

山西地震 编辑委员会

主 编：陈宇坤

副 主 编：万 亮 李自红 宋美卿 张瑞芳（专职）

编辑委员：（按姓氏汉语拼音排序）

曹 筠	陈 石	董康义	冯希杰	高武平	韩晓明	胡玉良
黄金刚	季灵运	贾建喜	蒋海昆	蒋晓山	雷建设	雷启云
雷生学	李 斌	李 丽	李冬梅	李宏伟	梁 艳	刘瑞春
罗 勇	吕 芳	马朝晖	郝志刚	史双双	宋美卿	万永年
王跃杰	武艳强	解 滔	薛 艳	闫计明	晏 锐	杨 斌
杨 静	殷伟伟	曾金艳	张 合	张亮娥	张仰辉	张郁山
赵晓云	郑文俊	周克昌				

EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI
THE BOARD OF EDITORS

EDITOR IN CHIEF: CHEN Yuhun

ASSOCIATE EDITORS IN CHIEF: WAN Liang LI Zhong SONG Meiqing ZHANG Ruifang (specific duty)

BOARD MEMBERS: CAO Jun CHEN Shi DONG Kangyi FENG Xujie GAO Wuping HAN Xuoming

HU Yuliang HUANG Jingang JI Lingyun JIA Jianxi JIANG Haikun

JIANG Xiaoshan LEI Jianshe LEI Qiyun LEI Shengxue LI Bin LI LI LI Dongmei

LI Hongwei LIANG Yan LI Ruijun LUO Yong LV Fang MA Zhuohui

SHAO Zhigang SHI Shuangshuang SONG Meiqing WAN Yongge WANG Yuejie

WU Yanqiang XIE Tao XUE Yan YAN Jinying YAN Rui YANG Bin YANG Jing

YIN Weiwei ZENG Jinyan ZHANG He ZHANG Liange ZHANG Yanghui

ZHANG Yushan ZHAO Xiaoyun ZHENG Weijun ZHOU Kechang

山西地震

SHANXI DIZHEN

EARTHQUAKE RESEARCH

IN SHANXI

季刊 Quarterly

1973年2月创刊

Established in February, 1973

2024年第1期(总第197期)

No.1 (Serial No.197) 2024

商标注册号: 327496

Number of Trade Mark Registra-

tion: 327496

主管单位: 山西省地震局

主办单位: 山西省地震学会

编辑出版: 《山西地震》编辑部

主 编: 陈宇坤

编辑部地址: 山西省太原市晋祠路

二段69号

邮政编码: 030021

电 话: (0351) 5610534

印 刷: 山西省建筑科学研究院

印刷科技有限公司

地 址: 太原市山姑巷

发行范围: 公开

发行订购: 《山西地震》编辑部

网 址: <https://sdxz.cbpt.cnki.net/>

电子信箱: sdxzjyb@163.com

出版日期: 2024年3月

Administration: Earthquake Administration of

Shanxi Province

Sponsoring Organization: Seismological Society of Shanxi Province

Edited and Published: by the Editorial Office

of ERS

Editor in Chief: CHEN YU-hun

Address of The Editorial Office:

No. 69, Block 2 of Jinci Road, Taiyuan

Postcode: 030021

Tel: (0351) 5610534

Printed: Shanxi Academy of Building Research

Printing Technology Co., Ltd.

Address: Shanyouxiang of Taiyuan

Distributed: Openly

Distributor and Order Department: Editorial

Office of ERS

<https://sdxz.cbpt.cnki.net/>

E-mail: sdxzjyb@163.com

Date of Publication: Mar. 2024

国际标准连续出版物号 ISSN 1000-6265

国内统一连续出版物号 CN 14-1107/P

年定价: 20.00元(不含邮寄费) 本期定价: 5.00元

SHANXI DIZHEN



ISSN 1000-6265

CN 14-1107/P

CODEN SDIZEY

山西地震

二〇二四年

第一期

总第一九七期

山西地震®

EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI



2024 / 1

ISSN 1000-6265



山西省地震学会

全国优秀地震期刊 山西省连续十三年一级期刊
中国期刊网 中国学术期刊(光盘版) 万方数据库全文收录期刊
中文科技期刊数据库来源期刊 维普资讯网全文收录期刊
中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

山西地震

(季刊·1973年创刊)

2024年第1期

(总第197期)

目次

· 技术交流 ·

基于震后舆情的灾情信息提取研究 闫晓美,牛艳杰,王宁,许振鹏(1)

· 地震活动性 ·

邢台震区应力场特征及 $M_L 3.5$ 以上地震的发震背景分析 章阳,董博,王时(5)

利用初至震相定位法测定 2013 年辽宁灯塔 $M_S 5.1$ 地震震源深度
..... 戴盈磊,张欣然,孔祥雪,田雨佳,王姝婷(10)

新疆中强地震前震频谱偏移特征分析 李奎,张青远,刘立霞,毛玉剑,张峰,周静(17)

· 观测分析 ·

马鞍山皖 27 井数字化水位观测资料分析与效能评估 袁鸣望,王俊,刘园园(23)

昌黎台地磁观测 Z 分量秒值受电气化铁路影响的分析 佟鑫,张国芬,郭建芳,周剑青,殷金平(29)

易县地震台伸缩仪 NE 分量异常分析 屈曼,侯晓真,马栋,高晨,张娜,龚燕民(33)

用不同方法评估山西地震台网的监测能力 梁向军,吴叔坤,王霞,刘林飞(38)

承德地区摆式仪器观测背景功率谱密度特征分析 周硕,王嘉琦,王向亮,李明威(44)

降雨对宝昌台地电阻率观测的影响 贾彦杰,贾昕晔,白少奇,高云峰,闫纪文(51)

责任编辑:张瑞芳; 校对:张瑞芳,张正霞; 英文译校:李斌
期刊基本参数:CN 14-1107/P*1973*q*A4*56*zh*P*¥5.00*70*10*2024-03
本刊网址:<https://sxdz.cbpt.cnki.net/>
本刊电子信箱:sxdzjb@163.com

CONTENTS

• **Academic Exchange** •

Research on Disaster Information Extraction Based on Post-Earthquake Public Sentiment
..... YAN Xiaomei, NIU Yanjie, WANG Ning, XU Zhenpeng(1)

• **Seismicity** •

Analysis of the Stress Field Characteristics in the Xingtai Seismic Region and the Seismogenic Background of
Earthquakes with Magnitudes above $M_L 3.5$ ZHANG Yang, DONG Bo, WANG Shi(5)

Determination of the Focal Depth of the 2013 Liaoning Dengta $M_S 5.1$ Earthquake Using the First-Arrival Seis-
mophase Location Method
..... DAI Yinglei, ZHANG Xinran, KONG Xiangxue, TIAN Yujia, WANG Shuting(10)

Analysis of Spectral Shift Characteristics of Foreshocks before Strong Earthquakes in Xinjiang Region
..... LI Kui, ZHANG Qingyuan, LIU Lixia, MAO Yujian, ZHANG Feng, ZHOU Jing(17)

• **Observation and Analysis** •

Analysis and Efficacy Evaluation of Digital Water Level Observation Data from Ma'anshan Well No. 27 in An-
hui Province YUAN Mingwang, WANG Jun, LIU Yuanyuan(23)

Analysis of the Influence of Electrified Railways on the Second Value of Z-component in Geomagnetic Observa-
tion at Changli Station
..... TONG Xin, ZHANG Guoling, GUO Jianfang, ZHOU Jianqing, YIN Jinping(29)

Analysis of Anomalies in the NE Component of the Extensometer at the Yixian Seismic Station
..... QU Man, HOU Xiaozhen, MA Dong, GAO Chen, ZHANG Na, GONG Yanmin(33)

Evaluating the Monitoring Capability of the Shanxi Seismic Network Using Different Methods
..... LIANG Xiangjun, WU Shukun, WANG Xia, LIU Linfei(38)

Analysis of Background Power Spectral Density Characteristics of Pendulum Instruments in the Chengde Area
..... ZHOU Shuo, WANG Jiaqi, WANG Xiangliang, LI Mingwei(44)

The Impact of Rainfall on the Earth's Resistivity Observations at Baochang Platform
..... JIA Yanjie, JIA Xinye, BAI Shaoqi, GAO Yunfeng, YAN Jiwen(51)

· 技术交流 ·

文章编号:1000-6265(2024)01-0001-04

基于震后舆情的灾情信息提取研究

闫晓美^{1,2},牛艳杰^{1,2},王宁^{1,2},许振鹏^{1,2}

(1.山西省地震局,山西太原030021;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:大地震发生后,通常会出现大量关于地震灾害的信息并在网络中快速传播,为快速准确地获取地震灾情信息,开展基于震后舆情提取灾情信息的相关研究。首先构建灾情信息挖掘模型,建立灾情关键词表,通过计算词向量相似度,快速提取地震灾情等相关信息。同时以“山东德州原平5.5级地震”为案例,验证构建模型在地震灾情提取方面的效果及其可行性和实用性。结果表明,该研究可为震后快速应对和处置灾情提供一定的参考数据和决策依据。

关键词:地震灾情;震后舆情;网络爬虫;文本挖掘;信息提取

中图分类号:P315-39

文献标志码:A

0 引言

近年来,全球范围内地震频发,造成大量人员伤亡和财产损失。2021年5月21日云南大理州漾濞县6.4级地震和22日青海果洛州玛多县7.4级地震,以及2023年2月6日土耳其7.8级地震和11月3日尼泊尔扎泽尔果德地区6.4级地震,均造成大量的人员伤亡和经济损失。

伴随移动互联网技术的发展,地震发生后,大量的地震相关信息在社交媒体平台传播,包括震感、伤亡及救援情况等。其中灾情信息作为地震发生时应急救援的重要依据,对应急处置和灾后救援具有重要价值。因此,快速、准确、全面地收集灾情信息,对灾情的及时响应和快速评估有着重要意义^[1]。

国内许多学者对地震灾情信息的收集、采集、提取与分类做了大量的分析研究。吴新华等基于文本分类方法,提出关键词过滤和时间关系识别的方法,有效提高微博文本突发地震事件的检测效率^[2]。杨腾飞等提出一种通过扩展上下文特征和匹配特征词的方法来快速识别和分类社交媒体中蕴含的不同类别的灾损信息,取得显著效果^[3]。李想等结合前后缀特征词与地址构成规则,实现对包含在灾害类事件中的地址信息的高效提取^[4]。王艳东等对社交媒体数据中的灾害信息进行分类和定位的基础上,重点分析舆论主题的发展变化和空间上的热点区域及分布规律^[5]。这些研究均是针对灾情信息的分类提取、灾情事件的地址信息

提取、灾情舆论信息的变化等展开,基于震后舆情开展灾情收集的研究相对较少。地震发生后,大量的灾情信息会在微博等新媒体平台涌现,有些灾情信息能够更直观地反映震区的受灾情况,却未得到充分挖掘和利用^[6-7]。因此,及时高效地从这些舆论数据中提取有效的灾情信息,对地震应急工作可起到一定的辅助作用。

当地震发生时,快速收集和挖掘来自互联网的灾情信息,可为灾情综合评估、灾难应急救援、灾后重建规划等提供统计数据 and 决策依据。本文以震后新浪微博发布的舆情信息为研究对象,分析震后舆论信息的抓取方法,借助文本分类技术,分析舆论信息的主题内容,探讨利用文本挖掘技术编写提取规则,通过计算词向量相似度,匹配地震灾情关键词库,提取灾情相关信息。

1 研究方法

1.1 构建灾情信息提取模型

本文主要运用文本挖掘方法^[8],构建基于地震舆情的灾情信息挖掘模型,通过Python语言实现主体建模,用于后期灾情信息的提取。技术路线图如图1所示。

1.2 构建地震灾情关键词表

地震灾情信息采集主要根据灾情关键词进行文本匹配,因此,关键词正确与否,直接影响灾情信息采集的准确率。

先根据公众描述的灾情特点和灾情综合评估需求,总结灾害描述性关键词,如震感、人员伤亡、生命线

收稿日期:2023-08-22

基金项目:山西省地震局青年项目(SBK-2312)。

第一作者简介:闫晓美(1984—),女,山西临汾人。硕士研究生,工程师,主要从事地震信息服务工作,E-mail:37198776@qq.com。

通讯作者:牛艳杰(1994—),男,山西吕梁人。硕士研究生,工程师,主要从事非天然地震监测研究,E-mail:976133487@qq.com。

状况等,形成地震灾情基础词库;再以语料库为基础,利用文本相似度方法,匹配地震灾情基础词库,找到相似词进行词库补充,形成灾情关键词表,为后期灾情文本提取做准备。

选用的语料库是维基百科(<http://zh.wikipedia.org>)文本数据,选择2023年4月20日更新的词条正文数据作为训练语料库,语料文件名称为 zhwiki-20230420-pages-articles-multistream.xml.bz2,文件大小约2.5 GB。计算语料库中每个词向量与灾情基础词的相似度,主要方法是将每个单词表示为一个向量,计算向量之间的距离来度量单词的相似度;选择相似度高的词作为地震灾害关键词的候选词,经人工分析后确定地震灾情关键词。

研究时,借助谷歌公司提出的 word2vec(词向量聚类)模型^[9],对语料库进行“训练”,计算两个词之间的相似度。结合语料库“训练”结果发现的相似词,通过人工筛查,选出地震灾害关键词。共分为四类:震感、人员伤亡、房屋状况、生命线状况(见表1),并将伤亡程度分为轻—中度和重度两类。

1.3 地震灾情信息提取

利用 Python 语言,构建主题模型,再结合地震灾情关键词表,从震后舆情信息中,进行灾情信息的提取,将非结构化的信息转化为结构化信息,输出完整的灾情信息^[10]。

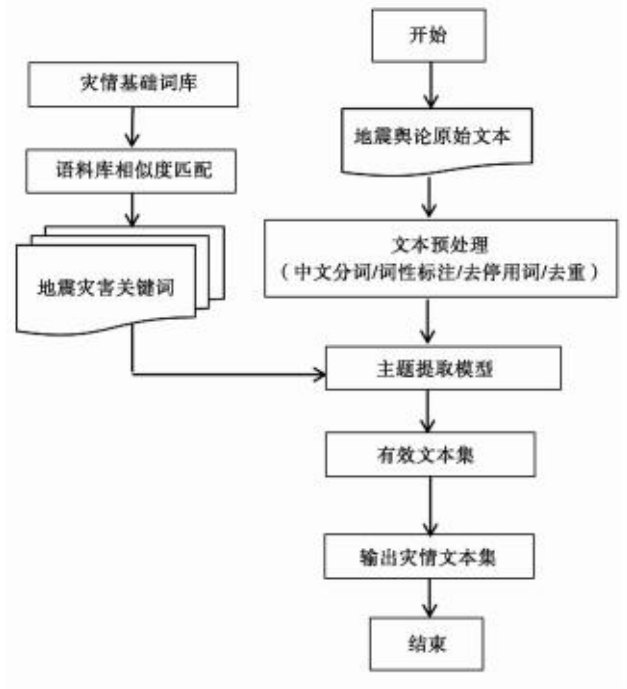


图1 地震灾情信息提取技术设计流程图
Fig.1 Technical design flow chart for earthquake disaster information extraction

表1 地震灾害关键词

Table 1 Keywords related to earthquake disasters

伤亡程度类别	震感	人员伤亡	房屋状况	生命线状况
轻—中度	震感、感应、地震、摇、晃、摇晃、震、震动、动、晃动、响、抖、甩、头晕、晕等	伤亡、受伤、被困、被埋、埋、转移、被压等	裂缝、掉落、墙裂、墙掉、响、抖动、摇晃、晃、晃动、轻微等	损坏、落石、滚石、无法通行、管制、阻塞、禁止、挡、被挡、断电、断水、停电、停水等
重度	强烈震、站不稳、摇晃、摔倒等	死亡、遇难、不幸、生命危险、垂危等	倒塌、损毁、损坏、破损等	断裂、滑坡、中断、严重等

1.3.1 地震灾情信息提取

地震灾情文本提取是从震后舆情信息中挖掘与地震灾害有关的文本数据,剔除其他无关数据的过程。主要利用主题模型,实现对特定地震灾情的信息识别,通过计算词向量相似度查找地震灾害相似词,用于提取地震灾害相关文本。具体步骤为:

- (1) 对文本数据进行中文分词、词性标注,得到文本集的词语集合。
- (2) 对词语集合进行停用词过滤操作。
- (3) 通过 word2vec 技术训练词语集合中的词语,得到每个词的词向量。
- (4) 根据词向量计算相似度,得到与灾情关键词相似的词语,扩充地震灾害关键词库,筛选出地震灾害主题文本集合。
- (5) 对初始主题文本集中的所有词语计算 TF-IDF

(词频—逆文档频率)值^[11],用来衡量词语对主题的贡献度;从中剔除平均 TF-IDF 值较低的文本;将超过阈值的词语添加到关键词集合中,根据关键词集合得到新的主题文本集合。重复步骤(5)直到没有新词出现,最终得到灾情主题文本集合。

1.3.2 数据采集

结合本文的数据采集需要,采用网络爬虫技术对微博文本进行采集。首先利用 python 语言编写网络爬虫程序,通过网页 URL 获取页面内容,利用正则表达式实现内容的抓取和采集。依据地震灾害关键词表抓取匹配的文本集,对指定时间内搜索出来的关键词文本集进行抓取,并存储在文本数据中。

1.3.3 文本预处理

对获取的数据进行清洗、分词和词性标注。

- (1) 数据清洗。

数据清洗是去除冗余、杂乱无意义的数 据,为下一步的中文分词和词性标注做准备。对采集到的微博数据,根据用户名、发文时间以及文本内容三项判断其是否为重复数据,并删除;对文本数据清洗,主要是去除文本内容中的无意义内容,如“@XX”“网页链接”、表情符号等。

(2) 中文分词和词性标注。

中文分词是将句子转化成词序列,为后续的词性标注做准备。词性标注是判断句子中每一个词所对应的语法标识,即词性。本文使用 Python 的 jieba 工具进行中文分词和词性标注^[12]。jieba 工具是目前应用较广泛的开源自然语言处理工具,可以实现分词、自定义词典、关键词提取、词性标注等多种功能,可在分词的同时完成词性标注。

如,对输入文本“德州平原地震了吗?就在十分钟前我是明显感到晃动,直接惊醒了。”进行词性标注,标注结果如下:

德州平原/ne_place 地震/n 了/u 吗/y ? /w 就/d 在/p 十分钟/t 前/f 我/r 是/v 明显/a 感到/v 晃动/v, /w 直接/ad 惊醒/v 了/u 。 /w

(3) 去除停用词。

为提高句子的搜索效率和表达语义,在分词之后,通常需要去除与文本无关的停用词,如“是”“吗”“了”等;还有一些特殊的符号,如 ¥、& 等。本文通过使用

百度停用词表和常用汉语停用词表来剔除停用词。

如,对输入文本“德州平原地震了吗?就在十分钟前我是明显感到晃动,直接惊醒了。”去除停用词,输出结果如下:

德州平原/地震/十分钟/前/明显/感到/晃动/直接/惊醒/

可以看到,输出结果去除“是”“吗”“了”“我”等停用词。

2 模型应用

2.1 案例说明

2023年8月6日2时33分,在山东德州市平原县发生5.5级地震,震源深度10 km,山东、河北、北京、山西多地有震感。之后又出现多次余震,据中国地震台网速报,截至6日6时,共记录到余震56次,其中3.0级及以上余震1次,3.0级以下余震55次。

2.2 数据采集

利用网络爬虫技术,使用地震灾害关键词库对微博文本进行匹配,抓取地震发生后24 h内(间隔为1 h)的地震灾情信息,共匹配到35 844条数据。经筛选、去重、去噪等数据处理后,得到有效数据共22 301条。表2为匹配得到的部分地震灾害相关微博数据。

表2 山东德州平原5.5级地震灾害信息相关微博信息提取示例

Table 2 Examples of Weibo posts related to the 5.5 magnitude earthquake disaster in Dezhou Plain, Shandong

编号	信息	关键词	程度
1	山东发生地震很少,这次震级倒是不小,但愿少人受伤。	地震、受伤	轻度、中度
2	山东地震了吗?我是河南的那天和女儿都感觉到震动了。	地震、震动	
3	山东都能地震……我默默打开了手机地震预警功能!	地震	
4	目前官方报道的因地震受伤的总计21人,相信我们中国人的团结和善良足矣抵御这次地震所带来的伤害。	地震、受伤	
5	德州平原地震了 淄博有震感。	地震、震感	
6	潍坊好像没有地震?是德州地震了平原县 你感觉到的可能就是从德州带来的余震。	地震	
7	坐标德州,有强烈的震感,地震中心是德州平原县。	震感、地震	
8	我们感受的是地震冲击,半夜被手机的地震预警惊醒。	地震	
9	恍惚中我只看到地震预警上写着地震150公里。还以为地震还有150公里就到滨州了,吓死我了。	地震	
10	德州平原都地震了。目前大街上坐着呢	地震	
11	山东德州平原县地震,真的,5.5级,被晃醒了,至今不敢睡	地震、晃	
12	地震在德州,山东德州平原县 我是山东菏泽曹县的,给我晃醒了,我以为做梦马上打开手机朋友圈几十个人都在说地震了,马上起来现在不敢睡	地震、晃	
13	如果您或您身边的人在地震区域,请密切关注当地政府和地震部门的官方通知,并按照相关指示采取行动,确保自身安全。	地震	
14	地震后还可能有余震,所以请保持警惕,避免到危险的地点,确保迅速撤离到安全区域。	地震	
15	我从没想到地震会出现在山东?也从没想过余震导致的房屋乱晃床咚咚响那么可怕 我以为我眩晕症犯了 当我意识到是地震时手脚都是哆嗦的,太恐怖了。	地震、晃	
16	昨晚刮风,睡到半夜以为还想这风这么大把房子刮的都动了,没想到山东会地震。	动、地震	

此次地震微博信息提取完成后,对灾情关键词表进行词频统计,将排列靠前的词列表如下(见表3),并生成柱状图。其中,出现频率最高的是“地震”一词,共出现9278次;“晃动”一词的频次达到3329次,说明晃动是地震时人们最直接、最明显的感受;其他“震感”“摇晃”“晕”等描述地震感受的词均排名前列。上述统计数据表明,震后的网络舆情主要以描述震感的信息为主,其他有关生命线情况、房屋破坏程度等描述较少(见图2)。

表3 灾情信息关键词词频统计表

Table 3 Frequency statistics table of disaster information keywords

单词	词频/次	单词	词频/次
地震	9 278	被困	389
晃动	3 329	断电	279
震感	2 716	断水	205
摇晃	2 046	墙裂	105
晕/头晕	1 283	受伤	97
转移	1 131	损坏	53
掉落	814	落石	21
阻塞	538	伤亡	17

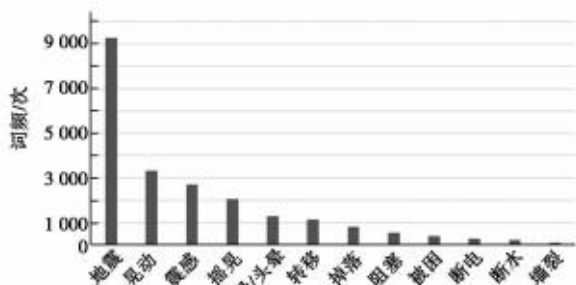


图2 灾情信息关键词词频统计图

Fig. 2 Frequency statistics graph of disaster information keywords

通过这些高频词看出,描述震感情况的信息均属于轻度、中度的范畴。根据山东省应急管理厅权威发布:截至2023年8月6日8时,震区共有126处房屋不同程度受损、21人受伤(德州20人、聊城1人)。由此可见,本文提取灾情信息的震感轻、中度程度与官方发布的基本一致。

3 结论与讨论

本文基于震后舆情展开灾情信息提取研究,首先建立关键词表,构建灾情信息挖掘模型,采用文本相似度方法抓取微博平台的地震灾害文本。研究以山东德

州平原县5.5级地震的新浪微博数据为例,从庞杂的微博数据中提取出地震灾情相关微博文本,有效验证模型的可行性和实用性。该研究可为震后及时掌握灾情情况、科学有效应对灾情、及时开展震后应急和救援提供一定的参考依据。

(1) 利用文本相似度方法,基于维基百科语料库,构建地震灾情关键词表,共分为震感、人员伤亡、房屋状况及生命线状况四大类。

(2) 建立灾情信息模型,采用文本相似度方法,针对震后舆情抓取地震灾情数据内容。

(3) 以山东德州平原县5.5级地震的微博数据为例,对灾情提取模型进行验证,结果显示采集到的灾情信息能够较准确地反映灾区的地震伤亡程度。

(4) 该研究还存在诸多问题和不足,如,地震灾情关键词不完善,缺少灾情等级、类别等信息;又如在文本提取过程中,没有对信息进行分类提取,对灾害严重程度、受伤人员数量、通信设施损毁详情等提出针对性的提取规则。在今后研究中要结合天气、交通数据等信息,提高地震灾害信息的识别和提取精度。

参考文献:

[1] 黄晶,李梦晗,康晋乐,等. 基于社交媒体的暴雨灾情信息实时挖掘与分析——以2019年“4·11深圳暴雨”为例[J]. 水利经济,2021,39(02):86-94.

[2] 吴新华,栾翠菊. 基于微博文本分类的突发地震事件检测方法[J]. 微型机与应用,2017,36(19):58-61+65.

[3] 杨腾飞,解吉波,李振宇,等. 微博中蕴含台风灾害损失信息识别和分类方法[J]. 地球信息科学学报,2018,20(07):906-917.

[4] 李想,刘纪平,罗安,等. 面向微博的灾害类事件地址提取与空间定位方法:以地震事件为例[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(04):128-131.

[5] 王艳东,李昊,王腾,等. 基于社交媒体的突发事件应急信息挖掘与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2016,41(03):290-297.

[6] 张正霞,谷利国,杨顺达. 防震减灾宣传关键时段互动应对策略研究[J]. 地震科学进展,2022,52(06):279-284.

[7] 张正霞,杨顺达,谷利国. 地震政务微博互动传播分析与应对策略[J]. 高原地震,2022,34(04):65-70+47.

[8] 张鸿. 基于人工智能的多媒体数据挖掘和应用实例[M]. 武汉:武汉大学出版社,2018:01.

[9] 周练. Word2vec的工作原理及应用探究[J]. 科技情报开发与经济,2015,25(02):145-148.

[10] 赵竹飞. 基于互联网新闻的灾情信息采集系统构建[D]. 上海:上海师范大学,2018.

[11] 程龙. 基于改进TF-IDF算法的信息抽取系统设计与实现[D]. 北京:北京邮电大学,2019.

[12] 石凤贵. 基于jieba中文分词的中文文本语料预处理模块实现[J]. 电脑知识与技术,2020,16(14):248-251+257.

· 地震活动性 ·

文章编号: 1000-6265(2024)01-0005-05

邢台震区应力场特征及 $M_L 3.5$ 以上地震的发震背景分析章 阳^{1,2}, 董 博^{1,2}, 王 时^{1,2}

(1. 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 河北 邢台 054000; 2. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要: 邢台老震区构造背景复杂, 发育多组断裂, 属构造较不稳定地带, 且区域中小地震频发。2017 年至 2021 年发生 6 次 $M_L 3.5$ 以上地震, 其中有两次 $M_L 4$ 以上地震。本文基于搜集的震源机制解资料, 反演区域现今地壳应力场, 模拟震源机制与地壳应力场的关系, 计算地壳应力场在地震发震断层面的相对剪应力和相对正应力, 分析地震的发震背景。结果表明, 6 次 $M_L 3.5$ 以上地震中, 有 2 次震源机制节面接近应力场的最大剪应力节面, 有 4 次震源机制节面远离应力场的最大剪应力节面。说明地震不是完全按照震源机制节面上具有最大剪应力的破裂方向发生, 有时可能发生在某些薄弱带上。因此, 在进行地震预测时, 不能只关注最大剪应力破裂方向, 还应多关注其边缘的地质薄弱带, 这一结果可能会为后续分析该区域的地震危险性, 研究地震孕育机制及动力学过程提供一定的参考依据。

关键词: 应力场; 邢台震区; 破裂方向; 发震背景; 地质薄弱带

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

0 引言

邢台老震区地质构造背景复杂, 发育有近 NS 走向倾滑性质的元氏断裂、NWW 走向走滑性质的隆尧断裂、NE 走向正断性质的晋县断裂和 NNE 走向新河断裂, 近年来中小地震频繁发生。2017—2021 年发生 6 次 $M_L 3.5$ 以上地震, 分别为 2017 年 1 月 3 日隆尧 $M_L 3.8$ 地震、9 月 4 日临城 $M_L 4.4$ 地震、9 月 15 日宁晋 $M_L 3.6$ 地震, 2018 年 10 月 30 日隆尧 $M_L 3.7$ 地震, 2019 年 1 月 15 日元氏 $M_L 3.5$ 地震, 2021 年 7 月 15 日宁晋 $M_L 4.1$ 地震。中等地震较活跃, 但 $M_L 5$ 以上地震平静已接近 20 年, 震情形势依然比较严峻。

地壳应力场主要反映区域应力状态, 对于揭示地震孕育和发生等动力学过程具有一定的指导意义。地壳应力场的获取大多来自断层滑动^[1-4]和震源机制^[5-7]的约束。前人根据断层滑动信息或震源机制估计应力场, 但断层滑动由于复杂环境影响, 难以精确测量。利用地震观测数据获得的震源机制解研究地壳应力场被学者们广泛使用。许忠淮等利用综合震源机制解法求解京津唐张和华北地区的构造应力场方向^[5], 其他研究人员使用不同方法对京津冀地区的地壳应力场开展大量研究^[8-15]。对小震频发的邢台老震区应力场的研究较少, 且在应力场解释时, 没有考虑应力形因子。万

永革等^{[4][7]}基于应力张量在断层面的剪切应力方向和断层滑动方向最为一致准则, 提出根据震源机制资料反演区域应力场的网格搜索法, 并给出不确定性范围。该方法可以获得较准确的 3 个主应力轴参数, 并给出应力形因子。万永革^[16]通过模拟不同应力体系下震源机制节面上相对剪应力和相对正应力的分布, 推测地震不一定沿着剪应力最大的断层面方向破裂, 也有可能发生在某些随机分布的地质薄弱带上, 当这些地质薄弱带受到足够大的剪应力作用时, 便会沿着该剪应力的方向破裂, 释放能量导致地震发生。因此可以根据计算剪应力的相对大小分析地震的发震背景。

本文搜集邢台及周边地区的历史震源机制解资料, 利用网格搜索法反演该区域的地壳应力场, 并给出不确定性范围。将区域地壳应力场投影到发震断层面上, 模拟震源机制解与区域地壳应力场的关系, 探讨邢台老震区 2017—2021 年发生的 6 次 $M_L 3.5$ 以上地震的发震背景, 为分析邢台老震区的地震危险性及其后续研究该区域的地震孕育机制和动力学过程提供参考。

1 数据搜集

搜集前人研究成果^[17-25], 整理出邢台老震区 128 个地震的震源机制解, 利用 P 波初动方法^[26-27]获

收稿日期: 2023-08-01

基金项目: 河北省地震科技星火计划(DZ2021121400006, DZ2023120600003)资助。

第一作者简介: 章 阳(1989—), 男, 江西南城人。硕士研究生, 工程师, 主要从事数字地震学与地震应力场等方面的研究, E-mail: zhangyang_ouc@163.com。

得 107 个 $M_L \geq 2.0$ 地震震源机制解,共获得 235 个 $M_L \geq 2.0$ 地震震源机制解资料。表 1 列出 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解,具体分布如图 1 所示。

表 1 邢台老震区及周边 $M_L \geq 3.5$ 地震震源机制解
Table 1 Focal mechanism solutions of earthquakes with $M_L \geq 3.5$ in and around the old Xingtai seismic area

发震日期	震中位置		震级	节面		
	纬度(°)	经度(°)		走向(°)	倾角(°)	滑动角(°)
1966-03-06	37.467	115.033	5.2	198	79	175
1966-03-08	37.396	114.957	6.8	19	81	-177
1966-03-20	37.267	114.967	5.6	193	80	-174
1966-03-22	37.566	115.178	7.2	186	83	-178
1966-03-22	37.500	115.083	6.7	199	89	-179
1966-03-22	37.517	115.033	5.6	186	80	165
1966-03-22	37.567	114.983	5.6	183	75	-169
1966-03-24	37.417	114.900	5.2	16	77	-158
1966-03-26	37.735	115.172	6.2	30	74	-157
1966-03-26	37.700	115.300	5.2	205	70	-17
1966-03-27	37.600	115.300	5.8	193	82	-178
1966-03-29	37.486	114.994	6.0	48	72	141
1966-04-20	37.250	114.783	5.3	308	60	23
1966-07-19	37.283	114.817	5.1	3	86	169
1967-12-03	37.715	115.150	5.7	158	75	157
1968-01-07	37.600	115.100	4.7	228	70	-6
1968-01-16	37.779	115.517	5.3	198	72	-60
1968-05-15	37.200	114.800	4.7	31	77	-163
1968-05-15	37.300	114.800	4.7	206	62	-124
1972-09-07	37.300	114.817	4.6	199	76	146
1974-06-06	37.600	115.100	4.9	220	83	170
1981-11-09	37.379	115.036	5.8	31	72	162
1982-01-26	37.400	114.867	4.4	210	80	-153
1985-11-30	37.233	114.817	5.3	236	89	161
1986-12-16	37.400	115.500	3.5	84	39	0
2002-04-22	37.270	114.420	4.7	156	21	-82
2002-08-10	37.520	115.070	3.5	217	88	24
2002-11-10	37.320	114.870	3.7	119	30	-121
2002-12-25	37.600	115.100	4.2	15	48	-107
2003-01-19	37.580	115.130	3.9	33	81	160
2003-09-06	37.330	114.920	3.6	296	73	-141
2003-10-02	37.470	114.950	3.7	111	64	-79
2004-03-14	37.400	114.320	3.6	191	65	-155
2004-05-24	37.400	114.570	3.5	236	34	-80
2004-07-23	37.470	115.000	3.6	250	45	5
2004-12-19	37.620	115.130	3.9	32	63	168
2010-04-30	37.506	115.037	3.9	190	86	174
2011-09-01	37.733	115.283	3.7	120	88	-25
2017-01-03	37.375	114.897	3.8	200	90	159
2017-09-04	37.500	114.350	4.4	92	85	-12
2017-09-15	37.460	115.010	3.6	41	83	-178
2018-10-30	37.210	114.660	3.7	127	89	-59
2019-01-15	37.680	114.540	3.5	207	83	178
2021-07-15	37.580	115.100	4.1	171	80	135

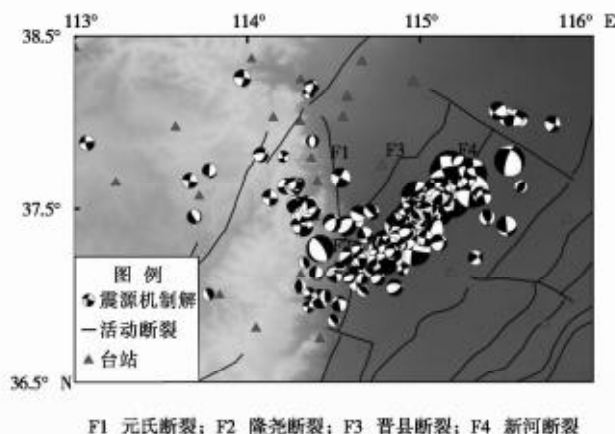


图 1 邢台地震序列地质构造背景、地震台站及震源机制解分布
Fig. 1 Geological structural background of the Xingtai earthquake sequence, seismic stations, and distribution of focal mechanism solutions

2 应力场反演

根据搜集到的震源机制解资料反演地壳应力张量,按照应力张量在断层面上的剪应力方向与断层滑动方向最为一致准则,利用震源机制资料全局网格搜索应力场的最优解,准确反演应力张量参数,获得较精确的主应力方向,并给出反演结果一定置信度下的置信区间和应力形因子。求得最优应力状态的压轴走向 240.20° ,倾伏角 1.79° ,95%置信度置信范围分别为 $239.70^\circ \sim 242.20^\circ$ 和 $1.35^\circ \sim 2.29^\circ$;张轴走向 149.79° ,倾伏角 12.87° ,95%置信度置信范围分别为 $149.29^\circ \sim 151.79^\circ$ 和 $12.37^\circ \sim 13.37^\circ$;中间轴走向 338.00° ,倾伏角 77.00° ,95%置信度置信范围分别为 $337.50^\circ \sim 340.00^\circ$ 和 $76.50^\circ \sim 77.50^\circ$,应力形因子 R 为 0.2。邢台老震区主压应力轴方向为北东向,主张应力轴方向为北西向,与实际地质构造背景相符,断层性质表现为走滑型(见图 2)。

3 结果分析

按照万永革^[16]提出的震源机制与应力体系关系模拟方法,将区域应力场投影到 6 次地震的发震断层面上,通过计算区域应力场的各个地震发震断层节面下的剪应力和正应力,用最大剪应力归一化得到相对剪应力和相对正应力。当相对剪应力大于 0.9 时,认为该地震的震源机制节面与应力场的最大释放应力节面一致。基于此,分析得到 6 次地震的发震背景,结果如表 2 和图 3 所示。

通过模拟地壳应力场和震源机制的关系,发现最

大剪应力在走向 20° 、倾角 90° ，走向 100° 、倾角 90° ，走向 190° 、倾角 80° 和走向 280° 、倾角 80° 的断层面上；最小剪应力在走向 150° 、倾角 90° 和走向 330° 、倾角 90° 的断层面上；最大正应力在走向 60° 、倾角 90° 和走向 240° 、倾角 80° 的断层面上；最小正应力在走向 150° 、倾角 90° 和走向 330° 、倾角 90° 的断层面上。最大剪应力节面附近的地震基本呈现出走滑性质，推测该区域后

续可能发生的地震大概率为走滑型地震。表 2 中的地震 1 和地震 4 发生在最大剪应力节面附近，地震沿着最大剪应力方向破裂；其余 4 次地震并非发生在最大剪应力节面上，其发震断层面可能是某些随机分布的地质薄弱带或小裂纹，在地壳应力场作用下，当这些地质薄弱带或小裂纹受到足够大的剪应力作用时，便会沿着受到的剪应力方向发生破裂而释放能量。

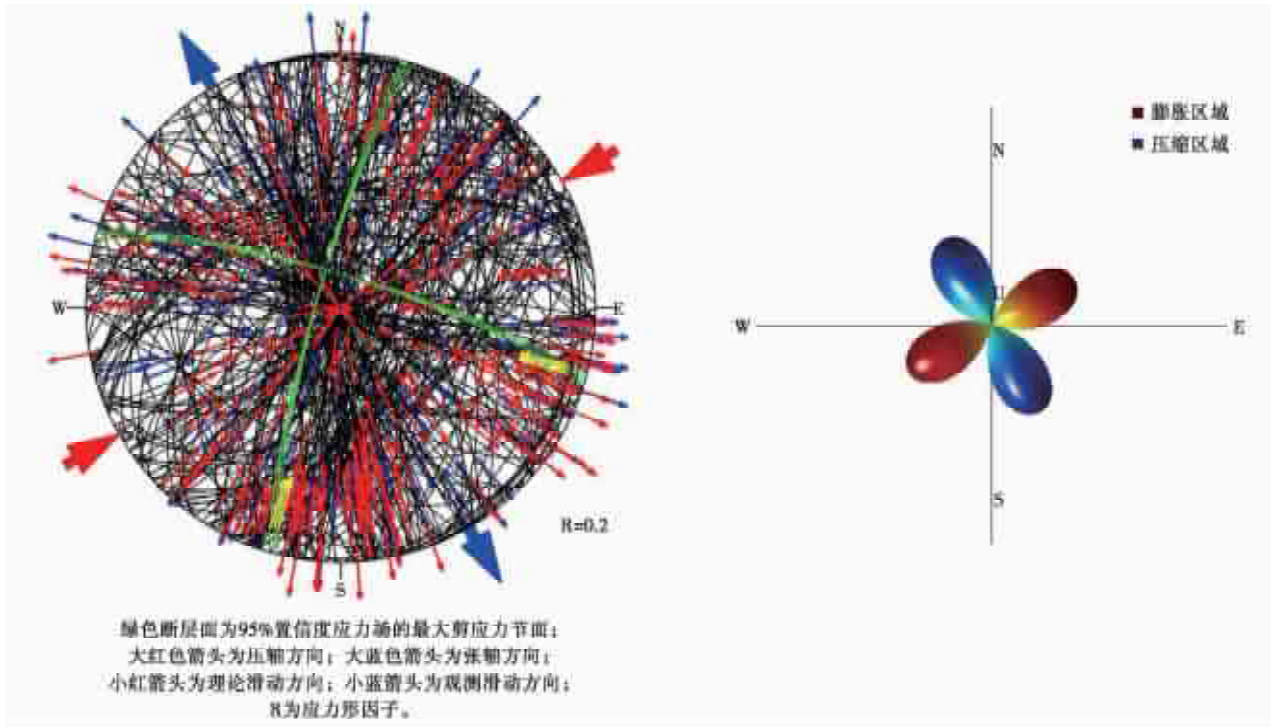


图 2 邢台老震区区域应力场及其空间三维辐射花样

Fig. 2 Regional stress field in the old Xingtai seismic area and its spatial three-dimensional radiation pattern

表 2 应力场在发震断面上的相对剪应力和相对正应力

Table 2 Relative shear stress and normal stress on the seismogenic fault plane in the stress field

地震序号	发震断层面			相对剪应力	相对正应力
	走向($^\circ$)	倾角($^\circ$)	滑动角($^\circ$)		
1	200	90	159	0.984	0.331
2	41	83	-178	0.742	0.821
3	127	89	-59	0.692	-0.514
4	207	83	178	0.909	0.614
5	171	80	135	0.711	-0.496
6 ^[28]	92	85	-12	0.650	0.691

4 结论

本文基于地壳应力场研究邢台老震区的地震发震

背景，搜集邢台老震区 235 个 $M_L 2.0$ 以上地震的震源机制解资料，利用网格搜索法反演区域现今地壳应力场，并给出其不确定性范围，进而将区域地壳应力场投影到发震断层面上，模拟震源机制与地壳应力场的关系，计算地壳应力场在 6 次 $M_L 3.5$ 以上地震发震断面上的相对剪应力和相对正应力，分析地震的发震背景，确定地壳应力场的最大剪应力破裂面断层参数。主要结论如下：

(1) 反演得到邢台老震区现今应力场的压轴走向 240.20° 、倾角 1.79° ，张轴走向 149.79° 、倾角 12.87° ，中间轴走向 338.00° 、倾角 77.00° ，应力形因子 R 为 0.2，主压应力轴方向为北东向，主张应力轴方向为北西向。

(2) 邢台老震区最大剪应力破裂面断层参数为走向 20° 、倾角 90° ，走向 100° 、倾角 90° ，走向 190° 、倾角 80° 和走向 280° 、倾角 80° 。最大剪应力节面附近的地

震基本呈走滑性质,推测该区域后续可能发生的地震大概率为走滑型地震。

(3) 邢台老震区 2017 年以来 6 次 $M_L 3.5$ 以上地震中,有 2 次的震源机制节面接近应力场的最大剪应力节面,有 4 次的远离应力场的最大剪应力节面。表

明地震不是完全按照震源机制节面上具有最大剪应力的破裂方向发生,有时可能发生在某些薄弱带上。因此,在今后的地震预测研究中,不能只关注最大剪应力破裂方向,还应多关注其边缘的地质薄弱带。

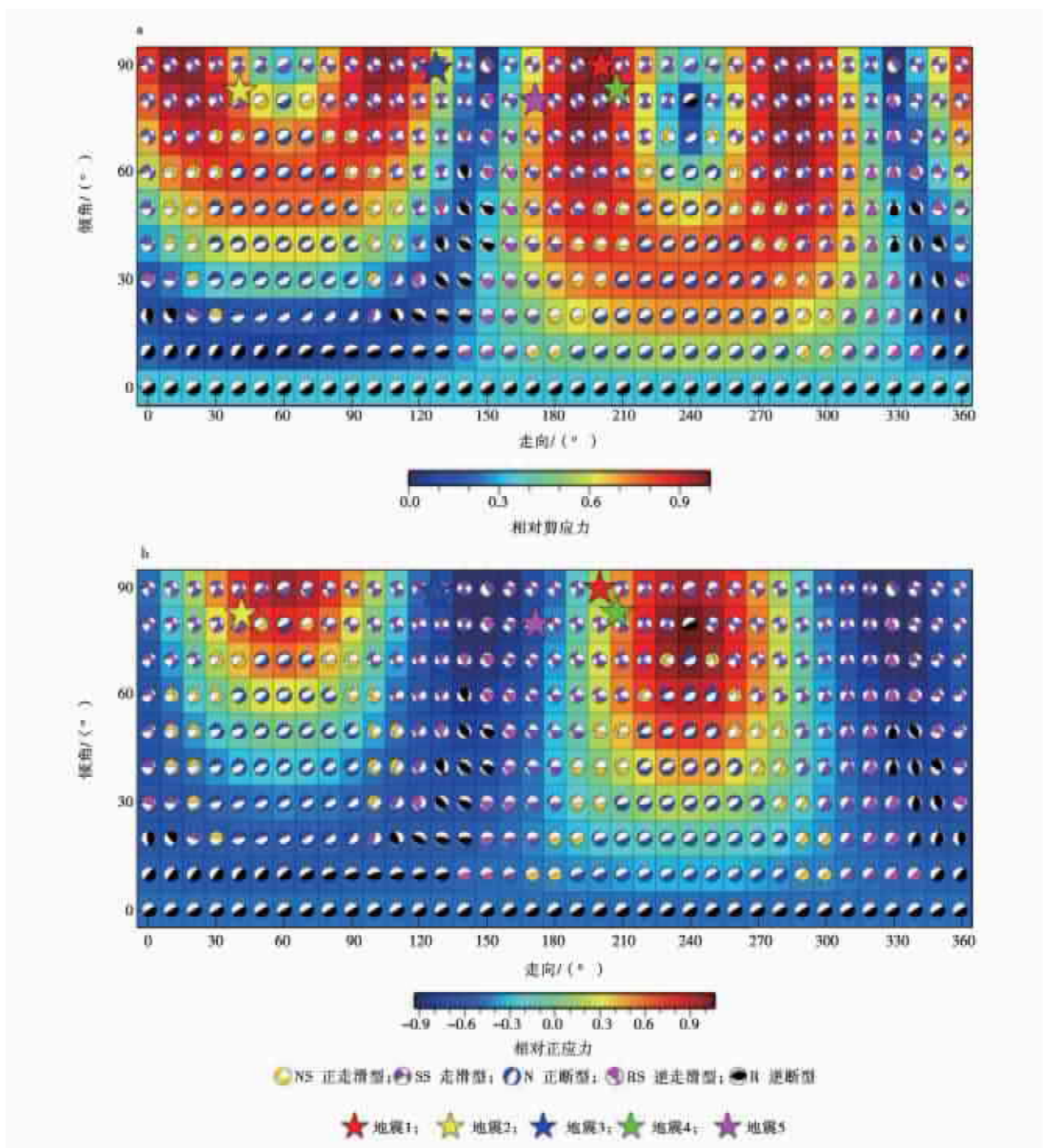


图 3 区域应力场在 5 次地震发震断面上的相对剪应力和相对正应力

Fig. 3 Relative shear stress and normal stress on the seismogenic fault plane of the regional stress field for five earthquakes

参考文献:

- [1] Angelier J. Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 1979, 56(3-4): T17-T26.
- [2] Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(B7): 5835-5848.
- [3] 许忠淮, 戈澍漠. 用滑动方向拟合法反演富蕴地震断裂带应力场[J]. *地震学报*, 1984, 6(4): 395-404.
- [4] 万永革. 联合采用定性和定量断层资料的应力张量反演方法及在乌鲁木齐地区的应用[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(9): 3144-3156.
- [5] 许忠淮. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场[J]. *地震学报*, 1985, 7(4): 349-362.
- [6] Angelier J. Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV—a new method free of choice among nodal planes. *Geophysical Journal International*, 2002, 150(3): 588-609.
- [7] Wan Y G, Sheng S Z, Huang J C, et al. The grid search algorithm of tectonic stress tensor based on focal mechanism data and its application in the boundary zone of China, Vietnam and Laos. *Journal of Earth Science*, 2016, 27(5): 777-785.
- [8] 李瑞莎, 崔效锋, 刁桂苓, 等. 华北北部地区现今应力场时空变化特征研究[J]. *地震学报*, 2008, 30(06): 570-580.
- [9] 张红艳, 谢富仁, 崔效锋, 等. 张渤带陆地现代构造应力场的非均匀特征[J]. *中国地震*, 2009, 25(03): 314-324.
- [10] 武敏捷, 林向东, 徐平. 华北北部地区震源机制解及构造应力场特征分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(05): 39-43.
- [11] 武敏捷, 武安绪, 徐平, 等. 首都圈地区震源机制解综合研究[J]. *中国地震*, 2012, 28(04): 393-401.
- [12] 胡幸平, 崔效锋. 华北地区中部地震精定位与构造应力场研究[J]. *震灾防御技术*, 2013, 8(04): 351-360.
- [13] 黄骥超, 万永革. 利用小震与强震震源机制解反演首都圈现今构造应力场[J]. *地震*, 2015, 35(01): 17-27.
- [14] 樊文杰, 崔效锋, 胡幸平, 等. 首都圈地区震源机制解及现今构造应力场时空变化特征研究[J]. *地震学报*, 2019, 41(01): 33-45.
- [15] 王晓山, 冯向东, 赵英萍. 京津冀地区地壳应力场特征[J]. *地震研究*, 2020, 43(04): 610-619.
- [16] 万永革. 震源机制与应力体系关系模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(6): 2281-2296.
- [17] 李钦祖, 靳雅敏, 于新昌. 华北地区的震源机制与地壳应力场[J]. *地震学报*, 1982, 4(01): 55-61.
- [18] 汪素云, James Ni, 马宗晋, 等. 华北强震断层面解和震源深度特征[J]. *地球物理学报*, 1991, 34(01): 42-54.
- [19] 许忠淮, 汪素云, 高阿甲, 等. 我国部分早期震源机制解答的重新测定[J]. *地震地磁观测与研究*, 1994, 15(05): 1-9.
- [20] 徐锡伟, 于贵华, 王峰, 等. 1966年邢台地震群的发震构造模型——新生断层形成? 先存活断层摩擦粘滑? [J]. *中国地震*, 2000, 16(04): 73-87.
- [21] 张宏志, 刁桂苓, 赵英萍, 等. 邢台地区近年的震源机制[J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27(06): 91-95.
- [22] 李守勇, 邹立晔, 孙晴, 等. 1966年邢台地震静态库仑应力触发分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2016, 36(10): 918-921.
- [23] 高彬, 贾科, 周仕勇. 华北地区 1900—1970 年 5 级以上地震发震位置与震源机制研究[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(11): 4089-4099.
- [24] 王晓山, 陈婷, 冯向东, 等. 邢台地震序列的应力释放调整过程[J]. *华北地震科学*, 2017, 35(1): 17-23.
- [25] 陈婷, 章阳, 王晓山, 等. 邢台老震区库仑应力演化及地震危险性分析[J]. *华北地震科学*, 2021, 39(4): 50-56.
- [26] 梁尚鸿, 李幼铭, 束沛溢, 等. 利用区域地震台网 P、S 振幅比资料测定小震震源参数[J]. *地球物理学报*, 1984, 27(3): 247-257.
- [27] 胡幸平, 俞春泉, 陶开, 等. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(6): 1711-1718.
- [28] 章阳, 万永革, 陈婷, 等. 河北临城地震序列揭示的一条隐伏断层[J]. *中国地震*, 2021, 37(02): 442-451.

(英文摘要见第 56 页)

利用初至震相定位法测定 2013年辽宁灯塔 $M_s5.1$ 地震震源深度

戴盈磊,张欣然,孔祥雪,田雨佳,王姝婷

(辽宁省地震局,辽宁 沈阳 110034)

摘要:以2009年至2022年辽宁测震台网的观测资料为基础,拟合辽宁地区小震Pg波走时曲线,得到上地壳P波速度为6.11 km/s,并构建该地区双层地壳P波速度模型。提取正式观测报告中的20个清晰Pg和9个Pn震相到时,基于初至震相定位法测定2013年辽宁灯塔 $M_s5.1$ 地震的震源深度为10.8 km,初至P震相最小走时残差为0.31 s;使用考虑误差的定位算法测定震源深度为10.27 km,定位残差为0.35 s,与使用其他速度模型计算得到的震源深度基本一致,可信度较高。分析认为,灯塔 $M_s5.1$ 地震震源深度在11 km左右。以该深度作为主要输入参数计算其在周围产生的位移场和应变场,显示出典型的走滑地震特征。

关键词:震源深度;初至P震相;速度模型

中图分类号:P315.3

文献标志码:A

0 引言

2013年1月23日12时18分在辽宁省辽阳市灯塔市与沈阳市苏家屯区交界处(北纬41.48°、东经123.20°)发生 $M_s5.1$ 地震(以下简称灯塔地震)。本次地震是1999年岫岩 $M_s5.4$ 地震以来辽宁地区最大地震^[1],发生在地震活动性相对较弱的辽宁中北部地区,具有一定的研究价值。震源深度是地震学研究的关键参数^[2],也是地震时空参数中最难测准的参数之一^[3]。准确测定灯塔地震震源深度对于其形成的动力学环境研究、地震灾害评估具有重要意义。

辽宁测震台网正式观测报告中灯塔地震的震源深度为6 km;中国地震台网正式地震目录(https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml?PAGEID=earthquake_zhengshi)给出的该地震震源深度是10 km;孙素梅等^[4]通过对灯塔地震序列事件的双重重定位,将灯塔5.1级主震震中位置修正为北纬41.475°、东经123.223°,震源深度9.275 km;谢弘臻等^[5]采用单纯形法研究得到灯塔地震的震源深度应为14 km;GCMT基于全球台网远震长周期数据测定的矩心深度为15.5 km;中国地震局地震预测研究所(<https://www.ief.ac.cn/kydts/info/2013/14144.html>)、苏培臻等^[6]使用CAP方法求解的最优矩心深

度分别为2 km和1 km。

卢造勋等^[7-8]曾开展过闾阳—海城—东沟剖面和内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地学断面速度结构及综合地球物理特征研究工作,所得结果呈现出地壳至上地幔速度结构的非均匀性特征。在实际的测震工作中,宜使用更加简单可靠的一维速度模型^[9]。鉴于此,本文通过拟合时距曲线的方式来构建辽宁地区上地壳P波速度模型,利用初至P震相定位法对灯塔地震震源深度进行重新测定,给出其在地表产生的位移场和应变场,并结合其他定位算法和多种速度模型对结果的可靠性进行讨论。

1 初至震相定位法

初至震相定位法由曾宪伟等^[10]率先提出。该方法利用初至Pg震相和Pn震相容易识别、读取误差相对较小的优势,将小震中距的Pg震相与大震中距的Pn震相结合起来,对震源深度形成更好的约束,被应用于2017年九寨沟地震序列的重新定位和发震构造研究^[11]、2021年宁夏灵武 $M_s4.0$ 和宁夏中卫 $M_L3.6$ 地震震源参数的测定^[12-13]。

对于一次地震事件,该方法首先假设一个初始震中位置和震源深度值。当震中距较小时,Pg震相先于Pn震相到达台站,若初至清晰,则计算Pg震相的理论

收稿日期:2023-09-26

基金项目:辽宁省地震局预研孵化基金项目(LZ2022001);中国地震局地震应急青年重点任务(CEAEDEM202305、CEA_EDEM-20240203),辽宁省地震局重大基础设施震灾风险评估精细化研究团队(LNDZ2023-TD4);中国地震局地震科技星火计划(XH24009YA)联合资助。

第一作者简介:戴盈磊(1983—),男,辽宁阜新人。硕士研究生,工程师,从事大地构造与地球动力学研究、地震应急等工作,E-mail:hand-somedyl@163.com。

到时,并与实际观测的Pg到时进行比较,得到在该台站的Pg震相走时残差;当震中距较大时,Pn震相先于Pg震相到达台站,若初至清晰,亦可得到该台站的Pn震相走时残差。分别计算某地震事件在各观测台站的P震相(Pg和Pn)走时残差,再对其L1范数求算术平均,最终得到该地震在初始震中位置和震源深度下的初至震相走时残差。实际应用时,为得到在某深度处可能的最小走时残差,一般以初始震中位置为中心,进行网格搜索,找到最小走时残差对应的震中位置;然后不断改变震源深度进行第二轮搜索,当走时残差再次达到最小时,理论上认为该深度即为最有可能的震源深度。

在不考虑有低速层存在的情况下,假设地壳为n层水平模型,Pg震相走时方程可表示为^[14]:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{pv_i h_i}{\sqrt{1-p^2 v_i^2}} + (h - \sum_{i=1}^{k-1} h_i) \frac{pv_k}{\sqrt{1-p^2 v_k^2}}, \quad (1)$$

$$t_{pg} = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{h_i}{v_i \sqrt{1-p^2 v_i^2}} + (h - \sum_{i=1}^{k-1} h_i) \frac{1}{v_k \sqrt{1-p^2 v_k^2}}, \quad (2)$$

式中: h_i ($i=1, 2, \dots, n$)是每层厚度; Δ 是震中距; h 是震源深度; k ($1 \leq k \leq n$)是震源所在层的层号; v_i ($i=1, 2, \dots, n$),且 $v_1 < v_2 < \dots < v_n$ 是每层的Pg波速度; p 是射线参数, $p = \sin \alpha_i / v_i$, α_i 是第*i*层的入射角; t_{pg} 是Pg震相走时。

Pn震相的理论走时表示为:

$$t_{pn} = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{h_i \sqrt{v_{pn}^2 - v_i^2}}{v_i v_{pn}} + \left(\sum_{i=1}^{k-1} h_i + 2h_k - h \right) \frac{\sqrt{v_{pn}^2 - v_k^2}}{v_k v_{pn}} + \sum_{i=k+1}^n \frac{2h_i \sqrt{v_{pn}^2 - v_i^2}}{v_i v_{pn}} + \frac{\Delta}{v_{pn}}, \quad (3)$$

式中: v_{pn} 是Pn波速度; t_{pn} 是Pn震相走时。根据以上3个公式,可计算Pg和Pn震相的理论走时,得到走时残差。

2 数据和速度模型

本文用于测定灯塔地震震源深度的初至震相数据来源于辽宁测震台网的正式观测报告。为保证读取质量,选取Z分量上具有明确初动方向的P波(Pg和Pn)观测到时,具体的台站分布情况如图1所示。从图中可知,记录清晰的Pg震相有20个,震中距范围31~179 km;Pn震相有9个,震中距范围187~317 km,且方位覆盖较理想。

由上述的初至P震相走时方程可知,实际选用的地壳速度模型会对理论走时的计算造成直接影响。因此,本文拟重新构建一个较可靠的辽宁地区地壳速度模型用于理论走时的计算。因使用Pn震相的到时数据,其台站震中距都在150 km以上,甚至更远(见图1),地震射线路径较长,需充分考虑地震波速度受地壳

横向不均匀性影响的情况,所以构建的速度模型分为2层。王亮等^[15]的地震精定位结果显示辽宁地区的地震基本上发生在上地壳内。本文采取拟合2009年至2022年辽宁地区小震Pg震相走时曲线^[16]的方式来获得上地壳P波速度模型参数(见图2)。为有效控制误差,拟合之前剔除大于2.5倍均方差的Pg走时数据。由图2可知,Pg震相走时呈明显的线性趋势,得到辽宁地区上地壳P波速度为6.11 km/s。此外,互相关系数r等于0.9987,趋近于1,说明P波速度与观测走时具有较高的相关性;总体均方差Sy为0.0995 s,回归均方差Sq为0.00049 s,P波速度误差为0.00004 km/s,且图中虚线表示的误差范围始终靠近拟合直线,表明回归方程是稳定的。下地壳及莫霍面速度参数选取卢造勋等^[17]对中朝地台北缘进行地震层析成像时使用的模型。本文构建的辽宁地区地壳速度模型参数如表1所示。

3 计算结果

根据第1节所述方法基于Python3.9环境编写计算程序,运用第2节中的观测数据和速度模型。首先以孙素梅等^[4]对灯塔地震重定位后的结果(北纬41.475°、东经123.223°)和辽宁测震台网正式观测报告中的6 km作为初始震中位置。在其周边0.15°×0.15°的区域内进行0.01°×0.01°的网格搜索。当找到初至P震相走时残差最小的位置后(北纬41.465°、东经123.193°),固定该位置,以0.1 km为步长不断改变震源深度进行再次搜索,得到灯塔5.1级地震初至P震相走时残差随深度的变化曲线(见图3)和震中附近走时残差三维图像及其在深度和经度、纬度方向上的切片(见图4)。图3中,震源深度在10.8 km处对应的走时残差最小,为0.31 s。图4中,走时残差相对较小的区域基本呈椭球状,其水平切片上的椭圆长短轴相差不大;在经度和纬度方向上的椭圆长轴明显沿垂向伸展,最小走时残差位置处于椭球中心附近,说明以上计算结果的绝对误差并不大,较可信。

4 灯塔地震在周围产生的位移场和应变场

地震矩张量与其在空间产生的位移场可表示为^[18]:

$$U_i(x_1, x_2, x_3) = \frac{\partial G_{ij}(x_1, x_2, x_3; \xi_1, \xi_2, \xi_3)}{\xi_k} \times M_{jk}(\xi_1, \xi_2, \xi_3), \quad (4)$$

式中: $M_{jk}(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 为地震产生的力矩; $G_{ij}(x_1, x_2, x_3; \xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 是点 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 处在*j*方向力 (x_1, x_2, x_3) 作用下产生的*i*方向位移,可表示为:

$$G_{ij}(x_1, x_2, x_3; \xi_1, \xi_2, \xi_3) = u_{iA}^{(j)}(x_1, x_2, -x_3) - u_{iA}^{(j)}(x_1, x_2, x_3) + u_{iB}^{(j)}(x_1, x_2, x_3) + x_3 u_{iC}^{(j)}(x_1, x_2, x_3). \quad (5)$$

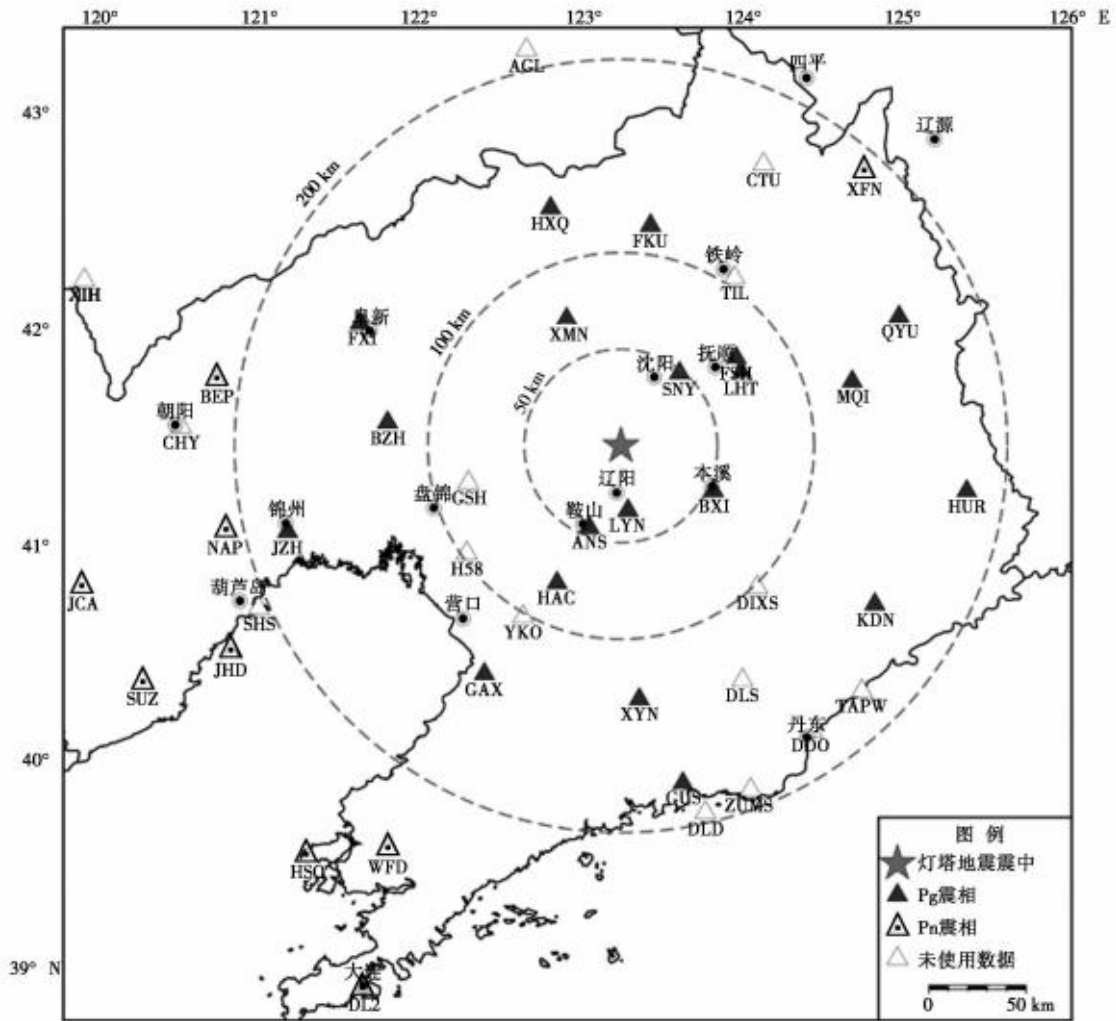


图 1 灯塔 $M_s5.1$ 地震震中与观测台站分布图

Fig. 1 Distribution map of the epicenter of the Denta $M_s5.1$ earthquake and observation stations

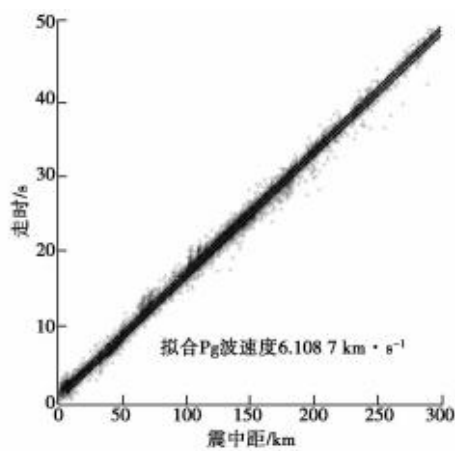


图 2 辽宁地区小震 P_g 震相走时曲线

Fig. 2 Travel time curve for P_g seismic phase of minor earthquakes in Liaoning area

表 1 辽宁地区双层 P 波速度模型参数

Table 1 Parameters of the dual-layer P-wave velocity model for the Liaoning area

层厚/km	P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
0~20	6.11
21~32	6.35
≥ 33	7.83

式(5)表明点源模型在无限弹性半空间介质中的位移场包含 2 个无限介质项(式中的第 1、2 项)与表面形变有关的项(式中的第 3 项)及与深度相乘的项(式中的第 4 项)。将介质视为泊松体,计算以上各项的拉梅常数和剪切模量均取值为 3.0×10^{10} Pa。因此,若标量地震矩已知,便可按上式计算弹性半空间中任意一点的位移 $U_i(x_1, x_2, x_3)$,并求解出应变张量 e 。

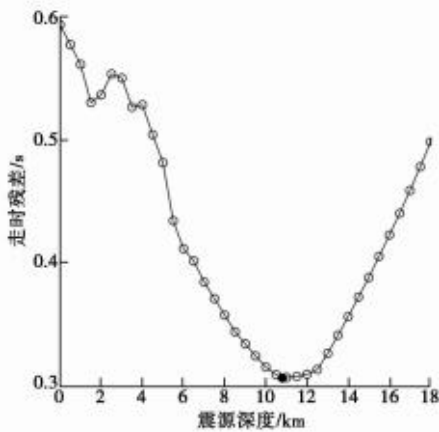


图3 灯塔 $M_s 5.1$ 地震初至 P 震相走时残差随震源深度变化曲线

Fig. 3 Residual travel time curve of the first-arrival P phase with focal depth for the Dengta $M_s 5.1$ earthquake

为进一步了解灯塔地震对周围的影响,根据 Okada^[19] 的弹性半空间模型, Wells 和 Coppersmith^[20] 提

出的经验公式,苏培臻等^[6] 反演的灯塔地震矩震级 $M_w 4.94$,估计该地震的断层面长度为 2.41 km、宽度 2.66 km,滑动量 13 cm,以及本文求解的该地震深度 10.8 km,选择戴盈磊等^[21] 给出的灯塔地震震源机制中心解节面 I (走向 13.16° ,倾伏角 88.64° ,滑动角 171.01°) 为发震断层面,使用万永革等^[22] 的程序,计算得到灯塔地震在周围地区产生的地表同震位移场和应变场(见图 5)。

图 5a 中箭头表示灯塔地震产生的水平位移,底图颜色代表垂直位移,向上为正。从中可知,震中东北方向和西南方向有物质汇入,垂直位移表现为沉降;西北和东南有物质涌出,垂直位移表现为隆升,且震中距越大位移量越小。图 5b 中深色和浅色箭头分别对应水平主压应变和水平主张应变,单位为 $1e-9$,背景颜色代表面应变,拉伸为正。在震中附近面应变为正的区城主张应变占主导,在面应变为负的区域主压应变大于主张应变。位移场和应变场四象限分区明显,与震源机制解的走滑特征一致。

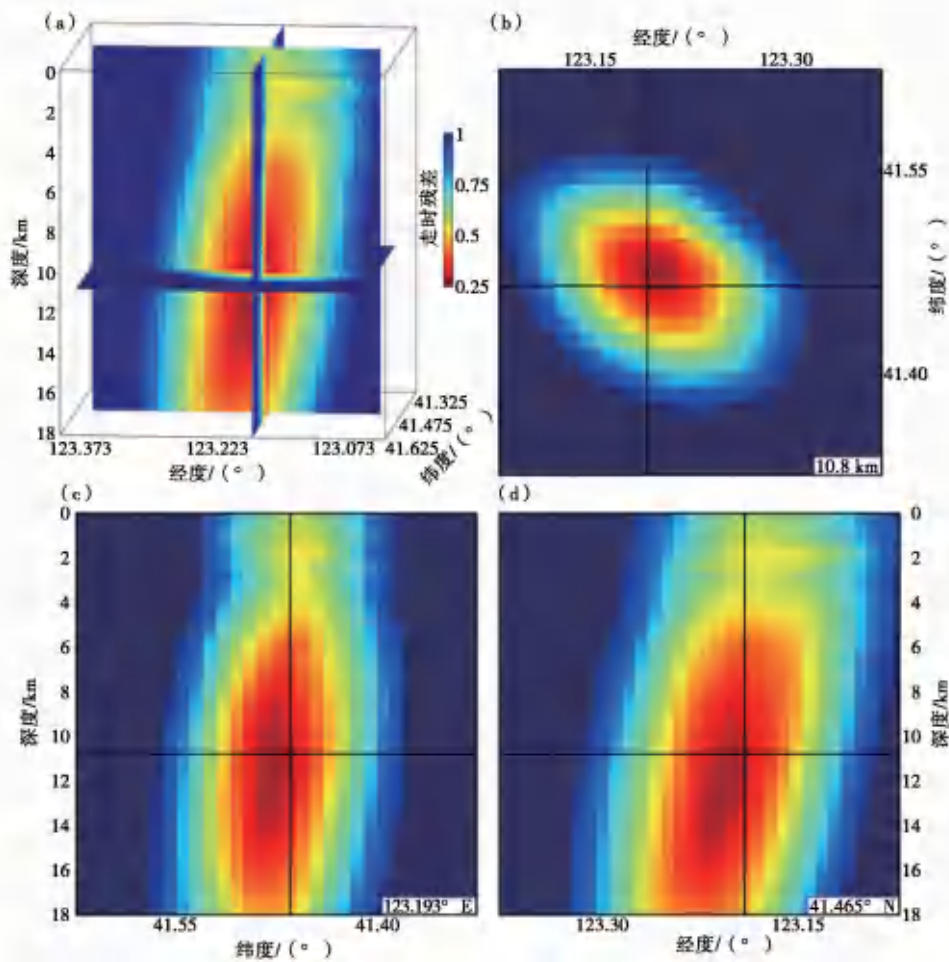


图4 灯塔 $M_s 5.1$ 地震震中附近走时残差三维切片

Fig. 4 Three-dimensional slice of travel time residuals near the epicenter of the Dengta $M_s 5.1$ earthquake

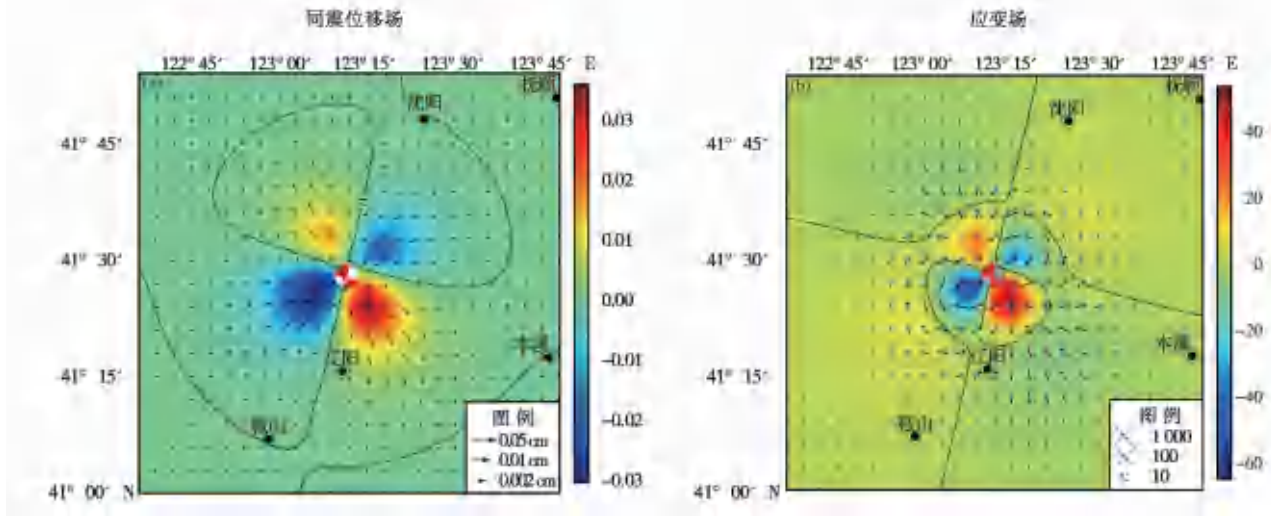


图 5 灯塔 $M_s5.1$ 地震产生的同震位移场和 10.8 km 深度处的应变场水平投影

Fig. 5 Coseismic displacement field and strain field horizontal projection at a depth of 10.8 km for the Dengta $M_s5.1$ earthquake

5 结论和讨论

本文测定灯塔地震震源深度为 10.8 km。为进一步探讨本文构建的速度模型和由此计算灯塔地震震源深度结果的合理性,分别使用 AK135^[23]、CRUST 1.0^[24]、JB^[25]、辽宁 2015^[26] 模型,同样根据上述方法和数据对该地震震源深度进行多次求解,结果如图 6、表 2 所示。经对比发现,本文给出的灯塔地震震源深度与利用主要全球一维速度模型计算的结果相差不到 1 km,且初至震相走时残差是最小的。这说明本文构建的模型更符合辽宁地区的地壳特征,所得震源深度较可信。

表 2 基于不同速度模型的计算结果

Table 2 Calculation results based on different velocity models

速度模型	震源深度/km	最小走时残差/s
AK135	11.3	0.65
CRUST1.0	10.6	1.27
JB	11.1	0.50
辽宁 2015	2.7	0.40
本研究	10.8	0.31

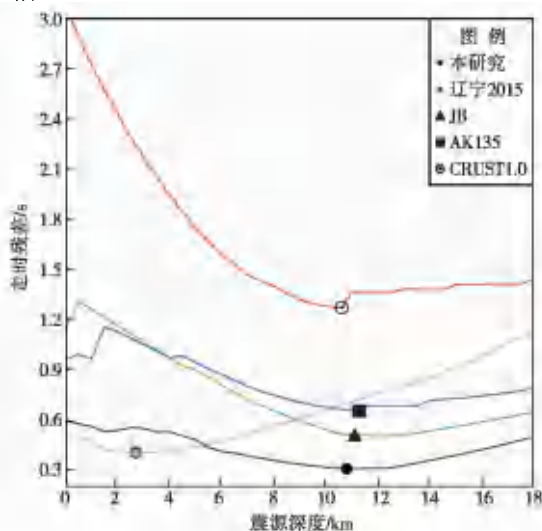


图 6 不同速度模型走时残差随震源深度变化曲线
Fig. 6 Travel time residual curves with focal depth for different velocity models

万永革等^[27]在牟磊育等^[28]的工作基础上提出考虑到时误差的地震定位算法,并应用于四川地区 2001—2008 年的地震定位。本文利用该方法程序^[29]对灯塔地震进行重定位。计算过程中以孙素梅等^[4]的双差定位结果作为初始震源位置,速度模型采用戴盈磊等^[30]反演的辽宁地区最小一维速度模型(见表 3),深度迭代步长 0.01 km,水平距离迭代步长 0.001°,当迭代误差小于 0.000 1 s 时停止迭代。最终得到重定位结果为东经 123.22°、北纬 41.57°,震源深度 10.27 km,定位残差 0.35 s。与上述采用初至 P 震相定位法测定的震源深度较接近。综合孙素梅等^[4]的双差重定位结果、谢弘臻和王九洋^[5]利用远震数据的测定结果、中国地震台网中心正式目录中的深度,笔者认为,灯塔地震最有可能的震源深度在 11 km 左右。

使用不同的观测数据、速度模型和计算方法都会使震源深度的计算结果出现一定差异。图 6 中,辽宁 2015 模型的最小走时残差与本文构建模型的接近,但测定结果迥异;本文构建模型和 AK135 模型在 1~3 km 处出现走时残差局部极小值,恰好与灯塔地震的矩心深度较浅对应,这可能与下辽河平原的沉积层有关。在使用 CAP 方法反演矩心深度的过程中,同时用

到 Pnl 波和面波信息,沉积层会使面波变得更慢一些^[31],导致矩心深度不确定范围变大。但具体情况还有待采用其他手段做进一步研究。此外,需要说明的是,本文测定的是灯塔地震初始破裂深度,矩心深度是一次地震能量释放的最佳深度位置。已有研究表明,矩心深度与定位深度存在明显差异的主要原因可能和缺少近台约束有关^[32]。本文使用的最近台站是距震中 31 km 的辽阳台,虽略大于 1.4 倍震源深度,但整体使用的震相到时数量充足、台站方位覆盖良好(见图 1),亦可对震源深度计算形成稳定约束,与已有的研究成果和其他利用区域台网走时数据定位方法的结果对比较一致。

表 3 辽宁地区最小一维速度模型
Table 3 Minimum one-dimensional velocity model for the Liaoning area

层号	层顶深度/km	P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	S 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	-1.0	5.74	3.10
2	0.0	5.92	3.36
3	5.0	5.93	3.36
4	10.0	6.04	3.56
5	15.0	6.17	3.58
6	20.0	6.25	3.64
7	25.0	6.28	3.67
8	30.0	6.38	3.71
9	35.0	6.42	3.89

综上所述,本文根据辽宁测震台网的观测资料拟合得到辽宁地区上地壳 Pg 波速度参数,并构建适用于该地区的双层 P 波速度模型。在此基础上,使用初至震相定位法测定灯塔 $M_s5.1$ 典型震例的震源深度为 10.8 km,初至 P 震相最小走时残差为 0.31 s。与之前学者和机构给出的采用其他速度模型和方法计算的结果比较接近,具备较高的可信度。将该震源深度结果作为主要输入参数之一,计算灯塔地震产生的位移场和应变场,体现出明显的浅源走滑型地震对周围地区的影响特征。本文验证了初至 P 震相定位法应用于辽宁地区的可行性,为今后这一地区的孕震环境、地震成因、地震烈度,油气开采与地震之间关系^[33]等研究工作提供科学参考。

辽宁省地震台提供观测资料,文中图件采用 GMT 和 MATLAB 软件绘制,在此对相关工作人员表示感谢!

参考文献:

[1] 张博,杨士超,邵媛媛,等.利用匹配滤波技术研究 2013 年灯塔 $M_s5.1$ 地震序列迁移[J].地震地磁观测与研究,2021,42(S1):67-69.
[2] 王瑶,万永革.多层介质中利用 sP 与 Pn 到时差确定震源深度的研究[J].地震工程学报,2021,43(06):1294-1302.

[3] 王登伟.利用直达 P 波测定地方震震源深度的探讨[J].地震地磁观测与研究,2010,31(05):45-48.
[4] 孙素梅,马莉,许振峰,等.辽宁灯塔 $M_s5.1$ 地震序列重新定位研究[J].防灾减灾学报,2018,34(03):42-48.
[5] 谢弘臻,王九洋.辽阳灯塔 $M_s5.1$ 地震震源深度分析[J].中国地震,2018,34(04):704-712.
[6] 苏培臻,安祥宇,李恩来,等.辽宁地区近期中小地震震源机制研究[J].地球物理学报,2020,63(11):4023-4036.
[7] 卢造勋,孟朴在,赵俊猛.辽阳—海城—东沟剖面地壳与上地幔速度结构特征与地震[J].东北地震研究,1989(04):1-11.
[8] 卢造勋,夏怀宽,赵国敏,等.内蒙古东乌珠穆沁旗至辽宁东沟地质断面综合地球物理特征[J].东北地震研究,1993(02):1-12.
[9] 王承伟,王晓睿,李恩来,等.基于 Hyposat 方法的辽宁地区地壳一维速度模型研究[J].地震工程学报,2017,39(S1):1-6.
[10] 曾宪伟,莘海亮,马翀之,等.利用初至 P 震相测定石嘴山 $M_L4.4$ 地震序列的震源深度[J].地震学报,2017,39(01):13-22.
[11] 曾宪伟,闻学泽,龙锋.由初至 P 震相重新定位 2017 年九寨沟地震序列的主震与 $M_L \geq 3.0$ 余震并分析震源构造[J].地球物理学报,2019,62(12):4604-4619.
[12] 许英才,曾宪伟.2021-09-29 宁夏中宁 $M_L3.6$ 地震震源参数测定[J].大地测量与地球动力学,2023,43(02):215-220.
[13] 许英才,曾宪伟.2021 年 11 月 18 日宁夏灵武 $M_s4.0$ 地震震源参数研究[J].地球与行星物理论评,2022,53(02):214-227.
[14] 邵世勤,张诚,邓齐赞.多层地壳模型近地震波走时表计算方法及程序设计[J].西北地震学报,1987(01):18-25.
[15] 王亮,焦明若,钱蕊,等.利用双差地震成像方法反演辽南地区地壳速度结构[J].地震地质,2022,44(02):378-394.
[16] 万永革.数字信号处理的 MATLAB 实现[M].北京:科学出版社,2012:10-11.
[17] 卢造勋,蒋秀琴,潘科,等.中朝地台东北缘地区的地震层析成像[J].地球物理学报,2002,45(3):338-351+446-448.
[18] Press F. Displacements, strains, and tilts at teleseismic distances[J]. Journal of Geophysical Research,1965,70(10):2395-2412.
[19] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. GeoScienceWorld, 1992,82(2):1018-1040.
[20] Wells L D, Coppersmith J K. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Geo Science World,1994,84(4):974-1002.
[21] 戴盈磊,万永革,孔祥雪,等.2013 年辽宁灯塔 $M_s5.1$ 地震震源机制中心解及震源区构造应力场特征分析[J].地震研究,2022,45(04):570-580.

- [22] 万永革,靳志同,崔华伟,等. 2015年12月25日山东平邑塌陷事件产生的位移场与应力场[J]. 地震地质, 2017,39(01):81-91.
- [23] Kennett B, Engdahl E R, Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from traveltimes[J]. *Geophysical Journal International*, 1995, 122(1):108-124.
- [24] Laske G, Masters G Ma Z, Pasyanos M. Update on CRUST1.0 — A 1-degree global model of Earth's crust [C]. EGU General Assembly Conference Abstracts, EGUGA, 2013.
- [25] Jeffreys H, Bullen K E. *Seismological tables*[R]. London: British Association for the Advancement of Science, 1940.
- [26] 朱元清,宋秀吉,刘双庆,等. 中国地震测定参考速度结构研究[M]. 北京:地震出版社, 2017:1-2.
- [27] 万永革,盛书中,程万正,等. 考虑到时误差的地震定位算法及其在四川地区 2001—2008 年地震定位的应用[J]. 地震地质, 2012, 34(1):1-10.
- [28] 牟磊育,赵仲和,张伟,等. 用 INGLADA 与 GEIGER 方法实现近震精定位[J]. 中国地震, 2006, 22(3):294-302.
- [29] 万永革. 地震学导论[M]. 北京:科学出版社, 2016:333-342.
- [30] 戴盈磊,刘晓丹,张文静,等. 辽宁地区最小一维速度模型研究[J]. 华南地震, 2023, 43(2):35-45.
- [31] 韦生吉,倪四道,崇加军,等. 2003年8月16日赤峰地震:一个可能发生在下地壳的地震? [J]. 地球物理学报, 2009, 52(01):111-119.
- [32] 房立华,吴建平,苏金蓉,等. 四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震主震及其余震序列精定位[J]. 科学通报, 2018, 63(07):649-662.
- [33] 赵韬,储日升,倪四道,等. 广西苍梧 $M_s 5.4$ 地震震源深度[J]. 地震地质, 2019, 41(03):619-632.

Determination of the Focal Depth of the 2013 Liaoning Dengta $M_s 5.1$ Earthquake Using the First-Arrival Seismophase Location Method

DAI Yinglei, ZHANG Xinran, KONG Xiangxue, TIAN Yujia, WANG Shuting

(Liaoning Earthquake Agency, Shenyang, Liaoning 110034, China)

Abstract: Based on the observational data from the Liaoning seismic network from 2009 to 2022, the travel time curve for Pg waves of minor earthquakes in the Liaoning area was fitted, resulting in an upper crustal P-wave velocity of 6.11 km/s, and a dual-layer crustal P-wave velocity model for the region was constructed. Twenty clear Pg and nine Pn phase arrivals from official observation reports were extracted. Using the first arrival seismophase location method, the focal depth of the 2013 Liaoning Dengta $M_s 5.1$ earthquake was determined to be 10.8 km, with a minimum travel time residual for the initial P phase of 0.31 s. Using a location algorithm that considers errors, the focal depth was determined to be 10.27 km, with a location residual of 0.35 s, which is essentially consistent with the focal depth calculated using other velocity models, indicating high reliability. The analysis suggests that the focal depth of the Dengta $M_s 5.1$ earthquake is around 11 km. Using this depth as the main input parameter, the displacement and strain fields produced in the surroundings were calculated, showing typical characteristics of a strike-slip earthquake.

Key words: focal depth; first-arrival P phase; velocity model

(上接第4页)

Research on Disaster Information Extraction Based on Post-Earthquake Public Sentiment

YAN Xiaomei^{1,2}, NIU Yanjie^{1,2}, WANG Ning^{1,2}, XU Zhenpeng^{1,2}

(1. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 030021, China;

2. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan, Shanxi 030025, China)

Abstract: After a major earthquake, a large amount of information regarding earthquake disasters usually emerges and spreads rapidly on the internet. To obtain earthquake disaster information quickly and accurately, this study carries out research on extracting disaster information based on post-earthquake public sentiment. First, a disaster information mining model is constructed, and a disaster keyword list is established. By calculating word vector similarity, earthquake disaster information and related information are quickly extracted. At the same time, the "5.5 magnitude earthquake in Yuanping, Dezhou, Shandong" case is used to verify the effectiveness, feasibility, and practicality of the constructed model in extracting earthquake disaster information. The results show that this research can provide certain reference data and a decision-making basis for rapid response and disposal of disaster situations after an earthquake.

Key words: earthquake disaster information; post-earthquake public sentiment; Web crawler; text mining; information extraction

新疆中强地震前震频谱偏移特征分析

李奎¹,张青远¹,刘立霞¹,毛玉剑¹,张峰¹,周静²

(1.新疆维吾尔自治区地震局,新疆 乌鲁木齐 830011;2.新疆维吾尔自治区矿山安全服务保障中心,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:运用前震或广义前震识别的频谱偏移法,以2013年1月至2022年11月新疆维吾尔自治区发生的 $M_s \geq 5.0$ 中强地震的前震为研究对象,通过研究其频率谱,分析新疆地区地震前震的频谱特征。结果表明,中强地震的前震中存在频谱偏移现象高达70%,说明频谱偏移法对该区域的地震研究具有一定的短临预测意义;地震频谱向低端偏移的临界值为1.5 Hz;直接前震中, $M_s \geq 3.5$ 地震出现频谱偏移的概率达85%, $M_s < 3.5$ 地震的频谱偏移现象较低;具有前震意义的地震,前震偏移率高低与后续中强地震的强度在 $M_s \geq 5.2$ 时呈现出明显的正相关趋势,由于数据量较少,认为这种正相关趋势可靠性不高,需进行深入研究。

关键词:中强地震;前震;频谱偏移法

中图分类号:P315.01

文献标志码:A

0 引言

新疆维吾尔自治区(以下简称新疆)地处欧亚大陆腹地,地质构造复杂,整体呈现“三山夹两盆”的地貌特征。在印度板块和亚欧板块碰撞的远程效应影响下,地壳形变强烈,导致新疆地震活动较频繁。新疆地区地震活动具有强度大、频度高、分布广的特点,平均每年记录到的地震约2万多条,震中主要分布在阿尔泰、北天山、南天山、阿尔金、西昆仑5条地震带上^[1]。通过学者的研究,地壳应力变化是导致地壳形变、褶皱、断裂乃至地震发生的直接原因^[2],强震发生前,应力在震源区大量的积累,如果能够准确地判断和识别强震前中等地震是否具有前震属性,或异常是否为地震前兆异常,在短临预报中具有重要意义。频谱偏移为地震活动前兆的一种新型识别指标,在中强地震预测方面有着广泛的应用。新疆地区是我国地震活动较频繁的地区之一,其中强地震前震频谱偏移特征研究具有重要的理论和现实意义。

前震和广义前震的定义和属性,不同学者对前震的空间范围、震级大小、构造关联性、孕震过程等条件的限定范围有所不同。梅世蓉等认为前震是指主震前发生在震源区内与主震有关的一些地震,震前40 d内发生距离主震100 km范围内的地震被认为是有意义的前震,或称为直接前震^[3]。广义前震是在直接前震基础上衍生的,陆远忠等^[4]将广义前震定义为发生在一个地震序列之前较长时间、较远距离,与该序列孕育

有关的单个地震或震群以及它们的组合。广义前震与主震发生的时空尺度存在着不确定性,有的距离主震较近,有的距离主震较远,优势间距为300~400 km,这种空间分布与孕震结构及孕震应力场有关。广义前震距离主震的发生时间一般为1~3个月,相当于地震预测的短临阶段^[5-6]。地震预测研究中,地震波形蕴含大量的信息,频率谱是地震波信息中重要的动力学特征,该方法是在地震统计研究的基础上,结合地震波形从频率域中挖掘更多的地震信息,通过频率谱特征进行前震研究。杨立明等人在此基础上发展和提出前震、广义前震识别的频谱偏移法。杨立明、马亮等人对南北地震带及祁连山地震带发生的3.0~4.9级地震的频谱进行系统的连续跟踪分析,在2019年5月16日云南永善4.7级地震后,发现存在明显的频谱偏移现象,间隔32 d后,距离云南永善4.7级地震137 km的四川长宁县发生6.0级地震,验证前震或广义前震识别频谱偏移的有效性^[5,7]。孙玺皓等人利用甘、青、川、藏台网41个数字地震台站的资料计算2020年1月23日四川石渠4.3级地震的频率谱,发现其频带宽度变窄且向低端偏移的现象,随后69 d在原震区发生5.6级地震,进一步验证前震或广义前震识别频谱偏移的有效性^[8]。

本文基于新疆数字化测震台网的波形数据,对2013年1月至2022年6月新疆发生的 $M_s \geq 5.0$ 中强地震(见图1)的广义前震进行频谱分析,总结梳理新疆中强地震前震频谱偏移特征,加强对观测资料的认

收稿日期:2023-06-02

基金项目:新疆地震青年科学基金(202315)。

第一作者简介:李奎(1991—),男,四川泸州人。工程师,主要从事数字地震资料处理及系统运维等工作,E-mail:877267356@qq.com。

识与理解,进一步验证和完善该判别方法。

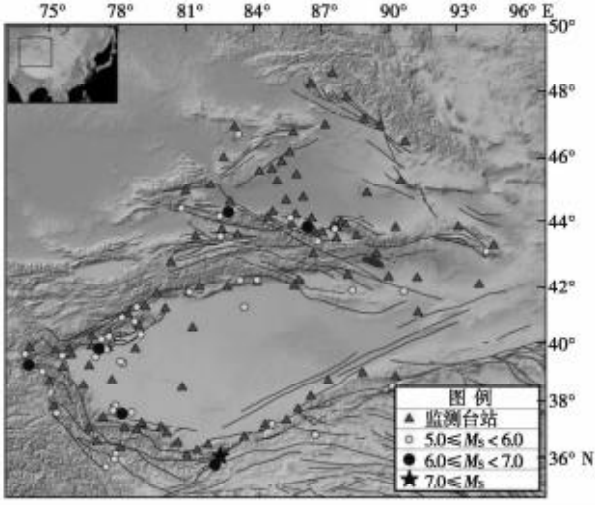


图1 新疆 $M_s \geq 5.0$ 地震及台站分布
Fig. 1 Distribution of $M_s \geq 5.0$ earthquakes and stations in Xinjiang

1 方法原理

前震或广义前震识别的频谱偏移法是在地震波形数据频谱分析的基础上发展而来的,是利用中等地震测震数据的频率谱,预测破坏性地震的实验性方法,其目的是判断目标地震是否具有前震属性^[9]。本次研究利用王永革^[10]在《数字信号处理的 MATLAB 实现》中的快速傅里叶变换脚本程序求取观测波形的频谱特征。

我国数字地震台网波形数据采样间隔为 0.02 s,最大频率(Nyquist 频率)为 25 Hz。利用离散傅里叶变换进行计算,具体理论计算公式如下:

$$x_i = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m \left(a_k \cos \frac{2\pi ki}{N} + b_k \sin \frac{2\pi ki}{N} \right),$$

$$a_0 = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \Delta t = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i,$$

$$a_k = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cos \frac{2\pi ki}{N} \Delta t = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cos \frac{2\pi ki}{N},$$

$$k = 1, 2, \dots, m,$$

$$b_k = \frac{1}{N\Delta t} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \sin \frac{2\pi ki}{N} \Delta t = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \sin \frac{2\pi ki}{N},$$

$$k = 1, 2, \dots, m,$$

式中: a_k 为余弦函数的振幅; b_k 为正弦函数的振幅。将 a_k, b_k 分别表示为一个复数的实部和虚部的函数组合,运用欧拉公式

$$e^{-j\frac{2\pi ki}{N}} = \cos\left(\frac{2\pi ki}{N}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi ki}{N}\right).$$

进行转换后通过

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j\frac{2\pi ki}{N}}, k = 1, 2, \dots, N-1,$$

计算,求得频率域内振幅的相对值(复数的形式),再通过

$$2|c_k| = 2\sqrt{(\text{Re}c_k)^2 + (\text{Im}c_k)^2} = \sqrt{(2\text{Re}c_k)^2 + (2\text{Im}c_k)^2} = N * \sqrt{a_k^2 + b_k^2}.$$

即可算得频率域内振幅的真实值。

2 数据选取及评判指标

杨立明等^[9]通过对祁连山地震带地震活动的跟踪分析,发现进入短期阶段的显著地震事件存在频谱范围变窄且向低频端偏移等现象,该特征在 2010 年青海玉树 7.1 级、2014 年新疆于田 7.3 级、2019 年长宁 6.0 级地震中得到验证;在孕震早期或其后无中强地震发生时,中等地震的频谱范围较宽,没有向低频偏移的特性。针对该特性,杨立明提出一种识别地震事件是否具有前震意义的频谱偏移法。通过对地震事件波形大量的跟踪分析,进一步明确频谱偏移法判定指标:正常背景的中等震级地震事件频谱较宽,优势频段为 0~5 Hz;具有前震或广义前震性质的中等震级地震具有频带变窄且向低频端偏移集中的特征,其优势频段为 0~1.5 Hz。

以 2013 年 1 月至 2022 年 6 月新疆发生的 $M_s \geq 5.0$ 中强地震为研究对象,按照学者梅世蓉等对前震的定义,分别选取中强震发生前 40 d 内、距离主震 100 km 范围内的 $M_s \geq 2.0$ 地震,作为中强地震的前震。利用 Matlab 程序对筛选截取的波形数据进行快速傅里叶变换得出频谱曲线,将频率按照 0~0.5 Hz、0.5~1.0 Hz、1.0~1.5 Hz、1.5~5.0 Hz、5.0~25.0 Hz 划分为五个区间,计算各区间内的百分占比,定量分析直接前震的频谱特征。研究中,判断台站记录到的地震波形数据是否发生频谱偏移的主要根据是频率的分布和频率在 0~1.5 Hz 的占比是否大于 50%。如果 0~1.5 Hz 的占比大于 50%,认为该台站记录到的地震波形数据在该台站发生频谱偏移;反之,未发生频谱偏移。存在偏移现象的台站被称为偏移台站,对应的偏移率为台站偏移率。统计分析偏移台站数量与记录清晰的台站数之比,如果大于 50%,认为该事件具有前震意义。偏移台站数量与记录清晰台站数量之比,称为地震偏移率或前震偏移率。需要说明的是本文中对于台站的选取是根据地震事件在台站是否被清晰记录到为选取条件,并未根据实际震中距离的远近和中强地震的大小来进行选取。

为避免台站背景噪声对频谱分析的影响,对同一台站(SCH 台)记录的普通地震事件(2021 年 7 月 28 日 $M_s 3.0$)波形数据和具有前震意义的地震事件

(2018年9月4日 M_s 4.7)波形数据进行频谱分析(见表1)。

表1 同一台站记录的普通地震与具有前震意义的地震频谱偏移对比表

Table 1 Statistics of spectral shifts in ordinary earthquakes and those with foreshocks recorded at the same station

地震事件		不同频率范围比例				
发震时间	震级/ M_s	0~0.5 Hz	0.5~1.0 Hz	1.0~1.5 Hz	1.5~5.0 Hz	5.0~25.0 Hz
2021-07-28	3.0	18.62%	17.06%	13.02%	36.25%	15.05%
2018-09-04	4.7	66.05%	13.82%	5.80%	7.22%	7.11%

通过对比分析,普通地震事件频率分布较宽,基本集中在0~5 Hz,未向低频区域偏移(见图2);具有前震意义的地震频率分布较窄,为0~1.5 Hz,占比达85.669%,向低频区域偏移(见图3)。

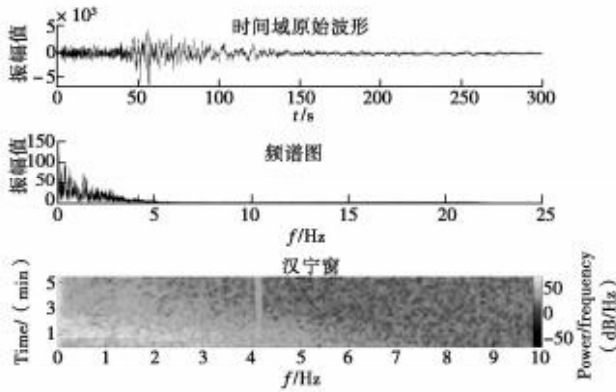


图2 正常背景下的波形频谱特征

Fig. 2 Waveform spectral characteristics under normal background

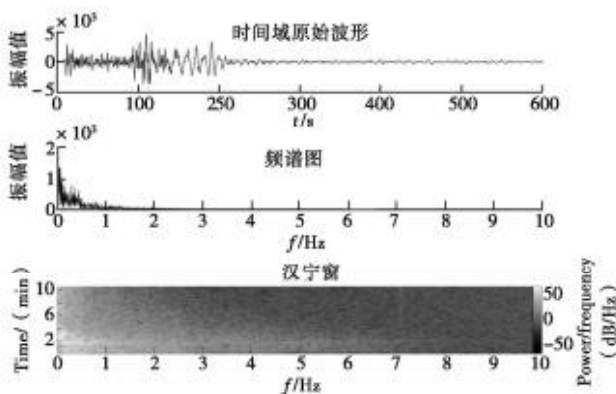


图3 具有前震意义的波形频谱特征

Fig. 3 Waveform spectral characteristics with precursor significance

3 新疆地区直接前震频谱特征分析

2013年1月至2022年11月,新疆共发生 $M_s \geq 5.0$ 中强地震50次,其中 $M_s \geq 7.0$ 地震1次, $6.0 \leq M_s < 7.0$ 地震3次, $5.0 \leq M_s < 6.0$ 地震46次。存在前震的中强地震有30次,比率达60%。按照震中距100 km内、40 d内发震的条件筛选出具有前震意义的地震事件147个,其中频谱偏移地震事件40个(见表2);有21次中强地震的前震存在频谱偏移现象,9个中强地震的前震未发生频谱偏移。共计完成4100次地震波形的频率谱,其中 $2.0 \leq M_s < 3.0$ 有2123条, $3.0 \leq M_s < 4.0$ 有1256条, $4.0 \leq M_s < 5.0$ 有721条。

分析中发现新疆 $M_s \geq 5.0$ 地震的前震中 $M_s \geq 3.5$ 地震出现频谱偏移的概率为85%, $M_s < 3.5$ 地震的频谱偏移现象较低。

对21次存在频谱偏移的地震进行分析统计,探究前震频谱偏移率与后续中强地震强度的关系。由图4看出,中强地震发生前频谱偏移现象普遍存在,偏移率各有不同。在相同震级间,频谱偏移率略有差异。7级、6级、5级地震的前震偏移率较分散,未呈现良好的相关性; $M_s \geq 5.2$ 地震的前震偏移率出现明显的正相关趋势,即前震偏移率越高,后续发生地震的强度越大。由于数据量较少,认为这种正相关趋势可靠性不高,需进一步验证。

下面以2022年7月3日新疆阿合奇县 M_s 5.2地震直接前震(4.2级)的频谱偏移为例,说明频谱偏移现象在新疆地区的特征。

(1) 阿合奇 M_s 4.2地震频谱特征。

2022年7月3日的新疆阿合奇县 M_s 5.2地震发生前40 d,震中距100 km范围内共发生4次地震。其中,7月2日发生的 M_s 2.5、7月3日发生的 M_s 4.2和 M_s 3.2地震均出现频谱偏移,偏移率分别为50%、89.47%、57.90%。还有1次 M_s 2.8地震未出现频谱偏移现象。

以7月3日发生的 M_s 4.2地震为研究对象,分析频谱偏移特征。结果显示有38个台站记录到清晰的波形数据,其中4个台站无波形频谱偏移特征,34个台站出现明显的频谱偏移特征,偏移率达89.47%(见图5)。

表 2 新疆 2013 年 1 月至 2022 年 11 月 5.0 级及以上地震前震频谱偏移统计表

Table 2 Statistics of foreshock spectral shifts for earthquakes of magnitude 5.0 and above in Xinjiang from 2013 to November 2022

发震时间	震级 M_s	震中位置		震源深度	震中地名	前震个数	频谱偏移数	是否存在频谱偏移	记录台站数	偏移台站数	平均偏移率/%
		纬度(°)	经度(°)								
2013-03-11	5.2	40.2	77.5	8	阿图什市	4	1	是	34	21	75
2013-03-29	5.6	43.4	86.8	13	昌吉市	2	1	是	36	26	72.222
2013-08-30	5.1	43.76	87.64	12	乌鲁木齐市	3	0	否	—	—	—
2013-12-01	5.3	40.26	78.98	9	柯坪县	1	0	否	—	—	—
2014-02-12	7.3	36.1	82.5	12	于田县	1	1	是	73	73	100
2014-04-30	5.1	43.06	94.29	9.1	哈密市	1	0	否	—	—	—
2014-07-09	5.1	39.31	78.27	8	麦盖提县	1	0	否	—	—	—
2015-01-10	5.0	40.21	77.27	10	阿图什市	4	0	否	—	—	—
2015-06-25	5.4	41.67	88.36	9	托克逊县	1	0	否	—	—	—
2016-01-14	5.3	42.19	84.12	5	轮台县	2	1	是	27	19	70.3
2016-02-11	5.0	43.55	82.55	8	新源县	3	1	是	66	60	90.909 090 91
2016-12-08	6.2	43.83	86.35	6	呼图壁县	1	0	否	—	—	—
2016-12-20	5.8	37.25	84.81	9	且末县	1	1	是	30	28	93.333 333 33
2017-05-11	5.5	37.58	75.25	8	塔什库尔干县	1	0	否	—	—	—
2017-09-16	5.7	42.11	83.43	6	库车县	4	3	是	—	—	76.397 468
2018-09-04	5.5	39.51	76.98	8	伽师县	4	1	是	37	33	89.189 189 19
2018-10-16	5.4	44.19	82.53	10	精河县	2	0	否	—	—	—
2018-11-04	5.1	40.24	77.63	22	阿图什市	4	0	否	—	—	—
2018-12-20	5.2	39.08	74.75	10	阿克陶县	5	1	是	27	26	96.296 296 3
2019-01-12	5.1	39.57	75.59	10	疏附县	8	4	是	—	—	92.033 027 84
2020-01-16	5.6	41.21	83.6	16	库车县	7	2	是	—	—	59.883 720 93
2020-01-18	5.4	39.83	77.18	20	伽师县	6	1	是	27	18	66.666 666 67
2020-01-19	6.4	39.83	77.21	16	伽师县	11	5	是	—	—	74.481 074 48
2020-02-21	5.0	34.56	85.68	9	改则县	2	2	是	—	—	65.776 55
2020-03-23	5.0	41.75	81.11	10	拜城县	2	2	是	—	—	90.768 970 19
2020-05-06	5.0	39.71	74.1	10	乌恰县	1	0	否	—	—	—
2020-05-09	5.2	40.77	78.76	15	柯坪县	1	0	否	—	—	—
2020-06-26	6.4	35.73	82.33	10	于田县	1	1	是	39	39	100
2020-07-13	5.0	44.42	80.82	15	霍城县	2	0	否	—	—	—
2021-03-24	5.4	41.7	81.11	10	拜城县	3	1	是	62	39	62.903 225 8
2021-09-04	5.1	37.87	77.96	7	皮山县	25	1	是	57	35	63.454 554
2022-03-17	5.2	36.1	77.86	10	皮山县	10	6	是	—	—	54.545 454
2022-07-02	5.1	37.59	78.6	10	皮山县	1	0	否	—	—	—
2022-07-03	5.2	40.88	78.14	10	阿合奇县	4	3	是	—	—	65.789 473 68
2022-10-16	5.1	39.42	78.13	17	巴楚县	2	0	否	—	—	—
2022-10-23	5.1	37.71	77.85	17	皮山县	16	1	是	63	50	79.365 079 37

(2) 台站频谱特征分析。

按照将波形初动位置作为起始位置,尾波衰减结束后为波形结束位置,截出波形,利用 Matlab 程序计算频率谱。计算得到的三分量波形数据频率谱基本一致,因此,在计算各台站频率谱时,只选用垂直向的地震波形。有关研究表明,高频波携带的能量较大,会随着能量的衰减而减少,低频的成分会增加,因此随着震中距的增加,理论上低频的占比会随着地震波的衰减

而增加,但在震中距 500 km 范围内,偏移台站的低频成分权重没有明显的变化^[6]。通过分析阿合奇 $M_s 4.2$ 地震部分 500 km 范围内的偏移和未偏移台站的频谱曲线看出,偏移台站的频率谱优势频段集中在 0~1.5 Hz,并向低频段偏移,所占比重较大;未偏移台站频率谱优势频段集中在 0~5 Hz,分布较均匀,没有向某一频段集中的特性(见图 6、图 7)。

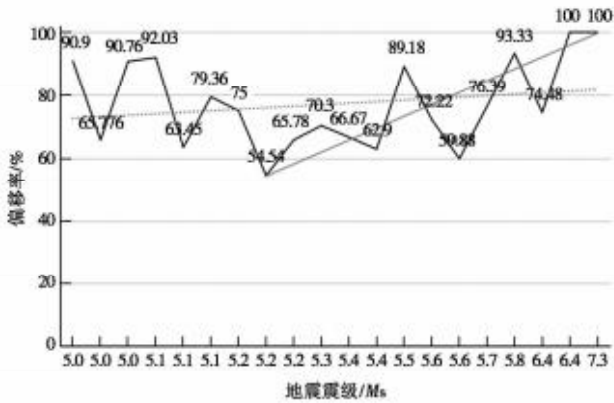


图4 前震偏移率与地震强度相关性
 Fig. 4 Correlation between foreshock shift rate and earthquake intensity

4 结论与讨论

对2013年1月至2022年6月新疆发生的 $M_s \geq 5.0$ 中强地震前广义前震进行频谱分析,梳理总结新

疆地震前震的量化频谱偏移特征。

(1) 按照梅世蓉等对前震的定义,对新疆2013年1月至2022年11月疆内发生的50次 $M_s \geq 5.0$ 中强地震的前震频谱特征定量分析结果显示,中强地震的前震中存在频谱偏移现象达70%,说明在新疆区域内频谱偏移法具有一定的短临预测意义。

(2) 通过将频率进行分组定量计算发现,杨立明等对于频谱偏移法中具有前震或广义前震性质的地震频谱向低端偏移临界值定为1.5 Hz是合理的,该临界值也适用于新疆地区。

(3) 具有前震意义的地震震级大小会影响前震偏移率的高低,可能与地震的能量衰减有关。新疆 $M_s \geq 5.0$ 地震的前震中 $M_s \geq 3.5$ 地震出现频谱偏移发生的概率达85%, $M_s < 3.5$ 地震的频谱偏移现象较低。因此,可将 $M_s \geq 3.5$ 地震的频谱是否偏移作为中强地震的异常指标。

(4) 具有前震意义的地震,前震偏移率高低与后续中强地震的强度在 $M_s \geq 5.2$ 地震呈现出明显正相关的趋势,即前震偏移率越高,后续发生地震的强度越大。由于数据量较少,认为这种正相关趋势可靠性不高,需进一步开展研究。

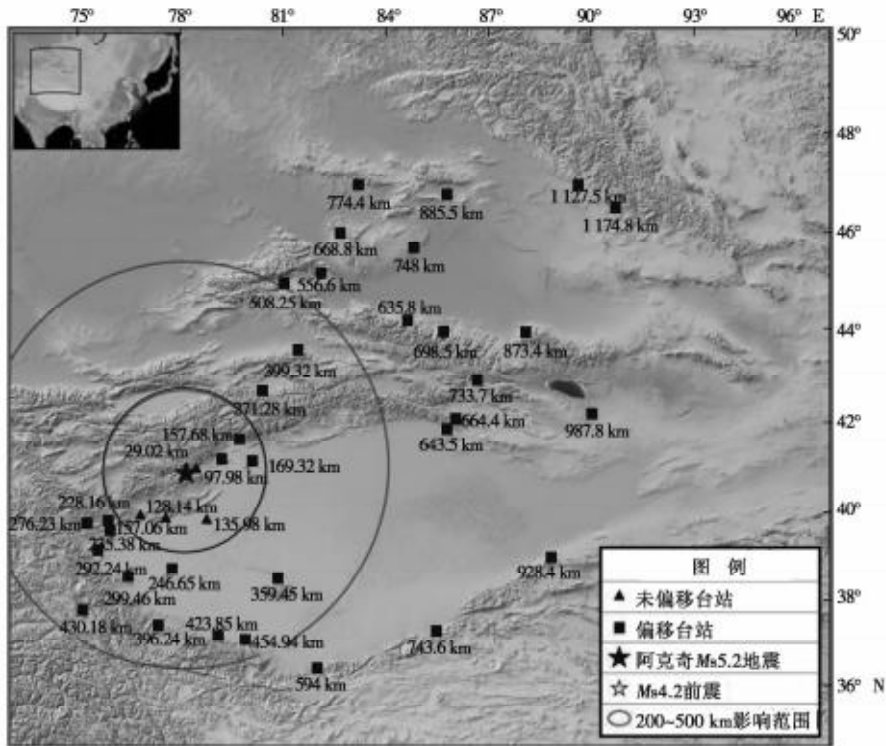


图5 频谱偏移和未偏移台站分布图
 Fig. 5 Distribution of stations with and without spectral shift

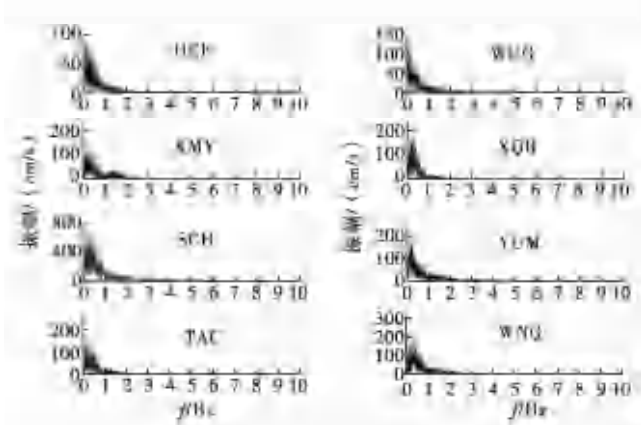


图6 偏移台站垂直向频谱曲线
Fig. 6 Spectral curve of shifted stations

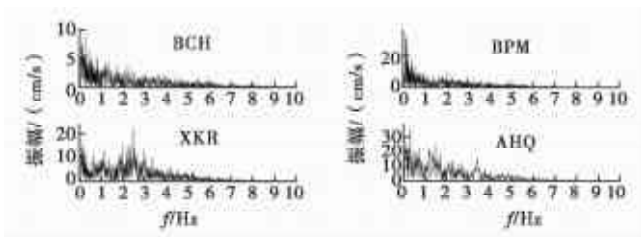


图7 未偏移台站垂直向频谱曲线
Fig. 7 Spectral curve of unshifted stations

本文采用回溯法定量探究频谱偏移法的有效性,目前未运用该方法进行R值评分检验,同时也未用于日常的地震震情跟踪,对于报准率、虚报率、漏报率无法进行准确统计。各台站波形数据易受当地气压、风

噪、降雨、地下水补给等环境因素影响,在本次研究中,未对这部分干扰进行处理。因此,后续研究中,仍需积累大量的震例数据以及完备的数据处理方法来完善和评估该判别方法。

参考文献:

[1] 赵石柱,张勇,闫新义. Sg、Sn震相对新疆及相邻地区速报地震定位的影响分析[J]. 内陆地震,2021,35(3):237-244.

[2] 郑红霞,张训华,赵铁虎,等. 渤海海峡地应力场研究及地质条件评价[J]. 中国海洋大学学报,2015,45(11):081-091.

[3] 王林瑛,陈佩燕,吴忠良,等. 前震特征及其识别研究[J]. 地震学报,2005,27(2):171-177.

[4] 陆远忠,陈章立,王碧泉,等. 地震预报的地震学方法[M]. 北京:地震出版社,1985.

[5] 杨立明,梅秀苹,姜佳佳,等. 前震或广义前震识别的频谱偏移法及其应用研究[J]. 中国地震,2015,31(2):188-197.

[6] 董治平,程建武,康庆强,等. 祁连山构造带中强地震前广义前震活动探讨[J]. 西北地震学报,2008,31(1):49-55.

[7] 马亮,杨立明,程建武,等. 前震与广义前震识别的频谱偏移法及其在长宁6.0级地震前的跟踪实践[J]. 高原地震,2019,31(1):17-25.

[8] 孙玺皓,赵玉红,苏维刚,等. 前震或广义前震识别的频谱偏移法在石渠5.6级地震预测中的应用[J]. 高原地震,2020,32(3):1-8.

[9] 杨立明,马亮. 前震或广义前震识别的频谱偏移法在长宁6.0级地震前的跟踪实践[J]. 国际地震动态,2019,488(8):172-173.

[10] 万永革. 数字信号处理的MATLAB实现[M]. 北京:科学出版社,2012:87-100.

Analysis of Spectral Shift Characteristics of Foreshocks before Strong Earthquakes in Xinjiang Region

LI Kui¹, ZHANG Qingyuan¹, LIU Lixia¹, MAO Yujian¹, ZHANG Feng¹, ZHOU Jing²

(1. Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang, 830011, China;
2. Xinjiang Mine Safety Service Guarantee Center, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: Using the method of spectral shift for foreshock or generalized foreshock identification, this study focuses on the foreshocks of moderate to strong earthquakes ($M_s \geq 5.0$) that occurred in the Xinjiang Uygur Autonomous Region from January 2013 to November 2022. By analyzing their frequency spectra, the spectral characteristics of foreshocks in the Xinjiang region are examined. The results show that spectral shifts occur in up to 70% of the foreshocks of moderate earthquakes, indicating that the spectral shift method has certain significance for short-term earthquake prediction in this region. The critical value for spectral shift towards the lower end is 1.5 Hz. In direct foreshocks, the probability of spectral shifts in earthquakes with $M_s \geq 3.5$ reaches 85%, while it is lower for earthquakes with $M_s < 3.5$. Earthquakes with meaningful foreshocks show a clear positive correlation between the rate of spectral shift and the intensity of subsequent moderate to strong earthquakes when $M_s \geq 5.2$. However, due to the small amount of data, this positive correlation is considered to have low reliability and requires further research.

Key words: moderate to strong earthquakes; foreshocks; spectral shift method

· 观测分析 ·

文章编号: 1000-6265(2024)01-0023-06

马鞍山皖 27 井数字化水位观测资料分析与效能评估

袁鸣望¹, 王 俊², 刘园园¹

(1. 安徽省马鞍山市地震局, 安徽 马鞍山 243000; 2. 安徽省地震局, 安徽 合肥 230000)

摘要: 马鞍山皖 27 井是安徽省 2008 年第一批数字化改造的观测井, 为加强对观测资料的应用及评估观测井的效能, 对该井的井水位动态特征、主要干扰因素、异常变化特征、井水样水化特征等进行分析。结果表明, 皖 27 井水位资料连续可靠, 年变规律明显, 地壳应力—应变响应灵敏度较高, 对周边 200 公里范围内的中强震有很好的对应关系, 能够在中短期前兆异常监测中发挥一定的作用。

关键词: 皖 27 井; 数字化水位; 资料分析; 效能评估

中图分类号: P315.72⁺³

文献标志码: A

0 引言

我国开展地震地下流体观测和科学研究始于 1966 年河北邢台地震后, 几十年来的观测结果表明, 地下流体观测具有较强的地震信息获取能力, 如 1976 年唐山 $M_s 7.8$ 地震、1998 年张北 $M_s 6.2$ 地震、2001 年四川雅江—康定 $M_s 6.0$ 地震和 2002 年甘肃玉门 $M_s 5.9$ 地震前, 在震源区附近都观测到大幅度的地下水异常^[1]。马鞍山皖 27 井自 2008 年 8 月地下水数

字化改造完成并运行至今已十五年, 其中在 2011 年安庆 $M_s 4.8$ 地震等出现异常。为进一步获取该井数字化水位观测资料与地震的有关信息, 并评估其监测效能, 笔者开展相关研究。

1 皖 27 井观测概况

皖 27 井位于安徽省马鞍山市慈湖高新技术开发区太来社区, 地处下扬子断块区、宁芜断陷盆地西侧、铜井—芜湖 NE 向断裂带上(见图 1)。

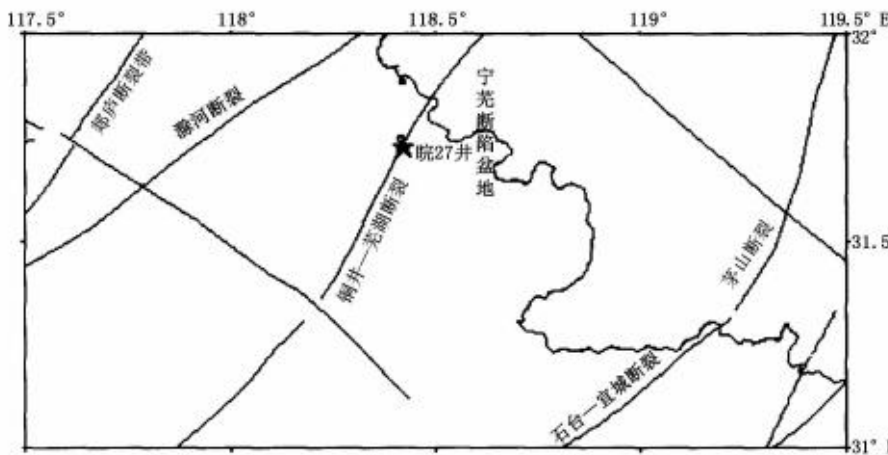


图 1 皖 27 井周边地质构造图

Fig. 1 Geological structure around Well No. 27

收稿日期: 2023-04-09

基金项目: 安徽省地震局地震科研基金青年项目(20200611)。

第一作者简介: 袁鸣望(1981—), 男, 浙江余姚人。硕士研究生, 工程师, 主要从事防震减灾工作, E-mail: 45559224@qq.com。

皖 27 井成井时深 450.17 m, 套管直径 146 mm, 下设至地下 35 m。套管以下为裸孔, 直径 90 mm。该井为静水位, 观测含水层为闪长玢岩, 属构造裂隙承压水(见图 2)。

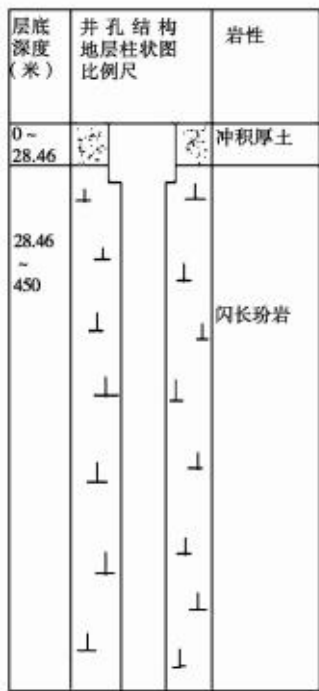


图 2 皖 27 井井孔柱状图概况

Fig. 2 Overview of the stratigraphic column of Well No. 27

该井 1983 年 3 月开始使用 SW40 型水位仪进行人工观测, 2008 年数字化改造时采用 LN-3A 型数字化水位仪, 2016 年更换为 SWY-II 型数字水位仪。

2019 年 1-9 月进行改造, 观测室升高 3.7 m, 套管加长 4 m。现井深 454.17 m, 井口标高 27.0 m。

2 井水位动态分析

2.1 水位年动态

整理 2009-2022 年的井水位和降雨量观测数据(2016 年仪器故障和 2019 年观测室改造数据缺失较多未列入统计, 共统计 12 年)看出, 2-3 月处于全年第一峰值的有 5 次、第二峰值的 1 次、第三峰值的 2 次, 占 67%; 7-8 月处于全年第一峰值的有 4 次、第二峰值的 3 次、第三峰值的 2 次, 占 80%; 12 年中, 12 月至来年 1 月水位出现谷值的次数为 12 次, 占 100%; 5-6 月出现谷值的次数为 6 次, 占 50%(见图 3)。

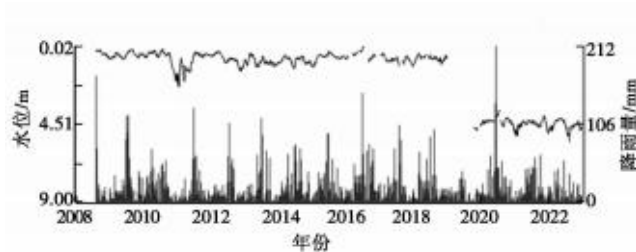


图 3 皖 27 井水位和降雨量曲线图

Fig. 3 Water level and rainfall curve for Well No. 27

综合图 3 及表 1 的年动态特征可见, 皖 27 井水位多年趋势基本平稳, 呈明显的冬低夏高年变特征, 总体表现为 1-2 月上升、3-5 月下降、6-8 月上升、9-12 月下降的上升-下降-上升-下降型。除 2010-2012 年、2020-2022 年井水位出现异常变化外, 其他年份年变规律明显, 年变幅基本在 0.5~0.9 m。

表 1 皖 27 井水位年动态特征

Table 1 Annual dynamic characteristics of water level in Well No. 27

年份	年变幅	第一峰值		第二峰值		第三峰值		第一谷值		第二谷值		第三谷值	
		幅度/m	出现时间	幅度/m	出现时间	幅度/m	出现时间	幅度/m	出现时间	幅度/m	出现时间	幅度/m	出现时间
2009	0.546 3	0.189 6	08-20	0.344 8	03-21	0.402 1	11-24	0.735 9	01-01	0.731 7	06-08	0.684 6	11-02
2010	1.896	0.16	07-28	0.262 7	05-02	0.314 3	02-27	2.056	12-31	0.674 3	06-07	0.649 9	01-22
2011	2.020 2	0.315 5	07-20	0.655 3	09-30	0.420 8	11-10	2.335 7	01-17	2.050 6	03-16	1.479 3	05-22
2012	1.131 8	0.316 2	03-05	0.645 9	08-11	0.813 1	12-31	1.448	11-17	0.966 7	06-05	0.588 4	01-11
2013	0.790 9	0.406 7	02-28	0.579 6	07-15	0.837	10-10	1.197 6	05-15	1.159 7	11-18	1.121 5	01-30
2014	0.765 6	0.526 9	03-12	0.573 9	09-23	0.814 4	12-07	1.292 5	06-25	1.166 9	12-31	0.968 6	01-04
2015	0.895 6	0.305 1	06-30	0.472 6	04-02	0.531 7	12-01	1.201 0	01-12	0.74	10-31	0.735 2	12-31
2017	0.744 9	0.421 6	02-04	0.550 8	10-21	0.621	07-11	1.166 5	12-29	1.158 6	08-04	0.927 2	04-01
2018	0.763 1	0.396	03-03	0.549 7	12-20	0.520 9	07-12	1.159 1	01-03	1.049 9	11-02	0.901 3	10-15
2020	1.162 2	3.72	07-22	4.116 8	10-21	4.266 4	02-29	4.882 2	12-30	4.673 3	09-02	4.577 3	02-17
2021	1.177	4.008 2	11-18	4.284 5	07-30	4.292	04-15	5.185 4	01-22	5.159 5	02-06	5.062 9	01-09
2022	1.345	4.160 9	06-05	4.293 9	11-27	4.583 3	09-18	5.506 1	08-23	5.028 1	01-06	4.924 5	02-20

2.2 水位月动态

水位月动态图以整点值为基础绘制,主要分析在一个月时间尺度内是否有规律可循,分析时把渐升、渐降和平稳的变化作为有规律的变化标志,把无规律起伏、渐变和明显的脉冲作为无规律变化的标志,从而在有规律变化的动态曲线上识别出转折、阶变、脉冲等地震短期前兆异常^[2]。

对图4的月动态规律进行分析表明,皖27井月动态规律不清晰,很难识别出转折、脉冲、阶变等具有短期预测意义的前兆异常。

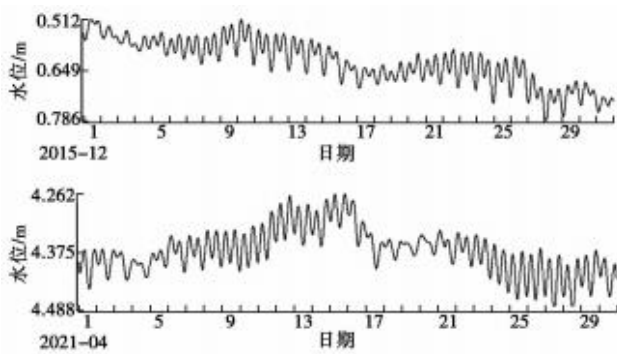


图4 皖27井水位月动态曲线图

Fig. 4 Monthly dynamic curve of water level in Well No. 27

2.3 水位日动态

井水位日动态最显著的特征是地球固体潮效应,即井水位随潮汐引力的大小而升降变化。从图4月动态曲线图中可见井水位随潮汐引力的大小影响十分显著,相位清晰,幅度较大,最大日潮差可达10 cm。说明井水位对地壳应力一应变的响应具有很高的灵敏度,可为识别短期和短临前兆异常提供可靠的动态背景^[3]。

图5为频谱分析图,显示马鞍山27井水位频谱中主成分为M2波、S2波和K1波、O1波,其中M2波、S2波是半日波,K1波、O1波是全日波。M2波振幅最大,这与改进水位理论固体潮波形变化一致,实际水位观测也是如此。因此,M2波潮汐因子能够反映该井水位异常变化。

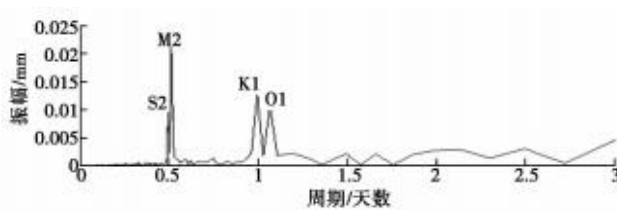


图5 皖27井水位频谱分析图

Fig. 5 Spectrum analysis graph of water level in Well No. 27

3 水位动态主要影响因素分析

降雨和气压变化是影响井水位动态的主要自然因素。

3.1 降雨影响

3.1.1 水位年变幅与降雨量关系分析

中国气象有关规定,24小时降雨量大于50 mm的强降雨称为“暴雨”。皖27井无气象三要素观测装置,收集统计周边站点2008年8月1日—2022年12月31日降雨量数据,日降雨量超50 mm的共计50次,皖27井水位第二日出现上升的有40次,下降的有10次,分别占80%和20%;三日后水位对比第二日仍处于上升的32次,下降的18次,分别占64%和36%。结合图3发现,短时强降雨后水位有明显的上升变化,综合分析认为皖27井水位受强降雨影响显著。

由井水位年变幅与年降雨量图6可见,2019年因改造未统计外,水位年变幅与年降雨量的相关系数在0.4~0.7,两者呈一定的正相关性。2010—2012年、2021—2022年井水位年变幅均超过1 m,而降雨量不高,期间皖27井周边相继发生2011年1月19日安庆M_s4.8、2012年7月20日高邮M_s4.9、2021年12月22日常州M_s4.2地震,说明水位异常变化可能与这些地震孕育有关。

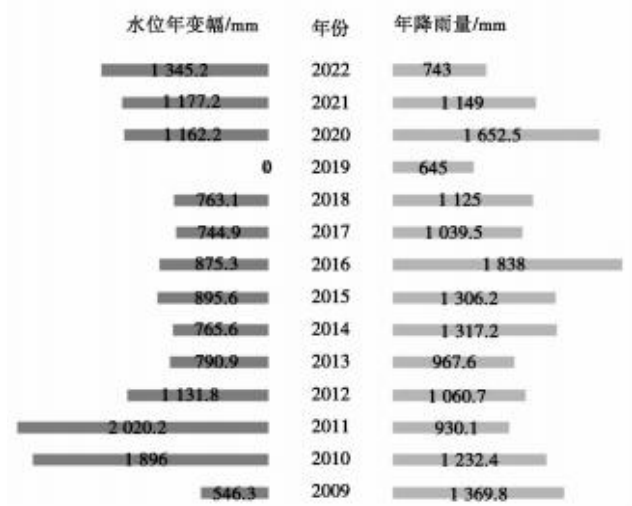


图6 皖27井水位年变幅与年降雨量图

Fig. 6 Annual amplitude of water level change and annual rainfall in Well No. 27

3.1.2 水样结果分析

安徽省地震局于2013—2022年分别在距其西南方8.8 km的马钢井和1.3 km的角带厂、正南方10 m的井前池塘和100 m的天然河采用溢流法采集水样,同时采集皖27井10 m、35 m和60 m深度的水样。测试结果如表2所示。

降雨的氢氧同位素是一种非常理想的天然示踪剂, $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 在蒸发过程中保持线性关系。受纬度、季节、大陆以及海拔效应等的影响, 不同地区不同季节的大气雨水线各不相同, 本次所选的大气降雨线引自

Craig(1961), 其方程为:

$$\delta\text{D} = 8.1\delta^{18}\text{O} + 10,$$

式中: δD 为氢同位素实测比值; $\delta^{18}\text{O}$ 为氧同位素实测比值。

表 2 不同水样测试结果对比
Table 2 Comparison of test results of different water samples

样品点	采集时间	阳离子/(mg/L)				阴离子/(mg/L)			同位素/(‰)		水氢 (Bq/L)
		Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	SO ₄ ²⁻	F ⁻	Cl ⁻	δD	$\delta^{18}\text{O}$	
马钢井	2013-04-07	11.46	3.78	38.57	47.92	低于检出限	低于检出限	27.75	-45.65	-6.74	7.5
天然河	2013-04-07	32.95	10.08	21.09	25.72	193.39	1.14	44.47	-28.41	-4.20	0.1
	2017-06-05	49.10	21.83	85.57	21.00	301.80		83.76			
	2021-01-20	48.75	15.46	81.7	22.06	148	0.77	85.21	-39.16	-5.74	
角带厂	2013-04-07	36.88	0.99	28.68	34.56	286.07	0.38	4.74	-56.61	-8.28	18.3
池塘	2017-06-05	56.81	16.82	90.04	18.75	78.96		83.78			
皖 27 井(10 m)	2021-01-20	90.98	18.66	22.54	38.79	138.97	0.86	87.41	-38.95	-6.36	
	2021-08-12	78.8	15.4	21.6	33.6	136		85.1			
	2021-11-18	65.9	23.5	24.2	28.5	138		93.5			
	2022-06-17	35.3	10.6	246	75.6	272		88.8			
皖 27 井(35 m)	2013-04-07	76.19	6.02	14.95	17.27	160.58	0.56	19.49	-54.68	-7.96	0.0
	2017-06-05	81.79	5.27	6.90	5.84	109.74		20.94			
皖 27 井(60 m)	2013-04-07	81.15	6.89	15.80	17.82	165.00	0.50	19.78	-54.63	-8.10	0.2

由表 2 和图 7a 可知, 所有采样点的氢氧同位素均落在大气雨水线附近, 表明马钢井、角带厂、天然河、皖 27 井四处采样点的水均为大气成因水。2013 年和 2021 年的天然河水样在大气降雨线的右下方, 可能是区域降雨少(马鞍山市区年降雨量 1 156.8 mm, 两次取样前一个月分别降雨 51.5 mm 和 12.5 mm), 蒸发强, $\delta^{18}\text{O}$ 值偏大。2013 年的马钢井、角带厂、皖 27 井

35 m 和 60 m 深处水样正好落在大气降雨线上, 表明此三处具有大气成因。2021 年皖 27 井 10 m 深处的氢氧同位素位于大气降雨线附近, 反映出地下水的循环深度浅、滞留时间或补给路径相对较长等特点。在 $\delta^{18}\text{O}$ 与 Cl^- 对比图上, 2021 年皖 27 井和天然河的位置较接近, 表明皖 27 井水与距其 100 m 的天然河补给源大体一致^{[4]、①}(见图 7b)。

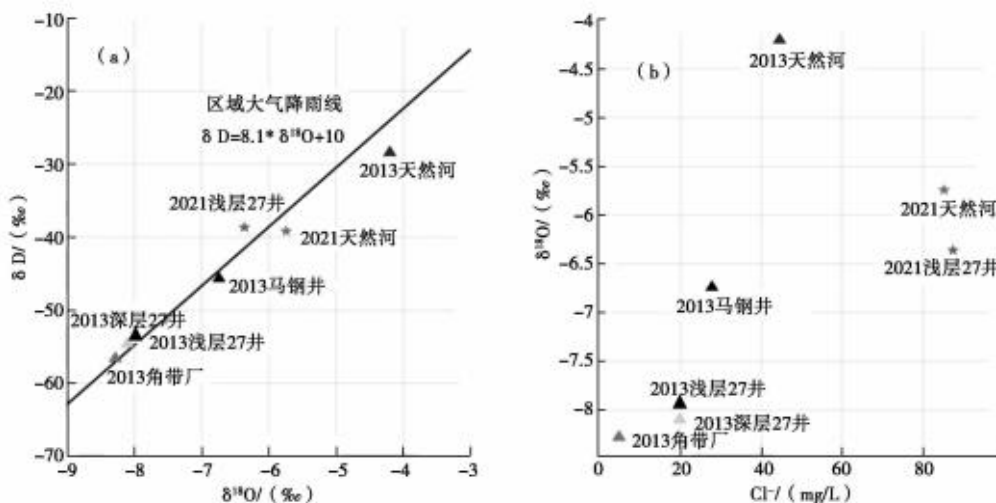


图 7 水样氢氧同位素与大气降雨线及氯离子的关系

Fig. 7 Relationship between hydrogen and oxygen isotopes in water samples and the atmospheric rainfall line and chloride ions

① 安徽省地震局, 马鞍山市地震局. 异常核实—2021 年 1 月 20 日安徽马鞍山 27 井水位, 2021.

3.2 气压影响

气压每变化 1 hPa 引起的水位变化量称为井水位气压效率,单位为 mm/hPa,是反应气压效应强弱的一个重要指标^[5]。图 8 为 2009 年皖 27 井水位与大气气压图,总体表现为冬季气压高、水位低,夏季气压低、水位高,但不同时段,水位与气压的相关性存在差异,相关性表现为不稳定、不明显。

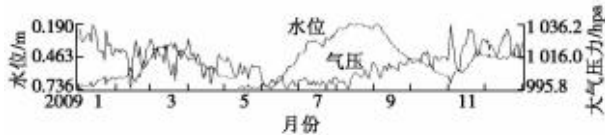


图 8 皖 27 井水位与大气气压值对比图
Fig. 8 Comparison of water level and atmospheric pressure values in Well No. 27

4 映震能力分析

4.1 水位异常

皖 27 井数字化改造以来,出现多次水位异常现象,特别是 2011 年安庆地震前 4 个月,井水位突然急剧下降,现场调查分析后认为,仪器工作正常,无气压、降雨、周边开采等异常情况,水位变化真实,能够反映含水层内的应力变化。2011 年 1 月 17 日水位降至 2.335 7 m 后上升,于 19 日发震。汇总 2009—2022 年皖 27 井的水位资料(见图 9),兼顾地震构造上的关联性,选取以井孔为中心,200 km 范围内 $M_s \geq 3.5$ 、400 km 范围内 $M_s \geq 4.0$ 地震为对应地震进行分析,共统计 9 次满足条件的地震。通过筛选,发现 7 次存在异常(见表 3),占比 77.8%,表明该井水位异常与周边 $M_s \geq 3.5$ 地震有较好的关联性。

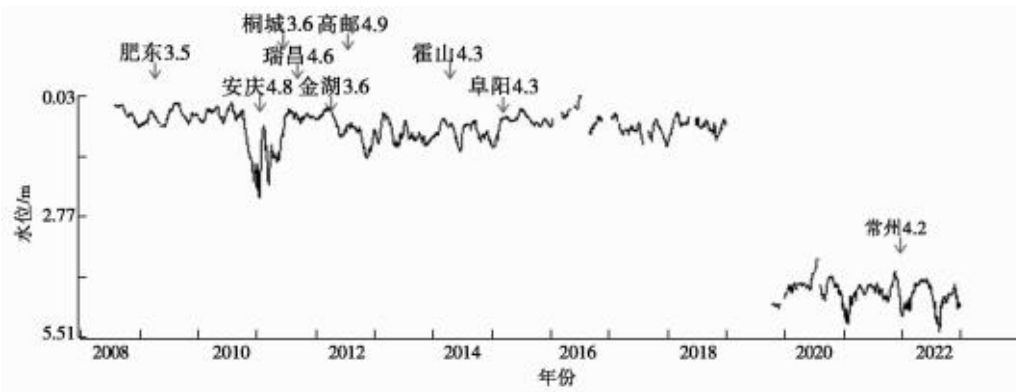


图 9 皖 27 井水位日均值图
Fig. 9 Daily average water level graph of Well No. 27

笔者认为,皖 27 井位于铜井—芜湖 NE 向断裂带上,与安庆、桐城、高邮地震不属于同一断裂,但三次地震震中位置正好位于皖 27 井所处断裂带的走向上,且同属下扬子断块区。一次地震孕育与发生的过程,不完全只是一条或几条孕震断裂的活动过程,特别是强震的孕育与发生过程是与较大尺度的区域构造活动有关。结合年变幅与年降雨量相关情况,当两者的相关系数 > 1.0 时,该井对区域范围内井震距 < 200 km 且震级 $M_s \geq 4.0$ 的地震有一定的指示作用。

4.2 相对变差率分析

相对变差率^[6]是通过月变差率定量地描述观测值长趋势动态特征变化,尤其是分析破年变特征,可以定量地确定本年度相对上年度同期的变化程度,即设月均值观测序列为 Y_i ,如有明显的年变特征,使用 13 点平滑方法剔除去年变影响,如有高频波动成分,使用 5 点平滑方法清除,得到无年变、无高频率序列 Y_i ,则相邻月均值相对变差率定义为:

$$\Delta Y_i = \frac{Y_i - Y_{i-12}}{Y_i}, i = 13, 14, 15, \dots, n。$$

或隔年月均值相对变差率定义为:

$$\Delta Y_i = \frac{Y_i - Y_{i-24}}{Y_i}, i = 25, 26, 27, \dots, n。$$

从定义来看,相对变差率是反映趋势性变化特征,将每年同期水位数据进行比较分析,以提取异常信息。运用相对变差率对皖 27 井历年水位的月均值进行变差分析的结果表明,从 2010 年 10 月开始,皖 27 井水位变差率逐渐增大,2011 年 1 月 19 日安庆 $M_s 4.8$ 地震后,变差率达到峰值,其后一直高于阈值,期间相继发生桐城 $M_s 3.6$ 地震、瑞昌阳新 $M_s 4.6$ 地震,至 2011 年 9 月变差率才开始逐渐减小。2012 年 6 月起,变差率再次高于阈值,8 月发生高邮 $M_s 4.9$ 地震,其后 2014 年 4 月霍山 $M_s 4.3$ 、2015 年 3 月阜阳 $M_s 4.3$ 地震前水位变差率也均有一定程度的增大。

异常本身并不是某一个地震的“专有”前兆,而是

多个地震的“共同前兆”。从成因来看,趋势异常不是来自震源的“源兆”,而是“外因性”的“场兆”^[7-9]。因此,皖27井2010—2011年水位长时间破年变异常可

能是安庆 $M_s 4.8$ 、桐城 $M_s 3.6$ 、瑞昌阳新 $M_s 4.6$ 地震的共同前兆中短期异常(见图10)。

表3 皖27井周边400 km范围内 $M_s \geq 3.5$ 地震参数及对应异常统计

Table 3 Parameters of earthquakes with $M_s \geq 3.5$ within 400 km of Well No. 27 and corresponding anomaly statistics

序号	发震时间	震中地名	震级	异常情况	井震距/km
1	2009-04-06	安徽肥东	3.5	无	101
2	2011-01-19	安徽安庆	4.8	2010年10月5日从0.3555 m开始下降,至2011年1月17日达到2.3357 m后上升,平均1.9 cm/d,两日后发震	180
3	2011-06-17	安徽桐城	3.6	安庆地震后水位上升,上升至0.8358 m时发生地震	177
4	2011-09-10	江西瑞昌	4.6	安庆地震后水位上升,上升至2011年7月20日0.3155 m后开始下降,下降至0.519 m时发生地震	376
5	2012-04-08	江苏金湖	3.6	无	160
6	2012-07-20	江苏高邮	4.9	2012年4月2日从0.303 m开始下降,下降至6月5日0.9667 m开始回升,共下降66.4 cm,平均1.04 cm/d,上升过程中发生地震	175
7	2014-04-20	安徽霍山	4.3	2013年7月15日从0.7596 m开始下降,至11月18日1.1597 m开始回升,2014年3月12日达到0.5269 m后下降,在下降过程发生地震	233
8	2015-03-14	安徽阜阳	4.3	2015年1月12日从1.2110 m开始上升,上升0.5596 m过程中发生地震	300
9	2021-12-22	江苏常州	4.2	2021年10月5日从4.7113 m开始上升,11月18日达到4.0082 m后下降,共上升70.31 cm,平均1.6 cm/d,下降至4.709 m发生地震,共下降70.1 cm,平均2.06 cm/d	139

通过水位变差率分析显示,皖27井破年变异常

真实地反映了该井及周边区域应力调整增强过程。

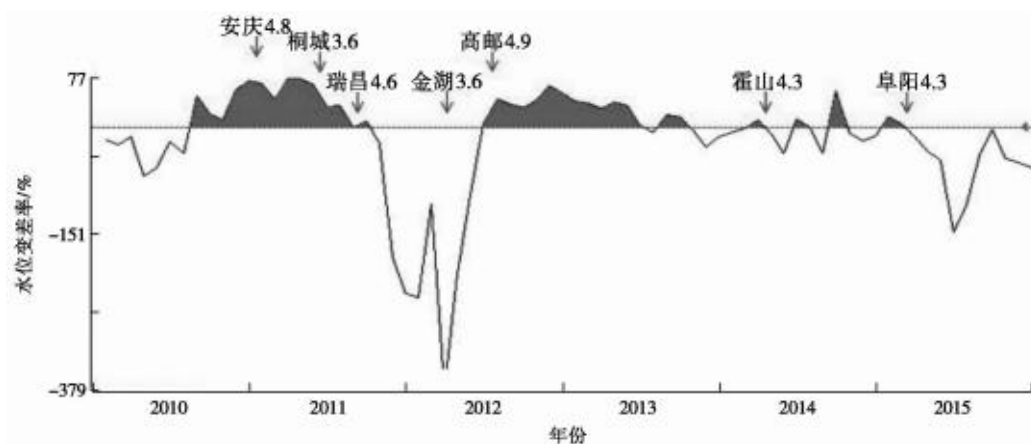


图10 皖27井水位相对变差率曲线

Fig. 10 Relative variation rate curve of water level in Well No. 27

5 结论

(1) 皖27井水位年变规律明显,全年水位呈冬低夏高特征,年动态为上升—下降—上升—下降型,年变幅在0.5~0.9 m。

(2) 大气降雨在皖27井井水补给中占有一定的份额,短时强降雨对皖27井影响显著,井水位年变幅度与年降雨量呈一定的正相关性,相关系数为0.4~0.7。井水位与气压相关性不明显。

(3) 皖27井具有较高中期或中短期前兆监测效

能,水位破年变异常与井震距200 km范围内 $M_s \geq 3.5$ 、400 km范围内 $M_s \geq 4.0$ 地震有一定的对应关系,特别是对井震距 < 200 km且震级 $M_s \geq 4.0$ 的下扬子断块区内的地震有较好的预报效能。

参考文献:

[1] 陆明勇,牛安福,鲁德顺,等.地壳形变与地下水动态异常特征研究进展[J].西北地震学报,2005,27(1):89-95.

(下转第50页)

昌黎台地磁观测 Z 分量秒值受电气化铁路影响的分析

佟鑫¹, 张国苓², 郭建芳¹, 周剑青¹, 殷金平³

(1. 河北省地震局唐山地震监测中心站, 河北 唐山 063000; 2. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021; 3. 江西省赣州市防灾减灾中心, 江西 赣州 341000)

摘要: 电气化铁路对地磁观测造成的干扰一方面由铁路本身铁磁性物质引起, 另一方面由机车运行时高压电弧产生的磁场引起。本文主要对电气化机车运行时对昌黎台地磁观测垂直分量的影响特征进行分析, 结果表明, 干扰形态主要表现为突跳尖峰, 干扰幅度约 0.5~5 nT; 电气化铁路两侧引起的干扰方向相反, 同侧的相同; 测点距离铁路越近, 对观测值的影响越大。通过研究分析, 明确电气化机车运行对昌黎台地磁观测值产生的影响, 为观测数据的正确应用提供参考依据。

关键词: 地磁观测; 干扰; 电气化铁路

中图分类号: P315.63

文献标志码: A

0 引言

20世纪60年代以来,我国陆续建立大量电磁监测台站,用于探测与地震孕育过程相关的地震电磁前兆。随着社会经济的发展,城市化进程加快,使得原来观测环境较好的地磁台站日益受到外界环境不同程度的干扰。目前,影响我国地磁台网监测的环境干扰源包括:城市轨道交通(地铁、轻轨)、超高压直流输电、地电阻率同台观测、公路车辆、基建工程和建筑物等^[1]。

河北昌黎地震台(以下简称昌黎台)地磁观测始于1968年,是我国开展电磁观测较早的专业台站。观测近50年来,观测仪器经历了从模拟观测、数字化观测,到网络化观测仪的变革。自2010年GM4磁力仪观测开始,昌黎地震台地磁Z分量秒值一直记录到不明原因的单点突跳,利用突跳点的数值减去前一秒的数值得到单点突跳幅度,经统计,每日的干扰幅度在0.5~5 nT。

针对昌黎台地磁突跳干扰,尝试用不同的方法寻找干扰源:通过区域停电来排除周边粉丝厂干扰;更换供电电源和改变供电方式,排除地电观测供电系统干扰;利用多台地磁仪器对比观测,排除仪器自身原因;利用变电站停电检修,排除变电站漏电干扰;采用视频记录铁路列车的运行情况,排除火车及动车的车辆自身铁磁性干扰。打雷时,地磁Z分量出现尖峰干扰,突跳多伴随闪电和打雷,短时间内出现数次干扰,属于较密集的尖峰干扰(见图1a)。昌黎台的突跳干扰出现时间不固定,无明显固定天气变化影响,尖峰多孤立

出现(见图1b)。

GB/T 19531.2-2004地震台站观测环境技术要求第2部分:电磁观测中规定,6000 KVA电气化铁路与地磁观测点的避让距离为0.8 km^[2]。台站南1.1 km处为电气化铁路,符合规范要求,但在列车高速通过时有时会有电打火声音,经调研,电气化机车和动车组运行时会产生电火花^[3-6],对地磁观测造成干扰。本文主要针对电气化铁路火车运行时产生电火花对地磁观测的干扰进行分析。

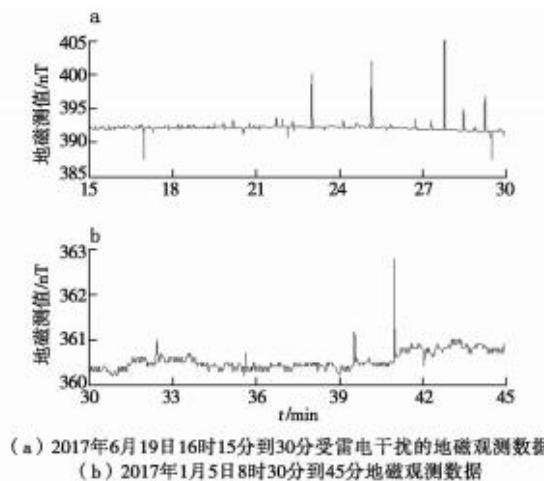


图1 FGM磁通门磁力仪记录的地磁信号
Fig. 1 Geomagnetic signal recorded by FGM fluxgate magnetometer

收稿日期:2023-03-07

第一作者简介:佟鑫(1987—),男,吉林白城人。工程师,主要从事电磁学和地震预测研究工作,E-mail:tongxin@hbdzj.gov.cn。

通讯作者:张国苓(1986—),女,河北石家庄人。高级工程师,硕士研究生,主要从事电磁学和地震预测研究等,E-mail:zhangguoling002@163.com。

1 实验设计

电气化机车的受电弓每次在升、降弓及行进间都可能产生高压电弧^[3],这个电弧会产生自生磁场。同时在弓网滑动接触过程中和电动列车在高速运行过程中会有电火花或电弧现象^[4]。电气化机车尤其是动车,在经过昌黎台这一区段时,产生的电弧或电火花可能对地磁观测造成一定的影响。

昌黎后土桥地震台记录不明原因的突跳(见图1b),方向不定,世界时00时—16时干扰比较多,利用右手螺旋定则原理,制定一套验证性观测实验。使用一台FGM磁通门磁力仪在台站的南、北侧各取若干监测点,取白天干扰时段较多的1—2个小时监测一段时间,分析监测点的突跳干扰同步性和幅度变化情况。在台站南侧选取3个观测点,其中2个在铁路南侧,在台站北侧选取1个观测点(见图2)。以铁路为对称轴在铁路南北两侧各取距离相同的点(测点2和测点5),测点1—5分别距离铁路为:0.86、1.18、1.45、0.73、1.19 km,将观测数据进行对比分析。

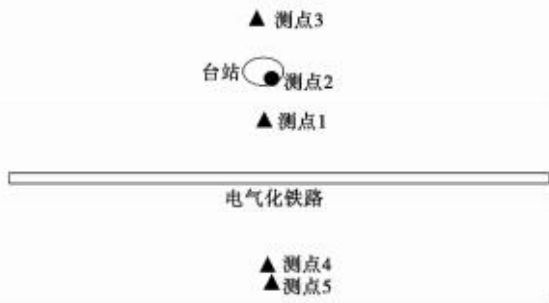


图2 台站、测点及铁路位置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the station, measurement points, and railway location

2 实验结果及分析

(1) 测点1实验观测。

测点1和台站位于电气化铁路同侧,2017年10月17日3—4时的观测数据显示,在干扰时刻记录的突跳方向一致(见表1、图3),测点1突跳幅度大于台站常规地磁观测突跳,可能与测点1距离电气化铁路更近一些有关。

(2) 测点2实验观测。

测点2和台站位于电气化铁路同侧,2017年10月17日4—6时观测数据显示,在干扰时刻的突跳方向一致(见表2、图4),幅度大致相当,可能与两者距离电气化铁路的距离大致相同有关。

(3) 测点3实验观测。

测点3和台站位于电气化铁路同侧,2017年10月

17日6—8时观测数据显示,在干扰时刻的突跳方向一致(见表3、图5),测点3观测数据突跳幅度小于台站的,可能跟测点3距离电气化铁路远一些、受干扰的影响小一些有关。

表1 测点1和台站地磁观测数据对比
Table 1 Comparison of geomagnetic observation data between Measurement Point 1 and the station

突跳时间	实验仪突跳幅度(nT)	实验仪突跳方向	在用仪突跳幅度(nT)	在用仪突跳方向
03:00:51	2.37	↑	1.22	↑
03:19:22	0.31	↓	0.21	↓
03:19:49	0.63	↓	0.26	↓
03:22:21	0.82	↓	0.63	↓

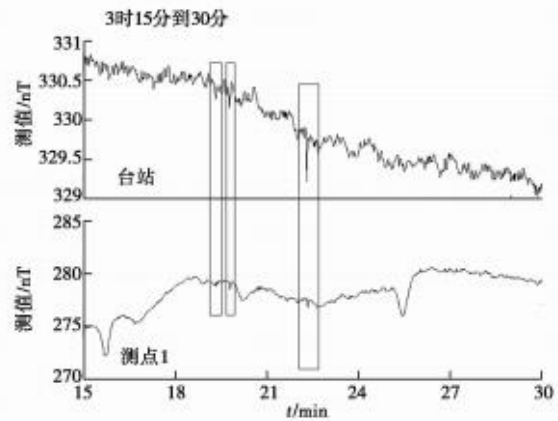


图3 测点1和台站常规地磁观测对比曲线
Fig. 3 Comparison curve of routine geomagnetic observations between Measurement Point 1 and the station

表2 测点2和台站地磁观测数据对比
Table 2 Comparison of geomagnetic observation data between Measurement Point 2 and the station

突跳时间	实验仪突跳幅度(nT)	实验仪突跳方向	在用仪突跳幅度(nT)	在用仪突跳方向
04:04:34	2.8	↓	2.76	↓
04:14:57	2.07	↓	1.62	↓
04:19:49	5.38	↓	4.77	↓
05:16:13	0.76	↑	0.56	↑
05:32:37	1.19	↑	1.05	↑

(4) 测点4实验观测。

测点4和台站位于电气化铁路两侧,2017年8月5日5—6时观测数据显示,在干扰时刻的突跳方向相反(见表4、图6),测点4的突跳幅度大于台站的,可能跟测点4距离电气化铁路近一些、受干扰的影响大一些有关。

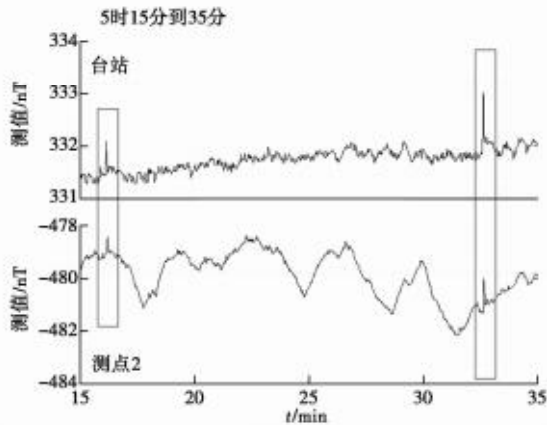


图4 测点2和台站常规地磁观测对比曲线

Fig. 4 Comparison curve of routine geomagnetic observations between Measurement Point 2 and the station

表3 测点3和台站地磁观测数据对比
Table 3 Comparison of geomagnetic observation data between Measurement Point 3 and the station

突跳时间	实验仪突跳幅度(nT)	实验仪突跳方向	在用仪突跳幅度(nT)	在用仪突跳方向
06:22:17	1.84	↑	1.96	↑
06:41:42	0.59	↑	0.64	↑
06:52:21	0.31	↓	0.43	↓
06:58:50	1.56	↑	1.73	↑
07:11:34	0.99	↑	1.09	↑
07:14:13	0.5	↑	0.65	↑

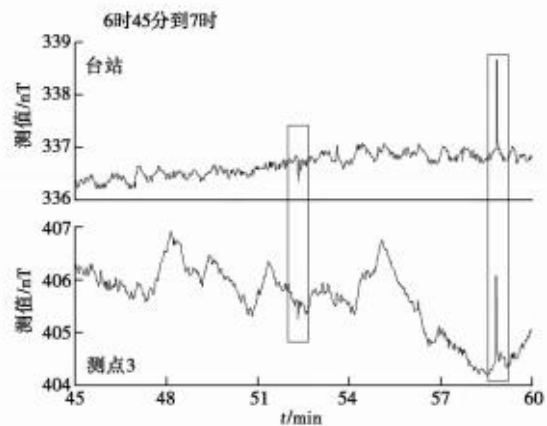


图5 测点3和台站常规地磁观测对比曲线

Fig. 5 Comparison curve of routine geomagnetic observations between Measurement Point 3 and the station

表4 测点4和台站地磁观测数据对比

Table 4 Comparison of geomagnetic observation data between Measurement Point 4 and the station

突跳时间	实验仪突跳幅度(nT)	实验仪突跳方向	在用仪突跳幅度(nT)	在用仪突跳方向
05:03:52	0.87	↓	0.66	↑
05:03:59	0.8	↓	0.68	↑
05:14:02	7.5	↑	2.42	↓
05:15:36	1.29	↑	0.76	↓
05:43:29	1.31	↑	0.14	↑
05:47:02	1.24	↑	1.48	↑
05:47:29	2.41	↓	1.37	↑

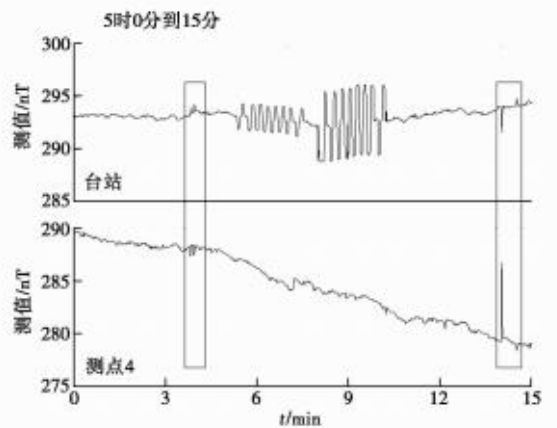


图6 测点4和台站常规地磁观测对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of routine geomagnetic observations between Measurement Point 4 and the station

(5) 测点5实验观测。

测点5和台站位于电气化铁路两侧,2017年8月6日1-2时观测数据显示,在干扰时刻的突跳方向相反(见表5、图7),测点5的突跳幅度与台站的相当,可能跟两者与电气化铁路的距离相近有关。

表5 测点5和台站地磁观测数据对比

Table 5 Comparison of geomagnetic observation data between Measurement Point 5 and the station

突跳时间	实验仪突跳幅度(nT)	实验仪突跳方向	在用仪突跳幅度(nT)	在用仪突跳方向
01:21:22	0.22	↓	0.33	↑
01:24:08	2.01	↑	0.98	↓
01:27:58	2.5	↑	1.62	↓
02:01:08	0.92	↓	1.15	↑

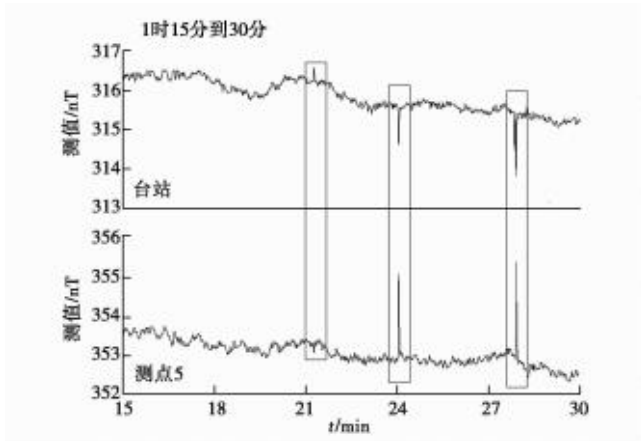


图7 测点5和台站常规地磁观测对比曲线

Fig. 7 Comparison curve of routine geomagnetic observations between Measurement Point 5 and the station

3 讨论

GB/T 19531.2—2004 中规定,6 000 KVA 电气化铁路与地磁观测点的避让距离为 0.8 km。昌黎台建台时该铁路未做电气化改造,上述国标在 2004 年制定时,大多数专家认为电气化铁路是交流电,不影响地磁观测,只有铁路上的钢铁影响地磁观测,0.8 km 是由钢铁重量产生磁场的距离计算出来。通过以上实验数据分析,电气化铁路在行进中产生高压电弧对地磁 Z 分量的影响确实存在。

当电气化机车运行时,铁路同侧的地磁观测点,记录的地磁 Z 分量产生的干扰方向相同,反之位于铁路两侧的干扰方向相反;干扰幅度与地磁观测点和铁路距离成正比;同一测点不同时间段的干扰幅度不一致。

(1) 根据电流产生磁场的公式:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_L \frac{Idl \times r}{r^3},$$

式中: I 是电流大小;真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$,空气磁导率近似等于真空磁导率; r 是观测点到电弧的距离; dl 为单位面积电荷通过的导线长度^[7]。电流大小和距离远近是影响产生磁场的重要因素,此次试验测定的干扰大小由机车产生电弧瞬间电流大小、产生电弧位置距离台站远近以及电弧长度决定。机车运行速度快,机车受电弓的碳板受摩擦破坏大,产生的电弧

长,该电弧电流大,产生的磁场强;相反,当受电弓破坏小时,产生电弧长度小,电流小,产生的磁场也较小^[3]。这也就是为什么同一测点不同时段干扰大小存在差异的原因。同时,机车与受电线路何时产生电弧是随机的^[4],产生的电弧距离台站较近,受影响也会较大,反之影响较小。

(2) 火车道铺设为对向行驶两车道,向不同方向行驶的车辆产生的电弧电流方向不同,根据物理学定理安培定则可知,不同方向机车产生磁场的方向不同,所以铁路两侧地磁测点的干扰方向相反。

(3) 地磁观测仪器磁通门磁力仪受温度、场地影响极大。本次实验观测仪放置于室外,台站观测仪器安装于温湿度相对稳定的地下室,当实验测点观测时间超过半个小时后,数据飘移幅度会很大。尤其在测点 5 观测时,此处接近村落,很难找到理想的观测点,旁边是一个废弃的房屋,在没有做梯度测量的前提下,会导致该处测量数据不准确;同时该测点在观测前期被大树阴影遮挡,温度较低,在收取仪器时发现大树阴影不见,观测点被暴晒。理论上,该测点数据应该与台站观测突跳值大小相近,突跳方向相反,但实际观测的数据突跳方向与理论一致,突跳数值出现时大时小的现象。

中国地震局地球物理研究所杨冬梅、李琪研究员对本文的研究思路和实验设计进行指导,河南洛阳台郅红魁也进行深入探讨,在此一并表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 曹志成. 河北省地震监测志[M]. 北京:地震出版社, 2005.
- [2] 中国地震局分析预报中心,中国地震局地球物理研究所. 地震台站观测环境技术要求:GB/T 19531.2—2004[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [3] 高金涛. 浅谈 HXD3 型电力机车升降弓对接触网的冲击[J]. 中国机械,2009,27(3):16-17.
- [4] 吴积钦,钱清泉. 受电弓与接触网系统电接触特性[J]. 中国铁道科学,2008,29(3):106-108.
- [5] 李罡. 受电弓与接触网系统电接触特性研究[J]. 建材与装饰,2012(4):177-178.
- [6] 吕录敬. CRH380AL 型动车组受电弓工作原理浅析[J]. 科学与财富,2015(13):194-195.
- [7] 徐文耀. 地球电磁现象物理学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009.

(英文摘要见第 43 页)

易县地震台伸缩仪 NE 分量异常分析

屈曼¹,侯晓真¹,马栋¹,高晨¹,张娜²,龚燕民²

(1. 河北省地震局,河北 石家庄 050021;2. 河北省地震局保定地震监测中心站,河北 保定 071000)

摘要: 易县地震台伸缩仪 NE 分量自 2022 年 10 月以来变化趋势发生转折,呈现张性趋势变化,总体变化幅度达 2.1×10^{-6} 。为明确异常变化的原因,对观测数据质量和环境干扰等影响因素进行分析论证,利用不同的荷载模型定量计算 3 项干扰源对伸缩仪产生的应变影响。综合各项因素认为,易县地震台伸缩仪 NE 分量的异常变化为前兆异常的可能性较大,需要对该测项的后续变化加强跟踪分析。

关键词: 潮汐因子;异常;伸缩仪;荷载模型

中图分类号: P315.63

文献标志码: A

0 引言

易县地震台(简称易县台)位于太行山隆起带与华北平原拗陷区的分界部位,北偏东距北京市 100 km,正南距河北省保定市 80 km,东距河北省易县县城 15 km,是隶属于河北省地震局的国家基本台。台址处于太行山北段低山丘陵地区,紫荆关断裂带东侧,紧邻天津至涞源 112 国道。1975 年,为进一步加强华北平原及京津地区地震监测能力,国家地震局测量大队(现中国地震局第一形变监测中心)组建易县台,于 1976 年建成。该台形变类仪器观测洞室为 20 世纪 50 年代人工开凿,属军队备用山洞,洞口海拔约 95 m,洞顶覆盖层平均厚度为 40 m。山洞岩石构造不均一,台基为片麻岩,山洞下部岩性为闪长岩,顶部为中厚层夹薄层石灰岩和页岩。

易县台伸缩仪 NE 分量多年来一直存在趋势异常变化,在此基础上,2022 年 10 月以来变化趋势又发生转折,呈现张性趋势变化。对于该异常变化,对观测系统进行全面检查,对测区地质构造情况及基础资料进行详细调查,并勘察观测环境的变化,收集气象观测数据,调查是否存在人为因素。进一步对观测资料的异常变化进行深入地理论分析和模型计算,对异常性质做出准确的判定。

1 异常特征

易县伸缩仪 NE 分量为河北省年度形变异常测项,该测项正常背景变化为平稳的波动变化,自 2020 年 1 月呈张性趋势变化,2022 年 1 月下旬转折压

性变化(见图 1a)。该测项自观测以来未出现如此大幅度的张性趋势异常变化。

本文重点分析的异常变化为 2022 年 10 月 3 日出现的上升变化趋势,2023 年 1 月 8 日转折缓慢上升变化,至 3 月 15 日总的上升幅度达 2.1×10^{-6} (见图 1b)。

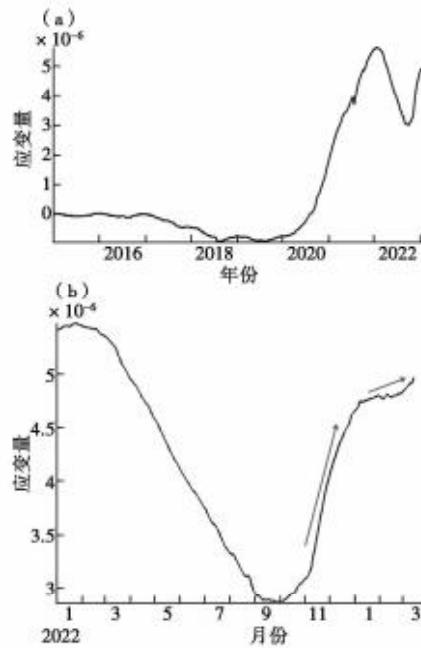


图 1 易县台伸缩仪 NE 分量观测曲线
Fig. 1 Observation curve of the NE component of the extensometer at Yixian Station

收稿日期:2023-09-21

第一作者简介:屈曼(1986—),女,河北石家庄人。硕士研究生,高级工程师,主要从事地壳形变与地震预测方面的研究,E-mail:1017063249@qq.com。

2 观测质量分析

2.1 仪器工作状态分析

对易县台伸缩仪 NE 分量工作状态的全面检查和供电电压量测的结果均符合观测要求,电压稳定。易县台伸缩仪供电系统正常,仪器数据采集器和传输系统工作正常。

根据维修日志记录,2020 年至今,伸缩仪 NE 分量未进行仪器维修。NE 分量自 2013 年 11 月底安装运行以来多次受到短期干扰,包括仪器校准、电源故障、进洞调零、检修同一观测室水管仪,进洞维修、调试伸缩仪等多项干扰因素,造成观测曲线短时间畸变,对观测数据的影响时间较短,未造成长时间的趋势变化。

由于格值会导致潮汐因子和数据趋势等出现相应的变化^[1],易县台伸缩仪正常情况每年标定两次。通过查阅标定记录详情,2022 年 10 月按照学科组要求对其进行标定,标定结果符合规范要求,说明仪器工作状态正常。

通过对仪器观测系统的检查、查阅维修日志及标定结果,认为该仪器运行稳定,观测系统运行正常,仪器工作状态良好。

2.2 潮汐因子分析

采用调和计算 2020 年 1 月 1 日至 2023 年 3 月 16 日易县台伸缩仪 NE 分量 M2 波潮汐因子(见图 2)可以看出,计算时间段内的潮汐因子在一定范围内稳定变化,变化范围为 0.43~0.5,未出现大幅度转折和速率增加等异常变化。由此可见,仪器运行状态基本稳定、可靠。

NE 分量异常变化的时段为 2022 年 10 月至 2023 年 3 月,潮汐因子在该时间段内变化较平稳,未出现大幅上升、下降变化。因此,认为 NE 分量观测数据质量较可靠,数据变化可信,可以基本排除观测因素对本次异常的影响。

3 荷载变化的定量分析

3.1 环境干扰源

对现场环境进行调查,在易县台观测山洞周围存在三项明显的环境干扰源,分别为新建房屋、采石场采石活动和水库蓄水,其分布情况如图 3 所示。

(1) 新建房屋。在易县台形变山洞西偏北 462 m 处出现新建房屋,据了解,该房屋建设工程自 2022 年 3 月 17 日开始动工,11 月底建成两栋三层楼房。每栋楼房长约 35 m,宽约 13 m。经查阅资料,建筑所用材料为钢筋 20 kg/m²、水泥 160 kg/m²、砖 600 kg/m²。新建楼房约 1 365 m²,计算其荷载重量约 1.1×10⁶ kg。

(2) 采石场采石。采石场距形变山洞东侧约 3 km,山洞和采石场高差约 15 m。据保定市应急管理局了解,采石场 2022 年 1 至 9 月集中开采,开采量估

计为 300 万吨,9 月后至 2023 年 3 月未开采。

(3) 水库蓄水。旺隆水库在易县台西北方向约 5 km 处,2022 年 4 月 6 日全部泄流完成,2023 年 2 月开春解冻以后水库才渐渐蓄水,水面面积约 6.7×10⁵ m²,水库中水深约 3 m 左右。由于水库放水在本次异常出现 6 个月之前,认为放水与本次异常的时间相关性较差;蓄水在本次异常变化期间,需要考虑蓄水对本次异常的影响。

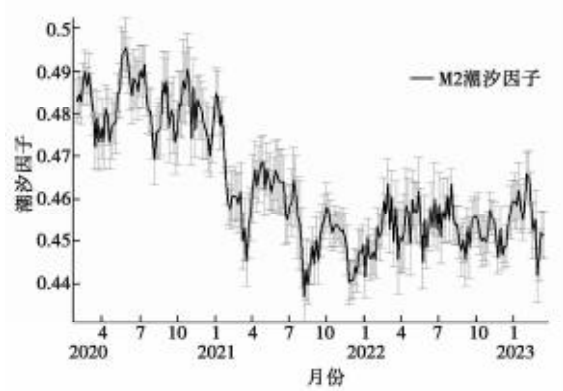


图 2 易县台伸缩仪 NE 分量潮汐因子
Fig. 2 Tidal factor of the NE component of the extensometer at Yixian Station

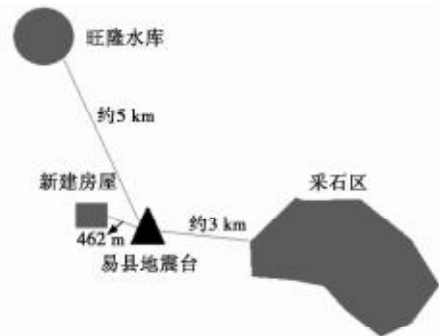


图 3 易县台环境干扰源分布示意图
Fig. 3 Schematic diagram of environmental disturbance sources at Yixian Station

由于上述三项干扰源均造成观测环境的荷载变化,为更精确地分析本次异常变化的根本原因,本文利用三维集中荷载模型和地表集中荷载模型,分别对三项干扰因素进行荷载计算,得到其对易县台伸缩仪观测数据的影响量级。

3.2 三维集中荷载模型

根据邱泽华^[2]针对仓库等对应变观测影响的理论,能够造成地面载荷变化的干扰因素可以利用该模型进行荷载影响的计算。作为一级近似,可用三维无

限半空间边界上作用集中载荷的模型研究这种载荷变化。这种模型只关心重量变化,不考虑干扰因素的面积和分布等。对于这个问题,有位移解:

$$u = \frac{F * x * z}{4 * \pi * G * R^3} - \frac{F * x}{4 * \pi * (G + \lambda) * R * (R + z)},$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

式中: u 表示 x 水平方向的位移; F 为集中力; λ 和 G 是拉梅常数。

对于最小“安静”距离问题,只需导出 x 水平方向的应变 $e_x = \frac{\partial u}{\partial x}$,即

$$e_x = -\frac{3 * F * x^2 * z}{4 * G * \pi * (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} + \frac{F * z}{4 * G * \pi * (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{F * x^2}{4 * \pi * (x^2 + y^2 + z^2)(z + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) * (G + \lambda)} - \frac{F * x^2}{4 * \pi * (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}} * (z + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) * (G + \lambda)} - \frac{F * \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} * (z + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) * (G + \lambda)}{2 * (1 + \nu) * \frac{E}{(1 + \nu)}}, \lambda = \frac{\nu * E}{(1 + \nu)(1 - 2 * \nu)}。$$

分别将三项干扰源引起荷载变化的重量作为荷载变化量 F ,计算结果中的应变符号遵从弹性力学规定,拉张为正,压缩为负。

(1) 新建楼房的重量计算结果为 $F = 1.1 \times 10^6 \times 9.8 = 1.1 \times 10^7$ N,水平距离 $x = 462$ m,与山洞的高差 $z = 84$ m,由此计算得出新建楼房对伸缩仪观测造成的影响量为 3.5×10^{-12} 。

(2) 采石石料的重量计算结果为 $F = 300 \times 10^7 \times 9.8 = 2.9 \times 10^{10}$ N, $x = 3\ 000$ m,高差 $z = 15$ m,由此计算得出采石活动对伸缩仪观测造成的影响量为 5.8×10^{-9} 。

(3) 水库蓄水量约为 $F = 6.7 \times 10^5 \times 3 \times 10^3 \times 9.8 = 2.0 \times 10^{10}$ N, $x = 5\ 000$ m,高差 $z = 100$ m,由此计算得出水库蓄水对伸缩仪观测造成的影响量为 1.3×10^{-9} 。

3.3 地表集中荷载模型

骆鸣津^[3]等根据半无限空间均布荷载模型,利用圆柱坐标调和函数推导出的地面负荷对应力应变影响的理论模型如下。

假定负荷力垂直作用在半无限平面介质的面上,且介质是各向同性,以负荷着力点为圆柱坐标系的原点,向下为 z ,水平向外为 r 。利用满足圆柱坐标的调和函数 $V(r, \theta, z)$ 的解^[4]、傅里叶—贝塞尔积分^[5],推

导出荷载变化引起的平面应变:

$$e_{rr}(r, z) = \frac{P}{4\pi\mu} \left[\frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \frac{z}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{3z^2}{(r^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \right] + \frac{P}{4\pi\mu r^2} \left[-\frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu} \frac{z}{(r^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \right],$$

$$e_{zz}(r, z) = -\frac{P}{4\pi\mu(\lambda + \mu)} \frac{z}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{P}{4\pi\mu} \frac{3z^3}{(r^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}},$$

$$e_{\theta\theta}(r, z) = \frac{P}{4\pi(\lambda + \mu)} \frac{1}{r^2} - \frac{P}{4\pi\mu(\lambda + \mu)} \frac{\lambda + 2\mu}{r^2} \frac{z}{(r^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} + \frac{P}{4\pi\mu} \frac{z^3}{r^2} \frac{1}{(r^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}。$$

根据 $e_{rr}(r, z)$ 、 $e_{zz}(r, z)$ 、 $e_{\theta\theta}(r, z)$ 推演出应力 $\sigma_{rr}(r, z)$ 、 $\sigma_{zz}(r, z)$ 、 $\sigma_{\theta\theta}(r, z)$,并用下式证明推演的公式是正确的。

$$\sigma_v(r, z) = (3\lambda + 2\mu)e_v(r, z) = 3(\lambda + \frac{2}{3}\mu)e_v(r, z) = 3Ke_v(r, z),$$

$$e_v(r, z) = e_{rr} + e_{zz} + e_{\theta\theta}, \sigma_v(r, z) = \sigma_{rr} + \sigma_{zz} + \sigma_{\theta\theta},$$

$$\lambda = \frac{VE}{(1 + V)(1 - 2V)}, \mu = \frac{E}{2(1 + V)},$$

式中: K 为压缩模量; P 为由于荷载形成的作用于坐标原点并与地面垂直的集中力; r 为荷载力作用点至参考点水平投影的距离; z 为钻孔深度; E 为岩石的弹性模量; V 为岩石的泊松系数。由此计算荷载对洞体应变的影响为:

$$b = e_{rr}(r, z) + e_{\theta\theta}(r, z)。$$

利用上述模型计算三项干扰源荷载变化造成的应力影响量。

(1) 新建楼房的重量计算结果为 $F = 1.1 \times 10^6 \times 9.8 = 1.1 \times 10^7$ N,水平距离 $x = 462$ m,与山洞的高差 $z = 84$ m。花岗岩的弹性模量 $E = 5.7 \times 10^{10}$ Pa、泊松比 $V = 0.23$,根据上述模型计算,新建楼房荷载引起的应变量为 4.7×10^{-11} 。

(2) 对于采石石料的重量计算结果为 $F = 300 \times 10^7 \times 9.8 = 2.9 \times 10^{10}$ N, $x = 3\ 000$ m,高差 $z = 15$ m。由此计算得出采石活动对伸缩仪观测造成的影响量为 8.5×10^{-11} 。

(3) 水库蓄水量约为 $F = 6.7 \times 10^5 \times 3 \times 10^3 \times 9.8 = 2.0 \times 10^{10}$ N, $x = 5\ 000$ m,高差 $z = 100$ m。由此计算得出水库蓄水对伸缩仪观测造成的影响量为 3.9×10^{-10} 。

3.4 模型计算综合分析

利用两个不同的荷载模型计算三项干扰因素的载荷变化对伸缩仪 NE 分量的影响汇总如表 1 所示。

表 1 荷载模型计算结果统计表

Table 1 Statistical table of load model calculation results

干扰源	干扰时间	三维集中荷载模型	地表集中荷载模型
新建房屋	2022-03-11	3.5×10^{-12}	4.7×10^{-11}
采石活动	2022-01-09	5.8×10^{-9}	8.5×10^{-11}
水库蓄水	2023-02-03	1.3×10^{-9}	3.9×10^{-10}

(1) 新建房屋影响分析。①变化量级。荷载模型计算结果显示,新建房屋造成的最大影响为 10^{-11} 量级,小于伸缩仪自身观测分辨率,影响量级较小,其产生的干扰难以被伸缩仪记录到,即使产生影响,相比异常幅度 10^{-6} ,也较微小。②变化时间。房屋建设时间为 2022 年 3 月到 11 月,伸缩仪 NE 分量出现转折上升异常在 2022 年 10 月以后,时间相关性较差。③变化性质。新建房屋造成的荷载影响值为正,代表拉张,伸缩仪为快速张性趋势变化,变化性质较相符。由于影响量级很小、时间相关性差,认为新建房屋不是本次伸缩仪异常变化的主要原因。

(2) 采石场影响分析。①变化量级。不同模型的计算结果虽然存在一定差异,最大量级为 10^{-9} ,伸缩仪 NE 分量自 2022 年 10 月以来的上升幅度达到 2.1×10^{-6} ,二者量级相差较大。采石场存在时间为 2017 年以后,采石活动一直存在。虽然之前多次异常核实,并进行模型计算,发现采石活动会对易县伸缩仪造成一定的影响,但影响幅度较小。②变化时间。采石活动集中在 2022 年 1-9 月,本次异常出现在 2022 年 10 月以后,时间相关性较差。③变化性质。采石活动造成的荷载影响值为正,代表拉张,伸缩仪在 2022 年 1-9 月采石期间的变化形态为下降即压性变化,变化性质不一致。10 月之后的张性变化时段内,采石活动已经停止,因此,采石活动不是本次伸缩仪异常变化的主要原因。

(3) 水库蓄水影响分析。①变化量级。荷载模型计算结果显示,水库蓄水造成的最大影响为 10^{-9} 量级,影响量级较小,相比异常幅度 10^{-6} ,水库蓄水对伸缩仪的影响也较微小。②变化时间。水库从 2022 年 4 月一直在维修堤坝,期间没有蓄水,2023 年 2 月解冻以后才逐渐蓄水,本次异常时间为 2022 年 10 月,表明干扰存在和异常出现的时间相关性比较差。③变化性质。蓄水引起的荷载影响值为正,代表拉张,本次异常为张性增强,变化性质较一致。由于影响量级小、时间相关性差,认为水库蓄水不是伸缩仪异常变化的主要原因。

4 对比分析

4.1 与其他观测手段对比分析

易县伸缩仪 NE 分量的异常变化在 2020 年出现

并确定为年度异常进行日常跟踪,查阅相关河北地区应变背景场的数据资料^[6],发现易县周围地区的重力资料也存在一定的变化背景。易县附近地区的相邻两期重力值和累积重力值,均出现正异常累积现象,说明该地区应变场确实存在一定的异常变化。查阅该台其他形变测项的观测数据,未发现同步趋势异常变化。梳理周围台站形变测项的观测数据,存在 2 项趋势异常,分别为张家口台伸缩仪、怀来台伸缩仪。张家口台伸缩仪 NS 分量,自 2020 年以来出现张性变化增强的异常现象,目前异常仍在持续(见图 4);怀来台伸缩仪 NE 分量自 2021 年出现张性趋势变化,目前异常仍在持续(见图 5)。从异常出现的时间来看,三台伸缩仪出现异常时间比较接近;从异常性质来看,三者均属于张性趋势异常变化,说明异常变化比较真实可靠。

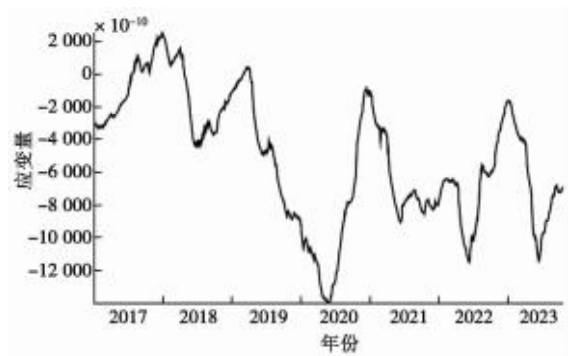


图 4 张家口台伸缩仪 NS 分量观测曲线
Fig. 4 Observation curve of the NS component of the extensometer at Zhangjiakou Station

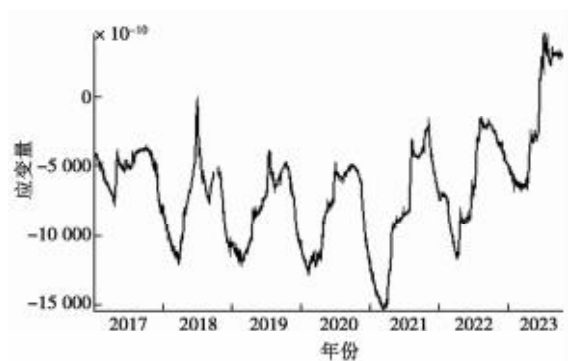


图 5 怀来台伸缩仪 NE 分量观测异常曲线
Fig. 5 Observation anomaly curve of the NE component of the extensometer at Huailai Station

4.2 震例对比分析

根据震例分析,易县伸缩仪 NE 分量在张北 6.2 级地震、文安 5.1 级地震之前都存在不同程度的异常变化。张北 6.2 级地震之前主要异常形态为短期固体

潮畸变,文安地震之前为压性下降趋势变化。易县台伸缩仪自2020年确认为异常以来,异常形态主要为上升—下降—上升的趋势转折变化,虽然本次异常形态与以往震例的不同,但针对该异常多次进行现场核实论证,异常情况确实存在。由于应力环境的变化,同一地区震级相当的地震前兆情况可能是不同的,前兆异常存在非重复性^[7],根据历史震例情况,主要震例集中在晋冀蒙交界地区和河北平原带中段,易县台伸缩仪异常可以为该地区的震情形势提供一定的判定依据。

2023年8月6日2时33分在山东德州市平原县发生 $M_L5.5$ 地震,该地震发生时,易县台伸缩仪 NE 分量数据曲线变化比较光滑,未记录到明显的同震响应,该地震发生前后的曲线形态也未出现明显的震前异常和震后恢复变化。经查阅震例资料,易县台伸缩仪自观测以来没有山东地区的震例信息,认为其长期趋势变化与山东平原地震的关系不大,可能与区域应力场变化有关,需要后续进一步研究论证。

5 结语

对易县台伸缩仪 NE 分量异常情况进行多方面分析得出,从仪器运行稳定性来看,在本次异常出现时间段内,仪器运行状态良好,供电系统正常。该仪器自运行以来虽存在一些进洞干扰,但均为短期干扰,不会对观测趋势造成大幅影响,在本次异常出现前后也未进洞维修仪器。通过计算该测项的潮汐因子,显示2020年以来 NE 分量潮汐因子变化较稳定。综合分析认为仪器运行状态正常,数据观测质量比较可靠。

本次异常出现前后,观测山洞周围存在三项明显的环境干扰,利用邱泽华三维集中荷载模型和骆鸣津

地表集中荷载模型,分别对新建房屋、采石场和水库蓄水进行荷载影响的定量计算,从变化量级、时间相关性以及变化性质三方面进行对比分析,认为三者均不是此次易县台伸缩仪 NE 异常变化的主要原因。

通过对观测系统、洞室环境、地质条件、辅助观测资料情况、台站其他形变观测资料变化情况、周围环境因素变化等多方面调查,对各种可能的影响因素进行勘察和分析论证,利用不同的荷载模型定量计算干扰源对伸缩仪的影响,结合周围形变观测手段和相关震例进行对比分析,认为易县台伸缩仪 NE 分量的异常变化为前兆异常的可能性较大,应该加强后续数据变化的跟踪分析工作。

参考文献:

- [1] 闫伟,陈国琴,杨跃文,等.以丽江地震台为例研究潮汐观测仪器格值变化检测及格值归化方法[J].地震研究,2015,38(04):613-616+698.
- [2] 邱泽华.钻孔应变观测点到地面载荷干扰源最小“安静”距离的理论分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(23):4063-4067.
- [3] 骆鸣津,池顺良,马鸿钧.地层绝对应力测量与钻孔应变测量[M].北京:地震出版社,2008:175.
- [4] 刘颖.圆柱函数[M].北京:国防工业出版社,1983:66.
- [5] 梁昆森.数学物理方法[M].北京:人民教育出版社,1978:371.
- [6] 屈曼,侯晓真,马栋,等.基于GNSS数据的河北地区形变特征[J].华北地震科学,2021,39(04):68-74.
- [7] 牛安福,江在森.我国地形变观测预报地震的现状及对地震预测问题的思考[J].国际地震动态,2005,(05):174-178.

Analysis of Anomalies in the NE Component of the Extensometer at the Yixian Seismic Station

QU Man¹, HOU Xiaozhen¹, MA Dong¹, GAO Chen¹, ZHANG Na², GONG Yanmin²

(1. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang, Hebei 050021, China;

2. Baoding Seismic Monitoring Center Station, Hebei Earthquake Agency, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: Since October 2022, a trend change has occurred in the NE component of the extensometer at Yixian Seismic Station, showing a tensile trend change, with a total change amplitude reaching 2.1×10^{-6} . To clarify the cause of the abnormal change, an analysis and demonstration of factors such as observation data quality and environmental disturbances were conducted, and the strain effects of three disturbance sources on the extensometer were quantitatively calculated using different load models. Considering all factors, it is believed that the abnormal change in the NE component of the extensometer at Yixian Seismic Station is more likely to be a precursor anomaly, and it is necessary to strengthen the tracking and analysis of subsequent changes in this measurement.

Key words: tidal factor; anomaly; extensometer; load model

用不同方法评估山西地震台网的监测能力

梁向军^{1,3}, 吴叔坤², 王霞^{1,3}, 刘林飞^{1,3}

(1. 山西省地震局, 山西 太原 030021; 2. 广东省地震局, 广东 广州 010010;

3. 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: 基于山西数字地震台网 2015—2019 年记录的地震目录及观测报告数据, 采用“基于概率的完整性震级”PMC 方法、震级一序号法、最优拟合度(GFT)法和最大曲率法等多种方法分别评估山西地震台网的监测能力。结合山西测震台网的实际情况和不同评估方法的计算原理进行对比分析, 结果显示, 部分台站围限的区域能监测到 $M_L 1.0$ 及以下的地震外, 其余区域的监测能力下限为 $M_L 1.5$; “基于概率的完整性震级”方法更适合用于评估山西地震台网的监测能力。随着预警台网的正式运行, 建议采用该方法对地震预警台网的实际监测能力重新评估。

关键词: 监测能力; 山西地区; PMC 方法; 震级一序号法; 最优拟合度法

中图分类号: P315.73

文献标志码: A

0 引言

测震台网产出的地震目录及观测报告是开展地震预测、活动构造及地震危险性等研究工作的基础资料, 区域台网的监测能力直接影响这些资料的产出质量和精度。因此, 科学评估一个台网的监测能力显得尤为重要。国内外对台网监测能力进行评估的方法有多种, 如“震级一序号”法^[1]、“最大曲率法(MAXC)”“最优拟合度(GFT)方法”^[2], 完整性震级范围(EMR)方法^[3]。目前, 这些监测能力评估方法已在甘肃地区^[4]、新疆地区^[5]、云南地区^[6]得到应用, 但上述方法依赖于地震分布。近年来, Schorlemmer 等提出“基于概率的完备震级(probability-based magnitude of completeness, PMC)”方法^[7], 该方法的优点是对地震分布假设依赖性不明显, 还能避免部分复杂的地震分布被普遍关注, 并在一些区域取得良好效果^[8-13]。一些学者针对山西测震台网的监测能力先后利用不同的方法进行评估, 获得不同时期的台网监测能力^[14-16], 但缺少 PMC 方法评估研究, 特别是多种方法的对比分析。为此, 本文尝试用 PMC 方法评估山西地震台网的监测能力, 并与震级一序号法、最大曲率法、最优拟合度方法相比较, 分析不同评估方法所得结果的差异, 为山西地震台网的监测能力评估和优化布局设计提供参考。

1 研究方法及原理

1.1 基于概率的完整性震级(PMC)方法计算原理

PMC 方法^[17-18]利用测震台网产出的实际观测报告来评估监测能力, 不需要假定震级分布关系, 是对单台检测能力评估, 然后计算综合概率, 对弱震地区和地震活动较少地区实现“无缝”评估^[8], 具体计算步骤为:

第一步: 利用检测到的台站周边地震事件数目 N_+ 和未检测到的地震事件数目 N_- , 震级 M 和震源距离 L 的二维空间计算单台检测概率 $P_D(M, L)$ 为^[19]:

$$P_D(M, L) = \frac{N_+}{N_+ + N_-} \quad (1)$$

计算中要求所用的地震事件数目 $N \geq 10$, 所选地震事件的阈值 L_M 为^[19-20]:

$$L_M = \sqrt{\Delta M^2 + \Delta M^{*2}} \leq 0.1, \quad (2)$$

式中: ΔM 为地震事件的震级与参考点 (M, L) 的震级 M 之差; ΔM^* 为地震事件的震级与根据震级测定公式将震源距 L 转换成的震级 M^* 之差^[8]。

第二步: 利用上述所得的各单台检测概率 $P_D(M, L)$, 计算在空间位置 x 处的地震同时被 i 个台站测到的概率 P_E^i 。当 $i=0$ 时, 有

$$P_E^0 = \prod_{i=1}^S [1 - P_{D,i}(M, L)]$$

进一步计算震级档在位置 x 处 t 时刻的地震台网检测概率 $P_E(M, x, t)$ ^[8]。结合山西台网实际情况, 在地震事件的选择上, 1 个地震至少要被 3 个台站记录到作为计算标准, 相当于扣除仅被 0、1 和 2 个台站记录的联合概率, 即在此条件下计算地震台网检测概率为:

收稿日期: 2022-07-05

基金项目: 山西省地震局科研项目(SBK-2118)。

第一作者简介: 梁向军(1978—), 女, 山西孝义人。高级工程师, 主要从事地震监测与研究, E-mail: liang_xj2005@163.com。

通讯作者: 吴叔坤(1977—), 男, 广东增城人。高级工程师, 主要从事地震监测与研究, E-mail: 76558847@qq.com。

$$P_E(M, x, t) = 1 - \sum_{i=0}^2 P_E^i$$

此外,进一步得到所有震级档 M 在位置 x 处 t 时刻的最小完整性震级 M_p 为:

$$M_p(x, t) = \min_{M \in M_0} M \mid P_E(M, x, t) = 1 - Q,$$

式中: Q 为地震被漏掉的阈值水平, 设为 $0.01^{[8]}$ 。

1.2 震级一序号法、最大曲率 MAXC 方法和最优拟合度 GFT 方法计算原理简述

M_c 计算方法主要是基于震级不小于 M_c 的地震在震级一频度分布上满足 G-R 关系的假定^[21], 即

$$\lg N = a - bM.$$

认为这些地震的记录是完整的^[22-25]。其中 N 为震级 $\geq M$ 的累积地震数, a 和 b 值为常数, 当震级一频度分布中能满足 G-R 关系时, 对应的最小起始震级即为 $M_c^{[26]}$ 。

用震级一序号法研究 M_c 的变化特征, 最大曲率 (maximum curvature method, 简称为 MAXC) 方法将震级一频度曲线的一阶导数最大值对应的震级作为 M_c ; 90% 和 95% 拟合优度法, 即 GFT (goodness-of-fit test, 简称为 GFT) 通过搜索给定的实际与理论震级一频度分布下的拟合程度百分比来确定 $M_c^{[27]}$, 详细的研究方法原理见文献^[27]。上述三种不同的研究方法同时使用, 优先级别顺序设为 $GFT-95\% > GFT-90\% > MAXC$, 选定优先级别最高的 M_c 为最终结果^[27], 以此解决由于结果不唯一带来的优选问题。

2 研究资料选取

山西数字地震台网共接收 74 个地震台站记录的信号, 其中 57 个台站为山西省内, 17 个台站为邻省 (河北、内蒙古、陕西和河南台网) 共享。由于 PMC 方法基于概率统计学方法, 只有足够多的地震数量才能保证测出的台网监测能力数据更加客观、准确。山西数字地震台网始测于 2000 年, 先后经历“九五”“十五”改造, 台站数量和密度不断增加, 从 2015 年开始无新增台站, 为保证多种方法测定结果的稳定性以及同期对比的科学性, 本文采用的四种研究方法均使用 2015 年 1 月至 2019 年 12 月产出的可定位地震目录及其对应的观测报告数据。从图 1 看出, 山西地区地震定位所用台站的分布较均匀, 地震密集区略显稀疏。下文将用 PMC 方法和震级一序号法、最大曲率 MAXC 方法和最优拟合度 GFT 方法来评估山西测震台网的监测能力。

3 研究结果

3.1 PMC 计算结果

图 2a 为利用山西省内 57 个台站获得的山西地区

基于概率的最小完整性震级 M_p 空间分布图, 图 2b 为含周边省份 17 个台站后获得的 M_p 空间分布图。为方便对比分析, 在图中同时标注所用的台站位置。由图 2 可见, 对比共享邻省 17 个台站前后的结果, 省内中间绝大多数区域最小完整性震级等值线基本无变化, 但省界附近的监测能力有一定的提升, 如晋陕豫交界区监测能力由之前的 $M_L 2.0$ 及以上提升到 $M_L 1.7$, 晋冀蒙交界区由之前的 $M_L 2.0$ 提升到 $M_L 1.5$, 说明共享台站对拾震能力发挥出重要作用。两侧隆起区的省界附近监测能力变化不大, 是由于隆起区本身地震发生率偏低, 即使增加省外台站, 拾震率也不会有太高的提升。同时从图 2b 还可以发现, 由于内蒙古、陕西、河

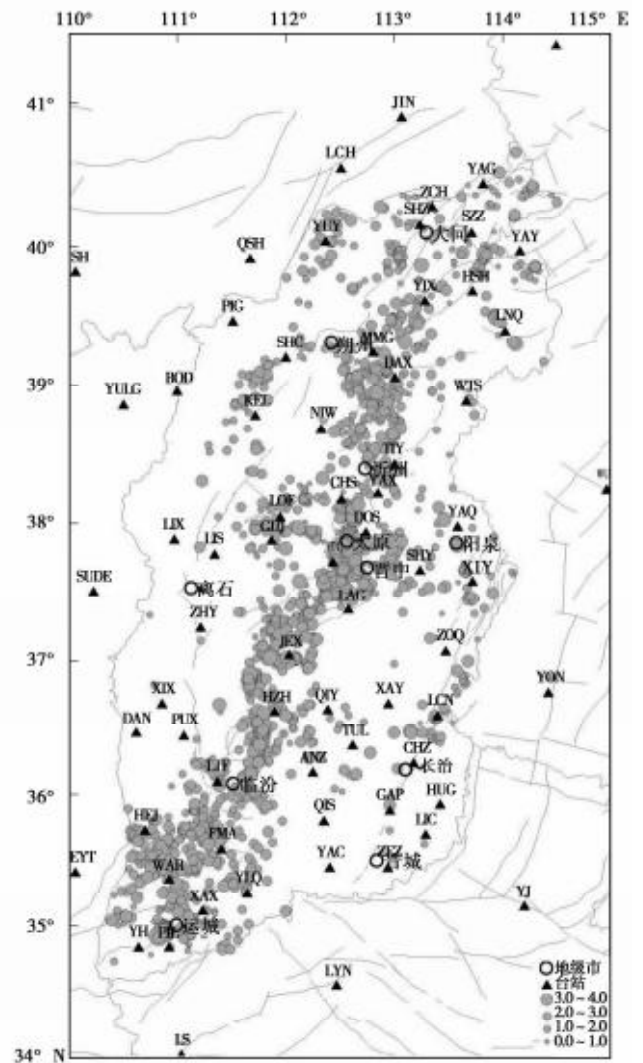


图 1 2015 年 1 月至 2019 年 12 月研究区
所选地震震中分布图

Fig. 1 Distribution map of earthquake epicenters selected for the study area from January 2015 to December 2019

南、河北四省共享台站数量上的差异,如只共享河南台网的3个台站、河北台网的4个台站,山西与河南、山西与河北交界处的监测能力较山西与内蒙古、山西与陕西交界地区的监测能力还是偏低。从山西地区整体来看,监测能力最强(M_{min})的地区主要集中在大同一

镇川—山自皂—阳高、岢岚—神池—雁门关—宁武、定襄—岔上—东山、介休—沁源—屯留、万荣—夏县—平陆等台站围限的区域,均能监测到 $M_L 1.0$ 及以下的地震;其余区域的监测能力下限为 $M_L 1.5$ 。

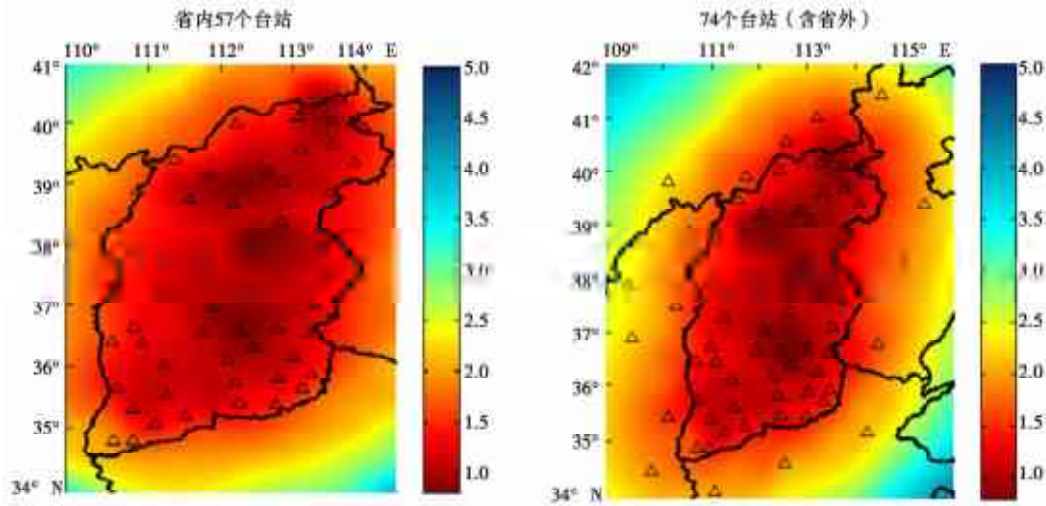


图2 山西地区最小完整性震级分布 M_{\min} 图

Fig. 2 Map of the minimum completeness magnitude distribution in the Shanxi region

3.2 震级—序号法、最大曲率 MAXC 方法和最优拟合度 GFT 方法计算结果

用定性评估震级的震级—序号法得到山西地区2015年1月至2019年12月的13 716次可定位地震(见图3)的最小完整性震级 M_c 的结果显示,地震数量均达到100以上的震级水平为 $M_L 1.0$ 及以下,多方法定量结果与震级—序号法结果基本一致,最小完整性震级 M_c 为 $M_L 0.5 \sim 0.9$ 。最大曲率 MAXC 方法和拟合度分别为90%和95%的GFT方法最小完整性震级 M_c 的计算结果(见图4)显示,山西地区最小完整性 M_c 大致为 $M_L 0.6 \sim 0.9$ (根据选取的最优结果(GFT—95%为 M_c —best)),各方法得到的最小完整性震级结果如表1所示。 M_c 随时间的变化较平稳,与2015年以来山西台网的台站数未增加(最大台间距在70 km左右)密切相关。山西地区2015年以来 $M_L 1.0$ 地震都能被监测到,与王霞等^[27]利用1970—2012年得到的研究结果较一致。

法、90%和95%拟合优度法只给出一个平均的监测能力,基于概率的完整性震级(PMC)方法能直观地体现出山西不同区域、不同震级水平的监测能力。因此,PMC方法适用于指导山西台网优化布局方案,震级—序号法、最大曲率法、90%和95%拟合优度三种方法适用于定性评估山西地区的监测能力。

4 讨论

基于概率的完整性震级(PMC)方法与震级—序号法、最大曲率法、90%和95%拟合优度法相比,结果相差较大,后三种方法的 M_c 大致为 $M_L 0.6 \sim 0.9$,比较宽泛。用PMC方法测算的 M_c 仅有5个小区域能接近这个水平。究其原因,震级—序号法、最大曲率

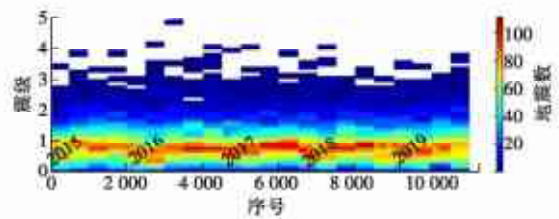


图3 山西地区2015—2019年地震事件震级—序号图

Fig. 3 Magnitude-Number plot of earthquake events in the Shanxi region from 2015 to 2019

山西地震主要集中在中部的各大断陷盆地内(见图1),从图2的 M_{\min} 空间分布来看,监测能力高的区域除大同—镇川—山自皂—阳高、定襄—岔上—东山等台站围限的区域覆盖大同盆地、太原盆地部分区域外,整体上地震密度大的区域并不是监测能力最高的,如大同盆地西南地区监测能力低于东北地区,原因是台

站主要集中在东北地区,西南地区只有一个右玉台(YUY),此外,朔州地区的台站也较稀疏。太原盆地也类似,台站分布极不均匀,大多数集中在盆地的东北部,中部和南部各有太谷台(TAG)和介休台(JEX),台间距最大达84 km,盆地西边界仅有晋祠台,西侧隆起区台站也远离盆地西侧的控盆边界断裂,导致很多小震未被记录到。在临汾盆地西侧,只有一个大宁台(DAN),也属于严重缺少台站的情况,且缺少陕西共享台站。相反,在少震的长治地区出现高 M_p 值,这是由于该地区的台站分布密集、台间距小且比较均匀,较小的地震也基本都能记录到,成为山西的高监测能力地区。因此,一方面,为提高山西边界地区的地震监测能力,山西台网需要共享更多的台站(见图5),将网缘地震变为网内地震,其定位精度会明显改善,速报质量也随之提高;另一方面,结合本文最小完整性震级分布 M_p 图研究结果,建议在小震密集区,如大同盆地、忻定盆地、太原盆地、临汾盆地和运城盆地内的台站稀疏地区,增加台站数量,且尽可能保证台站均匀分布。

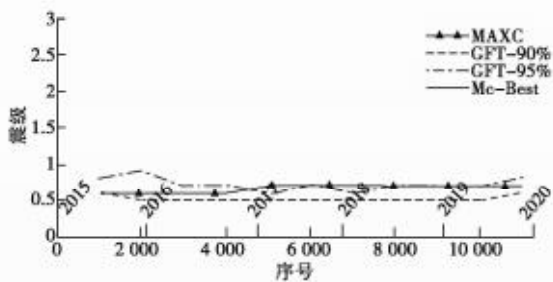


图4 不同方法的山西地区最小完整性震级 M_c 时序变化曲线

Fig. 4 Time series curves of the minimum completeness magnitude M_c for the Shanxi region using different methods

表1 GFT-90%、GFT-95%和MAXC最小完整性 M_c 值
Table 1 Minimum completeness M_c values for GFT-90%, GFT-95%, and MAXC

研究方法	最小完整性 M_c 值
GFT-90%	$M_L0.5\sim0.7$
GFT-95%	$M_L0.6\sim0.9$
MAXC	$M_L0.6\sim0.7$

国家预警台站于2021年9月已进入内部试运行阶段,较之前的台站数量有大幅度的增长,新增1 096个,包括81个基准站、154个基本站、861个一般站。其中重点预警区内有1 083个台站,台站密度为每万平方千米约81个台站,平均台间距为9.6 km;一般预警区内有13个台站,台站密度为每万平方千米约6个台站,平均台间距为42.06 km。相比山西测震

台网原运行的57个测震台站,监测能力会有大幅的提升。利用山西预警台网基准站速度计的噪声水平,按照近震震级公式计算全省的理论监测能力可知,监测能力达到 $M_L0.5$ 的占山西地区70%的区域,其余地区的监测能力达到 $M_L1.0$ (见图6)。由于目前预警台网运行时间较短,待数据记录时间达到1 a以上时,可采用PMC方法重新评估预警台网的监测能力,从而客观给出基于地震记录的实际监测水平,为后续在台网优化改造提供参考。

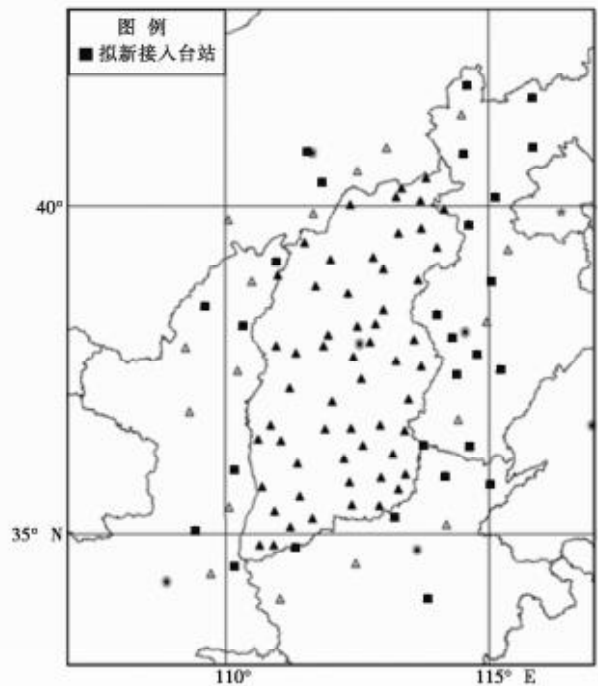


图5 山西台网拟新接入的邻省台站分布图

Fig. 5 Distribution map of stations in neighboring provinces newly proposed to be connected to the Shanxi network

5 结论

本文在2015—2019年地震目录和地震观测报告数据基础上,分别利用4种不同的方法开展山西地区最小完整性震级 M_c 的计算和对比分析,并结合既有的台站布局和邻省共享台站情况进行讨论,得到如下结论和认识:

(1) 基于概率的完整性震级(PMC)方法计算结果更加精细,可从空间上给出不同地区的最小完整性震级 M_c 分布情况,对于指导山西台网优化布局具有一定的参考价值。

(2) 共享邻省台站后,晋陕豫交界地区的监测能力由共享前的 $M_L2.0$ 及以上提升到 $M_L1.7$,晋冀蒙交界区的由共享前的 $M_L2.0$ 提升到 $M_L1.5$,两侧隆起区

的监测能力变化不明显。

(3) 大同一镇川—山自皂—阳高、岢岚—神池—雁门关—宁武、定襄—岔上—东山、介休—沁源—屯留、万荣—夏县—平陆等台站围限的区域, 均能监测到 $M_L 1.0$ 及以下的地震, 其余区域的监测能力下限为 $M_L 1.5$ 。

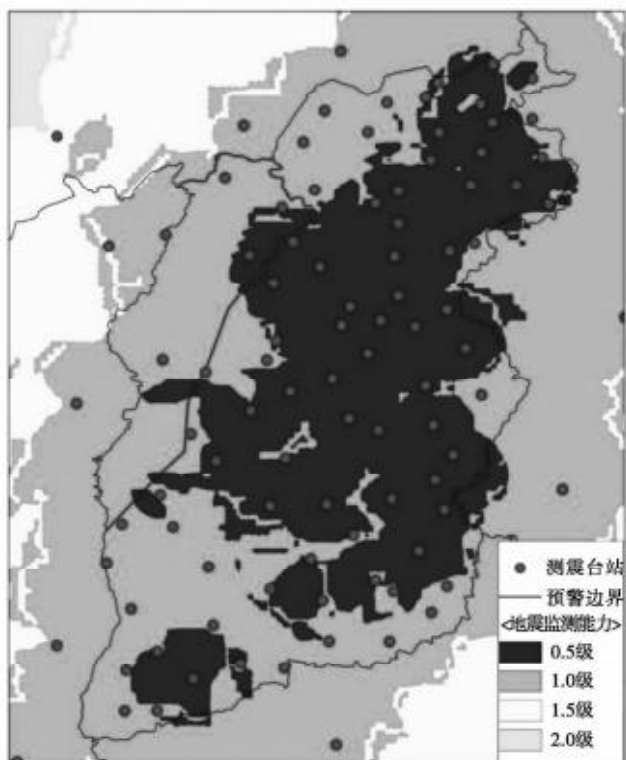


图6 山西预警台站理论监测能力图
Fig. 6 Theoretical monitoring capability map of the Shanxi early warning stations

参考文献:

[1] Cao A M, Gao S S. Temporal variation of seismic b-values beneath northeastern Japan island arc[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(9): 1334.
[2] Wiene S, Wyss M. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes[J]. Adv Gerphys, 2002, 45(I-V): 259-302.
[3] Woesser J, Rivere F, Crusem R. Assessing the quality of earthquake catalogs: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainties[J]. Bull Seismol Soc Am, 2005, 95(4): 684-698.
[4] 冯建刚, 蒋长胜, 韩立波, 等. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J]. 地震学报, 2012, 34(5): 646-658.
[5] 李志海, 蒋长胜, 黄瑜, 等. 新疆地区地震目录完整性分析和台网科学布局研究[J]. 地震学报, 2011, 33(6): 763-

775.
[6] 刘丽芳, 李志海, 蒋长胜. 云南地区地震目录最小完整性震级研究[J]. 地震研究, 2012, 35(4): 491-499.
[7] Schorlemmer D, Woessner J. Probability of detecting an earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(5): 2103-2117.
[8] 王亚文, 蒋长胜. 南北地震带地震台网监测能力评估的不同方法比较研究[J]. 地震学报, 2017, 39(3): 315-329.
[9] 安祥宇, 赵倩, 王晓睿, 等. 基于 PMC 方法的辽宁测震台网监测能力评估[J]. 地震工程学报, 2019, 41(6): 1545-1552.
[10] 蒋长胜, 房立华, 韩立波, 等. 利用 PMC 方法评估地震台阵的地震检测能力——以西昌流动地震台阵为例[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 832-843.
[11] 李智超, 黄清华. 基于概率完备震级评估首都圈地震台网检测能力[J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2584-2593.
[12] 刘芳, 蒋长胜, 张帆, 等. 内蒙古区域地震台网监测能力研究[J]. 地震学报, 2014, 36(5): 919-929.
[13] 王鹏, 郑建常, 李铂. 基于 PMC 方法的山东省测震台网监测能力评估[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2408-2414.
[14] 张玲, 梁向军, 董春丽, 等. 山西数字地震台网监测能力分析[J]. 山西地震, 2010(4): 11-16.
[15] 高跃雄, 李兵, 彭丽娟, 等. 山西数字测震台网台站监测能力分析[J]. 山西地震, 2011(4): 9-16.
[16] 耿伟, 宋美琴. 山西地震台网监测能力研究[J]. 山西地震, 2014(2): 29-32.
[17] Nanjo K Z, Schorlemmer D, Woessner J, et al. Earthquake detection capability of the Swiss Seismic Network [J]. Geophysical Journal International, 2010, 181(3): 1713-1724.
[18] Schorlemmer D, Mele F, Marzocchi W. A completeness analysis of the national seismic network of Italy [J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115 (B4): B04308.
[19] Schorlemmer D, Woessner J. Probability of detecting an earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(5): 2103-2117.
[20] Gentili S, Sugan M, Peruzza L, et al. Probabilistic completeness assessment of the Past 30 years of Seismic monitoring in northeastern Italy [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2011, 186(1/2): 81-96.
[21] Gutenberg R, Richter C F. Frequency of earthquakes in California [J]. Bull Seism Soc Amer, 1944(34): 185-188.
[22] Woessner J, Wiemer S. Assessing the quality of earthquake catalogs: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainties [J]. Bull seism Soc Amer, 2005, 95(4): 684-698.
[23] Wiemer S, Wyss M. Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan [J]. Bull Seism Soc Amer, 2000(90): 859-869.
[24] Cao A M, Gao S S. Temporal variation of seismic b-val-

- ues beneath northeastern Japan island arc[J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29 (9): 1334. doi: 10. 1029/2001GL013775.
- [25] Marsan D. Triggering of seismicity at short timescales following Californian earthquakes[J]. *J Geophys, Res*, 2003, 108(B5): 2266. doi: 10. 1029/2002JB001946.
- [26] Amorese D. Applying a change-point detection method on frequency-magnitudedistribution[J]. *BullseismSoc Amer*, 2007, 97(5): 1742-1749.
- [27] 王霞, 宋美琴, 李丽, 等. 山西地区不同时段地震目录最小完整性震级研究[J]. *地震*, 2014, 34(2): 82-88.

Evaluating the Monitoring Capability of the Shanxi Seismic Network Using Different Methods

LIANG Xiangjun^{1,3}, WU Shukun², WANG Xia^{1,3}, LIU Linfei^{1,3}

(1. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 030021, China; 2. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou, Guangdong 010010, China; 3. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan, Shanxi 030025, China)

Abstract: Based on the earthquake catalog and observation report data recorded by the Shanxi digital seismic network from 2015 to 2019, various methods including the "Probability-based Completeness Magnitude" (PMC) method, Magnitude-Number (M-N) method, Goodness-of-Fit Test (GFT) method, and the Maximum Curvature (MAXC) method are used to evaluate the monitoring capability of the Shanxi seismic network. A comparative analysis is conducted by considering the actual conditions of the Shanxi seismic network and the computational principles of different evaluation methods. The results show that apart from the areas confined by certain stations where earthquakes of ML1.0 and below can be detected, the lower limit of monitoring capability for other regions is ML1.5. The "Probability-based Completeness Magnitude" method is more suitable for evaluating the monitoring capability of the Shanxi seismic network. With the official operation of the early warning network, it is recommended that this method be used to re-evaluate the actual monitoring capability of the earthquake early warning network.

Key words: monitoring capability; Shanxi region; PMC method; Magnitude-Number method; Goodness-of-Fit Test method

(上接第 32 页)

Analysis of the Influence of Electrified Railways on the Second Value of Z-component in Geomagnetic Observation at Changli Station

TONG Xin¹, ZHANG Guoling², GUO Jianfang¹, ZHOU Jianqing¹, YIN Jinping³

(1. Tangshan Seismic Monitoring Center Station, Hebei Earthquake Agency, Tangshan, Hebei 063000, China; 2. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 3. Ganzhou Disaster Prevention and Reduction Center, Jiangxi, Ganzhou 341000, China)

Abstract: The interference of electrified railways on geomagnetic observations is caused on one hand by the ferromagnetic substances of the railway itself, and on the other hand by the magnetic field generated by the high voltage electric arcs during locomotive operation. This paper mainly analyzes the characteristics of the influence of electrified locomotive operation on the vertical component of geomagnetic observation at Changli Station. The results show that the interference pattern is mainly characterized by sudden spikes, with an interference amplitude of about $0.5 \sim 5 \text{ nT}$; the direction of interference caused by both sides of the electrified railway is opposite, while it is the same on the same side; the closer the measurement point is to the railway, the greater the impact on the observation value. Through research and analysis, the impact of the operation of electrified locomotives on the geomagnetic observation values at Changli Station is clarified, providing a reference for the correct application of observation data.

Key words: geomagnetic observation; interference; electrified railway

承德地区摆式仪器观测背景功率谱密度特征分析

周 硕,王嘉琦,王向亮,李明威

(河北省地震局承德地震监测中心站,河北 承德 067000)

摘要:为获取承德地区摆式倾斜仪捕捉的地震前兆信息及仪器性能,利用功率谱密度分析方法研究3台VP型垂直摆和1台水平摆倾斜仪的噪声频谱特征。研究表明,正常情况下,4台仪器记录的主要背景噪声为0.2 Hz以下的低频自然环境噪声;降雨事件主要影响0.2 Hz以下的低频段;摆式仪器能较好地记录到地震波,近震为更多高频成分,远震以记录面波占主导;地震事件可导致0~0.3 Hz频段的噪声显著增加;仪器标定过程中,低频噪声会显著增加。

关键词:摆式倾斜仪;功率谱密度;背景噪声

中图分类号:P315.62

文献标志码:A

0 引言

地震形变观测是获取地壳变化综合信息的重要手段之一。地形变可以直接反映出地壳深部的变化过程和震源区的演化特征。倾斜测量是捕捉地壳微小变形的高灵敏度观测方法,利用高精度的摆式仪器进行观测,可以获得地壳发生的秒级变化信息,为研究地震成因与震兆提供重要线索^[1-3]。VP型倾斜仪具有2 s-1 yr的超宽频带和高采样率,能捕捉地壳长期稳定变化与短期震动的全过程。SQ-70DSI倾斜仪实现了秒级数据采集,时空分辨率较高,更适用于研究地震震兆等短期异常变化。这两种仪器的使用可以全面监测地壳变化,为研究地震过程提供详实的时空变化信息。但无论何种观测环境都难以完全避免各类环境噪声的干扰,这在一定程度上影响信号的采集与分析^[4-9]。为提高观测精度和后续分析结果的准确性,有必要研究不同观测条件下观测到的背景噪声特征,明确噪声对研究信号的干扰程度与规律。目前,功率谱分析(PSD)方法常用于地震计及重力观测,赵莹等已开展一定的研究探讨倾斜观测的频率响应特征和噪声来源,但多数局限于单台观测,对不同于干扰条件下的响应特征缺乏分析^[10-13]。承德地区具有代表性的高精密摆式观测监测网,可为检验和完善相关规律提供有利条件。

本文以高精度宽频带垂直摆倾斜仪(VP型)和石英摆倾斜仪(SQ-70DSI)观测承德地区地震形变的资料为基础,选取承德地区在两种倾斜仪正常观测段和

不同干扰源观测段的秒数据,利用功率谱分析(PSD)方法研究其背景噪声在频域的分布特征。通过对比分析不同观测条件、不同仪器观测的结果,了解承德台站的观测环境特征,为提高观测质量与后续震情研判的准确性提供参考依据。

1 台站参数

承德台位于冀北隆升区内,冀北隆升区南以尚义—古北口断裂与燕山隆升区相邻,北在康保—围场断裂以北。本区是燕山山脉北部的组成部分,主要构造线和山脉走向为近东西向。主要断裂有近EW向的尚义—平泉断裂,该断裂自尚义向东经崇礼、赤城、汤河口、下板城至平泉,是尚义—北票断裂的中段,大致沿北纬41°线展布张北—沽源断裂、康保—赤峰断裂和干沟窑断裂,NEE向的东河套—平泉断裂和NE向的双峰寺—红石砬断裂。

承德地区共布设VP型垂直摆倾斜仪(以下简称VP仪)3套,分别架设在承德台、丰宁台和宽城台进行形变观测(见表1、图1)。承德地震台地质构造为燕山沉陷带、承德台凸的中部,岩性为变质片麻岩、砾岩,观测洞室植被良好,仪器室顶部和旁侧的覆盖在40 m以上,仪器室年温差小于0.3℃。丰宁地震台观测山洞土层覆盖较厚,达到25 m左右,南侧有丰宁—隆化断裂带,仪器室年温差小于2℃。宽城地震台山洞位于燕山构造带马兰峪大背斜东翼、宽城盆地边缘,岩性为震旦纪灰岩,地貌为高山区,洞顶覆盖厚度为20~40 m,仪器室年温差小于0.5℃^[14]。

收稿日期:2023-06-16

基金项目:河北省地震局科技星火项目一攻关项目(DZ2023120800009)。

第一作者简介:周 硕(1985—),男,河北承德人。助理工程师,主要从事地震形变观测研究工作,E-mail:zsrqxzyh@163.com。

通讯作者:王嘉琦(1991—),男,河北承德人。工程师,主要从事地震监测研究工作,E-mail:wjq6020373@163.com。

2 方法原理

本文选取 2016 年 1 月 1 日至 12 月 31 日承德地区 VP 仪和 SQ-70DSI 型倾斜仪(以下简称 SQ-70DSI 仪)采集的原始秒数据进行研究(见图 2)。首先,对两种仪器观测的数据进行预处理,去除数据中的线性趋势项和固体潮影响,得到地震噪声数据;将一天的连续地震噪声数据 $x(j)$ 分割为 4 个重叠 50% 的数据段,每个数据段时长为 1 h,采样率为秒级。利用快速傅里叶变换,估算每个数据段的功率谱密度(PSD):

$$PSD = \frac{\Delta t}{N} \left| \sum_{j=1}^n x(j) \exp(2\pi i(j-1)(k-1)/N) \right|^2。$$

为提高计算速度和减少“频谱泄露”效应,选择重叠窗技术。运用如上公式计算每个数据段的 PSD,取 4 段 PSD 的算术平均值,得到当日的地震噪声总体 PSD^[15]。重复该过程,获得两种倾斜仪 2016 年每日的 PSD 曲线。将频率划分为 11 个频率段,每个频率段宽度为 0.1 Hz,频率范围为 0.01~10 Hz。在每个频率段内选取 PSD 的算术平均值,得到地震噪声功率随频率的变化特征。同时,以日为单位,统计每个频率段内 PSD 的算术平均值,讨论地震噪声功率在不同频率下的时空分布特征。

表 1 承德地区摆式仪器基本参数表

Table 1 Basic parameters of pendulum instruments in the Chengde area

台站名称	仪器型号	覆盖层厚度/m	洞进深/m	台基岩性	采样率/s	分辨力/ $10^{-3}''$
承德台	VP 垂直摆	40	52	片麻岩、砾岩	1	0.2
宽城台	VP 垂直摆	40	69	灰岩	1	0.2
丰宁台	VP 垂直摆	25	113	花岗岩	1	0.2
	SQ-70DSI 水平摆	25	92	花岗岩	1	0.2

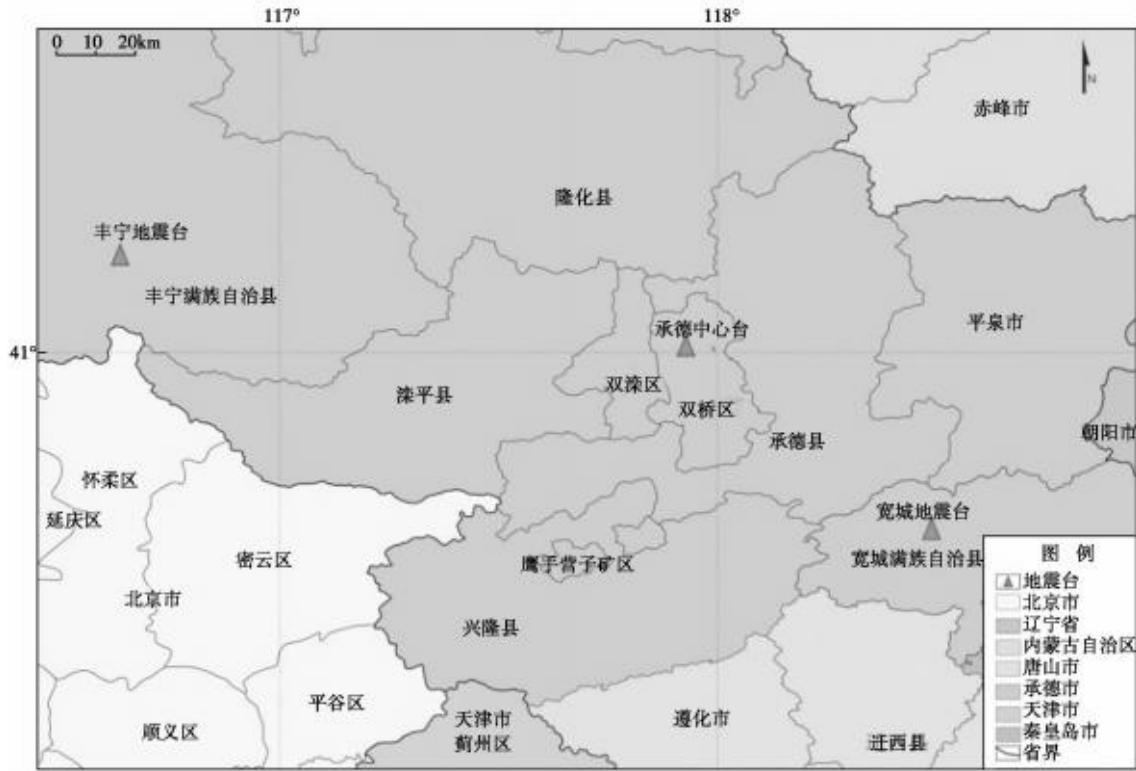


图 1 承德地区地震台站分布图

Fig. 1 Distribution map of seismic stations in the Chengde area

3 观测资料的功率谱密度响应特征

VP 仪与 SQ-70DSI 仪均为秒采样,选取不同特征时段当天 NS 向秒数据作为研究对象。对两种仪器的观测数据进行预处理,去除数据中的线性趋势项和

固体潮影响,得到地震噪声数据。将一天的地震噪声数据分割为 24 个小时的数据段,利用快速傅里叶变换,计算每个数据段的功率谱密度。在 0~0.5 Hz 低频范围内的 PSD 平均值作为当天该仪器的背景噪声水平。

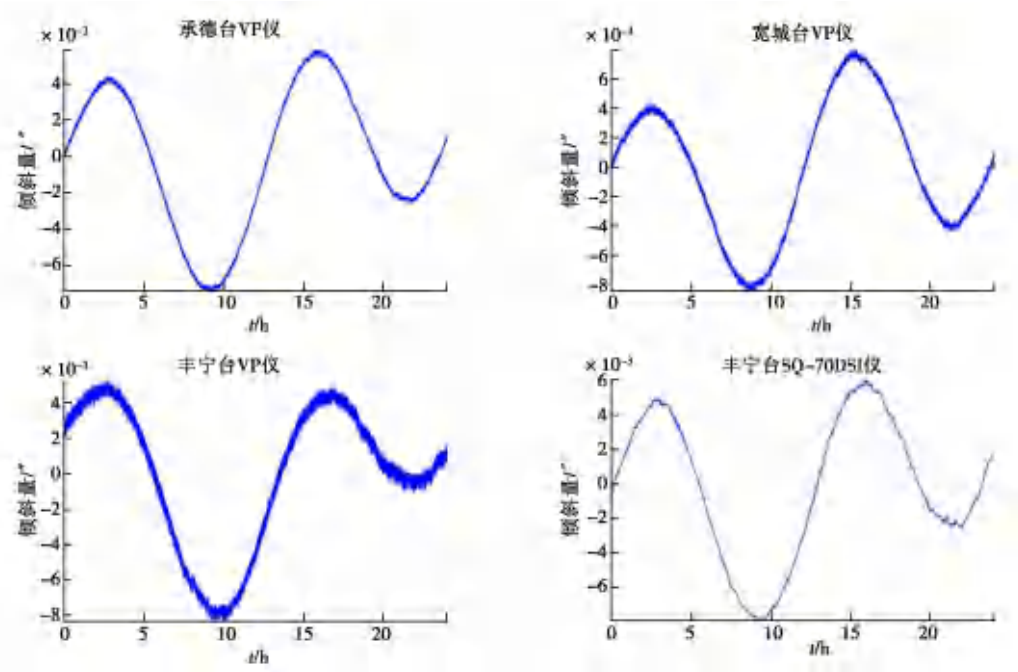


图2 承德地区摆式仪器观测数据原始曲线

Fig. 2 Original curves of observational data from pendulum instruments in the Chengde area

3.1 正常日变特征分析

选取2021年1月9日承德地区两种倾斜仪的观测数据,研究其在未受任何环境干扰时的地震噪声时频特征(见图3)。结果显示,两种仪器观测到的地震噪声功率谱密度在0.2 Hz频段内达到峰值,约-10 dB/Hz,表明主要的背景噪声为低频自然环境噪声。VP仪在0.01~0.1 Hz和1~10 Hz频段的PSD略高于SQ-70DSI仪,但差异在10%以内,说明VP仪对低频信号更加敏感,SQ-70DSI仪在中高频段的

灵敏度更高。地震噪声日变化结果表明,两种仪器观测到的PSD在白天稳定,夜间略有增加,与人为活动趋势一致。VP仪PSD在23点至次日1点之间增幅更大,SQ-70DSI仪在21-23点之间增幅较小,这表明VP仪对周边环境的影响更加敏感,特别是人为活动,与其更高的频率响应范围相关。丰宁台垂直摆噪声PSD较大,达到-26 dB/Hz,同台的水平摆噪声为-64.62 dB/Hz,考虑到两台仪器处于相同的观测环境,说明丰宁台垂直摆噪声可能主要源于仪器本身。

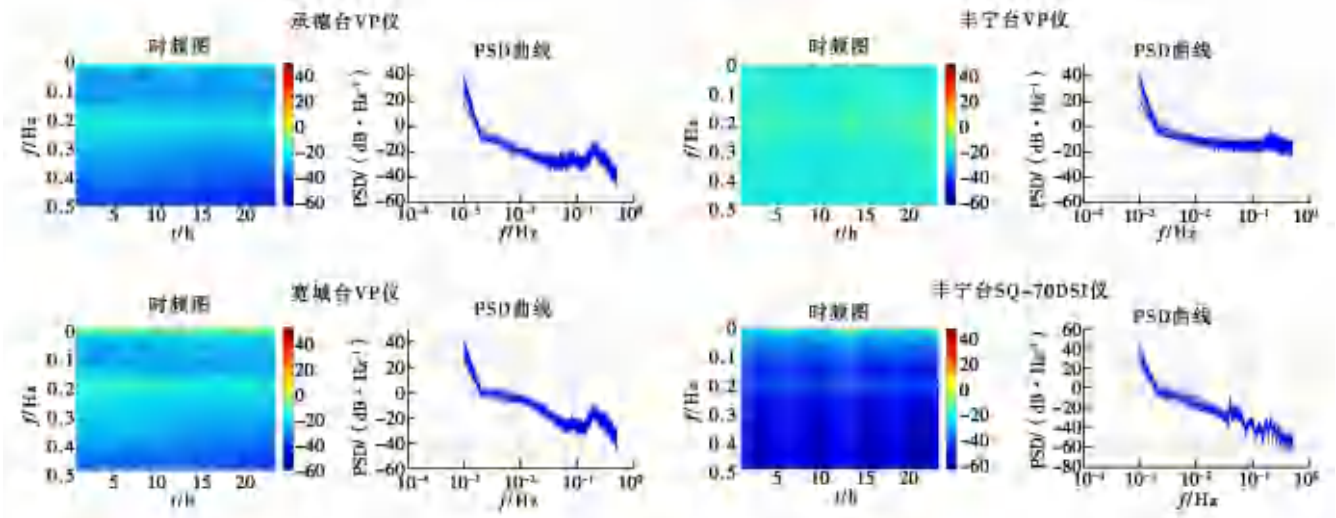


图3 承德地区摆式仪器正常动态计算结果

Fig. 3 Normal dynamic calculation results of pendulum instruments in the Chengde area

3.2 各类干扰特征分析

在定点形变观测中常常受到各种非观测信号源的干扰,一般分为人为干扰、观测系统干扰、自然环境干扰、震扰等。本文重点分析对观测数据背景影响较大,次数较频繁、特征较明显的自然环境干扰和震扰以及人为干扰的典型事件。按照对观测曲线造成的变化进行分类,分析其噪声功率谱密度特征。

3.2.1 自然干扰

摆式仪器相较于其他形变仪器受自然环境干扰较小,在各种自然环境中受降雨干扰较大。当雨水渗入改变介质密度时,引起局部介质加速变形,仪器基墩和

仪器本体受力改变,产生的数据随之发生变化,表现为固体潮曲线短时畸变或波动。

选取承德台 2021 年 7 月 1 日、宽城台 2021 年 8 月 1 日、丰宁台 2021 年 6 月 27 日受降雨干扰较明显的特征曲线作为研究对象,计算其噪声功率谱密度并作时频图,得到承德地区摆式仪器降雨干扰计算结果(见图 4)。由图 4 可见,4 台仪器受降雨干扰时,主要影响低于 0.2 Hz 的低频部分,高频部分基本不受影响。丰宁台水平摆受降雨干扰的影响峰值在 10 dB/Hz,比垂直摆的抗干扰能力强。

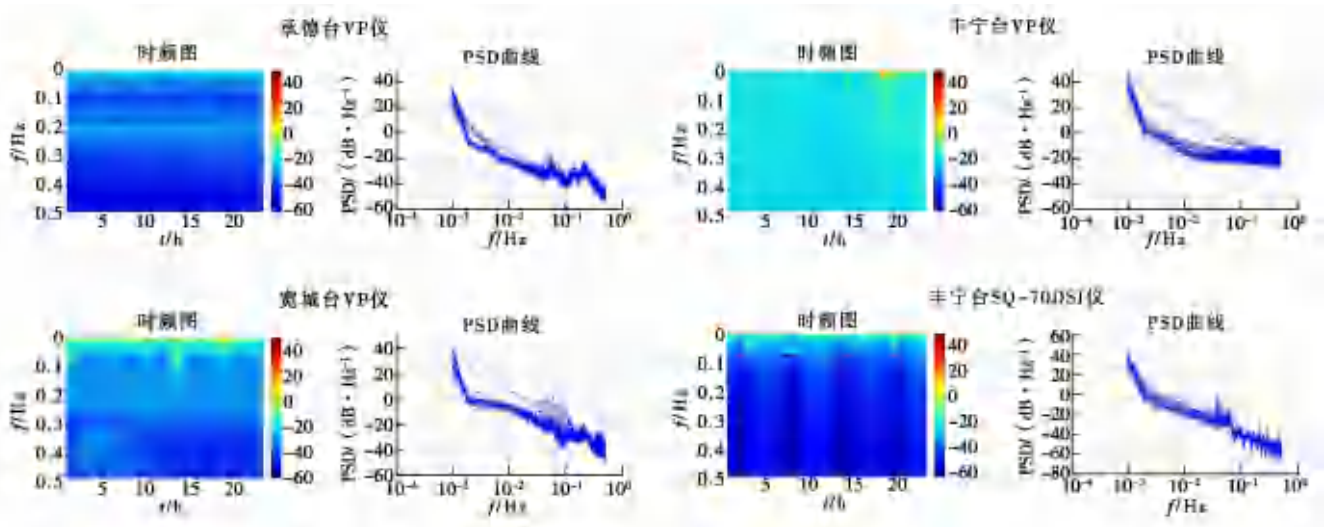


图 4 承德地区摆式仪器受降雨干扰时计算结果

Fig. 4 Calculation results of pendulum instruments in the Chengde area affected by rainfall interference

3.2.2 地震波

摆式仪器能记录到大部分地震波形,近震在曲线上通常表现为同震阶变,中远地震在曲线上能较好地记录到 P 波及 S 波到时。选取 2021 年 3 月 17 日 2 时 38 分 22 秒在堪察加东海岸附近海域发生的 M6.4 地震和 2020 年 7 月 12 日 6 时 38 分 25 秒在河北唐山古冶发生的 M5.1 地震当天 4 台仪器的数据作为研究对象进行分析。由地震参数表 2 可知,近震和远震的响应参数差异显著。近震响应延迟时间短,震中距小,最大震幅大,持续时间长;远震则相反,响应较弱且短暂。这表明地震波在传播路径上遭受的衰减作用导致响应的差异,近震波形可保留更多的高频成分和大幅值。由图 5、图 6 看出:(1) 在两次地震事件期间,4 台仪器的背景噪声显著增加,其时频图呈现纵向条带的扩大,最大值出现在 0~0.1 Hz 频段内。近地震事件的时频图高频能量区较集中,对应体波到达的初期阶段;远地震事件的时频图低频能量较分散,对应面波占主导地位。(2) 从功率谱密度结果来看,4 台仪器对近地震

事件的同震响应频段为 0~0.5 Hz,受到全频段的干扰;对远地震事件的同震响应频段为 0.02~0.5 Hz,主要受高频部分的干扰。(3) 水平摆在近地震事件时段的功率谱密度为 5 dB/Hz,低于同时段的垂直摆,其影响频段也较窄;在远地震事件时段功率谱密度达到 50 dB/Hz 左右,高于同时段的垂直摆,其影响频段更广,这说明水平摆对远地震事件的记录更敏感。

3.2.3 人为干扰

摆式仪器受人为干扰因素主要为标定、调零,受进洞干扰较小,曲线畸变一般表现为突跳、台阶。选取承德台垂直摆 2021 年 5 月 7 日,宽城台垂直摆 2021 年 6 月 16 日,丰宁台垂直摆 2021 年 7 月 15 日、水平摆 2021 年 7 月 9 日标定数据进行分析,其中承德台、宽城台垂直摆和丰宁台水平摆在标定当天均有震扰,不作为研究对象。由图 7 可以看出,4 台仪器在标定时段的观测背景功率谱密度增大,时频图上出现纵向条带,其中低频部分增大幅度明显大于高频部分,且随着频率升高,影响范围及峰值逐渐减小;3 台垂直摆标定

时段功率谱密度曲线形态基本一致,承德台当天两次标定的功率谱曲线基本重合,水平摆由于标定方式原

因,对观测背景的影响在频段和峰值方面均高于垂直摆。

表 2 地震响应参数表

Table 2 Seismic response parameter table

发震地点	发震时间	震级/M	仪器型号	响应延迟时间/s	震中距/km	最大震幅/ $10^{-3}''$	持续时间/s
堪察加东海岸 附近海域	2021-03-17 T02:38:22	6.4	承德 VP 仪	379	3 618	172.562	5 022
			宽城 VP 仪	401	3 623	150.619	4 978
			丰宁 VP 仪	450	3 689	125.232	4 973
			丰宁 SQ-70DSI 仪	398	3 689	334.976	8 633
河北唐山古冶	2020-07-12 T06:38:25	5.1	承德 VP 仪	18	196	48.783	464
			宽城 VP 仪	7	147	87.507	605
			丰宁 VP 仪	25	244	30.365	421
			丰宁 SQ-70DSI 仪	24	244	334.976	401

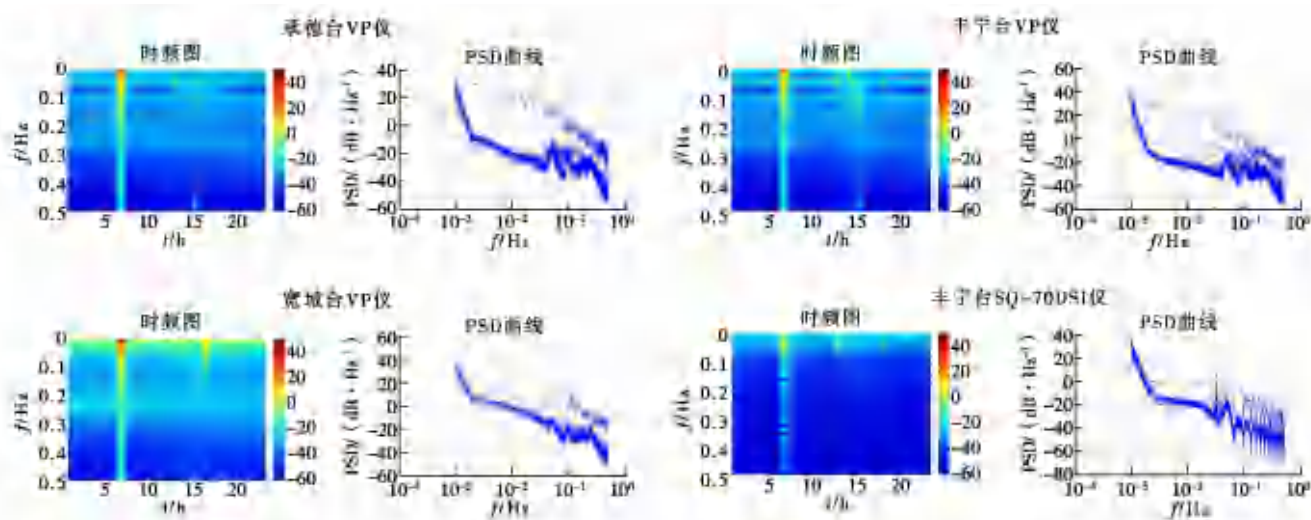


图 5 承德地区摆式仪器 2020 年 7 月 12 日地震时段的计算结果

Fig. 5 Calculation results for the period of the July 12, 2020 earthquake recorded by pendulum instruments in the Chengde area

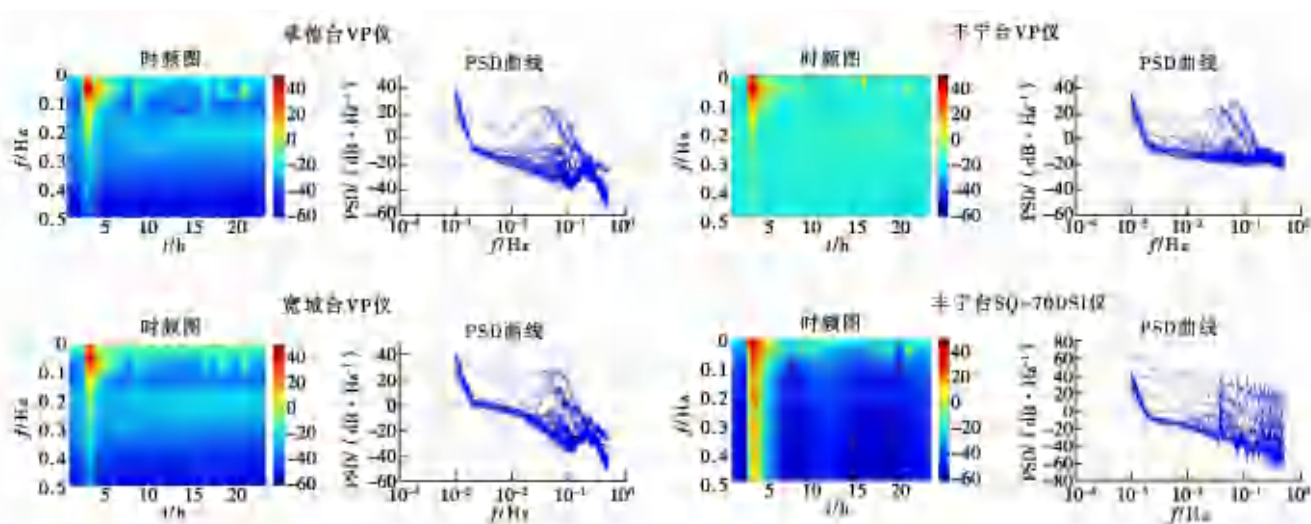


图 6 承德地区摆式仪器 2021 年 3 月 17 日地震时段的计算结果

Fig. 6 Calculation results for the period of the March 17, 2021 earthquake recorded by pendulum instruments in the Chengde area

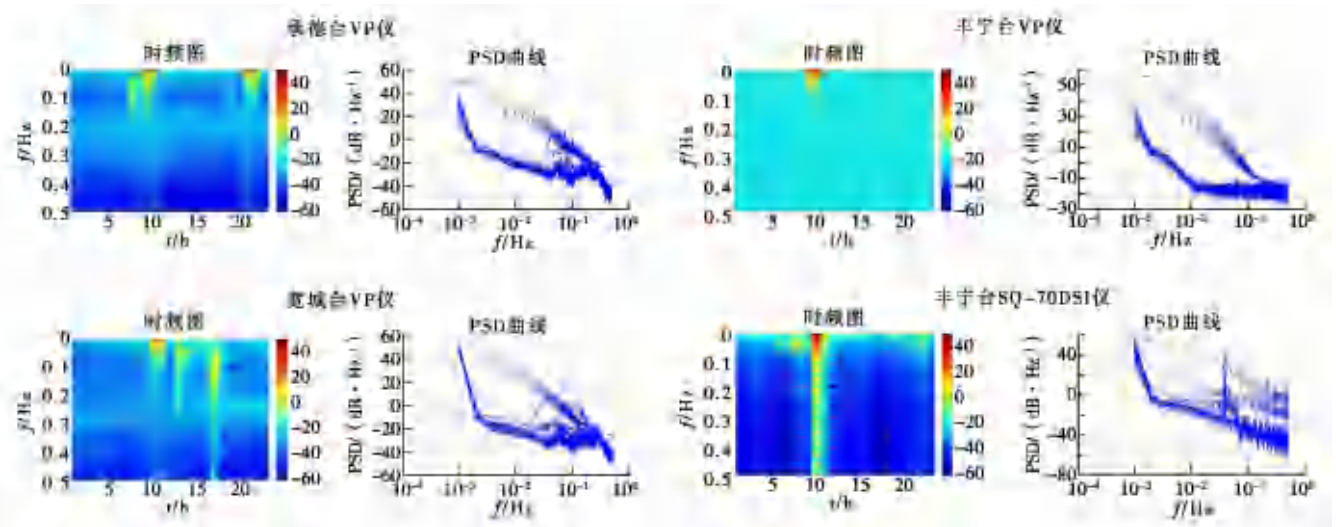


图7 承德地区摆式仪器标定时段的计算结果

Fig.7 Calculation results during the calibration period of pendulum instruments in the Chengde area

4 结论与讨论

本文利用功率谱密度分析法对承德地区3台VP垂直摆、1台水平摆秒采样数据正常时段及干扰时段的噪声信号进行分析。研究发现:

(1) 在未受任何干扰的情况下,4台仪器的功率谱密度变化较小,能够较清晰地记录地脉动信号。时频分析显示0.2 Hz附近存在较清晰的条带,表明主要的背景噪声源是低频的自然环境噪声。

(2) 降雨干扰主要影响0.2 Hz以下的低频部分,高频部分基本不受影响。水平摆较垂直摆具有更强的抗干扰能力。

(3) 摆式仪器由于频率响应范围广,可以较好记录地震波涵盖的广范围频谱成分。近震记录包含更丰富的高频成分和大幅度值;远震相反,面波占主导,记录较弱。地震事件会导致背景噪声水平增加,其中0~0.3 Hz低频段受影响最显著。近震事件下,高频区的噪声能量更集中,对应体波到达的初期阶段;远震事件下,低频区的噪声能量更分散,对应面波占主导。水平摆对远震事件的记录更敏感,不仅受影响的频率范围更广,功率谱密度也更高,这与其抗环境干扰的能力强有关。

(4) 仪器标定过程会导致背景噪声的功率谱密度增大,时频分析显示会出现纵向条带,其中低频部分的增大幅度显著大于高频部分。随着频率的提高,影响范围和峰值会逐渐减小。垂直摆在标定过程中的功率谱密度曲线形态基本一致,水平摆由于标定方式的不同,对背景噪声的影响不仅在频段上更广,峰值也更高,这与其抗环境干扰能力较强有关。

本文通过对不同观测环境下背景噪声的定量分析

得出,0.2 Hz以下主要为自然环境噪声和仪器自身噪声,0.2~0.3 Hz为短期人为噪声频段,0.3 Hz以上主要是仪器自身和环境共同作用频段。因此,在分析观测资料时,通过频率范围就可以初步判断噪声来源。在今后研究中,进一步扩大研究时间范围和事件案例,对上述规律进一步检验和改进,为提高观测质量和分析准确性提供支撑。

参考文献:

- [1] 杨玲英,崔庆谷,毛先进,等. 云龙地震台水管倾斜仪与水平摆倾斜仪同震响应对比分析[J]. 地震研究, 2012, 35(01):48-52.
- [2] 崔庆谷,杨星,杨跃文. 水管仪、垂直摆及水平摆高频段记录数据差异的对比[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(04):175-178.
- [3] 于庆民,卢双苓,郝军丽,等. 泰安地震台形变仪器映震能力统计分析[J]. 地震研究, 2015, 38(03):408-415+517.
- [4] 韩宇飞,江颖,张晓彤,等. 陆态网络太原台gPhone重力仪背景噪声水平研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(05):898-900.
- [5] 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(02):1-4.
- [6] 胡玮,石伟,贾昊东. 乌加河地震台水平摆、水管倾斜仪同震响应对比分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(04):142-146.
- [7] 李惠玲,高云峰,程冬焱,等. VP宽频带垂直摆倾斜仪观测干扰识别[J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 39(02):100-107.
- [8] 李希亮,李惠玲,孟建国,等. 泰安地震台垂直摆和水平摆抗干扰能力对比[J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 39(02):116-120.
- [9] 贾昕晔,贾彦杰,白少奇,等. 宝昌地震台VP型宽频带

- 垂直摆倾斜仪干扰因素分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 39(05): 131-135.
- [10] 赵莹. 全台网垂直摆倾斜仪背景噪声水平分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(08): 869-874.
- [11] 李自芮. 宁夏形变观测典型自然环境干扰因素研究[J]. 国际地震动态, 2019(08): 60-61.
- [12] 侯颖, 余大新, 叶庆东, 等. 北京市测震台网数字地震台站台基背景噪声分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(04): 102-107.
- [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] 王嘉琦, 孙澎涛, 袁国旭, 等. 河北宽城地震台 SS-Y 型钢瓦伸缩仪观测系统更新前后观测数据质量对比分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(03): 134-138.
- [15] 赵莹. VP 垂直摆观测背景的功率谱密度特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(10): 1080-1085+1095.

Analysis of Background Power Spectral Density Characteristics of Pendulum Instruments in the Chengde Area

ZHOU Shuo, WANG Jiaqi, WANG Xiangliang, LI Mingwei

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

Abstract: To capture the seismic precursor information and assess the performance of pendulum inclinometers in the Chengde area, the noise spectrum characteristics of three VP-type vertical pendulums and one horizontal pendulum inclinometer were studied using power spectral density analysis methods. The study results show that under normal conditions, the main background noise recorded by the four instruments is the low-frequency natural environmental noise below 0.2Hz; rainfall events mainly affect the low-frequency band below 0.2Hz; pendulum instruments can record seismic waves well, with local earthquakes showing more high-frequency components, and distant earthquakes dominated by surface waves; seismic events can lead to a significant increase in noise in the 0-0.3Hz frequency band; during instrument calibration, low-frequency noise will significantly increase.

Key words: pendulum inclinometer; power spectral density; background noise

(上接第 28 页)

- [2] 车用太, 赵文忠, 鱼金子, 等. 京津冀地区井水位的数字化观测及其地震前兆监测效能评估[J]. 地震, 2006, 26(4): 103-112.
- [3] 解晓静. 海南省井水位的数字化观测在地震前兆监测中的效能[J]. 华南地震, 2015, 35(2): 28-36.
- [4] 方震, 孙盼盼, 李军辉, 等. 2012 年 10 月后皖 27 井水位下降成因分析[J]. 地震, 2016, 36(2): 85-92.
- [5] 张昱, 常千军, 陈瑶, 等. 甘肃省地下水观测资料效能评估结果分析[J]. 华南地震, 2012, 32(4): 20-28.
- [6] 王燕, 杨兴悦, 陈雪梅, 等. 甘肃模拟水位资料处理方法研究及映震效能评估[J]. 地震研究, 2013, 36(1): 24-33.
- [7] 张国民, 傅征祥, 桂燮泰, 等. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [8] 范雪芳, 刘耀伟, 吴桂娥, 等. 华北地区水位与水氢中期、中短期前兆异常特征研究[J]. 地震研究, 2010, 33(2): 147-158.
- [9] 王俊, 张军, 陶月潮, 等. 芜湖皖 28 井水位异常综合分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2014, 35(5/6): 172-178.

Analysis and Efficacy Evaluation of Digital Water Level Observation Data from Ma'anshan Well No. 27 in Anhui Province

YUAN Mingwang¹, WANG Jun², LIU Yuanyuan¹

(1. Earthquake Agency of Ma'anshan City, Ma'anshan, Anhui 243000, China; 2. Anhui Earthquake Agency, Hefei, Anhui 230000, China)

Abstract: Well No. 27 in Ma'anshan, Anhui Province, was among the first batch of wells to be digitalized in 2008. To enhance the application of observation data and assess the effectiveness of observation wells, an analysis is conducted on the dynamic characteristics of the well water level, main interference factors, characteristics of abnormal changes, and the hydrochemical characteristics of well water samples. The results indicate that the water level data from Well No. 27 is continuous and reliable, with clear annual patterns and high sensitivity to the crustal stress-strain response. The well has a good correspondence with moderate and strong earthquakes within a 200 km radius and can play a role in the monitoring of medium and short-term precursor anomalies.

Key words: well No. 27; digital water level; data analysis; efficacy evaluation

降雨对宝昌台地电阻率观测的影响

贾彦杰¹, 贾昕晔¹, 白少奇¹, 高云峰², 闫纪文¹

(1. 内蒙古自治区地震局锡林浩特地震监测中心站, 内蒙古 锡林浩特 026000;

2. 内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 宝昌地震台地电阻率 NS 和 EW 测道观测值的年变形态均为夏低冬高型, 夏季降雨对观测数据造成快急始—慢恢复的短期变化。为进一步研究该变化的特征, 结合台站地下电性结构和区域降雨数据, 采用影响系数理论和褶积滤波方法分析降雨对宝昌台地电阻率观测的影响。结果显示, 台站测区表层介质影响系数为正, 地电阻率观测值随表层介质真电阻率同向变化; 基于降雨数据, 通过褶积滤波方法拟合的年变形态与实际观测数据一致, 表明降雨是宝昌台地电阻率年变化的主要原因。

关键词: 地电阻率; 降雨; 电性结构; 褶积滤波; 影响系数

中图分类号: P315.72⁺8

文献标志码: A

0 引言

自1966年河北邢台 $M_s7.2$ 地震后, 我国逐步开展地电阻率定点连续观测, 目前有90余个观测站分布在主要地震活动区域和大中城市附近。观测采用对称四级装置, 每个台站在地表或井下布设2~3个水平方向的测道。地表观测的供电极距AB约300~3000m, 电极埋深2~150m。地电阻率观测值是地下固定探测范围内介质真实电阻率的综合反映, 在长期的观测过程中, 观测装置的位置和极距通常是固定不变的, 用以连续监测探测体积内介质电阻率随时间的变化情况。

地电阻率观测数据在理想状态下变化较平稳, 在受到测区内及附近区域自然和人为因素的影响时, 观测数据会出现多种变化形态, 理清各类变化形态可能产生的原因, 对于从观测数据中识别和排除与地震孕育过程无关的信息具有重要意义。年变化是地电阻率观测中常见的变化形态, 有关研究表明, 年变化是由浅层介质电阻率随降水和温度的季节性变化引起的^[1-2]。降雨对地电阻率测值的影响比较复杂, 既存在即时效应, 又存在滞后效应, 与地电阻率观测数据季节性变化之间的相关性较好。不同台站的年变化形态也存在较大的差异, 有些台站所有测道年变化和月降雨呈负相关, 有些台站则是不同测道年变形态相反。因此, 对年变的分析需结合台站电性结构、降雨方式和地形等因素综合考虑^[3-5]。通过计算分层介质的影响系数, 发现

年变形态受表层介质影响系数的控制^[6], 在数据分析时需要定量地扣除。本文在采用影响系数定性分析的基础上, 使用褶积滤波法定量分析降雨对宝昌台地电阻率观测数据的影响, 为日常分析、震情会商和异常研判提供一定的参考依据。

1 地电阻率观测

宝昌地震台(以下简称宝昌台)位于内蒙古自治区锡林郭勒盟太仆寺旗宝昌镇, 地质构造上属于阴山构造带内蒙古地轴东段, 属四级构造单元, 该区的主要断裂为赤峰—开原断裂^[7](见图1)。宝昌台地电测区在台站附近农田内, 周边无地表水系, 观测以来的测区环境未发生明显改变, 属观测环境较好的台站之一。

宝昌台地电阻率布极区位于宝昌镇董家西沟村南边的农田内, 布极中心点距观测室直线距离约500m, 地电阻率观测采用四极对称观测方式, 布设NS和EW两个测道, 供电极距为560m, 测量极距为80m, 电极埋深2.5m(见图2)。

2 电性结构模型及影响系数

2.1 水平层状模型

图3的基于高密度电法反演得到深度为2.5~101m的电阻率剖面结果显示, 地电布极区地下电阻率基本呈水平分布, 大致可分为4层结构^[8]。

沿NS和EW测向对布极区开展垂向直流电测深测量, 得到电测深曲线(见图4)。结果显示, 宝昌台地

收稿日期: 2022-11-14

基金项目: 内蒙古自治区地震局局长基金(2022JC13)。

第一作者简介: 贾彦杰(1985—), 男, 内蒙古自治区锡林郭勒盟太仆寺旗人。工程师, 从事地球物理监测预报工作, E-mail: 356239734@qq.com。

电阻率测区电性结构属于 KH 型,地电阻率测区地下 可分为 4 层电性结构(见表 1)。

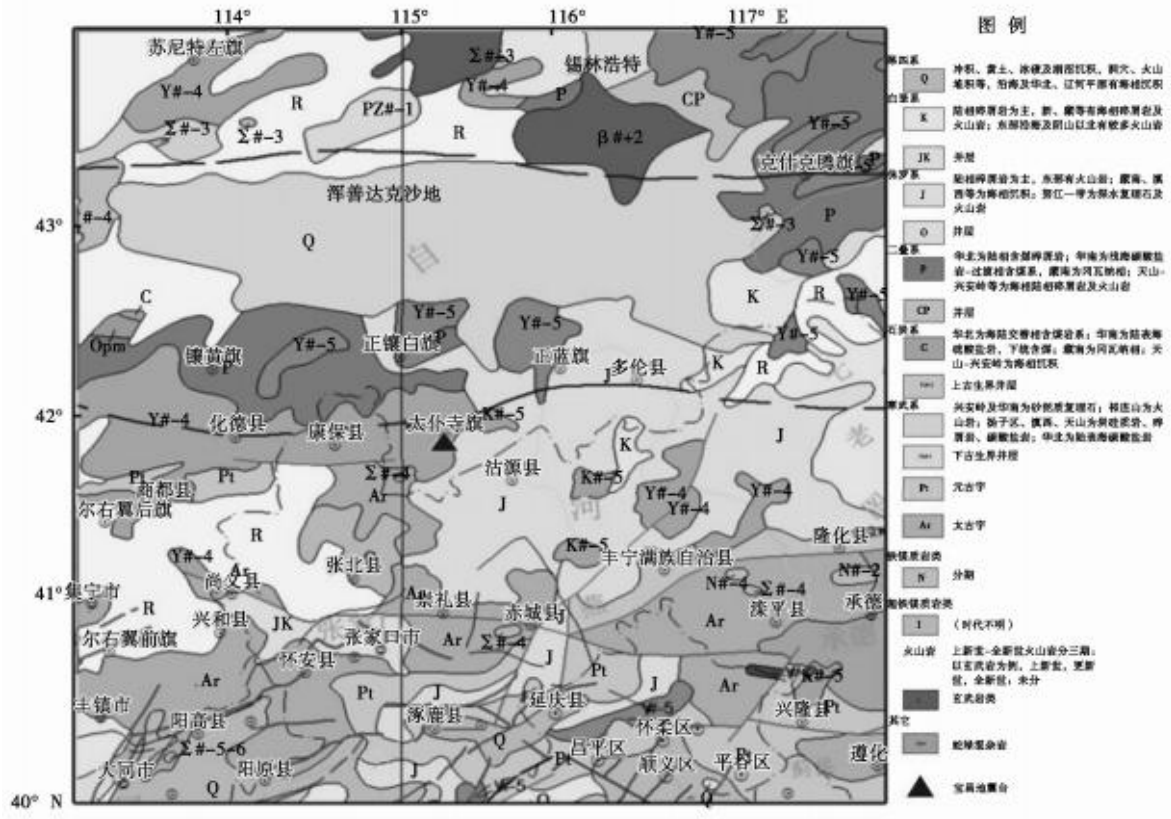


图 1 宝昌台地质构造图 Fig. 1 Geological structure map of Baochang Station

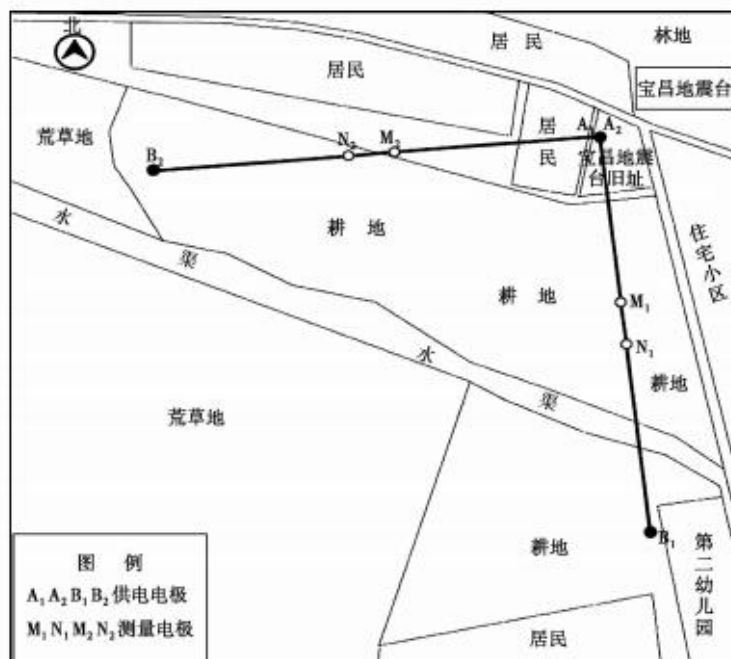


图 2 宝昌台地电阻率观测布极图 Fig. 2 Distribution map of resistivity observations at Baochang Station

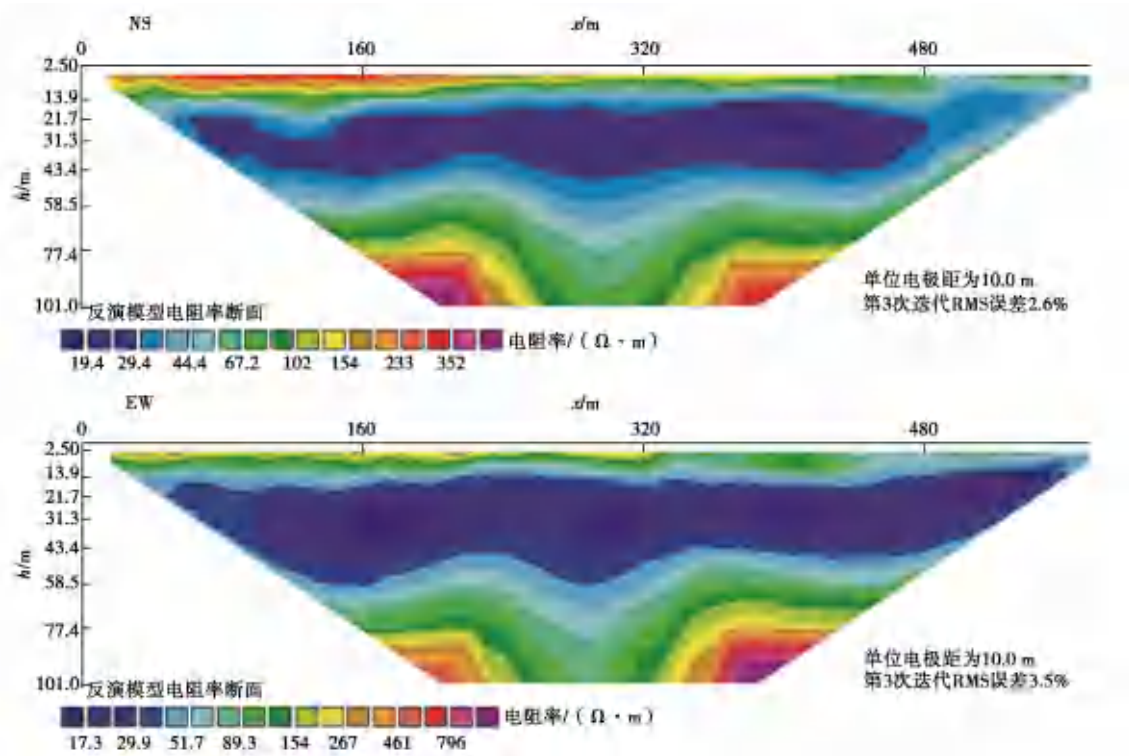


图3 宝昌台地电布极区剖面电阻率分布

Fig. 3 Resistivity distribution along the profile at Baochang Station

表1 测区水平层状电性结构模型

Table 1 Horizontal layered electrical structure model of the measurement area

层数	层深(m)	NS向		EW向	
		电阻率(Ω·m)	相对误差(%)	电阻率(Ω·m)	相对误差(%)
1	1	70	0.034 028 7	196	0.041 271 2
2	6	150		239	
3	64	28		34	
4	∞	980		1 280	

结合测得的地电测区电测深参数,采用地电阻率滤波器算法^[9],计算不同观测极距下的地电阻率值,并与原始观测值对比,结果显示两者基本一致(见图4)。

2.2 影响系数

依据表1所示NS和EW向的一维电性结构,计算两个方向各层介质的影响系数^[10-12],分布如图5所示(虚线表示影响系数为负)。图中,B1、B2、B3、B4分别为模型第1、2、3、4层的影响系数,随着供电电极距AB增加,B1、B2整体减小,B3、B4整体增大,并在AB达到一定距离后均趋于平缓。由此可知,增大供电电极距可有效抑制第1层和第2层的干扰。在宝昌台观测

装置极距 $AB/2=280$ m处,NS和EW测道的第一层介质影响系数B1为正值,说明观测数据将随表层介质真电阻率同向变化,并呈现夏低冬高的年变形态。

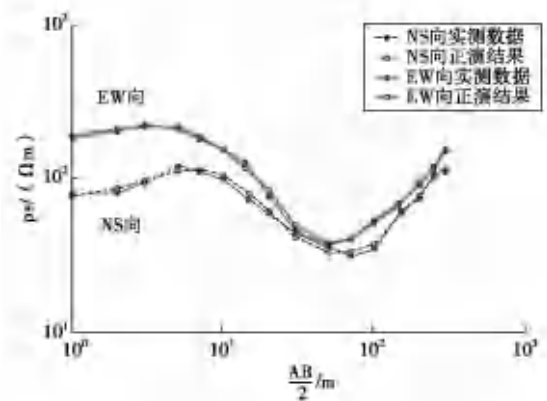


图4 宝昌台地电阻率测区电测深曲线

Fig. 4 Electric sounding curve at Baochang Station

3 降雨影响的定量分析

降雨在短时间内引起浅表介质含水量增加,真电阻率降低,随着水分的蒸发,浅表介质真电阻率逐渐回

升。以季节为时间尺度,春夏季的持续性降雨,浅表介质含水量逐渐上升且渗透深度逐渐增加,秋冬季则相反。因此,降雨对地电阻率既有短期影响,又有季节性影响。

3.1 短期影响

选取宝昌台 2019—2022 年地电阻率和降雨量的资料,分析即时降雨引起的地电阻率短期变化。研究认为宝昌台所在区域出现即时降雨,在降雨开始且降雨量达到一定程度时,地电阻率 EW 和 NS 测道观测值同步出现快速下降变化,降雨结束后数据缓慢恢复正常。表 2 给出地电阻率变化幅度与降雨量之间的关系,地电阻率和降雨量统计结果表明,降雨时间与数据变化及恢复时间具有很好的相关性(见图 6)。

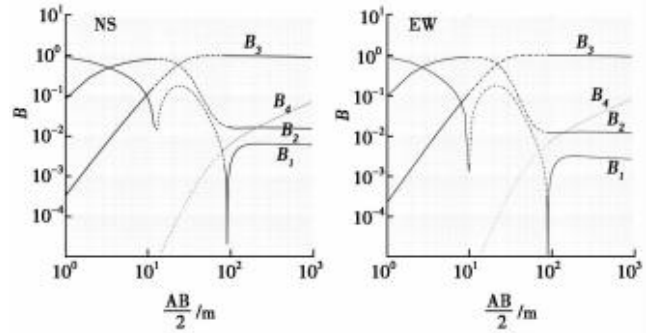


图 5 宝昌台各层介质影响系数
Fig. 5 Impact coefficients of various media at Baochang Station

表 2 地电阻率变化幅度与降雨量对比

Table 2 Comparison of resistivity change amplitude and rainfall

地电阻率变化时间		2019-05-04—05	2020-06-13—14	2022-05-29—30	2022-08-14—15
地电阻率变化幅度/($\Omega \cdot m$)	NS 向	0.52	0.88	0.53	0.36
	EW 向	0.24	1.06	0.46	0.35
降雨量/mm		2	6	1	2
影响时间/h		21	21	22	30

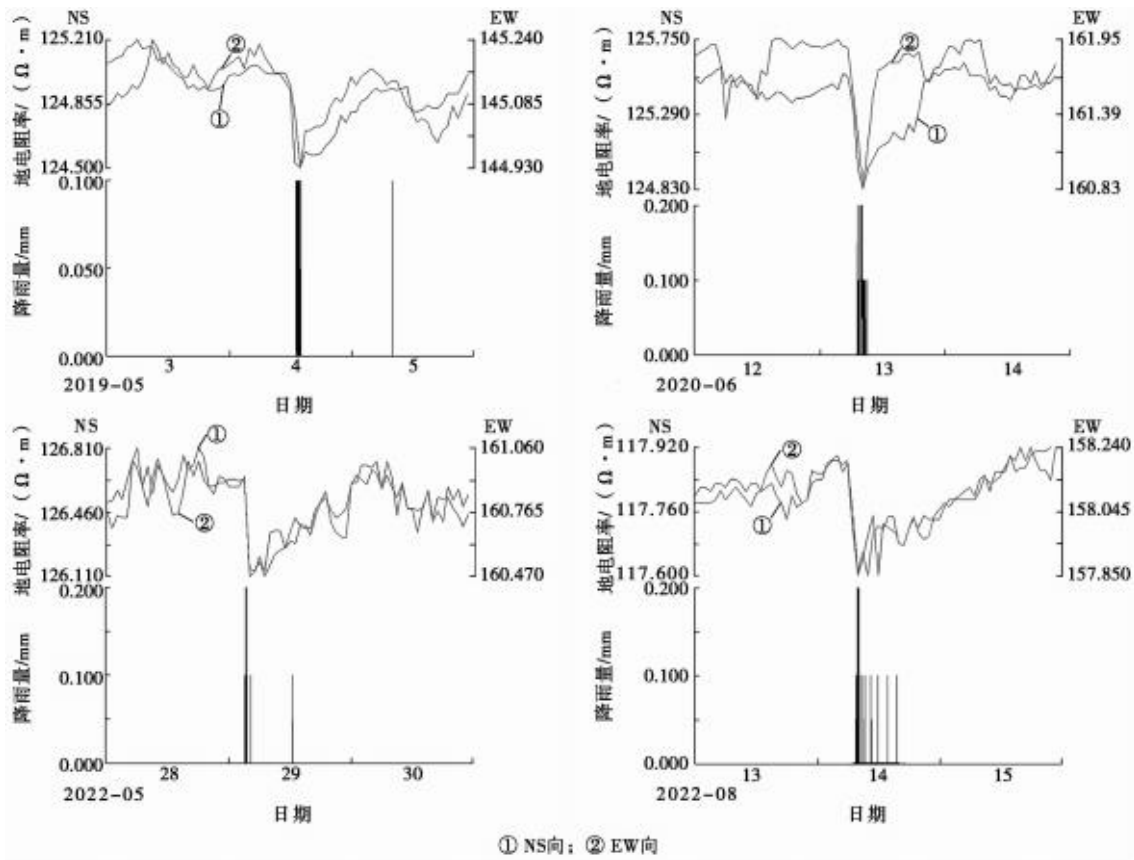


图 6 地电阻率与降雨量时序曲线图
Fig. 6 Time series curves of resistivity and rainfall

3.2 对年变动态的影响

宝昌台地电阻率具有夏低冬高的年变化特征。依据宝昌台钻孔剖面图及电测深曲线,该台地下电性结构可分4层:第一层主要是细沙层,第二层是砂碎石层,第三层是含水层,第四层是石英斑岩层。宝昌台水位虽逐年趋于下降,但这并不是导致地电阻率两测道下降的主要原因,因为宝昌台水位主要在第一层变化,对决定该台地电阻率长期变化的第二、三、四层电阻率影响较小^[13]。使用地电阻率月均值与月降雨总量做相关性计算得出,NS、EW向测值与降雨量的相关系数分别为-0.650、-0.601,说明两者有较好的相关性。

研究认为月降雨量对地电阻率的季节性年变和趋势变化有一定的影响^[14]。为确定宝昌台地电阻率长期变化是否由降雨量引起,选取2012—2021年月降雨量,运用褶积滤波法计算降雨量对地电阻率年变和趋势性变化的影响(见图7、图8)。

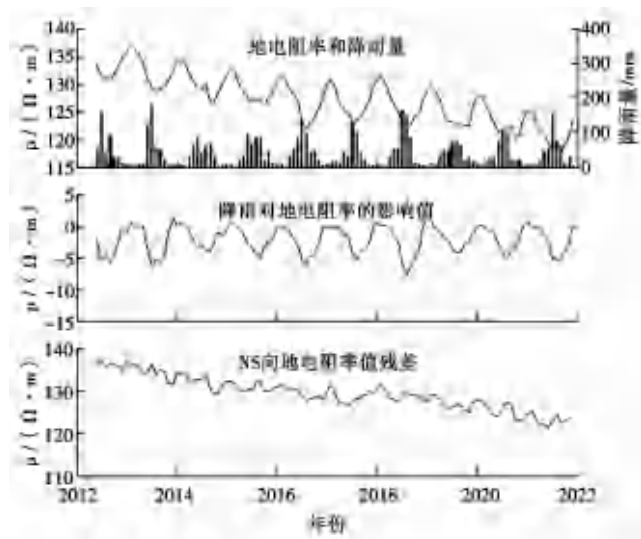


图7 月降雨量对宝昌台NS向地电阻率的影响

Fig. 7 Influence of monthly rainfall on NS resistivity at Baochang Station

计算结果显示,宝昌台地电阻率年变化形态为夏低冬高,年变幅度与降雨量的大小关系密切。如,2018年降雨较多,年变幅度较大;2019年降雨较少,年变幅度较小。去除降雨对观测数据的影响后,观测数据年变不显著,但趋势性下降变化依然存在,说明宝昌台地电阻率观测数据出现的年变化由降雨导致,长趋势性变化不是由降雨引起。

4 结论

本文结合宝昌台测区电性结构,采用影响系数理论和褶积滤波方法分析降雨对宝昌台地电阻率观测数

据的影响表明,EW和NS测道表层介质的影响系数为正值,观测数据随表层介质真电阻率同向变化。即时降雨在短期内引起表层介质电子快速下降,降雨停止后,随着水分的蒸发缓慢回升,地电阻率表现为快急始—慢恢复的变化;季节性降雨引起浅部介质含水率夏高冬低形态的季节性变化,因而地电阻率年变特征为夏低冬高。多年降雨量的定量拟合结果表明,降雨是宝昌台地电阻率年变形态的主要影响因素,长趋势变化的成因还需作进一步研究。

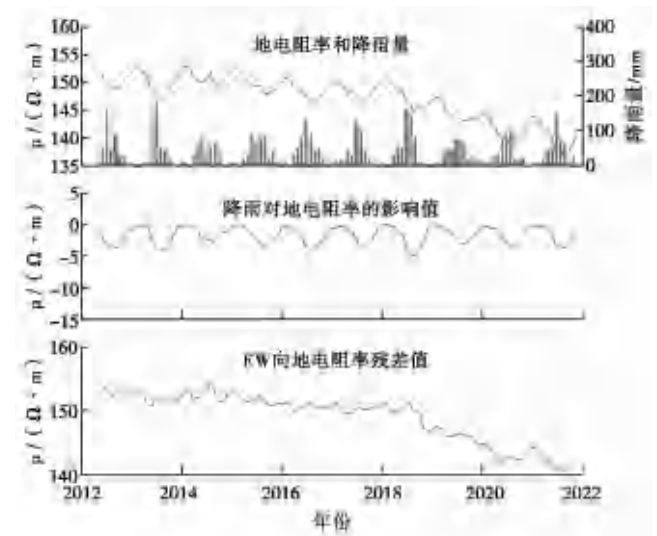


图8 月降雨量对宝昌台EW向地电阻率的影响

Fig. 8 Influence of monthly rainfall on EW resistivity at Baochang station

参考文献:

- [1] 赵和云,钱家栋. 郟县台多极距观测资料的反演和分析[J]. 中国地震,1987,3(S1):73-78.
- [2] 薛顺章,温新民,董永德,等. 地电阻率预报地震新方法的研究[J]. 地震学报,1994,16(2):227-234.
- [3] 金安忠. 地电阻率正常变化与电剖面的关系[J]. 地震学报,1981,3(4):421-428.
- [4] 李飞,姚伟中. 新沂地震台地电阻率与地下水位和降水的关系研究[J]. 地震研究,2004,27(4):326-329.
- [5] 张伟峰,王远,潘洁,等. 嘉山台地电阻率与降雨关系探究[J]. 华南地震,2015,35(1):84-89.
- [6] O'Neill D J, Merrick N P. A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array[J]. Geophysical Prospecting,1984,32(1):105-123.
- [7] 内蒙古自治区地震局. 内蒙古自治区地震监测志[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,2006.
- [8] 魏建民,戴勇,刘芳,等. 宝昌地震台地电阻率电性结构特征[J]. 地震地磁观测与研究,2019,40(3):56-63.
- [9] Lu J, Xue S Z, Qian F Y, et al. 2004. Unexpected changes in resistivity monitoring for earthquakes of the

- Longmen Shan in Sichuan, China, with a fixed Schlumberger sounding array[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 145(1-4): 87-97.
- [10] 姚文斌. 电测深数值计算和解释入门[M]. 北京:地震出版社, 1989.
- [11] 解滔, 卢军. 地电阻率三维影响系数及其应用[J]. *地震地质*, 2015, 37(4): 1125-1135.
- [12] 戴勇, 高立新, 杨彦明, 等. 地电阻率变化成因分析—以宝昌台为例[J]. *地震地质*, 2021, 43(3): 647-662.
- [13] 戴勇, 高立新, 高昌志, 等. 宝昌台地电阻率变化特征[J]. *地震研究*, 2013, 36(3): 358-363.
- [14] 张学民, 王志贤, 臧明珍, 等. 降雨对地电阻率干扰的分析[J]. *华北地震科学*, 1996, 14(4): 71-75.

The Impact of Rainfall on the Earth's Resistivity Observations at Baochang Platform

JIA Yanjie¹, JIA Xinye¹, BAI Shaoqi¹, GAO Yunfeng², YAN Jiwen¹

(1. Xilinhot Center Station, Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Xilinhot, Inner Mongolia Autonomous Region 026000, China; 2. Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia Autonomous Region 010000, China)

Abstract: The annual variation of the resistivity observations along the NS and EW profiles at Baochang Seismic Station exhibits a pattern of low values in summer and high values in winter. Summer rainfall induces short-term changes in the observations with a rapid onset and slow recovery. To further investigate the characteristics of these changes and considering the subsurface electrical structure of the station and regional rainfall data, the impact coefficient theory and convolution filtering method are employed to analyze the influence of rainfall on the resistivity observations at Baochang Station. The results indicate that the impact coefficient of the near-surface media in the station's measurement area is positive, and the resistivity observations change in the same direction as the true resistivity of the near-surface media. The convolution filtering method, based on rainfall data, fits well with the observed annual variation, suggesting that rainfall is the main cause of the annual changes in resistivity at Baochang Station.

Key words: resistivity; rainfall; electrical structure; convolution filtering; impact coefficient

(上接第9页)

Analysis of the Stress Field Characteristics in the Xingtai Seismic Region and the Seismogenic Background of Earthquakes with Magnitudes above $M_L 3.5$

ZHANG Yang^{1,2}, DONG Bo^{1,2}, WANG Shi^{1,2}

(1. Hebei Hongshan Thick Sediment and Earthquake Disaster National Field Scientific Observation and Research Station, Xingtai, Hebei 054000, China; 2. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang, Hebei 050021, China)

Abstract: The old seismic area of Xingtai has a complex tectonic background, with multiple sets of faults developed, belonging to a relatively unstable tectonic zone with frequent regional minor and moderate earthquakes. From 2017 to 2021, there were six earthquakes above $M_L 3.5$, including two above $M_L 4$. Based on collected focal mechanism solution data, this paper inverts the current crustal stress field in the region, simulates the relationship between the focal mechanism and the crustal stress field, and calculates the relative shear stress and normal stress on the seismogenic fault plane of the crustal stress field, analyzing the seismogenic background of the earthquakes. The results show that among the six earthquakes above $M_L 3.5$, the focal mechanism planes of two earthquakes are close to the plane of maximum shear stress in the stress field, while the planes of four earthquakes are far from the plane of maximum shear stress. This indicates that earthquakes do not always occur in the direction of maximum shear stress on the focal mechanism planes, and sometimes may occur in some weak zones. Therefore, in earthquake prediction, it is not sufficient to only focus on the direction of maximum shear stress rupture; attention should also be paid to the geological weak zones at the edges. This result may provide a reference for subsequent analysis of the seismic risk in the region and for studying the seismogenic mechanism and dynamic process.

Key words: stress field; Xingtai seismic area; rupture direction; seismogenic background; geological weak zones