

小湾水库近场区地震震源参数初步研究*

邬成栋, 付 虹, 赵小艳

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 利用小湾电站水库诱发地震监测台网 11 个子台自 2005 年 5 月 21 日开始观测至 2006 年 9 月所记录的数字波形资料, 在已知非弹性衰减系数和场地响应的条件下, 用遗传算法反演了小湾水库近场 328 个中小地震的地震矩、应力降和拐角频率等震源参数, 并对近场区及库区地震震源参数之间的关系进行了初步讨论。结果表明, 小湾库区应力水平明显低于其周边区域。

关键词: 震源参数; 拐角频率; 小湾水库

中图分类号: P315.3⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2010)01-0050-05

0 引言

水库诱发地震是一个比较复杂的问题, 是地震科学研究中的新课题, 目前国际上还处于初步研究阶段, 尚不能十分准确地对其预测、预报。近年来随着数字地震观测技术的发展, 利用数字化地震波形资料提取震源参数得以实现, 从而为水库地震的监测和预测提供了一条新的技术途径。2002 年 7 月 29 日浙江温州珊溪水库发生水库诱发地震。对该地震序列震源参数的处理结果显示, 序列中的地震拐角频率明显低于同震级的构造地震的拐角频率, 这可能是水库诱发地震不同于构造地震的一个特点(钟羽云等, 2004)。水库诱发地震的重要原因之一是水沿着断裂带下渗, 使介质强度降低和非均匀性程度变大。这一方面会使岩石破裂错动的慢度变大, 另一方面会使岩石错动辐射的地震波的高频成分减少, 从而使拐角频率变小, 震源破裂半径偏大。通过对震源参数的研究, 我们可以期望分辨水库诱发地震并监测其发展趋势。

随着小湾水库数字化地震监测台网建设完成, 利用其提供的大量数字化波形资料, 提取地震的震源参数, 如地震矩、应力降、拐角频率等, 从而更好地为水库地震预测预警服务, 已经成为一项亟待开展的工作。尽管小湾水库还未建设完成, 现在还未记录到水库地震, 但通过对库区天然地震震源参数的反演, 有助于我们更深刻地从物理学成因及地震机理方面了解和分析地震过程。

笔者利用小湾电站水库诱发地震监测台网自 2005 年 5 月至 2006 年 9 月期间的数字地震记录, 反演计算了小湾水库近场区中小地震震源参数, 并初步研究了震源参数间的相互关系, 力求通过计算找到水库蓄水前天然地震的本底特征, 从而为水库地震预测服务。

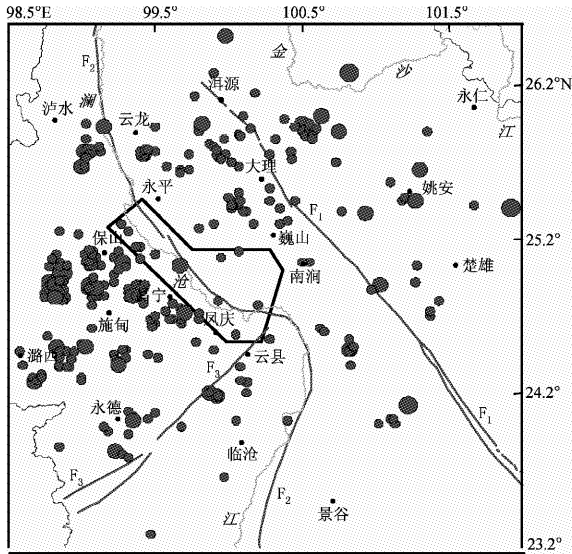
1 数据及预处理

为了监测水库地震的发生, 小湾电站水库诱发地震监测台网于 2005 年 5 月建成并投入观测。台网由 11 个子台组成, 每个子台均安装了数字化三分向数据采集器, 采样频率 100 Hz。表 1 列出了各个子台的基本参数。

表 1 小湾台网台站主要参数				
Tab. 1 Station parameters of Xiaowan seismic network				
台号	代码	台名	高程/m	地震计型号
1	JCC	蕨菜村台	2 232	FSS-3B
2	MJT	马街台	1 863	FSS-3B
3	DST	大寺台	1 798	FSS-3B
4	YJT	腰街台	1 985	FSS-3B
5	YXT	永新台	1 369	FSS-3B
6	XHT	新华台	2 482	FSS-3B
7	BXT	碧溪台	2 217	FSS-3B
8	CHN	昌宁台	1 719	FBS-3
9	GJT	耆街台	1 869	FSS-3B
10	NJT	牛街台	2 393	FSS-3B
11	QHT	青华台	2 316	FBS-3

* 收稿日期: 2009-06-10.
基金项目: 云南省科技攻关项目“复杂构造区水库地震监测预警研究”(2006SG01)项目资助。

小湾台网自 2005 年 5 月至 2006 年 9 月共记录到 486 个 2 级以上地震。地震大多发生在水库近场区域内,但发生在库区内的地震较少,仅有 12 个,地震分布如图 1 所示。在对地震波谱资料进行处理的过程中,对每一条地震记录,我们从第一个可识别的 S 震相开始至 90% 的 S 波能量被包括来截取“S 窗”,并采用平移窗谱方法 (Chael, 1987) 获得稳定的观测信号的傅立叶谱。将 S 窗内的波形分成若干个包含有 256 个采样点的小段,使相邻小段之间有 50% 重叠,在每小段波形的起始和末尾加上 5% 的 cosine 边瓣,通过快速傅立叶变换得到每一小段的傅立叶谱,并对其进行仪器响应校正和噪声校正,最后在频率域内合成得到 S 波的总的谱振幅。取 P 波初动前 256 个采样点的记录作为噪声记录,计算出与观测信号持续时间相同的噪声位移振幅,然后对观测信号扣除噪声。之后,按照信噪比大于 2 倍为标准选择可以使用的波形记录,最终确定小湾水库附近区域 328 个 2 级以上地震用于计算。实际使用的资料的震级范围为 2.0 ~ 4.9 级。



F₁: 红河断裂; F₂: 澜沧江断裂; F₃: 南汀河断裂

图 1 研究用地震震中分布与库区位置图

Fig. 1 Distribution of earthquake used to calculate and location of reservoir region

2 计算原理与方法

任一台站观测到的地震地面运动的傅立叶谱可以表示为

$$A_{ij}(f) = A_{i0}(f) \cdot G(R_{ij}) \cdot S_j(f) \cdot I_j(f) \cdot e^{-\frac{\pi R_{ij}}{Q(f)\beta}} \quad (1)$$

式中, $A_{ij}(f)$ 是在第 j 个台观测到的第 i 个地震的傅立叶谱振幅, $A_{i0}(f)$ 为第 i 个地震的震源谱振幅, R_{ij} 为震源距, $G(R_{ij})$ 为几何衰减函数, $S_j(f)$ 为第 j 个台站的场地响应项, $I_j(f)$ 为第 j 个台站的仪器响应项, $Q(f)$ 为频率依赖的品质因子, β 为地震波速度。

要想得到震源参数, 必须设法区分地震记录中的震源效应、传播路径、场地响应及仪器响应成份。对于几何衰减我们采用了三段几何衰减模型 (Atkinson, Meren, 1992; 黄玉龙等, 2003)

$$G(R) = \begin{cases} R^{-b_1} & R \geq R_{01}, \\ R_{01}^{-b_1} \cdot R_{01}^{b_2} \cdot R^{-b_2} & R_{01} < R \leq R_{02}, \\ R_{01}^{-b_1} \cdot R_{01}^{b_2} \cdot R_{02}^{-b_2} \cdot R_{02}^{b_3} \cdot R^{-b_3} & R > R_{02}. \end{cases} \quad (2)$$

为了约束解的收敛和稳定, 本研究中取定参数 $R_{01} = 60 \text{ km}$, $R_{02} = 100 \text{ km}$, $b_1 = 1.0$, $b_2 = 0.0$, $b_3 = 0.5$ 。在考虑非弹性衰减及场地响应时, 我们采用小湾台网的计算结果 (邬成栋等, 2007)。小湾水库附近区域 Q 值与频率的关系是 $Q(f) = 225.8f^{0.332}$ 。

这样对台站记录扣除传播路径、场地响应及仪器响应的影响, 对某个地震, 就可以得到第 j 个台站所记录的该地震的震源位移谱 $[A_0(f)]_j$, 再对台站得到的震源谱求平均值, 即是该地震的震源谱

$$\bar{A}_0(f) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [A_0(f)]_j \quad (3)$$

式中, N 为该地震的波形记录数。

采用频率的二次方衰减的 Brune 模型作为理论震源谱, 不同频率上的震源位移谱就可表示为

$$A_{\text{theo}}(f) = \frac{\Omega_0}{1 + (f/f_c)^2} \quad (4)$$

式中, Ω_0 表示零频幅值, f_c 表示拐角频率。笔者采用遗传算法求解每个地震的这两个参数, 计算方法是使理论震源谱和平均震源谱的残差为极小:

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^p \frac{[A_{\text{theo}}(f_k) - \bar{A}_0(f_k)]^2}{[A_{\text{theo}}(f_k) \bar{A}_0(f_k)]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

其中 p 表示频率点个数。图 2 给出了 1 个地震的震源谱和拟合的理论震源谱。图中蓝线为由单个台

站记录得到的震源谱。绿线为各台震源谱的平均值，红线为拟合的理论震源谱，由图可见理论震源谱拟合效果较好。

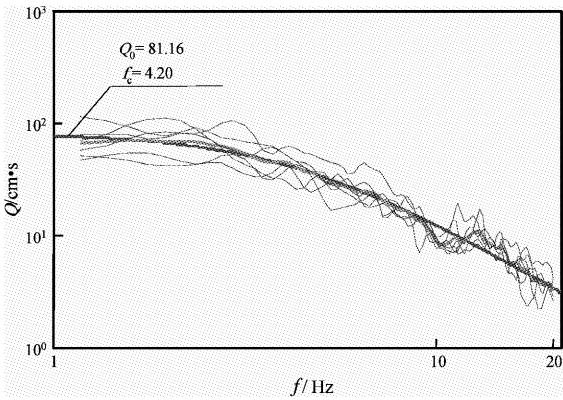


图2 2005年5月26日 M_L 3.9地震的震源谱和拟合的理论震源谱示意
Fig. 2 Illustration of source spectra of earthquake on May 26, 2005 and theoretic source spectra

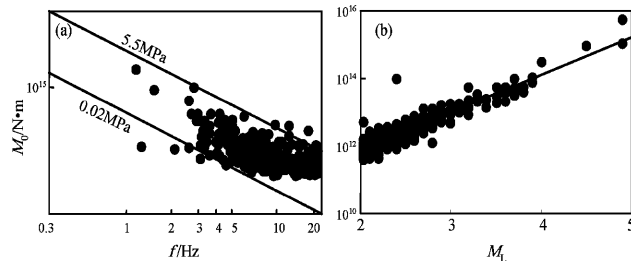
根据得到的震源谱参数求各种震源参数 (Brune, 1970)，地震矩

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v_s^3 \Omega_0}{R_{\theta\varphi}} \tag{6}$$

式中， ρ 是密度，本研究取为 2.9 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。由于我们没有每个地震的断层面解，所以令 $R_{\theta\varphi}$ 为一常数。取 SH 波在全震源球上的平均值为 $\sqrt{2/5}$ 。应力降

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

对于震源尺度，采用圆盘型震源模型，计算震源半径



$$r = \frac{2.34v_s}{2\pi f_c} \tag{8}$$

3 计算结果

我们采用小湾水库地震监测台网的数字化波形记录，用上述方法进行反演，得到 328 个地震的震源参数：地震矩 M_0 、拐角频率 f_c 、应力降 $\Delta\sigma$ 、震源半径 r 。小湾水库近场区地震的地震矩变化范围为 $3.956 \times 10^{11} \sim 5.426 \times 10^{15} \text{ N} \cdot \text{m}$ ，平均为 $2.959 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{m}$ ；拐角频率变化范围为 $1 \sim 20 \text{ Hz}$ ，平均为 9.9 Hz ；应力降变化范围为 $0.002 \sim 18.367 \text{ MPa}$ ，平均为 0.77 MPa 。叶建庆等 (2007) 计算了红河断裂带两侧地块的地震震源参数，得到地震矩变化范围为 $10^{13} \sim 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。应力降的测算结果显示，华南块体西缘的云南及越南北部地区的年均值为 7.29 MPa ，滇西南块体为 4.48 MPa 。与上述结果比较小湾近场区地震矩及应力降明显偏低，表明在我们所研究的时间段内小湾水库近场区应力水平相对较低。钱晓东和秦袁政 (2005) 计算了澜沧江流域水电工程地区的环境剪应力，认为小湾水库附近区域属于低应力地区，这与我们的结果一致。

图 3a 给出了地震矩与拐角频率的关系。两者虽然不是线性关系，但相关性还是明显的——拐角频率越大，地震矩越小。图 3b 给出了地震矩和震级的相关关系。很明显，震级越大，地震矩也越大，二者最小二乘最佳拟合的直线是

$$\log M_0 = 1.11 M_L + 9.65 \tag{9}$$

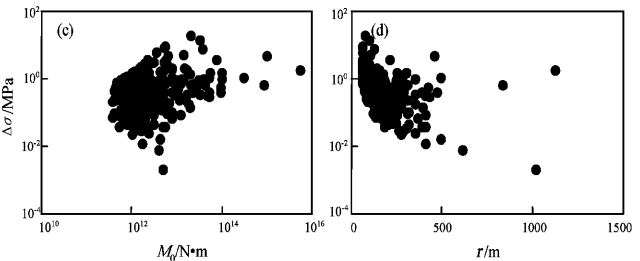


图3 震源参数间的相互关系
(a) 地震矩与拐角频率的关系；(b) 地震矩与震级的关系；(c) 压力降与地震矩的关系；(d) 压力降与震源半径的关系
Fig. 3 Relation between the source parameters
(a) relation between M_0 and f_c ；(b) relation between M_0 and M ；
(c) relation between $\Delta\sigma$ and M_0 ；(d) relation between $\Delta\sigma$ and r

图 3c 给出了应力降和地震矩的关系。从图中可以看出，地震矩在 $1.5849 \times 10^{11} \sim 1.0000 \times 10^{14}$ $\text{N} \cdot \text{m}$ 范围内，应力降有随着地震矩增大而增加的趋势，而地震矩超出的部分应力降变化范围小，随地震矩变化不明显。图 3d 给出了应力降与震源半径的关系。从图中可看出，二者似乎没有明显

的相关性。

我们取澜沧江及黑惠江两侧约 15 km 的范围作为小湾水库区（图 1 中黑色多边形区域），在我们所研究的时间段内，库区仅发生 12 次 2 级以上地震，最大震级为 3.2。表 2 给出了这 12 次地震的震源参数。

表 2 小湾水库库区地震震源参数

Tab. 2 Source parameters of the earthquakes occurred in reservoir region

序号	发震时间	震中位置		震级 M_L	$M_0 / \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}$	f_c / Hz	$\Delta\sigma / \text{MPa}$	R / m
	年-月-日	$\lambda_E / (^\circ)$	$\varphi_N / (^\circ)$					
1	2005-05-23	25.10	99.50	2.0	24.397	11.5	0.738	113.1
2	2005-06-07	25.12	100.07	2.1	7.792	15.3	0.551	85.2
3	2005-06-13	25.08	99.95	2.5	50.503	3.3	0.037	390.1
4	2005-11-09	24.80	99.93	2.5	35.132	6.0	0.147	218.6
5	2006-02-24	24.72	99.80	2.2	32.435	5.0	0.080	261.2
6	2006-03-13	24.77	100.20	2.3	20.955	10.4	0.471	124.9
7	2006-05-25	24.58	100.05	2.5	13.760	14.8	0.875	88.3
8	2006-07-18	25.15	99.40	2.1	19.510	5.6	0.067	234.0
9	2006-08-01	25.03	99.67	3.2	79.831	10.4	1.788	125.0
10	2006-08-26	25.25	99.32	2.3	10.588	13.3	0.490	98.1
11	2006-08-28	25.30	99.27	2.5	16.611	10.8	0.415	120.5
12	2006-09-19	25.15	99.37	2.0	6.266	8.2	0.069	158.7

由表 2 可以进一步得出，小湾水库库区地震矩平均值为 $2.6482 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{m}$ ，比近场区平均值要低 1 个量级；应力降平均为 0.47 MPa，也比近场区平均值要低很多。应力降为地震时断层面上所释放的应力，是一个与地震活动、震源介质、区域构造应力水平密切相关的参数。尽管应力降与因应力量值的关系比较复杂，但在某些条件下人们已可以由应力降估算出应力值，如万永革等（2006）给出用走滑地震应力降估算应力量值的方法，并发现应力降与应力量值有正比关系。多数研究也认为应力降与应力可能存在正比关系。库区地震的地震矩与应力降均明显偏小说明库区应力水平要明显偏低，这与库区发生的最大地震仅

为 3.2 级地震也是相符合的。钟羽云等（2004）指出水库地震的拐角频率可能明显低于同震级的构造地震的拐角频率。小湾库区地震拐角频率平均为 9.5 Hz，与近场区平均值非常接近，表明我们所研究的时段内没有水库诱发地震发生，库区所发生的地震与近场区一样，都是构造地震。这与水库还未蓄水的情况也是相符合的。图 4 给出了库区地震震源参数的相互关系。从图中可以看出，震源参数的变化与近场区具有相似的特征，所不同的是库区地震矩和震级线性关系的斜率要小一些，二者最小二乘最佳拟合的直线是

$$\log M_0 = 0.73 M_L + 10.54 . \tag{10}$$

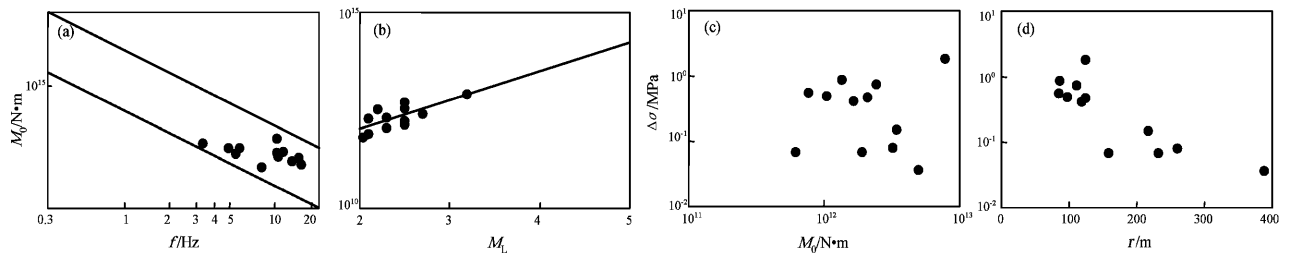


图 4 库区震源参数间的相互关系

(a) 地震矩与拐角频率的关系；(b) 地震矩与震级的关系；(c) 压力降与地震矩的关系；(d) 压力降与震源半径的关系

Fig. 4 Relation between the source parameters in reservoir region

(a) relation between M_0 and f_c ; (b) relation between M_0 and M ;

(c) relation between $\Delta\sigma$ and M_0 ; (d) relation between $\Delta\sigma$ and r

4 结论和讨论

通过对小湾水库近场 328 个中小地震震源参数的反演,我们得到了地震矩和拐角频率、震级的相关关系,其中地震矩和震级的线性关系是比较明显的。陈培善等(2002)曾利用美国加州地震记录资料,并结合地震定标律,总结出 $M_L \leq 3.6$ 时地震矩和震级线性关系的斜率为 1。我们对 328 个中小地震进行了反演,得到线性关系斜率稍大于 1。另外,在地震矩小于 $10^{14} \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,应力降和地震矩也有某种正比趋势,而超出此范围后,应力降变化不明显。夏爱国等(2006)在研究新疆天山中东段地区震源参数时总结出:当 $M_L \leq 4.5$ 时,应力降变化较大,随地震矩有某种增大趋势,而当 $M_L \geq 4.5$ 时,应力降变化不明显,有趋平趋势。在世界许多地方人们都发现应力降随着震级变化会呈现出不同的尺度关系。目前多数专家认为这反映出大于某一震级后的地震可能不存在优势的地震破裂尺度,一方面也可能反映出小地震与大地震在震源机制、破裂过程等方面有着本质的区别。本文结果与其有相似之处。通过反演得到的拐角频率在 $1 \sim 20 \text{ Hz}$ 之间,总体上遵循震级越小,拐角频率越高的特点。但有些地震的结果明显偏高,原因可能是对于 $M_L \leq 3.0$ 的小震来说,波形比较容易受干扰,在进行快速傅立叶变换时,震源谱和噪声谱差值小而误差大。可见要得到精确的震源参数的确不容易。

从库区地震震源参数分析结果来看,库区地震的拐角频率并没有出现明显偏小的现象,表明在我们的研究时段内库区发生的地震均为构造地

震,地震矩与应力降明显低于近场区范围平均值的现象则说明库区的应力水平明显低于其周边区域。

对震源参数的研究,有助于我们更深刻地从物理学成因及地震机理方面了解和分析地震过程,这对提高地震预测预报的水平有积极作用。小湾水库还未建设完成,现在还未记录到水库地震,我们通过对这些天然地震震源参数的反演,可以得到库区天然地震震源参数的背景值,从而为将来的水库地震预测服务。

参考文献:

- 陈培善,白彤霞,李保昆. 2002. 中国与美国西部平均构造剪应力值的比较[J]. 地震学报,24(5):479-486.
- 黄玉龙,郑斯华,刘杰,等. 2003. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报,46(1):54-61.
- 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.
- 万永革,沈正康,兰从欣. 2006. 根据走滑大地震前后应力轴偏转和应力降求取偏应力量值的研究[J]. 地球物理学报,49(3):838-844.
- 郭成栋,付虹,汤曙恩. 2007. 小湾水库近区地震波非弹性衰减和场地响应研究[J]. 中国地震,23(3):259-266.
- 夏爱国,赵翠萍. 2006. 天山中东段地区震源参数的初步应用研究[J]. 内陆地震,20(3):245-251.
- 叶建庆,张建国,杨晶琼,等. 2007. 红河断裂带两侧地块地震震源参数研究[J]. 地震研究,30(3):241-247.
- 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.
- Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. BSSA,82:2014-2031.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake[J]. JGR,75(26):4997-5009.
- Chael E. 1987. Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick[J]. BSSA,77(2):347-365.

Primary Study on Source Parameters near Xiaowan Reservoir

WU Cheng-dong, FU Hong, ZHAO Xiao-yan

(Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

On the basis of digital seismograms recorded at 11 stations of Xiaowan Reservoir Induced Earthquake Monitoring Network from 21 May, 2005 to September 2006, we inverted source parameters near Xiaowan reservoir using genetic algorithm by the help of the known non-elasticity attenuation and site response and got source parameters such as seismic moment, stress drop and corner frequency of 328 earthquakes. We discussed the relation of source parameters in Xiaowan reservoir and its vicinity. The study shows that the stress level in Xiaowan reservoir region is clearly lower than that in the region near Xiaowan reservoir.

Key words: source parameters; corner frequency; Xiaowan reservoir