

深井抽水对地倾斜观测影响的实验研究*

褚金学¹, 方伟¹, 苏有锦², 赵昆², 王永安², 杨玲英², 李正春¹

(1. 云南省地震局 弥渡地震台, 云南 弥渡 675600; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 采用抽水、放水实验方法, 研究地倾斜的变化量与地下水抽取量之间的关系、蓄水池池水变化量与地倾斜变化量之间的关系。通过对抽水实验数据分析研究可知: 在放水速率 ($V_{放水} < 9 \text{ m}^3/\text{h}$)、总放水量 ($T < 82 \text{ m}^3$) 有限的前提下, 弥渡地震台观测山洞正上方 30 m 处的蓄水池水量变化不会引起地倾斜观测资料的明显变化; 而地下水抽取是造成地倾斜异常变化的主要原因, 且地倾斜异常变化在时间上与抽水作业 (起止时间) 保持高度同步性; 抽水活动持续时间与地倾斜变化量是成非线性关系: 随抽水时间延长, 地倾斜变化速率开始较快, 随后减小。但在开始抽水 2 小时时段内表现为近似线性关系, 即 NS 测向 $V_{NS} = -0.04553 \text{ ms/min}$, EW 测向 $V_{EW} = -0.07971 \text{ ms/min}$ 。通过频域分析可知: 弥渡地倾斜观测受抽水干扰的异常信号的频率在 $0.0018 \sim 0.003 \text{ Hz}$ 之间。由此, 笔者设计了带阻滤波处理软件对抽水干扰信号频段进行处理, 降低了抽水作业对弥渡地倾斜观测的影响。

关键词: 抽水实验; 地倾斜; 抽水干扰; 带阻滤波处理软件

中图分类号: P315.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)03-0416-10

0 引言

地壳在地球内力和外力作用下不断运动, 由于地球的非均匀性, 这种运动必然会在某些地区引起较大的地壳形变, 在一定条件下导致地壳的突然破裂 (地震发生)。地震与地壳形变关系最为直接, 故而受到国内外地震预报探索者的普遍重视 (国家地震局, 1986)。地壳形变是一个复杂的系统, 形变量的大小不仅与地壳内部的运动特征有关, 而且与许多外界因素, 如气温、气压、降雨量、蒸发量、地下水位、地表温度以及地下不同深度的地温等有关 (刘权威, 1996)。因抽水产生的地下水水位的动态变化会造成所在区域局部地表形变 (中国地震局科技司, 1995)。作为观测精度很高 ($10^{-8} \sim 10^{-10}$) 的定点形变观测在采集形变前兆观测数据时, 经常会记录到由于台站附近水井抽水而引起的异常现象 (陈鹏等, 2004)。深井抽水会产生一定的地倾斜变化, 其变化的幅度和持续时间由抽水点至观测仪器的方位、距离、抽水量以及地下水降深等因素决定 (陈德福等, 1993; 阴朝民, 2003; 国家地震局预测预防司, 1998)。地震前兆观测的精度直接影响了地震前兆

的分析, 从而影响了地震分析预报的准确度。而抽水干扰就是影响地震前兆观测精度较大的因素之一 (裴晓峰, 1995)。

倾斜观测仪主要包括水管倾斜仪、石英摆倾斜仪和钻孔垂直摆倾斜仪等。目前这些倾斜仪器的观测精度可达 10^{-9} , 且连续性和稳定性较好 (牛安福, 2003)。弥渡地震台地倾斜观测仪器为 FSQ 型水管倾斜仪, 该观测于 2013 年 12 月在模拟观测基础上升级改造造成 DSQ 型数字化观测。从 2004 年起, 在弥渡地震台观测山洞旁的弥渡一中校园内挖了一口深层抽水井, 并在山洞的顶上方修建了一个蓄水池, 每天把井水抽到蓄水池供给弥渡一中使用。该学校的抽水、蓄水作业导致水管倾斜观测数据大幅变化, 造成了观测质量下降以及地震前兆异常信号识别困难的问题。

弥渡地震台这样的观测环境无意中营造了一个天然的地倾斜受地下卸载与地面增压的小实验场, 这样的实验场在全国同类观测中, 并不多见。本文利用现有的实验场地, 深入了解困扰弥渡地震台形变观测受抽水干扰的问题, 了解其影响机制。进一步研究地下水抽取、蓄水池池水变化量与地倾斜变化之间的关系, 为类似抽水、蓄水使观测场地增压、卸压, 从而导致地倾斜观测量变

* 收稿日期: 2015-01-04.

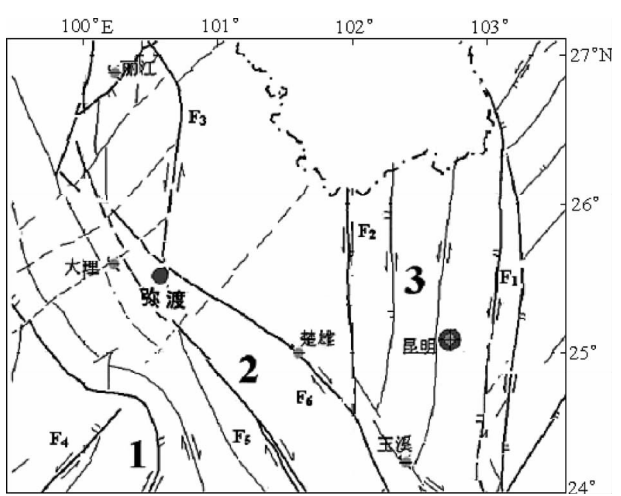
基金项目: 云南省人民政府十项重点工程“云南大震短临跟踪工作”专项资助.

化的相关研究提供参考。

1 台站观测环境概况

弥渡地震台位于弥渡冲击倾斜盆地东南部边缘近山地带，处在金沙江—红河断裂系上，位于红河断裂与程海断裂及楚雄—建水断裂的交汇点处（图1）。台站海拔1 680 m，地貌多为侵蚀低山地貌。

形变观测山洞是1985年在防空洞基础上改造而成的地震专用观测山洞。其中，各仪器室和引道总长288 m，宽3 m，高3 m。北洞口至东西仪器室西端的进深为20 m，西洞口至东北、南西仪器室的南西端进深为65 m。平均覆盖厚度约为40 m。山洞岩性以轻度风化玄武岩为主，较破碎。洞内日温差小于0.01℃，年温差小于0.4℃，相对湿度约为89%。经过多年观测使用，该山洞对天气变化的抗干扰能力较好。



1：怒江—澜沧江断裂系；2：金沙江—红河断裂系；3：康滇断裂系；F₁：小江断裂；F₂：元谋—绿汁江断裂；F₃：程海断裂；F₄：南丁河断裂；F₅：红河断裂；F₆：楚雄—建水断裂

图1 第四纪活动断裂分布图
Fig.1 Distribution map of Quaternary active faults

2 抽水、放水实验

2.1 实验相关资料

2.1.1 抽水井及其附近水文地质资料

根据《弥渡县第一完全中学供水井竣工报告》^①的钻探揭露：本区范围内岩石种类单一，厚度大，地层主要由第四系浮土（主要为粉土、粉质粘土）及玄武岩层组成。其中粉土、粉质粘土层为相对隔水层，含水层主要为破碎的玄武岩层。玄武岩为中等风化，上部岩芯较完整，多为长柱状，含水性相对较差。中下部岩芯较为破碎，裂隙发育，地下水水蚀明显。其中64.1~72.0 m为层间断层破碎带，可见黑色断层泥及滑动面。含水较为丰富，地下水类型为裂隙性地下水（图2）。

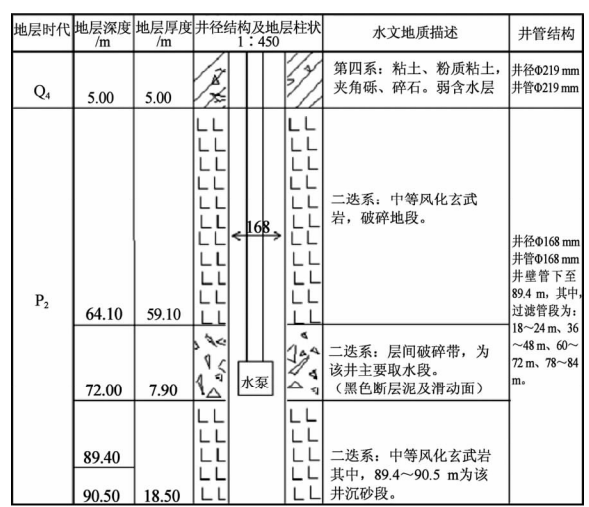


图2 水井区域水文地质及井管结构综合图
Fig.2 Chart of hydrogeological in wells region and well pipe structure

2.1.2 蓄水池设计资料

根据蓄水池设计图（图3）可知，蓄水池形状近似于长方体（19.5 m×5.5 m×1.62 m）。距池底1.15 m、1.41 m处的池壁上分别安装有水位传感器a和b，当自动控制阀检测到蓄水池水位下降至a传感器位置时，水泵开始抽水作业；当水位超过b传感器位置时，水泵停止抽水作业。通过计算可知，在抽水实验模式下，蓄水池对山洞所产生的最大理论荷载压力变化在174 m³水所产生的压力范围内；在自动抽水模式下，蓄水池对观测山洞的荷载压力范围是固定的，即蓄水池所产生的压力变化幅度始终保持在约28 m³水所产生的压力范围内。

① 西南有色306勘察工程有限公司.2004.弥渡县第一完全中学供水井竣工报告.

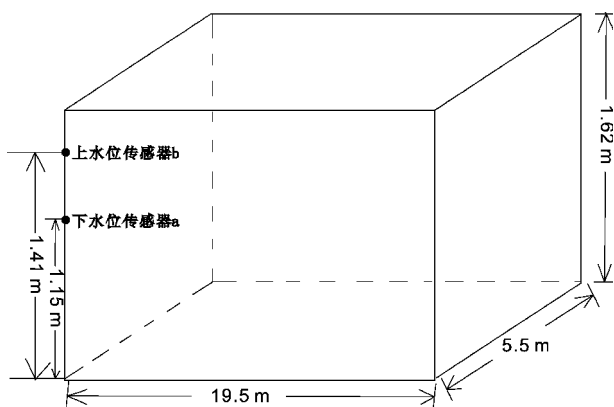


图3 蓄水池设计示意图

Fig. 3 Sketch map of the design of water reservoir

2.1.3 实验系统设计

为了摸清弥渡地倾斜观测受弥渡一中抽水作业的详细干扰情况,研究地下水抽取量与地倾斜变化量,蓄水池池水变化量与地倾斜变化量之间存在的定量关系。结合现有场地环境,通过与水井拥有方弥渡一中沟通、协调后决定:在弥渡一中水管管网系统的不同位置布设水表,对水泵抽水量、蓄水池蓄水量、水池放水量进行实时监控。

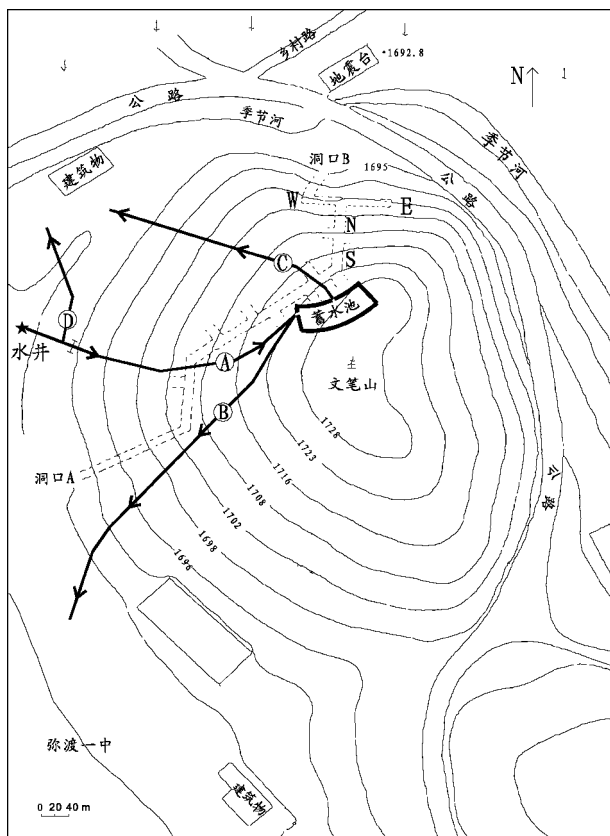


图4 实验场地平面布置图

Fig. 4 The plane layout of test site

2.2 实验过程及数据

实验场地布置如图4所示,与本次实验有关的水管线路共有3条,一条为抽水井—蓄水池之间的供水管道,另两条为蓄水池供水管道。通过在水管线路路上安装水表(A、B、C、D)、闸阀(a、b、c、d)来对抽水作业、蓄水作业进行定量监控。与弥渡一中进行协调,在不影响弥渡一中日常用水需求的前提下,我们将实验日期选在学生离校的寒假、暑假期间进行。抽水实验时,通过分时段读取各水表读数,并结合蓄水池设计参数,可以计算出每一次手动抽水实验时的实验时段、实验时长、水泵抽水量、池进水量、池放水量、池水变化量、抽水速率、放水速率等参数(表1)。

3 实验数据定性分析

3.1 蓄水池池水变化量与地倾斜观测之间的关系

根据表2蓄水池放水实验数据统计情况,并结合弥渡台水管倾斜仪在蓄水池放水实验时段实测的观测数据(图5、6)进行仔细分析,在放水速率、总放水量有限的前提下,蓄水池放水时段前后数据连续性较好,并未出现明显数据异常情况。为此,通过初步研究可表明:在弥渡台形变观测山洞上的蓄水池蓄水、放水不会对弥渡台地倾斜观测造成明显干扰。

3.2 地下水抽取与地倾斜变化之间的关系

表3为本次抽水实验所获得的详细实验数据,将表3中的抽水实验数据与抽水实验时段弥渡台DSQ型地倾斜仪实测数据(图7~9)进行对比分析,可发现如下规律:抽水作业可导致单位时间内的弥渡地倾斜变化量相对抽水前发生明显改变,在开始抽水和停止抽水两时刻均同时出现拐点;抽水所引起的地倾斜变化在时间上与抽水作业(起止时间)保持高度同步性。实验结果与李恩建等(2006)研究结果一致。抽水活动引起的地倾斜变化,还具有随抽水时间延长先加速、后减速的变化过程。上述变化过程可以用王庆良等(2002)提出的含水层水平变形机理作出较为合理的解释:即在抽水开始阶段,下伏断层尚处于抽水引起的地层径向拉张应变区域内,断层面上的正应力减小;随着抽水过程加长和内部径向挤压区的不断向外发展,下伏断层将逐渐处于抽水引起的径向挤压区域内,断层面上的正应力又将增大。

表 1 抽水实验数据统计表
Tab. 1 Statistics of pumping water test data

日期	实验描述	实验时段	实验时长 /h	泵抽水量 /m ³	池水变化量 /m ³	抽水速率 /m ³ ·h ⁻¹	放水速率 /m ³ ·h ⁻¹
1 月 26 日	不抽水,池不进水,池不放水(空池)	—	24	0	0	—	—
1 月 27 日		—	24	0	0	—	—
1 月 28 日		—	24	0	0	—	—
1 月 29 日	抽水,池进水,池不放水	09:04 ~ 15:44	6. 7	115. 3	115. 3	17. 2	—
1 月 30 日	抽水,池进水,池不放水	08:55 ~ 14:15	5. 3	88. 5	88. 5	16. 7	—
1 月 31 日	不抽水,池不进水,池不放水(满池)	—	24	0	0	—	—
2 月 1 日		—	24	0	0	—	—
2 月 2 日		—	24	0	0	—	—
2 月 3 日		—	24	0	0	—	—
2 月 4 日		—	24	0	0	—	—
2 月 5 日		—	—	—	—	—	—
2 月 5 日	不抽水,池不进水,池放水	11:10 ~ 14:50	3. 7	0	- 30. 2	—	8. 2
2 月 18 日	抽水,池进水,池放水	16:32 ~ 20:35	4. 05	51. 6	28. 9	12. 7	5. 6
2 月 19 日	抽水,池不进水,池放水	09:00 ~ 12:05	3. 08	44. 9	- 14. 8	14. 6	4. 8
	抽水,池进水,池放水	15:38 ~ 21:30	6. 08	73. 6	46. 6	12. 1	4. 4
2 月 20 日	抽水,池不进水,池放水	08:35 ~ 10:40	2. 08	34. 3	- 15. 6	16. 5	7. 5
	自动抽水	15:25 ~ 23:59	8. 57	未知	未知	未知	未知
8 月 5 日	自动抽水	22:35 ~ 00:38	2. 05	未知	未知	未知	未知
8 月 6 日	不抽水,池不进水,池放水	—	24	0	- 32	—	1. 3
8 月 7 日	不抽水,池不进水,池放水	10:00 ~ 19:00	9	0	- 82	—	9. 1
8 月 8 日	抽水,池进水,池不放水	09:54 ~ 15:24	5. 5	87. 6	87. 6	15. 9	—

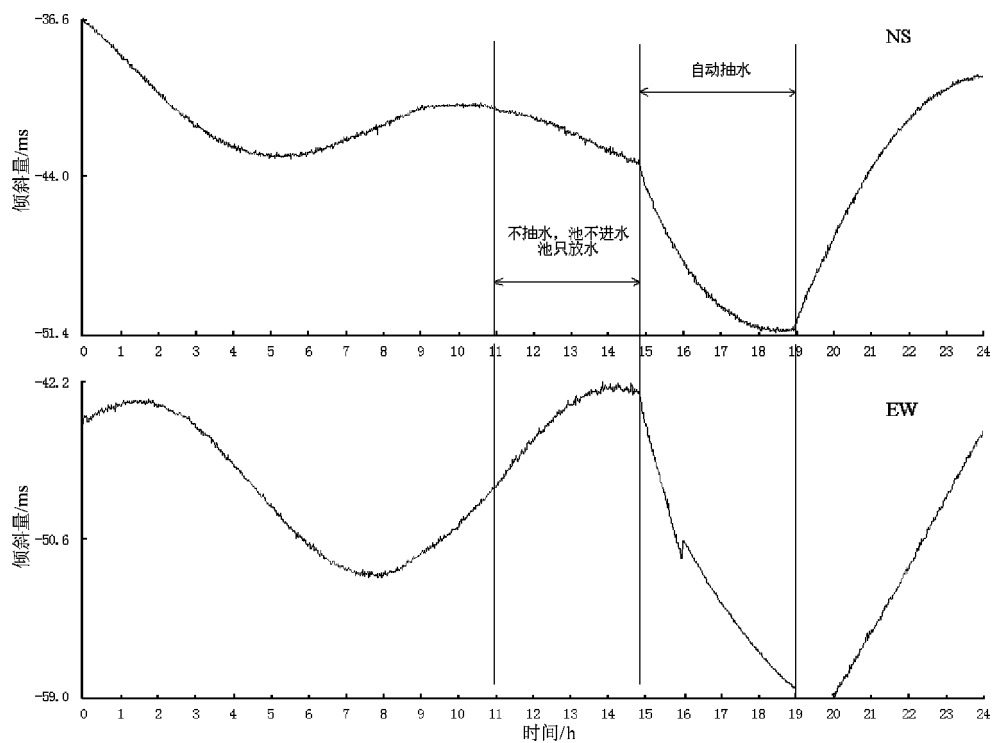


图 5 2014 年 2 月 5 日弥渡地震台 DSQ 型水管倾斜仪在放水实验时段实测的观测数据曲线图
Fig. 5 The real measured observation data curve recorded by DSQ water tube tiltmeter
in the period of reservoir water drainage at Midu Station on Feb. 5, 2014

表 2 蓄水池放水实验数据统计表
Tab. 2 Statistics of test data of reservoir water drainage

日期	实验描述	实验时段 /时:分	实验时长 /h	放水速率 $/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	池进水量 $/\text{m}^3$	池放水量 $/\text{m}^3$	池水变化量 $/\text{m}^3$
2 月 5 日	只对池放水	11:10 ~ 14:50	3.7	8.2	0	30.2	-30.2
8 月 6 日	只对池放水	00:00 ~ 23:59	24.0	1.3	0	32.0	-32.0
8 月 7 日	只对池放水	10:00 ~ 19:00	9.0	9.1	0	82.0	-82.0

表 3 水泵抽水实验数据统计表
Tab. 3 Statistics of test data of pumping water

日期	实验描述	实验时段	实验时长/h	泵抽水量/ m^3	池水变化量/ m^3	抽水速率/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
1 月 26 日	不抽水,池不进水,池不放水(空池)	—	24	0	0	—
1 月 27 日		—	24	0	0	—
1 月 28 日		—	24	0	0	—
1 月 29 日	抽水,池进水,池不放水	09:04 ~ 15:44	6.7	115.3	115.3	17.2
1 月 30 日	抽水,池进水,池不放水	08:55 ~ 14:15	5.3	88.5	88.5	16.7
1 月 31 日	不抽水,池不进水,池不放水(满池)	—	24	0	0	—
2 月 1 日		—	24	0	0	—
2 月 2 日		—	24	0	0	—
2 月 3 日		—	24	0	0	—
2 月 4 日		—	24	0	0	—
2 月 18 日	抽水,池进水,池放水	16:32 ~ 20:35	4.05	51.6	28.9	12.7
2 月 19 日	抽水,池不进水,池放水	09:00 ~ 12:05	3.08	44.9	-14.8	14.6
	抽水,池进水,池放水	15:38 ~ 21:30	6.08	73.6	46.6	12.1
2 月 20 日	抽水,池不进水,池放水	08:35 ~ 10:40	2.08	34.3	-15.6	16.5
	自动抽水	15:25 ~ 23:59	8.57	未知	未知	未知
8 月 8 日	抽水,池进水,池不放水	09:54 ~ 15:24	5.5	87.6	87.6	15.9

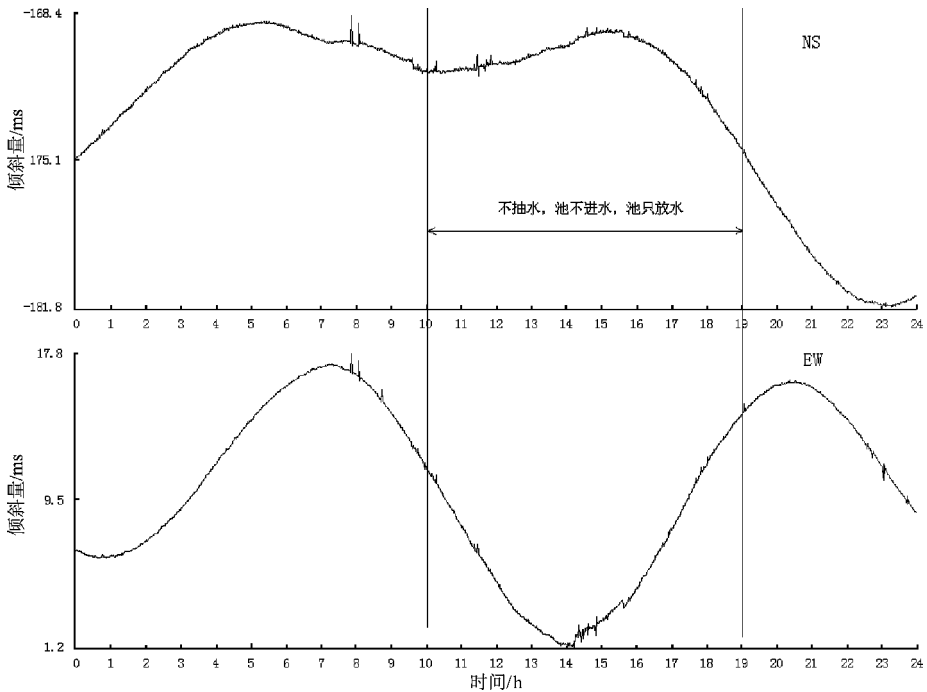


图 6 2014 年 8 月 7 日弥渡台 DSQ 型水管倾斜仪在放水实验时段实测的观测数据曲线图
Fig. 6 The real measured observation data curve recorded by DSQ water tube tiltmeter
in the period of reservoir water drainage at Midu Station on Aug. 7, 2014

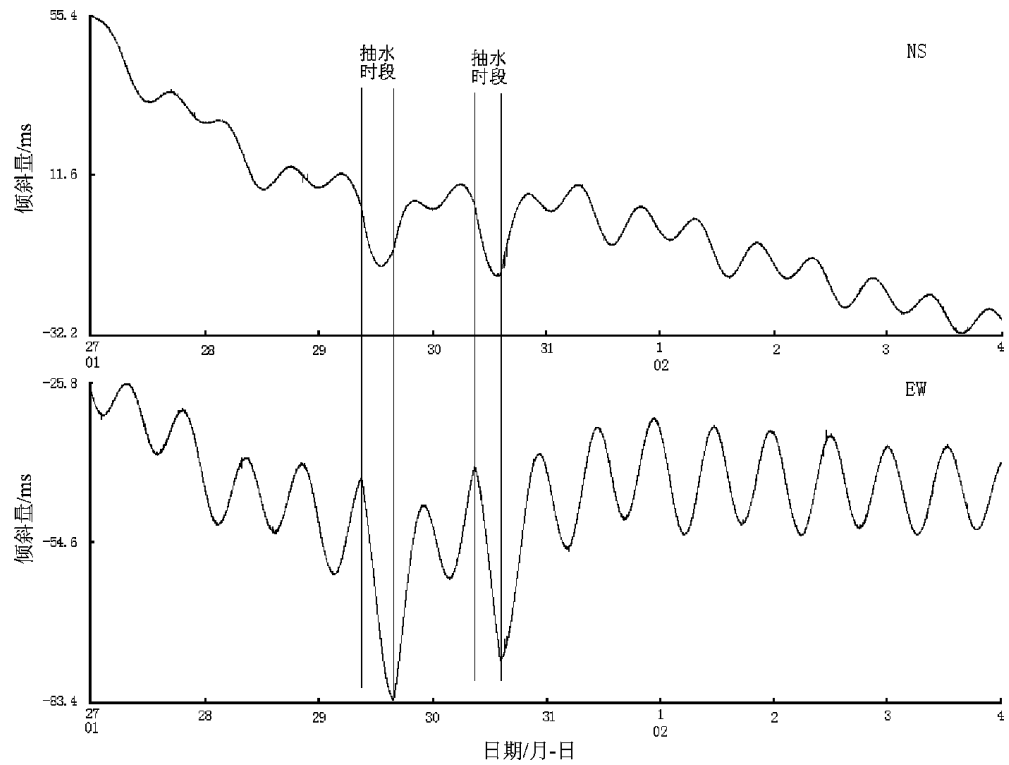


图 7 2014 年弥渡地震台 DSQ 型水管倾斜仪在抽水实验时段实测的观测数据曲线图
Fig. 7 The real measured observation data curve recorded by DSQ water tube tiltmeter in the period of pumping test at Midu Station in 2014

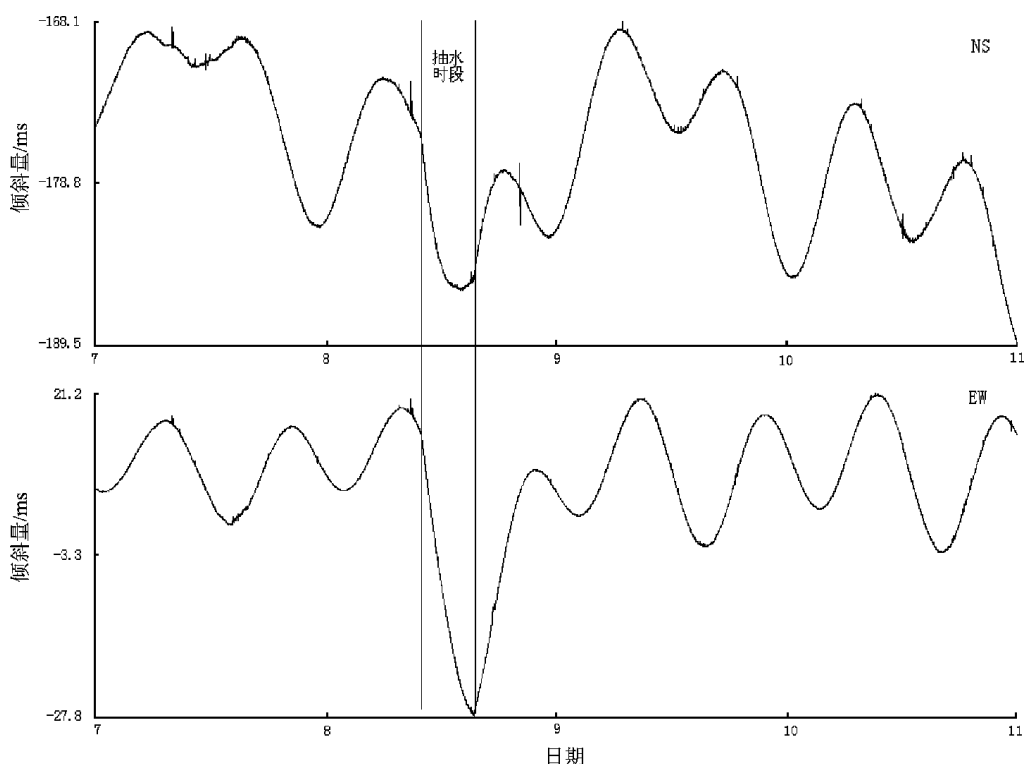


图 8 2014 年 8 月弥渡地震台 DSQ 型水管倾斜仪在抽水时段实测的观测数据曲线图
Fig. 8 The real measured observation data curve recorded by DSQ water tube tiltmeter in the period of pumping test at Midu Station on Aug. , 2014

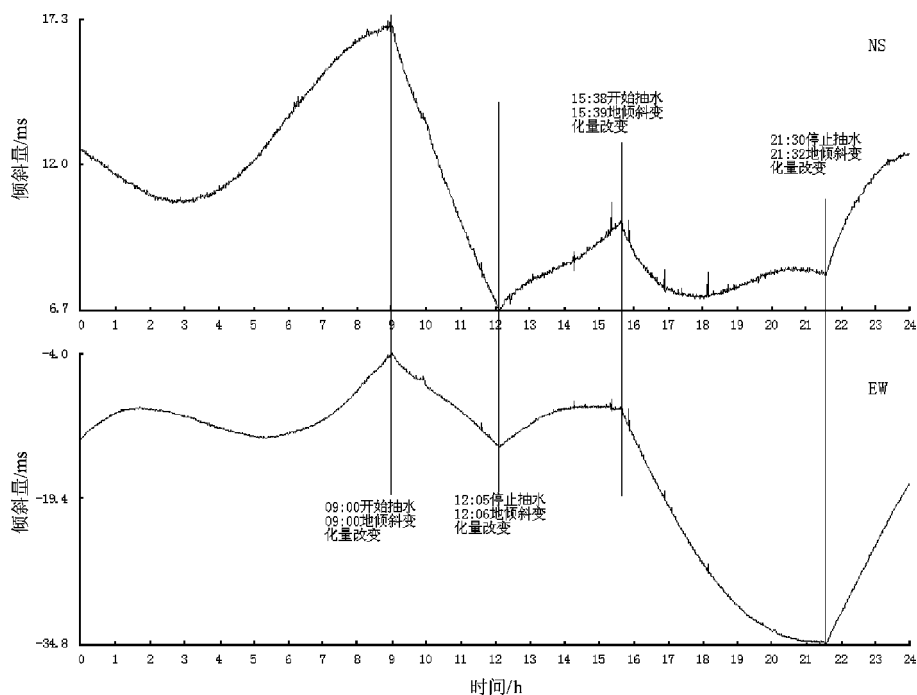


图9 2014年2月19日弥渡地震台DSQ型水管倾斜仪在抽水时段实测的观测数据曲线图

Fig. 9 The real measured observation data curve recorded by DSQ water tube tiltmeter in the period of pumping test at Midu Station on Feb. 19, 2014

4 抽水对地倾斜影响的定量分析

在对实验数据定性分析之后,确定了弥渡台地倾斜异常变化是由深井抽水引起,且抽水时间与弥渡台地倾斜异常变化时间高度同步(图9),利用该实验成果,笔者以2014年1~8月弥渡台DSQ型水管倾斜仪观测数据随机选取的38个抽水时段原始数据为研究对象进行统计分析,以便为下一步定量研究抽水量与地倾斜变化量关系提供更加充分、客观、科学的数据支撑。详细统计情况如表4所示。

4.1 抽水干扰异常曲线的时域定量分析

使用Matlab数据处理软件(万永革,2007;肖本夫等,2011)对弥渡台DSQ型地倾斜仪原始观测数据进行处理:将表4中38个抽水时段的原始观测数据曲线汇总在一起,可得到弥渡台2014年1~8月中随机的38个抽水时段地倾斜实测曲线图(图10);将38个抽水时段的原始观测数据进行平均计算,可得到在开始抽水2h内弥渡台平均地倾斜变化量曲线图(图11a);最后,将抽水时段平均地倾斜变化量进行分钟值差分处理,可得到平均地倾斜变化率统计图(图11b)。

从图8可看出弥渡台整个抽水时段的地倾斜变化量成非线性变化关系。但在抽水2h内,其因抽水而

导致的地倾斜变化量几乎成线性关系(图11a),其地倾斜变化率基本上为一个固定值(图11b)。通过计算可得到弥渡地倾斜观测受抽水干扰引起的地倾斜变化率为:NS测向 $V_{NS} = -0.045\ 53\ \text{ms}/\text{min}$,EW测向 $V_{EW} = -0.079\ 71\ \text{ms}/\text{min}$ 。

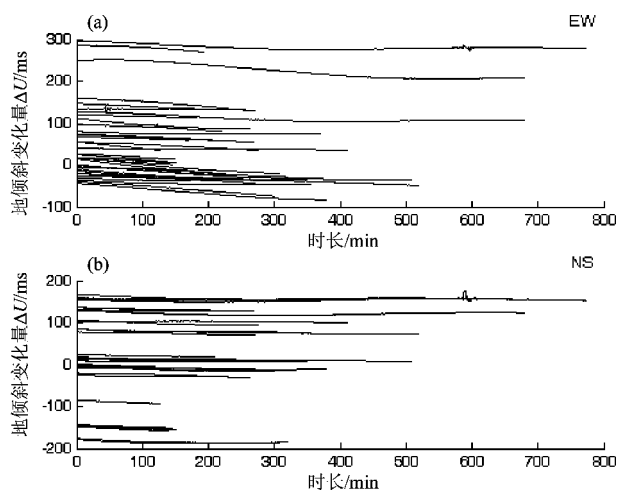


图10 2014年1~8月弥渡地震台中随机的38个抽水时段地倾斜实测曲线

Fig. 10 The real measured curve of ground tilt in the randomly selected 38 pumping periods at Midu Station from Jan. to Aug. in 2014

表 4 随机选取的 38 个抽水时段数据统计表
Tab. 4 Data statistic of the randomly selected 38 pumping periods

日期	试验描述	试验时段	试验时长/min
1 月 29 日	抽水,池进水,池不放水	09:04 ~ 15:44	381
1 月 30 日	抽水,池进水,池不放水	08:55 ~ 14:15	301
2 月 18 日	抽水,池进水,池放水	16:32 ~ 20:35	236
2 月 19 日	抽水,池不进水,池放水	09:00 ~ 12:05	176
	抽水,池进水,池放水	15:38 ~ 21:30	351
2 月 20 日	抽水,池不进水,池放水	08:35 ~ 10:40	116
	自动抽水	15:25 ~ 23:59	510
8 月 8 日	抽水,池进水,池不放水	09:54 ~ 15:24	321
1 月 13 日	自动抽水	06:21 ~ 10:52	272
	自动抽水	14:21 ~ 20:16	356
1 月 24 日	自动抽水	08:45 ~ 17:33	520
2 月 13 日	自动抽水	07:42 ~ 10:55	194
	自动抽水	15:21 ~ 18:15	175
2 月 24 日	自动抽水	08:42 ~ 12:43	242
	自动抽水	16:30 ~ 20:00	211
3 月 13 日	自动抽水	07:00 ~ 11:37	278
	自动抽水	14:23 ~ 21:14	412
3 月 24 日	自动抽水	01:01 ~ 03:48	168
	自动抽水	08:24 ~ 12:10	227
	自动抽水	15:07 ~ 19:36	270
4 月 13 日	自动抽水	07:25 ~ 11:06	222
	自动抽水	14:13 ~ 20:23	371
4 月 24 日	自动抽水	07:21 ~ 18:41	681
5 月 13 日	自动抽水	08:00 ~ 20:08	681
5 月 24 日	自动抽水	08:09 ~ 21:04	776
6 月 13 日	自动抽水	09:06 ~ 12:20	195
6 月 25 日	自动抽水	00:41 ~ 03:43	183
	自动抽水	08:22 ~ 12:52	271
	自动抽水	16:05 ~ 20:22	258
7 月 13 日	自动抽水	05:47 ~ 08:50	184
	自动抽水	14:51 ~ 19:15	265
7 月 24 日	自动抽水	09:25 ~ 11:32	128
8 月 13 日	自动抽水	13:08 ~ 18:16	309
8 月 18 日	自动抽水	03:40 ~ 05:47	150
	自动抽水	09:45 ~ 12:10	146
	自动抽水	16:29 ~ 19:00	152
8 月 19 日	自动抽水	06:07 ~ 08:37	139
	自动抽水	17:25 ~ 19:45	141

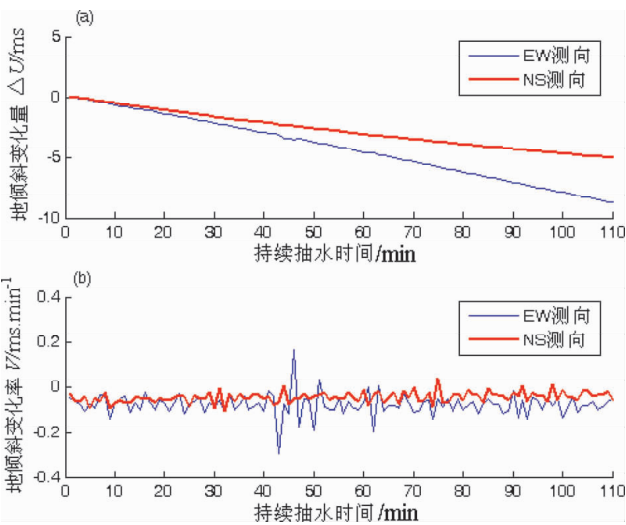


图 11 弥渡台 38 个随机抽水时段平均地倾斜变化量 (a) 与变化率 (b) 统计图
Fig. 11 The statistical chart of the variation amount (a) and rate (b) of average ground tilt in the randomly selected 38 pumping periods at Midu Station

4.2 抽水干扰异常曲线的频域分析

结合弥渡一中日用水量（平均 90 m³/d）统计情况，可初步计算出弥渡一中在日常自动抽水模式下，平均抽水时长一般在 2.5 ~ 4.5 h 范围内（表 3 的实际抽水统计情况可验证），而日抽水次数与弥渡一中日用水量、用水高峰期分布有关，据表 3 统计可知弥渡一中抽水井日抽水次数（即日抽水干扰时段数）约为 2.5 次。假设数据恢复时段时长与抽水时段时长相等的情况下，弥渡台受抽水干扰的地倾斜异常信号的周期应是平均抽水时长的两倍，即 5 ~ 9 h，转换成频率可知弥渡台受抽水干扰的地倾斜信号频率范围在 0.001 8 ~ 0.003 Hz 之间，故受抽水干扰的地倾斜异常信号频率范围处于地倾斜固体潮的 1/3 日潮汐附近，通过实测曲线频谱与固体潮曲线频谱（左艳等，2011）对比分析可得到验证（图 12）。其中，弥渡台地倾斜固体潮理论值数据是采用 EIS2000 专业软件计算所得。为此，给我们提供了一种从原始信号中去除抽水干扰信号的方法。笔者通过设计带阻滤波处理软件把抽水干扰信号频段滤除，带阻滤波处理软件的设计原理如下：把受抽水干扰的地倾斜观测信号通过快速 Fourier 变换对其进行频率分析，然后在频率域中将抽水干扰信号的频率

成分 (0.001 8 ~ 0.003 Hz) 的振幅置零, 接着运用 Fourier 逆变换 (IFFT) 到时间域从而达到滤波的效果。滤波效果如图 13 所示。详细的 matlab 滤波程序如下:

```
x = load ('dsq_ ns_ yu_ 0204_ 0211. txt'); %
加载弥渡台地倾斜观测数据
dt = 1; N = length (x);
n = 0: N - 1; t = n * dt; f = n / (N * dt); % 时
间序列及频率序列
y = fft (x);
f1 = 0.0018; f2 = 0.003; % 要滤去频率的上限
和下限
yy = zeros (size (y)); % 设置与 y 相同元素的
数组
for m = 0: N - 1; % 将频率落在该频率范围及
```

其大于 Nyquist 频率的波滤去

```
if (m / (N * dt) > f1 & m / (N * dt) < f2)
... ; % 小于 Nyquist 频率的滤波范围
| (m / (N * dt) > (1 / dt - f2) & m / (N *
dt) < (1 / dt - f1)); % 大于 Nyquist 频率的滤波
范围
yy (m + 1) = 0; % 置在此频率范围内的振动
振幅为零
else
yy (m + 1) = y (m + 1); % 其余频率范
围的振动振幅不变
end
end
plot (t / (24 * 60), real (ifft (yy))); % 运用
IFFT 变换回时间域并绘制滤波后的数据曲线
```

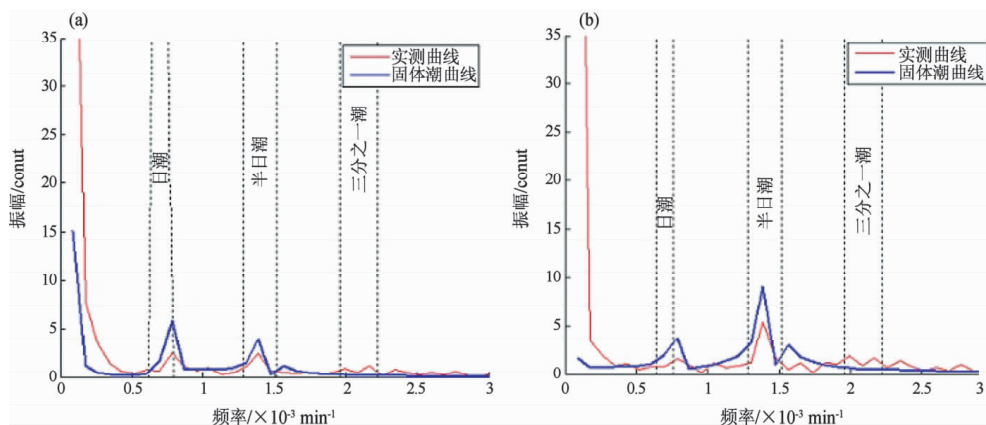


图 12 弥渡台 DSQ 型地倾斜仪 NS (a) 和 EW (b) 实测数据频谱与固体潮数据频谱测向分析对比图

Fig. 12 Spectrum analysis comparison chart between the real measured data and tidal data recorded by DSQ ground tiltmeter in NS (a) and EW (b) at Midu Station

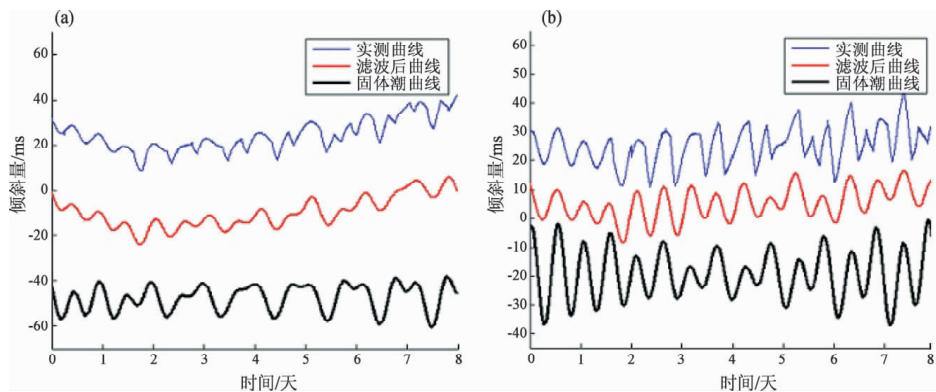


图 13 弥渡台 DSQ 型地倾斜仪 NS (a) 和 EW (b) 测向实测曲线、滤波后曲线与固体潮曲线对比效果图

Fig. 13 Comparison chart among the real measured, filtering and solid tide curves recorded by DSQ ground tiltmeter in NS (a) and EW (b) at Midu Station

5 结论

经过对抽水实验数据的分析研究可知: 在放水速率 ($V_{\text{放水}} < 9 \text{ m}^3/\text{h}$)、总放水量 ($T < 82 \text{ m}^3$) 有限的前提下, 弥渡台观测山洞正上方 30 m 处的蓄水池池水变化不会对弥渡地倾斜观测造成明显干扰; 而抽水作业是造成地倾斜异常变化的主要原因, 且在时间上与抽水作业保持高度同步性。此外, 抽水活动引起的地倾斜变化是成非线性关系的, 具体表现为随抽水时间延长先加速、后减速的变化过程。但在开始抽水 2 h 内表现为近似线性关系, 即 NS 测向 $V_{\text{NS}} = -0.04553 \text{ ms/min}$, EW 测向 $V_{\text{EW}} = -0.07971 \text{ ms/min}$ 。通过频域分析可知: 弥渡地倾斜观测受抽水干扰的异常信号的频率在 0.0018 ~ 0.003 Hz 之间。由此, 笔者设计了带阻滤波处理软件对抽水干扰信号频段进行处理, 大大降低了抽水作业对弥渡地倾斜观测的影响, 其效果较为明显。

参考文献:

- 陈德福. 1993. 地壳形变动力学观测与研究[M]. 北京: 海洋出版社.
- 陈鹏, 李正媛, 刘妙龙, 等. 2004. 地下水位对定点形变观测干扰的抽水实验[J]. 大地测量与地球动力学, 24(3): 79-82.
- 国家地震局. 1986. 地倾斜台站观测规范[M]. 北京: 地震出版社.
- 国家地震局预测预防司. 1998. 地壳形变分析预报方法[M]. 北京: 地震出版社.
- 李恩建, 董红军, 霍琛. 2006. 抽水对地壳形变观测影响的研究[J]. 防灾技术高等专科学校学报, 8(1): 66-72.
- 刘权威. 1996. 地壳形变干扰因素有效性的判别[J]. 测绘学报, 25(2): 95-103.
- 牛安福. 2003. 地倾斜变化的突变性及与地震关系的研究[J]. 地震学报, 25(4): 441-445.
- 裴晓峰. 1995. 抽水对蓟县台形变观测的干扰机理研究[J]. 地震地磁观测与研究, 16(4): 76-80.
- 万永革. 2007. 数字信号处理的 MATLAB 实现[M]. 北京: 科学出版社.
- 王庆良, 刘玉海, 陈志新, 等. 2002. 抽水引起的含水层水平应变地裂缝活动新机理[J]. 工程地质学报, 10(01): 46-50.
- 肖本夫, 万永革, 祁玉萍. 2011. 强干扰环境下有效数字地震信号的提取[J]. 华北地震科学, 29(1): 07-09.
- 阴朝民. 2003. 地壳形变数字观测技术[M]. 北京: 地震出版社.
- 中国地震局科技司. 1995. 地震观测技术[M]. 北京: 地震出版社.
- 左艳, 冀林旺, 王晶晶, 等. 2011. 数字化倾斜实测潮汐与理论固体潮汐的对比分析[J]. 防灾减灾学报, 27(3): 44-49.

Experimental Study on the Effect of Deep Well Pumping on Ground Tilt Observation

CHU Jin-xue¹, FANG Wei¹, SU You-jin², ZHAO Kun², WANG Yong-an²,
YANG Ling-ying², LI Zheng-chun¹

(1. Midu Seismic Station, Earthquake Administration of Yunnan Province, Midu 675600, Yunnan, China)

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

Abstract

By using pumping and dewatering test method, we researched the relationship between the variation of ground tilt and amount of groundwater extraction, water yield variation of water reservoir. The analysis result of the pumping water test data showed that under the premise of the limited drainage rate ($V_{\text{drainage}} < 9 \text{ m}^3/\text{h}$), the total discharge of water ($T < 82 \text{ m}^3$), the water yield variation of water reservoir which was located at 30 m above the observing cave of Midu Station didn't cause significant interference to the ground tilt observation. The main reason of the ground tilt anomaly variation was induced by the pumping of the ground water and its variation maintained a high degree of synchrony with the pumping operation (the date of the start and the end) in time. The duration of pumping water had a non-linear relation with the ground tilt variation, that is, the variation rate of ground tilt was faster at first, and decreased as follow with the pumping time. However it showed an approximately linear relationship, that is, $V_{\text{NS}} = -0.04553 \text{ ms/min}$ in NS, $V_{\text{EW}} = -0.07971 \text{ ms/min}$ in EW within the first two hours of pumping water. The frequency domain analysis result shows that: The frequency of anomaly signal of ground tilt which was interfered by pumping water was between 0.0018 Hz and 0.003 Hz. Thus, we designed a band-stop filter processing program to filter out the frequency of pumping water signal to reduce the influence of pumping water on the ground tilt observation.

Key words: water pumping experiment; ground tilt; pumping water interference; band-stop filter processing program