

DOI:10.13203/j.whugis.20140983



文章编号:1671-8860(2017)10-1497-04

# 长江三峡水库蓄水对断层活动的影响

张 燕<sup>1</sup> 吕品姬<sup>1</sup> 柳 嘉<sup>1</sup>

1 中国地震局地震研究所地震大地测量实验室,湖北 武汉,430071

**摘 要:**分析了位于仙女山断裂带的湖北省秭归县周坪站倾斜仪 2002~2009 年的观测数据,并与三峡库区水位资料进行了对比分析,结果发现,蓄水前后倾斜仪观测曲线的走向发生了趋势性变化,表明三峡蓄水对附近的断层活动有影响,蓄水期间的短期荷载变化引起的响应更为显著,但蓄水效应没有从根本上改变断层的活动性质;还发现 3 次大的蓄水期间,水位上升量与观测曲线的上升量成相同比例的对应关系,进一步说明,周围断层对三峡蓄水引起的荷载变化响应明显,不同的荷载变化引起断层活动变化的程度不同。

**关键词:**三峡水库;仙女山断裂;蓄水效应;倾斜

**中图法分类号:**P227; P315.72

**文献标志码:**A

长江三峡工程是中国目前最大的水利工程,总库容 393 亿  $m^3$ ,属世界上特大型水库之一。三峡大坝建设期间采取分级蓄水,蓄水前后最显著的变化是小震群活动明显增加<sup>[1]</sup>。在水库首次蓄水过程中和蓄水后较短时间内,各观测数据都显示出库区存在较大的变化,重力变化显示强烈的库水荷载效应和明显滞后的库水渗透效应<sup>[2]</sup>,重力卫星监测到该区的水储量变化<sup>[3]</sup>。三峡库区地壳形变的基本图像显示垂直形变较为显著,主要来自因蓄水荷载而产生的形变,水平形变不明显;精密水准测量和 GPS 观测均反映三峡水库因蓄水而导致库区有一定范围的沉降<sup>[4,5]</sup>。

虽然形变监测手段对蓄水引起的地壳变化已有反映,但这种反映短期内主要表现为上地壳的弹性形变,蓄水效应有一个滞后期,蓄水所引起的库区地壳形变和断层活动会在今后很长一段时期内存在,本文分析了距三峡大坝 19 km 左右的湖北省秭归县周坪定点形变台 2002~2009 年的数据,与三峡库区水位变化进行了对比研究,揭示出蓄水较长时间后引起的地壳形变活动特征。

## 1 观测站情况

仙女山断裂北起长江南岸的荒口,南经周坪至马家湾,长约 20 km,距长江三峡大坝约 19 km,走向 NW(北西) $340^\circ$ 左右,倾向 SW(南西),倾角

$30^\circ\sim 60^\circ$ ,为三峡库首区主要断裂(见图 1)。周坪定点形变台跨仙女山断裂,位于断裂北端,连续监测断层的运动及其变化。周坪站山洞位置为  $110^\circ47'E$ ,  $30^\circ50'N$ ,海拔高程 556 m。山洞全长 185 m,其中进口段 13 m、交通段 85 m、垂交段 87 m,垂交段与断层走向正交。沿正交仙女山断裂安装了一套有 3 个探头的 DSQ 型水管倾斜仪,相当于 DSQ-21 和 DSQ-31 两套单分量水管倾斜仪(见图 2),测点 1、2 和测点 3 分别位于主断裂西侧和东侧,测点 1 与 2 和测点 1 与 3 之间的跨距分别为 43.83 m 和 70.26 m。

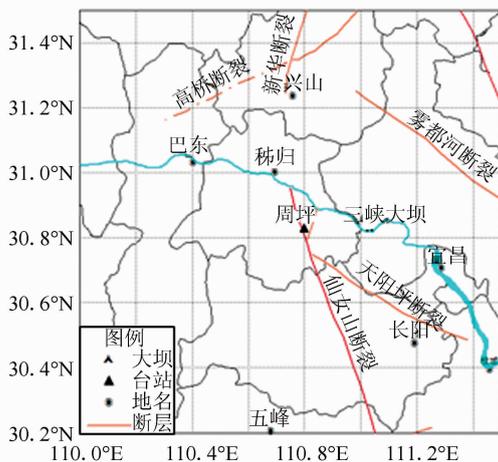


图 1 周坪站分布图

Fig. 1 Distribution of Zhouping Station

收稿日期:2015-09-09

项目资助:中国地震局地震研究所所长基金(IS201326120);中国地震局地震科技星火计划(XH14034)。

第一作者:张燕,副研究员,主要从事地壳形变与地震预测方法研究。zhwater@sina.com

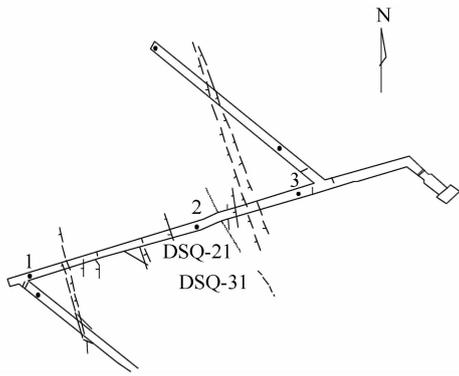


图2 倾斜仪布置图

Fig. 2 Distribution of Tilt Meters

## 2 仙女山断裂数据分析

周坪定点形变台是无人值守的连续观测站,水管仪以整时值采样从1999-08-01开始观测,连续性一直较好,2009年10月数据采集出现故障后,连续性较差,缺记严重,已不能满足分析的需要;另外,考虑到与三峡蓄水后水位的对比研究,本文使用周坪站水管倾斜仪2002~2009年的观测数据进行分析。

### 2.1 周坪站倾斜仪数据分析

周坪站有DSQ21和DSQ31两台倾斜仪。

$$\begin{aligned} T_{21} &= T_2 - T_1 \\ T_{31} &= T_3 - T_1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $T_{21}$ 、 $T_{31}$ 是倾斜仪DSQ21、DSQ31的观测数据; $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 是点1、2、3的读数。

图3是两套仪器观测曲线图,黑色曲线代表DSQ21观测数据;蓝色曲线代表DSQ31观测数据。从图3中可以看出,1999~2002年蓄水前,两条曲线走向均为向下变化的趋势,说明点2相对点1、点3相对点1是抬升的,即呈现向西倾的态势;蓄水后虽然曲线走向向下没有改变,但曲线斜率发生了明显减小的变化,表示点2相对点1、点3相对点1抬升量较蓄水前都有不同程度地下降,西倾减缓。DSQ21观测数据1999~2002年年变化量为1 000 ms,蓄水后变为每年变化460 ms,降幅为54%;DSQ31观测数据1999~2002年年变化量为2 200 ms,蓄水后变为每年变化700 ms,降幅68%,可见DSQ31仪器受水库蓄水影响的程度更大。点3位于仙女山断裂主断裂的东侧,离库区也更近,DSQ31观测数据蓄水前后变化更为显著也是正常的。周坪站两套水管仪观测曲线发生转折的时间一致,都与三峡蓄水时间重合,且具体表现也是东侧相对西侧抬升量减小,

即东侧相对西侧较蓄水前有所下沉,这与蓄水后库容增加,库区荷载导致该地区垂直下降是符合的。

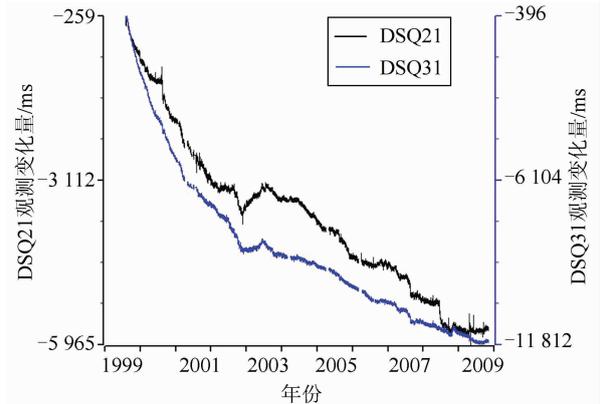


图3 两套倾斜仪观测数据

Fig. 3 Observation Data of Two Sets of Tilt Meter

### 2.2 三峡库区水位与倾斜仪观测数据对比分析

周坪站水管倾斜仪记录到三峡库区蓄水前后仙女山断裂两盘的变化,说明三峡库区水荷载的变化对断层活动是有影响的。以倾斜仪DSQ21观测数据为例,图4(a)中黑色曲线代表的是三峡库区水位变化,蓝色曲线是倾斜仪DSQ21的观测数据,2003年库区水位从68 m上升至135 m,水位差67 m,倾斜仪观测曲线从下降转为上升,变化了近400 ms;2006年库区水位从135 m上升至156 m,水位差21m,倾斜仪观测曲线上升了近100 ms;2008年库区水位从146 m上升至175 m,水位差29 m,倾斜仪观测曲线上升了近150 ms。图4(b)是倾斜仪DSQ31观测数据和水位的对比,变化趋势与图4(a)相似,不做具体描述。总的来说,蓄水期间,观测曲线短暂上升;蓄水结束后,观测曲线重新转为下降,保持原来的变化趋势,即蓄水位的变化和倾斜仪观测曲线呈现同趋势变化特征,而且水位上升量与倾斜仪观测曲线上升量之间基本成相同比例关系。

### 2.3 水荷载影响倾斜观测的模拟分析

由于水库库容变化引起的地面荷载变化,使得倾斜观测受到水库库容变化的影响。这里把库容重量作为重量变化,有位移解<sup>[6]</sup>:

$$u = \frac{F_x z}{4\pi G R^3} - \frac{F_x}{4\pi(G+\lambda)R(R+z)} \quad (1)$$

式中, $u$ 为水平方向的位移; $F$ 为集中力; $\lambda$ 和 $G$ 为拉梅常数; $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 。

水平方向的倾斜 $w_x$ 为:

$$w_x = \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{3F_x z^2}{4\pi G(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} - \frac{F(2G+\lambda)x}{4\pi G(G+\lambda)(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \quad (2)$$

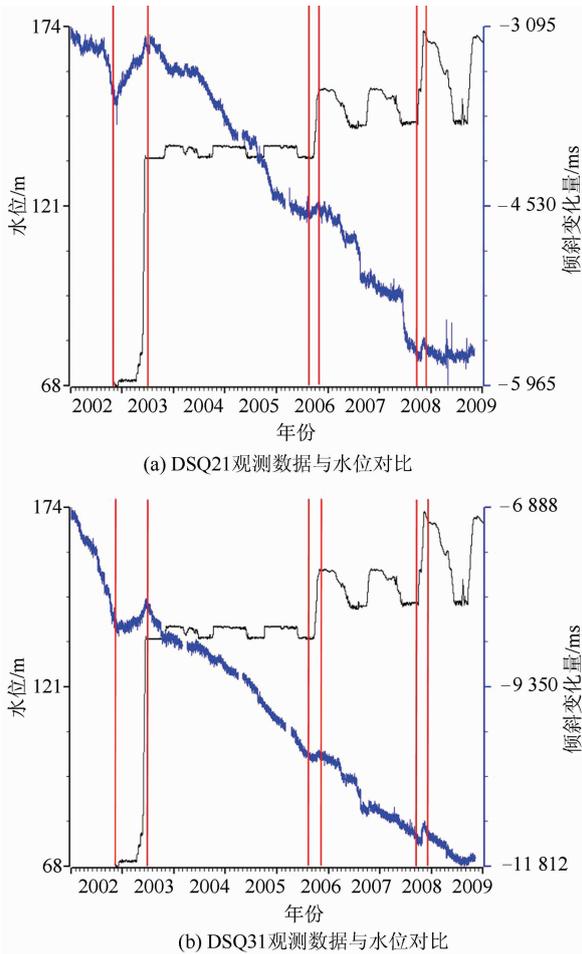


图 4 三峡库区上游水位与倾斜仪观测数据对比

Fig. 4 Comparisons Between Three Gorge Upstream Water Level and Tilt Observation Data

其中,拉梅常数  $G$  和  $\lambda$  分别为:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 2.0 \times 10^{10} \text{ Pa};$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} = 2.0 \times 10^{10} \text{ Pa}.$$

式中,  $E=5.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ;  $\nu=0.25$ 。蓄水至 135 m 时,库容增至 100 亿  $\text{m}^3$ ,可推算出离其 19 km 左右处产生的水平方向的倾斜量为  $\omega_x=0.01 \times 10^{-8} \text{ rad}$ ,实际观测到的倾斜变化为 400 ms,即  $\omega_x=1.9 \times 10^{-6} \text{ rad}$ ;蓄水至 175 m,库容增至 393 亿  $\text{m}^3$ ,可推算出离其 19 km 左右处产生的水平方向的倾斜量为  $\omega_x=0.04 \times 10^{-8} \text{ rad}$ ,实际观测到的倾斜变化为 650 ms,即  $3.2 \times 10^{-6} \text{ rad}$ 。由图 4 可知,不同库水位对应的水荷载变化与倾斜模拟与观测结果成正相关;不同的荷载,计算得出的倾斜变化量不同,反映了不同的荷载变化对断层活动变化的影响程度不同。但实际观测的倾斜量与模拟结果存在一定的差距,实际观测量大于模拟结果,造成这种现象的原因很多,首先实际库区形状的复杂是难以用简单的模型来近似,并且如此

大的库区容量,计算会产生更大的误差;其次地下介质的复杂性、地形地质条件的差异也会造成弹性模量等取值的偏差而引起结果的偏差;另外,当水荷载变化时,实际观测的倾斜量变化与之呈正相关,尽管本文已尽可能做了干扰排查处理,但实际观测的倾斜变化是否完全是由于水荷载的变化引起还无法证明。

### 3 结 语

通过分析长江三峡库区附近周坪站倾斜仪观测数据,可以看出蓄水前后观测曲线的变化较为明显,且倾斜仪两端的变化特征与库区水荷载的增加是相呼应的,说明跨仙女山断层的周坪站倾斜仪记录到了与蓄水过程相对应的断层倾斜运动;也表明长江三峡蓄水对附近的断层活动有影响,但蓄水效应没有从根本上改变断层的活动性质,在保持原有逆断层性质的基础上,下盘(东侧)下降程度相对增加,结果导致倾斜仪测点 2 和测点 3 读数增大,测点 2 至测点 1 测向和测点 3 至测点 1 测向观测曲线斜率减小。

对比分析周坪站倾斜仪数据与三峡水位的关系,结果发现 3 次大的蓄水期间,倾斜仪观测曲线都会出现暂时性地上升,蓄水结束后,观测曲线会恢复原来的状态,保持向下变化的趋势。主要原因是蓄水期间,荷载突然增加,造成地表快速下沉,倾斜量加大,测点 2 和测点 3 的读数快速变大,曲线变化趋势反转;蓄水结束稳定后,出现回弹,库区地表上升,倾斜量减小,曲线回归以前的趋势。进一步分析还发现 3 次大的蓄水期间,水位上升量与观测曲线的上升量成相同的比例关系,这更说明蓄水会引起倾斜仪观测数据的变化。

运用三维无限空间边界上作用集中荷载的模型,模拟了库区荷载引起观测点的倾斜变化,结果显示不同库水位对应的库容变化与倾斜模拟及观测结果的对应关系一致,同时,不同的荷载,计算得出的倾斜变化量不同,反映了不同的荷载变化对断层活动变化的影响程度不同。但模拟结果与实际观测量之间存在差距,其原因较为复杂,除了模型本身的适用程度外,库区的复杂地形、地质条件等都会影响计算结果。

2003 年蓄水前,仙女山断裂附近地震活动很弱,仅有零星地震分布。蓄水后,在库水荷载和渗透的共同作用下,小震微震活动频次明显增强。尤其是 2008 年蓄水至 175 m 后,几次较大的构造型水库地震均发生在该断裂附近,如 2008-11-22

秭归 Ms4.1 地震,2013-03-27 和 30 日秭归 Ms4.2 和 Ms4.5 地震。这些均反映了库水作用对地震的触发作用,也间接论证了库水对仙女山断裂活动的影响是不容忽视的。

综上所述,长江三峡水库蓄水对周围的断层活动有较为明显的影响,但这种影响没有从根本上改变断层的性质;蓄水期间的短期荷载变化引起的响应更为显著。水库蓄水对附近断层的影响主要是水载荷产生的应力场及其在断层面上引起的静态库仑破裂应力变化使得处于临界应力状态的断层发生活动,与断层的位置、产状、受区域应力场控制下的可能滑动方向等因素有关。

### 参 考 文 献

- [1] Li Shengle, Yan Zunguo, Xue Junrong, et al. First Microquake Swarm Activity Since Storage in Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2003, 23(4): 75-79(李胜乐,严尊国,薛军蓉,等.长江三峡水库蓄水后的首发微震群活动[J].大地测量与地球动力学,2003,23(4):75-79)
- [2] Sun Shaoan. High Precise Gravity Survey Before and After Impoundment of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24(2):30-33(孙少安,三峡工程蓄水前后的精密重力测量[J].大地测量与地球动力学,2004,24(2):30-33)

- [3] Wang Hansheng, Wang Zhiyong Yuan Xudong, et al. Water Storage Changes in Three Gorges Water Systems Area Inferred from GRACE Time-variable Gravity Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(3):730-736(汪汉胜,王志勇,袁旭东等.基于 GRACE 时变重力场的三峡水库补给水系水储量变化[J].地球物理学报,2007,50(3):730-736)
- [4] Du Ruilin, Xing Canfei, Wu Zhonghua, et al. Crustal Deformation of Three Gorges Area[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2004, 24(2):23-29(杜瑞林,邢灿飞,伍中华,等.长江三峡库区地震地形变监测研究[J].大地测量与地球动力学,2004,24(2):23-29)
- [5] Du Ruilin, Qiao Xuejun, Yang Shaoming, et al. The Results of GPS Treatment and the Strain Field in the Three Gorges of the Yangtze River[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(9): 768-771(杜瑞林,乔学军,杨少敏,等.长江三峡 GPS 处理结果和应变背景场[J].武汉大学学报·信息科学版,2004,29(9):768-771)
- [6] Qiu Zehua. A Theoretical Analysis of the Minimum Quiet Distance of the Interference Source of the Inclined Observation Load[J]. *Earthquake*, 2004, 24(4):80-86(邱泽华.倾斜观测载荷干扰源最小安静距离理论分析[J].地震,2004,24(4):80-86)

## Impact of the Yangtze River Three Gorges Reservoir on Fault Activity

ZHANG Yan<sup>1</sup> LV Pinji<sup>1</sup> LIU Jia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

**Abstract:** The impounding of the Three Gorges Reservoir has lasted for 10 years since its beginning in 2003. In this paper, the tilt data of the Xiannvshan fault zone from 2002 to 2009 is analyzed by comparing with the water level data of the Three Gorges Reservoir, and the result reveals that the trend of curve in the tilt data changes around the impounding, which shows that the impounding of three gorges reservoir has an affection on the nearby fault activity. the response of short-term changing load during impounding is more significant but can't change the nature of activity fundamentally. It is found that water rise level has the same ratio with the observation data's rise level during three large impoundment, which further shows that the tilt meter is able to record the load change caused by the impounding of three gorges reservoir.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; Xiannv mountain fault zone; impounding effect; tilt

**First author:** ZHANG Yan, PhD, associate researcher, specializes in crustal deformation, etc. E-mail: zhwater@sina.com

**Foundation support:** The Director of Foundation of the Institute of Seismology, the China Earthquake Administration, No. IS201326120; the Spark Program of Earthquake Sciences, No. XH14034.