

张博,王宝善,李璐,等. 2024. 新疆努尔加水库周边区域地震活动性特征[J]. 地震研究, 47(4): 503–516, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0056.
Zhang B, Wang B S, Li L, et al. 2024. Seismicity in the region around the Nurga Reservoir in Xinjiang[J]. Journal of Seismological Research, 47(4): 503–516, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0056.

新疆努尔加水库周边区域地震活动性特征^{*}

张博^{1,6}, 王宝善^{1,2,3}, 李璐¹, 魏斌⁴, 苏金波^{1,4,5}

- (1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;
3. 中国科学技术大学 安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽 合肥 230026; 4. 新疆维吾尔自治区
地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011; 5. 中国地震局 乌鲁木齐中亚地震研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;
6. 防灾科技学院 地球科学学院, 河北 三河 065201)

摘要: 水库库区附近的地震活动性对水库的安全运行有重要影响。为了进一步理解构造活跃区地震活动与水库蓄水的关系, 以新疆努尔加水库为例, 采用模版匹配滤波方法对 2014—2018 年库区附近的地震事件进行了检测, 完备震级 (M_c) 由检测前的 1.1 降低至 0.5, b 值为 0.86。利用双差定位法对检测事件中的 1 064 个事件进行了重定位, 地震定位结果及波形相似性分析显示, 水库蓄水后在库区下游形成的两个地震丛集分属于不同的发震构造。受库区东西两侧昌吉背斜和喀拉扎背斜的控制, 两丛集地震活动分别位于积累了大量变形的反冲断层上盘和背斜生长行成的膝折带中。地震活动在时间上还与蓄水位周期性变化相关。根据地震活动时空演化特征推断, 库水沿着砂砾岩层向下渗流, 改变了介质强度或断层的摩擦阻力, 促使构造应力的释放, 这是地震活动增加的主要物理机制。

关键词: 努尔加水库; 微震检测; 波形互相关; 地震定位; 地震活动性

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)04-0503-14
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0056

0 引言

随着水库在世界各地兴建, 人们陆续在多个水库库区附近观测到与蓄水过程相关的破坏性地震 (Gupta, 2002; McGarr et al., 2002), 地震学研究中采用水库触发地震来描述这类特殊的地震活动。全球范围内已有超过 150 余例水库触发地震的报道, 其中 40 余例位于中国大陆地区 (蒋海昆等, 2014)。国内水库触发地震的报道主要集中在黄河以南地区, 以西南、华东、华南地区居多, 分布于不同的地质构造带。天山区域是我国构造活动强烈的地质构造带之一 (张培震等, 2003; 张国民等, 2005), 区域内常有 6 级以上破坏性地

震活动。但在天山区域却少有水库诱发地震的报道, 仅有的两个案例是位于南天山的克孜尔水库 1993 年 $M4.4$ 地震、2005 年 $M5.3$ 地震和恰普其海 2006 年 $M4.6$ 地震 (蒋海昆等, 2014)。对于北天山区域水库蓄水对区域地震活动影响的研究相对较少。

2015 年 1 月位于北天山北坡中段的努尔加水库建成蓄水, 这是一座兼具供水、防洪、灌溉三大功能的控制性水利枢纽工程, 总设计库容为 6 844 万 m^3 , 控制流域面积近 8 000 万 m^2 , 属于 III 等中型水库 (王永涛, 2011)。水库位于三屯河流域的中低山区, 距上游三屯河水库 17 km, 距下游西干渠首 7.3 km。在运行的第二年 (2016 年) 库区附近出现一系列地震活动, 引起关注。开展努

^{*} 收稿日期: 2023-08-19.

基金项目: 国家自然科学基金 (41790462, 41804059, 41904084, 41561164018)。

第一作者简介: 张博 (1990-), 讲师, 主要从事微震检测、地震定位及地震活动性相关教学科研工作. E-mail: zhangbo199011@163.com.

尔加水库地震活动性的观测研究为我们提供了一个进一步讨论在北天山区域水库蓄水与库区周边地震活动关系的良好机会。

本文对努尔加水库蓄水前后库区周边地震活动的时空演化特征进行分析,讨论水库蓄水对库区周边地震活动的影响。采用模版匹配滤波(Peng, Zhao, 2009; Meng *et al*, 2012)及基于波形互相关的地震定位技术(Yang *et al*, 2009)来完善水库蓄水前1年、后4年库区周边的地震目录。通过分析努尔加水库地震活动的时空演化特征,结合区域地质构造背景及水库蓄水过程,讨论努尔加水库库区周边地震活动的发震机制以及水库蓄水对库区周边地震活动的影响。

1 努尔加水库地质构造背景

天山是远离板块边界的大陆内部山系,新生代以来受到强烈的挤压和隆升等构造变形作用,形成了欧亚大陆内部再生造山带(邓起东等, 1999; 张培震等, 2003; 张国民等, 2005)。北天山区域近水平沿 NNE 向的最大主压应力,受到博格达山和博罗科努山堆积造成的挤压隆升影响,以东经 87°为界发生偏转,偏转角度约 9°(李艳永等, 2018)。在近南北向的强烈挤压作用下,天山南、北山前地区发育了多个凹陷盆地(杨晓平等, 2008)。在天山北麓发育了两个不同类型的

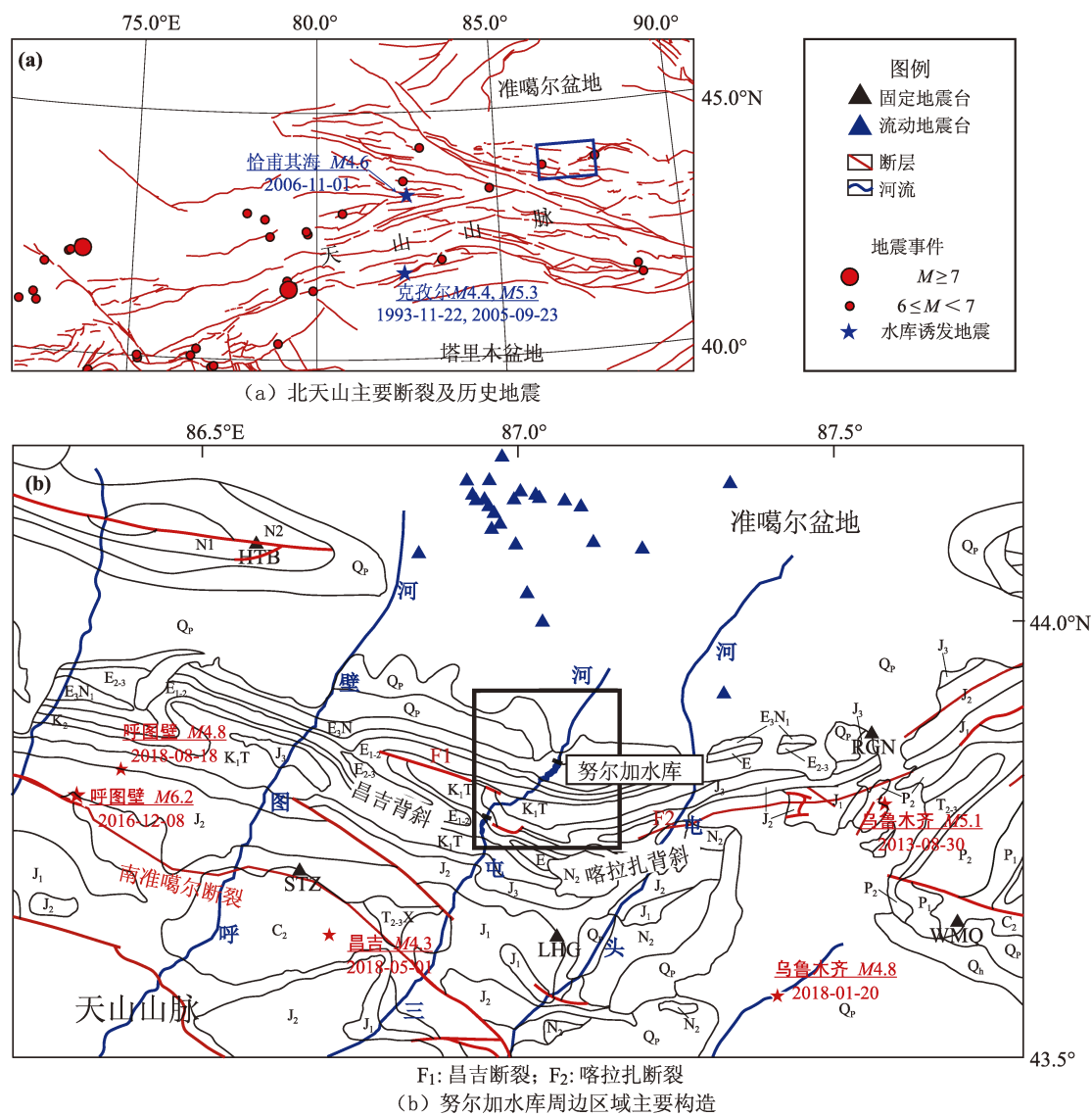


图 1 努尔加水库周边区域构造背景

Fig. 1 Regional tectonic settings around the Nurga Reservoir

逆断裂-褶皱构造,分别为乌鲁木齐以西的北天山山前逆断裂-背斜活动构造系和乌鲁木齐以东的博格达逆冲推覆构造系(汪一鹏,沈军,2000;陈立春,2011)。北天山主要构造及历史地震如图1a所示。

努尔加水库地处北天山北麓中段,临近构造活动较为活跃的天山地区。努尔加水库库区($86.98^{\circ} \sim 87.07^{\circ} \text{E}$, $43.80^{\circ} \sim 43.87^{\circ} \text{N}$)位于上述两构造系之间,昌吉背斜北翼与喀拉扎背斜交汇处(张子凤,2014)。距离库区10 km范围内发育有两条北倾的逆断层(陈伟等,2010),分别为昌吉断裂(图1b, F_1)和喀拉扎断裂(图1b, F_2)。其南部为南准噶尔断裂(图1b),北天山区域历史上记录到的最大地震为玛纳斯7.7级地震(顾功叙,1984)和2016年12月8日的呼图壁 $M_s 6.2$ 地震(Gong *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2019),都被认为与此断层相关。库区基底基岩岩性由巨厚层状的砂砾岩、砾岩组成,其中夹含砾泥质砂岩透镜体,地层产状倾向下游($270^{\circ} \sim 280^{\circ} \text{NE} \angle 29^{\circ} \sim 30^{\circ}$)。

努尔加水库的选址地三屯河是一条雨雪混合补给的山溪性中小型内陆河,发源于天山北坡

中段的天格尔峰,跨越高、中、低山带,出山口后进入平原灌溉区,最终消失于沙漠中(张婉君,2020)。三屯河径流量年际变化平稳,多年平均年径流量为3.55亿 m^3 ,是北天山中段径流量最大的河流,但是年内径流分布极度不均匀,季节性和月径流变化较大,来水量主要集中在6~9月,径流量为2.77亿 m^3 ,约占全年来水量的78%(陈俊仁,2017),致使库区水位呈现大幅度的周期性年变化。

2 库区周边地震活动检测及定位

水库蓄水对周边地震活动的影响通常集中在库区附近约10 km内,因此,我们将研究区域限定为努尔加水库库区周边10 km以内的范围(图1b中的黑色框)。

由中国地震台网统一目录(以下简称台网目录)可见,研究区域内水库蓄水前(2011—2014年)库区附近的地震活动并不强烈,2级以上地震平均约2.7次/年,而在蓄水后的第二年(2016年)共发生10次2级以上地震(图2)。尤其是在三屯河汛期(4—10月)接连发生4次3级以上

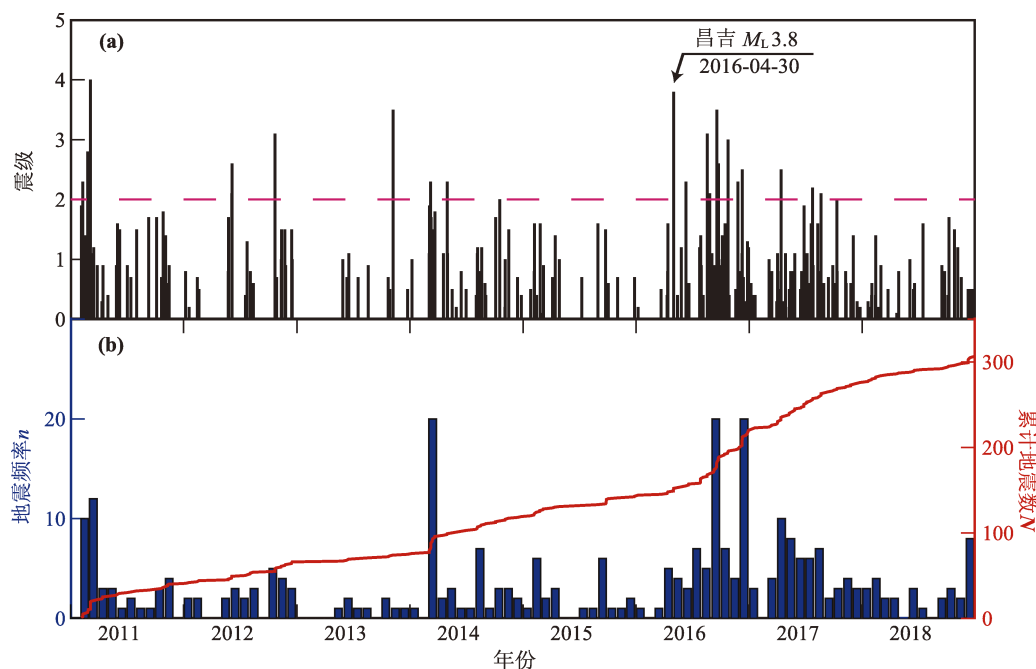


图2 2011—2018 研究区中国地震台网统一目录地震序列震级时间关系 ($M-t$) (a) 及月地震频率直方图 (b)

Fig. 2 The $M-t$ plot (a), the monthly seismic rates (blue histograms) and the cumulative number (red curve) (b) of the earthquakes in the study area during 2011–2018 according to the China Earthquake Networks Center Catalogue

地震,其中最大地震事件发生在4月30日,震级为 M_L 3.8,是2011年以来最大的地震事件(图2)。其后,地震活动逐渐减弱,并在2018年逐步恢复至水库蓄水之前的水平。因此,本文选取2014年1月至2018年12月的数据,期间台网目录共记录到271次地震事件。

由于北天山区域地质构造复杂(邓起东等,1999;杨晓平等,2008),库区周边固定地震台站分布较为稀疏,距离库区100 km以内仅有5个固定地震台,这些因素可能会导致目录构建过程中大量地震事件被遗漏、因台网目录,基于单事件法震源位置确定存在偏差等,进而影响地震活动性分析的可靠性。

收集库区100 km以内的固定地震台网(图1b中黑色三角形)及“呼图壁计划”(Ji *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022)架设的流动地震台网(图1b中蓝色三角形)观测数据,采样频率均为100 Hz。流动地震台网的观测开始于2013年6月,在研究时窗内分阶段先后布设了30个流动观测台站,有效弥补了地震观测系统在库区北侧的缺失(图1b)。

目前以波形互相关技术为基础的模板匹配滤波技术是一种低信噪比下检测遗漏地震事件的有效方法(Peng, Zhao, 2009; Meng *et al.*, 2012)。该方法以震相清晰的地震事件作为模板,利用波形相关性,扫描连续波形数据,寻找与模板事件波形相似度高的一段连续波形,作为新检测事件,实现对微弱地震事件的自动识别和检测。其对具有相似发震机理且传播路径相近的地震事件具有很好的检测效果,已经应用于地脉动检测、余震序列变化以及确定发震构造等方面(Shelly *et al.*, 2007; Peng, Zhao, 2009; Yang *et al.*, 2009; 侯金欣, 王宝善, 2017)。

相较于单事件定位,双差定位方法(HypoDD)可以一定程度减小由于地壳复杂性而引起的误差,随后发展出的波形互相关技术可以被应用于震相的到时差的计算(Yang *et al.*, 2009),大大提高了到时差拾取精度,进而提高地震定位精度(黄媛等, 2006; Waldhauser, Schaff, 2008)。基于波形互相关技术的双差定位方法(Waldhauser, Ellsworth, 2000),可以有效构建区域地震目

录,并且有助于地震学家更为详尽地刻画地震丛集发震构造、分析地震活动的时空演化特征、讨论地震序列的成因(易桂喜等, 2017)。这种方法一方面可以提高模板事件的定位精度,另一方面可以高效的确定检测事件的空间分布(侯金欣, 王宝善, 2017)。

2.1 模板事件的重定位

本文首先对2013—2018年研究区域内超过4个台站(包含固定地震台站和流动地震台站)记录的223个地震事件进行重定位。重定位所采用的速度模型为Sun等(2012)校正的适用于北天山区域的一维速度模型。

台网目录事件的重定位先利用Hypoinverse方法(Klein, 2002)进行单个事件的绝对定位,初步确定震源位置,再利用双差定位方法(Waldhauser, Ellsworth, 2000)进行相对定位,获得更为精确的定位结果。绝对定位采用人工拾取的2 709条P波和2 256条S波的到时数据;相对定位采用的事件对震相走时差则利用互相关技术提取获得。走时差的计算遵循Yang等(2009)提出的方法:首先对波形记录进行2~8 Hz的带通滤波提高信噪比,然后截取时窗长度为2 s的P波(即人工拾取的P波到达前0.5 s,到达后1.5 s)和时窗长度为3 s的S波(即人工拾取的S波到达前1 s,到达后2 s)震相进行互相关计算。选取互相关系数最高的结果计算事件对震相走时差,对应的互相关系数则为该事件对对应震相走时差的权重系数。以0.4为阈值,互相关系数低于0.4的震相对则以人工标记到时计算震相走时差。最终,获得了95 328个P波和80 268个S波走时差。

利用双差定位方法进一步确定了132个地震事件的震源位置,占实际参与定位的地震数目的56%,没有进行双差定位的事件则采用绝对定位的结果。走时残差由重定位前2.059 s下降到定位后的0.469 s。根据重定位的位置重新测定了地震震级,震级的测定采用新的震级国家标准《地震震级的规定》(GB 17740—2017)所规定的地方性震级 M_L 的测定方法(刘瑞丰等, 2018)。

2.2 地震事件的检测及定位

为了克服流动台站记录质量变化对微震检测造成的影响,使用来自5个观测质量较好的固定台

站的连续数据。微震检测的过程遵循 Peng 等 (2009) 的分析方法,采用 Meng 等 (2012) 改进的基于 GPU 加速的程序提高计算效率。具体步骤如下:

(1) 对连续波形数据进行预处理:去波形尖灭、去均值、去线性趋势,并进行 2~8 Hz 带通滤波,提高信噪比。

(2) 对重定位的台网目录进行筛选,选择重定位与区域内且至少具有 9 个信噪比大于 3 的固定地震台站信道清晰记录的 174 个地震事件作为模板事件。

(3) 计算每个模板和连续波形之间的滑动窗口互相关系数 (cross-correlations, CC):

$$CC = \frac{\sum_{t_0}^{t_1} \{ [X(t) - \bar{X}] \times [Y(t) - \bar{Y}] \}}{\sqrt{\sum_{t_0}^{t_1} [X(t) - \bar{X}]^2 \times \sum_{t_0}^{t_1} [Y(t) - \bar{Y}]^2}} \quad (1)$$

式中: t_0 和 t_1 分别是要用于计算 CC 值的信号窗口

的起止时刻; $X(t)$ 和 $Y(t)$ 分别是在 t_0 和 t_1 时间段内的模板事件波形和连续波形。计算过程中每次在连续波形上移动一个采样点。分别设置 CC 值的计算的时间窗口为垂直分量的 P 波和两个水平分量的 S 波到达之前 1 s 和之后 3 s。

(4) 根据模板事件震相到时计算不同台站的 CC 值,然后取平均值。

(5) 平均 CC 值大于 0.35 且大于 CC 值波列的绝对离散中位数 15 倍的波形被视为潜在检测事件。为了尽量减少可能的重复检测,我们只在 2 s 的时间窗口内保留最大 CC 对值应的波形作为检测事件 (Meng *et al.*, 2012)。

(6) 检测事件的发震时刻由其模板事件的震相走时确定;检测事件的震级由其所对应的模板事件的水平分量的 S 波到时前 2 s 到后 2 s 内最大振幅的比值,计算两个水平分量的振幅比的平均值来确定 (Meng *et al.*, 2012)。

从 2014 年 1 月 1 日到 2018 年 12 月 31 日,研究区总共检测到 2 649 个地震事件 (图 3),

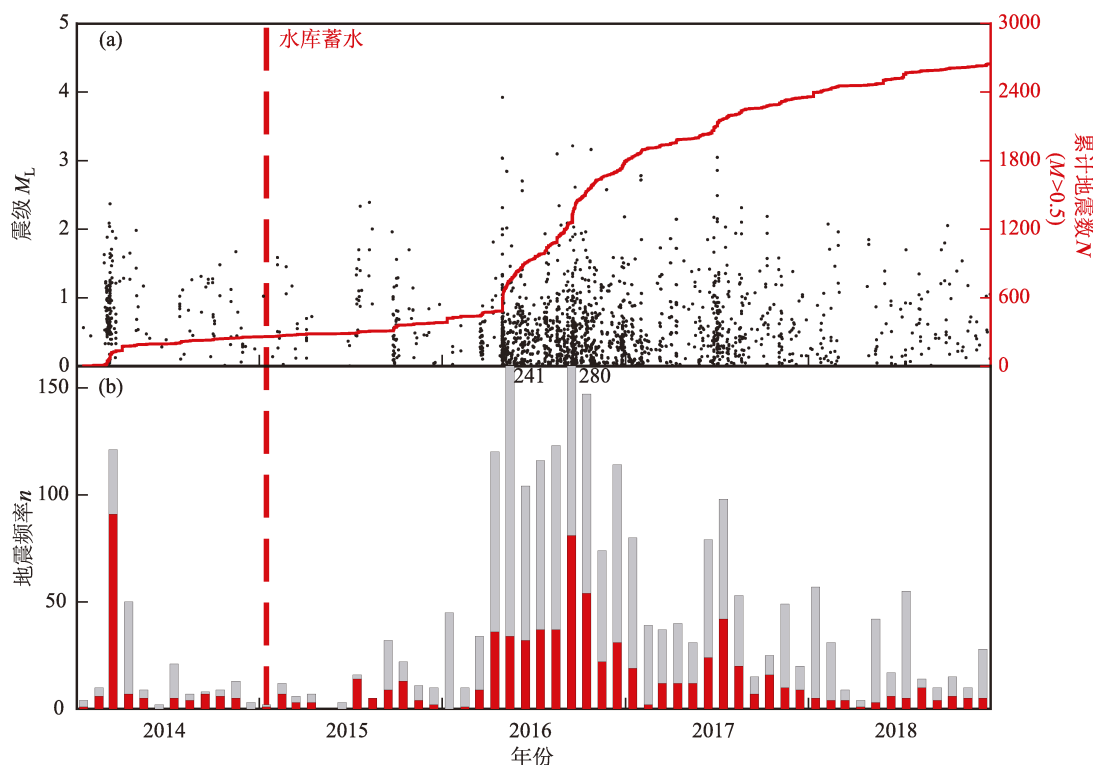


图3 地震检测事件 $M-t$ 关系图及完备震级以上累积地震数 (a) 及地震活动月频度统计 (b)
(灰色柱状图为所有事件的月频度,红色为完备震级以上月频度统计)

Fig.3 The $M-t$ plot of the detected events (a) and the monthly cumulative number (b)

(Grey historams represent the monthly rate of all events; red historams represent the monthly rate of the events with magintudes larger than the complete magnitude)

近 10 倍于中国地震台网目录中记录的同区域和时间段的 271 个事件。为了确定地震因素的完整性,使用 ZMAP (Wiemer, Wyss, 2000; Wiemer, 2001) 进行 Gutenberg - Richter 关系的拟合。微震检测将台网目录的完备震级 (M_c) 由检测前的 1.1 降低至 0.5, 检测目录的 b 值为 0.86 (图 4)。

在利用模板匹配滤波进行遗漏事件检测的基础上,利用基于波形互相关的双差定位方法 (Yang *et al.*, 2009) 可以实现对检测事件的地震定

位 (侯金欣, 王宝善, 2017)。检测事件定位过程中,首先设置检测事件的初始位置为其对应的模板的位置。事件对的 P 波及 S 波的走时差通过波形互相关获得,并采用与台网目录精定位过程中使用的相同的 P 波及 S 波时窗窗长及互相关阈值。为了保证定位结果的准确性及稳定性,定位过程中加入流动台数据以加强约束,并且只选择震相数据丰富且具有强关联性的地震对进行定位。将最小震相数目设置为 8,这使得我们失去了许多未能得到强关联性的地震。

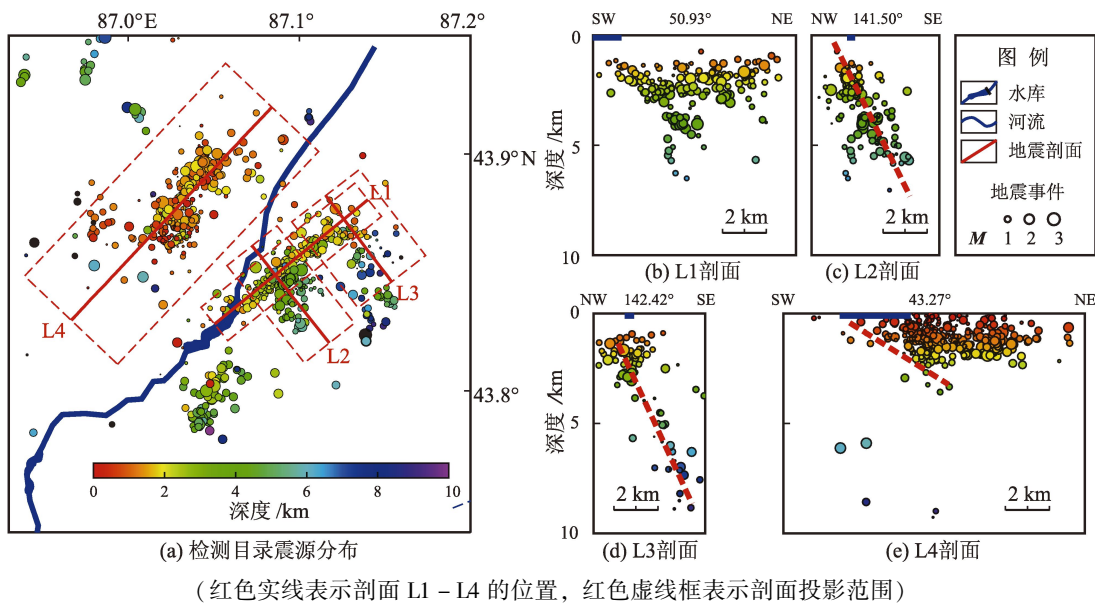
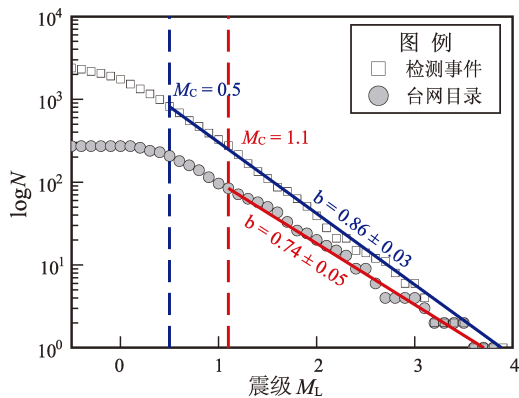
最终,2 649 个检测事件中的 1 064 个事件被重新定位,占有参与定位事件的 40%,其中 826 个检测事件被定位于研究区域内 (图 5a)。走时残差从定位前的 2.059 s 减少到定位后的 0.234 s。水平和垂直定位的平均偏差估计分别为 0.184 km 和 0.205 km。

3 讨论

3.1 努尔加水库周边地震活动空间分布特征

研究区域地震震源深度整体呈现西浅东深的分布特征 (图 5a)。以三屯河为界,河流西侧的地震活动主要分布在 3 km 以上的浅部地层中,由剖面 L4 可以看出此处地震活动沿着倾向 NNE、倾角约 30° 的北倾节面延伸至地下约 3 km 深处 (图 5e)。

图 4 研究区域内中国地震台网目录和检测目录的 b 值估计以及地震目录完备性分析
Fig. 4 The b -value estimation and the analysis of the completeness of the China Earthquake Networks Center Catalogue and the detected catalogue



(红色实线表示剖面 L1 - L4 的位置, 红色虚线框表示剖面投影范围)

图 5 检测目录地震空间分布特征

Fig. 5 The spatial distribution of detected catalogue

河流东侧的地震活动则可以库区为界,划分为上游和下游两个丛集。位于库区上游的地震活动主要分布在约 4 km 深度 (图 5a); 位于库区下游的地震活动则表现出由西北向东南深度逐渐变深的特征。由剖面 L2 和 L3 可看出,位于库区下游的地震活动主要沿着倾向 SE、倾角约 60° 的节面分布 (图 5c 和 5d), 延伸至地下 9 km 深处。

根据震中空间分布特征,将努尔加水库周边地震活动划分为 A、B 和 C 三个丛集 (图 6)。结合地震活动的发震时刻,水库蓄水前地震活动主要分布在河流东岸库区上游约 1 km 的丛集 C 中 (图 6 中黑色圆形)。蓄水后的地震活动主要集中在库区下游约 5 km 范围内 (图 6 中红色圆形) 河流东西两侧的丛集 A 和 B 中。蓄水后的地震深度优势分布在 3 km 以上 (图 6, 红色柱状图)。相较于蓄水前的地震丛集 (图 6, 黑柱状图), 蓄水后

的地震丛集具有更浅的震源深度优势分布。

水库蓄水后在库区下游出现的两个地震丛集 (丛集 A 和丛集 B) 表现出截然不同的空间分布特征。两丛集分别沿着 NEE 和 SE 倾向的两个节面分布 (图 5), 分属于不同的发震构造。发震构造和传播路径相似的地震在同一台站记录中具有相似的波形 (Shelly *et al*, 2007; Peng, Zhao, 2009), 表现为高互相关系数。分别在丛集 A 和 B 中选取了两个地震事件作为模板事件, 并选择位于研究区域南边对两丛集地震活动具有相近传播路径的硫磺沟台 (LHG) 作为记录台站, 分别统计两模板事件在研究区域地震记录中 P 波互相关系数 (图 7c, 灰色时窗为互相关系数计算时窗, 包含人工拾取的 P 波到达前 0.5 s 至到达后 1.5 s) 大于 0.9 的地震事件震中分布 (图 7a 中蓝色圆和红色圆)。结果表明, 与模板事件具有较高波形相似性 (即具有较高 P 波互相关系数) 的地震事件位于其所对应的丛集中, 而位于不同丛集的地震事件 P 波波波形相似性较低 (图 7c)。

为了进一步讨论 A、B 两丛集中地震事件的波形相似性, 统计两丛集中任意 1 级以上事件对的 P 波互相关系数 (图 8), 统计结果显示丛集内的事件对比丛集之间的事件对具有更高的互相关系数。P 波波波形互相关分析进一步表明, 库区下游两丛集的地震活动具有不同的发震构造。

3.2 研究区域地震震源分布特征及区域断层

位于库区西北方向的丛集 A 位于昌吉背斜的北翼, 沿着倾向 NNE、倾角约 30° 的节面延伸至地下 3 km。沿着昌吉背斜走向将地震定位结果投影至地震勘探线 Line 1 (图 9a)。剖面显示丛集 A 的地震活动主要集中在由南准噶尔断裂和反冲断层形成的楔形构造活动轴面区域。

楔形构造广泛分布于准噶尔盆地南缘和北天山山前冲断构造中, 是其构造位移消减的主要方式之一 (Qiu *et al*, 2019)。楔形体端点限制的轴面之内发生褶皱变形, 即反冲断层的下盘发生褶皱变形, 其向前陆方向位移分量致使上盘地层抬升 (李本亮等, 2012)。反冲断层上盘被抬升的过程中在对应地层中积累了大量形变, 形成局部应力集中, 地震活动常常出现在这类地质构造中 (Thomas *et al*, 2017; Kandula *et al*, 2022)。

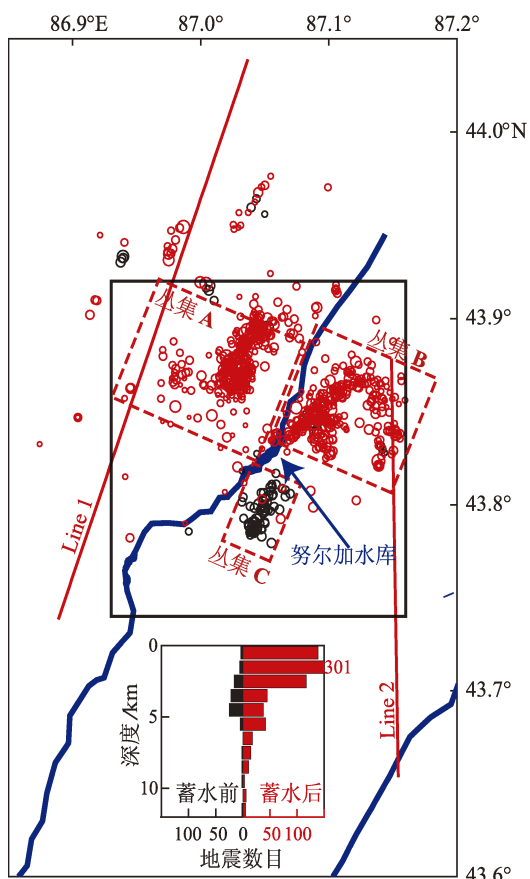


图 6 蓄水前后研究区震中及深度分布特征

Fig. 6 Distribution of the epicenters and focal depths in the study area before (black) and after (red) the Nurga Reservoir impoundment

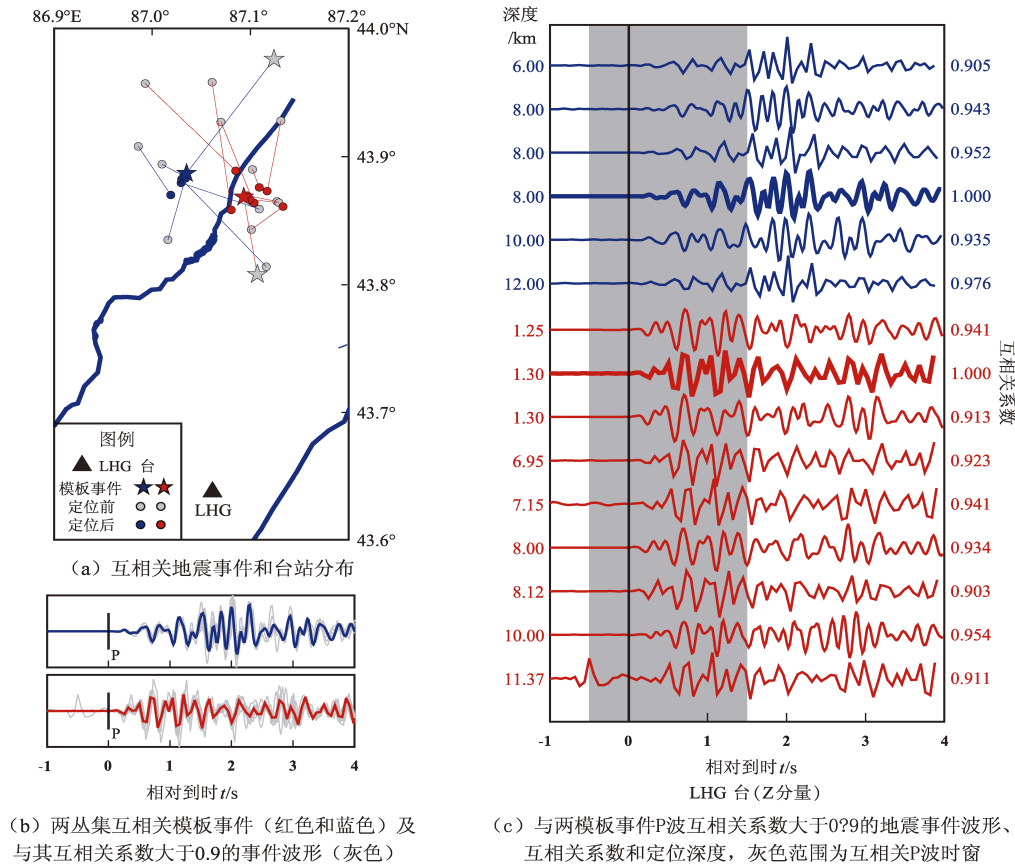


图 7 硫磺沟台 (LHG) 记录的部分事件波形互相关示意图

Fig. 7 Cross - correlation of the waveforms of some seismic events recorded at Liuhuanguogou station

与丛集 A 不同, 位于库区东北方向的丛集 B 发生于喀拉扎背斜之上, 其地震活动主要沿倾向东南、倾角约 60° 的节面分布。节面走向与喀拉扎断层相近, 倾向相反。将地震定位结果沿喀拉扎背斜的走向投至地震勘探线 Line 2 (图 9b), 尽管节面与已有的断层解译并不完全相符, 但其产状与区域内存在的高倾角断层的构造特征相一致。

喀拉扎背斜内部存在多组台阶状逆断层楔形构造, 地层多次重叠抬升 (陈立春, 2011; 李本亮等, 2012), 其主要受到由北向南反向冲断的喀拉扎断层控制 (管树巍等, 2006)。地震反射剖面显示喀拉扎断层为上陡下缓的向西北大角度倾斜的铲状断层, 其在地下 10 km 产状趋于水平 (李本亮等, 2012)。背斜生长的过程中, 在其北翼行成膝折带, 膝折带枢纽和翼间脚恒定 (陈杰等, 2005), 在浅部 (≤ 10 km) 发育有向东南倾斜的大倾角断层 (李本亮等, 2012)。

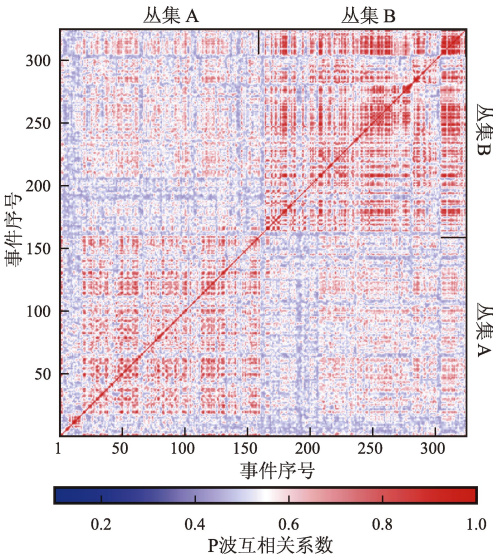


图 8 丛集 A 和 B 任意 1 级以上地震事件对在硫磺沟台 (LHG) 地震记录中 P 波互相关系数

Fig. 8 The P - wave cross - correlation coefficients of each seismic - event pair with the magnitude larger than 1 in Cluster A and Cluster B recorded at Liuhuanguogou station

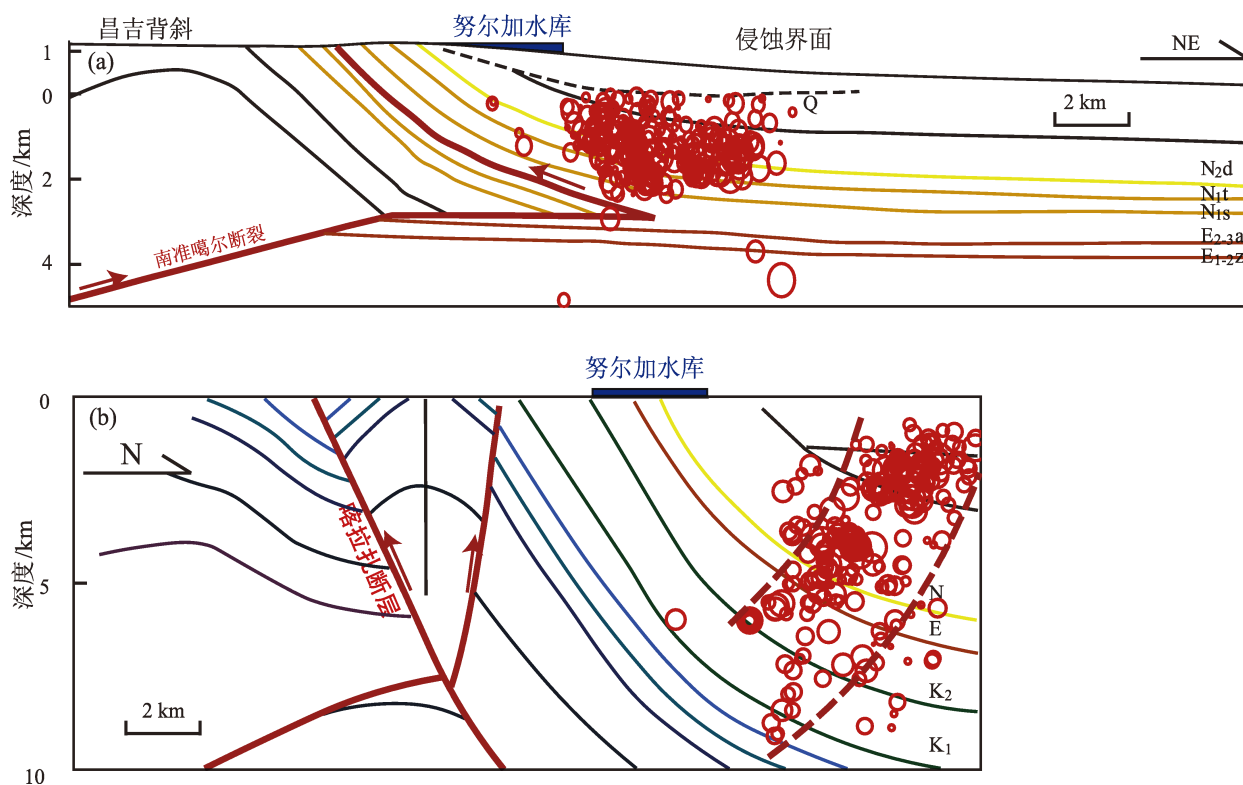


图9 震源深度剖面及地震勘探剖面解释结果 Line 1 (a) 和 Line 2 (b)

(Line 1 和 Line 2 地震勘探剖面解释结果分别修改自 Qiu 等, 2019 和王天宝等, 2013)

Fig. 9 The focal – depth distribution and the interpretation of the seismic profile of Line 1 (a) and Line 2 (b)

(The interpretation results of Line 1 and Line 2 are modified from Qiu *et al.*, 2019 and Wang *et al.*, 2013)

3.3 地震活动时间演化特征及其与水库蓄水的相关性

努尔加水库的库水水位主要受三屯河径流量变化的影响。三屯河是一条径流量年际变化平稳、但是年内径流季节性变化显著的内陆河（陈俊仁，2017；张婉君，2020），这使得努尔加水库蓄水水位呈现出较为稳定的年变化特征，即水库的蓄水水位随着径流量开始增大逐渐上升，并在径流量逐渐减弱时达到峰值，其后逐渐下降直至新一轮汛期的开始。因此，河流径流量可以一定程度反映水库蓄水水位的年变化特征。收集三屯河 1977—2019 年间平均径流量作为径流量季节性变化的数据，将其与区域地震活动的月频次进行对比（图 10a）。

在努尔加水库蓄水之前，区域内地震活动通常不会超过一个月，且主要集中在库区上游的丛集 C 中（图 10b，灰色）。水库蓄水后，库区周边区域地震活动主要集中在下游的两个丛集中，并由深度较

浅的丛集 A 开始（2015 年），随后出现在深度较深的丛集 B 中（2016 年）（图 10b）。两丛集内的地震活动序列持续时长显著增加，超过 2 个月。

2015 年 1 月水库开始蓄水，9 个月后随着蓄水后的首个汛期结束，地震在库区下游的丛集 A 中开始活动。蓄水后的第二年（2016 年），丛集 A 的地震活动随着三屯河在 3 月汛期的开始而开始，并持续至 9 月汛期结束而结束（图 10a 中，蓝色柱状图），图中三屯河径流量为碾盘庄水文站多年纪录平均结果。与之相类似，丛集 B 的地震活动开始于蓄水后第二年（2016 年 9 月），并在之后的蓄水周期中丛集 B 的地震活动与三屯河汛期在时间上相一致。两个丛集表现出相似的年变化演化特征，即首次活动的年份中地震都开始于 8 月前后，并在 9 月达到峰值，而在次年，丛集内的地震活动自 4 月便开始活跃并在 5—7 月达到峰值（图 10）。这种年变化特征持续至 2018 年，库区周边地震活动随即逐渐减弱。

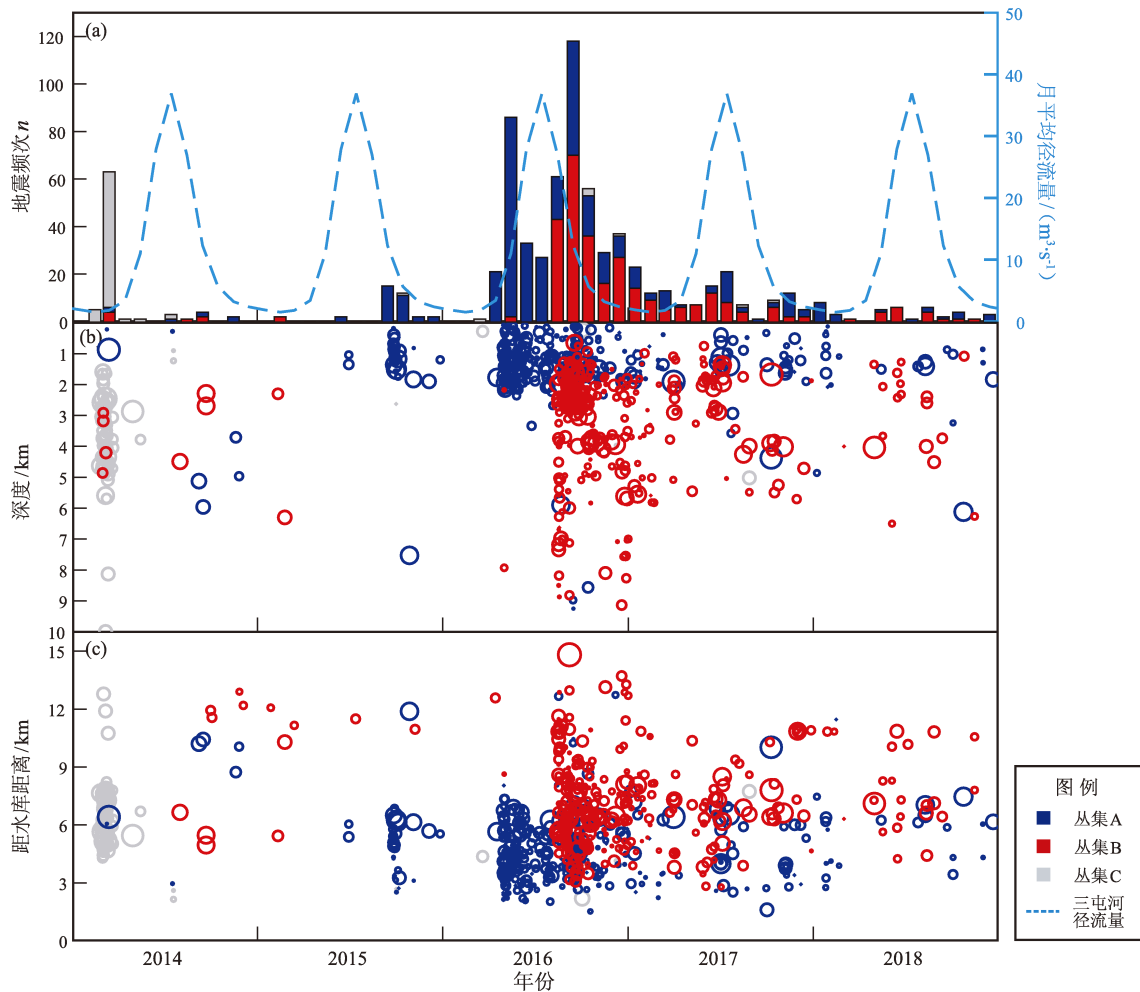


图 10 地震活动频次 (a)、深度分布 (b) 和地震活动距离水库距离 (c) 的时间演化

Fig. 10 The temporal evolution of the seismic rate (a), the depth distribution (b), and the distance between earthquake events and the Nurga Reservoir (c) in the study area

在汛期即将结束时, 三屯河径流量逐渐减少, 此时对应的水库蓄水水位接近当年的蓄水峰值。水库下游两丛集地震活动的首次活跃都出现这一时段 (8—9 月)。在丛集首次活动开始后的第二年, 水库蓄水水位随着径流量的增加而上升, 地震活动也随之逐渐增加并持续至径流量减少, 直至汛期结束。地震活动频次随水库蓄水水位变化的特征在龙滩水库 (华卫等, 2012)、漫湾水库 (李永莉等, 2004) 以及小湾水库 (姜金钟等, 2016) 等水库触发地震的研究中得到证实。蓄水水位 (库容) 的变化与库区周边地震活动的相关性是判断水库触发地震的重要参数之一。努尔加水库蓄水后, 地震活动频次与水库蓄水水位 (库容) 具有很好的相关性, 表明库区的地震活动与水库蓄水紧密相关, 库区周边存在水库触发地震

的现象。

地震数目和震级通常遵循古登堡 - 里克特关系: $\log N = a - bM$, 其中 b 值被认为与地热梯度、区域应力状态等有关。水库触发地震序列的 b 值往往大于该区的背景 b 值, 如中国新丰江水库 ($M6.1$) (秦嘉政等, 2009)、赞比亚 - 津巴布韦边界的卡里巴 (Kariba) 水库 ($M6.1$) (Gough, Gough, 1970; Gupta, 2002)、希腊克里马斯塔 (Kremasta) 水库 ($M6.2$) (Gupta *et al.*, 1972; Gupta, 2002) 和印度科伊纳 (Koyna) 水库 ($M6.3$) (Gupta, 1983, 2002)。研究区域地震序列 b 值的大小是判断水库触发地震的重要标准之一。根据地震目录估计的 b 值为 0.86, 其增幅显然不及以主要由人类工业活动为主的诱发地震活动观测到的变化, 但仍略高于北天山的背景 b 值统计结果

(0.71) (苏乃秦等, 2001)。

努尔加水库蓄水后, 库区周边区域地震序列持续增长且与水库蓄水水位变化相关, 蓄水后地震序列 b 值高于该区域背景值, 表明努尔加水库库区周边的地震活动受到水库蓄水的影响, 影响范围主要集中在库区下游 5 km 内沿河分布的两个地震丛集中。

3.4 库区周边地震活动主要物理机制

努尔加水库地处北天山区域, 最大主压应力近水平, 库区附近以逆冲断层为主。由于缺少水位数据, 难以对水位升降导致的库伦应力变化进行定量的估计, 但是水库蓄水形成的地面载荷加载很难形成促进地下深处断运动的附加水平拉力 (陈颙, 2009), 载荷更多起到稳定作用 (Gough, Gough, 1970; Beck, 1976)。努尔加水库为中型水库, 其蓄水量较小, 蓄水引起的载荷变化也相对较弱。因此, 载荷作用不应是努尔加水库蓄水对周边地震活动影响的主要因素。

努尔加水库下游的两个地震丛集发生于水库蓄水之后, 其空间分布分别受到不同的地质构造控制。沿着地层倾角测算蓄水位置至两丛集的发震位置的距离。丛集的地震活动是由深度较浅的、距离更近的丛集 A 先开始, 并在 2016 年之后逐渐由近至远、由浅至深地向丛集 B 迁移 (图 10c)。坝址库盘区域出露的基岩地层为砂砾岩、砾岩, 坝址属于弱透水—接近中等透水岩体, 渗透率在几到几百 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (郭召杰等, 2007), 并且在地层抬升过程中还会进一步发育裂隙和微裂隙, 这些都会成为库水向下渗流的通道。库水沿着地层向地下渗流, 流体的渗入会改变岩层中不连续面上的有效正应力 (Gupta, 1983, 2002; 易立新等, 2003), 并对构造破碎带起到润滑作用, 降低断层和岩体不连续面的强度和摩擦系数 (Talwani, 1997), 促使构造应力释放, 促使地震发生, 地震活动通常表现出迁移特征 (Gupta, 2002; 周斌等, 2010)。

值得注意的是, 蓄水后两个地震丛集集中出现于抬升的断层和背斜生长形成的膝折带中, 流体渗入引起本不活跃的背斜倾覆端的地震活动性增加。水库的建成是否会引起两个背斜下伏构造相连, 使地区潜在发震震级大幅提升, 仍需要进一步研究。在地质构造背景复杂, 构造活动强烈

的区域兴建水库需要进行更为详尽的地震地质调查及地震安全性评估。

4 结论

本文采用微震检测及定位方法获得了较为完备且具有更高精度的努尔加水库库区周边地震目录, 结合相关地质和水文地质资料, 分析了库区周边地震活动和水库蓄水之间的关系, 得出以下结论:

(1) 努尔加水库蓄水后, 区域地震活动的模式发生改变, 地震活动频次及地震序列持续时间都显著增加, 并与水库蓄水位的变化相关。蓄水后的地震活动由浅至深, 先后发生于库区下游的两丛集中, 并分别受到昌吉背斜和喀拉扎背斜的控制, 空间上表现出与区域构造相一致的特征, 发震位置与坝址库盘区域出露的基岩地层具有一定程度的水文地质连通性, 存在库水渗流的通道。

(2) 水库蓄水后, 库水沿着砂砾岩层向下渗流, 改变了介质强度或断层的摩擦阻力, 促使构造应力的释放, 这是地震活动增加的主要物理机制。

(3) 尽管观测到的较为显著的水库诱发地震活动出现在本不活跃的背斜倾覆端, 但研究区域内没有出现更大范围的断层活化现象。水库诱发的地震主要集中在库区下游 5 km 范围内, 并随着蓄水进入第三个周期后逐渐减弱。在之后的水库蓄水过程中是否还会诱发地震, 是否会引起两个背斜下伏构造相连, 进而导致库区潜在发震震级增大, 仍需要更多的观测资料, 并开展进一步研究。

参考文献:

- 陈杰, Scharer K M, Burbank D W, 等. 2005. 利用河流阶地限定活动褶皱的类型和生长机制: 运动学模型 [J]. 地震地质, 27(4): 513–529.
- Chen J, Scharer K M, Burbank D W, et al. 2005. Kinematic models of fluvial terraces over active fault-related folds: constraints on the growth mechanism and kinematics [J]. Seismology and Geology, 27(4): 513–529. (in Chinese)
- 陈俊仁. 2017. 昌吉市地下水资源超采影响分析及应对措施 [J]. 水资源开发与管理, (8): 26–28, 32.
- Chen J R. 2017. Analysis on groundwater resources over exploitation influence in Changji and countermeasures [J]. Water Resources Development and Management, (8): 26–28, 32. (in Chinese)

- 陈立春. 2011. 北天山乌鲁木齐转换区构造系晚第四纪活动性[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- Chen L C. 2011. Late quaternary behavior of active tectonic system in the Urumqi transform region of the North Tianshan[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 陈伟, 郝晋进, 张健, 等. 2010. 昌吉背斜构造浅析[J]. 天然气勘探与开发, 33(4): 25–28.
- Chen W, Hao J J, Zhang J, *et al.* 2010. Changji anticlinal structure[J]. Natural Gas Exploration and Development, 33(4): 25–28. (in Chinese)
- 陈颢. 2009. 汶川地震是由水库蓄水引起的吗? [J]. 中国科学: 地球科学, 39(3): 257–259.
- Chen Y. 2009. Was the Wenchuan earthquake caused by reservoir water storage? [J]. Scientia Sinica Terrae, 39(3): 257–259. (in Chinese)
- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 等. 1999. 乌鲁木齐山前拗陷逆断裂—褶皱带及其形成机制[J]. 地学前缘, 6(4): 191–201.
- Deng Q D, Feng X Y, Zhang P Z, *et al.* 1999. Reverse fault and fold zone in the Urumqi range—front depression of the Northern Tianshan and its genetic mechanism[J]. Earth Science Frontiers, 6(4): 191–201. (in Chinese)
- 顾功叙. 1984. 中国地震目录(公元前 1831 年—公元 1969 年)[M]. 北京: 地震出版社.
- Gu G X. 1984. Catalogue of Chinese Earthquakes, 1831BC—1969AD [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 管树巍, 张朝军, 何登发, 等. 2006. 前陆冲断带复杂构造解析与建模——以准噶尔盆地南缘第一排背斜带为例[J]. 地质学报, 80(8): 1131–1140.
- Guan S W, Zhang C J, He D F, *et al.* 2006. Complex structural analysis and modeling: the first row of anticlinal belt on the southern margin of the Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(8): 1131–1140. (in Chinese)
- 郭召杰, 邓松涛, 魏国齐, 等. 2007. 天山南北缘前陆冲断构造对比研究及其油气藏形成的构造控制因素分析[J]. 地学前缘, 14(4): 123–131.
- Guo X J, Deng S T, Wei G Q, *et al.* 2007. Comparative study of the foreland thrust belts of South and North Tianshan and implications for hydrocarbon accumulation[J]. Earth Science Frontiers, 14(4): 123–131. (in Chinese)
- 侯金欣, 王宝善. 2017. 2014 年鲁甸 $M_s 6.5$ 地震前后地震活动性[J]. 地球物理学报, 60(4): 1446–1456.
- Hou J X, Wang B S. 2017. Temporal evolution of seismicity before and after the 2014 Ludian $M_s 6.5$ earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(4): 1446–1456. (in Chinese)
- 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.
- Hua W, Chen Z L, Zheng S H, *et al.* 2012. Differences existing in characteristics of source parameters between reservoir induced seismicity and tectonic earthquake—a case study of Longtan reservoir[J]. Progress in Geophysics, 27(3): 924–935. (in Chinese)
- 黄媛, 杨建思, 张天中. 2006. 2003 年新疆巴楚—伽师地震序列的差分法重新定位研究[J]. 地球物理学报, 49(1): 162–169.
- Huang Y, Yang J S, Zhang Z T. 2006. Relocation of the Bachu—Jiashi, Xinjiang earthquake sequence in 2003 using the double—difference location algorithm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 49(1): 162–169. (in Chinese)
- 姜金钟, 付虹, 陈棋福. 2016. 位于构造活跃区的小湾水库地震活动特征——基于地震精定位的分析[J]. 地球物理学报, 59(7): 2468–2485.
- Jiang J Z, Fu H, Chen Q F. 2016. Characteristics of seismicity of the Xiaowan reservoir in an area of tectonics from double—difference relocation analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(7): 2468–2485. (in Chinese)
- 蒋海昆, 张晓东, 单新建. 2014. 中国大陆水库地震统计特征及预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社.
- Jiang H K, Zhang X D, Shan X J. 2014. Research on statistical characteristics and prediction methods of reservoir earthquakes in mainland China[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 李本亮, 管树巍, 陈竹新, 等. 2012. 楔形构造在山前冲断构造位移动量消减中的作用——以准噶尔盆地南缘为例[J]. 地质学报, 86(6): 890–897.
- Li B L, Guan S W, Chen X Z, *et al.* 2012. The effect of wedge structure on displacement subduction of piedmont thrust structure: A case study of the southern margin of Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 86(6): 890–897. (in Chinese)
- 李艳永, 杨佳佳, 王成虎, 等. 2018. 呼图壁地区震源机制解及构造应力场特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 38(12): 1246–1250.
- Li Y Y, Yang J J, Wang C H, *et al.* 2018. The focal mechanism solution and stress field inversion of earthquakes along Hutubi[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 38(12): 1246–1250. (in Chinese)
- 李永莉, 秦嘉政, 董天禹, 等. 2004. 澜沧江漫湾电站水库诱发地震分析[J]. 地震地磁观测与研究, 25(3): 51–57.
- Li Y L, Qin J Z, Dong T Y, *et al.* 2004. Analysis on reservoir induced seismicity at Manwan Power Station on Lancang River[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 25(3): 51–57. (in Chinese)
- 刘瑞丰, 陈运泰, 薛峰, 等. 2018. 如何正确使用新的震级国家标准[J]. 地震地磁观测与研究, 39(4): 1–11.
- Liu R F, Chen Y T, Xue F, *et al.* 2018. How to use the new national Standard of magnitude correctly[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 39(4): 1–11. (in Chinese)
- 秦嘉政, 刘丽芳, 钱晓东. 2009. 水库诱发地震活动特征及其预测方法研究[J]. 地震研究, 32(2): 105–113.
- Qin J Z, Liu L F, Qian X D. 2009. Research on characteristics and prediction of reservoir induced seismicity[J]. Journal of Seismological Research, 32(2): 105–113. (in Chinese)
- 苏乃秦, 刘启泓, 龙海英. 2001. 新疆北天山中长期地震活动形势分析[J]. 内陆地震, 15(3): 201–210.
- Su N Q, Liu Q H, Long H Y. 2001. Analysis on moderate, long—term seismicity trend in North Tianshan, Xinjiang[J]. Inland Earthquake, 15(3): 201–210. (in Chinese)

- 汪一鹏,沈军. 2000. 天山北麓活动构造基本特征[J]. 新疆地质, 18(3):203-210.
- Wang Y P, Shen J. 2000. Basic features of active structures at the Northern foothill of Tianshan Mountains, China[J]. Xinjiang Geology, 18(3):203-210. (in Chinese)
- 王天宝,贾东,魏东涛,等. 2013. 准噶尔盆地南缘中生代正反转构造分析[J]. 地质科学, 48(1):176-190.
- Wang T B, Jia D, Wei D T, et al. 2013. Mesozoic inverted structure analysis of the southern margin of the Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 48(1):176-190. (in Chinese)
- 王永涛. 2011. 新疆昌吉市努尔加水库工程施工总布置设计[J]. 黑龙江水利科技, 39(2):60-62.
- Wang Y T. 2011. General layout design of Nurja Reservoir project in Changji, Xinjiang[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 39(2):60-62. (in Chinese)
- 杨晓平,邓起东,张培震,等. 2008. 天山山前主要推覆构造区的地壳缩短[J]. 地震地质, 30(1):111-131.
- Yang X P, Deng Q D, Zhang P Z, et al. 2008. Crustal shortening of major Nappe structures on the front margins of the Tianshan[J]. Seismology and Geology, 30(1):111-131. (in Chinese)
- 易桂喜,龙锋,梁明剑,等. 2017. 2016年9月23日四川理塘M4.9和M5.1地震震构造分析[J]. 地震地质, 39(5):949-963.
- Yi G X, Long F, Liang J M, et al. 2017. Seismogenic structure of the M4.9 and M5.1 Litang earthquakes on 23 September 2016 in Southwestern China[J]. Seismology and Geology, 39(5):949-963. (in Chinese)
- 易立新,车用太,王广才. 2003. 水库诱发地震研究的历史、现状与发展趋势[J]. 华南地震, 23(1):28-37.
- Yi L X, Che Y T, Wang G C. 2003. Retrospection and prospect of the research on reservoir induced seismicity[J]. South China Journal of Seismology, 23(1):28-37. (in Chinese)
- 张国民,马宏生,王辉,等. 2005. 中国大陆活动地块边界带与强震活动[J]. 地球物理学报, 48(3):602-610.
- Zhang G M, Ma H S, Wang H, et al. 2005. Boundaries between active-tectonic blocks and strong earthquakes in the China mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 48(3):602-610. (in Chinese)
- 张培震,邓起东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学, 33(S1):12-20.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. 2003. Strong earthquakes and active-tectonic blocks in the China mainland[J]. Scientia Sinica Terrae, 33(S1):12-20. (in Chinese)
- 张婉君. 2020. 水文监测在新疆三屯河碾盘庄水文站的应用研究[J]. 地下水, 42(6):204-205.
- Zhang W J. 2020. Research on the application of hydrological monitoring at Nianpanzhuang Hydrological Station in Santun River, Xinjiang[J]. Ground Water, 42(6):204-205. (in Chinese)
- 张子凤. 2014. 努尔加水库地质灾害危害性分析及建议[J]. 中国谁能及电气化, (6):27-30.
- Zhang Z F. 2014. Nurga Reservoir geological disaster hazard analysis and recommendations[J]. China Water Power and Electrification, (6):27-30. (in Chinese)
- 周斌,薛世峰,邓志辉,等. 2010. 水库诱发地震时空演化与库水加卸载及渗透过程的关系——以紫坪铺水库为例[J]. 地球物理学报, 53(11):2651-2670.
- Zhou B, Xue S F, Deng Z H, et al. 2010. Relationship between the evolution of reservoir-induced seismicity in space-time and the process of reservoir water body load-unloading and water infiltration—a case study of Zipingpu reservoir[J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(11):2651-2670. (in Chinese)
- GB 17740—2017, 地震震级的规定[S].
- GB 17740—2017, General ruler for earthquake magnitude[S]. (in Chinese)
- Beck J. 1976. Weight-induced stresses and the recent seismicity at Lake Oroville, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 66(4):1121-1131.
- Gong Z, Jing Y, Li H, et al. 2019. Static-dynamic strain response to the 2016 M6.2 Hutubi earthquake (eastern Tien Shan, NW China) recorded in a borehole strainmeter network[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 183:103958.
- Gough D I, Gough W I. 1970. Load-induced earthquakes at Lake Kariba-II[J]. Geophysical Journal International, 21(1):79-101.
- Gupta H K, Rastogi B K, Narain H. 1972. Some discriminatory characteristics of earthquakes near the Kariba, Kremasta, and Koyna artificial lakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 62(2):493-507.
- Gupta H K. 1983. Induced seismicity hazard mitigation through water level manipulation at Koyna, India: A suggestion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 73(2):679-682.
- Gupta H K. 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India[J]. Earth-Science Reviews, 58(3-4):279-310.
- Ji Z, Wang B, Yang W, et al. 2021. Observation of higher-mode surface waves from an active source in the Hutubi Basin, Xinjiang, China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 111(3):1181-1198.
- Kandula N, McBeck J, Cordonnier B, et al. 2022. Synchrotron 4D X-ray imaging reveals strain localization at the onset of system-size failure in Porous Reservoir rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 179:325-350.
- Klein F W. 2002. User's guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran program to solve for earthquake locations and magnitudes[R]. U. S. Geological Survey, doi:10.13140/2.14859.3602.
- McGarr A, Simpson D, Seeber L. 2002. 40 Case histories of induced and triggered seismicity[J]. International Geophysics, 81(2):647-661.
- Meng X, Yu X, Peng Z, et al. 2012. Detecting earthquakes around Salton Sea following the 2010 M_w7.2 El Mayor-Cucapah Earthquake Using GPU Parallel Computing[J]. Procedia Computer Science, 9:937-946.
- Peng Z, Zhao P. 2009. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake[J]. Nature Geoscience, 2:877-881.
- Qiu J, Rao G, Wang X, et al. 2019. Effects of fault slip distribution on the

- geometry and kinematics of the southern Junggar fold – and – thrust belt, northern Tian Shan [J]. *Tectonophysics*, 772:228209.
- Shelly D R, Beroza G C, Ide S. 2007. Non – volcanic tremor and low – frequency earthquake swarms [J]. *Nature*, 446:305 – 307.
- Sun A, Sun Y, Zhang H, *et al.* 2012. 1 – D P – and S – wave velocity models for the collision zone between the northern Tianshan mountain and the Junggar basin based on local earthquake data [J]. *Earthquake Science*, 25:495 – 503.
- Talwani P. 1997. On the nature of reservoir – induced seismicity [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 150:473 – 492.
- Thomas A D, Kathleen A I, David J H, *et al.* 2017. Strain localization and elastic – plastic coupling during deformation of porous sandstone [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 98:167 – 180.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double – difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6):1353 – 1368.
- Waldhauser F, Schaff D P. 2008. Large – scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross – correlation and double – difference methods [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113:B08311.
- Wang X, Xu C, Wen Y, *et al.* 2019. The 2016 M_w 6.0 Hutubi earthquake: A blind thrust event along the northern Tian Shan front [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 173:79 – 87.
- Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4):859 – 869.
- Wiemer S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP [J]. *Seismological Research Letters*, 72(3):373 – 382.
- Yang H, Zhu L, Chu R. 2009. Fault – plane determination of the 18 April 2008 Mount Carmel, Illinois, Earthquake by detecting and relocating aftershocks [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6):3413 – 3420.
- Zhang B, Wang B, Wei B, *et al.* 2022. Spatiotemporal evolution of seismicity during the cyclic operation of the Hutubi underground gas storage, Xinjiang, China [J]. *Scientific Reports*, 12:14427.

Seismicity in the Region around the Nurga Reservoir in Xinjiang

ZHANG Bo^{1,6}, WANG Baoshan^{1,2,3}, LI Lu¹, WEI Bin⁴, SU Jinbo^{1,5,4}

(1. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

(2. *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

(3. *Mengcheng National Geophysical Observatory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

(4. *Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China*)

(5. *Urumqi Institute of Central Asia Earthquake, China Earthquake Administration, Urumqi 830011, Xinjiang, China*)

(6. *School of Earth Sciences, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China*)

Abstract

Reservoirs located in the area with active tectonics are threatened by both tectonic earthquakes and reservoir – triggered earthquakes. To further understand the relationship between the reservoir impoundment and the seismicity in the active tectonic zone, we detected the earthquake events around the Nurga Reservoir from 2014 to 2018 using the matched filter technique (MFT) and the double – difference location (hypoDD) method. As a result, the minimum magnitude of completeness (M_c) dropped from 1.1 to 0.5, while b – value was 0.86. More than 2 600 events were detected and 1 064 of them were relocated. Two earthquake clusters occurred within 5 km in the lower reaches of the Nurga Reservoir area after the Reservoir's impoundment. They were generated by different seismogenic structures controlled by the Changji anticline and the Kalazha anticline respectively. The seismicity in this area correlated well with the periodic changes of the Reservoir's water level. The water flows along the glutenite layer to the earthquake source area, causing the tectonic stress release. This is the main reason for the seismicity in the reservoir area.

Keywords: the Nurga Reservoir; micro – earthquake detection; waveform cross – correlation; earthquake location; seismicity