

澜沧江流域小湾、糯扎渡水库地震台网 震级完备性初探*

曹 颖, 徐 彦, 叶建庆, 李丹宁

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 利用 b 值稳定性方法计算了云南省澜沧江流域上的小湾和糯扎渡水库台网地震目录的最小完整性震级 M_c , 并对其实际监控能力进行了分析。结果表明, 随着台网的建设, 小湾水库台网的监控能力呈微弱下降, M_c 由一期台站运行时的 $M_L 1.6$ 变为一、二期台站运行时的 $M_L 1.7$, 表明台网的运行情况影响了其监控能力; 糯扎渡水库台网的监控能力有了显著的提高, M_c 由一期台站运行阶段的 $M_L 1.3$ 变为一、二期台站合并运行后的 $M_L 0.8$ 。

关键词: 最小完整性震级; 地震目录; 监控能力; 小湾水库台网; 糯扎渡水库台网

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)03-0406-06

0 引言

区域地震台网监测能力的科学评估是台网进一步优化布局的基础, 也是利用地震观测数据进行地震活动和地震危险性分析的前提。地震目录的最小完整性震级 M_c 是表征地震台网监测能力的重要参数, 其定义为覆盖时空范围内 100% 的地震事件可被监测到的最低震级 (Rydelek, Sacks, 1989; Wiemer, Wyss, 2000)。对 M_c 的科学评估是大多数地震活动和地震危险性分析中最关键的步骤之一。常用的估计区域 M_c 的方法有两类, 一类是假定震级不小于 M_c 的地震在震级-频度分布上满足 $G-R$ 关系 (Gutenberg, Richter, 1944), 并认为这些地震的记录是完整的 (Wiemer, Wyss, 2000, 2005; Cao, Gao, 2002), 震级-频度最佳满足 $G-R$ 关系时所对应的最小起始震级即为 M_c 。另一类是基于概率的完整性震级方法 (probability-based magnitude of completeness, 简称为 PMC) (Schorlemer, Woessner, 2008)。由于 PMC 方法对观测资料、台站布设历史、采用的震级-距离衰减关系等要求较高, 操作上具有一定难度, 因此本文采用基于 $G-R$ 关系的统计地震学方法进行研究。基于 $G-R$ 关系计算 M_c 的方法主要包括 EMR 方法 (Wiemer, Wyss, 2005)、MAXC 方法 (Wi-

emer, Wyss, 2000)、 b 值稳定性方法 (M_c by b -value stability, 简称为 MBS) (Cao, Gao, 2002) 及拟合度分别为 90% 和 95% 的 GFT 方法 (Wiemer, Wyss, 2000) 等。Wiemer 和 Wyss (2000) 利用拟合度分别为 90% 和 95% 的 GFT 方法研究了阿拉斯加、美国西部、日本地区的地震目录的最小完整性震级的空间分布, 冯建刚等 (2012) 分别利用 EMR、MAXC 及 GFT 方法研究了甘肃地区地震目录最小完整性震级的时空分布特征, 刘丽芳等 (2012) 采用 MAXC 方法和拟合度分别为 90% 和 95% 的 GFT 方法研究了云南地震区的 M_c 时间演化。本文采用了 b 值稳定性方法分别计算分析了澜沧江流域上的两个水库台网, 即小湾水库台网和糯扎渡水库台网的地震目录的最小完整性震级 M_c 。

澜沧江纵贯滇西南, 境外段为湄公河。澜沧江-湄公河长 4 880 km, 流经中国、缅甸、越南、泰国、老挝、柬埔寨 6 国, 属亚洲第一国际大河、世界第三国际大河, 它的水利资源开发与利用倍受沿岸各国关注。目前我国沿澜沧江规划了 15 个梯级电站, 云南省地震局对澜沧江流域上进行地震监测的有小湾水库、糯扎渡水库、漫湾水库以及景洪水库。小湾电站水库是澜沧江龙头水库, 坝高 292 m, 水库总库容为 $149.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, 主库长 178 km, 于 2008 年开始蓄水。糯扎渡电站水库设计最大坝高 262.5 m, 设计正常蓄水位高程

* 收稿日期: 2013-11-05.

基金项目: 国家自然科学基金 (41004022) 和云南省青年地震科学基金 (201309) 联合资助.

812 m, 水库总库容 $237.03 \times 10^8 \text{ m}^3$, 库长 214 km, 是澜沧江中下流梯级规划中工程规模、调节库容、装机容量和发电量最大的电站, 于 2011 年 11 月 29 日开始蓄水。漫湾水库台网是从 2012 年 8 月开始运行, 运行时间短, 数据量少。景洪水库台网由于合同问题已于 2012 年 10 月停止运行, 故笔者只选取了小湾水库台网及糯扎渡水库台网的地震目录为基础数据, 使用 b 值稳定性方法分别计算分析了这两个水库地震目录的最小完整性震级 M_c , 并评估了其地震目录的质量, 为水库库区地震的监测、水库诱发地震、区域地震活动性研究提供了参考依据。

1 研究方法

Cao 和 Gao (2002) 根据 b 值的稳定性来测定区域最小完整性震级, 该方法称为 b 值稳定性方法。在地震学研究中有许多常规的参数, 如近震震级最早由 Richter (1935) 引入, 另一个常规化计算的参数是频度—震级分布:

$$\lg N = a - bM. \quad (1)$$

式 (1) 描述了震级及其频度间的关系 (Ishimoto, Iida, 1939)。基于震级—频度关系, 可以利用最大似然法 (Aki, 1965) 来计算 b 值

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - M_c}. \quad (2)$$

其中: \bar{M} 为均值, M_c 为最小完整性震级。

计算一系列地震的 b 值与所使用的方法有很大关系, 不同 b 值可能是由相同的数据在不同的假设下计算所造成的。就最大完整性震级而言, 不同的地震震级间隔、间隔内的零观察数据以及大震级地震都会影响到 b 值的计算。利用最大似然法计算成组数据的 b 值, 能够恰当的计算最小完整性震级、震级间隔大小以及零观察数据的间隔 (Bender, 1983)。

b 值稳定性方法认为 b 值随最小完整性震级 M_c 变化的曲线的特征为: 当区域最小完整性震级 M_c 小于实际值时, b 值呈线性增长, 而当达到实际地震监测的最小完整性震级后, b 值不再随震级变化而变化, 而是形成一平台。 b 值的转折点即为根据实际观测地震目录得到的区域最小完整性

震级 M_c 。

用于测定区域最小完整性震级时所使用的 b 值随震级变化曲线也可用于评价一个地震目录的优劣。对于一个符合 $G-R$ 关系式 (式 1) 的地震目录, b 值随最小完整性震级变化曲线的特征为: 当最小完整性震级小于实际值时, b 值呈线性逐渐增加, 当变化的最小完整性震级达到实际的值时, b 值将不再变化。然而对于实际的地震目录, b 值并不会如理论般的在最小完整性震级后呈一直线, 而是在某一值的附近波动。所以 b 值在最小完整性震级后的变化情况可用来评价地震目录的好坏。

2 台网资料

2.1 小湾水库台网

小湾水库台网由 17 个测震台站 (含 1 个强震台)、1 个中继站、1 个数据汇集处理中心和小湾水库地震台网监测中心构成。其中一期台站 12 个, 台站包围并均匀的分布于库坝区, 于 2005 年 6 月 1 日开始试运行; 二期台站 4 个, 主要分布于库首区, 于 2009 年 9 月 1 日开始运行, 2010 年 4 月小湾一、二期台站合并运行。小湾水库台网台站分布见图 1。地震台网监测中心实时接收数据, 使库区地震监测、速报、研究和预警形成一体, 达到信息共享, 快速应对紧急事件。数据经过工作人员的分析处理后生成台网各种数据及测定结果, 并实现台网的各种监测功能。

2.2 糯扎渡水库台网

糯扎渡电站水库地震监测台网由 12 个测震台站和糯扎渡水库台网监测中心构成。一期台站 4 个, 主要分布于糯扎渡水库库区, 于 2008 年 6 月建成并完成主体设备安装, 产出单台地震监测数据, 2009 年 2 月监测系统实现联网监测。二期台站 8 个, 于 2009 年 6 月开始运行。2009 年 6 月糯扎渡水库台网一、二期台站合并运行观测, 台网分布见图 2。

2.3 数据选取

在水库诱发地震的研究中选取地震目录时, 李永莉等 (2012) 和林松建等 (2010) 选取的研究范围为库区 20 km, 毛玉平等 (2008) 和王绍晋等 (2005) 对云南漫湾水库和大朝山水库的选取研究范围为库区 50 km。由于小湾和糯扎渡大坝周围 20 km 范围内的地震资料较少, 而且两水库台网

监控的库区地震范围远大于此,因此笔者选取大坝周围 50 km 范围内的数据进行分析研究,研究范围如图 1 和图 2 中的黑框所示。笔者选取 2005 年 6 月至 2013 年 7 月小湾水库 20 698 条 $M_L \geq -2.1$ 的地震目录,以及糯扎渡水库自 2008 年 6 月至 2013 年 7 月 13 990 条 $M_L \geq -2.1$ 的地震目录来分析 2 个水库台网的实际监控能力。

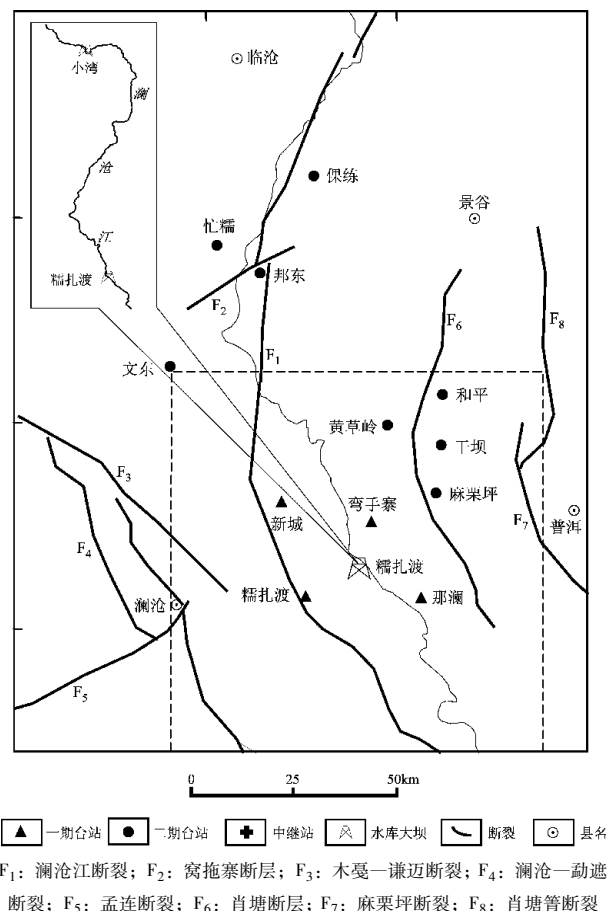
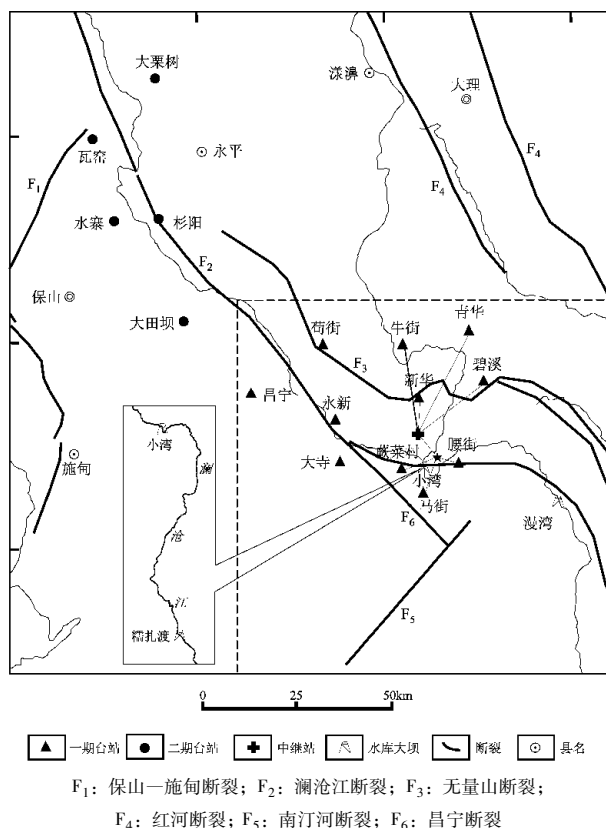
3 台网实际监控能力分析

3.1 小湾水库台网

小湾水库台网建设之初即 2005 年 6 月至 2009 年 8 月只有一期台站,2009 年 9 月起增加二期台站,台站数量由原来的 12 个增加至 16 个,监测范围也由原来的库坝区扩大至库首区。利用水库建设的前后两个阶段的地震目录所得到的最小完整性震级直观的体现了小湾水库台网监控能力的变化,笔者使用 MBS 方法分别计算了 2005 年 6 月至 2009 年 8 月和 2009 年 9 月至 2013 年 7 月两个时期

的最小完整性震级。图 3a 为运用 MBS 方法得到的小湾水库台网监测区的 b 值随震级下限变化曲线图,图中黑色点值为运用 2005 年 6 月至 2009 年 8 月,即一期台站的地震目录得到的 b 值变化,灰色点值为运用 2009 年 9 月至 2013 年 7 月,即一、二期台站的地震目录得到的 b 值变化。两个时间段得到的 b 值随震级变化曲线的特性都符合 MBS 方法所认为的 b 值随 M_c 变化的曲线特性,即对于小于真实最小完整性震级的情况下, b 值随震级的增加而增加,而在最小完整性震级处 b 值出现转折,对于大于最小完整性震级的部分 b 值将不再随震级增大而增加,而是保持在一个值附近波动。图 3a 中 b 值变化曲线显示转折点在 $M_L 1.6$ 附近,而小湾水库台网监测区的 M_c 为 $M_L 1.7$ 。

小湾水库台网由一期的 12 个台增加到了、二期合并的 16 个台。虽然地震台站数目增加了,可根据实际观测的水库地震目录得到的小湾水库



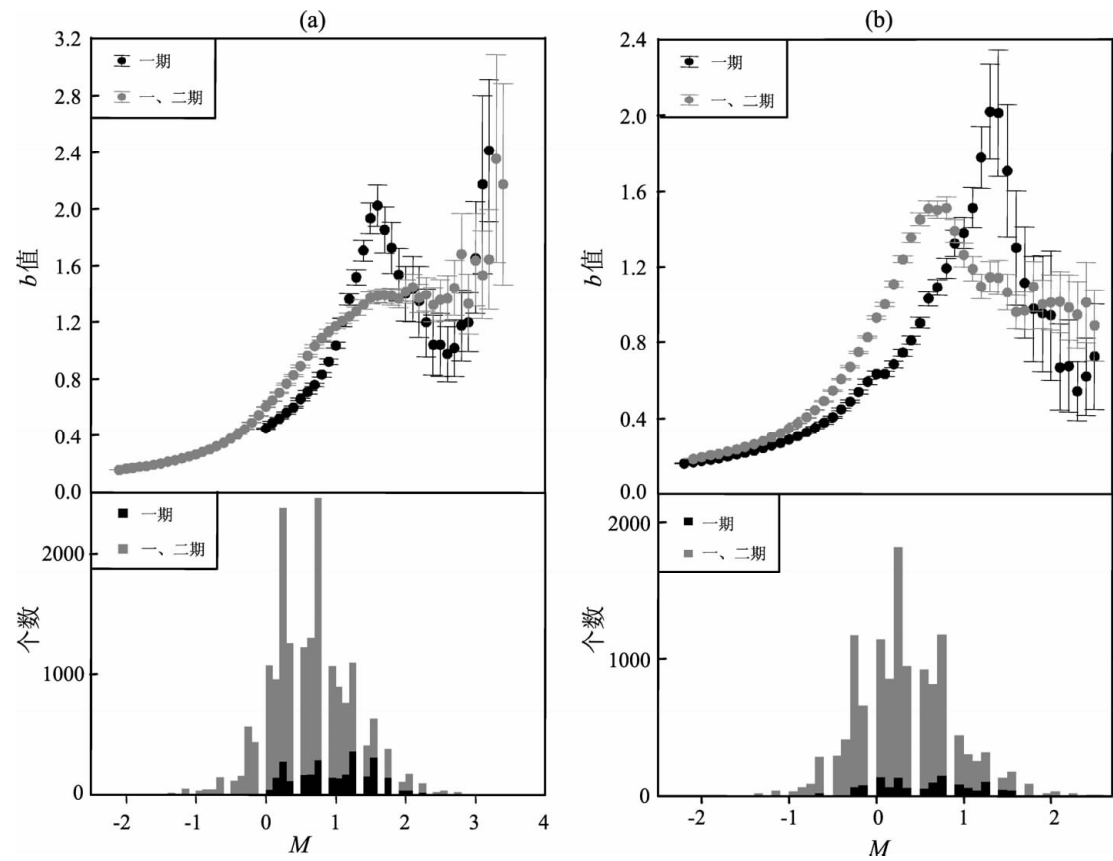


图 3 小湾 (a)、糯扎渡 (b) 水库台网地震目录最小完整性震级 M_c 分析图
Fig. 3 Analysis on minimum magnitude of completeness (M_c) in earthquake catalog for the Xiaowan (a) and Nuozhadu (b) Reservoir Seismic Network

台网监控能力却下降了。决定 M_c 的因素有台站密度、台站运行率、地震数据获取的途径及震级计算的方法等，由于小湾水库自运行开始，获取地震数据的途径和计算震级的方法一直未改变。而随着台站数增多， M_c 并没有由于台站数增多而减小。虽然随着小湾水库地震台站数目增多，台站密度增大，但是一期台站的运行情况明显好于增加二期台站后的运行情况。

图 4 为 2005 年 6 月至 2009 年 8 月一期台站和 2009 年 9 月至 2013 年 7 月增加了二期台站后的小湾水库台网各台和台网的平均运行率，从图中可看出只有一期台站时各台平均运行率均在 90% 以上，而增加二期台站后，有 6 个台站的平均运行率没有达到 90%，最低的一个台的运行率仅为 77.12%，增加二期台站后的各台平均运行率明显不如只有一期台站时的情况。增加二期后的台网的平均运行率 91.37%，而一期台网的平均运行率为 96.11%。虽然台站的密度在增大，但是台网的运行情况却影响了监控能力。

虽然加入了二期台站，但由于台网运行率不高影响了小湾水库台网的最小完整性震级。运行率低应该会导致系统在不同震级结构下缺失地震，

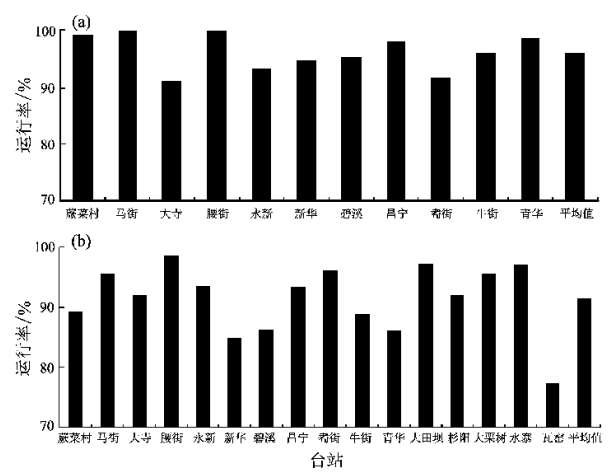


图 4 小湾水库台网各台站及台网平均运行率统计图
(a) 2005-06 ~ 2009-08; (b) 2009-09 ~ 2013-07
Fig. 4 The average operating rate chart of each station and network in Xiaowan Reservoir Seismic Network

但图 3a 显示并非如此, $M_L 2.0$ 以上的地震缺失明显, 而 $M_L 2.0$ 以下的地震并无明显缺失, 其原因为台站数增加对监测大震级地震没有影响, 却加强了小震级地震的监测能力, 因此监控到的库坝区地震数目明显高于只有一期台站时的情况。一期台站由于当时只要求分析 0 级以上的地震, 所以没有记录到 0 级以下的地震, 而增加二期台站后, 小湾水库地震目录不仅丰富了 0 级以下地震的观测, 而且所监控到的 0 级以上地震也远多于一期台站观测数。

3.2 糯扎渡水库台网

糯扎渡水库台网建设分两个阶段, 2008 年 6 月至 2009 年 8 月一期只有 4 个台站运行观测, 2009 年 9 月增加了二期 8 个台站, 笔者按照这两个阶段来分析糯扎渡水库台网监控能力的变化。图 3b 为糯扎渡水库台网监测区的 b 值随震级下限变化曲线图, 图中黑色和灰色的点线分别为使用 2008 年 6 月至 2009 年 5 月一期台站和 2009 年 6 月至 2013 年 7 月一、二期台站的地震目录得到的 b 值变化曲线。图 3b 中 b 值变化曲线显示黑色曲线的转折点为 $M_L 1.3$, 2009 年 6 月至 2013 年 7 月的地震目录所得到的灰色曲线显示出现阶段的 M_c 为 $M_L 0.8$ 左右。现阶段的糯扎渡水库台网的监控能力与只有一期 4 个台时期的监控能力相比提高了将近 40%。

2008 年 6 月 5 日至 2009 年 6 月 25 日为糯扎渡电站水库地震监测台网的初运行期, 在初运行期内由于没有形成完整的台网体系, 存在人为因素和自然因素, 导致台网运行存在诸多问题。2009 年 6 月台网加入了二期 8 个台站, 项目承担单位为了台网整体运行率的提高投入了大量人力、物力进行供电系统以及通讯系统改造, 同时形成了完整的运行体系及管理规范, 使得糯扎渡水库台网的运行情况有所好转。图 5 为 2009 年 10 月至 2013 年 7 月糯扎渡水库台网各台站和台网的平均运行率, 台网的平均运行率为 91.28%。而之前的数据由于管理的问题, 并没有保存, 所以无法给出。

糯扎渡水库台网一期运行 13 个月, 运行时间短, 运行情况不佳, 监测到的地震资料少, 如图 3b 所示, 所以目录质量不佳。而加入二期 8 个台站后, 库坝区地震的监测能力得到了显著提高, 水库地震目录中各震级档次的地震数量都远远大

于一期观测数据。正是由于糯扎渡水库在增加二期台站后观测质量的提升, 使得其最小完整性震级由 $M_L 1.3$ 降到了 $M_L 0.8$ 。

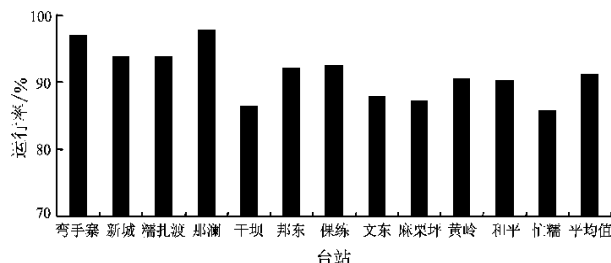


图 5 糯扎渡水库台网各台站与台网平均运行率统计图

Fig. 5 The average operating rate chart of each station and network in Nuozhadu Reservoir Seismic Network

4 结论

笔者选取水库大坝周围 50 km 以内的地震资料, 并使用 MBS 方法分别计算了小湾水库台网及糯扎渡水库台网的最小完整性震级。小湾水库台网最小完整性震级一期台站阶段为 $M_L 1.6$, 一、二期台站运行观测后为 $M_L 1.7$ 。相比一期台站时期, 现行的小湾水库台网的监控能力有微弱的减小, 其原因为一期台站时的运行情况好于增加二期台站后的运行情况, 实际观测揭示出现行的台网的运行情况影响了小湾水库的监控能力。

糯扎渡水库台网一期单独运行时期的 M_c 为 $M_L 1.3$, 一、二期台站合并运行时期的 M_c 为 $M_L 0.8$, 糯扎渡水库台网在目前 12 个台站的框架下对发生在水库监测区内的 $M_L \geq 0.8$ 的地震不会存在漏记情况, 但对于 $M_L < 0.8$ 的地震由于台网密度不够而不能做到 100% 的记录。相比只有 4 个台站的初运行时期, 现行的台网对库坝区的监控能力有了显著提高。

参考文献:

- 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 2012. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J]. 地震学报, 34(5): 646-658.
- 李永莉, 赵小艳, 付红. 2012. 小湾水库蓄水前后的水库地震波速比变化初探[J]. 地震研究, 35(4): 464-470.
- 林松建, 郑师春, 林琛, 等. 2010. 福建水口库区地震活及其动力成因分析[J]. 华南地震, 30(3): 53-62.

- 刘丽芳,李志海,蒋长胜. 2012. 云南地区地震目录最小完整性震级研究[J]. 地震研究, 35(4): 491–499.
- 毛玉平,王洋龙,付虹,等. 2008. 漫湾和大朝山电站水库诱发地震活动及其构造环境研究[J]. 地震研究, 31(3): 209–214.
- 王绍晋,秦嘉政,龙晓帆. 2005. 漫湾水库蓄水前后库区地震活动性与构造应力场分析[J]. 地震研究, 28(1): 53–57.
- Aki K. . 1965. Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\lg N = a - bM$ and its Confidence Limits [J]. Bull. Earthquake. Re. Inst. , 43: 237–239.
- Bender B. . 1983. Maximum Likelihood Estimation of b -values for Magnitude Grouped Data[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 73(3): 831–851.
- Cao A. M. , Gao S. S. . 2002. Temporal Variation of Seismic b -values beneath Northeastern Japan Island Area[J]. Geophys. Res. Lett. , 29(9): 1334, doi:10. 1029/2001GL013775.
- Gutenberg R. , Richter C. F. . 1944. Frequency of Earthquakes in California[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 34(4): 185–188.
- Ishimoto M. , Iida K. . 1939. Observation of Earthquakes Registered with the Microseismograph Constructed recently[J]. Bull. Earthquake. Re. Inst. , 17: 443–478.
- Richter C. F. . 1935. An Instrumental Earthquake Magnitude Scale[J]. Bull. Seismol. Soc. Am. , 25(1): 1–32.
- Rydelek P. A. , Sacks I. S. . 1989. Testing the Completeness of earthquake Catalogues and the Hypothesis of Self-similarity[J]. Nature, 337: 251–253.
- Schorlemer D. , Woessner J. . 2008. Probability of Detecting and Earthquake[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 98(5): 2103–2117.
- Wiemer S. , Wyss M. . 2000. Minimum Magnitude of Complete Reporting in Earthquake Catalog; Examples from Alaska, the Western United States and Japan[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 90(4): 859–869.
- Wiemer S. , Wyss M. . 2005. Assessing the Quality of Earthquake Catalogues; Estimating the Magnitude of Completeness and its Uncertainty[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 95(2): 684–698.

Preliminary Study on Completeness of Magnitude for the Xiaowan and Nuozhadu Reservoir Seismic Networks in Lancang River Basin

CAO Ying, XU Yan, YE Jian-qing, LI Dan-ning

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

Abstract

The minimum magnitude of completeness M_C of the seismic catalog for Xiaowan and Nuozhadu Reservoir Seismic Networks in Lancang River Basin is calculated by b -value stability methods and the actual monitoring ability of the two reservoirs is analyzed. The results show that the monitoring capability of the Xiaowan Reservoir Seismic Network had been decreased weakly along with the construction of the networks. The M_C increased from $M_L 1.6$ in the first stage operation to $M_L 1.7$ after the merge operation of the first and second stages, which indicated that the operation of the seismic network influenced its monitoring capability. The monitoring capability of the Nuozhadu Reservoir Seismic Network improved significantly. The M_C reduced from $M_L 1.3$ in the first stage operation to $M_L 0.8$ after the merge operation of the first and second stages.

Key words: minimum magnitude of completeness; seismic catalog; monitoring capability; Xiaowan Reservoir Seismic Network; Nuozhadu Reservoir Seismic Network