

# 固原台VP宽频带垂直摆观测数据对比分析

杨慧慧, 师海阔, 栾博文

宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川

收稿日期: 2022年6月6日; 录用日期: 2022年7月7日; 发布日期: 2022年7月14日

---

## 摘要

本研究采用2021年1~12月炭山台、泾源台的VP宽频带垂直摆观测数据。通过将这两个台站的VP宽频带垂直摆观测数据进行固体潮记录、数据连续性、观测精度、相关性以及同震响应特征等方面进行对比分析, 得出这两套仪器观测资料的优劣性。

## 关键词

VP宽频带垂直摆, 数据干扰, 对比分析

---

# Comparative Analysis of VP Broadband Vertical Pendulum Observation Data at Guyuan Station

Huihui Yang, Haikuo Shi, Bowen Luan

Earthquake Agency of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia

Received: Jun. 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jul. 7<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 14<sup>th</sup>, 2022

---

## Abstract

Based on the observation data of VP broadband vertical pendulum at Tanshan station and Jingyuan station in Guyuan from January to December 2021, the VP broadband vertical pendulum observation data of the two stations are compared and analyzed in terms of solid tide records, data continuity, observation accuracy, correlation and coseismic response characteristics. The advantages and disadvantages of the two sets of instrument observation data are obtained.

## Keywords

VP Broadband Vertical Pendulum, Data Interference, Comparative Analysis

---

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

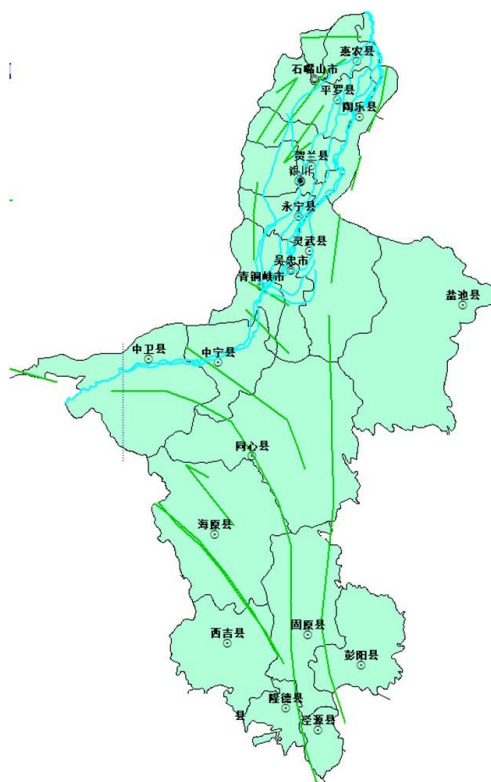
固原地震监测中心站辖区内炭山形变台和泾源形变台各有一套 VP 宽频带倾斜仪。炭山形变台自建成之日起架设的是 VP 型宽频带倾斜仪, 泾源形变台始建于 2006 年, 最初架设的是 VS 型垂直摆, 于 2017 年 11 月升级为 VP 宽频带垂直摆。VP 宽频带垂直摆倾斜仪的测量频带宽度由 2 秒至无穷大[1], 其优于千分之一角秒的分辨力和拓宽的频带, 不但满足了对地倾斜的观测, 并且也能记录到缓慢地震和长周期地震等更多地震信息[2]。由于场地环境、仪器最初的架设情况、安装点的地理位置、地质构造、观测系统、人为干扰、自然环境干扰等[3]均不相同, 两套仪器所产生的数据优劣性也不尽相同。本文对炭山台、泾源台 VP 宽频带垂直摆观测数据进行固体潮记录、数据连续性、观测精度、相关性以及同震响应特征等方面的综合分析, 明确两套仪器的资料产出质量等情况, 对其运行价值充分地了解, 本次研究对开展地震监测预报工作具有较高的理论研究价值和现实意义[4], 本文将对这两个形变台站 2021 年 1~12 月 VP 宽频带垂直摆观测数据进行研究分析对比。

## 2. 台站概况以及仪器特点说明

泾源形变台始建于 2006 年 4 月, 北纬 35.49°, 东经 106.34°, 海拔高度为 1890 m, 台基为第四纪洪积沙土, 基岩完整质密, 位于泾源县城卧龙山下的旧防空洞内, 东面有牛首山—固原断裂, 西面有六盘山东麓断裂。原山洞南北(NS)、东西(EW)两个方向成 120°夹角, 施工将 EW 方向取直, 与 NS 向成 90°正交。最终两个方向的室内长度分别为: NS 向 33 米, 引洞加 23 米主洞, EW 向洞长 23 米。清理洞内地面浮土厚 20 cm 至新鲜岩石, 将所有清理出的土夯填到山洞东端废弃段(上部不留缝隙)。山洞顶部覆盖厚度小于 15 米, 山体上覆盖植物密度高且均为高度较大的植物。洞体室温 8 度, 洞内年温差变化小于 0.2 度。VP 宽频带垂直摆于 2017 年 11 月正式观测。

炭山形变台始建于 2012 年 11 月, 北纬 36.39°、东经 106.27°, 海拔高程 2300 m, 地处宁夏南部多山地区, 属大陆半干旱草原气候带, 干旱少雨。开凿洞室长度北南向(NS)为 50 米, 东西向(EW)为 30 米, 区域断裂有海原断裂和六盘山东麓断裂带北端, 处于牛首山—罗山—固原断裂带与烟囱山断裂带中间。山洞顶部覆盖大于 40 米, 侧向覆盖大于 30 米。主体山脉基本无植被, 接近主峰局部地方(背坡)有沙砾石覆盖现象, 两公里内没有大的活动断裂通过。洞内岩石系前寒武系和石英云母片岩, 完整性好。洞体室温 8 度, 年变化小于 0.4 度, 观测洞室的顶部地形对称性良好。

VP 宽频带垂直摆用于测量地球内部的倾斜变化, 是地震前兆观测的重要手段之一[5]。与其他洞体倾斜仪(水管倾斜仪、石英水平摆倾斜仪)相比, VP 垂直摆倾斜仪在传感器方式、机械结构、电路结构和运行维护等方面更简单实用[6]。VP 型垂直摆倾斜仪是由中国地震局地震研究所在 VS 型垂直摆倾斜仪基础之上研发的新型地震前兆观测设备, 由于其优于千分之一角秒的分辨力和拓宽的频带不但满足了对地倾斜固体潮的观测, 并且也能记录到缓慢地震和长周期地震等更多的地震信息[7]。VP 宽频带垂直摆测量太阳和月亮位置变化所引起的铅垂线变化, 用于测量倾斜固体潮[8]。VP 宽频带垂直摆的位移传感器精度达万分之一微米, 大大缩短了摆长, 减小了仪器尺寸和加工难度。两套仪器均安装在观测洞内, 受干扰较小[5](图 1)。



**Figure 1.** Geological structure map of Jingyuan station and Tanshan station

**图 1.** 泾源台、炭山台地质构造图

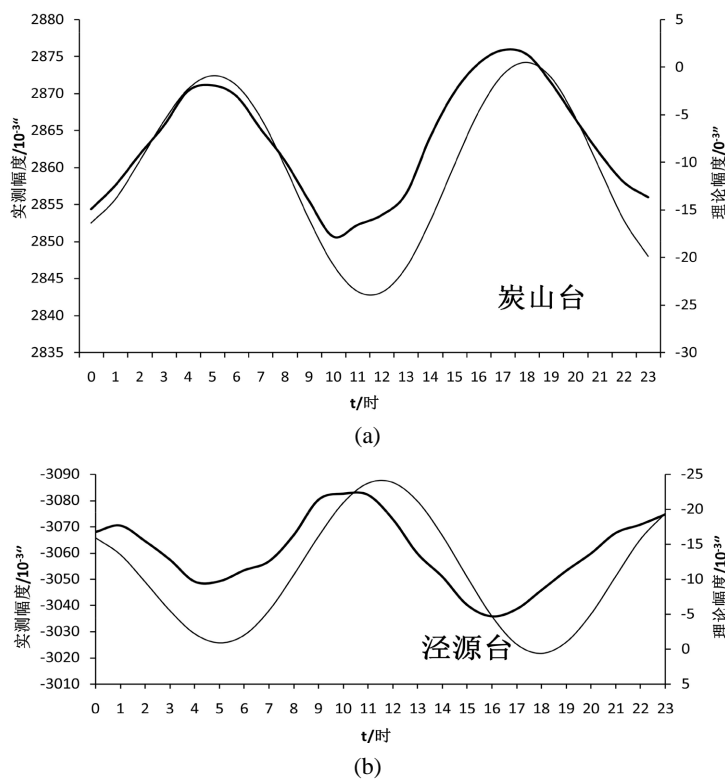
### 3. 观测数据分析

#### 3.1. 正常固体潮记录

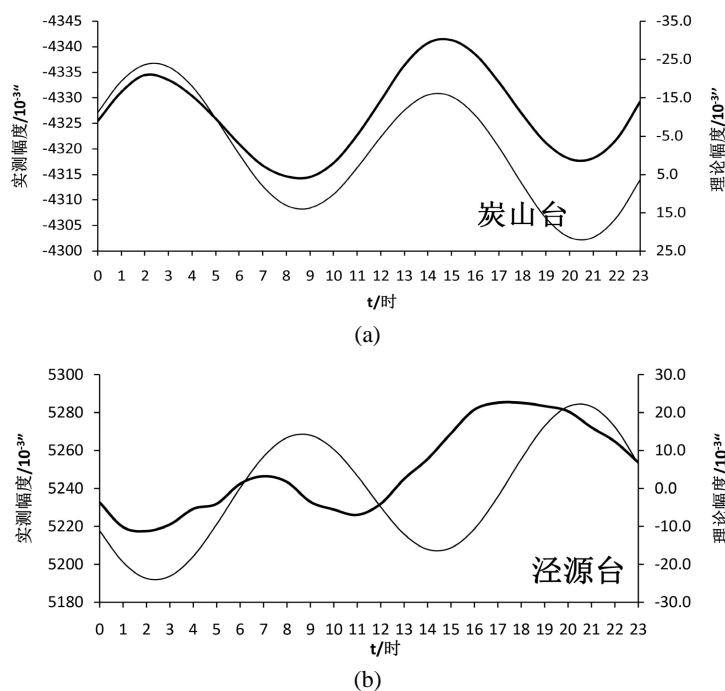
用 VP 宽频带垂直摆可以观测到地球的固体表层和海洋潮汐相似的周期性升降现象，记录的日观测曲线展示了地壳在一天内所产生的弹性形变量，反映地壳一天的变化[4]。陆地表面的升降幅度可达 7~15 cm，当存在固体潮时，垂直摆铅垂线的方向和地面倾斜会发生相应的变化，但幅度不大，仅有千分之几角秒角度。以 2021 年 03 月 26 日炭山台和泾源台记录的日变分钟值和理论固体潮曲线(如图 2, 图 3)为例，炭山台 NS 与 EW 向实测曲线与理论固体潮相关性好，而泾源台 NS 向与 EW 向相关性较差，NS 向与理论固体潮相位相比，滞后 110 分钟，EW 向比理论固体潮相位滞后 123 分钟。炭山台 VP 型垂直摆记录的观测曲线日变幅较小，泾源记录的日变幅相对较大，而且泾源所记录的固体潮曲线没有炭山清晰，这是因为泾源所处山洞的条件较炭山差，山洞上部覆盖层不足 15 米，山坡上布满高大挺拔的树木，容易受到天气等因素的影响，例如风扰、降雨等[9]。每当刮风、降雨时，VP 型垂直摆会迅速超出量程。场地的不对称也会对数据产生影响[10]，泾源山洞的西侧临近水库，所处场地不是无限广阔且对称的，故水库对东西向所记录的曲线有影响[11]，且自从 VP 型垂直摆架设之日起，东西向的曲线一直向西漂移的趋势，在向西漂移的趋势上，记录的曲线也受到水库蓄放水的扰动影响。

#### 3.2. 资料连续性

本次研究分析采用宁夏省泾源形变台、炭山台 VP 型垂直摆 2021 年观测资料，计算数据完整率与连续率，具体情况见下表 1:



**Figure 2.** Comparison between NS diurnal observation curve of VP vertical pendulum and theoretical earth tide in Jingyuan station and Tanshan station  
**图 2.** 炭山台与泾源台 VP 型垂直摆 NS 向日观测曲线与理论固体潮对比



**Figure 3.** Comparison between EW diurnal observation curve of VP vertical pendulum and theoretical earth tide in Jingyuan station and Tanshan station  
**图 3.** 炭山台与泾源台 VP 型垂直摆 EW 向日观测曲线与理论固体潮对比

**Table 1.** Statistics of VP broadband vertical pendulum continuity and integrity**表 1.** VP 宽频带垂直摆连续率、完整率统计

	完整率(%)		连续率(%)	
	NS	EW	NS	EW
炭山台	99.57	99.51	99.92	99.92
涇源台	99.71	98.53	99.99	99.99
平均	99.64	99.01	99.96	99.96

通过统计发现,炭山台连续率、完整率良好,连续率北南、东西两个测向均达到 99.92%。涇源台北南向连续率与完整率良好,连续率达到 99.99%、完整率达到 99.71%,东西向相对南北向连续率、完整率较差,影响该测向观测资料连续性的主要因素有仪器故障、人为干扰、环境影响等。涇源台形变台是旧防空洞改造而成,洞体顶部土层覆盖厚度小于 15 米,山坡上覆盖的植物密集,容易受到天气等因素的干扰[12],观测数据迅速超出观测量程,反复调零影响观测数据的完整率[13]。

### 3.3. 观测精度对比

固体潮观测的实际意义是计算实测固体潮相对理论固体潮的偏离数值,通过长期、连续观测获的固体潮随时间的变化信息,进而研究地球内部物性的变化及机理[14],取 VP 型垂直摆整点值数据,使用调和和分析计算固体潮偏离值,应用中国地震前兆数据处理系统 2011 集成版[4],求解潮汐因子、绝对误差、相对误差、相位的滞后与误差,如表 2 所示。

观测精度跟场地环境、仪器最初的架设情况、安装点的地理位置、地质构造、观测系统、认为干扰、自然环境干扰等密切相关[3]。观测精度指标取决于绝对误差。

**Table 2.** Harmonic analysis results of VP type vertical pendulum from January to December 2021**表 2.** 2021 年 1~12 月 VP 型垂直摆调和结果

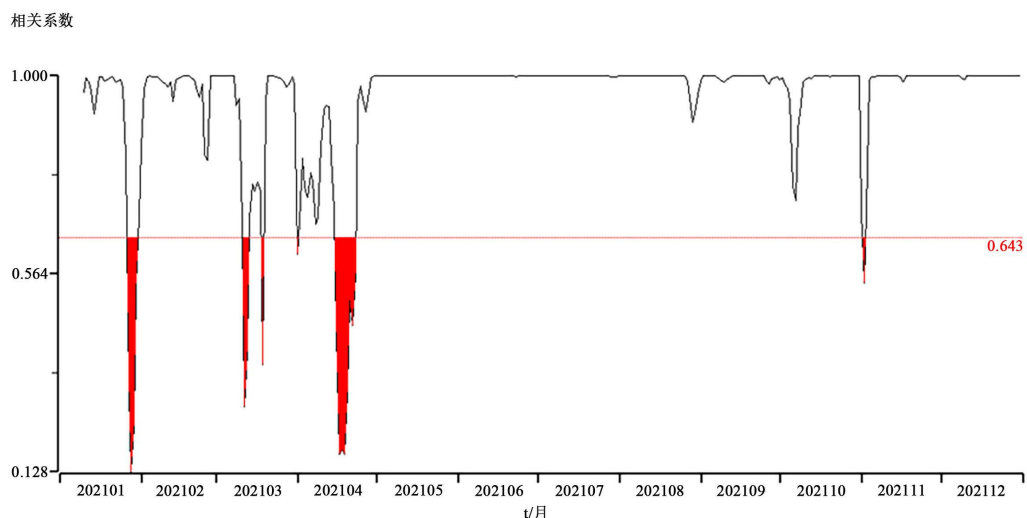
台站名	测向	潮汐因子	绝对误差	相对误差	相位滞后/°	相位误差/°
炭山台	NS	0.8506	0.0270	0.0317	4.4100	1.8172
	EW	1.1879	0.0133	0.0111	-82.9146	0.6373
涇源台	NS	0.8020	0.0849	0.1072	4.8051	6.1421
	EW	1.2653	0.1200	0.0947	-66.6372	5.4235

通过调和和分析发现,炭山台东西向绝对误差最小,观测精度最高,炭山台北南向的绝对误差相对较小,涇源台的北南向、东西向绝对误差均较大,观测精度较低。炭山在极端天气干扰的情况下,数据稳定性高,涇源在极端恶劣的天气下(降雨、刮风)数据跳跃极大,经常出现超出量程的情况。

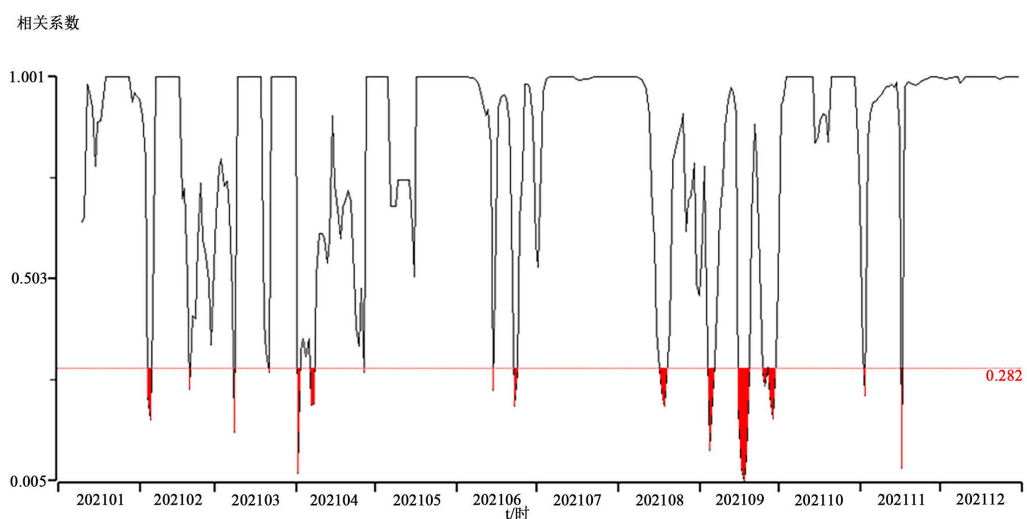
### 3.4. 日均值变化趋势相关性分析

相关系数是用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标[15]。相关系数按积差方法算,同样以两变量与各自平均值的离差为基础,通过两个离差相乘来反映两变量之间的相关程度。相关系数是研究两变量之间相关程度的量,一般用字母  $r$  表示  $r_{xy} = \frac{\sum xy}{Ns_x s_y}$ 。其中,  $r_{xy}$  表示  $x, y$  数列之间的相关系数;  $x = X - \bar{x}$ ,  $y = Y - \bar{y}$ ;  $s_x$ 、 $s_y$  分别是  $x$ 、 $y$  的标准差;  $N$  为成对量数的次数[16]。

采用 2021 年炭山台、泾源台的日均值数据，通过 mapsis 基于 GIS 的地震分析预报系统，分别计算泾源台、炭山台 NS、EW 向 VP 宽频带垂直摆最大相关系数(图 4，图 5)。



**Figure 4.** Maximum correlation coefficient in NS direction between Jingyuan station and Tanshan station  
**图 4.** 泾源台与炭山台 NS 向最大相关系数



**Figure 5.** Maximum correlation coefficient in EW direction between Jingyuan station and Tanshan station  
**图 5.** 泾源台与炭山台 EW 向最大相关系数

从图中可以看出，两个台 NS 向的相关性好于 EW 向的相关性。NS 向的最大相关系数在 0.9 左右，而 EW 向的相关系数整体低于 0.7。NS 向相关系数的低值主要集中在 1~4 月，西北地区 1~4 月的天气为全年最恶劣时段，狂风呼啸，黄沙漫天，为一年中风扰最为严重的时候，故而观测数据将会受到风扰的影响；而 EW 向的低值主要集中在 1~4 月、8~10 月，受到风扰的同时受到水库蓄放水的影响，5~7 月水库处于蓄水状态，而且蓄水情况稳定，从某种程度来讲，水库所蓄水的体积无限扩大了仪器的观测场地，使观测场地达到一个对称的状态，观测曲线固体潮形态会比较清晰。这也从另一个方面论证了泾源台所记录的曲线确实受到风扰、水库蓄水的影响。



### 3.5. 同震相应特征分析

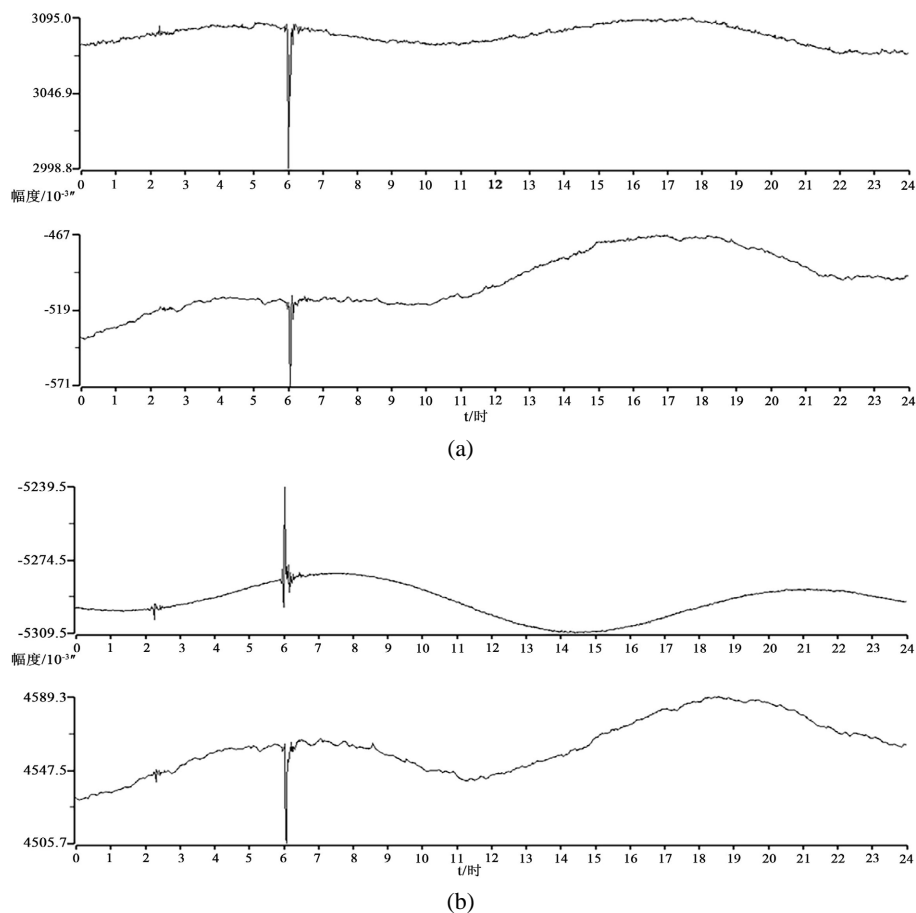
炭山台 VP 型垂直摆 2021 年共记录 4~5 级地震 19 次, 5~6 级地震 45 次, 6~7 级地震 42 次, 7 级以上地震 16 次。泾源台 VP 型垂直摆 2021 年共记录 4~5 级地震 18 次, 5~6 级地震 36 次, 6~7 级地震 37 次, 7 级以上地震 16 次。两套垂直摆记录的地震次数差不多(表 3)。

**Table 3.** VP broadband vertical pendulum seismic event records at Tanshan and Jingyuan stations

**表 3.** 炭山台、泾源台 VP 宽频带垂直摆地震事件记录情况

地点	发震时间	震级 (M)	震源深度 /km	震中距 /km	最大响应幅度/ $10^{-3}$ "		响应时间/min		响应持续时间/min	
					炭山台	泾源台	炭山台	泾源台	炭山台	泾源台
青海果洛州	2021-6-3	4.9	10	778	49.0	49.7	1	4	9	7
四川宜宾	2021-9-3	4.8	17	932	54.4	17.7	3	6	5	6
台湾	2021-8-5	5.8	9	1998	92.1	56.6	8	12	13	12
棉兰老岛	2021-8-12	6.9	11	3925	35.6	52.7	6	9	19	17
银川市灵武市	2021-11-18	4	15	179	31.4	12.0	1	2	4	2

2021 年 8 月 5 日棉兰老岛 6.9 级地震为例, 从图中可以看出, 炭山台 VP 宽频带垂直摆对地震的响应幅度大于泾源台 VP 型垂直摆, 响应时间快于泾源台 VP 型垂直摆, 响应时间也更快(图 6)。



**Figure 6.** VP broadband vertical pendulum observation curve of Mindanao M6.9 earthquake on August 5, 2021

**图 6.** 2021 年 8 月 5 日棉兰老岛 6.9 级地震 VP 宽频带垂直摆观测曲线

## 4. 认识和结语

通过对比炭山台、泾源台 VP 宽频带垂直摆观测资料, 得到以下结论:

- 1) 炭山台记录的曲线固体潮相对明显, 泾源台观测曲线固体潮不明显;
- 2) 两套仪器观测连续率均达到 99.90%, 炭山台、泾源台北南向(NS)完整率均达到 99.50%以上, 而泾源台东西向(EW)完整率为 98.53%, 这与泾源台 EW 向经常做超量程数据预处理有关;
- 3) 两个台 NS 向的相关性好于 EW 向的相关性。NS 向的最大相关系数在 0.9 左右, 而 EW 向的相关系数整体低于 0.7。NS 向的相关系数主要受到风扰的影响, 而 EW 主要受到风扰和水库蓄水的影响, 其中风扰的影响集中在 1~4 月, 水库蓄放水的影响集中在 8~10 月;
- 4) 从整体观测曲线看, 炭山观测数据受到的干扰小, 泾源观测曲线受到的干扰大些。

## 致 谢

感谢宁夏回族自治区地震局中卫地震监测中心站师海阔副站长对本文的研究提供技术指导。

## 基金项目

宁夏自然科学基金资助项目(2020AAC03441)。

## 参考文献

- [1] 马武刚, 胡国庆, 谭业春, 等. 新型宽频带垂直摆倾斜仪的设计及应用[J]. 测绘信息与工程, 2010, 35(5): 28-30.
- [2] 刘莉, 王飞, 陆栋梁, 等. 金寨地震台垂直摆倾斜仪运行情况与干扰因素分析[J]. 高原地震, 2015, 27(4): 41-46.
- [3] 刘盼, 陈冬柏. 西安基准地震台 VP 垂直摆倾斜仪曲线形态分析与讨论[J]. 科技与创新, 2019(15): 53-54.
- [4] 杨晓东, 张晨蕾, 吴明, 等. 陕西省 VP 型垂直摆倾斜仪观测对比分析[J]. 地震科学进展, 2021, 51(8): 371-375.
- [5] 王建亮, 沈宁, 张燕霞, 栾博文, 金涛. 银川基准台 SQ-70D 石英水平摆与 VP 宽频带垂直摆观测数据对比分析[J]. 防灾减灾学报, 2020, 36(4): 45-50.
- [6] 马武刚, 吴艳霞, 胡国庆. VP 型宽频带潮汐观测仪的研制[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3): 873-877.
- [7] 张磊, 汪翠枝, 刘文兵, 等. 蓟县垂直摆观测数据变化分析[J]. 华北地震科学, 2011, 29(3): 34-38.
- [8] 王秋宁, 古云鹤. 西安地震台形变观测自然环境干扰分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2016, 37(3): 72-77.
- [9] 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.
- [10] 杨红樱, 熊峰. 降雨对呼和浩特地震台形变观测的影响[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(5): 101-108.
- [11] 雷登学, 张建武, 田野, 等. 肃南地震台形变观测资料干扰识别与排除[J]. 地震地磁观测与研究, 2012, 33(1): 49-52.
- [12] 曾新福, 汤兰荣, 牛在坡, 等. 探讨水文、气象因素对九江台形变资料的影响[J]. 防灾科技学院学报, 2013, 15(3): 55-60.
- [13] 李杏梅, 张凯, 颜加进. 漳州地震台 VP 垂直摆数据干扰分析[J]. 科技与创新, 2019(20): 138-139, 141.
- [14] 杨晓东, 张创军, 齐银峰, 等. 乾陵地震台形变观测干扰分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 39(2): 127-131.
- [15] 周雯, 李志雄, 徐芳芳, 等. 海南五指山形变台 DSQ 型水管倾斜仪与 VP 型垂直摆倾斜仪同震响应对比分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(5): 90-95.
- [16] 高明智, 郝冉, 高力, 等. VP 型宽频带垂直摆倾斜仪与 SQ-70 石英水平摆倾斜仪观测资料对比分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(2): 179-183.