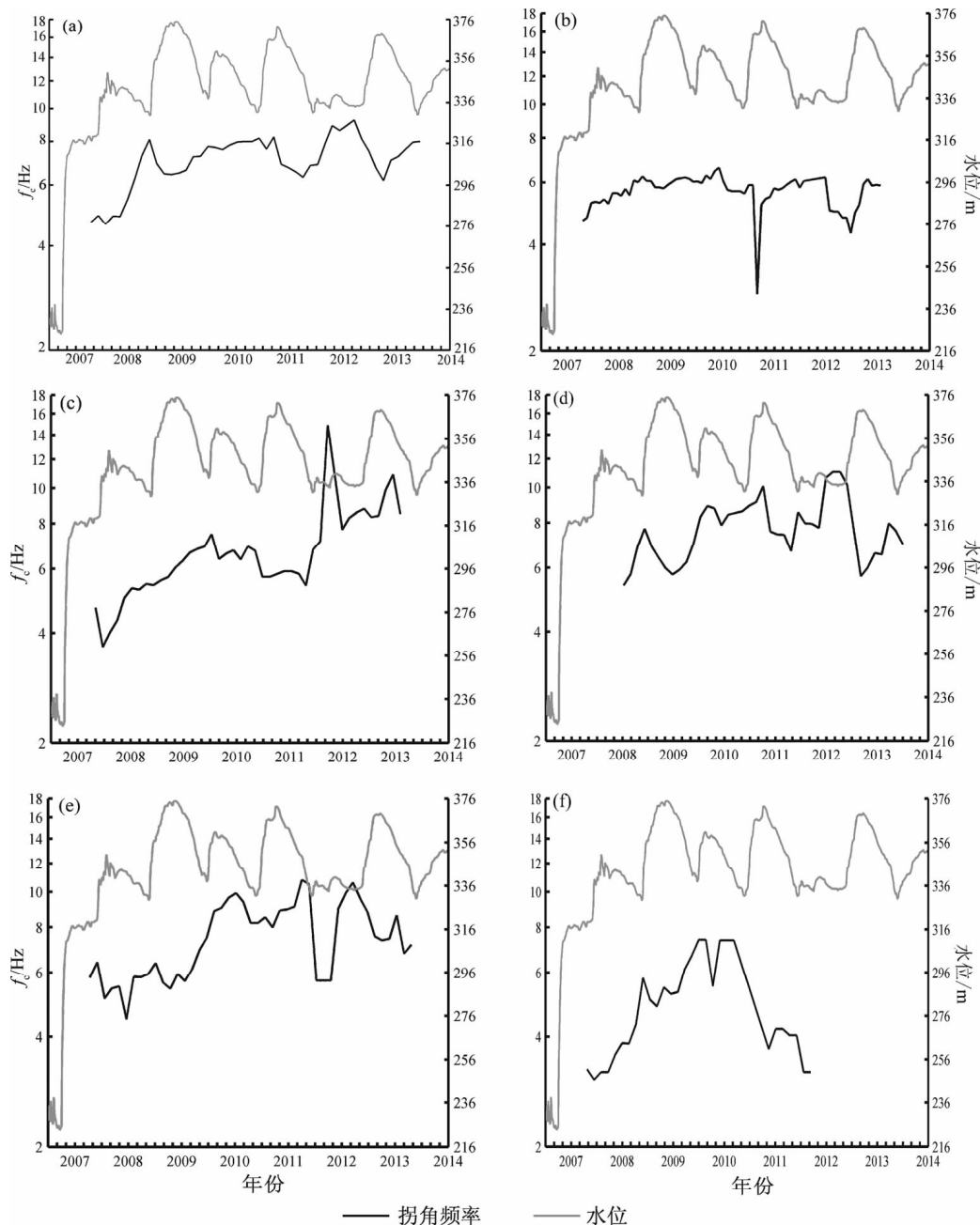


图 4 拐角频率与水位变化关系曲线图

(a) 整个库区地震; (b) 罗妥地震丛; (c) 八茂地震丛; (d) 拉浪地震丛; (e) 坝首地震丛; (f) 布柳河地震丛

Fig. 4 The relationship between corner frequency and water level changes

(a) earthquake in the whole area; (b) Luotuo earthquake cluster; (c) Bamao earthquake cluster; (d) Lalang earthquake cluster; (e) Bashou earthquake cluster; (f) Buliuhe earthquake cluster

4 讨论与结论

(1) 广西龙滩库区地震拐角频率与地震矩关系整体上成负相关关系,即地震矩越大,拐角频率越小,地震矩越小,拐角频率越大。将该区域按顺时针方向分为5个地震丛分别进行分析后,离坝首较近的坝首地震丛地震的拐角频率与地震矩关系不明显。这可能是与离库坝区较近的坝首地震丛地震所在区域在水库蓄水后水体迅速向离坝首较近的 NNE 向八腊断裂及近场区规模最大的天峨—谷金断裂带方向扩散和渗透有关的,由于场地软介质对地震波的高频成分有较强的吸收,对于小地震则会导致拐角频率明显变小。

(2) 广西龙滩库区拐角频率的对数与震级呈线性关系,拟合关系式为 $\lg f_c = -0.068 M_L + 0.902$ 。在扣除震级对拐角频率影响后的结果显示,2010年9月18日广西天峨与贵州交界处发生 $M_L 4.8$ 地震前,拐角频率的变化较为稳定,在拐角频率上升阶段发生了该次地震。

(3) 广西龙滩库区地震拐角频率与水位变化关系存在明显的局部差异性,即距坝区远近的不同负相关关系明显程度不同,变化时间上的一致性也不尽相同。离坝区越近,变化时间上的一致性更强,负相关关系也越明显,同时拐角频率也相对较低,这可能是水库蓄水后裂隙增加、库水渗透和岩石软化强度降低引起的,离库坝越近的区域对水库蓄放水导致的压力变化和库区岩体裂隙充水程度的变化越为敏感。

本文在撰写过程中得到朱新运研究员、史水平高级工程师的帮助,在此向他们表示衷心感谢!

参考文献:

- 陈翰林,赵翠萍,修济刚,等. 2009. 龙滩水库地震精定位及活动特征研究[J]. 地球物理学报,52(8):2036-2043.
- 华卫,陈章立,郑斯华,等. 2012. 水库诱发地震与构造地震震源参数特征差异性研究——以龙滩水库为例[J]. 地球物理学进展,27(3):924-935.
- 康英,杨选,吕金水,等. 2005. 2004年阳江 $M_s 4.9$ 地震震源参数分析[J]. 地震,25(3):109-114.
- 雷建设,赵大鹏,苏金蓉,等. 2009. 龙门山断裂带地壳精细结构与汶川地震发震机理[J]. 地球物理学报,52(2):339-345.
- 李发,李罡风,裴红云. 2012. 安庆 4.8 级地震序列的地震波谱变化研究[J]. 高原地震,24(1):23-27.
- 刘特培,康英. 2004. 广东地区地震波谱和震源参数某些特征及与地震预报的关系[J]. 地震地磁观测与研究,25(6):41-48.
- 钱晓东,秦嘉政. 2005. 澜沧江流域水电工程地区的环境剪应力及震源参数[J]. 地震研究,28(1):64-70.
- 师海阔,朱新运,贺永忠. 2010. 宁夏及邻区地震震源参数研究[J]. 大地测量与地球动力学, (增刊):38-43.
- 张萍,陈忠奇,曹凤娟,等. 2006. 岫岩 5.4 级地震前后拐角频率比的变化特征[J]. 四川地震, (4):19-36.
- 张永久,乔慧珍. 2011. 紫坪铺水库库区震源波谱参数研究[J]. 西北地震学报,33(2):117-122.
- 张永久,赵翠萍. 2009. 紫坪铺水库库区介质衰减、台站响应和震源参数研究[J]. 地震地质,31(4):664-674.
- 钟羽云,朱新运,张震峰. 2004. 温州珊溪水库 $M_L 3.9$ 震群震源参数特征[J]. 地震,24(3):107-114.
- 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.
- Brune J. N. . 1970. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes[J]. JGR,75:4997-5009.

Characteristic of Temporal and Spatial Differences of Corner Frequency of the Earthquake in Longtan Reservoir of Guangxi

LU Li-juan, HUANG Shu-sheng, ZHANG Fan, ZHOU Bin, YAN Chun-heng

(*Earthquake Administration of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, Guangxi, China*)

Abstract

Using the Brune model and the 1 284 $M_L \leq 1.0$ seismic wave data recorded by Guangxi Longtan Digital Seismic Network from Sep. , 2006 to Jul. , 2013, we transferred the velocity recording spectrum into hypocenter displacement spectrum by geometry diffusion correction, dielectric attenuation correction and instrumental correction etc. . Then we calculated the corner frequency and zero frequency limit by using genetic algorithm and obtained the source parameters of seismic moment and rupture radius etc. finally. The analysis result of corner frequency characteristic shows that the corner frequency of the earthquake had obvious local difference in Longtan Reservoir of Guangxi, the relationship between the corner frequency and seismic moment of C4 earthquake that is near the dam head plexus was not obvious. The closer from the dam area, the consistency of change relationship between corner frequency and water level is stronger on the time, the negative correlation is more obvious and the corner frequency is relatively lower. The $M_L 4.8$ earthquake on Sep. 18, 2010 occurred in the rise stage of corner frequency at the junction of Guangxi Tian'e and Guizhou, but the corner frequency was stable before more than 1 year before the earthquake.

Key words: Longtan Reservoir; Brune model; epicenter parameter; corner frequency