

浅议降雨对丰宁台水管倾斜仪的干扰与排除

郭亚亚, 张玉林, 孙彭涛, 常玉柱, 任俊峰

A brief discussion on the interference and elimination of rainfall to the water pipe inclinometer at Fengning station

Guo Yaya, Zhang Yulin, Sun Pengtao, Chang Yuzhu, and Ren Junfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-143>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同地震台站水管倾斜仪数据资料对比分析

Comparative analysis of water pipe inclinometer data of different seismic stations

地震科学进展. 2020(11): 15-20

蚌埠监测中心井水位长时间持续升高成因分析

Analysis on the causes of the long-term continuous increase of the water level in the well of Bengbu Monitoring Center

地震科学进展. 2021(10): 472-476

陕西省VP型垂直摆倾斜仪观测对比分析

Comparative analysis of VP type vertical pendulum tiltmeter in Shaanxi Province

地震科学进展. 2021(8): 371-375

甘肃景泰 $M_S4.7$ 地震前芦阳水温异常分析

Analysis on water temperature anomalies at Luyang well before the Jingtai $M_S4.7$ earthquake in Gansu Province

地震科学进展. 2018(5): 12-19

德令哈台尕海井水位异常分析

Analysis on the water level anomaly at Delingha Gahai well in Qinghai Province

地震科学进展. 2020(2): 36-39

河流载荷加载对抚顺水管倾斜的影响分析

Analysis of the influence of the river loading on the tilting of the Fushun water pipe

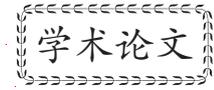
地震科学进展. 2019(8): 98-99



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭亚亚, 张玉林, 孙彭涛, 等. 浅议降雨对丰宁台水管倾斜仪的干扰与排除 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(6): 383-388. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-143

Guo Y Y, Zhang Y L, Sun P T, et al. A brief discussion on the interference and elimination of rainfall to the water pipe inclinometer at Fengning station[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(6): 383-388. doi:10.19987/j.dzcxjz.2023-143



浅议降雨对丰宁台水管倾斜仪的干扰与排除

郭亚亚* 张玉林 孙彭涛 常玉柱 任俊峰

(承德地震监测中心站, 河北承德 067000)

摘要 选取 2021—2023 年丰宁地震台 DSQ 水管倾斜仪和气象三要素观测资料, 通过对降雨量与观测数据做相关性分析和褶积滤波分析, 并通过褶积滤波法与多元回归法消除降雨的滞后效应, 判断降雨与水管仪应变量之间的关系。结果表明: 丰宁 DSQ 水管倾斜仪趋势转折与降雨有关, 观测数据日变化幅度与降雨累积值存在良好的线性关系, 与瞬时降雨量之间没有明显的相关性, 在响应时间上存在 1 天的滞后; 褶积滤波能较好的消除降雨引起的阶变, 但未能完全消除 2021 年 6—9 月水管仪降雨后 NS 向南倾、EW 向东倾的状态, 可能还受到其他因素影响。

关键词 水管倾斜仪; 降雨; 相关性分析; 褶积滤波

中图分类号: P315.6 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)06-0383-06

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2023-143

A brief discussion on the interference and elimination of rainfall to the water pipe inclinometer at Fengning station

Guo Yaya, Zhang Yulin, Sun Pengtao, Chang Yuzhu, Ren Junfeng

(Chengde Earthquake Monitoring Center Station, Hebei Chengde 067000, China)

Abstract Observation data of DSQ water pipe inclinometer and meteorology at Fengning seismic station from 2021 to 2023 were selected. Correlation analysis and convolution filter analysis were performed on rainfall and observation data, and convolution filter method and regression analysis were used to eliminate the lag effect of rainfall, and the relationship between rainfall and water pipe stress variables was judged. The results show that the trend change of the Fengning DSQ water pipe inclinometer was related to rainfall, and the daily variation of the observed data had a good linear relationship with the rainfall accumulation value, but did not obviously correlate with the instantaneous rainfall, and the response time had a lag of 1 day. Convolution filtering can better eliminate the step change caused by rainfall, but it failed to completely eliminate the southward inclination of NS and eastward inclination of EW after the rainfall of the water pipe meter from June to September 2021. Other factors may also affect the inclination of NS to S and EW to E of the water pipe meter.

Keywords water pipe inclinometer; rainfall; correlation analysis; convolution filtering

收稿日期: 2023-10-12; 采用日期: 2023-12-27。

基金项目: 中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202201047)资助。

* 通信作者: 郭亚亚(1984-), 女, 工程师, 主要从事地震监测工作。E-mail: guoyaya.1122@163.com。



0 引言

形变测量是重要的地震监测技术,为防震减灾和地震预报提供了高精度高时间分辨率形变信息,一般而言,可以通过形变观测的非正常趋势变化进行异常判定^[1-2]。水管倾斜仪作为重要的形变观测手段,有较高的观测精度,但在日常观测中容易受到降雨、气温、气压等环境因素的干扰,如果不加以排除,将影响异常判定的可靠性。

2021年6—9月丰宁地震台DSQ型水管倾斜仪(以下简称水管仪)观测数据曲线出现间断性转折变化,NS向加速下降,EW向加速上升。通过异常核实发现水管仪转折变化可能与降雨有关。游丽兰等^[3]用褶积滤波和多元回归法排除大灰厂短水准的降雨干扰有一定成效,刘序俨^[4]提出用褶积回归法排除降雨对地倾斜观测干扰效果也很好。本文利用2021—2023年丰宁水管仪和气象三要素观测资料,对降雨量与观测数据做线性相关性分析,并通过褶积滤波法与回归性分析消除降雨的滞后效应,判断降雨与水管仪应变量之间的关系。

1 丰宁台形变山洞及水管仪概况

丰宁地震台形变山洞位于丰宁县大阁镇帐房沟村,海拔约740 m的丘陵地带,观测区属于中朝准地台燕山台褶皱带北部、围场拱断束上黄旗岩浆岩压带大阁火山沉积盆地,主要地层是早元古代花岗岩和第四系坡洪积层、冲洪各地层,东西向丰宁—隆化与尚义—平泉断裂,在测区南部通过。山洞北边为农田,南靠走向近EW向西山山体,西有驸马山,最高峰海拔约1800 m,周边地形整体西高东低(图1)。

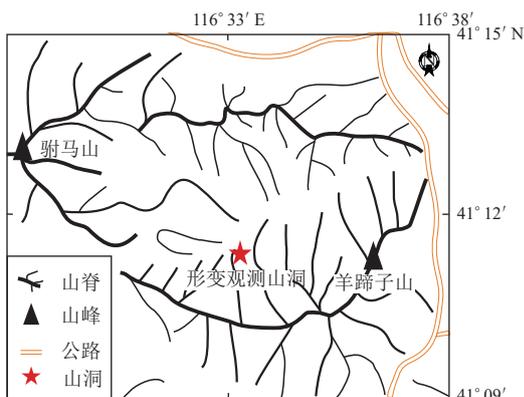


图1 丰宁台帐房沟形变观测站周边地形图

Fig. 1 Topographic map around Fengning Zhangfanggou deformation observation station

形变山洞于2018年建成,进深约120 m,洞顶覆盖层约40 m,洞室温度变化范围:9.23℃~9.32℃。2020年6月水管仪安装完毕,仪器运行稳定后于2020年12月数据接入河北省地震局数据库,2021年全年仪器运行正常,周边无干扰源。

2 降雨对DSQ型水管倾斜仪干扰分析

每年的6—9月为丰宁县的雨季,年降雨主要集中在在这个时间段。2021年6—9月共发生降雨事件64次,累计降雨量446.4 mm,对水管仪观测造成一定程度的影响。2022年6—9月共发生降雨事件47次,累计降雨量145.1 mm;2023年6—9月共发生降雨事件47次,累计降雨量164.7 mm,降雨对水管仪日变曲线并未产生明显的影响,主要表现为长时间的趋势性变化(图2),降雨结束后曲线逐渐恢复。由于2022年和2023年降雨量明显减少,且时间相对比较分散,只在日降雨量较大时曲线有明显阶变,阶变方向与2021年相同均表现为NS向下降,EW向上升。

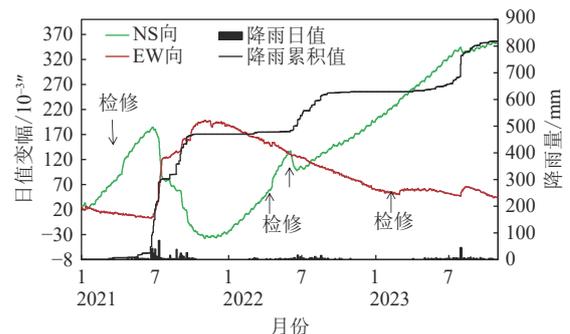


图2 水管仪变化趋势与降雨量对比图

Fig. 2 Comparison map of water pipe meter trend and rainfall

从图2可以看出,2021年6—9月水管仪观测两分向曲线变化形态与累积降雨量的变化形态有相似性,EW向表现为正相关,NS向表现为负相关,NS向同步性优于EW向,从响应时间上来看,水管仪观测曲线变化略滞后降雨时间。

雨水渗入地面,引起地下介质密度和重力的双重改变。降雨初期,局部产生缓慢形变,当连续降雨量使地面岩石达到饱和,形变观测的变化趋势才会与降雨同步,所以形变观测曲线变化要略滞后于降雨的累积变化,降雨结束后,随着水分的蒸发和渗流,岩石和土层中的水分减少,岩石应变会逐渐恢复^[5-6]。丰宁台水管仪的变化形态符合降雨干扰特征。

2.1 相关性分析

对水管仪观测数据有影响的降雨情况大致分为

两类：短时强降雨和长时间连续降雨。短时强降雨对观测曲线有明显干扰的有 2021 年 7 月 12 日、8 月 9 日、8 月 25 日、9 月 20 日、2023 年 7 月 31 日—8 月 1 日，短时强降雨总量与水管仪形变量及影响时长统计见表 1。连续降雨主要有 2 次：第 1 次在 2021 年 6 月 23 日—7 月 8 日，降雨量 193.3 mm，两次相邻降雨时间最大间隔小于 36 h；第 2 次在 2021 年 9 月 1—7 日，降雨量 62.2 mm，两次相邻降雨时间最大间隔小于 15 h。2022 年全年未受降雨干扰。

理论上降雨量越大，对水管仪的影响越大，影响持续时间越长，但从强降雨影响统计结果来看，并不完全符合这一规律。2021 年 8 月 25 日降雨量较大但水管仪形变量却非常小，可能因降雨较快，38.3 mm 降水发生在 6 min 内，瞬时最大降雨量 9.1 mm/min，雨水流失快，渗入少，没有造成明显的负载；2023 年 7 月 31 日 16:00—18:00 降雨量 38.0 mm，当地有洪水形成，也属快速流失性降雨，对水管仪的影响也相对偏小。持续降雨期内，累计降雨量与水管仪形变量数

表 1 短时强降雨对水管仪的影响

Table 1 Influence of short time heavy rainfall on water pipe meter

日期	降雨量/ mm	NS向变幅/ 10 ⁻³ "	EW向变幅/ 10 ⁻³ "	影响时长/ 日
2021-07-12	71.60	79.74	81.25	10
2021-08-09	16.20	9.81	4.22	3
2021-08-25	38.30	1.09	2.70	2
2021-09-20	25.90	22.41	5.67	4
2023-07-31	74.50	11.12	17.78	5
—08-01				

据做对比(图 3)分析，二者呈线性相关。统计水管仪日变幅与降雨数据，发现降雨后最大形变量基本上发生在降雨次日。用降雨量累积值分别与降雨当日形变量和降雨次日形变量计算相关系数：6 月 23 日—7 月 8 日段 NS 向分别为-0.71 和-0.80，EW 向分别为 0.58 和 0.61；9 月 1—7 日段 NS 向分别为-0.78 和-0.86，EW 向分别为 0.72 和 0.74，降雨量累积值与降雨次日形变量的相关性更高。

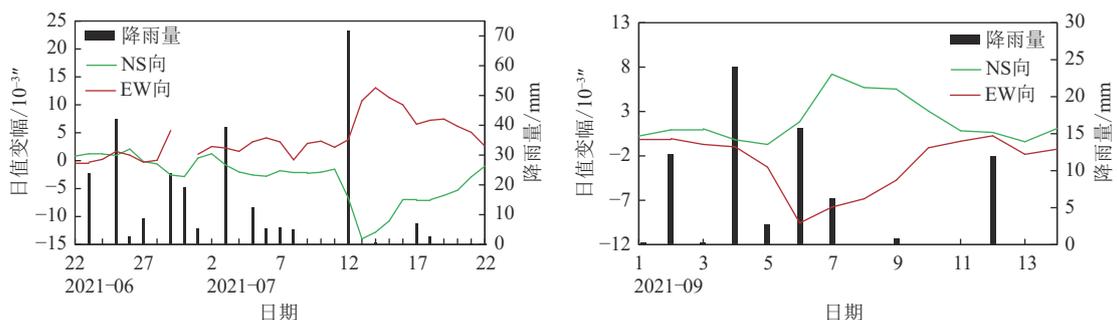


图 3 降雨量与水管仪形变量对比

Fig. 3 Comparison of rainfall and water pipe shape variables

2.2 褶积滤波分析

降雨对水管仪的观测值影响并不是当天最大，地层、岩石等从接受水分到膨胀发生形变有一过程，达到一定影响量后，随着雨水蒸发与流失，影响开始减弱。对于这种突发性不连续和非叠加性的影响，是一个既调幅又调相的过程，而褶积滤波能够较好的处理这种干扰^[3-4]。该方法具体算法如下：离散型的两个序列 $x(t)$ 和 $h(t)$ 的褶积 $y(t)$ 的计算公式为：

$$y(t) = \sum_{\tau=0}^t x(\tau)h(t-\tau) = x(t) * h(t) \quad (1)$$

离散型的褶积滤波是按时间序列求各次影响的累积总和，而对每次影响，又同时顾及干扰本身的大

小及相对于观测的时间间隔两个因子，并以此来消除有时间滞后的影响。

若降雨量最大影响在第 M 天，影响持续到第 N 天，设单日降雨量对水管仪观测值的影响函数为 $x(t)$,

$$x(t) = \begin{cases} A_0 + A_1t + A_2t^2 & 0 \leq t \leq M \\ B_0 + B_1t + B_2t^{-1} & M < t \leq N \\ 0 & t > N \end{cases} \quad (2)$$

则降雨对观测值的总影响为：

$$Y(t) = x(t) * h(t) \quad (3)$$

应用公式(2)，

$$\begin{aligned}
 Y(t) &= x(t) * h(t-\tau) = \sum_{\tau=0}^N x(\tau)h(t-\tau) \\
 &= \sum_{\tau=0}^M x(\tau)h(t-\tau) + \sum_{\tau=M+1}^N x(\tau)h(t-\tau) \\
 &= A_0 \sum_{\tau=0}^M h(t-\tau) + A_1 \sum_{\tau=0}^M \tau h(t-\tau) + A_2 \sum_{\tau=0}^M \tau^2 h(t-\tau) + \\
 &B_0 \sum_{\tau=M+1}^N h(t-\tau) + B_1 \sum_{\tau=M+1}^N \tau h(t-\tau) + B_2 \sum_{\tau=M+1}^N \tau^{-1} h(t-\tau)
 \end{aligned} \quad (4)$$

式中, t 和 τ 为时间变量, $h(t)$ 为降雨量函数, 公式(4)表示时刻 t 天前 N 天中每天降雨对 t 天测值影响总和。

2023年水管仪运行平稳, 只在7月31日—8月1日降雨时有明显阶变, 其它时间段基本无干扰。

7月3日—8月26日断断续续有降雨, 若降雨造成的影响小于水管仪的日变幅不会影响水管仪的趋势变化, 7月31日降雨量44.8 mm, 8月1日降雨量29.7 mm, 水管仪NS向表现出明显的下降, EW向表现出明显的上升, 至8月6日恢复。选取2023年7—8月日均值和降雨量数据, 统计降雨后水管仪观测值日变幅度, 基本上降雨次日形变量最大, 影响时长为5天, 选取 $M=1$, $N=5$ 。利用褶积滤波法计算降雨对水管仪的影响, 绘制降雨对水管仪的影响曲线(图4)。图4c和图4d为通过褶积滤波法拟合出的降雨对水管仪观测的影响量, 图4e和图4f为剔除降雨影响后水管仪的修正曲线, 可以看出剔除降雨干扰后, 水管仪变化较为平稳, 表明褶积滤波法对剔除降雨对水管仪的影响具有可行性。

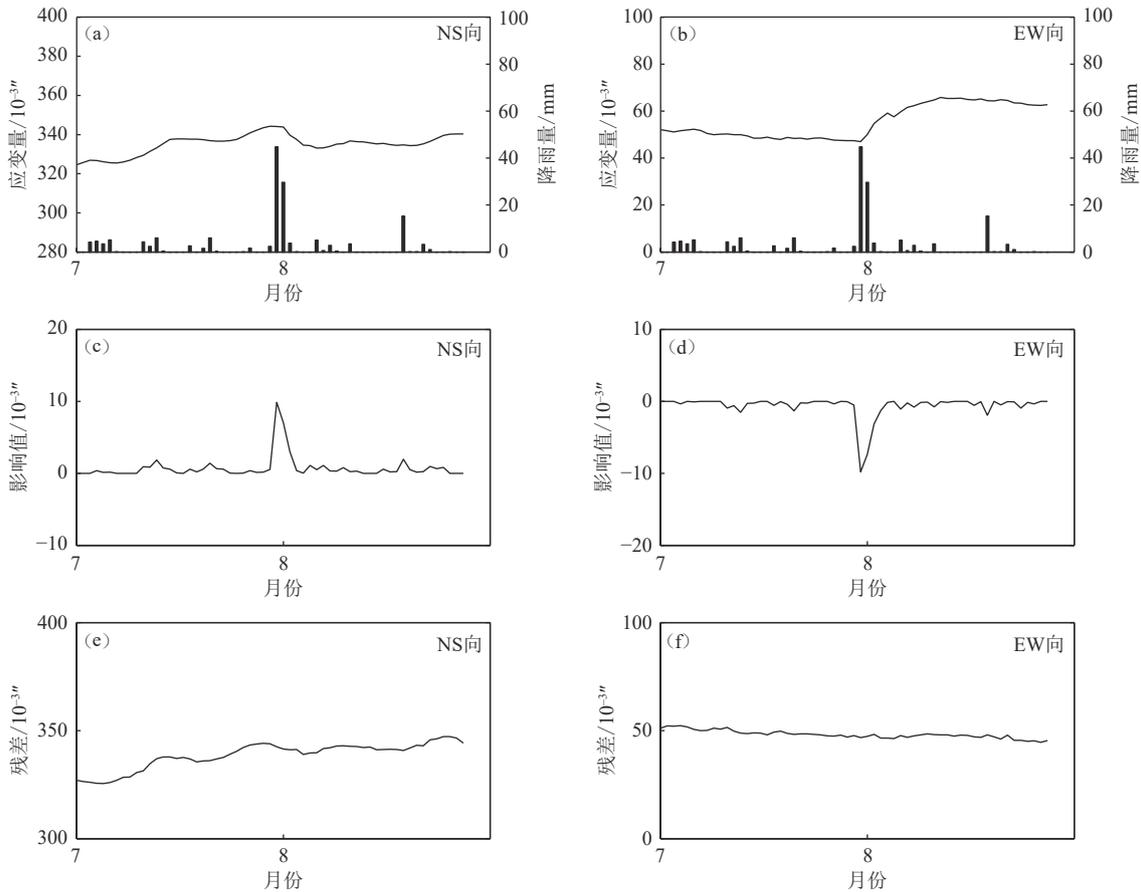


图4 2023年降雨对丰宁水管仪NS向和EW向的影响

Fig. 4 Influence of rainfall on the NS and EW direction of Fengning water pipe meter in 2023

2021年的降雨情况比较复杂, 因连续降雨水管仪曲线在恢复过程中存在再次被降雨干扰的情况, 降雨量不同, 对水管仪的影响时长也不同。统计6—9月降雨后水管仪观测值日变幅度, 基本上降雨

次日形变量最大, 选取 $M=1$, 根据影响持续时间不同, 选取相应的 N 值(表2), 用褶积滤波法计算降雨对丰宁水管仪NS向、EW向的影响值, 再用线性回归方程估算水管仪未受降雨影响的测值。图5a和

图 5b 分别为 NS 向和 EW 向水管仪日值和降雨量曲线, 图 5c 和图 5d 分别为褶积滤波法计算后降雨量对 NS 向和 EW 向水管仪的影响量, 图 5e 和图 5f 分别为 NS 向和 EW 向应变量值残差。剔除掉降雨的影响后, 水管仪曲线相对稳定一些, 不再有明显的阶变, NS 向下降和 EW 向上升趋势有所减缓, 说明 2021 年丰宁台水管仪出现的阶变与降雨有关。但 6—9 月 NS 向 S 向倾斜、EW 向 E 向倾斜的趋势未完全改变。

表 2 N 值选取

Table 2 N-value selection

日期	影响时长/日	N 值
2021-06-23—07-08	4	4
2021-07-12	10	10
2021-08-09	3	3
2021-09-01—07	3	3
2021-08-25	2	2
2021-09-20	4	4

3 干扰原理分析

丰宁形变山洞所处位置在西山北坡山前, 周边整体地形西高东低, 降雨后雨水自西向东汇集, 雨水渗入增加土壤和岩石孔隙中的水分, 导致岩石的抗压能力降低, 引起岩石压力和应变的变化, 导致水管仪 EW 向降雨后东向倾斜; 山洞北边地势相对平坦, 南边为西山山体, 山体土层较厚, 植被茂密易于储存水分, 雨季雨水较大时, 降雨导致被覆层负载增加, 雨水继续渗入, 进入岩石裂缝, 造成裂缝和孔隙压持续增大, 产生非永久性形变, 随着降雨量的不断增加, 导致水管仪 NS 向降雨后南向倾斜。

降雨对形变观测的影响通常是多种效应叠加的结果, 形式相当复杂, 会有多日连续降雨或者间隔很短就再次降雨的情况, 2021 年丰宁降雨这两种情况都有。当形变山洞所在山体含水量较为饱和, 后续的降雨则无法被山体保存而形成有效载荷, 同时岩石膨胀有极限, 在连续降雨的时段也会达到饱和, 不能单独取决于当日降水量, 还可能与临近时间的降雨

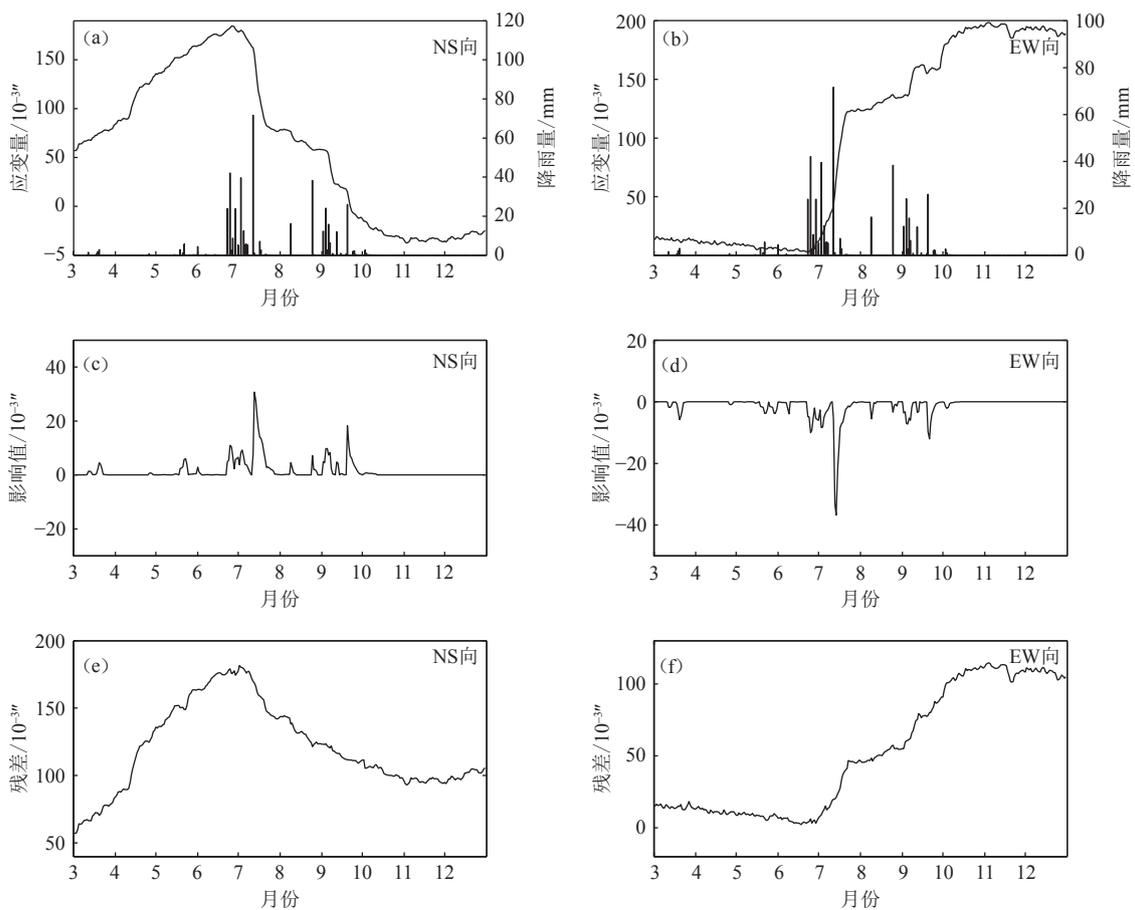


图 5 2021 年降雨量对丰宁水管仪 NS 向和 EW 向的影响

Fig. 5 Influence of rainfall on NS and EW direction of Fengning water pipe meter in 2021

量有关。另外,岩石和土层的渗透率不同,会引起载荷的不均匀,对形变影响也会比较大^[7-10]。

丰宁帐房沟形变山洞还安装有 SQ-70DSI 水平摆倾斜仪、SS-Y 型洞体应变仪和 VP 型垂直摆倾斜仪各 1 套,这 3 套仪器在 2021 年 6—9 月与 DSQ 水管倾斜仪有同步的趋势变化,但在变化幅度和变化形态上 DSQ 水管倾斜仪与降雨的对应性最好。与 2022 年和 2023 年年变曲线对比,水平摆倾斜仪 NS 向,洞体应变仪 NS 向,在 2022 年仍有一段时间漂移,可能因不同仪器对同一干扰的灵敏性不同,且仪器运行时间较短,还未完全稳定,降雨形成的载荷改变了原有的平稳过程。褶积滤波法未能完全消除水管仪降雨后 NS 向南倾,EW 向东倾的状态,可能与仪器本

身的零漂也有关系,需要进一步收集更丰富的资料进行深入研究。

4 结论

丰宁 DSQ 水管倾斜仪受降雨干扰时呈现 NS 向加速南倾,EW 向加速东倾的趋势变化,趋势转折的方向受地形和载荷双重影响;丰宁 DSQ 水管倾斜仪在变化形态上与降雨对应性较好,响应时间上存在 1 天的滞后;观测数据日变化幅度与降雨累积值存在良好的线性关系,与瞬时降雨量之间没有明显的相关性;褶积滤波能较好的消除降雨引起的阶变,但未能完全消除 2021 年 6—9 月水管仪降雨后 NS 向南倾、EW 向东倾的状态,可能还受到其他因素影响。

参考文献

- [1] 中国地震局监测预报司. 地形变测量(试用本)[M]. 北京:地震出版社, 2008
Monitoring and Forecasting Department of China Earthquake Administration. Topographic variation survey: Trial version[M]. Beijing: Seismological Press, 2008
- [2] 丁建国, 陆德明, 狄梁, 等. 常熟台倾斜仪降雨干扰定量分析[J]. 华南地震, 2011, 31(3): 83-88
Ding J G, Lu D M, Di L, et al. Quantitatively determination analysis of rain influence at Changshu seismic station[J]. South China Journal of Seismology, 2011, 31(3): 83-88
- [3] 游丽兰, 梁卫鸣, 陈岩. 用褶积滤波及多元回归方法处理断层位移测量资料[J]. 地壳形变与地震, 1984, 4(4): 386-393
You L L, Liang W M, Chen Y. Processing the fault displacement data using faltung filtering and polynary regression[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1984, 4(4): 386-393
- [4] 刘序俨. 应用褶积同态滤波排除降雨对地形变观测的干扰[J]. 地震, 1985(6): 48-51
Liu X Y. Eliminating precipitation effects on observation data of crustal deformation by means of homomorphic convolution filter[J]. Earthquake, 1985(6): 48-51
- [5] 汪翠枝, 张磊, 刘双庆, 等. 定点形变观测的降雨干扰及排除方法研究[J]. 华北地震科学, 2010, 28(1): 42-47
Wang C Z, Zhang L, Liu S Q, et al. Study on the rainfall interfere in fixed-point deformation data and eliminable method[J]. North China Earthquake Sciences, 2010, 28(1): 42-47
- [6] 吕琳, 杨艳芳, 舒德亮. 武汉台形变观测与降雨参数之间的定量分析与研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(1): 136-142
Lü L, Yang Y F, Shu D L. Quantitative analysis and mechanism of the relation between deformation observation and rainfall parameters based on data from Wuhan station[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 136-142
- [7] 李宏伟, 刘瑞春, 王霞, 等. 山西昔阳地震台水平摆观测受降雨影响的数值分析[J]. 山西地震, 2016(2): 1-4
Li H W, Liu R C, Wang X, et al. Effect of rainfall on observation of horizontal pendulum tiltmeter in Xiyang seismological station[J]. Earthquake Research in Shanxi, 2016(2): 1-4
- [8] 李智蓉, 付虹, 张中旭. 鲁甸 6.5 级地震前昭通地震台形变异常与降雨关系分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 919-928
Li Z R, Fu H, Zhang Z X. Analysis on the relationship between deformation anomaly and rainfall in Zhaotong station before Ludian 6.5 earthquake[J]. Journal of Yunnan University, 2018, 40(5): 919-928
- [9] 彭登靖, 马敏伟, 秦波, 等. 降雨变化对昭通中心站 YRY-4 钻孔应变仪的影响分析[J]. 地震科学进展, 2022, 52(9): 414-419
Peng D J, Ma M W, Qin B, et al. Analysis of the influence of rainfall change on the YRY-4 borehole strain gauge at Zhaotong seismic station[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2022, 52(9): 414-419
- [10] 杨龙翔, 薛秀秀, 闫伟, 等. 信阳台伸缩仪降雨干扰特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(1): 103-106
Yang L X, Xue X X, Yan W, et al. Analysis of rainfall interference characteristics of Xinyang station extensometer[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(1): 103-106