超星·期刊

文章编号：1000-6265(2025)03-0030-05

忻州地震监测中心站四分量钻孔应变台阵观测场地效能分析

尚永明[1,2]，郭宝仁[1,2]，张亚敏[1,2]

（1. 山西省地震局忻州地震监测中心站，山西　忻州　034200；
2. 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站，山西　太原　030025）

摘要：为掌握忻州地区四分量钻孔应变台阵观测场地的效能情况，优化台站布局，提升地震监测能力，选取神池、代县、原平、宁武、繁峙 5 个子台的观测场地进行科学分析评估。结果表明，目前忻州地区四分量钻孔应变台阵除神池外，均观测效能良好，具有较好的监测能力。后续选址时在考虑地质构造条件的基础上，还应充分考虑场地环境、气象条件和人文活动等因素。

关键词：四分量钻孔应变；观测场地；监测环境；模型构建
中图分类号：P315.78　　**文献标志码**：A

0　引言

忻州地区位于山西省中北部，历史上中强震活动较为频繁。四分量钻孔应变观测是一种深埋式地壳形变观测仪器，具有较好的稳定性[1-2]，能够提供地下真实的长短周期应变变化信息[3]，是当前地球物理场信息记录的重要手段之一。与其他应变观测手段相比，钻孔应变观测在不同时间尺度（数秒至数年）都具有较高分辨率[4]。2012—2017 年，忻州地区（神池、代县、原平、宁武、繁峙）陆续架设了 5 套四分量钻孔应变仪组成观测台阵（下文简称忻州钻孔应变台阵），台站选址多在偏僻山区，建设初期人烟稀少，干扰源较少。近年来，随着城镇化和农村现代化的快速发展，民居、景点的开发建设使干扰源不断增多，观测场地环境干扰问题愈发突出。地球物理观测场地的选择直接关系到地震监测数据的准确性、时效性和连续性。因此，对观测场地进行科学分析评估，优化台站布局，降低干扰影响，是提升地震监测能力的关键。已有专家学者为了解周边环境对测项观测的影响开展研究，刘琦等[5]从监测条件和地震预测效能方面对跨断层形变观测场地进行分析，得出评估结果及优化建议；靳宝萍等[6]运用勘察钻孔和高密度电阻率方法研究井下地电阻率观测场地的地质特征；张德刚[7]从地下水位变化、城建施工等环境干扰方面对所属站点仪器运行情况进行分析，效果显著。但先前研究多为单一测项或站点分析，本文从地质条件、监测环境方面对多个站点组成的台阵进行系统分析。基于山西忻州地区 5 套四分量钻孔应变仪组成的台阵观测资料，从场地地质条件、监测环境状况、观测数据质量及场地模型构建等方面开展综合评估，以便为地震监测站的选址、布局及运维提供参考依据，同时给出场地优化的相关建议。

1　观测区域背景概况

忻州钻孔应变台阵的观测场地分布在忻定盆地四周边缘断裂附近的基岩区域，忻定盆地北部以恒山断块隆起与大同盆地相隔，南部以石岭关横向隆起与太原盆地分离，自北向南由代县、原平和定襄 3 个凹陷组成。忻定盆地受祁吕贺“山”字形构造体系前弧东翼和新华夏系构造带所控制，第四纪以来构造活动强烈。历史上曾发生过 7 级以上地震 3 次，即公元 512 年 5 月 21 日原平代县交界 7.5 级地震、1038 年 1 月 9 日忻府区与定襄交界 7 1/4 级地震和 1683 年 11 月 22 日原平 7.0 级地震。神池观测场地位于管涔山山前断裂西缘，代县观测场地位于恒山南麓断裂南缘，原平观测场地位于五台山西麓断裂东缘，宁武观测场地位于五寨断裂东缘，繁峙观测场地位于五台山北麓断裂北缘（见图 1）。

2　地质条件分析

2.1　岩性特征分析

岩性特征是场地地质条件的重要组成部分。钻孔剖面图可直观反映地下岩层在垂直方向的岩性特征及变化情况，是分析场地地质条件的重要方法。本文根据钻孔剖面揭示的地层、岩性等信息，绘制了钻孔柱状

收稿日期：2025-05-26
基金项目：山西省地震局科研项目（SBK-2510）。
第一作者简介：尚永明（1994—　），男，河北邯郸人。硕士研究生，工程师，主要从事地震监测与分析工作，E-mail：shangyongming@outlook.com。

超星·期刊

图(见图 2)。

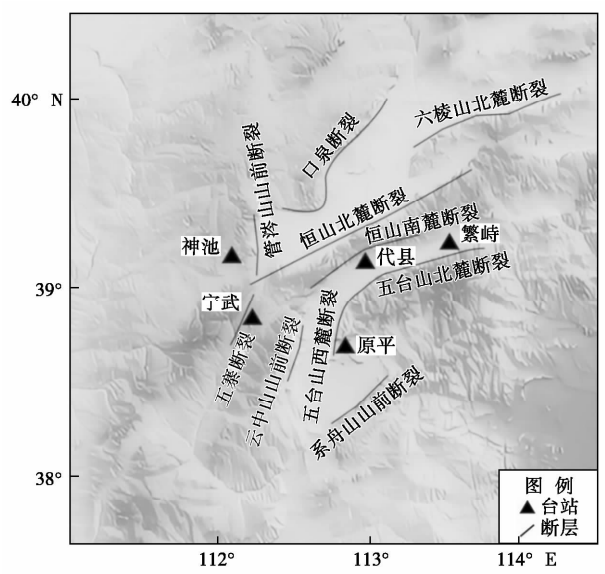


图 1　应变台站分布图

Fig. 1　Distribution of strain stations

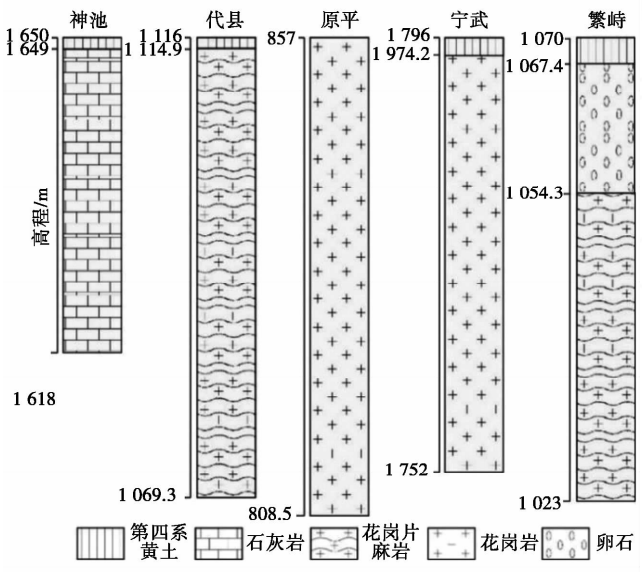


图 2　钻孔剖面图

Fig. 2　Borehole profile

神池观测场地的岩性结构从上至下大致可分为 2 层:第一层为第四系黄土,呈黄褐色,埋深 0～1.0 m;第二层为石灰岩,灰色,隐晶质结构,层状构造,裂隙发育一般,埋深 1～32.0 m。

代县观测场地的岩性结构从上至下大致可分为 2 层:第一层为第四系黄土,呈黄褐色,埋深 0～1.1 m;第二层为花岗片麻岩,灰绿色,粒状变晶结构,块状构造,埋深 1.1～46.7 m。

原平观测场地岩性结构为花岗岩,呈灰褐色,粒状结构,块状构造,裂隙发育一般,埋深 0～48.5 m。

宁武观测场地的岩性结构从上至下大致可分为 2 层:第一层为第四系黄土,呈黄褐色,埋深 0～1.8 m;第二层为花岗岩,灰色,粒状结构,块状构造,裂隙发育一般,埋深 1.8～44.0 m。

繁峙观测场地的岩性结构从上至下大致可分为 3 层:第一层为第四系黄土,呈黄褐色,埋深 0～2.6 m;第二层为卵石,埋深 2.6～15.7 m;第三层为花岗片麻岩,灰绿、灰黑色,粒状、块状构造,裂隙发育一般,埋深 15.7～47.0 m。

可以看出,5 个观测场地的基岩岩性存在差异,而不同基岩类型对钻孔形变观测的稳定性具有重要影响,这主要和岩石在外力作用下产生弹性变形的能力(弹性模量)有关。

2.2　地层三维展布特征分析

三维地质模型能够立体呈现地下不同岩层的空间展布状态、接触面及地层厚度信息,利于直观准确地开展场地地质分析。忻州 5 个台阵观测场地的地层分布简单,且原平、宁武基岩岩性均为花岗岩,因此选取神池、代县、宁武、繁峙 4 个观测场地为例进行三维建模分析。各观测场地范围有限,地形起伏不大,且不存在地层尖灭问题。先对数据预处理,选取各场地四角作为控制点,建立三维坐标信息,并根据钻孔数据建立岩层分界面信息;再将以上信息汇总并导入 surfer 软件进行网格化处理;最后运用 surfer 3D 建模平台,导入网格数据并调整参数生成三维地质模型。由图 3 可见,三维模型反映的信息在与钻孔剖面和实际钻孔数据高度契合的同时,更加直观地展现了各地质单元的展布特征、岩层信息及传感器所处岩层岩性、岩石弹性模量(E)、传感器埋深(H)等信息,便于后续从地质角度解译观测数据质量。

3　监测环境分析

3.1　典型环境干扰分析

四分量钻孔应变仪分辨力优于 10^{-9},对场地环境变化响应灵敏。忻州钻孔应变台阵观测多年来受到诸多环境因素的干扰,特别是阶段性、不规律性干扰较为显著,如场地附近机械施工、连续降雨、气压干扰等,现以代县和神池测点为例进行分析。

(1) 施工干扰。

2022 年 5 月 24—27 日,代县四分量钻孔应变观测曲线每日发生小幅度台阶或畸变(见图 4)。现场巡检发现在数据变化时间段内均有大型挖掘机进行观测场地平整施工,异常核实未发现其他干扰源,表明大型挖掘机施工振动引起的地表载荷变化是导致数据变化的主要原因。原平测点在 2019 年 5 月也存在阶段性施工干扰[8],其数据变化特征与代县相似。

超星·期刊

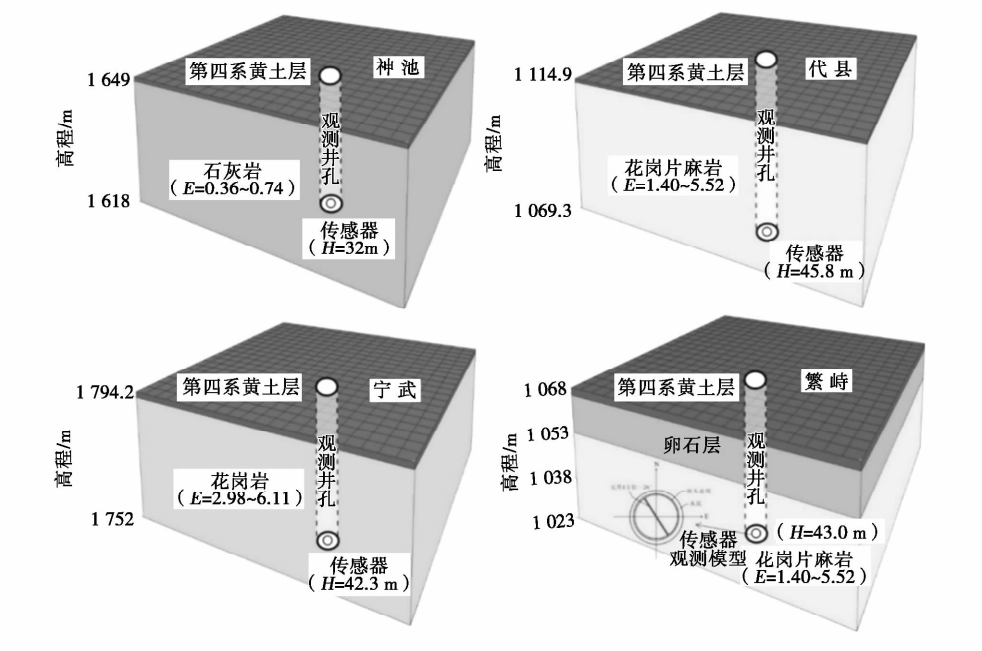


图 3 场地三维地质模型

Fig. 3 Three-dimensional geological model of site

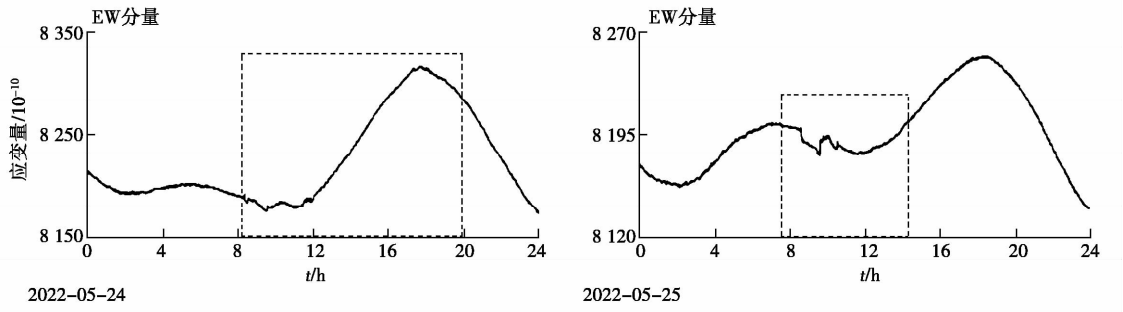


图 4 代县四分量钻孔应变仪场地施工干扰曲线图

Fig. 4 Site construction interference curve of four-component borehole strain gauge in Daixian

(2) 降雨干扰。

代县测点在每年雨季(7—9 月)易受连续降雨干扰,观测曲线出现数小时至数天的持续上升或下降变化,前人研究认为该变化与测点所处的地理位置、井孔地质条件有关[8]。测点地表松散覆盖层较厚,且邻近山体的岩石存在裂隙,在雨季大量雨水渗入地表覆盖层及岩体孔隙,导致孔隙压力增加和水位上升,钻孔围岩应变状态改变引起数据变化。

(3) 气压干扰。

神池钻孔应变自观测以来受气压干扰明显,在长周期(年、月)和短周期(日、时)均有体现,且不规律性短时扰动更为显著,长周期表现为气压干扰系数较高,短周期表现为观测曲线畸变,通常表现为钻孔应变量与气压呈反向同步变化(见图 5)。忻州 5 个台阵观测场地中,神池台的气压干扰系数(绝对值)最高,如表 1 所示,表明其受气压干扰程度最高,这与前人的研究成果一致[9];钻孔应变观测气压干扰系数会随围岩弹性模量和传感器深度的增大而减小,而神池台钻孔围岩弹性模量和传感器深度均小于其他台站(见图 3),因此受气压干扰最为显著。

在多年观测资料中,忻州钻孔应变台阵记录到数起典型场地干扰事件。其中,代县和原平测点均记录到阶段性场地机械施工干扰;代县测点在每年雨季时(7—9 月)均记录到连续降雨干扰;神池测点自观测以来受气压干扰显著。宁武和繁峙测点因观测资料相对较少,暂未记录到典型场地干扰事件。

超星·期刊

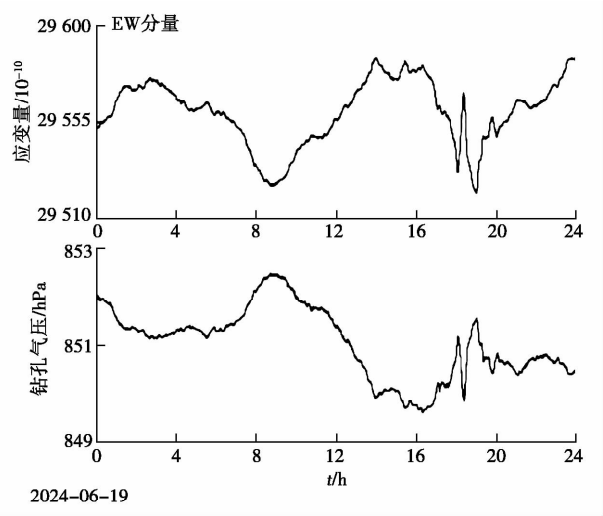


图 5　神池四分量钻孔应变仪气压干扰曲线图

Fig. 5　Air pressure interference curve of Shenchi four-component borehole strain gauge

表 1　忻州钻孔应变台阵气压干扰系数表

Table 1　Xinzhou array air pressure interference coefficient table

测点	气压干扰系数/(10^{-9}/hPa)			
	2022 年	2023 年	2024 年	平均值
神池	−79.4	−84.2	−86.5	−83.4
代县	−2.8	−2.5	−2.6	−2.6
原平	−3.3	−2.8	−2.9	−3.0
宁武	−2.1	−2.0	−2.7	−2.3
繁峙	−2.3	−2.2	−2.2	−2.2

通过对上述典型场地干扰事件的分析,除场地周边干扰源外,场地地质构造和水文地质条件对四分量钻孔应变观测也具有显著影响。如,地表覆盖层厚度、围岩孔隙度、围岩裂隙、围岩弹性模量和传感器埋深等因素。因此,在后续观测站网的优化改造或新建台站时,除考虑人口、交通、电力、通信、干扰源之外,还需重点勘察区域地质构造和水文地质条件,规避不利干扰因素,提升观测数据的准确性和可靠性。

3.2　场地综合评估

地球物理观测场地的选择直接关系到监测数据质量,影响地震分析预报的效果。在地震监测场地建设初期,人烟稀少、干扰源较少,但随着社会发展和城镇化进程的加快,采矿活动、景点开发等情况使干扰源不断增多,给场地观测环境带来严峻挑战。参考前人的研究成果,并结合观测场地建设、干扰源规避及仪器设备部署环境等相关规范标准,针对忻州钻孔应变台阵观测场地的监测环境开展定性评估,主要考虑观测场地周边人口密度、交通状况、电力供应、网络通信质量、安全防护设施、长期连续干扰等因素。人文及交通状况、电力及通信质量、基础设施建设的评估指标分为良好、较差。由于阶段性干扰或不规律性短时扰动通常对仪器长期稳定运行影响不大,而长期显著连续干扰对仪器运行和数据质量的影响较大,因此本文主要针对有无长期显著连续干扰情况进行分析。场地监测环境评估的具体准则为:当同时满足全部条件时,定为 A 类;当上述条件有 1 个不满足时,定为 B 类;当上述条件 2 个或以上不满足时,定为 C 类。本文对最新场地情况进行分析,评估结果如表 2 所示,忻州钻孔应变台阵观测场地的监测环境整体较好,其中 A 类场地 4 处,B 类场地 1 处,A 类场地占总场地数的 80%。神池台自观测以来受气压干扰显著,表现为长周期气压干扰系数(绝对值)较高,映震效能较差,综合评估为 B 类观测场地。

表 2　忻州钻孔应变台阵观测场地监测环境定性评估结果

Table 2　Qualitative evaluation of monitoring environment of Xinzhou array observation site

观测场地	地理位置	基岩类型	人文及交通	电力及通信	基础设施建设	长期显著连续干扰	综合评估
神池	大羊泉村西(山坡)	花岗片麻岩	良好	良好	良好	长期显著连续气压干扰,映震效能较差	B
代县	富家窑村北(山坡)	花岗岩	良好	良好	良好	无	A
原平	子干乡东侧(山坡)	花岗片麻岩	良好	良好	良好	无	A
宁武	张家崖村西南(山脚)	花岗岩	良好	良好	良好	无	A
繁峙	西砂河村西北(山脚)	石灰岩	良好	良好	良好	无	A

4　结束语

本文从场地地质条件、监测环境状况、观测数据质量及场地模型构建等方面对忻州钻孔应变台阵场地观测效能进行分析,得出以下认识:

(1) 神池台目前监测条件低于其他 4 个台站,主要影响因素为场地基础地质条件差异,该台站受气压影响程度显著,2022—2024 年平均气压干扰系数(绝对值)为 83.4×10^{-9} hPa,远高于台阵中其他台站,应与该台站钻孔围岩弹性模量较小($E=0.36\sim0.74$)且传感器深度较浅($H=32$ m)有关,建议选择其他合适的断层段位置补充新建观测场地。

(2) 基于评估结果,忻州钻孔应变台阵受短周期、不规律性场地环境干扰较为显著,具体干扰事件包括场地附近机械施工、连续降雨、气压干扰等。

(3) 基于本研究成果,四分量钻孔应变台站在场地选址时,除考虑人口、交通、电力、通信、干扰源之外,还需重点勘察区域地质构造和水文地质条件,从而提升观测数据的准确性和可靠性。

超星·期刊

参考文献：

[1] 陈永前，张淑亮，李宏伟. 基于四分量钻孔应变资料的区域应变场特征分析[J]. 大地测量与地球动力学，2021，41(10)：1095-1100.

[2] 陈永前，李富珍，任天翔，等. 通过钻孔应变高频记录直接研究动态应力变化：以一次土耳其 M_w7.8 地震为例[J]. 地球物理学报，2025，68(5)：1866-1883.

[3] 池顺良. 钻孔应变观测能够告诉我们些什么？[J]. 山西地震，2019(1)：17-29.

[4] Gladwin M T，Hart R. Design parameters for borehole strain instrumentation[J]. Pure and Applied Geophysics，1985，123(1)：59-80.

[5] 刘琦，李腊月，胡乐银. 北京及周边地区跨断层形变站网评估[J]. 地震研究，2023，46(4)：491-502.

[6] 靳宝萍，张亮娥，张聪聪，等. 临汾地震监测中心站深井地电阻率观测场地地质条件分析[J]. 山西地震，2022(1)：40-44.

[7] 张德刚. 泸州台钻孔应变观测的环境干扰分析[J]. 四川地震，2016(4)：7-9＋14.

[8] 尚永明. 山西忻州地区 YRY-4 分量钻孔应变仪典型干扰因素分析[J]. 地震地磁观测与研究，2023，44(5)：159-166.

[9] 尚永明. 忻州地震监测中心站 YRY-4 分量钻孔应变仪气压干扰定量识别及特征分析[J]. 地震地磁观测与研究，2024，45(5)：131-136.

Analysis of Observation Site of Four-component Borehole Strain Array at Xinzhou Earthquake Monitoring Center Station

SHANG Yongming[1,2]，GUO Baoren[1,2]，ZHANG Yamin[1,2]

(1. Xinzhou Earthquake Monitoring Center Station of Shanxi Earthquake Agency，Xinzhou，Shanxi 034200，China；
2. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan，Taiyuan，Shanxi 030025，China)

Abstract：In order to understand the efficiency of the four-component borehole strain array observation site in Xinzhou area，optimize the layout and improve the seismic monitoring ability，the observation sites of five sub-stations of Shenchi，Daixian，Yuanping，Ningwu and Fanshi were selected for scientific analysis and evaluation. The results show that the four-component borehole strain array in Xinzhou area has good observation efficiency and good monitoring ability，but the monitoring conditions of Shenchi observation site are relatively poor. In addition to the geological structure conditions，the site environment，meteorological conditions and human activities should also be fully considered in the subsequent site selection.

Key words：four-component borehole strain；observation site；environmental monitoring；model construction

(上接第 29 页)

Cause Analysis of Abnormal Rise at N and W Components of Water Pipe Instrument in Yongnian Seismic Station

LI Yuguo[1]，LIANG Shiming[2]，ZHANG Yingjie[1]，ZHAO Changhong[1]，ZHANG Shuangfeng[1]，MA Guangqing[3]

(1. Handan Central Seismic Station of Hebei Earthquake Agency，Handan，Hebei 056000，China；
2. National Key Laboratory of Earthquake Dynamics and Strong Earthquake Prediction，Beijing 100029，China；
3. Hebei Earthquake Agency，Shijiazhuang，Hebei 050021，China)

Abstract：In view of the abnormal phenomenon that the annual reversal of the NS and EW components of the water pipe instrument in Yongnian Seismic Station since September 2021，the possible interference sources are comprehensively investigated by systematically investigating the operating status of the instrument，observing environmental changes and meteorological conditions in the same period，and a three-dimensional concentrated load model is constructed to quantitatively calculate the theoretical influence of surface load changes caused by large-scale heavy rainfall on the observation of the water pipe instrument. The results show that the abnormal change of the two-component observation trend of the water tube instrument is related to the load change caused by the large-scale heavy rainfall event，which is caused by rainfall interference，not the earthquake precursor caused by tectonic activity.

Key words：water pipe instrument；rainfall interference；load model；abnormal reversal