

杜瑶, 王宇玺, 阮祥, 等. 去学水电站流动地震监测台网建设及蓄水初期地震活动初步分析[J]. 华南地震, 2019, 39(S1): 11–16. [DU Yao, WANG Yuxi, RUAN Xiang, et al. Preliminary Analysis of Quxue Hydropower Station Flow Seismic Monitoring Network Construction and Early Period Impounding Seismic Activity [J]. South China journal of seismology, 2019, 39(S1): 11–16]

## 去学水电站流动地震监测台网建设及 蓄水初期地震活动初步分析

杜 瑶, 王宇玺, 阮 祥, 赵 昱, 吴 彤, 格桑卓玛  
(四川省地震局, 成都 610041)

**摘要:** 四川去学水电站位于四川省甘孜藏族自治州得荣县境内, 金沙江二级支流硕曲河干流上, 库区及附近处于青藏高原东南缘地质结构不稳定地区, 地震构造背景复杂。介绍了该水库地震监测台网及监测能力情况, 并利用记录的蓄水后近 10 个月地震数据, 对库区及附近的地震活动时空特征进行了初步分析。分析认为水库监测区域内地震主要集中分布在两个区域, 一个位于在大坝及以东且延硕曲河展布, 另一个则是大坝以南 28~30 km 处, 沿德钦—中甸—大具断裂分布; 利用最小完整性震级  $M_L$  0.3 级以上地震分区进行了时间进程分析, 两个区域地震活动强度均较弱, 但频度和深度上有明显的差异, 表明大坝附近地震活动水平在时间趋势变化上受水库蓄水有一定影响, 需加强跟踪监测库区及附近地震活动。

**关键词:** 去学地震监测台网; 监测能力; 地震丛集; 最小完整性震级

**中图分类号:** P315.7      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-8662(2019)S1-0011-06

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2019.S1.002

## Preliminary Analysis of Quxue Hydropower Station Flow Seismic Monitoring Network Construction and Early Period Impounding Seismic Activity

DU Yao, WANG Yuxi, RUAN Xiang, ZHAO Yu, WU Tong, GE SANG Zhuoma  
(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Sichuan Quxue Hydropower Station is located in Derong County, Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture, Sichuan Province, the main stream of the Shuo River in the second tributary of the Jinsha River. Its reservoir area is located in geological structure unstable area of southeast Tibetan Plateau, with complex seismic structure background. This paper introduces this reservoir's seismic monitoring network construction and monitoring ability, and preliminarily analyzes the earthquake time and space characteristics by using earthquake statistics of 10 months after impounding. The analysis has shown that the earthquake in reservoir area mainly distributes in two areas: one is located in the east of the dam and spread along Shuoqu River; the other one is in the 28–30 km the south of the dam, and is distributed along Deqin–Zhongdian–Daju. Using earthquake zone

**收稿日期:** 2019-02-26

**基金项目:** 中国地震局地质研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(IGCEA1705); 四川长宁地震窗注水影响和机理研究(2016CESE0101)

**作者简介:** 杜瑶(1984–), 女, 工程师, 主要从事水库地震监测及分析。

**E-mail:** 64953467@qq.com.

with minimum integrity magnitude  $M_L \geq 0.3$ , the paper conducts time progress analysis. The earthquake activity intensities in both areas are relatively weak, but there is obvious difference in frequency and depth. It shows that the earthquake level around the reservoir is influenced by reservoir storage in time tendency, and it is necessary to strengthen tracing and monitoring reservoir and earthquake activities around.

**Keywords:** Quxue Seismic Monitoring Network; Monitoring Ability; Earthquake Cluster; Minimum Integrity Magnitude

## 0 引言

四川去学水电站位于四川省甘孜藏族自治州得荣县境内,地处定曲河(金沙江一级支流)最大支流——硕曲河干流上,库区大部分约长 15 km 位于云南省迪庆藏族自治州香格里拉县境内。坝址位于得荣县古学乡毛屋村上游峡谷河道中,距得荣县城约 40 km,距云南香格里拉县城 126 km,最大坝高 164.2 m,水库正常蓄水位 2330 m,总库容 1.326 亿  $m^3$ ,2017 年 2 月 12 日正式下闸蓄水。去学水电站属于高坝水电站,处于青藏高原东南缘地质结构不稳定地区,地震构造背景复杂。

去学水电站流动地震监测台网(下简称去学地震监测台网)于 2016 年 12 月建成并投入运行,分别在四川省甘孜州得荣县以及云南迪庆县境内建设了 2 个临时监测台站及 2 个流动监测台站。大坝附近及库区监测能力可达  $M_L$  0.5 级,至今台网运行近两年,记录了大量蓄水前后库坝区及附近的地震资料,为研究该区域地震活动规律及发展趋势提供了数据基础。

## 1 去学地震监测台网及监测能力

去学地震监测台网由:吉里台、色从台、毛屋台、下拥台 4 个测震临时台站和专用地震台网中心组成。台站布设在水电站坝下和库坝区内,沿库区均匀展布,分布在  $NS18km \times EW17k$  范围内,并包围了可能诱发地震的重点监视区段,重点监视区内监测震级下限为  $M_L$  0.5 级,震中定位误差  $\leq 1$  km。去学地震监测台网在台站地震观测系统上全部采用反馈式短周期地震计和 24 位数据采集器,流动地震台网采用速度平坦型特性系统,对地方性微小地震的监测能力明显高于采用位移平坦型特性的系统,观测频带为 2 s~40 Hz。在数据传输上,去学地震监测台网采用了人工取数方式传回四川省地震局专用地震台网中心,在专用地震台网中心对地震数据进行存储、分析处理,产出监测成果等(图 1)。

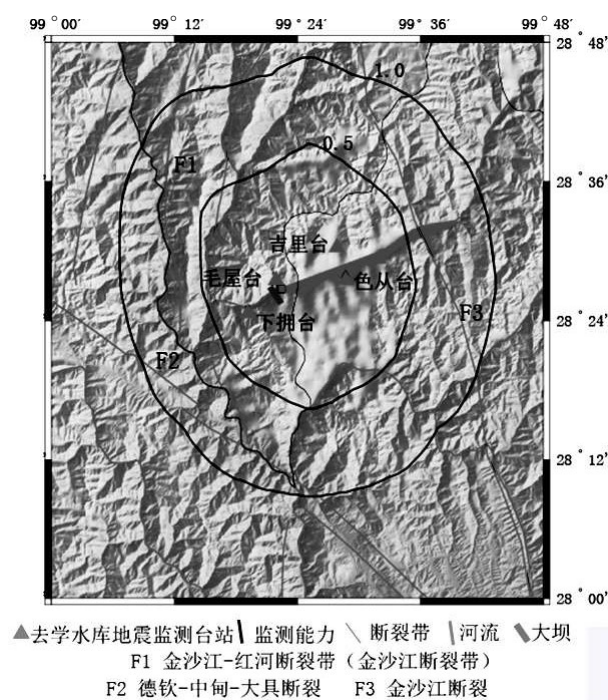


图 1 去学地震监测台网监测能力图

Fig.1 Monitoring capability map of quxue seismic monitoring network

## 2 去学库区地震地质背景情况

去学水库地震监测区位于青藏高原东南缘,地壳变动十分强烈,无论是断块的垂直差异运动还是断块侧向滑移显得十分突出。区域内断裂构造发育,第四纪以来活动显著,地震活动较为频繁,地应力调整快,以至水库蓄水造成的应力变化显得微不足道,从区域地震活动环境上看,不具备诱发大地震的地震活动环境。近场区内没有记录到  $M_s \geq 4.7$  级的历史地震,小震活动强度也较弱,坝址周围 5 km 内没有记录到  $M_L 2.0$  以上地震。

据去学地震监测台网记录,台网建成至水库下闸蓄水前(2016 年 12 月 10 日至 2017 年 2 月 11 日)去学水库地震监测区( $28.0^\circ \sim 28.8^\circ N$ ,  $99.0^\circ \sim 99.8^\circ E$ )共发生 190 次地震,其中 -0.9~0.9 级 176 次,1.0~1.9 级 13 次,2.0~2.9 级 1 次,无 3 级以上地震。从空间分布上看(图 2),大坝及附近 10

km 范围内仅零星分布一些微小地震。

库区内碳酸盐岩分布较广，岩溶发育，绝大多数溶洞深度均小于 5 m，一般 2~3m 居多，但灰岩中所夹的非碳酸盐岩隔水层，它阻隔了灰岩层间的水力联系，岩溶发育程度由地表向地下深处

由强渐弱。总体上虽然岩溶发育，但不会对诱发地震产生大的影响。由于构造和地理位置独特，去学水库库容和长度虽都较小，库区岩性、地貌等条件也没有本质上的差别，但构造和地震条件极为复杂，在很小的范围内变化较大。

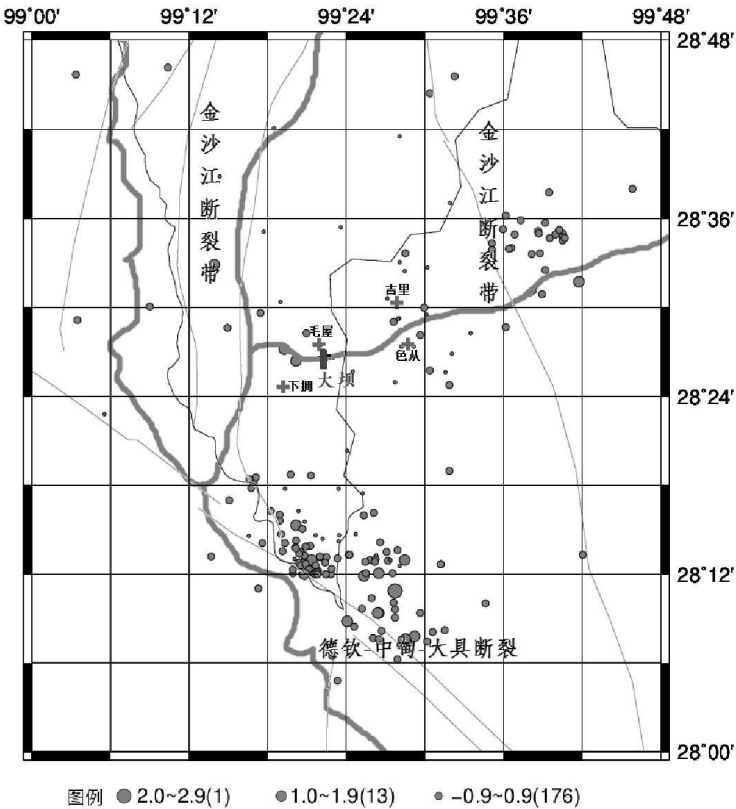


图 2 去学水库地震监测区蓄水前震中分布图

Fig.1 Distribution of epicenter before impoundment in Quxue reservoir seismic monitoring area

3 去学水库库区蓄水后地震活动监测及初步分析

2017 年 2 月 12 日至 2017 年 11 月 30 日，去学地震监测台网记录到监测区内地震 1649 次，其中  $M_L$  0.0~0.9 级地震 1473 次， $M_L$  1.0~1.9 级地震 157 次， $M_L$  2.0~2.9 级地震 19 次(表 1)，去学水库地震监测区内无速报地震。其中区域内记录最大地震为 2017 年 8 月 24 日发生在云南香格里拉的  $M_L$  2.8 级地震，距坝址约 25.6 km。

表 1 去学水库库区及附近地震统计表

Table 1 Statistical Table of earthquakes in and around Quxue Reservoir area

震级/ $M_L$	地震次数
0~0.9	1473
1.0~1.9	157
2.0~2.9	19
合计	1649

根据去学水库地震监测区地震活动监测情况分析，以去学水库大坝为基准，从图 3(a)震中距-频度图中可以看出地震在距大坝 0~4 km、9~11 km、以及 28~30 km 的三个区域呈现高频次活动，从图 3(b)地震方位角玫瑰图中高频次地震活动相对于大坝的优势方位角在 80°~90°、60°~70°和 180°~190°间均有分布，结合去学水库地震监测区地震分布图(图 4a)可以看出，地震丛集主要分布在图中的 A、B 两个区域，即去学水库大坝及以东且延硕曲河展布的地震丛集与去学大坝以南沿德钦—中甸—大具断裂分布的地震丛集。其中大坝以南地震集中分布在 2013 年 8 月 31 日 5.9 级地震余震区内。沿硕曲河分布的地震活动，其展布方向与河流附近的南北向断裂—金沙江断裂带无明显联系。

从地震的定位深度看，震源深度大多数都在 15 km 以内。其中，震源深度  $h \leq 5\text{km}$  的地震共

390 次(占 23.7%),  $5 \text{ km} \leq h \leq 10 \text{ km}$  的地震共 854 次(占 51.9%),  $10 \text{ km} \leq h \leq 15 \text{ km}$  共 218 次(占 13.2%),  $h \leq 15 \text{ km}$  共 1462 次(占 88.8%),  $h > 15 \text{ km}$  有 184 次(占 11.2%)。图 4(b)中将监测区内地震沿德钦—中甸—大具断裂走向(NW-SE 向)投影到垂直剖面上, 总体上可见, 地震深度在 15 km 以内, 但不同的地震集中活动区域深度分布上有

明显差异。A 区深度剖面投影显示地震集中活动分布在 12 km 深度范围内, 平均深度为 6.6 km, 且明显成丛、成团状分布; 而 B 区域地震丛集深度剖面投影在 40 km 范围内均有分布, 10~20 km 深度范围内地震稍有集中, 平均深度在 17.5 km, 该丛集整体深度明显深于 A 区的震群。

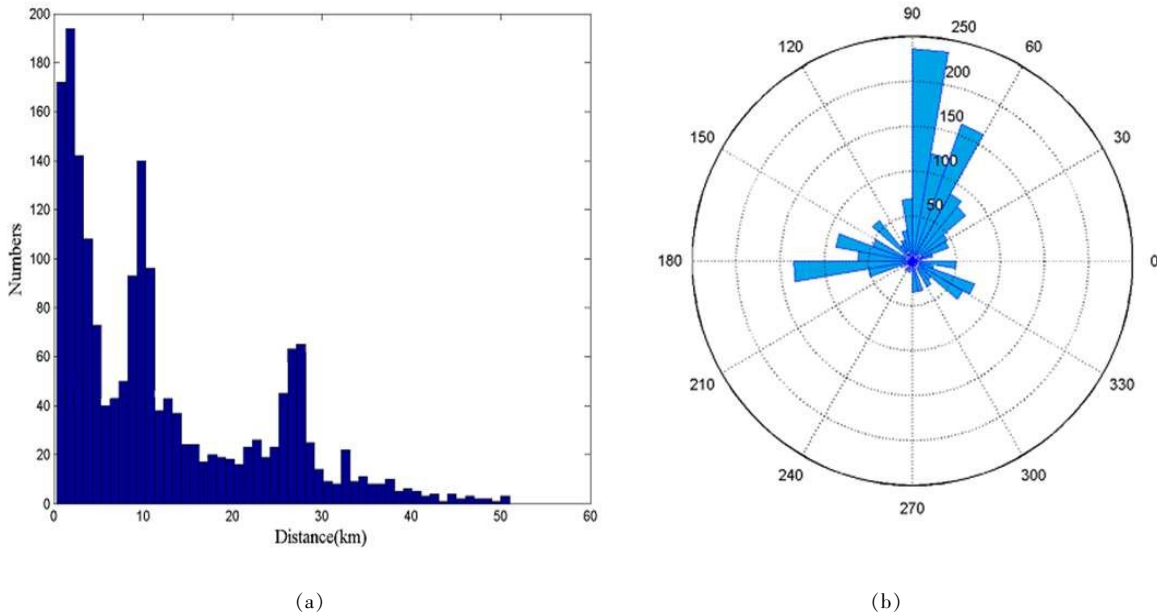
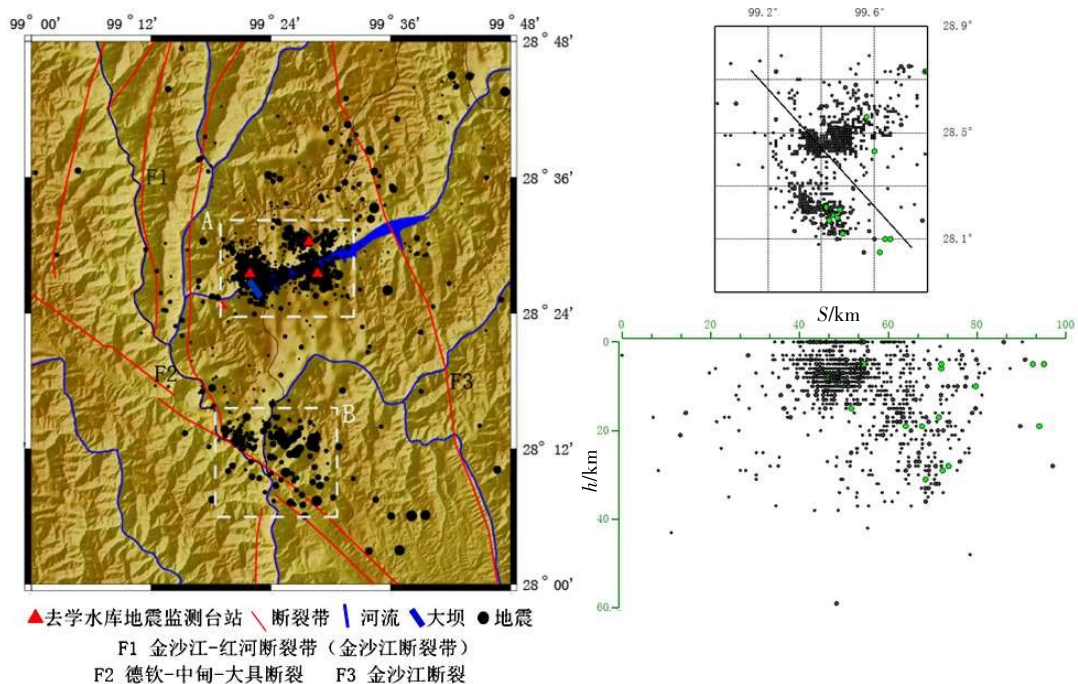


图 3 去学水库地震监测区震中距-频度图(a)及地震方位角分布玫瑰图(b)

Fig.3 Seismic epicenter distance-frequency map (a) and seismic azimuth distribution rosette of Quxue reservoir seismic monitoring area (b)



(a: 蓝色区域为水库蓄水淹没区域; b: 中黑色实心圆为与图 a 中对应的地震事件)

图 4 去学水库地震监测区地震分布图(a)及其沿 NW-SE 向投影(b)

Fig.4 Seismic distribution map of Quxue reservoir seismic monitoring area (a) and its projection along NW-SE direction (b)

为观察地震监测区内地震活动的特征,我们有必要对整个目录的完整性进行检测,以保证计算地震活动性参数的质量,同时可以利用实测数据检验去学地震监测台网的监测能力。首先我们采用最大释然法对库区及附近地震活动参数进行拟合(图 5),其中  $b$  值计算结果在 0.933 左右,  $a$  值为 3.15, 最大期望震级  $a/b$  值约 3.4 级,与监测区内发生的最大地震(2017 年 8 月 24 日云南香格里拉  $M_L$  2.8 级)震级略大,最小完整性震级  $M_c$  为 0.3,说明该台网记录  $M_L$  0.3 级以上的地震是完整的,同时可以验证去学监测台网的监测能力能够达到监测震级下限为  $M_L$  0.5 级的设计要求。

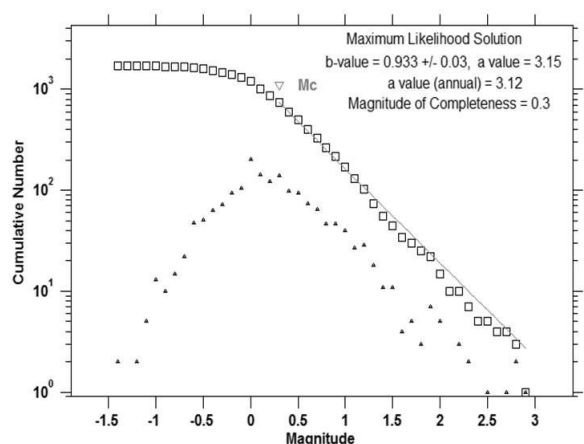


图 5 水库地震监测区  $\lg N-M$  关系及 GFT 拟合结果

Fig.5  $\lg N-M$  relationship and GFT fitting results in reservoir seismic monitoring area

基于以上计算结果,我们对台网记录的完整震级  $M_L$  0.3 级以上序列进行了时间进程的分析,共记录到  $\geq M_L$  0.3 级地震 710 次,占所有地震的 43%,主要集中分布的两个区域在地震活动时间上也呈现出一些差异。延硕曲河分布的 A 区域地震为地震监测区的主体发生区域,共记录到  $M_L$  0.3 级以上地震 488 次,占监测区内  $\geq M_L$  0.3 级地震总数的 68.7%,整个时间段内地震震级强度较弱,未记录到  $M_L$  3.0 级以上地震,最大地震是 2017 年 5 月 5 日以及 8 月 14 日先后发生在大坝附近丛集区域内的  $M_L$  2.3 级地震,地震深度均小于 10 km,虽然震级较小,但当地震感明显。区域内地震频次较高,2017 年 4 月后  $\geq M_L$  0.3 级地震频次明显增多,并逐月略有增多,监测时段内地震频次没有回落现象,2017 年 10 月  $\geq M_L$  0.3 地震活动达到了 74 次,3 月中旬起发震间隔明显变短(图 6)。去学水库于 2 月 12 日正式下闸蓄水,蓄水后该区域小震频次增加,认为水库蓄水与影响区(水域外延 10

km 范围)内地震活动水平有一定相关性。

分布在大坝以南 B 区域地震从时间序列则看出该区域内震级整体呈现出了较低水平,在研究时段内未记录到  $M_L$  3.0 级以上地震,  $M_L$  2.0 级以上地震 5 次,最高日频次 12 次,在 2017 年 6 月、8 月及 10 月分别发生了 2.0 级左右地震,频次略有增加,2 月至 8 月中旬发震间隔较长,整体频度及强度较弱(图 7),且频次起伏没有呈现出地震因蓄水而明显增加的现象。

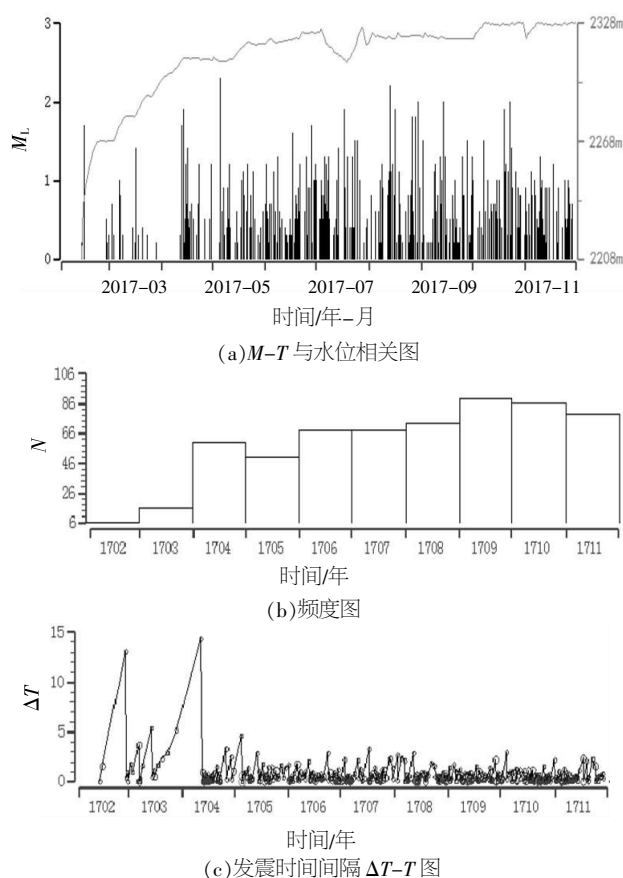


图 6 A 区域  $\geq M_L$  0.3 级地震地震时间序列

Fig.6 Seismic time series of earthquakes in area A ( $M_L \geq 0.3$ )

## 4 结语

去学水库地震监测区位于青藏高原东南缘,地壳变动十分强烈,区域内断裂构造发育,第四纪以来活动显著,地震活动频繁,地应力调整快。水电站坝段及附近没有一定规模的晚更新世~全新世活动断裂存在,坝址 5km 范围内没有一定规模的断裂分布。

去学地震监测台网于 2016 年 12 月建成并投入运行,由 4 个测震临时台站和专用地震台网中心构成。大坝附近及库区监测能力可达  $M_L$  0.5 级,



至今台网运行近两年,记录了大量蓄水前后库坝区及附近的地震资料,为研究该区域地震活动规律及发展趋势提供了数据基础。利用去学地震监测台网蓄水后 10 个月地震活动数据显示,主要分布在两个区域,一个是分布在去学水库大坝及以东且延硕曲河展布的地震丛集距大坝约 0~4 km、9~11 km,另一个则是大坝以南 28~30 km 处沿德钦—中甸—大具断裂分布地震丛集,该丛集在 2013 年 5.9 级地震的余震区内。延 NW-SE 向给出的地震垂直剖面投影可以看出两个区域深度有明显的差异,平均深度分别为 6.6 km 和 17.5 km,后者地震丛集深度明显深于大坝及附近延硕曲河展布的地震丛集。

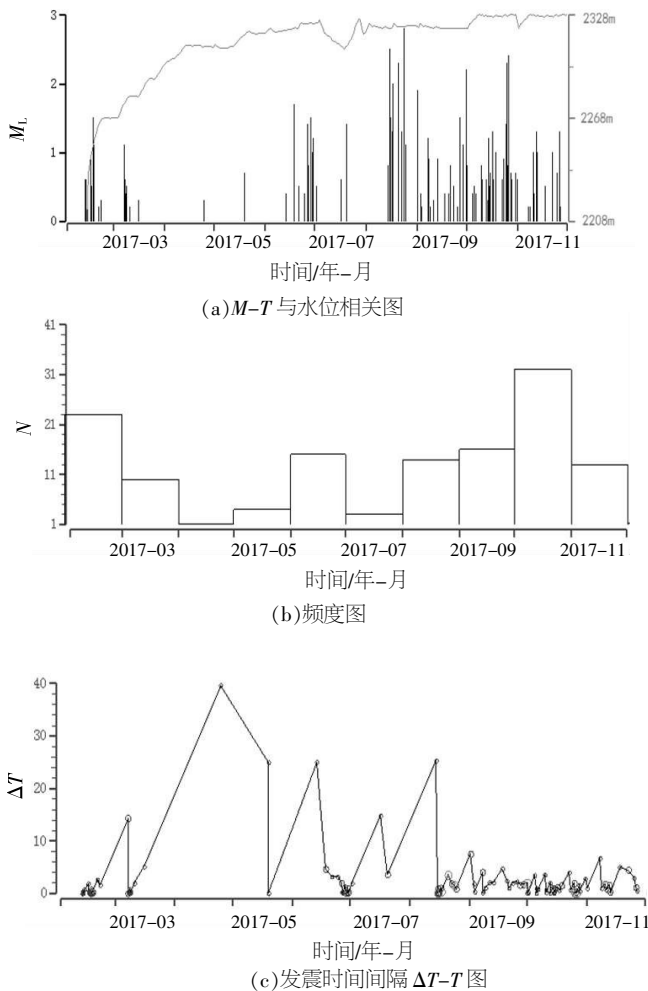


图 7 B 区域  $\geq M_L 0.3$  级地震时间序列

Fig.7 Seismic Time series of earthquakes in area B ( $M_L \geq 0.3$ )

对蓄水后台网地震目录资料检验结果显示,整个目录最小完整性震级  $M_c$  为 0.3。根据整个目录完整性震级  $M_c 0.3$  给出的两个地震集中活动区域活动性参数随时间变化显示德钦—中甸—大具

断裂上地震活动主要为 2013 年 5.9 级地震余震,整体活动较弱,频度起伏没有呈现出因蓄水而明显增加的现象;沿硕曲河分布的地震附近虽有金沙江断裂带通过,但展布与其没有明显联系。蓄水后库区附近地震频次增加,但强度较弱,未记录到  $M_L 3.0$  级以上地震,随时间发展地震频次逐渐升高,认为该区域地震活动受水库蓄水有一定影响。由于水库库区位于地震高烈度地区,需加强跟踪监测库区及附近地震活动。

#### 参考文献:

- [1] 龙锋,闻学泽,倪四道. 区域最小完整性震级时空分布的确定——以龙门山断裂带为例[J]. 地震,2009,29(3): 27-36.
- [2] 程万正. 高烈度区的水库地震问题[J]. 国际地震动态, 2013(4):10-18+9.
- [3] 阮祥,韩进,谢蓉华,等. 大岗山水库天然地震活动本底特征[J]. 地震,2017,37(3):157-168.
- [4] 王余伟,杜瑶,阮祥,等. 长河坝水电站临时地震台网建设及蓄水前本底地震活动性初步分析[J]. 四川地震,2016(4):10-14.
- [5] 杜瑶,张致伟,阮祥,等. 大岗山水库蓄水前库区地震空间分布及应力场特征[J]. 地震工程学报,2016,38(S1): 36-43.
- [6] 简讯. 去学水电站工程[J]. 四川水力发电,2016(5):60-60.
- [7] 王宇玺,阮祥. 去学水库天然地震活动本底研究报告[R]. 成都:四川赛思特科技有限责任公司,2017.