

结合波形互相关技术的龙滩水库地震双差定位^{*}

阎春恒, 周 斌, 郭培兰, 孙学军, 文 翔

(广西壮族自治区地震局, 广西南宁 530022)

摘要: 利用结合波形互相关技术的双差定位法对龙滩库区 2006 年 9 月 30 日至 2013 年 5 月 26 日发生的 3 682 次地震进行精定位, 获得了精度更高的定位结果, 平均理论误差小于 10 m。精定位结果显示: 蓄水后龙滩库区中小地震活动呈现明显的丛集性, 主要集中在罗妥、八茂、拉浪、坝首、布柳河以及库区下游的天峨县城 6 个区域, 每个地震丛的分布范围在 10 km 内, 优势深度为 4~9 km, 优势展布方向与穿过该地震丛的主要断裂带的走向或倾向一致, 表明库区地震活动基本分布在河流及断层附近 10 km 范围内, 表现出水库诱发地震活动典型的“双十”特征。研究成果可为龙滩水库续建工程诱发地震的预测与地震安全性评价提供依据。

关键词: 水库诱发地震; 地震精定位; 双差定位法; 波形互相关; 龙滩库区

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)03-0427-09

0 引言

水库诱发地震 (Reservoir-induced seismicity, 简称 RIS) 是由水库蓄水或排水过程引发的在一定时间内库区及其周边小区域范围内发生的地震活动 (秦嘉政等, 2009)。20 世纪 60 年代, 全球接连发生水库诱发的 6 级以上强震, 于是 RIS 开始引起社会各界的广泛关注, 一些学者分别从 RIS 的地震学特征、易于诱发地震的地质构造条件、诱震机理及预测评价方法等方面开展研究, 取得了许多重要的认识, 特别是近年来的研究更加注重通过对数字地震观测资料的精细分析, 认识水库地震发生的环境及机理、水库地震与天然地震震源特征的差异等 (Ross *et al.*, 1999; 华卫等, 2012)。而对库区地震事件的精确定位是以上研究的基础, 尤其是震源深度的精确测定是揭示特定属性的水库体系在库水的动态加卸载过程中, 库区下部介质和应力场发生响应的重要“云图” (陈翰林等, 2009a)。传统地震定位方法的精度受地下速度结构、台网几何形状、震相到时读数精度等因素的影响 (张爱民, 李强, 2006)。近年来, 双差定位法在国内外得到较广泛的应用 (Waldhauser, Ellsworth, 2000, 2002; 杨智娴等, 2003, 2011; 杨中书, 曾文敬, 2007; 李乐等, 2007; 卢显, 周龙

泉, 2011; 徐甫坤等, 2015), 该方法可以在很大程度上减小对地壳速度模型的依赖性, 通过选取相关性较强的地震对, 并调节地震对震源位置的矢量差, 使剩余残差最小, 但在震相到时拾取方面仍不能有效降低人为误差的影响。波形互相关技术可以对 P 波、S 波到时进行校正, 使部分震相到时读数精度达到百分之几秒, 某些震相甚至可达到 7‰ s (William, 1999)。因此, 结合波形互相关技术的双差定位法 (DD + WCC) 是一种较有发展前景的地震定位方法 (Schaff, Richards, 2004; 黄媛, 2008), 在一些应用实践中已经取得了较理想的结果。

广西龙滩水库位于珠江干流红水河上游的广西天峨县境内, 坝高 220 m, 正常蓄水位 400 m, 总库容 $273 \times 10^9 \text{ m}^3$, 属于高山峡谷型高坝大库容水库, 库区地势西高东低, 水库主要由红水河、布柳河、南盘江、北盘江、蒙江及曹渡河汇聚而成。龙滩水电站于 2001 年 7 月开工建设, 2006 年 9 月 30 日开始蓄水, 电站安装 9 台 $70 \times 10^4 \text{ kW}$ 的水轮发电机组, 总装机容量 $630 \times 10^4 \text{ kW}$, 年均发电量 $187 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 是国内在建的仅次于长江三峡及金沙江溪洛渡的特大型水电工程。龙滩水库蓄水后, 库区地震开始活跃, 并随水位季节性波动而起伏变化。陈翰林等 (2009a) 对 2006~2007 年龙滩库区发生的地震活动开展了精定位研究。

^{*} 收稿日期: 2015-10-03.

基金项目: 广西科技攻关计划 (14124004-4-8、1377002)、地震科技星火计划 (XH14041Y) 和中国地震局“三结合”课题 (龙滩水库中等地震前兆特征分析) 联合资助。

在此基础上,一些学者分别从库区深部速度结构与电性结构(王立凤等,2010; Zhou *et al.*, 2011, 2012; 詹艳等, 2012a, b)、震源机制与应力场(陈翰林等, 2009b; 史海霞, 赵翠萍, 2010)、孔隙压力扩散(刘耀炜等, 2011)等不同的角度初步讨论了诱发地震活动可能的成因机制,但有待结合水库荷载作用与渗透作用进行细致的定量研究(陈翰林等, 2009a)。目前,龙滩水库蓄水已逾9年,库区地震活动仍在发展演化。鉴于龙滩水库工程的重要性及进一步精细化研究的需求,本文利用结合波形互相关技术的双差定位法,对龙滩库区2006年9月30日至2013年5月26日发生

的地震进行精确定位。

1 研究区概况

1.1 地质构造概况

龙滩库区横跨广西天峨县和贵州罗甸县,地处云贵高原南缘向桂西北山区与丘陵过渡的斜坡地带。在大地构造上,库区及邻近区域位于华南褶皱系的二级构造单元右江褶皱带内。根据野外地质地貌和地震地质调查,研究区范围(24.8°~5.5°N; 106.5°~107.3°E)内发育有NW、NNW、NE和近SN向4组断裂(图1),它们多属于与印

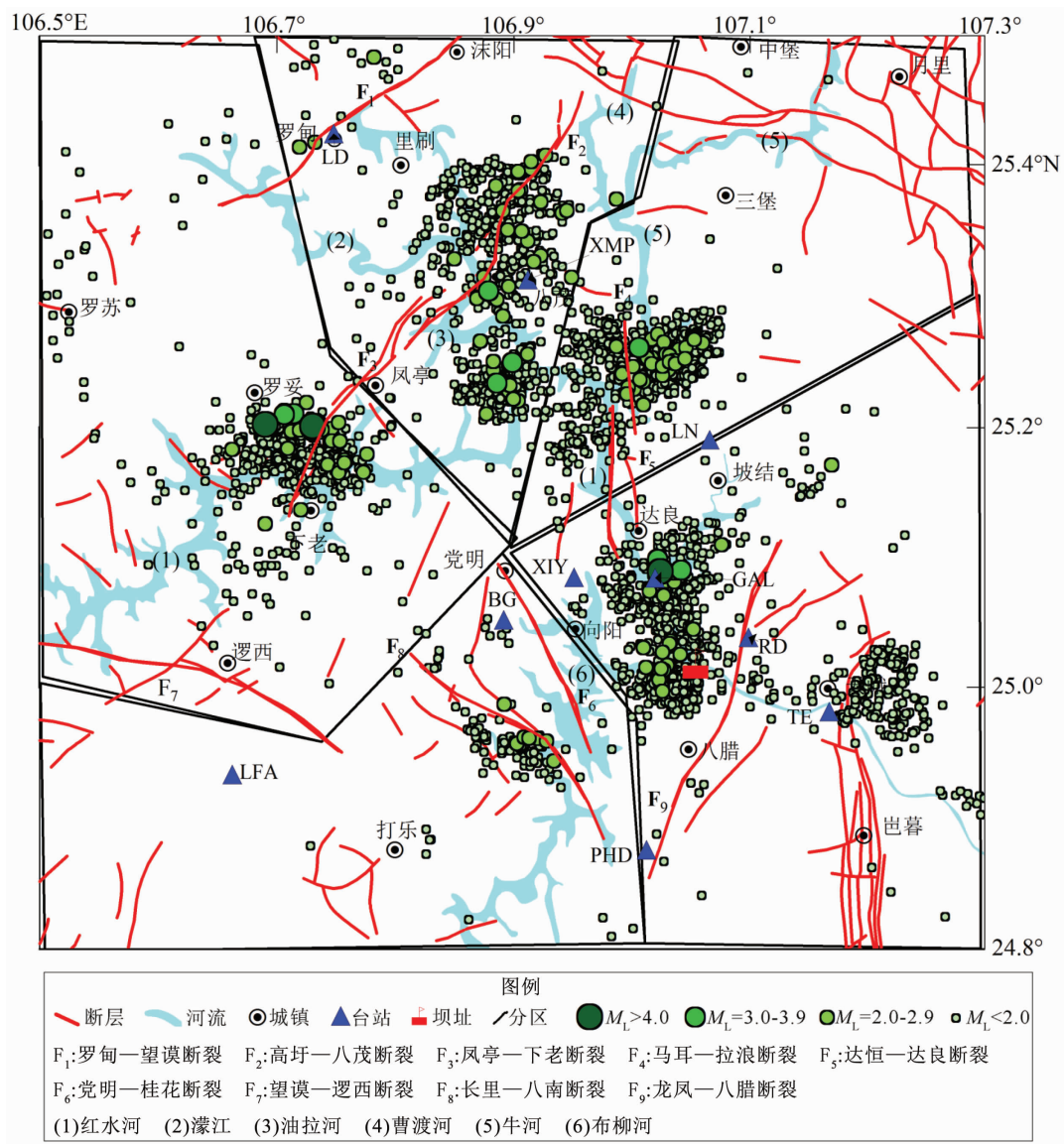


图1 龙滩水库断裂、河流、台站及蓄水后地震分布图(地震为广西地震台网中心定位结果)
Fig. 1 Distribution map of fault, river, station and earthquakes after reservoir impoundment in the Longtan Reservoir and its adjacent region (the earthquakes are located by Guangxi Seismic Network)

支褶皱相伴形成的断裂构造，倾角陡立，延伸不远，规模较小。库坝区附近的主要构造有位于其西翼呈 NNE 走向的龙凤—八腊断裂 (F_9)，该断裂发育于三叠系与二叠系间，区内长约 25 km，为一高角度向西倾斜的正断层。在库坝区的西南部，主要分布有 NNW 向的望漠—逻西断裂 (F_7) 和 NW 向的长里—八南断裂 (F_8)、党明—桂花断裂 (F_6)，其中： F_7 断裂呈左阶斜列式展布，由多个次级小断层和基岩断裂破碎带组成，区内长约 28 km； F_8 断裂为二叠系灰岩中发育的劈理密集带和柔褶变形带，倾向 SW，逆断走滑运动性质； F_6 断裂发育在中三叠统砂泥岩地层中，亦具逆断走滑运动性质。在库区西北部，主要分布大体呈 NE 走向的罗甸—望漠断裂 (F_1)、高圩—八茂断裂 (F_2) 和风亭—下老断裂 (F_3)，其中： F_1 断裂东北段为古生界与中生界的分界，西南段插入中生界地层中，区内长约 26 km； F_2 和 F_3 断裂切割二叠系及三叠系，断裂破碎带发育，宽达 30 ~ 100 m，断面呈舒缓波状，这 2 条断裂倾向相反，以右旋走滑运动为主。在大坝正北面，主要构造有达良背斜及其东西两翼呈近 SN 走向的马耳—拉浪断裂 (F_4) 和达恒—达良断裂 (F_5)，这 2 条断裂倾向相反，均为正断走滑运动性质。根据构造地貌、地质剖面揭露的断裂活动性以及所获得的年代学证据，除 F_1 、 F_5 和 F_7 为前第四纪活动断裂外，其余断裂在早—中更新世均有不同程度的活动，断裂破碎带发育，裂隙和岩溶裂隙泉沿断裂带呈线状分布（向宏发，周庆，2006；郭培兰等，2006；周斌等，2014）。

1.2 地震监测台网

龙滩数字遥测地震台网于 2006 年 3 月开始正式运行，由布设在龙滩水库周围的 12 个台站（杠里和向阳台 2010 年建成使用）以及 2 个信号中继站和 1 个台网中心组成，部分台站位置见图 1。台站均采用 24 位数据采集器，采样率 100 Hz，其中天峨台为 CMG-3ESPC 型宽频带地震计，杠里和向阳台为 FSS-3M 型短周期地震计，另外 9 个台为 FSS-3B 型的短周期地震计，这 3 种地震计分别在 0.03 ~ 40 Hz、2 s ~ 50 Hz、1 ~ 40 Hz 速度幅频特性平坦。网径在东西方向约 90 km，南北方向约 73 km。坝址上游 20 km 至坝址下游 5 km 的监测能力达 $M_L 0.5$ ， $M_L 1.0$ 监测能力涵盖了库区 50 km 范围（姚宏等，2008）。

1.3 地震活动

龙滩库区从 2006 年 9 月下闸蓄水至 2013 年 5 月 26 日，共记录 3 682 次 $M_L \geq 0.0$ 地震，其中 $M_L 1.0 \sim 1.9$ 的 837 次； $M_L 2.0 \sim 2.9$ 的 128 次； $M_L 3.0 \sim 3.9$ 的 8 次； $M_L 4.0 \sim 4.9$ 的 3 次，分别为 2007 年 3 月 17 日罗甸 $M_L 4.0$ 地震、2007 年 7 月 17 日天峨 $M_L 4.5$ 地震和 2010 年 9 月 18 日罗甸 $M_L 4.8$ 地震。根据广西地震台网中心定位结果，将库区 $M_L \geq 0.0$ 地震划分为 5 个区（图 1），运用结合波形互相关技术的双差定位法进行重新定位。

2 研究方法与资料处理

2.1 双差定位法

Waldhauser 和 Ellsworth (2000) 提出的双差地震定位法使用地震对走时差观测值与理论计算值的残差（“双差”）来反演地震丛中每个地震与地震丛集矩心的相对位置（Waldhauser, 2011），可大大减少地壳速度结构模型不精确导致的误差。对于同一台站 k 记录到的地震事件 i, j ，双差 dr_k^{ij} 定义为

$$dr_k^{ij} = r_k^i - r_k^j = (T_k^i - T_k^j)^{\text{obs}} - (T_k^i - T_k^j)^{\text{cal}} = (t_k^i - t_k^j) - (t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}}. \quad (1)$$

式中， r_k^i 和 r_k^j 分别为地震 i, j 在台站 k 的残差（理论到时与观测到时之差）； T_k^i 和 T_k^j 分别为地震 i, j 在台站 k 的地震波到时，对应走时分别为 t_k^i 和 t_k^j ； $(t_k^i - t_k^j)^{\text{obs}}$ 为地震对走时差观测值， $(t_k^i - t_k^j)^{\text{cal}}$ 为地震对走时差理论值。将走时差按公式 $r_k^i = \frac{\partial t_k^i}{\partial m}$

Δm^i 展开得

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j. \quad (2)$$

式中， Δm ($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \tau$) 为震源参数扰动量。将所有台站记录到的所有事件的双差方程联立可得到如下线性方程组：

$$WGm = Wd. \quad (3)$$

式中， G 为 $M \times 4N$ 的偏微分矩阵， M 是双差的观测数， N 是事件数的矩阵， m 为震源参数扰动量， W 为对每个方程加权的对角矩阵， d 为双差向量。求解 (3) 式，可得到震源参数。

2.2 波形互相关

震源机制相似和震源位置相近的 2 个地震到达某较远台站时，它们的波形可能相似。通过波形互相关技术校正后的 P 波震相到时读数精度比较正前高 1~2 个数量级 (Schaff, Richards, 2004)。针对人工标定的震相到时因人为因素可能存在不够精确或者错误的情况，本文运用波形互相关技术进行校正。互相关函数定义为

$$C(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+\tau)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)\sum_{n=0}^{N-1} y^2(n)}}.$$

(4)

式中， $x(n)$ 和 $y(n)$ 为地震对的时间序列。

将龙滩库区事件波形转换成 SAC 格式，进行去均值、去趋势等预处理，并在 1.5~10 Hz 范围内进行滤波；以事件发震时刻为时间零点，分别在 Pg 波和 Sg 波到时前后取一段波形进行互相关分析。其中，Pg 波到时之前截取 0.3 s、之后截取 1 s，Sg 波到时之前截取 0.5 s、之后截取 1.5 s，允许最大偏移均为 0.5 s。互相关计算过程中，如果相关系数阈值设定过高，可用数据会非常少，如果阈值设定过低，则很可能会有一些不真实的走时差数据参与到最后定位运算中。为提高数据的可靠性，将阈值设为 0.7，共获得 Pg 波到时差数据 255 816 条，Sg 波到时差数据 248 409 条。图 2 为对 4 个台站记录到的同一事件对做 Pg 波互相关示意图，给出了时间补偿及相关系数 (表 1)。对所有事件对时间补偿 (绝对值) 的统计结果显示 (图 3)，人工读取震相误差为 0~0.25 s，且 Pg 波的读取误差较 Sg 波的小。

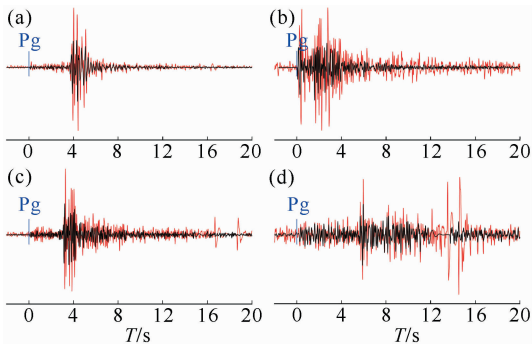


图 2 Pg 波互相关的部分图形
(a) XMP; (b) RD; (c) PHD; (d) JL
Fig. 2 Examples of waveform of cross-correlation about Pg wave

2.3 资料处理与模型参数

由于 Sg 波到时的人工拾取精度较 Pg 波低 (图 3)，设置 Pg 波震相权值为 1，Sg 波震相权值为

表 1 图 2 中地震对的详细信息

Tab. 1 Detailed information of seismic doublet showing in Fig. 2

事件对			
红色波形: 2009-02-05		00:47:21 M_L 0.3	
黑色波形: 2009-04-09		15:13:05 M_L 1.0	
台站	震相	互相关系数	事件延迟/s
XMP	Pg	0.783 8	0.05
RD	Pg	0.752 7	0.10
PHD	Pg	0.706 2	0.06
JL	Pg	0.871 5	0.01

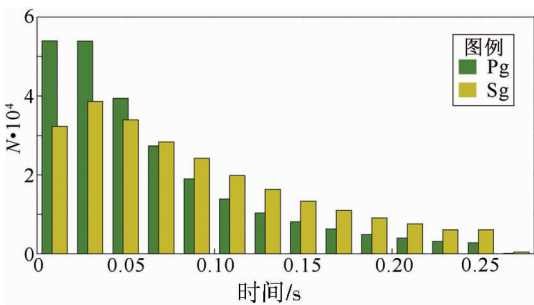


图 3 波形互相关的时间补偿统计
Fig. 3 Statistics of time compensation of waveform cross-correlation

0.5。对数据进行筛选处理，具体设定事件对之间的最大距离为 10 km，事件的最大邻居数为 20，1 个邻居所需要的最小震相对以及事件对使用的最小震相的数目均为 6，事件对使用最大震相对数目为 60。选择华南地壳速度结构模型为初始速度模型，从地表至 43 km 的莫霍面处分为 5 层，其顶部深度分别为 0、2.0、12.0、32.0 和 43.0 km，对应的 P 波速度分别为 3.70、4.85、5.90、6.35 和 8.1 km/s，波速比 V_p/V_s 取拟合值 1.687 (郑圻森等, 2003; 陈翰林等, 2009a)。设定定位初始位置从每个分区地震群的中心开始，采用共轭梯度法，分别对 5 个分区的地震进行重新定位。迭代组数均为 5 组，每组做 5 次迭代计算，每次迭代过程中震源位置和偏导数同时更新，每次迭代的阻尼值均在 60~100 之间选取。

3 结果分析

3.1 精定位结果及误差分析

双差定位共获得 3 082 个地震重定位结果，占原地震数的 83.7% (图 4)。与台网定位结果相比 (图 1)，精定位结果的地震震中水平向平均偏移

2.195 km, 深度平均偏移 1.167 km, 水平向最大误差 76.6 m, 深度最大误差 88.8 m, 水平向和深度的平均误差分别为 6.2 m 和 8.3 m。挑选 2008 年记录的布柳河地震丛的 72 个地震事件, 分别采用奇异值分解法和共轭梯度法进行定位, 以对本文定位结果精度进行评价。结果显示, 2 种方法定位结果的空间分布基本一致。

定位残差随纬度分布结果显示 (图 5), 仅利用震相报告资料的定位结果最大残差达 0.95 s, 平均残差 0.158 s, 加入波形互相关资料校正后, 定位结果最大残差降至 0.043 s, 平均残差仅为 0.003 s。进一步分析发现, 残差相对较大的定位结果主要

位于 25.10°N 以北区域。库区地震台站主要布设在坝首周围, 库区上游地区只有里纳 (LN)、小苗坡 (XMP) 和罗甸台 (LD), 台站少、分布不合理是导致上游地区地震定位结果误差较大的主要因素。总体而言, 本文采用结合波形互相关技术的双差定位方法重新定位的结果精度大大改善, 空间展布和深度分布也更集中。

3.2 地震空间分布特征

从图 4 可以看出, 龙滩水库蓄水后地震活动呈现出明显的丛集性, 主要分布在罗妥 (丛 I)、八茂 (丛 II)、拉浪 (丛 III)、坝首 (丛 IV)、布柳河 (丛 V) 和天峨 (丛 VI) 地区。其中, 前 5 个

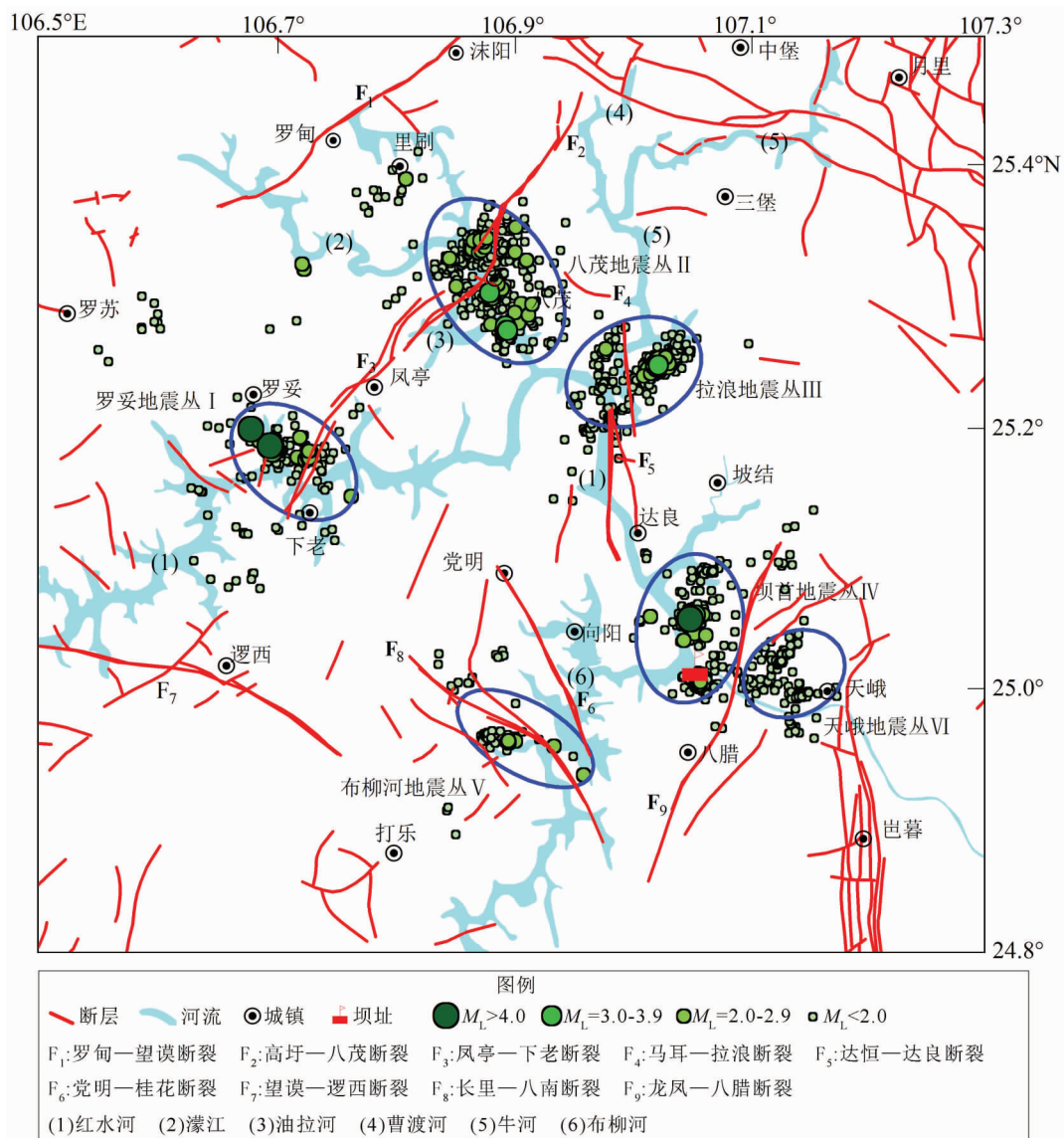


图 4 结合波形互相关技术的双差定位法定位结果

Fig. 4 Relocation result by using double-difference location algorithm combined with waveform cross-correlation technique

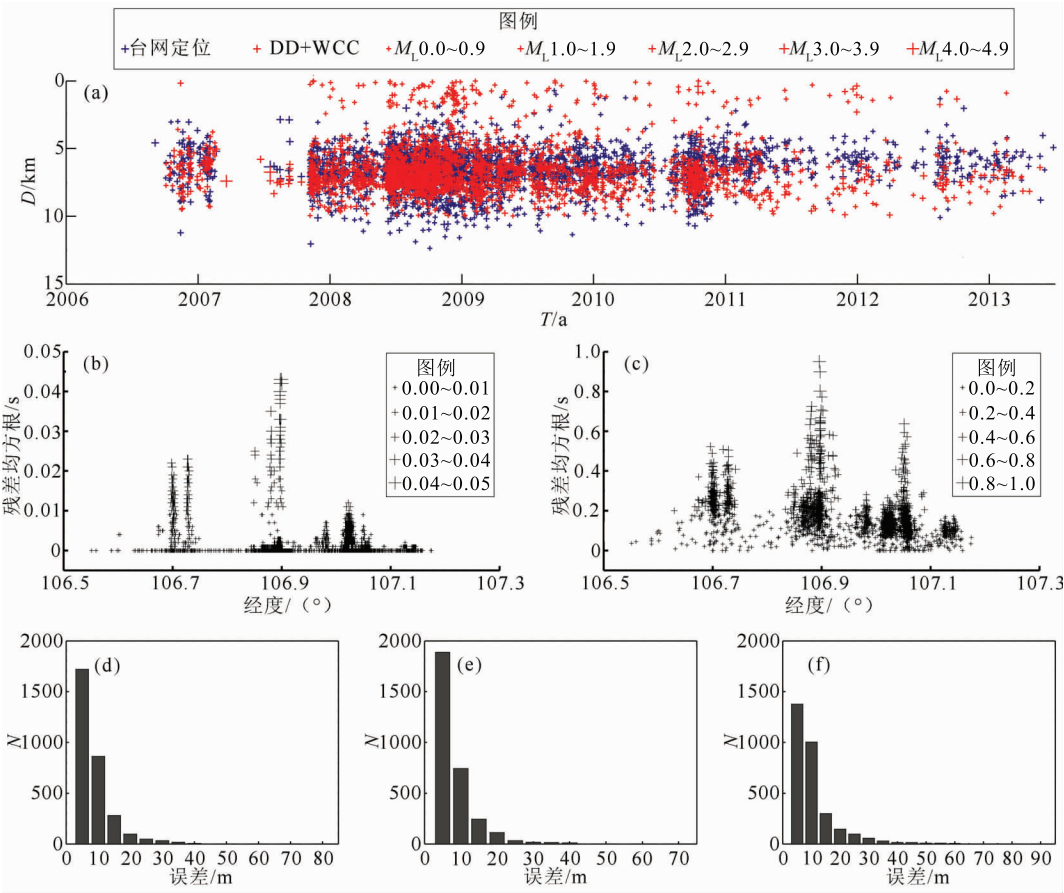


图5 台网定位和双差定位结果的震源深度对比及精定位结果误差统计
(a) 台网定位和双差定位结果的震源深度分布随时间变化图；(b) 采用地震目录和波形互相关资料联合定位结果的残差均方根；(c) 只采用地震目录资料定位结果的残差均方根；东西向 (d)、南北向 (e) 和垂直向 (f) 的定位误差

Fig. 5 Comparison of focal depth located by network catalogue and double-difference location and statistics of precise relocation result error

(a) focal depth located by network catalogue and double-difference location vary with time; (b) residual RMS of joint relocation by catalogue and waveform cross-correlation technique; (c) residual RMS of relocation by double-difference algorithm with catalogue merely; the location error in east-west (d), north-south (e) and vertical (f) respectively

地震丛均位于水库蓄水后淹没的深水区，最大水深分别达 194 m、156 m、147 ~ 178 m、194 m 和 154 m (常宝琦, 1986)。各地震丛分布特点如下：

地震丛 I 分布于罗妥至下老一带，F₃ 断裂南段与红水河交汇处附近。除 F₃ 断裂外，周围还分布一些小尺度的 NE 和 NW 向断裂。地震展布长轴 9 km，短轴 5 km，优势分布与 F₃ 断裂的倾向一致。与台网定位结果相比，长短轴均缩短了 5 km。库区蓄水以来发生的 3 次 $M_L \geq 4.0$ 地震中，有两次位于该丛，最大为 2010 年 9 月 18 日 $M_L 4.8$ 地震，也是水库下闸蓄水后迄今为止发生的最大地震。

地震丛 II 分布于 F₂ 断裂中段与油拉河交汇处

的八茂附近。小震众多，长轴 11 km，短轴 8.5 km，优势展布与 F₂ 断裂倾向一致。与台网定位结果相比，长短轴分别缩短了 12 km 和 5.5 km，凤亭正东的地震簇向北偏移约 5 km。最大地震为 2008 年 6 月 20 日 $M_L 3.2$ 地震和 2010 年 10 月 7 日 $M_L 3.2$ 地震。

地震丛 III 分布于红水河和牛河交汇的拉中至纳沙一带，F₄ 断裂穿过该丛，并被蓄水后的牛河水域淹没。地震呈 NNE 向优势展布，长轴 10 km，短轴 7 km，与 F₄ 断裂走向相近。与台网定位结果相比，长短轴分别缩短了 10 km 和 3 km。地震活动频度为 6 个地震丛中最高，但强度较弱，最大为 2010 年 1 月 25 日 $M_L 3.0$ 地震。

地震丛Ⅳ分布于拉当一坡结一带, 靠近 F_9 断裂及龙滩水库大坝, 距坝址最近。地震展布长轴 11 km, 短轴 6 km, 优势分布与 F_9 断裂走向一致。与台网定位结果相比, 长短轴分别缩短了 6 km 和 4 km。自水库蓄水开始, 该丛地震一直非常活跃, 频度仅次于地震丛Ⅲ, 最大为 2007 年 7 月 17 日 $M_L 4.5$ 地震。

地震丛Ⅴ分布于大坝以南的布柳河河面较为宽阔的纳宜西岸、 F_8 断裂与布柳河交汇处附近。地震展布长轴 7 km, 短轴 2 km, 优势分布与 F_8 断裂走向吻合。与台网定位结果相比, 长短轴分别缩短了 5 km 和 2.5 km。地震活动频度为 6 个地震丛中最弱, 最大地震为 2007 年 6 月 21 日 $M_L 2.8$ 地震。

地震丛Ⅵ位于水库下游的天峨县城区, 靠近

F_9 断裂及龙滩水库大坝。地震展布长轴 9 km, 较台网定位结果短 2 km, 短轴 8 km, 重定位结果向坝首方向整体移动约 9 km。地震活动强度为 6 个地震丛中最弱, 未记录到 $M_L \geq 2.0$ 地震。

3.3 地震深度分布特征

6 个地震丛震源深度范围分别为 0.3 ~ 11.3 km、0.1 ~ 10.2 km、0.2 ~ 11.7 km、0.6 ~ 12.7 km、0.8 ~ 9.4 km 和 0.3 ~ 12.0 km, 优势深度分别为 6 ~ 9 km、4 ~ 9 km、7 ~ 9 km、6 ~ 8 km、6 ~ 8 km 和 5 ~ 9 km; 地震丛Ⅳ和Ⅴ深度分布相对较浅, 地震丛Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ深度分布更为集中; 除丛Ⅲ外, 2007 年 11 月之后其余 5 个地震丛在 0 ~ 3 km 范围内均存在一定数量的极浅源微震活动 (图 5、6)。

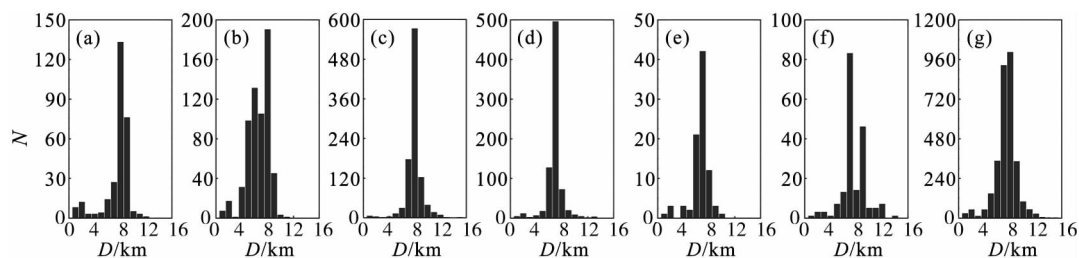


图 6 龙滩水库蓄水后库区地震震源深度统计结果

(a) 地震丛Ⅰ; (b) 地震丛Ⅱ; (c) 地震丛Ⅲ; (d) 地震丛Ⅳ; (e) 地震丛Ⅴ; (f) 地震丛Ⅵ; (g) 所有地震

Fig. 6 Statistical result of focal depth of earthquakes occurred after reservoir impoundment in the Longtan Reservoir region

(a) earthquake clusters I; (b) earthquake clusters II; (c) earthquake clusters III; (d) earthquake clusters IV; (e) earthquake clusters V; (f) earthquake clusters VI; (g) all earthquakes

4 讨论与结论

基于结合波形互相关技术的双差定位方法, 对龙滩水库下闸蓄水后 8 年内库区发生的地震进行重新定位, 采用奇异值分解法和共轭梯度法对定位结果进行评价, 验证了本文定位结果的可靠性。由于双差定位方法对地壳速度模型的依赖性较小, 波形互相关技术的应用对人工拾取震相到时进行了很好的校正, 最大限度降低了速度模型不够精确和震相到时读取误差, 因此重新定位结果的精度显著提高, 平均理论误差小于 10 m。较大地震因记录台站数多, 信息量丰富, 初始定位结果已较准确, 重新定位后震中位置偏移较小。微小地震因台站记录信息较少、波形记录信噪比较低、人工拾取震相误差相对较大等因素, 重新定位结果位置偏移较大。与台网定位结果相比, 重定位

后地震的丛集性更好, 每个地震丛的长短轴均明显缩短, 空间展布更加清晰。凤亭正东的地震簇向北移动了 5 km, 基本由微震组成的天峨地震丛向坝首方向整体偏移约 9 km, 与水库蓄水或断裂的关系更加密切。未获得重定位结果的地震震级基本小于 $M_L 2.0$, 这些地震主要分布在龙滩台网监测能力较弱地区, 因台站记录信息较少或邻居数较少, 在重定位过程中被舍弃。由于库区上游台站偏少, 罗妥、八茂和拉浪地震丛的定位残差相对较大。若更换更高采样率的设备, 并在库区上游和周边加密监测台站, 龙滩台网对库区的地震监控能力和定位精度将得到进一步提高。

研究结果显示, 蓄水后龙滩库区中小地震活动显著增强, 主要丛集在水位较深的罗妥、八茂、拉浪、坝首以及布柳河地区, 此外, 库区下游的天峨县城区也发生了一定数量的微震活动。地震丛的分布范围基本不超过 10 km, 优势深度为

4~9 km, 优势展布方向与穿过各地震丛的主要断裂带的走向或倾向一致。表明库区地震活动基本分布在河流及断层周围不超过 10 km 的范围内, 表现出水库诱发地震活动典型的“双十”特征。本文研究结果及认识可为龙滩水库地震活动特征量化分析、发震机理和预测深入研究、库区地震安全性评价及续建工程提供基础资料和参考。

本文所用波形及震相数据来自广西地震台网中心, 图件采用 Matlab、Adobe Photoshop 及 Adobe Illustrator 软件绘制, 江西省地震局吕坚高级工程师和中国科学院测量与地球物理研究所谢祖军博士为本文提供了波形互相关计算程序及悉心指导。作者谨向以上单位和个人表示衷心感谢。

参考文献:

- 常宝琦. 1986. 龙滩水库诱发地震危险性研究报告[R]. 广州: 广东省地震局.
- 陈翰林, 赵翠萍, 修济刚等. 2009a. 龙滩水库地震精定位及活动特征研究[J]. 地球物理学报, 52(8): 2035–2043.
- 陈翰林, 赵翠萍, 修济刚等. 2009b. 龙滩库区水库地震震源机制及应力场特征[J]. 地震地质, 31(4): 686–698.
- 郭培兰, 姚宏, 袁媛. 2006. 龙滩水库地震危险性分析[J]. 高原地震, 18(4): 17–23.
- 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.
- 黄媛. 2008. 结合波形互相关技术的双差算法在地震定位中的应用探讨[J]. 国际地震动态, 352(4): 29–34.
- 李乐, 陈棋福, 陈颢. 2007. 首都圈地震活动构造成因的小震精定位分析[J]. 地球物理学进展, 22(1): 24–34.
- 刘耀伟, 许丽卿, 杨多兴. 2011. 龙滩水库诱发地震的孔隙压力扩散特征[J]. 地球物理学报, 54(4): 1028–1037.
- 卢显, 周龙泉. 2011. 2007 年宁洱 6.4 级地震序列精定位[J]. 地震地质, 33(3): 560–567.
- 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.
- 史海霞, 赵翠萍. 2010. 广西龙滩库区地震剪切波分裂研究[J]. 地震地质, 32(4): 595–606.
- 王立凤, 詹艳, 赵国泽等. 2010. 广西龙滩库区库水加卸载过程中地下电阻率的变化[J]. 地震地质, 32(4): 586–594.
- 徐甫坤, 张彦琪, 苏有锦. 2015. 2014 年云南盈江 $M_s 6.1$ 地震前后序列分布差异研究[J]. 地震研究, 38(4): 525–534.
- 向宏发, 周庆. 2006. 广西红水河龙滩水电站工程场地地震动参数复核[R]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 杨中书, 曾文敬. 2007. 利用双差法对 2005 年江西九江—瑞昌 5.7 级地震序列重新定位[J]. 地震地磁观测与研究, 28(2): 25–31.
- 杨智娴, 陈运泰, 郑月军等. 2003. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精定位中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 33(增刊 1): 129–134.
- 杨智娴, Brian W S, 陈运泰等. 2011. 1999 年海城—岫岩地震序列的精确定位[J]. 地震学报, 33(3): 271–278.
- 姚宏, 陈鑫, 黄树生等. 2008. 龙滩水电工程数字遥测地震台网监测能力检验[J]. 地震地磁观测与研究, 29(4): 62–66.
- 张爱民, 李强. 2006. 双差定位法在三峡库区地震定位中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3): 73–77.
- 詹艳, 王立凤, 王继军等. 2012a. 广西龙滩库区深部孕震结构大地电磁探测研究[J]. 地球物理学报, 55(4): 1400–1410.
- 詹艳, 王立凤, 肖骑彬等. 2012b. 龙滩库区库水加卸载过程深部电阻率变化与水库地震[J]. 地球物理学报, 55(8): 2625–2635.
- 郑圻森, 朱介寿, 宣瑞卿等. 2003. 华南地区地壳速度结构分析[J]. 沉积与特提斯地质, 23(4): 9–13.
- 周斌, 孙峰, 阎春恒等. 2014. 龙滩水库诱发地震三维孔隙弹性有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, 57(9): 2846–2868.
- Ross A, Foulger G R, Julian B R. 1999. Source processes of industrially-induced earthquakes at the Geysers geothermal area, California[J]. Geophysics, 64(6): 1877–1889.
- Schaff D P, Richards P G. 2004. Lg-wave cross correlation and double-difference location: application to the 1999 Xiuyan, China, sequence[J]. Bull Seism Soc Am, 94(3): 867–879.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California[J]. Bull Seism Soc Am, 90(6): 1353–1368.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2002. Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations[J]. J Geophys Res, 107(B3): 3–1–3–15.
- Waldhauser F. 2011. HypoDD: A Program to Compute Double difference Hypocenter Locations[R]. US Virginia: US Geological Survey, 01–113: 1–25.
- William M. 1999. Using waveform similarity to constrain earthquake locations[J]. Bull Seism Soc Am, 89(89): 1143–1146.
- Zhou L Q, Zhao C P, Chen Z L, et al. 2012. Three-Dimensional VP and VP/VS Structure in the Longtan Reservoir Area by Local Earthquake Tomography[J]. PAGEOPH, 169(1–2): 123–139.
- Zhou L Q, Zhao C P, Zheng X, et al. 2011. Inferring water infiltration in the Longtan reservoir area by three-dimensional attenuation tomography[J]. J Geophys Int, 186(3): 1045–1063.

Double-difference Relocation of Earthquakes in Longtan Reservoir Combined with Waveform Cross-Correlation Technique

YAN Chunheng, ZHOU Bin, GUO Peilan, SUN Xuejun, WEN Xiang

(*Earthquake Bureau of the Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530022, Guangxi, China*)

Abstract

Using the double-difference location algorithm combined with waveform cross-correlation technique, we re-located 3 682 earthquakes occurred around Longtan Reservoir from Sep. 30, 2006 to May. 26, 2013. The relocating results are more precise than that of network catalogue, and its logically mean error is less than 10 m. The precise location results show that, the distribution of mid-small earthquakes shows obvious cluster in the 6 regions of Luotuo, Bamao, Lalang, Bashou, Buliuhe and Tian'e County after impounding. The distribution range of each earthquakes cluster is no more than 10 km and the focal depths dominantly distributed in 4 ~ 9 km, and its advantageous spread direction is consistent to the strike or trend of main faults which pass through the earthquakes cluster. These results indicate that the earthquakes in the reservoir basically distribute in the range of less than 10 km around the rivers and faults, which shows the typical "double ten" characteristics of reservoir-induced seismic activity. The obtained research results are useful to predict earthquake induced by Longtan Reservoir reconstruction project and could provide the basis for seismic safety assessment.

Key words: reservoir-induced seismicity; precise relocation of earthquake; double-difference location algorithm; waveform cross-correlation; Longtan Reservoir