

# 昔阳YRY-4钻孔应变仪观测资料可靠性分析

吕永青<sup>1,2</sup>, 宫静芝<sup>1,2\*</sup>, 池毅<sup>3</sup>, 张亮娥<sup>1,2</sup>, 史舒婷<sup>1,2</sup>, 王振江<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>山西省地震局太原地震监测中心站, 山西 太原

<sup>2</sup>太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 山西 太原

<sup>3</sup>上海国尊科技有限公司, 上海

收稿日期: 2024年5月27日; 录用日期: 2024年7月19日; 发布日期: 2024年7月30日

## 摘要

本文对昔阳站YRY-4四分量钻孔应变仪安装后记录的观测资料进行整理分析, 对仪器的固体潮汐记录、内在精度、潮汐响应、地震记录等方面进行分析, 评估了该应变仪在监测地壳运动和地震活动方面的精度和可靠性。研究结果表明, 昔阳YRY-4钻孔应变仪观测资料具有较高的可靠性, 可为地球科学的研究和地震监测提供有价值的数据支持。

## 关键词

YRY-4钻孔应变仪, 观测资料, 可靠性分析

# Reliability Analysis of Observation Data of Xiyang YRY-4 Borehole Strain Gauge

Yongqing Lv<sup>1,2</sup>, Jingzhi Gong<sup>1,2\*</sup>, Yi Chi<sup>3</sup>, Liang'e Zhang<sup>1,2</sup>, Shuting Shi<sup>1,2</sup>, Zhenjiang Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Taiyuan Earthquake Monitoring Center Station of Shanxi Provincial Seismological Bureau, Taiyuan Shanxi

<sup>2</sup>Taiyuan National Rift Valley Dynamics National Field Scientific Observation and Research Station, Taiyuan Shanxi

<sup>3</sup>Shanghai Guozun Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: May 27<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 30<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

This paper collates and analyzes the observation data recorded by the YRY-4 four-component borehole strain gauge installed at Xiyang Station, and analyzes the instrument's solid tide record, inherent accuracy, tide response, and seismic records. The accuracy and reliability of the strain gauge in monitoring crustal movement and seismic activity are evaluated. The research results show that the observation data of Xiyang YRY-4 borehole strain gauge has high reliability and can

\*通讯作者。

provide valuable data support for earth science research and seismic monitoring.

## Keywords

YRY-4 Borehole Strain Gauge, Observation Data, Reliability Analysis

Copyright © 2024 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

使用钻孔方法观测地壳应变变化进行地震预报研究，在我国是从 60 年代中期开始的。YRY 型压容式钻孔应变仪是张量式仪器，可同时测量体积应变和形状应变。YRY 型钻孔应变仪经过多年实际运行与不断改进，新型的 YRY-4 仪器已实现了遥控自动标定、遥控自动调零、数字输出、网络通讯功能，方便了仪器的运行管理。YRY 型钻孔应变仪已领先于国际同类型多分量仪器，率先实现了 4 分量同平面配置，解决了钻孔应变观测技术中的重要关键技术。

昔阳地震观测站(以下简称昔阳站) YRY-4 四分量式钻孔应变仪属于《山西省地震局 2019 年省级台网优化改造项目》更新仪器，安装于 2020 年 8 月，投入观测后产出的观测资料精度高、连续、可靠，观测资料能真实的反映地应变，具有较高的可信度和分析利用价值。

本文利用昔阳站 YRY-4 钻孔应变仪投入观测后的资料数据进行分析，从仪器精度，地震记录，等方面验证观测资料的可靠性，为今后利用该仪器进行区域内地震监测预报提供支撑。

## 2. 台站背景及观测环境

### 2.1. 测点地质构造

昔阳地震监测站位于山西断陷带以东的太行山断块隆起区，且太行隆起区是一个相对稳定的新构造单元。此隆起区内发育的主要断裂为晋获断裂带，中生代称其为“太行大断裂”，已有研究认为其是 NNE 向展布的基底软弱带(元古代太行古裂陷)，该带以东的河淮地块软流圈上拱、大地热流值高，岩石圈厚度仅 60 km 左右，为岩石圈“软块”，而其西侧的晋南地区岩石圈厚达 100 km、热流值偏低，称为沁水岩石圈“硬块”<sup>[1]</sup>；两者之间的太行古裂陷(即晋获断裂带)，成为应力应变易于集中的区域<sup>[2]</sup>。晋获断裂带的西侧发育井陉-左权断裂带，它与晋获断裂带平行延展，而昔阳、和顺等小型断陷盆地其边界受井陉-左权断裂带控制，至今仍有一定的活动性。昔阳地区处于太原-石家庄横向隆起构造带(即 38° 带)与 NNE 断裂带的复合部位，构造复杂，且地壳介质比较破碎，是区域应力场变化敏感部位。

昔阳站处在昔阳小型断陷盆地东缘，以北约 380 m 处为大寨断层，该断层走向 N38°E，倾向 NW，倾角 70°，长 8 km，大寨断层属井陉-左权断裂带，该断裂带由 24 条大小不等的断裂组成，总体走向 NNE，其最新活动时代为中更新世，沿断层线出露新生代玄武岩<sup>[3]</sup>。台址一带出露的地层主要有奥陶系下统含燧石结核的白云质灰岩及白云岩；奥陶系中统泥灰岩、灰色石灰岩；石炭系上统砂岩、砂质页岩及煤层；新生界第四系的中更新统砾石黄土和上更新统马兰黄土。

有历史记载及仪器记录以来，昔阳台周围 50 km 范围内共发生  $M \geq 5$  地震 6 次，其中历史记载的昔阳县(当时昔阳属平定州辖地)遭遇的最大地震为明天启七年夏(公元 1627 年)发生的平定州 5.5 级地震。

1967 年以来，昔阳一带中、小地震活动比较频繁，地震序列以震群型为主，如 1967 年昔阳 4.0 级和 4.5

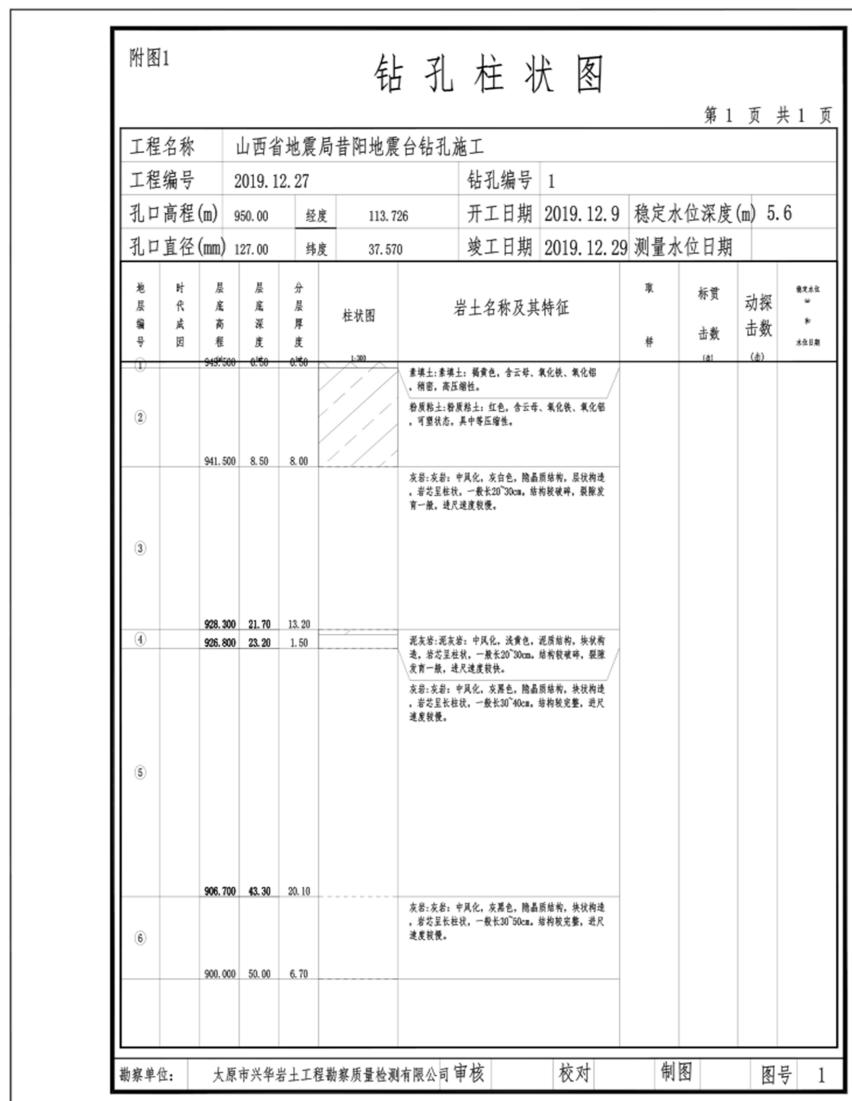
级 2 次震群、1969 年和顺 4.0 级震群、1971 年和顺 5.2 级震群、1972 年和顺 3.9 级震群、1982 年昔阳 4.2 级震群和 1994 年和顺 3.4 级震群，震源深度一般为 5~15 km；这 7 次震群均发生在昔阳、和顺小型断陷盆地的西侧，是山西地区近年来震群活动最多的地区之一。

## 2.2. 测点观测环境

昔阳站 YRY-4 钻孔应变仪观测场地台址条件优秀，处于温带、暖温带半干旱大陆性季风气候区。一年四季分明，全县平均降水量为 571.9 毫米，雨量主要集中在 7~8 月份，除夏天雷电较多外，台站周围基本无明显干扰源，符合地震形变观测规范要求。

## 2.3. 仪器安装情况

昔阳站 YRY-4 钻孔应变仪安装位置在昔阳台大寨观测站，站点为安装仪器新打 50 米钻孔一眼，安装位置在井孔 35 米处，岩性为石灰岩，从施工资料钻工柱状图中可见昔阳站测点岩性特征(见图 1)。



**Figure 1.** Drilling histogram

**图 1. 钻孔柱状图**

昔阳站 YRY 分量应变仪钻孔安装段基岩较完整[4], 仪器安装固结质量较好, 稳定快, 漂移小, 安装后第二天就可以从差应变上看到明显的固体潮, 7 天后曲线已基本拉平且面应变相关系数达到 0.9995。

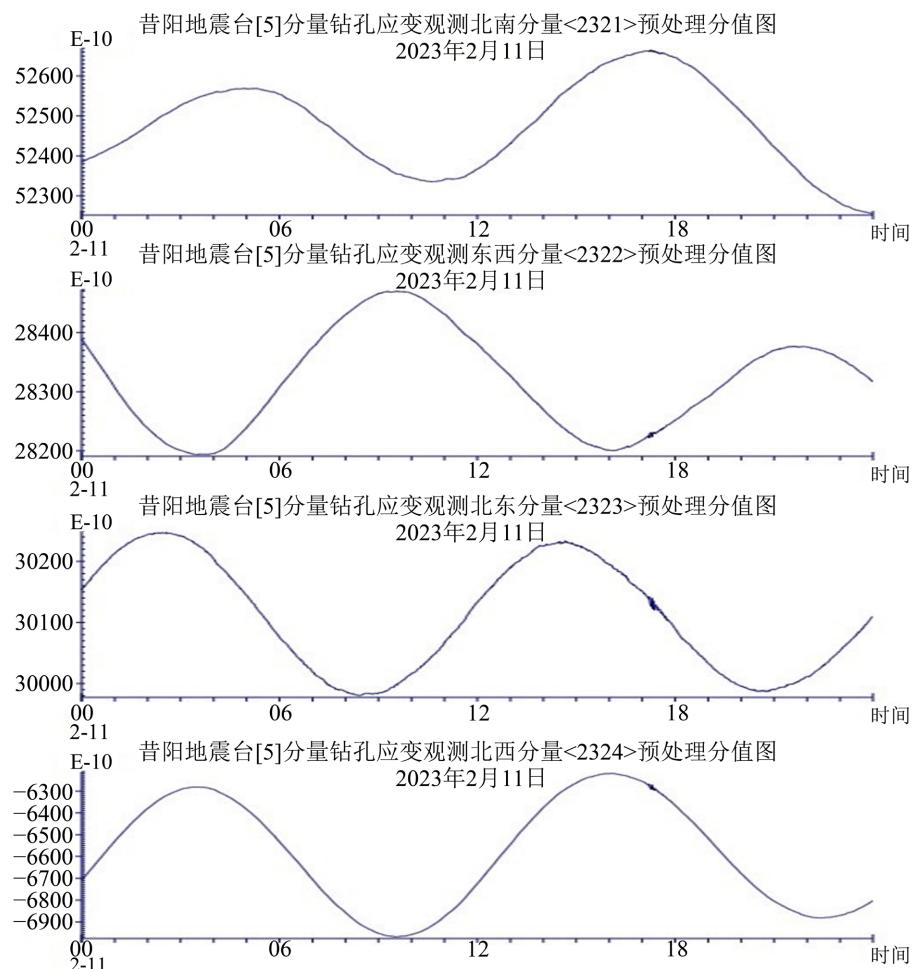
## 2.4. 观测系统介绍

YRY-4 型钻孔应变仪观测系统由传感器、主机和供电系统组成, 为防雷击, 供电系统采用了太阳能直流供电[5], 传感器部分为长圆筒径向位移式仪器。在圆筒中部位置安装了“南 - 北”“东北 - 西南”“东 - 西”“西北 - 东南”四个方向的四组径向测微传感器, 测量这四个方向圆筒直径的微小变化。

## 3. 观测资料可靠性分析

### 3.1. 观测数据曲线记录情况

由于钻孔安装段基岩较完整, 仪器安装后, 稳定快, 漂移小, 仪器分钟值曲线图可以记录清晰的固体潮(见图 2)。

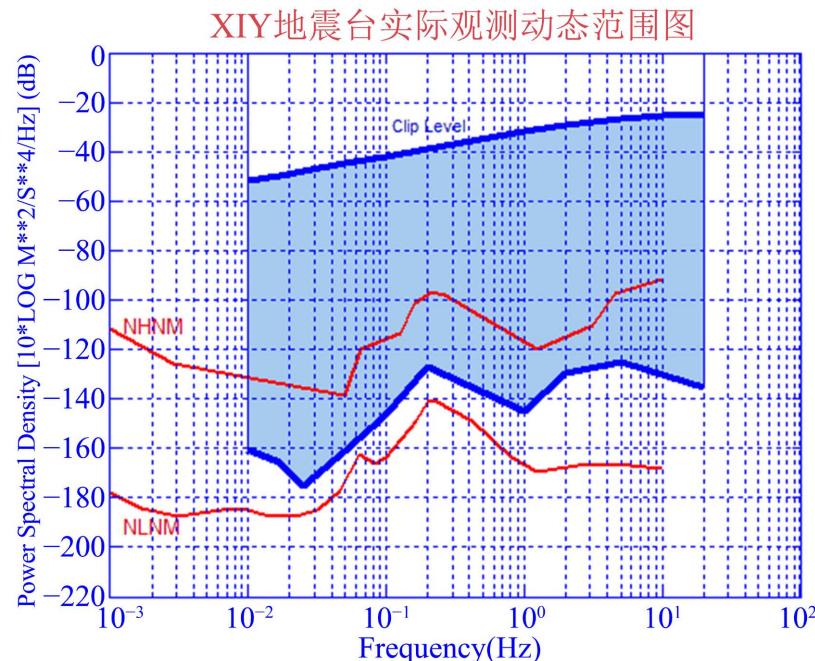


**Figure 2.** Xiyang YRY-4 component drilling strain gauge minute value curve  
**图 2.** 昔阳 YRY-4 分量钻孔应变仪分钟值曲线图

### 3.2. 测震背景噪声分析

昔阳站地噪声水平 1~20 Hz 各频点平均值约为-120 至-150 dB, 高于 NLNM 约 20 到 50 分贝, 计算

结果良好[6]。且该台址 1~20 Hz 频带内静态地脉动噪声有效值(RMS)的总平均值为 UD 向 3.02E-08° (m/s)、EW 向 9.24E-08° (m/s)、NS 向 1.27E-07° (m/s)，三分向总平均 8.31E-08° (m/s)。依据地震台站观测环境技术要求，该台址环境地噪声属于 II 级环境地噪声水平[7] (见图 3)。



**Figure 3.** Seismic background noise map of the site

**图 3.** 站点测震背景噪声图

### 3.3. 昔阳站 YRY-4 钻孔应变仪资料内精度分析

**Table 1.** Precision calculation table of YRY-4 instrument at Shanxi Station in October 2020

**表 1.** 2020 年 10 月份山西台站 YRY-4 仪器精度计算表

台站名称	北南分量	东西分量	北东分量	北西分量	平均值	精度排名
繁峙	0.0042	0.0031	0.0050	0.0066	0.00473	1
代县	0.0036	0.0086	0.0078	0.0038	0.00595	2
原平	0.0235	0.0139	0.0040	0.0050	0.01160	3
昔阳	0.0281	0.0089	0.0185	0.0031	0.01465	4
大同	0.0050	0.0030	0.0213	0.0081	0.02732	5
宁武	0.0688	0.0412	0.0068	0.0048	0.03040	6
神池	0.0260	0.0817	0.0688	0.0412	0.05443	7
陵川	0.4220	0.4299	0.2460	0.0800	0.29448	8
沁源	0.0051	0.2385	0.9650	0.0127	0.30530	9
阳城	0.3320	0.4976	0.4461	0.5498	0.45638	10

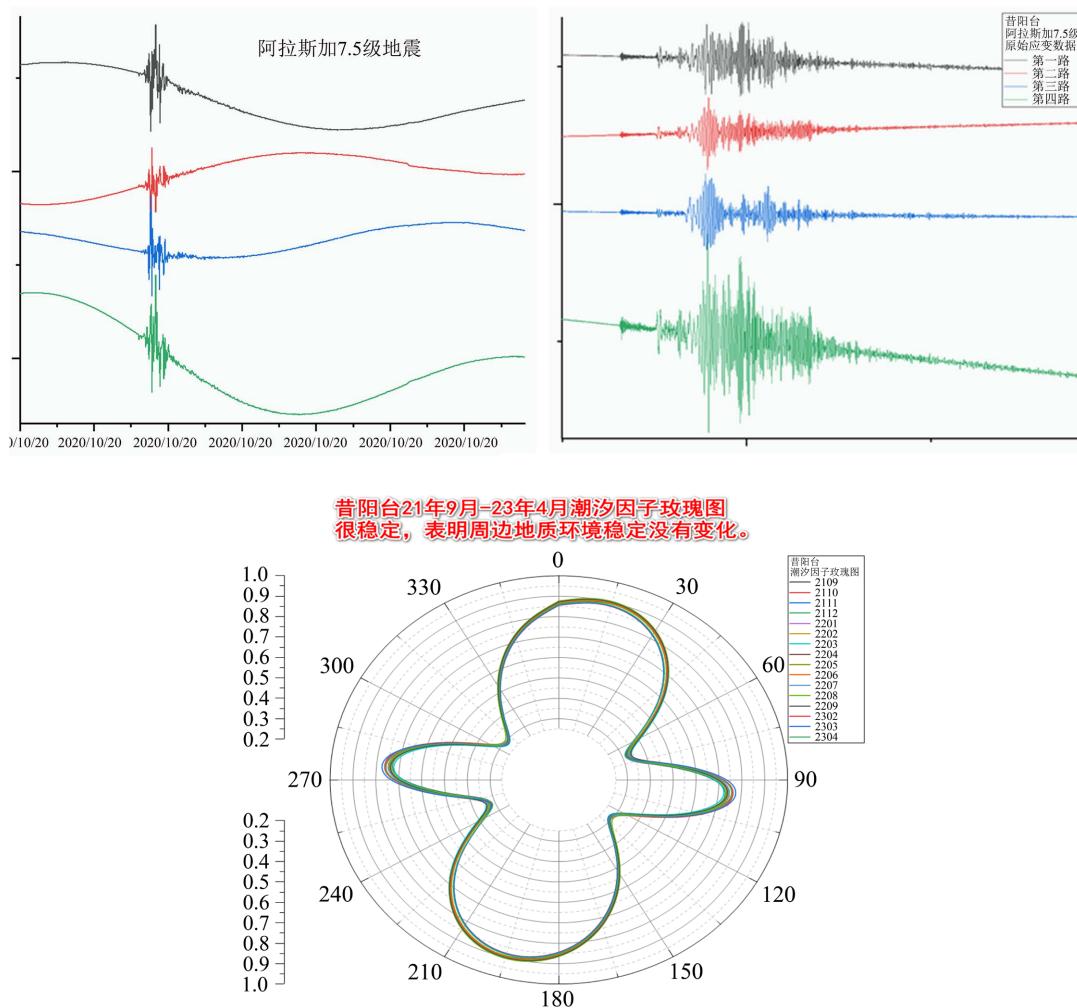
昔阳站 YRY-4 型四分量钻孔应变地震仪器内精度跟省内台站安装的同型号仪器精度做了对比(以 2020 年 10 月份观测数据为例计算固体潮内精度)昔阳台更新前钻孔仪器为 TJ-IIC 钻孔应变仪，该仪器从观测从下井到正式记录，运行情况良好，基本无断记和缺测现象，各项记录齐全完整，2000~2001 年曲

线趋于平稳状态，固体潮曲线记录平滑，精度达到国家I类台标准，资料利用率较高，在山西省及周边地区的几次较大地震中，均有不同程度反映[8]。

根据中国地震局地壳应力研究所钻孔应力 - 应变台网管理组出台的钻孔应力 - 应变台站数字观测资料质量年度评比办法中对一类台精度的要求为  $M1 < 0.05 \times 10^{-6}$  的要求检验，(在评价中，固体潮内精度小于 0.05 即为优秀)昔阳台观测资料精度达到了一类台精度要求(见表 1)。

### 3.4. 潮汐响应玫瑰图分析

昔阳站利用 2021 年 2023 年数据计算的潮汐响应玫瑰图，误差小，精度很高。四个花瓣指向与周边的断裂分布比较吻合，没有断裂阻隔的方向潮汐因子大，表现为花瓣长轴方向[9]。有断裂阻隔的方向潮汐因子小，表现为花瓣的腰身(见图 4)。

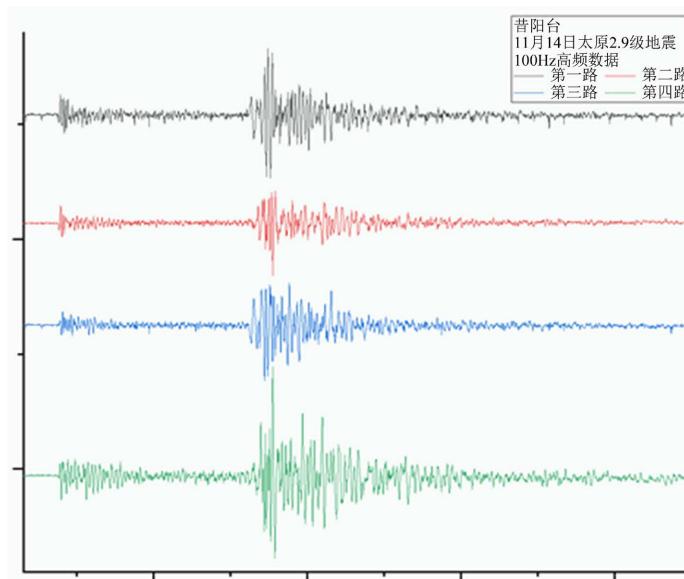


**Figure 4.** Tidal response rose diagram of Xiyang station from 2021 to 2023  
**图 4.** 昔阳站 2021~2023 年潮汐响应玫瑰图

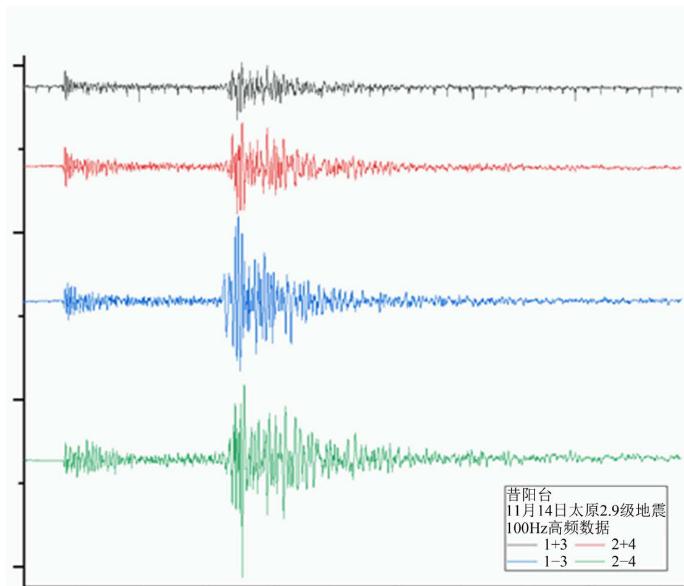
## 4. 同震响应印证观测资料可靠性

YRY-4 钻孔应变仪拾震率高[10]，能清晰完整的记录远震(见图 5)和近震(见图 6)，昔阳站记录到 2020 年 11 月 14 日太原 2.9 级地震 100 Hz 的高频数据，经过分析，该近距离地震波形的 1 + 3、2 + 4 面应变

相关系数为 0.88 [11]，而 2020 年 10 月 20 日阿拉斯加 7.5 级地震的 100 Hz 1+3、2+4 面应变相关系数为 0.994，说明在昔阳 - 太原之间，存在着造成数据失真的裂隙发展，后期值得继续关注。



**Figure 5.** Original data of the strain of the Alaska 7.5 magnitude earthquake at Xiyang Station  
**图 5.** 昔阳站阿拉斯加 7.5 级地震应变原始数据图形



**Figure 6.** The 100 Hz high-frequency data of the Taiyuan M2.9 earthquake recorded on November 14, 2020, and the graphs of surface strain and differential strain  
**图 6.** 记录到的 2020 年 11 月 14 日太原 2.9 级地震 100 Hz 高频数据原始数据和面应变、差应变图形

## 5. 结果与讨论

- 1) 昔阳站 YRY-4 四分量钻孔应变仪安装选址合理，周边干扰源少，观测资料连续、稳定、可靠。弥补了太原 - 石家庄横向隆起构造带(即 38° 带)与 NNE 断裂带的复合部位形变观测仪器少的空缺，提高

了该区域地球科学研究与地震形变前兆监测能力。

- 2) 通过计算观测资料内精度, 该仪器精度达到国家优秀标准。
- 3) 利用潮汐响应玫瑰图计算结果证明, 该仪器观测资料误差小, 精度高, 与周边断裂分布吻合, 其产出数据对监测区域周边应力场变化情况有非常高的科研价值。
- 4) 利用面应变相关系数分析可以看出, 昔阳 - 太原之间存在着造成数据失真的裂隙发展, 需长期跟踪研判数据的发展变化情况, 持续挖掘该条线路应力场变化情况和发展方向。

## 基金项目

SBK-1328《山西体应变综合分析研究》。

## 参考文献

- [1] 邢集善, 叶志光. 山西板内构造及其演化特征初探[J]. 山西地质, 1991, 6(1): 13.
- [2] 孟彩菊, 杨世英, 刘晓萍, 沈晓松, 何佳, 靳玉贞. 代县地震台体应变异常与山西地震带有感地震对应关系[J]. 地震地磁观测与研究, 2017(1): 96-101.
- [3] 吕永青, 张亮娥, 宫静芝, 王振江. 昔阳 FHD-2B 质子矢量磁力仪背景噪声过大原因分析及解决方法[J]. 山西地震, 2020(3): 26-28.
- [4] 吕永青, 宫静芝, 宋志英, 王振江. 山西昔阳 3.0 级地震前后石英水平摆异常特征分析[J]. 山西地震, 2018(4): 15-18.
- [5] 胡玉良, 穆慧敏, 吴晓赢, 邓红霞, 李颖. 基于案例推理的智能电源故障诊断算法研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2023(2): 164-169.
- [6] 高云峰, 李慧玲, 张登科. 山西代县台 VP 型宽频带倾斜仪映震能力浅析[J]. 大地测量与地球动力学, 2020(S3): 13-15.
- [7] 冯凯宇, 窦立婷, 李晨, 任力伟, 成诚, 丁学文. 四分量钻孔应变干扰特征时频域研究[J]. 山西地震, 2022(1): 21-24.
- [8] 李惠玲, 张淑亮, 李丽, 高云峰. 2010 年河津 4.8 级地震前物理场异常时空演化特征[J]. 山西地震, 2020(4): 1-7.
- [9] 李宏伟, 吕睿, 陈永前. 山西昔阳地震台水平摆异常综合分析[J]. 山西地震, 2020(2): 36-40.
- [10] 李文超, 刘瑞春, 刘炜, 闫芙蓉, 殷锴, 高龙飞. 大同中心站 YRY-4 钻孔应变仪与 BBVS 测震仪同震数据对比分析[J]. 山西地震, 2023(2): 11-14.
- [11] 陈永前, 张淑亮, 李宏伟. 利用钻孔应变与 GPS 资料联合对忻州地区应变场特征的分析[J]. 山西地震, 2021(2): 1-5.