第33卷 第2期
2011年6月

西 北 地 震 学 报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 33 No. 2
June, 2011

紫坪铺水库库区震源波谱参数研究

张永久，乔慧珍

（四川省地震局，四川 成都 610041）

摘 要：利用紫坪铺水库数字地震台网和成都区域数字台网中的油榨坪台2004年8月到2008年5月12日汶川大地震前的地震波形资料，采用遗传算法反演计算了紫坪铺库区261次1.6级以上地震的震源波谱参数。结果表明紫坪铺库区中小地震的地震矩 M_0 在 $1.35\times10^{12}\sim5.98\times10^{14}$ N·m之间；应力降随着震级的增加而升高；库区小震震源谱拐角频率与地震矩、震级的依赖关系不明确，这可能与紫坪铺水库蓄水后库区压力增加，且水体沿着龙门山断裂方向扩散和渗透有关。

关键词：紫坪铺水库；震源参数；地震矩；拐角频率；龙门山断裂

中图分类号：P315.31 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－0844(2011)02－0117－06

Study on Seismic Source Parameters in Zipingpu Reservoir Area

ZHANG Yong-jiu, QIAO Hui-Zhen

(*Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu* 610041, *China*)

Abstract: Based on digital seismograms recorded by Zipingpu reservoir digital seismic network and YZP station of Chengdu Digital Tele-seismic Network from August 2004 to May 2008 before Wenchuan M_S8.0 earthquake, the seismic source parameters of 261 earthquakes above M 1.6 are calcalated. The result shows: seismic moments M_0 were $1.35\times10^{12}\sim5.98\times10^{14}$ N·m; the stess drop increased with earthquake magnitude; and the relationship of corner frequency relying on seismic moment and earthquake magnitude was not come into existence in Zipingpu reservoir area. This may have relation with augment of pressure, pervasion and infiltration of water along Longmenshan fault belt after reservoir sluice.

Key words: **Zipingpu reservoir; Seismic source parameter; Seismic moment; Corner frequencey; Longmenshan fault**

0 引言

紫坪铺水库位于都江堰市区西北9 km处的岷江上游，为坝高156 m，总库容 11.12×10^8 m³ 的大型水利工程。紫坪铺库区建有包括7个子台的数字遥测地震台网进行实时监测，同时四川区域台网的油榨坪台也位于库区范围内。自2004年8月紫坪铺水库台网投入试运行以来，除了个别被盗子台一段时间无数据外，记录资料基本完整。

震源参数的计算一般在频率域进行，在对台站记录的地震波资料进行场地响应、仪器响应、几何扩散、路径衰减、震源辐射方向性因子校正之后[1-3]，通过遗传算法[4-6]可以获得低频波谱振幅极限、拐角频率等参数，进而根据一定的理论公式可计算应力降、震源半径、地震矩等。

紫坪铺水库台网从2004年8月17日开始运行到2008年汶川大地震前记录了丰富的中小地震资料。根据姚立珣等[7]的研究认为：水库诱发地震震源区的介质条件变化与一般构造地震不同，与水的作用有密切关系。岩体的扩容、饱和以及浸水弱化对地震波传播速度、破裂速度及破裂尺度有较大影响，而这些也是决定拐角频率等震源参数的主要因

收稿日期：2010-01-18

基金项目：国家科技支撑计划水库地震监测与预测技术研究(2008BAC38B03－02－02)

作者简介：张永久(1970－)，男(汉族)，四川仁寿人，副研究员，主要从事数字地震波资料在地震预测中的应用和综合地震预测研究.

素之一。本文在前期对紫坪铺水库库区介质衰减、台站响应研究和震源参数初步分析[8]的基础上，利用 2008 年 5 月 12 日汶川地震前发生在紫坪铺库区的大量中小地震的波形资料，采用 Brune 模型，计算紫坪铺库区中小地震的震源波谱参数，并进一步讨论震源参数的时空变化特征。

1 地震、台站及资料选取

2008 年 5 月 12 日汶川 8 级地震前紫坪铺水库库坝区地震活动强度不高，自 2004 年水库台网运行以来没有记录到 4 级以上地震。但与省内其他的水库如大桥水库、二滩水库蓄水后的地震活动相比，紫坪铺水库的弱震活动相对活跃[9-10]，尤其是 2005 年 9 月下闸蓄水后分别在 2006 年 10 月和 2008 年 2 月发生的两次震群活动表现特别明显。从紫坪铺水库台网 2004 年 8 月到 2008 年 5 月 11 日记录的库区地震目录分析，库区弱震活动频度受到水库的水位大幅度升降变化的明显影响(图 1)。2005 年 9 月开始下闸蓄水后水位从 9 月 30 日的 760 m 迅速上升到 10 月 10 日的 821 m，在缓慢上升到 12 月 3 日的 835 m 后水位开始下降，地震活动出现逐渐增加的趋势；2006 年 8 月 13 日开始库水位再次出现大幅度上升，到 10 月 7 日累计上升 54 m，此后水位开始下降，结果 10 月 12 日出现了水磨震群，该震群距离汶川 8.0 级地震震中不到 5 km；2007 年 12 月 14 日库水位再次达到高值后开始下降，2008 年 2 月 14 日又在大坝下游 10 km 左右的地方发生了董家山震群。

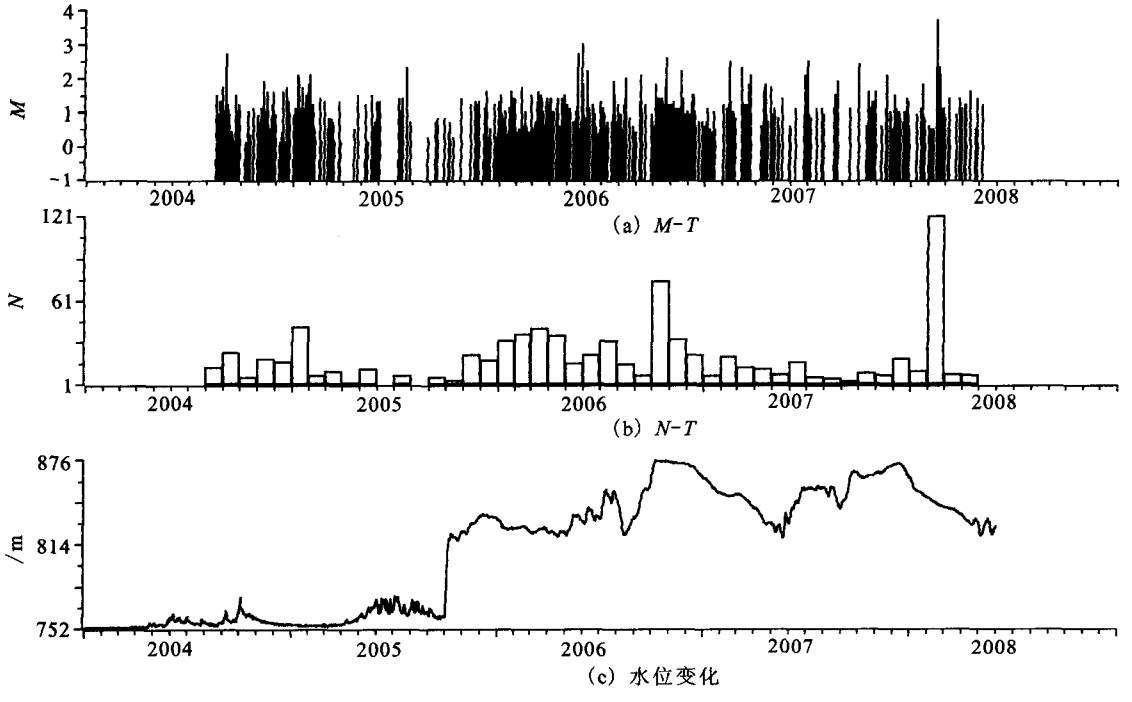


图 1 紫坪铺水库库区地震活动 $M-T$(a)、$N-T$(b)及水位变化(c)

Fig. 1 The seismic activity $M-T$(a), $N-T$(b) and water level variety (c) in Zipingpu reservoir area.

紫坪铺水库台网共有 7 个台站，基本均匀地展布在库区周边，平均台距为 10 km。台站使用 JC-V104 型短周期数字拾震器，配备 EDAS-24L 型 24 位数据采集器；数据采用超短波段的单工数字无线传输与 DDN 公用数据网接力传输、中心统一记录的方式；观测系统的动态范围优于 100 dB，采样率每秒 100 点；采用了 GPS 统一授时和定位系统，数据采集的时间服务精度优于 1 ms。选取区域内 2004 年 8 月 16 日到 2008 年 5 月 11 日发生的 1.6 级以上地震，用双差定位法[11]对其进行重新定位。然后挑选出同时被上述 8 个台站中的 3 个以上清晰记录的 261 次地震用于震源波谱参数的计算(图 2)。

2 震源参数计算方法

地面运动的位移谱可以表示为

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f) \cdot G(R_{ij}) \cdot S_j(f) \cdot e^{-k(f)R_{ij}} \quad (1)$$

式中 $A_{ij}(f)$为第 i 个地震在第 j 个台站的观测谱；$A_{i0}(f)$为第 i 个地震的震源谱；R_{ij}为第 i 个地震到

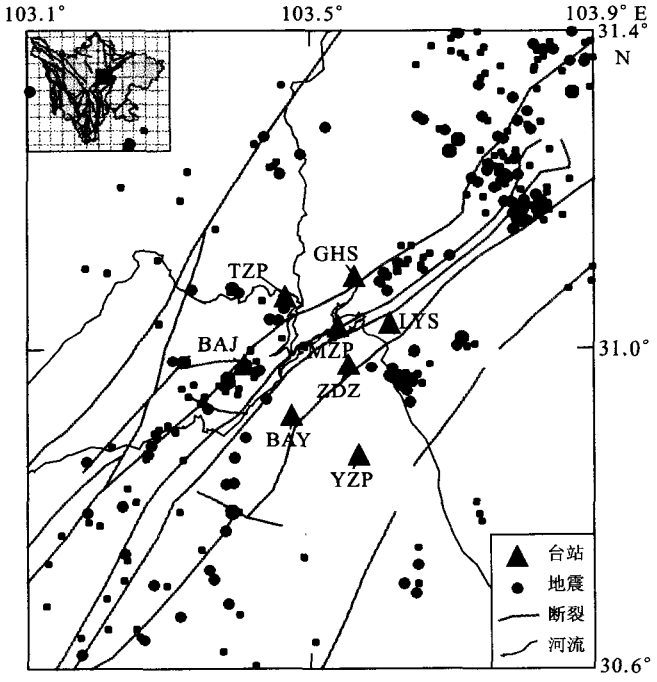


图 2　紫坪铺库区地震及台站分布

Fig. 2　Distribution of earthquakes and seismic stations in Zipingpu reservoir area.

第 j 个台站的震源距；$G(R_{ij})$ 为几何扩散函数；$S_j(f)$ 为第 j 个台站的场地响应；$k(f)$ 为非弹性衰减系数。对于某次地震的某个台站记录，从振幅谱中扣除仪器响应、噪声影响、传播路径影响、场地响应，就可以得到该台站记录的震源位移谱 $A_{0j}(f)$。这样，对于某次地震的每个台站记录都求出震源位移谱 $A_{0j}(f)$，再通过式(2)求平均震源谱来作为该地震的观测震源谱：

$$\overline{A}_0(f) = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} A_0(f)_j \tag{2}$$

根据 Brune(1970) 的 ω^2 模型，理论震源位移谱可以表示为

$$| O_{th}(f) | = \Omega_0 * [1 + (f/f_0)^2]^{-1} \tag{3}$$

式中，$O_{th}(f)$ 表示理论震源谱；Ω_0 表示震源谱低频极限值；f_0 表示拐角频率。把 Ω_0 和 f_0 作为独立变量，根据式(3)，利用遗传算法[4]使观测谱和理论谱具有最小残差，确定力 Ω_0 和 f_0，并利用得到的 Ω_0 和 f_0 求各种震源参数，地震矩

$$M_0 = \frac{4\pi\rho V_S^3 \Omega_0}{R_{\theta\varphi}} \tag{4}$$

这里 ρ 是介质密度，本研究取为 2.8 g/cm^3；V_S 是 S 波速度，本研究取为 3.5 km/s；$R_{\theta\varphi}$ 是辐射花样系数，

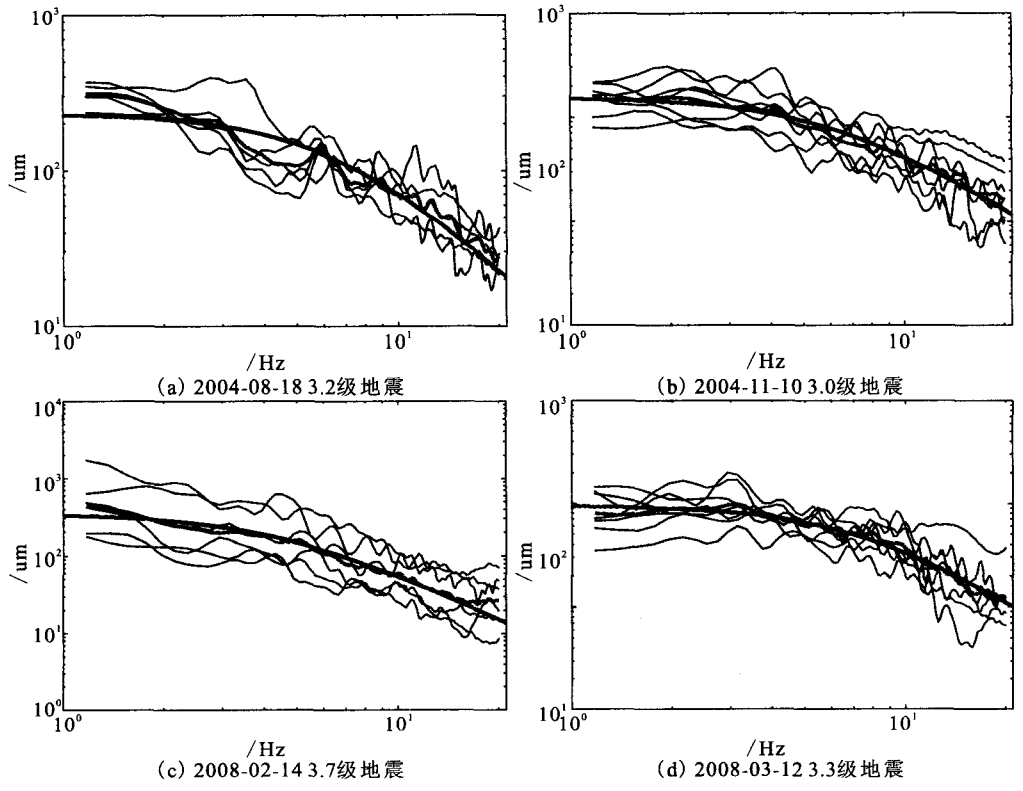


图 3　紫坪铺库区震源波谱实例

Fig. 3　The examples of source spectrum for four earthquakes in Zipingpu reservoir area.

理论上与震源机制相关，但单个小震的震源机制难以确定，也存在误差较大的影响。因而在实际工作中一般 $R_{\theta\varphi}$ 取 $\sqrt{2/5}$。应力降为

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r^3} \tag{5}$$

对于震源尺度，采用圆盘型震源模型（*Brune*，1970）计算震源半径

$$radius = \frac{2.34V_S}{2\pi f_c} \tag{6}$$

3 计算结果及分析

为计算剪切波地面运动的傅立叶谱，首先把台站记录矫正到零基线。将第一个可识别的剪切波到时开始至 S 波能量的 90% 作为 S 波窗，用延迟窗技术[12]获得三分量波形记录稳定的傅立叶谱。扣除仪器响应、噪声影响、传播路径影响、场地响应后，根据上节介绍的方法计算了紫坪铺库区 261 个中小地震的震源波谱参数。图 3 是求震源波谱参数的一些例子，(a)～(d)分别为 2004 年 8 月 18 日 3.2 级地震、2004 年 11 月 10 日 3.0 级地震、2008 年 2 月 14 日 3.7 级地震及 2008 年 3 月 12 日 3.3 级地震的震源波谱。

计算得到紫坪铺库区 261 个中小地震的地震矩 M_0 在 1.35×10^{12}～5.98×10^{14} N·m 之间。地震矩与震级的关系用最小二乘拟合线性回归关系可以表示为

$$\log M_0 = 11.12 + 0.92M_L \tag{7}$$

线性回归的相关系数 $R=0.91$，残差的标准差为 0.69（图 4）。

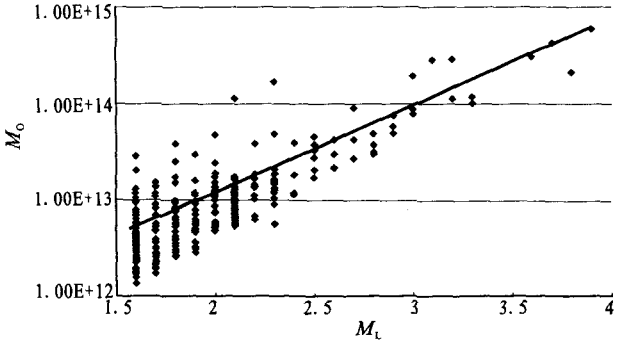


图 4 紫坪铺库区地震矩与震级的关系

Fig. 4 The relationship between seismic moments and magnitudes in Zipingpu resevoir area.

许多研究者在其它地方进行了相关研究，比如：Bakun 得到了美国中加州地区结果[13]，李一正得到了滇西实验场地区结果[14]，秦嘉政得到了昆明地区结果[15]，李立平得到了滇中禄劝地区和澜沧—耿马地区结果[16]，刘学军等得到了姚安地区结果[17]、张永久得到了雅江、马尔康地区的结果[18-19]。这些结果的斜率在 0.8～1.2 之间，截距在 9.91～12.01 之间。紫坪铺库区的研究结果与其他地区的研究结果一致。

紫坪铺库区 261 次地震应力降范围为 0.006 MPa≤$\Delta\sigma$≤32.809 MPa，应力降与震级的关系（图 5）表现为正相关，即应力降随着震级的增加而升高。与作者以前对雅江地区和马尔康地区的研究结果[18-19]比较，紫坪铺库区中小地震的应力降略高于这两个地区同等地震的应力降水平。

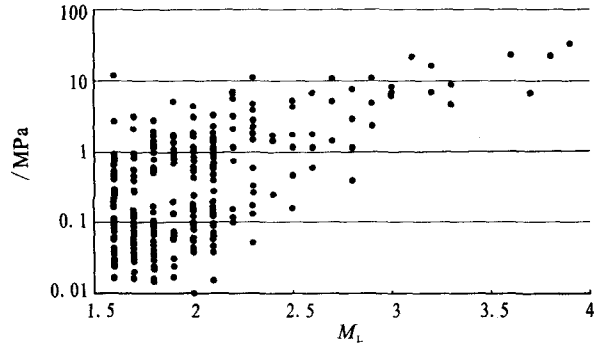


图 5 紫坪铺库区地震应力降与震级的关系

Fig. 5 The relationship between stress drops and magnitudes in Zipingpu reservoir area.

图 6 给出了紫坪铺库区地震拐角频率与震级之间的关系，可以看出震级与拐角频率的关系不明确。以前大多数研究结果中提到的拐角频率与地震大小的负相关关系[17-19]，即地震震级越大，地震矩越大，拐角频率越小这一规律对于紫坪铺库区的地震并不成立。

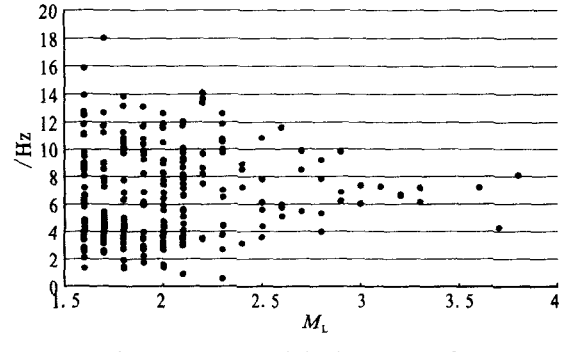


图 6 紫坪铺库区地震拐角频率与震级关系

Fig. 6 The relationship between corner frequencies and magnitudes in Zipingpu reservoir area.

拐角频率的大小与地震大小没有关系，那么是

什么因素在影响拐角频率的变化呢？刘特培等[20]认为这可能与参与计算的地震震级范围有关；姚立珣[7]、钱晓东[21]等分析认为是库区蓄水压力增加、岩体裂隙充水的影响；雷建设等[22]研究认为甚至可能与下地壳流有关。对紫坪铺库区地震拐角频率随时间变化过程分析，拐角频率低值主要集中出现在水库水位大幅度上升后。图 7 是 261 个地震的拐角频率 5 点平滑曲线及紫萍铺水库水位变化曲线，可见在几次水库水位出现大幅度上升一下降变化时地震的拐角频率都有降低的趋势出现，这与我们前期的研究结果是一致的[8]。从拐角频率空间分布分析，震级小拐角频率又相对低的地震主要分布在八角台、桂花树和灵隐寺台附近，而且离龙门山中央断裂很近的地方（图 8）。因此，综合时空分析结果认为，紫坪铺库区地震拐角频率与地震尺度关系出现的这种与一般规律不一致的现象，是紫坪铺水库蓄水后使库区压力增加，并且水体沿着龙门山断裂方向扩散和渗透的结果，与文献[7]和[21]的研究结果比较一致。

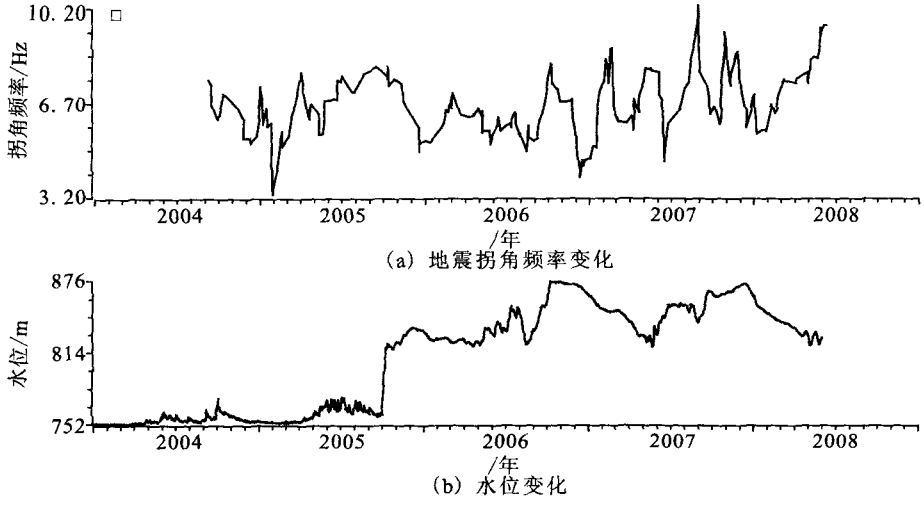


图 7　紫坪铺库区地震拐角频率(a)与水位(b)变化

Fig. 7　The variations of corner frequency and water level in Zipingpu reservoir area.

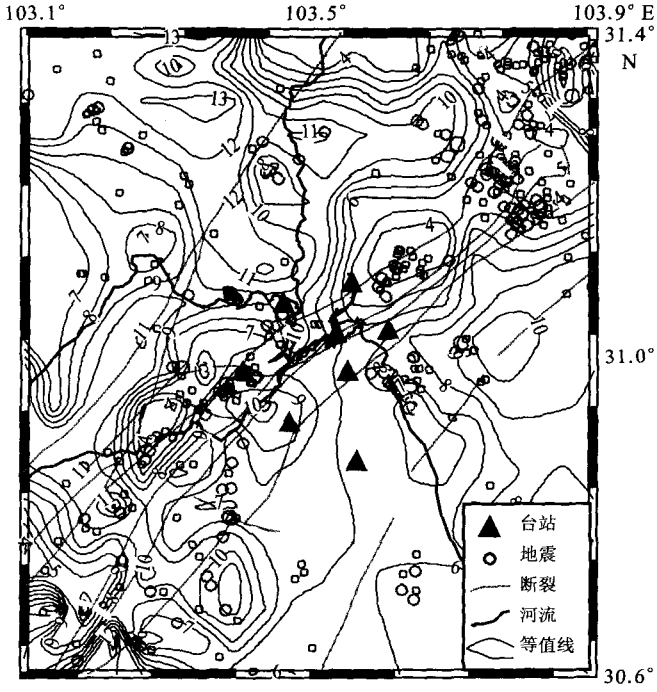


图 8　地震拐角频率空间等值线分布

Fig. 8　The space isolines of corner frequency in Zipingpu reservoir area.

对 2006 年 10 月 12 日水磨震群和 2008 年 2 月 14 日发生的董家山震群的拐角频率参数比较，前者的平均拐角频率比后者的低 3～4 Hz，再根据紫坪铺库区拐角频率总体的时空变化特征，并结合姚立珣等[7]对水库诱发地震的拐角频率特征的研究分析认为，紫坪铺库区 2006 年 10 月 12 日发生的水磨震群应该是水库诱发地震，而 2008 年 2 月 14 日发生的董家山震群是构造地震，该震群的发生可能是汶川地震前区域应力场增强的反应。

4　结论

本研究利用紫坪铺水库数字地震台网及成都数字台网中油榨坪台的波形资料，根据 Brune(1970) 的 ω^2 模型，采用遗传算法计算了紫坪铺水库库区 2004 年 8 月到 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震前的 261 次中小地震震源波谱参数，得到 261 个中小地震的地震矩 M_0 在 1.35×10^{12}～5.98×10^{14} N·m 之间；紫坪铺库区的地震矩与震级的关系与国内外

其他研究人员其他地区的研究结果一致。

紫坪铺库区261次地震应力降范围为0.006 MPa≤$\Delta\sigma$≤32.809 MPa，应力降随着震级的增加而升高，与作者以前对雅江地区和马尔康地区的研究结果比较，紫坪铺库区中小地震的应力降略高于这两个地区同等地震的应力降水平。

以前大多数研究结果中提到的拐角频率与地震大小的负相关关系对于紫坪铺库区的地震并不成立。分析认为，这种现象是紫坪铺水库蓄水后使库区压力增加，并且水体沿着龙门山断裂方向扩散和渗透的结果。紫坪铺库区2006年10月12日发生的水磨震群是水库诱发地震，2008年2月14日发生的董家山震群是构造地震，该震群的发生可能是汶川地震前区域应力场增强的反应。

[参考文献]

[1] Atkinson G M, R F Mereu. The shape of ground motion attenuation curves in Southeastern Canada[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1992, 82(5):2014-2031.

[2] Moya A, Jorge A. Inverson of source parameters and site effects from strong ground motion record using genetic algorithms[J]. Bull. Seism. Soc. Amer.,2000,90(4):977-992.

[3] Bindi D, Spallarossa D, Augliera P, et al.. Source parameters estimated from the aftershock of the 1997 Umbria Marche(Italy) seismic sequence[J]. Bull. Seis. Soc. Amer.,2001,91(3):448-455.

[4] 刘杰，郑斯华，黄玉龙. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应[J]. 地震学报，2003，25(2)：211-218.

[5] 郭晓，张元生，苹海亮，等. 祁连山中东段地区非弹性衰减系数、震源参数和场地响应研究[J]. 西北地震学报，2007，29(4)：319-325.

[6] 朱新运，于俊谊. 基于MATLAB的小震震源参数计算软件研制[J]. 西北地震学报，2008，30(4)：380-384.

[7] 姚立珣，钟羽云，张震峰，等. 岩体裂隙充水后对拐角频率的影响[J]. 西北地震学报，2004，26(4)：315-321.

[8] 张永久，赵翠萍. 紫萍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，2009，31(4)：664-674.

[9] 胡先明，谢蓉华. 紫坪铺水库地震台网记录地震的复杂性[J]. 四川地震，2006，(2)：17-20.

[10] 胡先明. 紫坪铺水库蓄水前天然地震活动[J]. 四川地震，2007，(2)：16-21.

[11] Waldhauser F, Ellsworth W L. A double diference earthquake location algorithm: Method an d application to the Northern Haiward Fault, Califomia[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 2000, 90(6):1353-1368.

[12] Chael, et al.. Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1987,77:347-365.

[13] Bakun W H. Seismic moments, local magnitudes, and coda-duration for earthquake in central Califonia[J]. Bull. Seis. Sco. Am.,1984, 74(2):439-458.

[14] 李一正. 滇西地区震级与地震矩标度[J]. 地震研究，1985，8(6)：617-632.

[15] 秦嘉政. 用近震尾波估算昆明及其周围地区的Q值和地震矩[J]. 地球物理学报，1986，29(2)：145-156.

[16] 李立平. 澜沧—耿马地震震源动力学参数研究[J]. 地震研究，1990，13(3)：223-232.

[17] 刘学军，叶建庆，蔡绍平，等. 姚安地震序列的震源参数研究[J]. 地震研究，2002，25(3)：240-245.

[18] 张永久，程万正. 用S波研究雅江地震序列震源波谱[J]. 中国地震，2003，19(4)：340-350.

[19] 张永久，彭立国，程万正. 马尔康地震序列震源参数研究[J]. 中国地震，2006，22(1)：85-91.

[20] 刘特培，康英. 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，2004，25(6)：41-48.

[21] 钱晓东，秦嘉政. 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，2005，28(1)：64-70.

[22] 雷建设，赵大鹏，苏金蓉，等. 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，2009，52(2)：339-345.