

山西地震 编辑委员会

主 编：陈宇坤

副 主 编：万 亮 李自红 张瑞芳（专职）

编辑委员：（按姓氏汉语拼音排序）

曹 筠 陈 石 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 邵志刚 史双双 宋美卿 万永革 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 张亮斌 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 Yu-kun

ASSOCIATE EDITORS IN CHIEF: WAN Liang LI Zi-hong ZHANG Rui-fang (specific duty)

BOARD MEMBERS: CAO Jun CHEN Shi FENG Xi-jie GAO Wu-ping HAN Xiao-ming HU Yu-liang
HUANG Jin-gang JI Ling-yun JIA Jian-xi JIANG Hai-kun JIANG Xiao-shan
LEI Jian-she LEI Qi-yun LEI Sheng-xue LI Bin LI Li LI Dong-mei LI Hong-wei
LIANG Yan LIU Rui-chun LUO Yong LV Fang MA Zhao-hui SHAO Zhi-gang
SHI Shuang-shuang SONG Mei-qing WAN Yong-ge WANG Yue-Jie WU Yan-qiang
XIE Tao XUE Yan YAN Ji-ming YAN Rui YANG Bin YANG Jing YIN Wei-wei
ZENG Jin-yan ZHANG He ZHANG Liang-e ZHANG Yang-hui ZHANG Yu-shan
ZHAO Xiao-yun ZHENG Wen-jun ZHOU Ke-chang

山西地震

SHANXI DIZHEN

EARTHQUAKE RESEARCH

IN SHANXI

季刊 Quarterly

1973年2月创刊

Established in February, 1973

2023年第1期（总第193期）

No.1 (Serial No.193) 2023

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：太原市山佑巷

发行范围：公开

发行订购：《山西地震》编辑部

网 址：<https://sxdz.cbpt.cnki.net/>

电子信箱：sxdzjb@163.com

出版日期：2023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-kun

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://sxdz.cbpt.cnki.net/>

E-mail: sxdzjb@163.com

Data of Publication: Mar.2023

ISSN 1000-6265

CN 14-1107/P

CODEN SDIZEY

年定价：20.00元（不含邮费） 本期定价：5.00元

SHANXI DIZHEN



ISSN 1000-6265

CN 14-1107/P

CODEN SDIZEY

山西地震®

EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI

山西地震

二〇二三年

第一期

总第一九三期

2023 / 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

2023年第1期

山西地震

(季刊·1973年创刊)

(总第193期)

目 次

(庆祝《山西地震》创刊50周年专刊)

· 地震活动性 ·

基于频谱分析的矩震级测定方法——以山西地震带为例 李 斌, 新一丹, 李嘉丽, 王振东, Nganaye Gomer De Dieu (1)

浙江省非天然地震区域特点和识别方法 赵梦琦, 孙 侃, 吕奥博, 陈依侃 (9)

· 地震地质 ·

山西清徐地裂缝分布、类型与建筑物避让距离确定 马秀芳, 赵晋泉, 曾金艳, 薛晓东, 薄建杰 (20)

· 观测分析 ·

井下地电阻率交流观测试验——以江宁台为例 樊晓春, 高可伟, 单友磊 (24)

忻州站井下与地表地电阻率观测数据对比分析 尚永明, 宁亚灵, 殷志刚, 李贵明 (30)

· 技术交流 ·

DTW 算法在地震时间序列信息挖掘中的应用 李宏伟, 张淑亮 (37)

基于 POI 的地震应急基础数据库更新方法研究 赵 杰, 郑树平 (41)

· 地震社会学 ·

东汉时期地震与社会文化的关系——张衡地动仪发明的背景研究 卢双苓, 于庆民, 钟普浴, 王合乾, 石晓辉, 邹春红 (45)

· 工作论坛 ·

筌路蓝缕 以启山林——我与《山西地震》 袁正明 (53)

· 本刊启事 ·

“地震灾害风险普查工程和地震易发区房屋设施加固工程”专刊约稿函 《山西地震》编辑部 (56)

本期责任编辑: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*9*2023-03

本刊网址:https://sxdz.cbpt.cnki.net/

本刊电子信箱:sxdzjb@163.com

CONTENTS

**(Special Issue of Congratulating 50 Years of the Starting Publication
of EARTHQUAKE RESEARCH IN SHANXI)**

• **Seismicity** •

- Determination of Moment Magnitude Based on Spectrum Analysis—Taking Shanxi Seismic Belt as an Example LI Bin, JIN Yi-dan, LI Jia-li, WANG Zhen-dong, Nganaye Gomer De Dieu(1)
Characteristics and Identification Methods of Non-Seismic Areas in Zhejiang Province ZHAO Meng-qi, SUN Kan, LV Ao-bo, CHEN Yi-ni(9)

• **Earthquake Geology** •

- Distribution, Types and Building Avoidance Distance Determination of Ground Fissures in Qingxu, Shanxi MA Xiu-fang, ZHAO Jin-quan, ZENG Jin-yan, XUE Xiao-dong, BO Jian-jie(20)

• **Observation and Analysis** •

- AC Resistivity Observation Experiment in Underground Environment—A Case Study of Jiangning Station FAN Xiao-chun, GAO Ke-wei, SHAN You-lei(24)
Comparing the data from underground and surface Electrical Resistivity Observation at the Monitoring Center of Xinzhou Seismic Station SHANG Yong-ming, NING Ya-ling, YING Zhi-gang, LI Gui-ming(30)

• **Academic Exchange** •

- Application of DTW Algorithm in Earthquake Time Series Information Mining LI Hong-wei, ZHANG Shu-liang(37)
Research on the Update Method of Earthquake Emergency Basic Database Based on POI ZHAO Jie, ZHENG Shu-ping(41)

• **Seismosociology** •

- The Relationship Between Earthquakes and Social Science and Culture During the Eastern Han Period in China—Background research on the invention of Zhang Heng's seismoscope LU Shuang-ling, YU Qing-min, ZHONG Pu-yu, WANG He-qian, SHI Xiao-hui, ZOU Chun-hong(45)

• **Work Forum** •

- Endure Great Hardships in Pioneer Work, Light the Way Through the Mountains—My Experience with the “Shanxi Earthquake” YUAN Zheng-ming(53)

• **Editorial Office Notice** •

- Invitation Letter for Special Issue of "Earthquake Disaster Risk Survey Project and Building Facility Reinforcement Project in Earthquake-prone Areas" Editorial Office of ERS(56)

Managing Editors for This Issue: ZHANG Rui-fang, ZHANG Zheng-xia;

Translator: LI Bin

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

E-mail: sxdzjb@163.com

·地震活动性·

文章编号:1000-6265(2023)01-0001-08

基于频谱分析的矩震级测定方法 ——以山西地震带为例

李斌^{1,2}, 靳一丹¹, 李嘉丽¹, 王振东¹, Nganaye Gomer De Dieu¹

(1. 太原理工大学地球科学与工程系, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学地震与地质灾害防治研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 矩震级 M_w 是目前量度地震大小最理想的物理量, 已成为国际地震学界开展研究的首选震级。对于中强地震事件, 矩震级 M_w 通常可以利用长周期地震波, 基于矩张量反演计算获得; 对于约3级以下的地震事件, 直接进行矩张量反演有时会产生较大误差。本文以山西地震带为例, 利用山西地震台网数字波形资料, 开展研究区 Q 值函数模型的分析评估与基于频谱分析的矩震级测定。研究表明, 基于 Q 值函数 $Q(f) = 299.4f^{0.563}$ 计算的频谱 M_w 更接近矩张量反演的 M_w , 与 Q 值模型参数 Q_0 、 α 和 κ 的优化组合结果存在较好吻合; 对于 $3.6 \leq M_L \leq 5.1$ 地震事件, 基于频谱分析计算得到的矩震级与基于矩张量反演矩震级较接近。在已具有详细的区域非弹性衰减模型基础上, 基于频谱分析快速测定中小地震的矩震级具有可行性。

关键词: 矩震级; 频谱分析; 中小地震; 山西地震带

中图分类号: P315.3⁺2

文献标志码: A

0 引言

山西地震带又称山西地堑系(见第2页图1), 位于鄂尔多斯断块东缘, 夹峙于吕梁山断块隆起与太行山断块隆起之间, 是我国新生代大陆裂谷中最显著的一条裂谷带^[1], 其形成和发展受印度板块、太平洋板块与欧亚板块相互作用的影响^[2]。地震带总体呈北北东走向, 其内部由一系列大的断陷盆地及次一级隆起、凹陷组成, 形成“S”形雁列式展布的构造格局^[3]。北东向的大同、太原、运城盆地较宽阔, 剖面不对称, 主要具有张裂性质; 北北东向的忻定、临汾盆地较狭窄, 剖面对称, 表现为右旋剪切破裂特征; 二者相间排列, 自北向南分别被石岭关隆起、灵石隆起、柴庄小隆起和峨嵋台地隆起相隔^[4]。盆地边界通常由大倾角正断层控制, 兼有一定的走滑运动。近年来的研究表明, 两侧断层活动程度不同, 造成不同地堑中盆地构造形态的差异, 且山西地区有史以来发生 $M \geq 6.0$ 的强震事件绝大多数与盆地边界断层活动有密切关系^[5-6]。最近一次造成人员伤亡和建筑物严重损坏的是1989年大同一阳高 $M 6.1$ 地震^[7], 至今该地区未发生过 $M \geq 6.0$ 地震, 但中小地震活动频繁。

地震震级的精确测定是地震学研究的基础问题之

一。截至目前, 国内外常用的震级标度方法包括地方震级 M_L 、面波震级 M_s 和矩震级 M_w 等, 各自优势、特点明显。如里氏震级 (M_L 和 M_s) 定义震级为距震中 100 km 的标准地震仪所记录的、以微米表示的最大振幅的对数值(标准地震仪周期 0.8 s, 阻尼比 0.8, 放大倍数 2 800 倍)。对于较大的地震事件 ($M_L > 6.5$), M_L 可能会受到震级饱和现象的影响; 对于震级小于 3 的地震事件, 近年来的研究表明, 由于地震波的衰减作用, 计算得到的 M_L 往往低于 M_w ^[8-10]。矩震级是基于地震矩的大小确定震级。地震矩是一个描述地震发生时力学强度的物理量, 由地震断层的破裂面积、平均错动量及岩石的剪切模量的乘积来表示。因此, 矩震级是一个绝对的力学标度, 不存在震级饱和问题^[11]。关于矩震级的概念提出、历史发展、优点分析等内容, 陈运泰等在其文章中已做详细总结与阐述, 指出无论是对大震还是小震、微震甚至极微震, 无论是对浅震还是深震, 无论是使用远场、近场地震波资料、大地测量和地质资料中的任何资料, 均可测量矩震级, 并能与熟知的震级标度如面波震级 M_s 相衔接。矩震级 M_w 是目前量度地震大小最理想的物理量, 已成为国际地震学界选定的首选震级, 矩震级测定已成为地震观测实践的常规工作之一^[12]。

收稿日期: 2022-09-25

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(201901D111051)。

第一作者简介: 李斌(1980—), 男, 山东菏泽人。博士研究生, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地震学与地震灾害研究工作, E-mail: 1036243813@qq.com。

该文获“庆祝《山西地震》创刊50周年有奖征文活动”二等奖。

对于中强地震事件,矩震级 M_w 通常可以利用长周期地震波,基于矩张量反演计算获得;对于约 3 级以下的地震事件,直接进行矩张量反演有时会产生较大误差^[13]。因此,对于中小地震事件,首先基于波形数据的震源频谱分析获得地震矩,进而计算得到矩震级的求解思路,是当前确定中小地震矩震级可选的理想方法之一。准确可靠的震源频谱分析结果,需要研究区详细的地壳速度结构,尤其是合理的区域衰减模型为前提。本文以山西地震带近年来发生的中小地震为研究对象,选取数据质量高且相对震级大的地震事件 ($M_L \geq 3.6$) 进行矩张量反演,分析研究山西地震带非弹性衰减模型,筛选出目前区域最合适的 Q 值函数。在此基础上,开展基于频谱分析的中小地震矩震级计算,拟合得到 M_w 和 M_L 震级之间的关系。

通过对中强震的矩张量反演或对地震数据的频谱分析来确定。为保证计算结果的可靠性与后续的对比如分析,本文中对于 $3.0 \leq M_L \leq 5.1$ 的地震事件全部采用频谱分析法进行计算,对于 $3.6 \leq M_L \leq 5.1$ 事件再同时基于矩张量反演方法进行震源机制的求解。

1.1 频谱分析

震源频谱往往受到几何扩散 $G(\Delta, h)$ 、衰减 $D(f)$ 和仪器响应的影 响。基于 Brune 震源模型理论^[16], 台站记录到的地震波频谱经仪器校正后可表示为:

$$A(f) = 0.6 \times 2.0 S(f) D(f) G(\Delta, h), \quad (2)$$

式中: f 为频率; h 为震源深度; Δ 为震中距; 系数 0.6 和 2.0 分别为平均辐射模式效应和自由表面效应; 衰减函数 $D(f)$ 由两部分组成, 可表示为:

$$D(f) = e^{-\frac{\pi f T}{Q_0}} \cdot e^{-\pi f \kappa}, \quad (3)$$

式中: 第一部分为地震波沿传播路径的损耗, T 是传播时间, Q_0 和 α 是常数, 品质因子 $Q = Q_0 f^\alpha$ (Q 值函数); 第二部分为近地表损耗, 由 κ 值决定。

几何扩散取决于震源距离。考虑到本研究区内大多数地震为浅源地震, 且频谱分析基于 S/Lg 波进行, 故采用 Herrmann 和 Kijko^[17] 提出的 S/Lg 波的几何扩散函数, 假设体波扩散的震中距离小于 100 km, 表面波扩散的震中距离大于 100 km。

根据上述公式, 得到地震波传播过程中的衰减情况, 进而推导出衰减校正后的震源频谱 $S(f)$, 确定拐角频率 f_0 与平台值 Ω_0 , 计算地震矩 M_0 和相应的矩震级 M_w ^[10, 18]。

为验证频谱分析结果的可靠性, 本文中首先采用手动方法确定一些地震的频谱矩震级 M_w , 然后将其与 SEISAN 软件自动程序计算得到的结果进行比较^[18], 发现差异并不明显。

1.2 矩张量反演

本文采用 Dreger^[19] 提出的时间域矩张量反演方法 (TDML_INV)。该方法基于双力偶点源模型, 通过同时考虑空间和时间点源, 将 t 时刻、距震源 x 处的自由表面位置的实测位移或速度记录 $U_n(x, t)$ 表示为:

$$U_n(x, t) = M_{ij} \times G_{w,ij}(x, z, t), \quad (4)$$

式中: U_n 表示记录的第 n 个分量; $G_{w,ij}$ 表示特定力偶方向第 n 分量的格林函数; M_{ij} 表示地震矩张量; 指标 i 和 j 表示地理方位。对于给定的震源深度, 可以通过线性最小二乘法反演观测数据来求解 M_{ij} 。然后将 M_{ij} 分解为标量地震矩、双力偶分量 (DC) 和补偿线性矢量偶极 (CLVD)。双力偶分量 (DC) 可以用对应的两个节平面的走向和倾角来描述, 各向同性分量 (ISO) 被约束为零。通过网格搜索不同深度的最小失配和最小 CLVD 分量, 可以找到震源深度和矩张量的最佳组合。

本文将地震波矩张量反演的 M_w 震级作为参考, 用于验证和评估研究区 Q 值函数的适用性与基于频

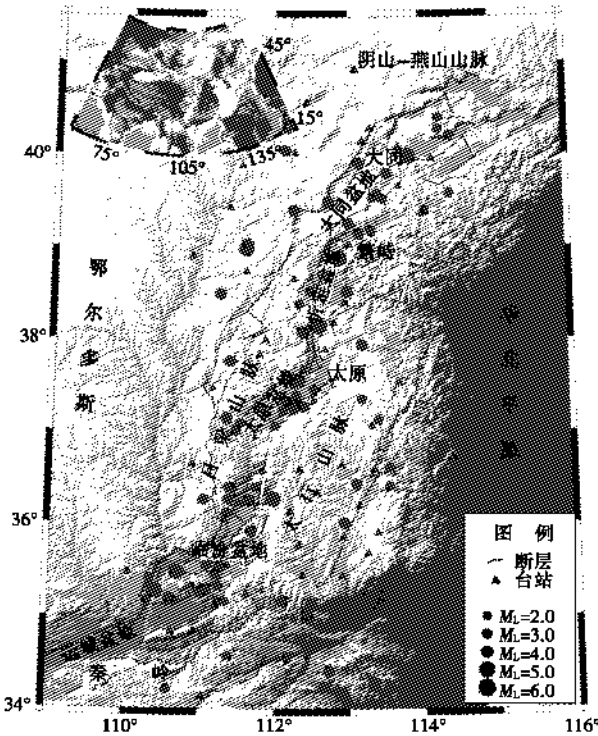


图 1 山西地震带区域构造图、台站分布与本文选取地震的震中分布图
Fig. 1 Regional tectonic map, station distribution of Shanxi seismic belt and epicenter distribution map of earthquakes selected in this paper

1 计算方法

关于矩震级 M_w 的数值计算, IASPEI(2013) 给出标准的计算公式^[14-15]:

$$M_w = \frac{2}{3} \times (\log_{10} M_0 - 9.1), \quad (1)$$

式中: M_0 是地震矩, 单位为牛顿米 (Nm)。地震矩可

谱分析计算得到的 M_w 震级的可靠性和准确性。

2 数据与数据处理

本文频谱分析基于 S/Lg 波形数据进行,为保证数据清晰不饱和,选取 2009—2022 年山西测震台网记录到的 102 个 $M_L \geq 3.0$ 地震的波形数据作为研究对象。选取地震的震中分布如图 1 所示。频谱分析首先从波形数据的垂直分量提取 S/Lg 波的时域信号,数据提取时间窗从 S 波到时前 2 s 开始,窗长为 20 s;然后基于快速傅里叶变换(FFT)将时域数据转换为频域数据;进行衰减校正,同时计算第一相位到达前的噪声频谱,用于确定观测到的频谱水平显著高于噪声的频率范围;根据所选择的频率范围,通过网格搜索拟合理论谱,得到频谱平台值 Ω_0 和拐角频率 f_0 [18]。

对于矩张量反演,本文选用速度波形数据。数据处理主要包括:台站数据选择、波形数据选择、去除仪器响应,以及在此基础上选择合适的滤波器进行滤波。根据以往的研究经验, $M_L \leq 4.0$ 地震的滤波带宽通常为 0.02~0.1 Hz, $4.0 < M_L \leq 5.1$ 的带宽为 0.02~0.06 Hz [10]。

3 地壳速度模型

近年来,研究者对山西地震带及周边区域的地壳结构开展研究并取得一些成果,研究方法包括接收函数分析、人工地震成像、噪声或天然地震层析成像等 [20-23]。本文使用的一维速度结构模型(见图 2)是基于唐有彩等 [21] 和 Yu 等 [23] 的研究结果。在该一维模型中,莫霍面深度为 40 km,这与该地区大多数相关研究结果一致;模型中每一层的 P 波速度为唐有彩等 [21] 模型中相应层的平均速度值, V_p/V_s 为李传金等 [22] 基于接收函数分析得到的山西 18 个地震台站下方 V_p/V_s 的平均值。

4 Q 值函数

地震波在地球介质内部传播时,由于介质的非弹性效应以及介质的非均匀性造成的散射现象,使地震波产生能量损耗与衰减,导致地震波在通过介质时发生畸变。因此,Q 值函数在基于频谱分析确定矩震级 M_w 中起着重要作用。有关山西地区的 Q 值函数,近年来许多学者已开展相关研究。早期工作如彭美焯 [24] 基于 Aki 尾波公式,首次利用单台多震记录分别计算各台站周围地壳介质的平均 Q 值及台站和震中之间的地壳介质 Q 值,研究结果给出各地 Q 值大多在 100~300,但没有得出 Q 值与频率之间的关系。

啜永清等 [26] 根据介质 Q 值理论,通过小震记录中的地震直达 P 波测定山西断陷带北中部 11 个区域的介质 Q 值,得到 Q 值范围从大同附近的 97 到繁峙附近

的 214 不等。此后,更多的研究结果表明区域介质 Q 值的大小与地震频率有关 [26-29]。

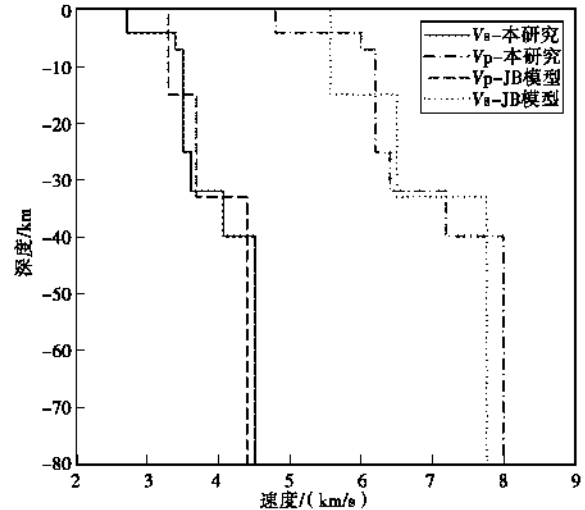


图 2 山西地震带区域一维速度模型
Fig. 2 Regional one-dimensional velocity model of Shanxi seismic belt

2004 年啜永清等 [26] 基于山西数字地震台网 14 个地震台的 310 条波形资料,采用 Atkinson [30] 和 Moya 方法 [31] 研究各台的场地响应和几种震源参数,并对上述两种方法的反演结果进行对比分析,得到山西地区非弹性衰减 Q 值随频率的关系为 $Q(f) = 323.2f^{0.506}$ (模型 I)。此后,宋美琴等 [27] 利用遗传算法反演山西中南部地区 14 个地震震源谱的低频水平、拐角频率和 7 个台站的场地效应,研究结果表明 $Q(f) = 299.4f^{0.563}$ (模型 II)。近年来,董春丽 [28] 和梁向军等 [29] 运用山西数字波形资料,采用 Atkinson [30] 方法得到山西地区介质的品质因子 Q 值随频率的关系,具体关系式分别为 $Q(f) = 469.5f^{0.3141}$ (模型 III) 和 $Q(f) = 420.7f^{0.369}$ (模型 IV)。

恰当的 Q 值函数是地震频谱分析的基础,因此,本文选取 2004 年以来啜永清等给出的 4 个 Q 值函数模型为研究对象(见第 4 页图 3),开展上述已有不同 Q 值函数模型的分析评估,选择当前最适合于本地区的模型进行后续计算。

5 计算结果分析

5.1 Q 值函数选择

为评估和选择最合适的 Q 值函数模型用于频谱分析,本文基于 Brune 震源谱理论 [16],运用网格搜索法开展 Q 值函数模型参数 Q_0 、 α 、 κ 的优化组合研究。即针对模型中每一个 Q_0 、 α 、 κ 参数组合,确定地震事

件波形的拐角频率 f_0 和频谱低频水平 Q_0 值,同时计算所有事件与台站组合的平均频谱匹配残差,以产生最小平均匹配残差的参数组合为最优。因此,网格搜索法可以很好地得到 Q 值函数的变化范围。为便于与目前已有的 4 个 Q 值函数对比分析,本文选择的参数变化范围涵盖上述 4 个 Q 值函数的参数范围。具

体参数设置如下: Q_0 的起始值 100,步长 50,共 8 步; α 的起始值 0.4,步长 0.1,共 4 步; κ 的起始值 0.02,步长 0.01,共 4 步,最后得到 128 个 Q_0 、 α 和 κ 组合。残差计算结果表明,组合残差在 0.1~0.8 范围内变化,且大多数的残差小于 0.3。表 1 给出了残差最小的前 5 个参数组合。

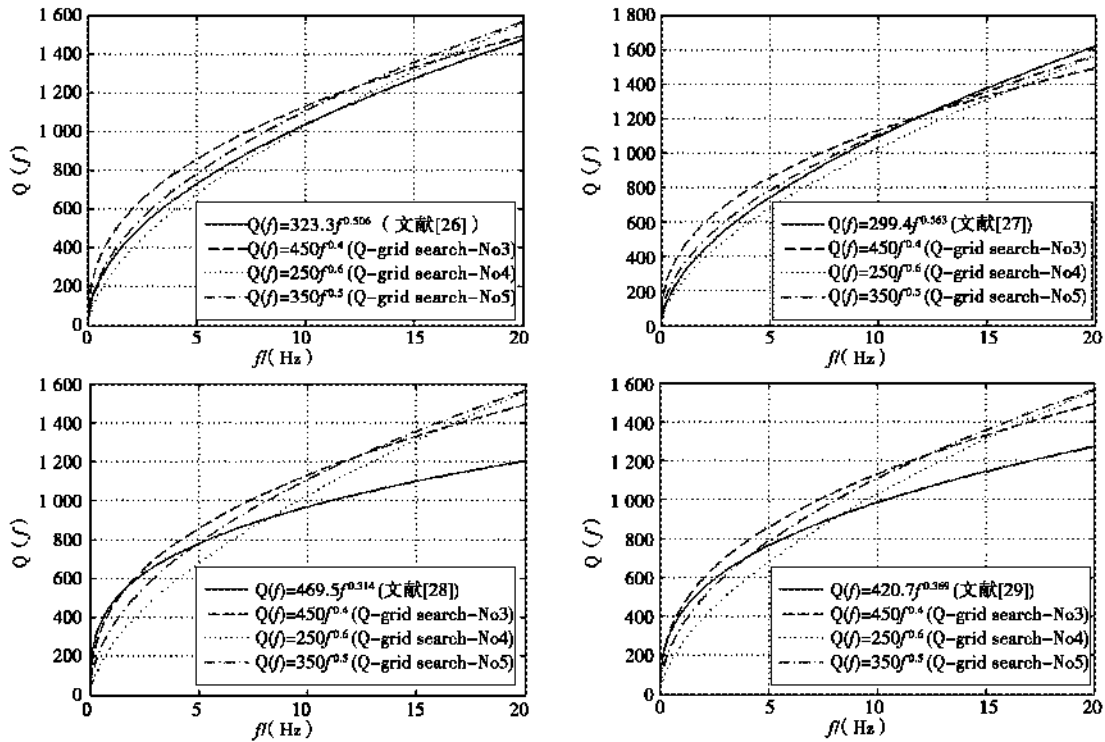


图 3 文献[26-29]研究中 Q 值函数模型与本文 Q 值函数参数组合搜索结果对比图

Fig. 3 Q -value function models from references [26-29] and its comparison with the Q -value function parameter combination search results in this paper

表 1 基于网格搜索法残差最小的前 5 个模型参数组合结果

Table 1 Top 5 results of grid search with minimum residuals for attenuation

组合	Q_0	α	κ	nf	f_0	M_w	re
1	150.0	0.700	0.040	2604	13.78	3.39	0.129
2	150.0	0.700	0.030	2668	11.02	3.36	0.130
3	450.0	0.400	0.040	2583	11.78	3.17	0.130
4	250.0	0.600	0.040	2623	12.52	3.24	0.131
5	350.0	0.500	0.040	2605	12.04	3.19	0.131

注: Q_0 、 α 、 κ 见式(3);nf 为计算次数; M_w 为平均 M_w ; f_0 为平均拐角频率;re 为平均残差

在此基础上,将已有 4 个 Q 值函数模型与基于网格搜索法得到残差最小的前 5 个参数组合结果进行比较分析(见图 3),发现已有的 4 个 Q 值函数模型与表 1 中编号 3、4、5 的结果相当。 Q 值函数模型 II 和 I 分别接近编号 4 和 5 的结果,模型 III 和 IV 接近编号 3 的结果。此外,模型 IV 的 Q_0 和 α 都比编号 3 小,将导致更高的衰减。模型 III 与表 1 编号 3 中的参数组合相

比,稍大的 Q_0 不能补偿更小的指标参数 α 。虽然这些参数的前 5 个组合残差同样很小,但用确定频谱 M_w 不同的参数可能会导致不同的结果。

为进一步检验哪一个 Q 值函数更适于频谱 M_w 计算,本文对数据质量较好且震级相对较大的 20 个地震事件 ($3.6 \leq M_L \leq 5.1$),基于 Dreger 矩张量反演方法 (TDML_INV) 进行地震矩张量反演,得出较可靠的

M_w 。以获得的矩震级为参考,验证和评估研究区 Q 值函数的适用性与基于频谱分析计算得到的 M_w 震级的可靠性和准确性。代表性地震事件 20090328 与 20100124 矩张量反演过程中波形拟合与反演结果如第 6 页图 4 所示,20 个代表性地震的矩震级计算结果详见表 2。通过比较事件,基于已知 Q 值模型计算出

的平均频谱 M_w 和矩张量反演的 M_w 平均值,发现基于 Q 值函数模型 II 计算的频谱 M_w 略接近矩张量反演的 M_w ,同时也接近网格搜索结果前 5 位组合中编号 4 的 Q 值函数(见图 4)。因此,本文选择模型 II,即 $Q(f) = 299.4f^{0.563}$ 用于本研究的频谱分析。

表 2 基于不同方法与 Q 值函数的 M_w 震级测定结果
Table 2 Magnitudes from scales for large events in the data set

地震事件	发震时间		震中位置		震源深度 km	震级 M_L SSN	M_w				
	年-月-日	时:分	纬度(°)	经度(°)			Spectral ¹	Spectral ²	Spectral ³	Spectral ⁴	MTI*
1	2009-03-28	11:11	38.904	112.934	10.0	4.5	4.1	4.1	4.0	4.0	4.2
2	2009-12-20	14:21	35.219	113.475	6.2	4.0	3.9	3.9	3.8	3.8	3.8
3	2010-02-08	13:42	39.075	111.703	18.8	3.8	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
4	2010-04-04	13:46	39.990	113.852	10.1	4.7	4.4	4.4	4.3	4.3	4.4
5	2010-04-07	07:30	36.299	111.711	5.0	4.1	3.6	3.7	3.6	3.6	3.7
6	2010-06-05	12:58	38.199	112.640	7.1	5.1	4.5	4.6	4.5	4.5	4.6
7	2010-06-10	13:08	37.818	111.481	14.4	3.6	3.1	3.1	3.1	3.1	3.2
8	2010-12-14	03:45	35.307	111.108	16.6	3.8	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
9	2011-01-15	04:02	35.517	110.736	15.9	4.1	3.7	3.7	3.6	3.6	3.6
10	2011-03-06	17:51	39.020	111.717	6.0	4.5	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9
11	2011-04-20	16:15	36.030	112.976	12.0	3.7	3.3	3.4	3.3	3.3	3.2
12	2011-04-26	03:15	39.382	113.052	19.0	3.7	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
13	2011-08-02	11:57	36.504	112.039	19.0	4.2	3.6	3.6	3.6	3.6	3.7
14	2011-12-24	06:20	39.503	112.790	6.0	3.9	3.5	3.5	3.5	3.5	3.6
15	2012-09-17	02:43	37.589	112.357	14.1	3.8	3.4	3.5	3.4	3.4	3.6
16	2012-11-01	16:09	35.951	111.734	5.0	3.8	3.3	3.3	3.3	3.3	3.5
17	2012-11-29	00:47	39.917	113.190	9.1	3.6	3.4	3.4	3.3	3.3	3.4
18	2016-03-12	11:14	35.000	110.880	11.7	4.4	4.0	4.2	4.1	4.1	4.2
19	2016-04-07	04:49	38.860	112.920	14.7	4.7	4.3	4.3	4.1	4.2	4.5
20	2022-10-03	01:49	38.350	113.370	10	4.3	4.1	4.2	4.3	4.1	4.2
Mean	—	—	—	—	—	4.05	3.72	3.75	3.7	3.69	3.78

注:表中 Spectral¹, $Q(f) = 323.3f^{0.506}$ (文献[26]), Spectral², $Q(f) = 299.34f^{0.563}$ (文献[27]), Spectral³, $Q(f) = 469.5f^{0.314}$ (文献[28]), Spectral⁴, $Q(f) = 420.7f^{0.369}$ (文献[29]), MTI-Moment tensor inversion

5.2 基于频谱分析的 M_w 震级

基于 Q 值函数模型 II,利用频谱分析方法开展选取地震事件的 M_w 震级测定,一共获得 102 个 $2.4 \leq M_L \leq 5.1$ 地震事件基于 Q 值函数计算的频谱 M_w 。第 6 页图 5 为 2 个典型地震事件的频谱分析结果。

5.3 M_L 与 M_w 拟合关系

M_w 震级的测定有利于推导山西地震带 M_L 与 M_w 的关系,基于已测定的 102 个地震事件的 M_w 震级,通过正交回归获得二者关系为:

$$M_w = 0.84M_L + 0.61, \quad (5)$$

式中:近震震级范围为 $2.4 \leq M_L \leq 5.1$;矩震级范围为 $2.6 \leq M_w \leq 4.6$ 。如第 7 页图 6 所示,当 $3.0 \leq M_L \leq 4.0$ 时, M_L 震级与 M_w 震级接近;当 $M_L < 3.0$ 时, M_L 略小;当 $M_L > 4.0$ 时, M_L 震级略大。这一结果表明,小地震事件 ($M_L < 3.0$) 在研究区域具有较高的衰减速度,以较高的频率为主,沿路径衰减较快,而 $M_L > 4.0$

的地震事件则相反。本文对各个地震事件的平均应力降进行研究,但在震级相似的情况下,平均应力降差异较大,其与震级的关系尚不清楚。

此外, M_L 与 M_w 之间的比例系数为 0.84,小于理论比率^[32-33]。之前的研究表明,不同地区之间的比例系数往往存在一定差异^[32-35]。

6 结论与讨论

本文以山西地震带为例,利用山西地震台网数字波形资料,开展研究区 Q 值函数的分析评估与基于频谱分析的矩震级测定,得到如下认识:

(1) 可靠的 Q 值函数在基于频谱分析确定矩震级中起着重要作用,运用网格搜索法开展 Q 值模型参数 Q_0, α, κ 的优化组合研究,同时联合准确可靠的矩张量反演结果,是分析评估与选取最佳区域 Q 值函数的可行性方法。

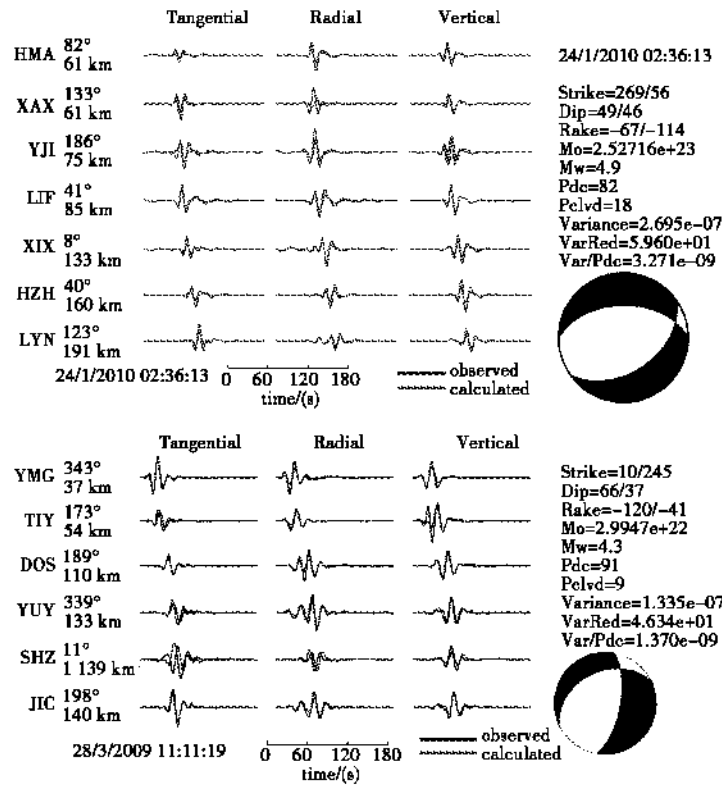


图 4 代表性地震事件 20090328 与 20100124 矩张量反演过程中波形拟合与反演结果
 Fig. 4 Waveform fitting and inversion results during moment tensor inversion of representative earthquake events 20090328 and 20100124

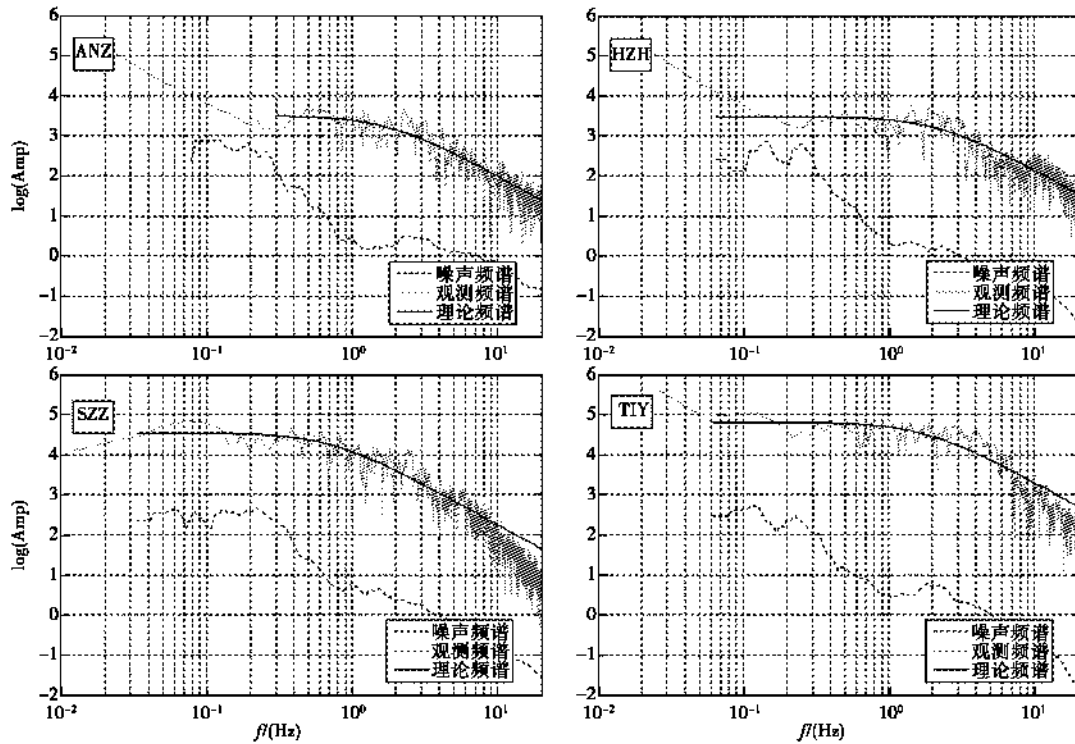


图 5 代表性地震事件的频谱分析结果
 Fig. 5 Spectrum analysis results of representative earthquake events

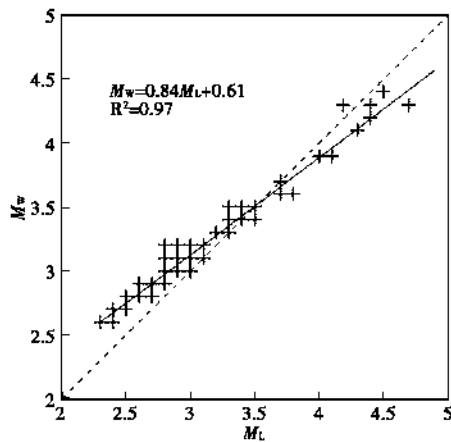


图6 基于本文研究结果得到的山西地震带 M_L 与 M_w 的拟合关系

Fig. 6 The fitting relationship between M_L and M_w in Shanxi seismic belt based on the research results in this paper

(2) 山西地震带已有的4个Q值函数中, $Q(f) = 299.4f^{0.563}$ 计算得到的频谱 M_w 更接近矩张量反演的 M_w 结果, 且与Q值模型参数 Q_0 、 α 和 κ 的优化组合结果存在较好吻合。

(3) 本研究中对于 $3.6 \leq M_L \leq 5.1$ 地震事件, 基于频谱分析计算得到的矩震级与基于矩张量反演的矩震级较接近; 在已具有详细的区域非弹性衰减模型研究结果的基础上, 基于频谱分析快速测定中小地震矩震级具有可行性。

参考文献:

- [1] Xu Xiwei, Ma Xingyuan. Geodynamics of the Shanxi Rift system, China[J]. Geodynamics of Rifting, 1992: 325-340.
- [2] Xu Xiwei, Ma Xingyuan, Deng Qidong. Neotectonic activity along the Shanxi rift system, China[J]. Tectonophysics, 1993, 219(4): 305-325.
- [3] 巩玉琪. 山西地堑带地质构造特征及地震活动性[J]. 山西地震, 1980(1): 22-26.
- [4] 李树德. 中国东部山西地堑系的形成机制及构造地貌、地震探讨[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1997, 33(4): 467-474.
- [5] Li Bin, Kuvvet A, SM Btger, et al. Stress pattern of the Shanxi rift system, North China, inferred from the inversion of new focal mechanisms [J]. Geophysical Journal International, 2015, 201: 505-527.
- [6] 扈桂让. 山西北部某场地活动断裂探测研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(16): 71-73.
- [7] Li Bin, Srensen M B, Atakan K, et al. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for the Shanxi Rift System, North China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2020, 110(1): 127-150.
- [8] Benjamin E, Bertina A, Donat F, et al. Automatic computation of moment magnitudes for small earthquakes and the scaling of local to moment magnitude[J]. Geophysical Journal International, 2010, 1: 407-420.
- [9] Goertz-Allmann B P, Edwards B, Bethmann F, et al. A new empirical magnitude scaling relation for switzerland [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(6): 3088-3095.
- [10] Li Bin, Sorensen, Mathilde, et al. New magnitude scales $M(L)$ and spectrum-based $M(W)$ for the area around Shanxi Rift System, North China[J]. Journal of seismology, 2015, 19(1): 141-158.
- [11] Kanamori H. Magnitude scale and quantification of earthquakes[J]. Tectonophysics, 1983, 93(3-4): 185-199.
- [12] 陈运泰, 刘瑞丰. 矩震级及其计算[J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 39(2): 1-9.
- [13] 李斌, 李自红, 宋美琴, 等. 山西原平 $M_L 4.7$ 地震矩张量反演[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(5): 598-605.
- [14] Kanamori H. The energy release in great earthquakes [J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(20): 2981-2987.
- [15] Hanks T C, Kanamori H. A moment magnitude scale [J]. Journal of Geophysical Research, 1979, 84(B5): 2348.
- [16] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75: 4997-5009.
- [17] Kijko A. Modeling some empirical vertical component L_g relations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73: 157-171.
- [18] Ottemoller, L. Moment magnitude determination for local and regional earthquakes based on source spectra[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(1): 203-214.
- [19] Dreger D S. 85, 11 TDMT_INV: Time domain seismic moment tensor INVersion[J]. International Geophysics, 2003, 81(3): 1627.
- [20] Chen Ling, Cheng Cheng, Wei Zigen. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2009, 286: 171-183.
- [21] 唐有彩, 冯永革, 陈永顺, 等. 山西断陷带地壳结构的接收函数研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(9): 2102-2109.
- [22] 李传金, 徐佩芬, 孙勇军, 等. 用远震接收函数研究山西地区地壳厚度变化: “晋中坡折带”及其地质意义探讨[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1143-1148.
- [23] Yu CQ, Chen WP, Ning JY et al. Thick crust beneath the Ordos plateau: implications for instability of the North China craton[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2010, 293: 1-10.

- ters, 2012, 357: 366-375.
- [24] 彭美焯. 利用近震尾波估算山西地区地壳介质的 Q 值[J]. 地震, 1989(4): 52-57.
- [25] 啜永清, 赵新平. 山西断陷带北中部介质 Q 值的研究[J]. 山西地震, 1992(3): 58-60.
- [26] 啜永清, 苏燕, 贾建喜, 等. 山西地区非弹性衰减系数、场地响应和几种震源参数的研究[J]. 地震学报, 2004, 26(4): 369-378.
- [27] 宋美琴, 王秀文, 梁向军, 等. 利用数字化地震波形资料研究山西中南部地区的非弹性衰减系数、震源参数和场地响应[J]. 山西地震, 2007(4): 1-6.
- [28] 董春丽, 胡玉良, 张玲, 等. 山西地区非弹性衰减系数、场地响应和震源参数的初步研究[J]. 华北地震科学, 2011, 29(4): 7-14.
- [29] 梁向军, 刘林飞, 张玲, 等. 利用遗传算法反演山西地区非弹性衰减系数、场地响应和震源参数[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(B08): 18-21.
- [30] Atkinson G M, Mercu R F. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(5): 2014-2031.
- [31] Moya A, Aguirre J, Irikura K. Inversion of source parameters and site effects from strong ground motion records using genetic algorithms[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(4): 977-992.
- [32] Bethmann F, Deichmann N, Mai P M. Scaling relations of local magnitude versus moment magnitude for sequences of similar earthquakes in Switzerland[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(2): 515-534.
- [33] Deichmann, N. Local magnitude, a moment revisited[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(4A): 1267-1277.
- [34] Grünthal G, Stromeier D. The unified catalogue of earthquakes in central, northern, and northwestern Europe (CENEC)—updated and expanded to the last millennium[J]. Journal of seismology, 2009, 4(13): 517-541.
- [35] Ottmøller L, Sargant S. A local magnitude scale M_L for the United Kingdom[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103: 2884-2893.

Determination of Moment Magnitude Based on Spectrum Analysis ——Taking Shanxi Seismic Belt as an Example

LI Bin^{1, 2}, JIN Yi-dan¹, LI Jia-li¹, WANG Zhen-dong¹, Nganaye Gomer De Dieu¹

(1. Department of Earth Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Institute of Prevention for Earthquake and Geological Hazards, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Moment magnitude M_w is the most ideal physical quantity for measuring earthquake size at present, and has become the preferred magnitude selected by the international seismological community. For moderate-strong earthquake events, the moment magnitude M_w can usually be obtained by using long-period seismic waves based on moment tensor inversion calculation. However, for earthquake events with magnitude below about 3, direct moment tensor inversion sometimes produces large errors. In this paper, taking Shanxi seismic belt as an example, using the digital waveform data of the seismic network of Shanxi province, the analysis and evaluation of the Q-value function model in the study area and the moment magnitude measurement based on spectrum analysis are carried out. The research results show that the spectrum M_w calculated based on the Q-value function $Q(f) = 299.4f^{0.583}$ is closer to the M_w of the moment tensor inversion, and there is a good agreement with the optimal combination results of the Q-value model parameters Q_0 , α and κ . For events with $2.4 \leq M_L \leq 5.1$, the moment magnitude calculated based on spectrum analysis is close to the moment magnitude based on moment tensor inversion. On the basis of the detailed research results of the regional inelastic attenuation model, it is feasible to quickly determine the moment magnitude of small and medium earthquake based on spectrum analysis.

Key words: Moment magnitude M_w ; Spectrum Analysis; Medium-small earthquakes; Shanxi seismic belt

浙江省非天然地震区域特点和识别方法

赵梦琦, 孙侃, 吕奥博, 陈依妮

(浙江省地震局, 浙江 杭州 310013)

摘要: 随着科技进步和工业发展, 浙江省数字地震台网记录到越来越多的非天然地震事件, 2015 年至 2021 年记录到 2 400 余个非天然地震事件。为便于工作人员快速分析、研判地震事件性质, 及时开展应急救援工作, 对非天然地震事件的区域特点及识别方法的总结尤为重要。本文概述天然地震与非天然地震的波形特性, 对浙江台州临海、舟山岱山、温州文成和湖州长兴 4 个典型区域的非天然地震波形进行震相分析、统计计算和频谱分析, 并与同区域的地震波形相比较, 获得浙江省非天然地震的规律与特征, 归纳出浙江省不同区域的非天然地震波形特征和识别方法。

关键词: 波形分析; 非天然地震; 区域特点

中图分类号: P315.3

文献标志码: A

0 引言

浙江省数字地震台网于 2000 年 1 月运行至今, 记录到天然地震、非天然地震以及其他震源或干扰产生的波形信息。2019 年 12 月, 非天然地震事件信息专报制度正式施行。2020 年 3 月开始, 浙江省数字地震台网集中归档所有触发报警的非天然地震事件。截至 2021 年 12 月, 总计归档非天然地震事件 2 400 余个。我国幅员辽阔, 不同地区的地质构造差异较大, 本文参考前人对不同省份的非天然地震识别判据^[1-4], 选取浙江省 4 个典型区域的非天然爆破事件(见表 1、第 10 页图 1), 对其波形特征进行分析, 并与同区域的天然地震进行比较, 得出浙江省不同区域非天然地震的特点, 总结其识别方法。

1 浙江省数字地震台网概况

浙江省数字地震台网包含 1 个台网中心和 55 个测震台站。台网中心采用广东省地震局研制的 JOPENS 测震台网数据采集与常规处理软件, 通过人机交互实时处理地震事件; 测震台站使用 BBVS-60 和 GL-S60 两种宽频地震计, EDAS-24IP 和 EDAS-24GN 两种数据采集器。为提高台网监测能力, 浙江省数字地震台网连接国家台网中心的 SDH 专用信道, 从邻省、直辖市(福建、江苏、上海、安徽和江西)区域地震台网获得 20 个测震台站的准实时地震波形数据^[5]。目前, 该数字地震台网有 75 个测震台站的波形数据(见第 11 页图 2)。

表 1 4 个典型区域非天然地震与天然地震信息汇总表

Table 1 Summary of information for non-natural and natural earthquakes in four typical regions

序号	发生日期	发生时间	发生位置		M_L 震级	发生地点	事件类型
			纬度(°)	经度(°)			
1	2019-06-28	12:17:36	28.80	121.67	2.3	台州临海	爆破
2	2016-03-22	06:44:43	30.30	121.95	1.9	舟山岱山	爆破
3	2018-04-16	23:09:59	30.28	122.60	2.2	舟山岱山	地震
4	2019-08-11	11:37:20	27.75	119.98	1.7	温州文成	爆破
5	2016-01-24	07:08:47	27.68	119.98	1.4	温州泰顺	地震
6	2016-07-06	20:38:37	31.11	119.68	2.6	湖州长兴	塌陷
7	2022-03-18	00:06:14	30.94	120.00	2.1	湖州长兴	地震

注:有数字地震台网波形记录以来, 台州临海未发生过天然地震, 故不讨论该区域的地震波形

收稿日期:2022-05-10

基金项目:浙江省地震局科技项目(2020zjj08)。

第一作者简介:赵梦琦(1989—), 女, 浙江杭州人。博士研究生, 工程师, 主要从事地震预报及监测等相关工作, E-mail:chaosmeng@126.com。该文获“庆祝《山西地震》创刊 50 周年有奖征文活动”三等奖。

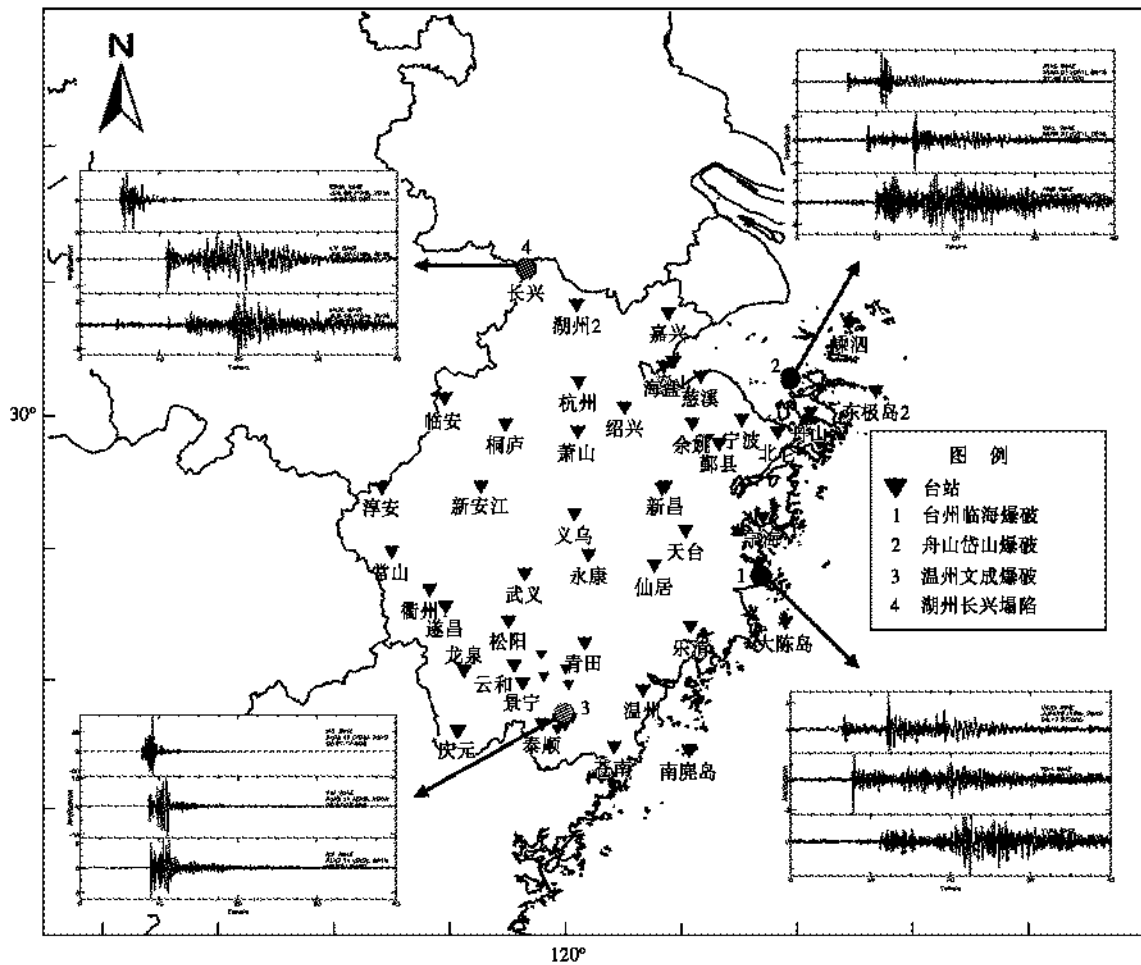


图1 经 1.5~15 Hz 滤波的记录到 4 个典型区域非天然地震的前 3 个台站垂直向波形
 Fig. 1 Vertical waveforms of the first three stations for non-natural earthquakes in four typical regions after filtered with 1.5-15 Hz bandpass

2 地震波形记录特征

2.1 地震波记录的共性特征

地震信息图上记录的信息包括由天然地震引发的地震波信息和其他的振动波信息。这些波的记录特征由于其振动方式及传播路径等不同形成差异。根据这些特征差异,将事件主要分为天然地震、人工爆破和塌陷。前人^[6-8]对这三类事件中地震记录的共性特征,总结出以下四点:

- (1) 各台站记录的波形依次出现的为纵波、横波和面波(纵波速度>横波速度>面波速度)。
- (2) 面波周期>横波周期>纵波周期。
- (3) 面波振幅>横波振幅>纵波振幅。
- (4) 震级越大,波列持续时间越长。

2.2 爆破的记录特征

参考国内外专家学者对爆破事件识别的研究结果^[9-14],归纳出 5 条识别爆破的主要判据:

(1) 初动向上。爆破因是膨胀源,产生的压缩波无象限分布,在震中距较近的台站记录到的垂直分量初动较强且多向上;天然地震是岩石的破裂或错动,初动方向多呈四象限分布。

(2) 纵波发育。爆破过程中,岩石受到正压力,无剪切力,直接产生的只有纵波,横波是因破裂过程发生切变派生而来,故爆破的纵波较强、横波较弱。尤其是震中距在数十公里的爆破波形中,可观察到纵波的垂直分量有一个振幅较大、周期较长的脉冲。

(3) 频率低。与天然地震相比,爆破频率较低,尤其在横波之后更明显。

(4) 时间较规律。天然地震的发生有较大的随机性,爆破是人工作业,一般发生在工作日的白天(见图3)。如,浙江省台州临海的爆破事件通常发生在中午。

(5) 波列衰减较快,持续时间较短,尤其横波与天然地震相比更明显。

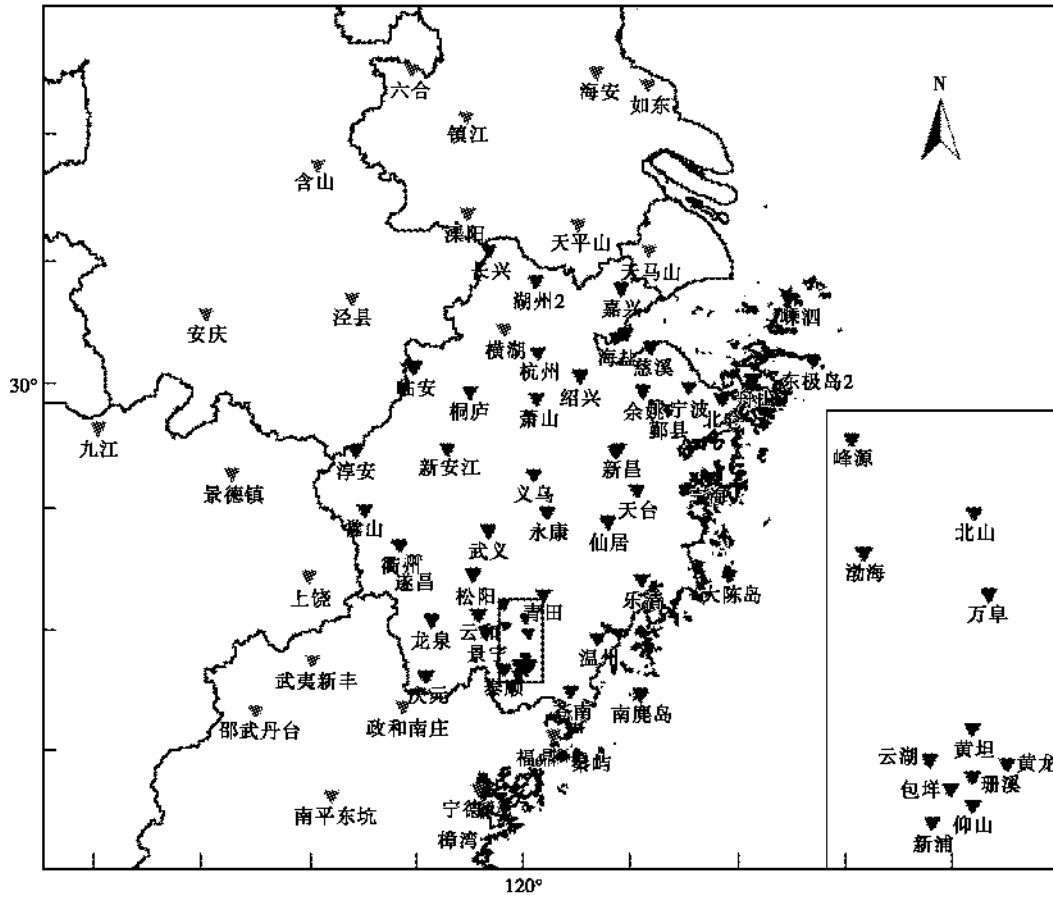


图2 浙江省及邻区测震台站分布
Fig. 2 Distribution of seismograph stations in Zhejiang Province and adjacent areas

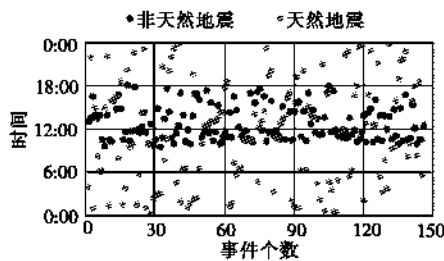


图3 2020年至2021年浙江省天然与非天然地震时间分布情况
Fig. 3 Time distribution of natural and non-natural earthquakes in Zhejiang Province from 2020 to 2021

2.3 塌陷的记录特征

与天然地震相比,塌陷具有以下特征:

(1) 震源体对源外介质主要实施拉力,首个记录台站的垂直分量初动多向下,与爆破相反,大多表现较平缓,这是识别塌陷的重要标志^[15-17]。

(2) 波形频率较单一,比爆破更低,接近 1 Hz,高频成分较少。有时甚至难以区分纵波和横波的记录频率。

(3) 面波明显且出现较早,波形周期较大,衰减较快。

3 浙江省非天然地震的记录特征

3.1 台州临海爆破记录特征

2015年以来,记录到的最大爆破发生在台州临海,

达 $M_L 2.3$ (见图 4), 在工业开发区, 爆破时间在中午。其记录特点是纵波与其他地区的爆破相比较小, 面波较发育。由图 4 看出, 除大陈岛台和乐清台由于噪声干扰较

大, 初动不清外, 其他两台初动清晰向上。该地区的爆破事件优势频率集中在 $0 \sim 2$ Hz, 76 km 左右的天台台站记录的面波发育, 频率最低接近 1 Hz。

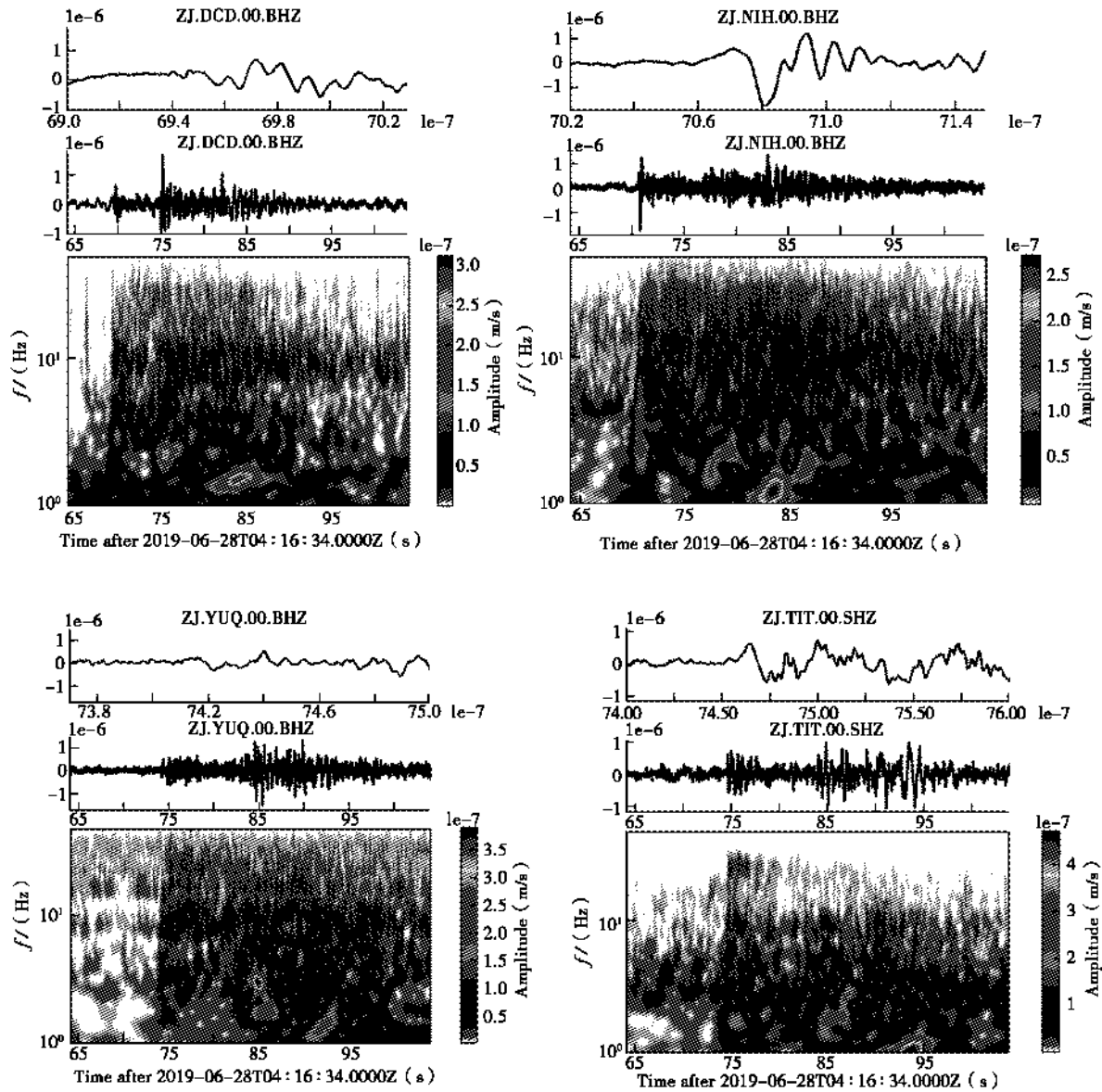


图 4 记录到 2019 年 6 月 28 日临海 $M_L 2.3$ 爆破的前 4 个台站波形及其频谱对比
 Fig. 4 Comparison of waveforms and spectra of the first four stations for the $M_L 2.3$ explosion in Linhai recorded before June 28, 2019

3.2 舟山岱山爆破记录特征

另一个发生爆破较多的地区是舟山岱山, 其记录波形的面波较不发育, 看起来与地震波形类似。区分的主要特征是频率单一, 主要集中在 $2 \sim 3$ Hz; 纵波较强, 初动清晰向上 (见第 13 页图 5)。该地区的爆破主

要是由大型石化基地建设引起, 故震级较大, 最大达 $M_L 1.9$, 全天均有发生。为进行比较, 以 2018 年 4 月 16 日岱山 $M_L 1.4$ 地震为例 (见第 14 页图 6), 该地区的地震频率较爆破高, 能达到 10 Hz 以上, 且能发现记录到初动清晰向下的台站。

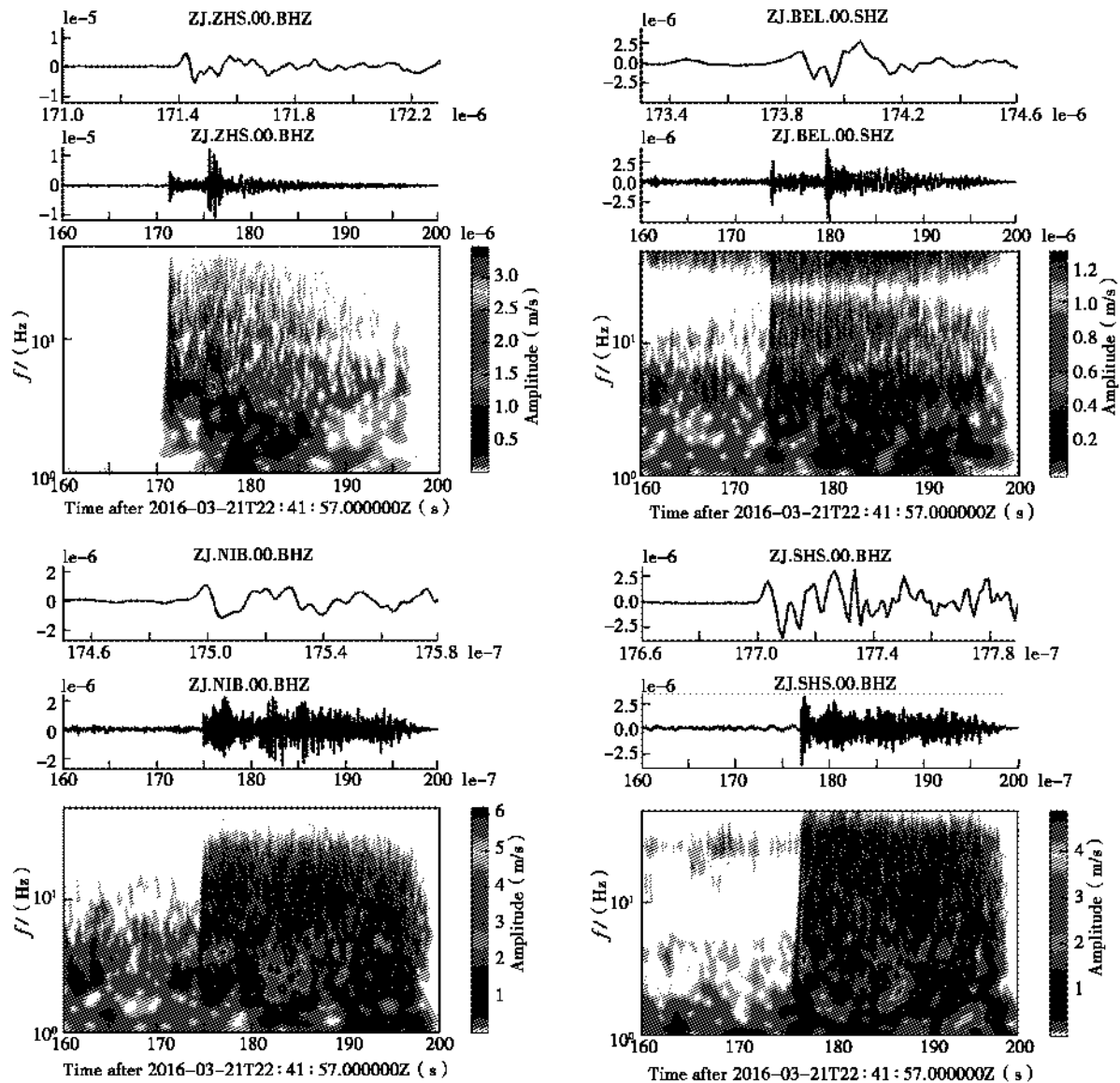


图5 记录到2016年3月22日岱山 $M_L 1.9$ 爆破的前4个台站波形及其频谱对比
 Fig. 5 Comparison of waveforms and spectra of the first four stations for the $M_L 1.9$ explosion in Daishan recorded before March 22, 2016

3.3 温州泰顺、文成爆破记录特征

除上述两个地区,温州泰顺和文成交界处由于测震台站较多,能记录到大量震级较小的工业爆破。与台州临海和舟山岱山相比,该地区的触发事件有爆破事件和大量的天然地震,因此对两者的正确识别显得更重要。

记录到爆破的波形特点是近台初动向上、纵波较强(见第15页图7)。由于各台站的震中距较近,地震记录图上横波不明显,一般震级在 $M_L 2.0$ 以下。

图7中的爆破事件震中距在7 km左右的云和台出现明显的面波,优势频率为2~3 Hz。该地区的爆破主要是交通基建工程施工造成,时间大多在中午,偶尔在晚上。

由于该地区的地震属于水库诱发地震,震源深度较浅,与爆破有一定的相似性(如,近台可能发育周期略大的面波)。与该地区的爆破波形相比,地震波形记录中近台通常有清晰的向下初动,纵波振幅明显小于横波,这是区别该地区地震和爆破的主要方法(见第

16 页图 8)。除此之外,爆破波形频率较单一、面波更发育、震级通常在 $M_L 2.0$ 以下等特征,也作为识别地震和爆破的辅助特征。

总的来讲,浙江省的爆破事件主要为工程爆破,爆破震中大多在工程所在地,大部分省内天然地震都发

生在地质构造活动地区,尤其是珊溪和皎口水库附近发生的震群。为避免造成意外事故及次生灾害,爆破药量受严格控制,震级通常在 $M_L 2.0$ 以下。由于浙江省的地震活动性较弱,爆破事件数量较天然地震的多。

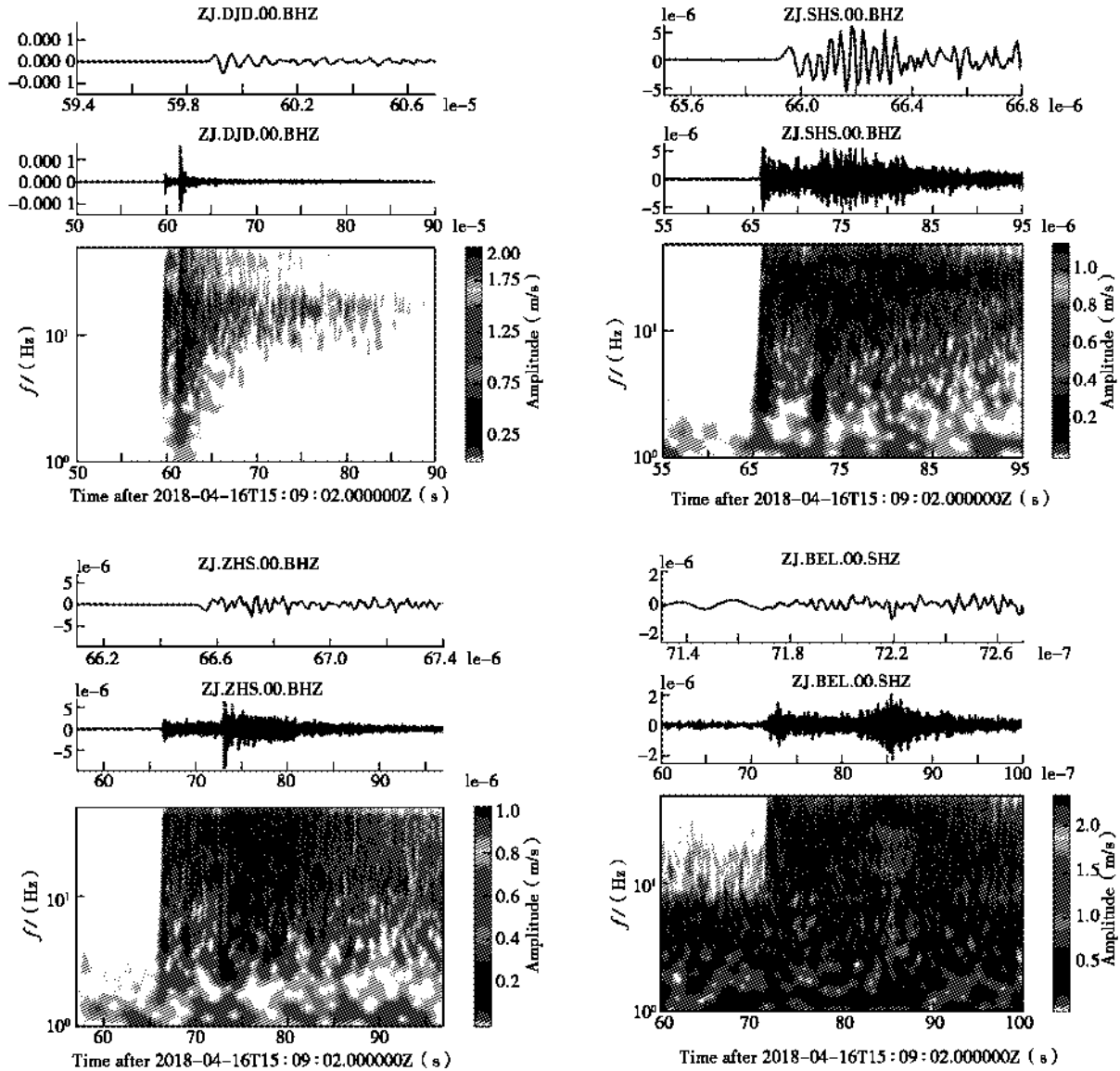


图 6 记录到 2018 年 4 月 16 日岱山 $M_L 1.4$ 地震的前 4 个台站波形及其频谱对比
 Fig. 6 Comparison of waveforms and spectra of the first four stations for the $M_L 1.4$ earthquake in Daishan recorded before April 16, 2018

3.4 湖州长兴塌陷记录特征

浙江省的塌陷主要分布在湖州长兴,属煤矿尾矿塌陷。该地在 2016 年 7 月 6 日和 7 日分别发生 $M_L 2.6$ 和 $M_L 2.5$ 的塌陷。记录到该事件的波形面波发

育且首个台站初动清晰向下,可与地震和爆破波形进行明显区分(见第 17 页图 9)。该地区的塌陷事件优势频率偏低,主要分布于 $0 \sim 3$ Hz,频率成分与爆破事件相比更简单,能量衰减较快。在震中距 36 km 左右

的江苏溧阳台出现较清晰的面波,频率达到最低值。与塌陷事件相比,该处的地震波形频率更高(见第18页图10),近台未出现明显面波,横波振幅与纵波振幅

之比更大。该区域由于地质构造的原因,与浙江省其他区域相比初动较平缓。

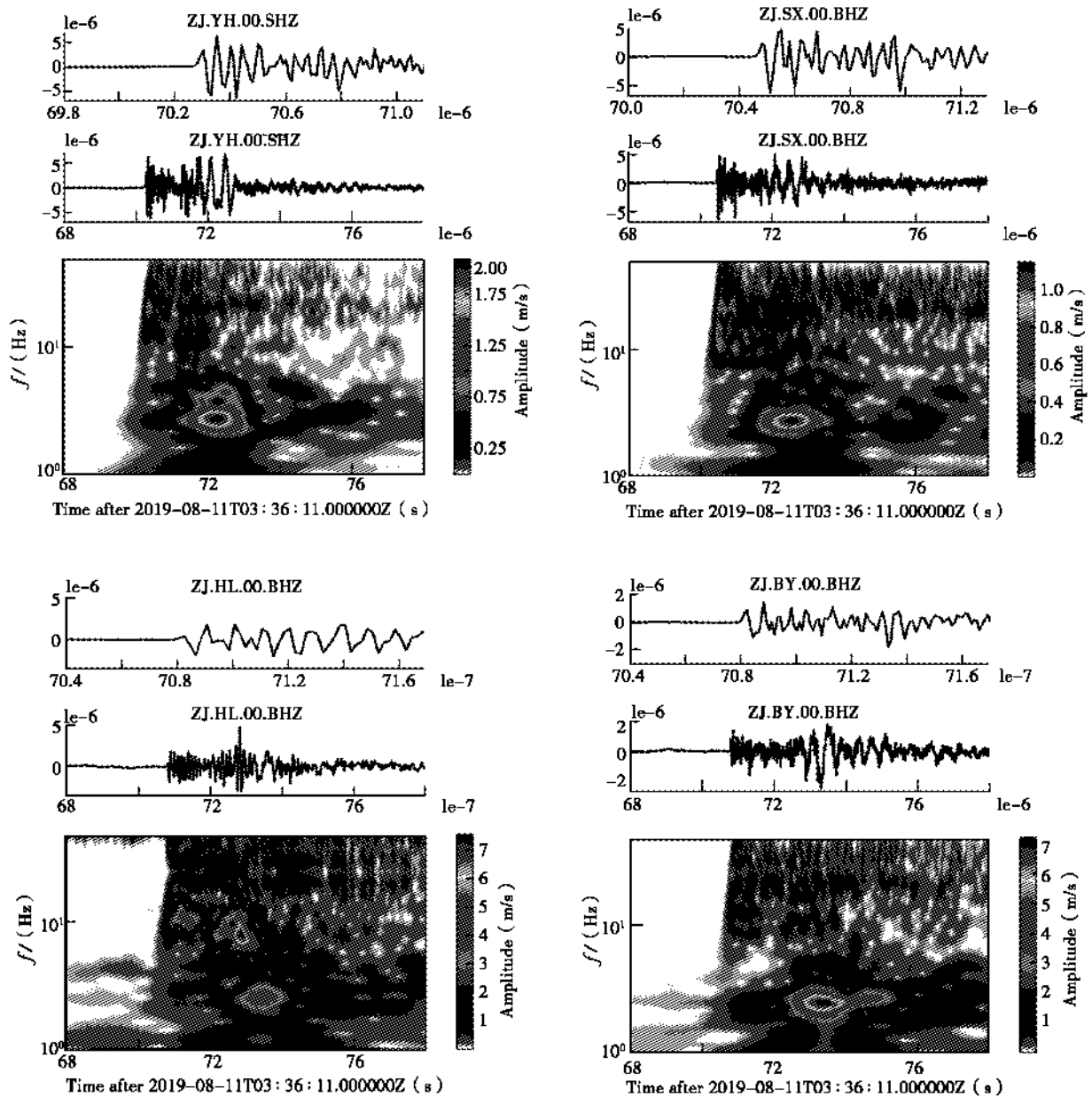


图7 记录到2019年8月11日文成 M_L 1.7 爆破的前4个台站波形及其频谱对比
 Fig. 7 Comparison of waveforms and spectra of the first four stations for the M_L 1.7 explosion in Wencheng recorded before August 11, 2019

3.5 浙江省其他非天然地震事件

除地震、爆破和塌陷,浙江省还发生过滑坡、音爆等其他非天然地震事件。例如2015年11月13日丽

水市莲都区 and 2016年9月28日丽水市遂昌县,由于降水导致的山体滑坡;2019年3月12日嘉兴地区的音爆事件;2019年3月19日和20日杭州市下沙、萧

山地区出现巨响,并伴随震动等。这些事件发生后,台网地震速报值班人员第一时间判断为非天然地震事件并进行粗定位,由于事件的能量较小,区域地震监测台

网分布稀疏,非天然事件的能量衰减较快,清晰记录的台站不多,未能进行精确定位和能量估算。

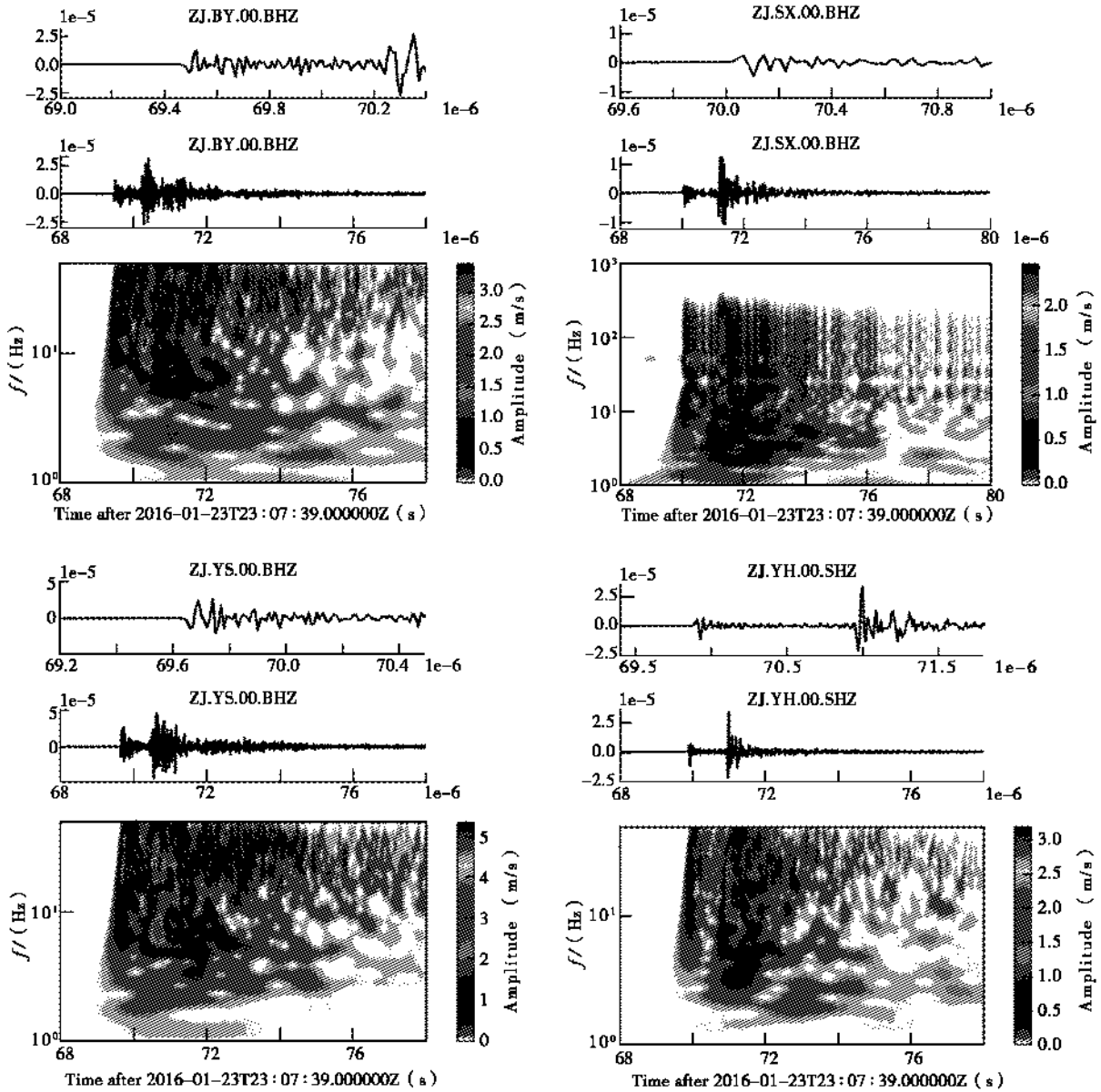


图8 记录到2016年1月24日泰顺 M_L 1.4地震的前4个台站波形及其频谱对比
 Fig.8 Comparison of waveforms and spectra of the first four stations for the M_L 1.4 earthquake in Taishun recorded before January 24, 2016

4 结论与讨论

通过对浙江省数字地震台网记录波形的分析和研判,总结出4个典型区域的非天然地震波形特征及识

别方法。

- (1) 台州临海的爆破震级最大,纵波较小、面波较发育。
- (2) 舟山岱山的爆破波形频率单一、纵波较强、初

动清晰向上。

(3) 温州泰顺、文成的爆破震级较小,近台初动向上且纵波较强。

(4) 湖州长兴的塌陷面波发育,首个记录台站初动清晰向下。

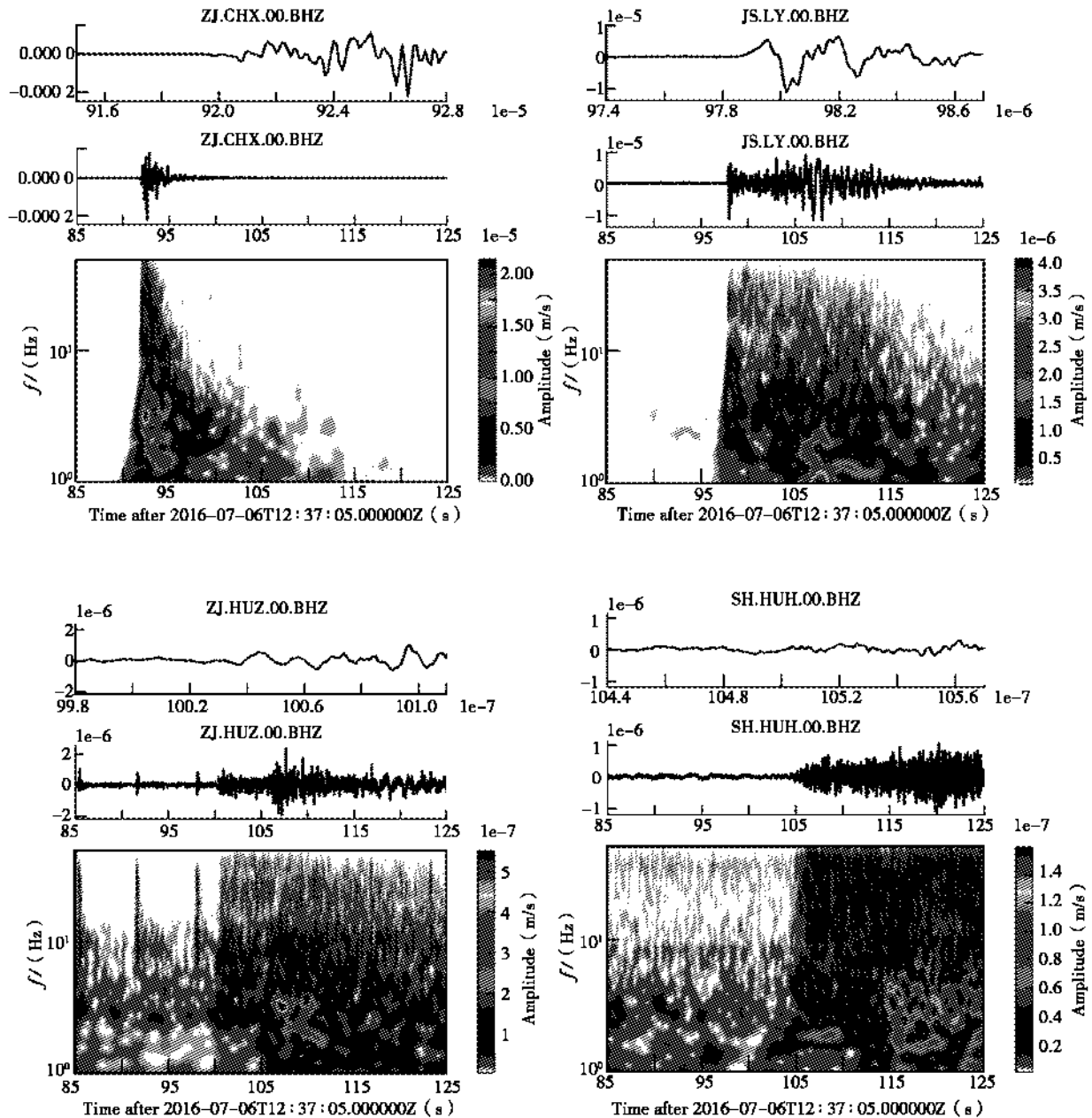


图9 记录到2016年7月6日长兴 M_L 2.6塌陷的前4个台站波形及其频谱对比
Fig.9 Comparison of waveforms and spectra of the first four stations for the M_L 2.6 collapse in Changxing recorded before July 6, 2016

地震分析要解决的第一问题是如何正确判别各种传播路径的地震波及其震相等重要信息,浙江省内爆破、塌陷等非天然事件较多,快速、准确地识别其波形

记录尤为重要,以上分析结果可为地震速报、震相分析和地震数字化应用提供一定的参考。

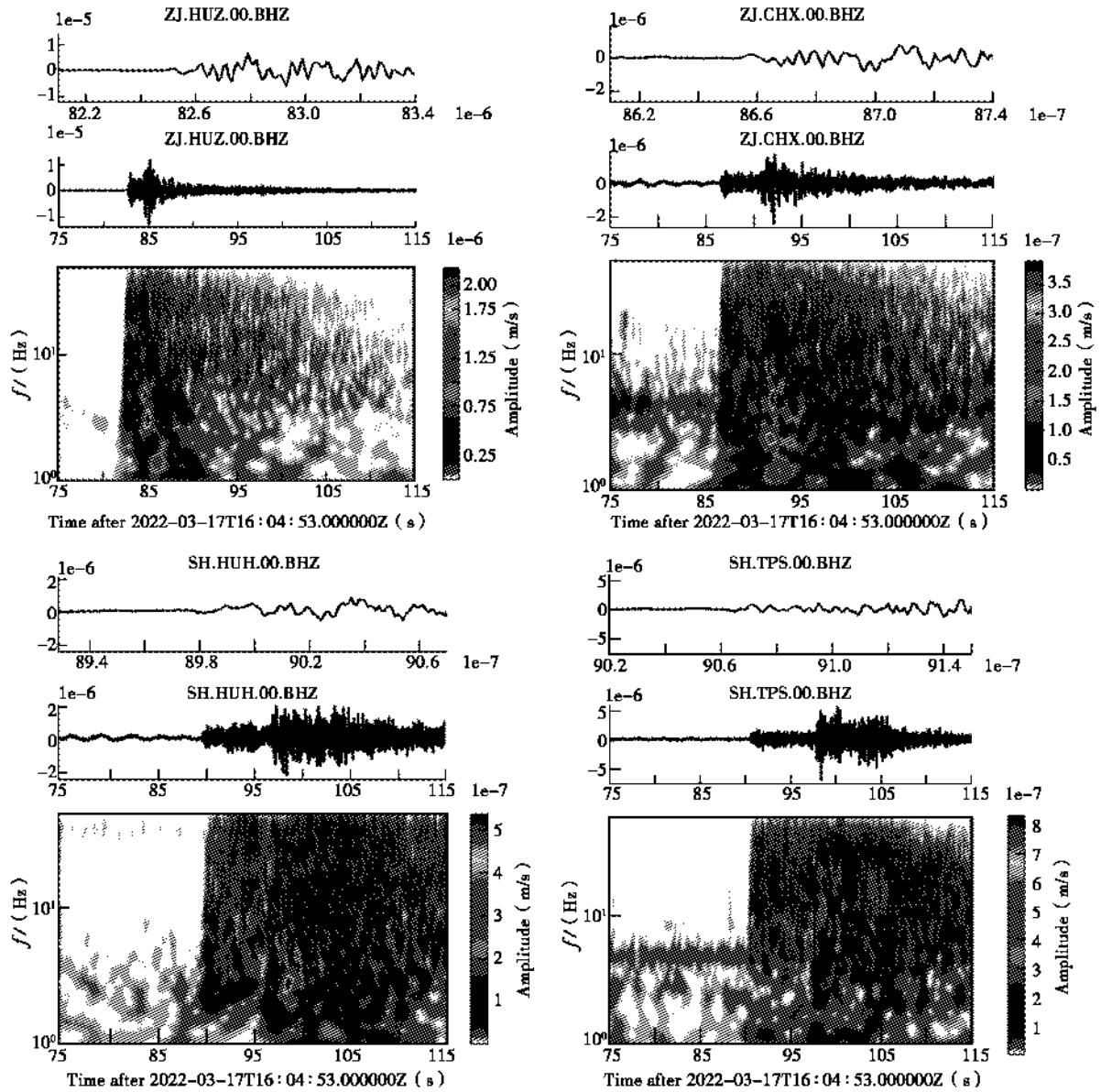


图 10 记录到 2022 年 3 月 18 日长兴 M_L 2.1 地震的前 4 个台站波形及其频谱对比
 Fig. 10 Comparison of waveforms and spectra of the first four stations for the M_L 2.1 earthquake in Changxing recorded before March 18, 2022

参考文献:

[1] 吴忠良, 陈运泰, 牟其铎. 核爆炸地震学概要[M]. 北京:地震出版社, 1994:88-92.
 [2] 赵永, 刘卫红, 高艳玲. 北京地区地震、爆破和矿震的记录图识别[J]. 地震地磁观测与研究, 1995(4):48-54.
 [3] 苏莉华, 魏玉霞. 河南省非天然地震的波形特征及识别方法[J]. 高原地震, 2011, 23(2): 30-34.
 [4] 林伟, 吴叔坤, 陈杏. 广东非天然地震的特征与识别[J]. 华南地震, 2004(1): 37-45.

[5] 郑亚迪, 宋美卿. 山西大同朔州地区非天然地震特征与识别[J]. 山西地震, 2022(1): 7-11.
 [6] 中国地震局监测预报司. 地震学与地震观测[M]. 北京:地震出版社, 2007.
 [7] 周舟. 非天然地震的波形特征与识别方法[J]. 科学技术创新, 2021(17):2.
 [8] 唐婷婷, 余思, 陈江贻. 天然地震与人工爆破特征识别研究综述[J]. 地震科学进展, 2021, 51(9):10.
 [9] Rodgers A J, Walter W R. Seismic Discrimination of the May 11, 1998 Indian Nuclear Test with Short-period Regional Data from Station NIL (Nilore, Pakistan) [J]. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159(4):679-

- 700.
- [10] Taylor S R , M. D. Denny, Vergino E S , et al. Regional discrimination between NTS explosions and western US earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1989, 79(4):1142-1176.
- [11] 傅淑芳,刘宝诚,李文艺. 地震学教程(下册)[M]. 北京:地震出版社,1980:127-130.
- [12] 刘 莎,杨健思,田宝峰,等. 首都圈地区爆破、矿塌和天然地震的识别研究[J]. 地震学报,2012,34(2):13.
- [13] 沈 萍,郑洽真. 瞬态谱在地震与核爆识别中的应用[J]. 地球物理学报,1999,42(2):233-240.
- [14] 张 娜,王 霞. 基于S变换的山西地区不同地震事件频谱特征分析[J]. 山西地震,2022(1): 1-6.
- [15] 王 风,吕 震,刘 兵,等. 邹城地区矿震、爆破和(天然)地震事件的特征分析[J]. 地震地磁观测与研究,2013,34(Z1):82-86.
- [16] 梁永焯,张 玲. 山西代县及左云地区爆破、塌陷波形特征对比分析[J]. 山西地震,2020(2):10-14.
- [17] 靳玉贞,林木金,范晓瑜,等. 山西地区爆破、塌陷(矿震)特殊地震动特征识别[J]. 地震地磁观测与研究,2015(3):63-66.

Characteristics and Identification Methods of Non-Seismic Areas in Zhejiang Province

ZHAO Meng-qi, SUN Kan, LV Ao-bo, CHEN Yi-ni

(Zhejiang Earthquake Agency, Hangzhou, Zhejiang 310013, China)

Abstract: With the advancement of technology and industrial development, the Zhejiang Province Digital Seismic Network has recorded an increasing number of non-seismic events, with over 2,400 non-seismic events recorded from 2015 to 2021. It is important to summarize the characteristics and identification methods of non-seismic events to facilitate rapid analysis and judgment by earthquake workers and timely emergency response. This paper summarizes the waveform characteristics of natural and non-seismic events, analyzes and calculates the non-seismic waveforms of four typical regions in Zhejiang Province, namely Linhai in Taizhou, Daishan in Zhoushan, Wen Cheng in Wenzhou, and Changxing in Huzhou, through phase analysis, statistical calculation, and spectral analysis. The characteristics and rules of non-seismic events in Zhejiang Province are compared with seismic waveforms in the same region, and the characteristics and identification methods of non-seismic waveforms in different regions of Zhejiang Province are summarized.

Key words: Waveform analysis; Non-seismic events; Regional characteristics

· 地震地质 ·

文章编号:1000-6265(2023)01-0020-04

山西清徐地裂缝分布、类型与建筑物避让距离确定

马秀芳^{1,2}, 赵晋泉^{1,2}, 曾金艳^{1,2}, 薛晓东^{1,2}, 薄建杰^{1,2}

(1. 山西省地震局, 山西 太原 030002; 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: 野外沿山西清徐地裂缝的展布区进行详细的地质调查、地质填图和地球物理勘探, 查明地裂缝的分布范围、活动特征, 分析成因类型, 确定建筑物避让距离。勘察区范围内地裂缝的展布大部分地段局限于交城断裂带东侧 200 m 之内, 方山村、西梁泉、东梁泉村在 200 m 之外仍有地裂缝分布, 其地裂带影响宽度为 244 m。清徐地裂缝有两种成因类型, 即构造地裂和非构造地裂。构造地裂为清徐西边山一带主要的地裂缝类型, 受交城断裂带的控制, 分布于交城断裂带及其附近, 具有规模大、破坏性强的特点; 非构造地裂位于六合村和大峪村, 六合村地裂缝主要是由超采地下水导致地面沉降而产生, 大峪村地裂缝是由于采煤引起的采空区地裂, 非构造地裂呈规模较小、分布范围小的特点。分析认为, 清徐一带建筑物避让交城断裂带的距离为: 方山、西梁泉、东梁泉 3 个村乙类建筑避让带的宽度确定为 280 m; 其他各村乙类建筑避让距离仍为 200 m, 丙类建筑按规范确定的 100 m 避让, 且不得跨越地裂缝; 交城断裂下盘(西侧)避让带宽度为: 西侧的乙、丙类建筑的避让距离为 100 m。

关键词: 地裂缝; 避让距离; 建筑物

中图分类号: P315.2⁺2

文献标志码: A

0 引言

交城断裂为太原断陷盆地的西界断裂, 是太原盆地内规模最大的断裂, 对太原盆地的形成、发展起着决定性作用。1998 年以来, 在清徐县西边山一带沿交城断裂相继出现了大量的地裂缝, 使沿线的村庄、道路、厂房、农田遭到不同程度的破坏。笔者一行沿地裂缝的展布区进行地质调查和地质填图, 查明清徐县地裂缝的分布范围、活动特征, 分析其成因类型, 确定了清徐一带建筑物避让交城断裂带的距离。研究结果可为减轻地裂对清徐县西边山一带建(构)筑物的破坏, 为清徐县的城乡建设提供规划依据。

1 研究方法与标准

研究范围为清徐县境内交城断裂带的展布区北西 1 km、南东 4 km, 东起上固驿村北东, 西至武家坡村西, 北起猫儿梁—刘家园—方山一线, 南至西支河渠一线, 面积 75 km²。通过地质、水文资料收集, 地质调查、探槽开挖、地球物理勘探等手段, 查明勘察区内断

层和地裂缝的位置、活动历史、几何形态、性质。

为在调查中统一对地裂缝灾害的评价尺度, 参考建筑地震破坏划分标准^[1]。本次调查将地裂缝对建筑物的灾害划分为三个层次: ①严重破坏。房屋因地裂缝发生倾斜、倒塌, 墙体、地面开裂并有 2 cm 左右的垂直位移, 主体结构遭到破坏, 承重墙体、圈梁、地基、屋顶有开裂及沉降, 地裂缝通过的房屋, 已无法维修恢复的房屋。②中等破坏。距离地裂缝较近的房屋, 墙体砌砖开裂, 地面开裂, 但房屋主体结构未发生变形和破坏, 中等维修后暂可居住的房屋。③轻微破坏。中等破坏外围的房屋, 地面产生细小的地裂, 墙体抹灰层开裂、脱落, 砌砖沿砖体之间有开裂现象, 经简单维修后仍可居住的房屋。

2 清徐地裂缝分布与成因

地裂缝是一种特殊的地壳形变, 与活动断裂有关的地裂缝实际上是断裂蠕滑活动在地表的直接显示, 是断裂除突发性粘滑错动产生地震以外的另一种表现形式, 是严重的自然灾害^[2]。笔者一行经过两个多月

收稿日期: 2022-07-23

基金项目: 山西省清徐县境内交城断裂带、地裂缝勘察及地震活动性评价工作, 清徐县经济技术开发区区域性地震安全性评价项目, 山西省地震局科研项目(SBK-1932、SBK-2035), 阳泉市地震局地震灾害预测采购项目。

第一作者简介: 马秀芳(1980—), 女, 山西大同人。工程师, 硕士研究生, 主要从事震害预测、地震安全性评价和历史地震研究工作, E-mail: 584131019@qq.com。

该文获“庆祝《山西地震》创刊 50 周年有奖征文活动”二等奖。

的实地调查、地球物理勘探,查明了清徐地裂缝的分布情况(见第22页图1)。

经过调查分析,清徐地裂缝有两种成因类型,即构造地裂和非构造地裂。构造地裂为清徐西边山一带主要的地裂缝类型,受交城断裂带的控制,分布于交城断裂带及其附近,具有规模大、破坏性强的特点;非构造地裂位于清源镇六合村和大峪村,六合村地裂缝主要是由超采地下水导致地面沉降产生的地裂缝,大峪村地裂是由于采煤引起的采空区地裂,非构造裂缝具有规模较小、分布范围小的特点。

2.1 构造地裂缝

清徐构造地裂缝主要集中分布于东于镇、马峪乡、清源镇边山的14个村庄,由北东向南西地裂缝经上固驿、平泉、仁义、东马峪、西马峪、东梁泉、西梁泉、都沟、东于村(耕地中)、新民、方山、马家坡、口儿村、武家坡,向南延伸至交城县境内。地裂缝还涉及清徐县境内的高速公路管理处、收费站、新民村北高速公路涵洞、六六一七工厂。

地裂从1998年开始在平泉村、方山村出现地面破裂,至2008年在清徐境内断续延伸长度已达15 km,地裂走向在 $NE30^{\circ}\sim 80^{\circ}$,优势方位在 $N45^{\circ}\sim 70^{\circ}E$ 。地裂带由多条地裂组合而成,均分布在交城断裂带的附近,具成带性特点。清徐构造地裂带由1~4条地裂缝组成,相距30~200 m不等,带宽30~240 m,一般由一条主地裂和若干条次级裂缝组合而成。主地裂延伸长、连续性好,在垂直主地裂的剖面上地裂两盘的拉张量、垂直差异升降量和两盘的水平扭动量都最大。与主地裂近于平行或小角度相交的次级地裂缝的活动量较小。次级地裂缝在主地裂上盘多为3~5条,影响宽度大;在主地裂下盘数量为2~3条,影响宽度小。

2.2 非构造地裂缝

清徐县西边山一带的地裂缝主要以构造地裂为主,也存在非构造地裂,如六合村村北地裂缝、大峪村地裂缝;前者是由于超采地下水使地面产生沉降引发的地裂,后者是煤炭采空区引发的地裂。

2.2.1 六合村北地裂缝

六合村北地裂缝位于山前洪积扇的中前缘,出现于2005年,共有2条,展布于村北人工渠的南侧,断续延伸长度约1 km,地裂缝走向近东西向,具有弧形展布特征,弧内侧向北,北部为垂直下降盘,下降幅度约0.5~1.5 m,其中部下下降强烈两端下降较缓,走向上稳定性差,延伸较短,地裂出露处地面微地貌为小陡坎或斜坡,高差0.3~1.0 m。地裂倾向N,倾角 $85^{\circ}\sim 88^{\circ}$,地裂缝西部位于耕地中,东部贯穿山西新鑫煤业有限公司洗煤厂、山西清徐晋峰醋业有限公司两个厂区。地裂缝表现为水平拉张,开裂宽5~10 cm。

地裂使山西新鑫煤业有限公司5间房屋及围墙遭受轻微—严重破坏,单条地裂缝的严重破坏带宽3~

5 m左右,墙体及房屋地面下沉3~10 cm左右,墙体出现宽2~15 cm的裂缝。地裂两侧9 m范围内的房屋及墙体遭到中等破坏9~15 cm,15~36 m范围内的房屋遭到轻微破坏,地裂影响带宽30 m。地裂缝使六合村约50亩耕地遭受轻微—严重破坏。

据村民介绍,2005年开始出现地裂,2007年以来出现加速发展。根据对六合村北地裂缝的调查统计,地裂缝年平均垂直形变速率为200 mm/a,水平开裂速率为5 mm/a。经地质调查,该区抽取地下水较严重,地裂缝以北分布有5个机井,用于工业生产和农田灌溉,抽取的地下水含有大量的泥砂,水呈浅黄色,含泥砂量约千分之一,该区属地下水严重超采区。经地球物理勘探,该区地裂缝之下无活动断裂,10 m之下土层连续,表明该地裂缝属非构造地裂缝。六合村北地裂缝属因地下水超采导致地面沉降而引起的地裂缝,其出现与断裂活动无关。

2.2.2 大峪村地裂缝

大峪村地裂缝位于剥蚀低山区,大峪村附近出露地层为二迭系下统煤系地层,地裂缝出现于2005年,有多条不同方向的地裂缝展布于村中。地裂缝的延伸一般为30~100 m,宽2~10 cm,以水平拉张为主,单条地裂的影响宽度为10~20 m。

地裂使村内57间房屋严重破坏,370余间房屋遭到轻微—中等破坏,单条地裂缝的严重破坏带宽3~5 m左右,墙体及房屋地面下沉3~10 cm左右,墙体出现宽2~20 cm的裂缝。

根据对大峪村地裂缝的地质调查,大峪村附近地层产状近水平,无活动断裂分布,岩层连续稳定,山体边坡在 30° 左右,无产生基岩滑坡的条件。因此,可排除因断裂活动和山体滑动产生地裂缝的可能。据当地村民反映,在村庄周围分布有3个煤矿,常听到地下放炮的声音。本区出露为煤层上部地层,可采煤层埋深约100~160 m左右,由此推测大峪村地裂缝的产生是由采煤引起。该地裂缝属非构造地裂缝,与断裂构造无关。

3 建筑物避让交城断裂带的距离

据上述,交城断裂带属强烈活动的全新世活动断裂,是具有发生7级以上地震的发震断裂^[3-5],勘察区依据《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015),该区地震动峰值加速度分区为0.20 g,对应的地震基本烈度为Ⅷ度^[6]。

依据《建筑抗震设计规范》第4.1.7款第2条规定^[7],该区的乙类建筑应避让交城断裂带的距离为200 m;丙类建筑应避让的最小距离为100 m;甲类建筑应根据所选位置,进行专门研究确定其适宜性。在避让距离的范围内确有需要建造分散的、低于三层的丙丁类建筑时,应该提高一度采取抗震措施,并提高基础和上部结构的整体性,且不得跨越断层线。

3.1 交城断裂上盘(东侧)避让带宽度

地裂缝带集中展布于交城断裂的上盘(东侧),根据《建筑抗震设计规范》第4.1.7款第2条规定^[7],结合清徐县地裂缝带的宽度和影响范围,勘察区内地裂缝的展布范围大部分地段局限于交城断裂带东侧200 m之内,仅方山村、西梁泉、东梁泉村在200 m之外仍有地裂缝分布,其地裂带影响宽度为244 m。因此,将经过方山、西梁泉、东梁泉3个村乙类建筑的避让带宽度确定为280 m。除方山村、西梁泉、东梁泉3个村以外的其他各村乙类建筑避让距离为200 m。丙类建筑避让交城断裂带的距离为100 m,且不得跨越地裂缝。

3.2 交城断裂下盘(西侧)避让带宽度

交城断裂带西侧地裂缝的影响宽度最大为60 m,西侧长期处于抬升处,构造活动和地震活动相对较弱,是较稳定的构造单元。因此,将避让区调整至交城断裂以西100 m处。交城断裂带西侧乙、丙类建筑的避让距离为100 m。

非构造地裂缝灾害属地质灾害范畴,不作为本次工作的研究重点,建议相关部门对该类地质灾害进行专项研究,提出防治方案。

4 结论

(1) 清徐地裂缝主要集中分布于东于镇、马峪乡、清源镇边山的14个村庄,由北东向南西地裂缝经上固驿、平泉、仁义、东马峪、西马峪、东梁泉、西梁泉、都沟、东于村(耕地中)、新民、方山、马家坡、口儿村、武家坡。地裂缝还涉及清徐县境内的高速公路管理处、收费站、新民村北高速公路涵洞、六六一七工厂。另外,在六合村和大峪村也有分布。

(2) 清徐地裂缝按照成因分为构造地裂和非构造地裂两种类型。构造地裂为清徐西边山一带主要的地

裂缝类型,受交城断裂带的控制,分布于交城断裂带及其附近,具有规模大、破坏性强的特点;非构造地裂位于清源镇六合村和大峪村,六合村地裂缝主要是由超采地下水导致地面沉降产生的地裂缝,大峪村地裂是由于采煤引起的采空区地裂,具规模较小、分布范围小的特点。

(3) 交城断裂上盘(东侧)避让带宽度:方山、西梁泉、东梁泉3个村乙类建筑的避让带宽度确定为280 m。其他各村乙类建筑避让距离为200 m。丙类建筑可按规范确定的100 m避让,且不得跨越地裂缝。交城断裂下盘(西侧)避让带宽度:交城断裂带西侧的乙、丙类建筑的避让距离为100 m。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地震破坏等级划分标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008:1-7.
- [2] 赵斌,王璐璐,孙礼钊,等. 地球物理方法在渭北地裂缝勘探中的应用[J]. 物探与化探,2013,37(3):406-410.
- [3] 郭慧,江娃利,谢新生. 山西交城断裂北端及中段3个大型探槽全新世断错现象分析[J]. 地震地质,2012,34(1):76-92.
- [4] 李白红,曾金艳,冉洪流,等. 交城断裂带北段最大潜在地震发震概率评估[J]. 震灾防御技术,2014,9(4):770-781.
- [5] 谢新生,江娃利,孙昌斌,等. 山西交城断裂带多个大探槽全新世古地震活动对比研究[J]. 地震地质,2008,30(2):412-430.
- [6] 中国地震局地球物理研究所,中国地震局工程力学研究所,中国地震局地质研究所,等. 中华人民共和国国家标准《中国地震动参数区划图》附录A:GB18306-2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范 GB50011-2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016:21.

(英文摘要见第55页)

· 观测分析 ·
文章编号:1000-6265(2023)01-0024-06

井下地电阻率交流观测试验 ——以江宁台为例

樊晓春^{1,2}, 高可伟^{1,2}, 单友磊³

(1. 南京市地震监测预警中心, 江苏 南京 210008; 2. 南京市应急管理局, 江苏 南京 210008;
3. 宿迁市地震局, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 简要介绍地电阻率交流观测的原理及方法, 并在江宁台开展井下地电阻率交流观测实验。初步观测结果表明, 井下地电阻率交流观测的抗地铁干扰效能优于井下直流观测, 且 5 Hz 的观测要优于 1 Hz; 井下地电阻率 1 Hz、5 Hz 交流观测与直流观测反映的相对变化一致性较好, 其数值差异不影响地震观测; 连续降雨使得交流地电阻率出现下降变化, 交流 5 Hz 比 1 Hz 更明显, 最大下降幅度约 0.92%, 且连续降雨可能会对地铁干扰起到一定的放大作用; 地电阻率交流观测使用趋肤深度来探讨探测深度, 由于趋肤深度仅与频率有关, 尚需做进一步研究。

关键词: 地电阻率; 交流; 直流; 井下观测; 地铁干扰
中图分类号: P319.3 **文献标志码:** A

0 引言

随着南京城市轨道交通的大规模建设, 南京地铁 S1、S7、S9 号线环绕江宁台地电阻率测区, 最近距离为 1.9 km, 受地铁干扰的影响较严重。2014 年 10 月 13 至 14 日, 江宁台场地背景噪声测试结果表明, 地表直流地电阻率南北向和东西向在 5—23 时(地铁运行)的噪声比较 0—4 时(地铁停运)分别降低了 33.87 dB 和 32.92 dB。地铁干扰信号特征及机理的研究表明, 地铁干扰周期从 1 s 到 2~3 min, 一般干扰周期为 120~180 s, 干扰频段主要集中在 0.1 Hz 以下, 较难获得地铁这类干扰源的干扰幅度^[1-2]。因地铁漏电产生的附加电场变化频率很低, 即地铁干扰周期完全覆盖地电阻率仪的供电间隔, 所以无法消除地铁干扰影响^[3]。江宁台于 2015 年 11 月在原测区新建 200 m 深的井下地电阻率水平观测装置, 通过增加电极埋深、缩短极距减少地铁对地电阻率的干扰影响。观测结果表明, 井下观测能够有效减轻地铁干扰。当井下地电阻率极距较小时, 其主要观测的是装置所在层位附近小体积范围内介质电阻率变化, 可能较难有效反映对孕震应力传递更有效的深部岩层信息, 认为井下地电阻率长极距有保留的必要性。江宁台地表地电阻率直流观测改为

交流观测后, 能够明显减轻地铁干扰, 表明交流观测可能较地电阻率垂向观测、井下观测具备更好的抗地铁干扰效能。本文介绍地电阻率交流观测的原理, 分析井下地电阻率交流观测长极距近 1 年的交直流观测数据, 对其抑制浅层地表干扰、地铁干扰的能力, 交直流观测的探测深度等开展相关研究。

1 地电阻率交流观测方法

1.1 理论基础

采用不同频率的交流电代替直流电作为人工场源, 要先确定直流电场与交流电场的相似性条件。交流电场和直流电场间的根本差别为: 交流电场起作用的除传导电流 I_c 外, 还包括位移电流 I_d ; 直流电场起作用的为传导电流 I_c 。用电流密度来表示, 总电流密度 j_t 可通过式(1)表示。当 $j_c \gg j_d$ 时, 位移电流大小与电场强度随时间的变化率 (dE/dt) 成正比, 与介电常数 ϵ 有关, 与介质的电阻率无关, 此时可忽略位移电流的影响, 认为交流电场与直流电场相似^[1,4-6]。设 m 为传导电流密度 j_c 和位移电流密度 j_d 的比值, f 为交流信号频率, ρ 为介质电阻率, ϵ_r 为相对介电常数^[6], 则 m 可通过式(2)计算。

$$j_t = j_c + j_d, \quad (1)$$

收稿日期: 2022-06-05

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH19015 YSX)。

第一作者简介: 樊晓春(1984—), 男, 江苏盐城人。高级工程师, 主要从事地震监测预报及台网管理工作, E-mail: fanxiaochungis@163.com。

通讯作者: 单友磊(1988—), 男, 江苏沭阳人。工程师, 主要从事地震监测预报、台网运维管理及地震应急保障工作, E-mail: 1773979777@qq.com。

该文获“庆祝《山西地震》创刊 50 周年有奖征文活动”三等奖。

$$m = \frac{j_c}{j_d} = \frac{1.8 \times 10^{10}}{\epsilon_r f \rho} \quad (2)$$

当 $m > 10$ 时, 传导电流密度 j_c 远大于位移电流密度 j_d , 介质中传导电流 I_c 起主导作用, 此时位移电流 I_d 的影响较小, 介质可视为一个导体, 交流电场可认为满足似稳电磁场, 近似遵循欧姆定律^[4,7]。考虑地电阻率观测台站的实际情况, 测区岩石的介质电阻率通常小于 $10^5 (\Omega \cdot m)$, 相对介电常数 ϵ_r 主要在 $5 \sim 50$, 代入式(2)计算 m 随介质电阻率和交流信号频率变化的关系。结果表明, 当交流信号源的工作频率 $f < 10^3$ Hz 时, 可采用与直流电场相同的理论基础测量和计算地电阻率值。

1.2 观测原理

井下地电阻率交流法采用交流稳流电源向地下发送单一频率信号, 接收经大地传输后的响应信号。图1为井下地电阻率交流观测原理示意图, 主要工作过程为: 低频稳流电源通过供电电极 A、B 向大地供入低频电流 I , 数据采集器分别测量供电电流 I 和测量电极 M、N 之间的同频率响应信号 ΔV (人工电位差), 地电阻率 ρ_s 可通过式(3)计算。图2为井下地电阻率布极示意图, 式(3)中的装置系数 K 为常数, 设 r_{AM} 、 r_{AN} 为电极间距离, r_{A_1M} 、 r_{A_1N} 为 A 镜像点电源点 A_1 至电极 M、N 之间距离, 对于井下地电阻率对称四级装置, 装置系数可通过式(4)计算^[8]。精确检测交流固定频率的信号幅度是提高整个交流观测系统测量的准确性, 根据马小溪等对频谱分析法、数字滤波法及相关检测法比较分析, 认为频谱分析法可作为最佳信号检测方法^[1], 检测精度符合观测要求。

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I} \quad (3)$$

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} + \frac{1}{r_{A_1M}} - \frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{A_1N}}} \quad (4)$$

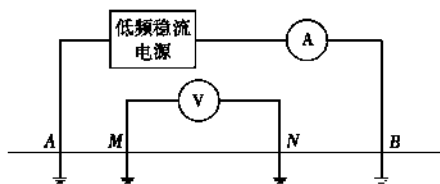


图1 井下地电阻率交流观测原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of AC resistivity observation in underground environment

2 观测数据分析

2.1 地铁干扰

江宁台井下地电阻率交流观测于2021年3月24日开始, 与井下地电阻率直流观测 NS (AB 间距为

$r_{AB} = 1\ 000$ m) 共用电极, 供电频率采用 1 Hz、5 Hz。如第 26 页图 3 所示, 井下地电阻率直流观测 NS ($r_{AB} = 1\ 000$ m) 受到较强的地铁干扰, 提取夜间 1—3 点数据后, 能够辨识长趋势变化, 但仍存在较多的突跳变化。井下地电阻率 1 Hz、5 Hz 交流观测能够辨识各种变化, 有效降低地铁干扰影响。与 1 Hz 相比, 5 Hz 整点值曲线在无降雨、抽水等干扰时, 更加光滑, 说明 5 Hz 观测数据精度高于 1 Hz。从第 26 页表 1 看出, 在地铁运行期间, 1 Hz、5 Hz 交流观测可明显提高观测数据的精度, 有效降低地铁对数据的干扰影响, 且 5 Hz 观测精度高于 1 Hz 的, 表明信号频率越高, 测量方差越小, 数据观测精度越高。对观测数据来说, 直流、交流数据存在一定差异, 交流频率越小, 与直流的差值越小; 交流频率越高, 抗地铁干扰的能力越好。

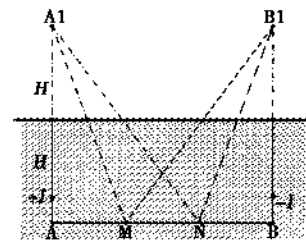


图2 井下地电阻率布极示意图
Fig.2 Schematic diagram of resistivity electrode configuration in underground environment

2.2 降雨干扰

长周期、高强度降雨使得江宁台测区附近地铁高架混凝土的高阻特性弱化、地铁沿线土壤湿度增加及更深层的土壤电阻率可能会明显降低, 有利于地铁产生的杂散电流流入大地, 江宁台井下地电阻率直流观测 NS ($r_{AB} = 1\ 000$ m) 变化幅度较往常明显变大^[9-10]。江宁台受地铁干扰较强, 当无较大连续降雨且地铁正常运行时, 其干扰幅度超过 19.27%。如第 27 页图 4 所示, 2021 年 5 月 11 日至 16 日, 连续降雨使得江宁台井下地电阻率直流观测 NS ($r_{AB} = 1\ 000$ m) 出现较大波动, 且地铁运行未调整, 最大幅度达 75.09%。原江宁台地表地电阻率直流观测 (2018 年 4 月停测) 受农田灌溉、降雨影响的最大幅度小于 1%, 井下地电阻率观测具备一定的地表浅层抑制干扰能力, 理论上受降雨影响小于地表观测, 认为降雨等干扰引起的整点数据短期变化信号远小于地铁干扰影响。因此, 连续降雨对井下地电阻率的影响幅度超过 1% 的可能性较小, 初步表明降雨可能会对地铁干扰起到一定的放大作用。

与直流观测不同, 江宁台井下地电阻率交流 1 Hz 和 5 Hz 观测 NS ($r_{AB} = 1\ 000$ m) 具备较强的抗地铁干扰能力, 整点数据能够识别短期和长期变化。如图 4

所示,江宁台井下地电阻率交流 1 Hz 和 5 Hz 与降雨的相关性较强。其中 2021 年 5 月 11 日至 16 日的降雨使得数据出现明显下降,降幅达 0.92%;降雨停止

后,数据恢复正常,上升幅度达 0.98%。表明降雨干扰会对江宁台井下地电阻率交流观测 NS($r_{AB}=1\ 000\ m$) 的短期变化产生干扰影响。

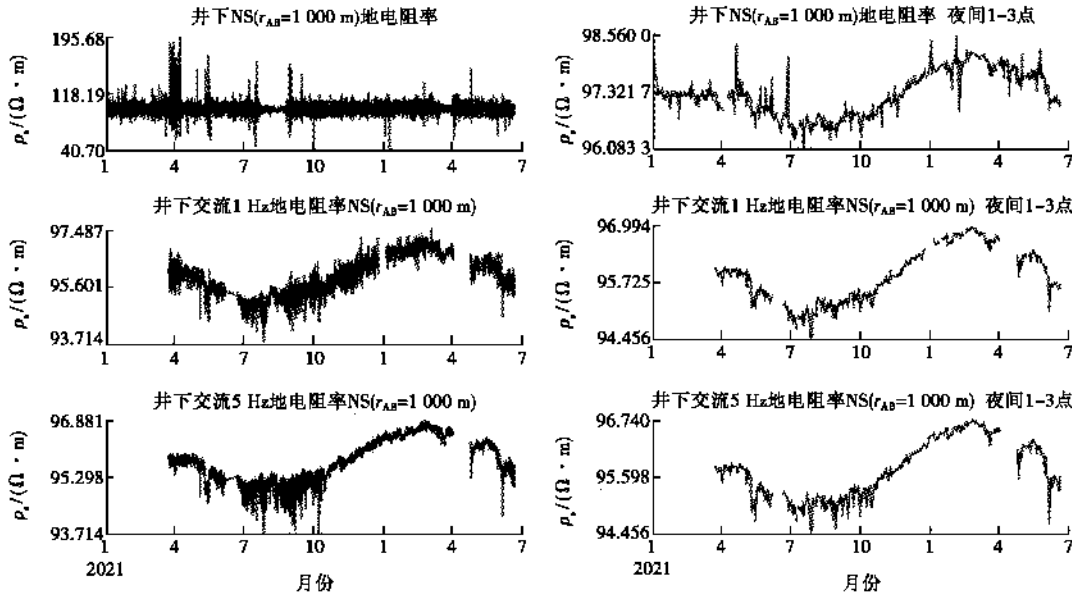


图3 地电阻率直流、交流 1 Hz 和 5 Hz 观测数据比较

Fig. 3 Comparison of resistivity data between DC, AC 1Hz and AC 5Hz observations

表 1 地电阻率直流与不同频率的交流观测结果对比

Table 1 Comparison of resistivity results between DC and AC observation at different frequencies

观测方法及频率	直流		交流 1 Hz		交流 5 Hz	
	电阻率/Ωm	均方差/σm	电阻率/Ωm	均方差/σm	电阻率/Ωm	均方差/σm
干扰时段	82.42~117.17	0.06~7.66	95.312~96.848	0.006~1.368	95.481~96.158	0.003~0.144
非干扰时段	94.03~100.12	0.01~0.89	95.649~96.288	0.002~0.344	95.52~96.102	0.002~0.069

3 讨论

3.1 交直流观测数据差异

从表 1 看出,与直流相比,交流 1 Hz 的地电阻率平均观测值相差约 1.6 (Ω·m),5 Hz 相差约 2 (Ω·m),随着信号频率的增大,交流观测与直流观测结果之间的差值增大。桂燮泰等认为交流与直流两种方法数值产生差异可能与观测精度不一致、探测深度不一致有关^[7],王兰炜等认为这种差异是由交流供电线与测量线的线间耦合造成,频率越低造成的影响越小^[5]。对于地震监测预报来说,主要研究的是地电阻率随时间的相对变化,井下地电阻率 1 Hz、5 Hz 交流观测与直流的夜间 0 至 3 点转日均值曲线的相对变化一致性较高,能否捕捉到直流电阻率观测的地震异常信号需要进一步验证。

如图 4 所示,井下地电阻率交流 1 Hz 和 5 Hz 观测数据受降雨等干扰的影响较明显。由于交流和直流

两者探测深度和范围不完全一致,不能完全认为采用同一装置的直流地电阻率同样会受到降雨干扰影响较强。同时,连续降雨对地铁干扰的放大作用,也需更多观测数据来进一步佐证。

3.2 抗地铁干扰

江宁台井下地电阻率直流观测为水平方向布极,井下 NS($r_{AB}=1\ 000\ m$)、EW 及 NS($r_{AB}=200\ m$) 分别与地铁运行产生的漏电电流的传播方向成一定角度,漏电电流在两测量电极间产生附加电位,使 ρ_s 的观测数值发生突跳变化^[11]。设 ρ_L 为漏电点附近电阻率, I_L 为漏电电流, r_{LM} 、 r_{LN} 为漏电点与测量电极 M、N 的距离,则任一漏电点产生的电位差 V_i 可通过式(5)表示^[12]。式(5)表明任一处 ΔV_i 值的正负及大小与漏电点位置、电流大小等有关。如第 28 页图 5 所示,当第 1 个漏电点产生的 V_i 大于第 2 个漏电点时, ρ_s 的观测数值下降,反之则上升。由于漏电点位置、电流大小一直在变化,使得 ρ_s 呈正负脉冲型突跳变化。同时,地

铁对地电阻率干扰影响时段除地铁运行期间外还有各种日常维护,主要包括车辆调度、接触网检测、钢轨检查等,维护过程中均可能产生漏电流^[9],从而对观测

数据造成一定的影响。如图3所示,提取井下地电阻率直流观测 NS($r_{AB}=1\ 000\text{ m}$)的夜间1至3点数据,仍存在较多的突跳变化,说明不能完全去除地铁干扰。

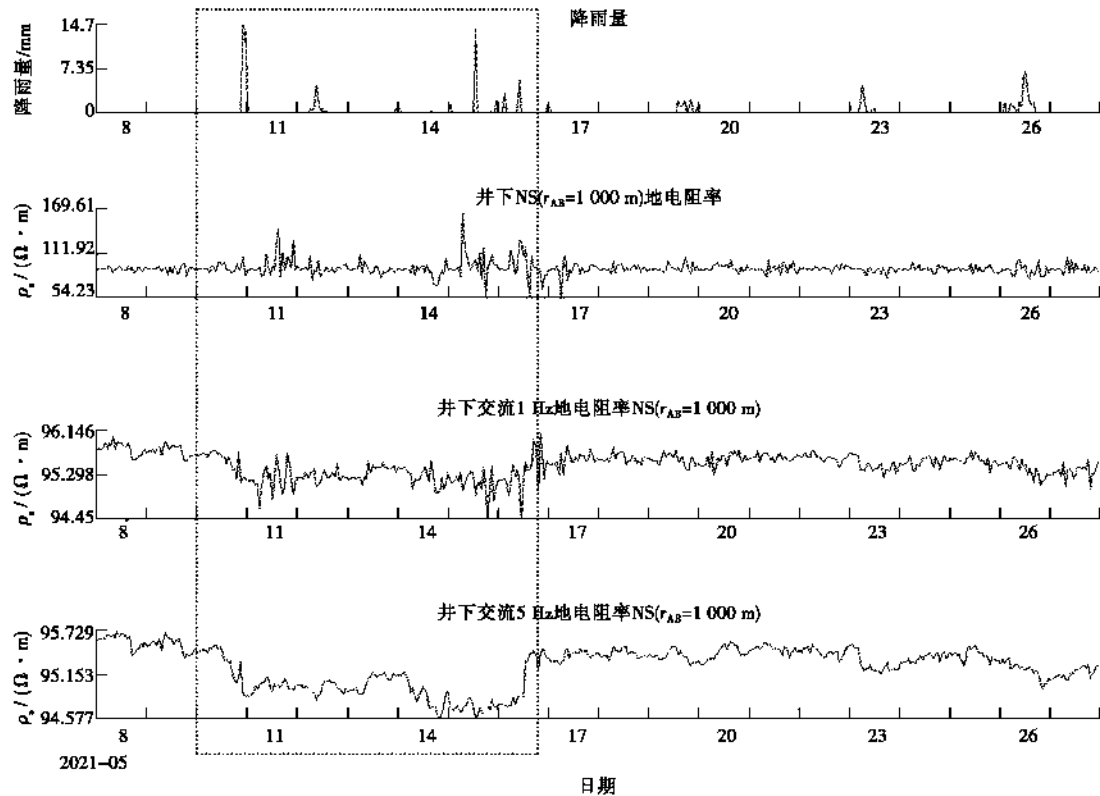


图4 降雨干扰影响

Fig. 4 Effect of rainfall interference

$$\Delta V_i = \frac{\rho_L I_L}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{LM}} - \frac{1}{r_{LN}} \right). \quad (5)$$

(1) 直流观测。

井下地电阻率直流观测主要采用深埋电极、缩短极距来减少轨道交通对地电阻率的电磁干扰影响,提高抑制地表浅层干扰影响能力。如图5所示,江宁台地电测区的电测深曲线为K型,电性结构等效为3层,井下地电阻率直流观测 NS($r_{AB}=1\ 000\text{ m}$)位于第二层与第三层之间,通过电流线反映三层介质中相应的电流线密度分布。对于江宁台井下地电阻率直流观测 NS($r_{AB}=1\ 000\text{ m}$),电流线被向上和向下“排斥”,使得第一层和第三层电流线变密,电流密度增大。计算该测道的影响系数, B_1 、 B_2 、 B_3 分别代表第一、二、三层影响系数计算结果,为0.221 6、0.141 8、0.636 6(见第28页表2),表明该测道的抑制地表浅层干扰能力不足以减轻或消除地表浅层干扰影响,但优于地表观测。当供电极距缩短为200 m时,第一、二及三层影响系数分别为0.004 3、0.908 0、0.087 6,表明极距缩短可以明显提高抑制地表浅层干扰能力。地电阻率

直流观测的抗地铁干扰原理初步探讨如下,根据电流密度线分布,认为井下地电阻率直流观测 NS($r_{AB}=1\ 000\text{ m}$)的 ρ_s 为多个地层的综合值,以第一层和第三层为主,深埋电极未能明显减轻地铁干扰影响。当极距缩短时,远场干扰影响减小,表现为供电电流不变时人工电位差增大,信噪比增加。值得注意的是,当观测极距缩短为200 m后,观测数据受地铁干扰的影响减小,但仍然无法分辨短期变化。

(2) 交流观测。

交流观测的原理与直流观测相同,通过供电电极向大地输入特定频率的低频交流电流来抑制观测频点信号以外的电磁干扰,选频发射建立人工交流电场,采用频谱分析法选频接收在测量电极之间用接收装置检测供电产生的人工电位差,实现减轻轨道交通的电磁干扰^[1,4-6,7]。江宁台井下地电阻率交流观测数据表明,交流地电阻率观测在具有较强干扰背景的测区能得到较高的信噪比,极大地提高观测数据的精度。地电阻率交流观测的抗地铁干扰效能,明显高于通过深埋电极和缩短极距来减轻地铁干扰的井下直流观测。

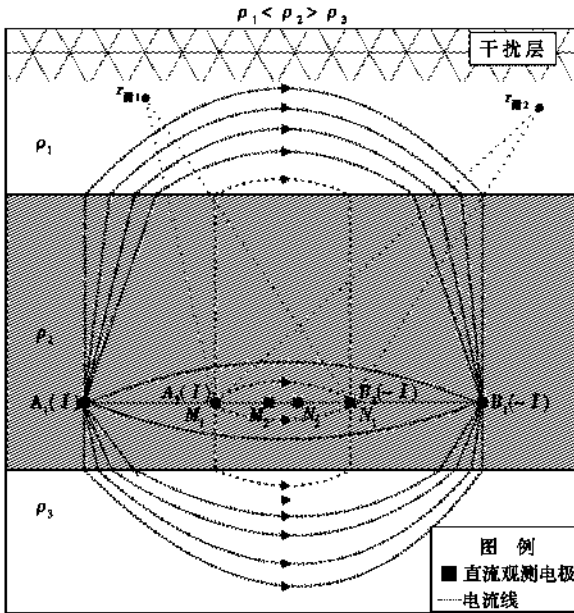


图5 三层介质中电流线密度分布示意图
Fig.5 Schematic diagram of current line density distribution in three-layer media

3.3 探测深度

探测深度的概念源于电法勘探,常用电流密度分

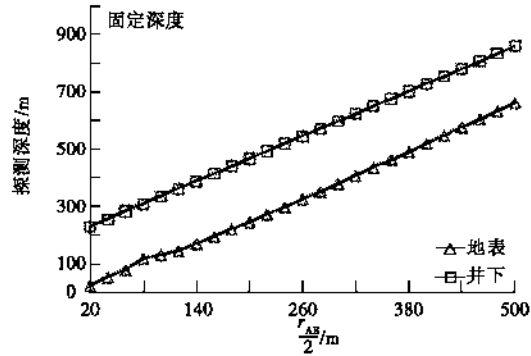
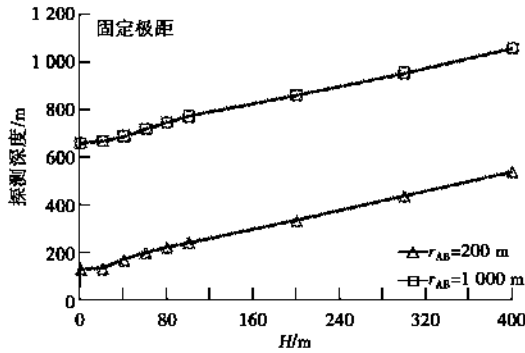


图6 K型3层模型时探测深度随电极埋深和供电极距的变化^[12]
Fig.6 Variation of exploration depth with electrode depth and supply electrode distance in the "K"-type three-layer model

对于地电阻率交流观测,忽略位移电流,在无磁性介质中,一般以趋肤深度作为电磁勘探的探测深度^[14]。当电磁波在地下介质传播一段距离,使得其振幅衰减幅度减到原来幅度的 e^{-1} 时,将此段距离称为趋肤深度。即:

$$e^{-\sqrt{\frac{\omega}{\rho}} \delta} = e^{-1}, \tag{6}$$

式中: ρ 为电阻率,单位 $\Omega \cdot m$; ω 为角频率; μ 为介质中的磁导率; δ 为趋肤深度。当取 μ 为真空中的磁导率时,即 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$, $\omega = 2\pi f$, 则趋肤深度为:

布及通过两个测量电极的等位面形状来图示说明探测深度的概念,主要与地下电性结构和供电极距有关。地下电流起着传递深部信息的作用,流入地下深度的电流越多,反映到地面上的深部信息就越强,有利于探测深部地质情况^[12]。地电阻率观测的探测深度通常要求为 300~500 m,无论地电阻率采用交流还是直流观测,均要求探测深度越深越好,是比较台址条件优劣的重要参数之一。

表2 江宁台部分影响系数计算结果
Table 2 Calculation results of some influence coefficients at Jiangning Station

观测装置	测道	B1	B2	B3
地表	NS($\gamma_{AB}=1\ 000\ m$)	0.513 0	0.400 0	0.087 1
井下	NS($\gamma_{AB}=1\ 000\ m$)	0.221 6	0.141 8	0.636 6
	NS($\gamma_{AB}=200\ m$)	0.004 3	0.908 0	0.087 6

对于地电阻率直流观测,《井下地电阻率观测技术指导意见》^①中,采用物探电法计算“K”型电性结构3层模型时不同电极埋深、极距对应的探测深度。结果表明,当电极埋深 $H > 100\ m$ 时,探测深度增加速度加快;当电极埋深固定时,其探测深度随极距线性增加(见图6)。根据井下地电阻率观测技术指导意见,当电极埋深为 200 m,供电极距 AB 间距分别为 200 m、1 000 m 时,探测深度为 335.15 m、861.63 m,基本满足观测要求。

① 王兰炜,等. 井下地电阻率观测技术指导意见,2017.

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (7)$$

式(7)表明,电磁波的趋肤深度随电阻率的增加或频率的减小而增大。趋肤深度等于约化波长,可用于评估频率域电磁测深探测深度。实际中受各种因素影响,探测深度达不到趋肤深度,一般取有效穿透深度 $\delta_{ED}^{[15-16]}$,以其来判定实际探测深度更趋合理。

$$\delta_{ED} = 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (8)$$

表3 趋肤深度与电阻率及交流频率之间的关系

Table 3 Relationship between skin depth and resistivity and AC frequency

f/Hz	$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$									
	5	10	20	30	50	80	100	200	250	300
1	795	1 125	1 591	1 948	2 515	3 181	3 557	5 030	5 624	6 160
5	356	503	711	871	1 125	1 423	1 591	2 249	2 515	2 755

江宁台井下地电阻率直流观测的探测深度主要与测区电性结构、供电极距和电极埋深相关。当供电极距小于200 m时,电极埋深应大于200 m,基本能满足观测需求。井下地电阻率交流观测的趋肤深度仅与频率有关,当 $\rho \geq 2f$ 时,基本满足观测需求。

4 结论

(1) 在地铁运行期间,井下地电阻率交流观测的抗地铁干扰效能优于直流观测,且5 Hz观测精度高于1 Hz,表明信号频率越高,测量方差越小,数据观测精度越高,抗地铁干扰能力越好。

(2) 由于交流电场与直流电场不完全相同,低频地电阻率交流观测利用交流1 Hz、5 Hz电场与直流电场相似特性,在同一装置下的测值与直流观测结果有一定差值,交流频率越小,与直流的差值越小,地电阻率作为地震前兆手段,主要研究的是地电阻率随时间的相对变化,井下地电阻率1 Hz、5 Hz交流观测与直流观测反映的相对变化较一致,其数值差异不影响地震观测。

(3) 对于交流地电阻率,连续降雨会对其短期变化产生干扰影响,交流5 Hz比1 Hz更明显,最大下降幅度约0.92%,与原江宁台地表地电阻率直流观测相当。

(4) 井下直流地电阻率观测受地铁干扰较强,连续降雨使得数据最大变幅超过75.09%,明显超过原江宁台地表地电阻率直流观测受降雨影响的变化幅度。无降雨时,其最大变幅约19.27%,表明连续降雨可能会对地铁干扰起到一定的放大作用。

(5) 地电阻率直流观测的探测深度主要与测区电性结构、供电极距和电极埋深相关,地电阻率交流观测的趋肤深度仅与频率有关,当 $\rho \geq 2f$ 时,基本满足交流观测需求,认为地电阻率交流观测探测深度的计算方

式(8)表明,趋肤深度仅与频率有关,与供电极距无关,与地电阻率直流观测通过增大供电极距长度来增加探测深度明显不同。江宁台地电阻率测区的地电阻率在10~300 $\Omega \cdot \text{m}$,根据式(8),可计算趋肤深度与电阻率及交流频率之间的关系(见表3)。结果表明,当 $\rho \geq 2f$,供电频率为1 Hz和5 Hz时,趋肤深度均大于300 m,满足地电阻率观测要求。

法尚需做进一步研究。

参考文献:

- [1] 马小溪. 地电阻率交流观测系统关键技术研究[D]. 北京:中国地震局地壳应力研究所,2015.
- [2] 张宇,张兴国,王兰炜,等. 新型地电阻率交流观测系统研究及江宁台观测试验[J]. 地震学报,2016,38(5):807-810.
- [3] 沈红会,李鸿宇,袁慎杰,等. 江宁地电场地铁干扰试验结果分析[J]. 地震,2014,34(3):125-131.
- [4] 张国民,傅承祥,桂燮泰,等. 地震预报引论[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [5] 王兰炜,张宇,张兴国,等. 地震地电阻率交流观测方法及观测实验[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(7):738-742.
- [6] 傅良魁. 同点激电法[J]. 地质与勘探,1983(9):52-57.
- [7] 桂燮泰,戴经安,关华平. 低频交流电法的试验和研究[J]. 西北地震学报,1988(2):22-28.
- [8] 王兰炜,申旭辉,张宇,等. 中国电磁监测试验卫星工程研制进展[J]. 地震学报,2016,38(3):376-385,509.
- [9] 樊晓春,刘孝峰,卜玉菲,等. 地铁运营调整对井下地电阻率干扰影响初步分析——以江宁台为例[J]. 地球物理学进展,2021,36(6):2675-2686.
- [10] 郭文峰,曹志勇,王海龙. 代县地电阻率降雨影响及数值模拟[J]. 地震地磁观测与研究,2019,40(2):62-70.
- [11] 樊晓春,李伟,袁慎杰,等. 地铁对井下地电阻率观测的影响分析——以江宁台为例[J]. 地震工程学报,2020,42(3):680-687.
- [12] 钱家栋,陈有发,金安忠. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京:地震出版社,1985.
- [13] 樊晓春,解滔,吴帆,等. 井下地电阻率观测影响系数分析——以江宁地震台为例[J]. 中国地震,2019,35(2):347-358.

(下转第36页)

忻州站井下与地表地电阻率观测数据对比分析

尚永明^{1,3}, 宁亚灵^{2,3}, 殷志刚^{1,3}, 李贵明^{1,3}

(1. 山西省地震局忻州地震监测中心站, 山西 代县 034200; 2. 山西省地震局, 山西 太原 030021; 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:忻州地震监测中心站(以下简称忻州站)于 2021 年 7 月完成井下地电阻率观测系统建设, 采用小极距和深埋方式布设电极。本文介绍忻州站井下地电阻率观测系统的场地布设概况、施工技术与工艺以及设备安装与调试情况。通过对井下观测和地表观测数据进行对比分析, 结果表明, 井下观测能够有效抑制环境干扰, 其观测稳定性和数据质量均优于地表观测; 地下水位对井下垂直观测具有显著影响, 且与地电阻率呈负相关性。

关键词:地电阻率; 井下观测; 地表观测; 观测系统

中图分类号:P319.3

文献标志码:A

0 引言

地电阻率观测能够记录地下介质电阻率的连续变化信息, 其异常变化特征可反映孕震过程中的构造应力累积和介质变形破裂过程, 是地震监测预报的重要手段之一。

近年来, 随着城镇化和农业农村现代化的快速发展, 观测环境干扰问题愈发突出, 早期建设的地表地电阻率观测受到不同程度的影响。为减轻地表环境干扰、抑制年变化, 突出深部介质电性结构的真实变化, 井下地电阻率观测技术得到了快速推广和应用^[1-6]。忻州站井下地电阻率观测系统建设依托“冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目(山西分项)”, 于 2018 年 11 月完成场地勘选, 2020 年 8 月至 2021 年 7 月进行施工建设, 2021 年 8 月正式投入试运行。该测点为山西忻州地区架设的第一套井下地电阻率观测系统。

本文基于忻州站井下地电阻率观测系统建设工作和观测资料, 对场地布设概况、施工技术与工艺、设备安装与调试等方面进行系统阐述, 并将忻州站井下与地表的地电观测资料进行对比分析, 以期为后续井下观测系统建设和观测质量提升提供参考。

1 测区概况

忻州站井下地电阻率观测系统建于山西省忻州市代县峪口乡峪口村, 原地表地电测区西南侧, 地势平坦开阔, 略向北西微倾, 海拔高程 904~905 m, 场地周边

无较强电磁干扰源。测区南东约 150 m 为走向 NE 的五台山北麓断裂(见图 1)。电测深、高密度电法测试结果表明, 测区电测深曲线具有“K”型特征, 在水平方向电阻率变化不大, 垂直方向大致可分为 3 层电性结构, 各电性结构层参数如第 31 页表 1 所示。根据钻孔岩芯资料, 该场地上覆第四系冲洪积物, 厚约 6 m; 中部为含漂卵石的强—中等风化片麻岩层和砂砾石层, 厚约 24 m; 下部为弱风化片麻岩层(含破碎带)。

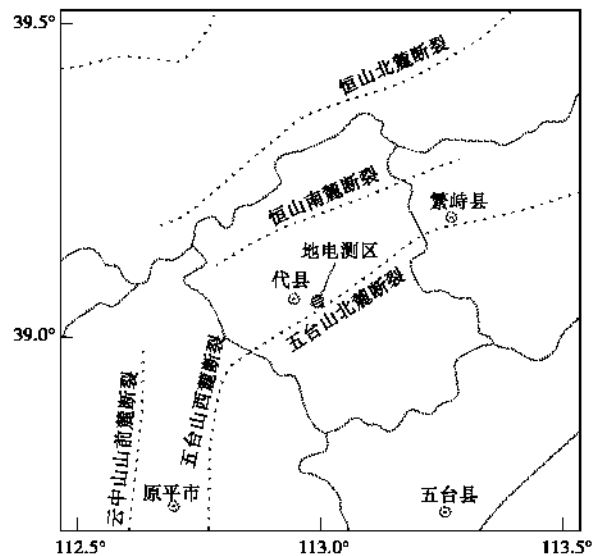


图 1 忻州站井下地电阻率测区构造位置图
Fig. 1 Schematic diagram of the measurement area construction location of the underground electrical resistivity in Xinzhou station

收稿日期:2022-09-08

基金项目:山西省地震局科研项目(SBK-2320), 震情跟踪定向工作任务“断层构造对晋冀蒙交界地电阻率异常的影响”。

第一作者简介:尚永明(1994—), 男, 河北邯郸人。硕士研究生, 助理工程师, 主要从事前兆观测与研究, E-mail: shangyongming@outlook.com。

该文获“庆祝《山西地震》创刊 50 周年有奖征文活动”二等奖。

表 1 井下地电阻率场地电性结构层参数

Table 1 Electric structural layer parameters of underground electrical resistivity field site

层序	层深/m	电阻率值/($\Omega \cdot m$)	主要岩性描述
1	0~12.4	33.6~179	第四系冲洪积物,含漂卵石的强风化片麻岩和砂砾石
2	12.4~59.9	272~627	含漂卵石的强风化片麻岩层和砂砾石,强-中等风化片麻岩
3	59.9~ ∞	179~272	弱风化片麻岩(含破碎带)

2 观测系统分析

2.1 场地布置概况

忻州站井下地电阻率观测场地共建设 9 口水平观测井,井深 110 m;1 口垂直观测井,井深 165 m;1 口水位观测井,井深 100 m。采用小极距对称四极观测装置,布设 3 个水平测道(NS、NE、NW)和 1 个垂直测道(UD)。3 个水平测道呈等边三角形布板,供电极距 AB 取 80 m,测量极距 MN 取 20 m,电极埋深约 106 m;垂直测道供电极距 AB 取 90 m,测量极距 MN 取 30 m,

分别于 -60 m、-90 m、-120 m 和 -150 m 位置埋设电极(见图 2)。外线路敷设采用地埋电缆和架空电缆相结合的方式。

地电测点采用市电加 UPS 的供电模式,市电经避雷器、配电箱后接入 UPS 电源,再输出到仪器设备。避雷采用 C、D 两级供电避雷系统,将所有需要接地的仪器设备接入避雷地网。井下地电阻率观测系统(除水位观测外)和原有地表地电阻率观测系统一同接入本地光纤网络通信系统,水位观测数据通过 CDMA 无线方式传输。

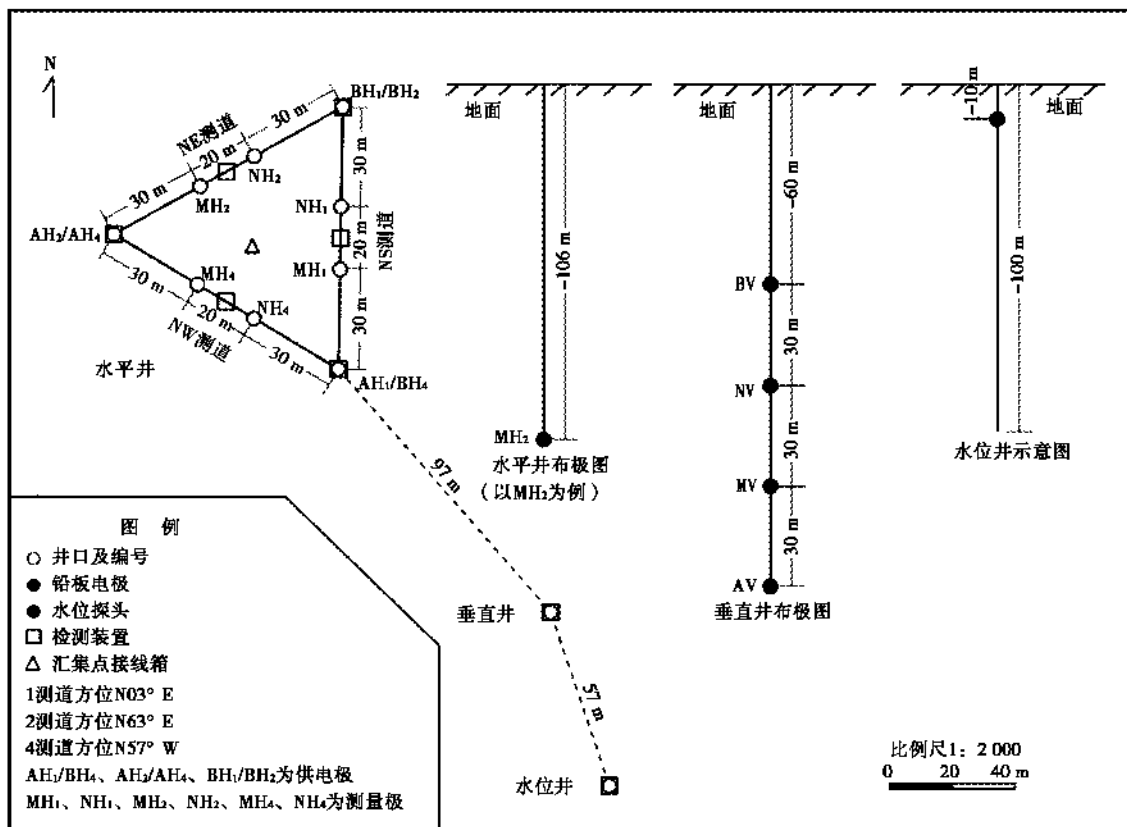


图 2 忻州站井下地电阻率场地布置

Fig. 2 Layout diagram of the observation site of Xinzhou station underground electrical resistivity

2.2 施工技术工艺

勘察钻孔取样结果表明,施工场地地质条件复杂,该场地上覆第四系冲洪积粉质黏土,下部为厚层风化片

麻岩夹砂卵砾石层,部分层位岩石破碎严重。根据现场地质情况,在原有泥浆护壁的基础上,在上部 0~80 m 范围内采用非金属管进行护壁,确保钻孔顺利实施。

电极材料选用含铅量 $\geq 99.99\%$ 、厚度 ≥ 5 mm的铅板电极。焊接前先用钢刷清洁铅板两侧的焊接部位;焊接时,依次进行熔铅、锁边和焊接;焊接完成后采用环氧树脂灌封胶进行密封,并将铅板卷制为铅筒电极。铅筒电极两侧碳纤维绳长度保持一致,使碳纤维绳充分受力和保证电极垂直下井。电极下井后,采用黏土球回填,规格为 $\Phi 3\sim 5$ cm,回填方式为人工投放。

电缆敷设前,需检查绝缘层无机械损伤,线路连接前应验证对地绝缘电阻符合规范要求(≥ 5 M Ω),敷设时的信号线(测量线)与供电线间距应大于30 cm。观测场地内采用地理方式布线,牵引至汇集点,通过架空方式接入观测室,实现与观测仪器的连接。

2.3 设备安装与调试

忻州站井下地电阻率观测采用ZD8MI型多极距电阻率仪,该仪器采样间隔为1 h,电阻率测量最大误差为 $\pm(0.1\%$ 读数 $+0.02)$ $\Omega \cdot m$ 。

气象三要素观测采用ZKGD3000-M型气象三要素自动监测系统,该仪器采样间隔为1 min,气温分辨力为0.000 1 $^{\circ}C$,气压分辨力为0.000 1 hpa,降雨量分辨力为0.1 mm。安装时对场地进行检查,百叶箱、雨量筒周围无树木、建筑等遮挡物,不存在温度、降雨量测量干扰源。

水位观测采用SWY-II数字水位仪,仪器采样间隔为1 min,分辨力优于1 mm,水位观测传感器投放在水面下1.80 m处。水位仪器参数 Φ 的计算方法为:

$$\Phi = H + h,$$

式中: H 为仪器观测的水柱高度; h 为校测值。

3 井下与地表地电阻率观测数据对比分析

3.1 观测质量评价

忻州站井下地电阻率于2021年8月中旬开始试运行,选取2021年9月至2022年6月的观测资料进行分析,将井下与地表地电阻率的连续率、完整率、观测精度和均方根误差的平均值进行对比(见表2)。

表2 忻州站地电阻率观测质量对比

Table 2 Comparison of the quality of underground and surface electrical resistivity observation at Xinzhou Station

观测类型	测向	连续率 (%)	完整率 (%)	观测精度 (%)	均方根误差
井下地电阻率	NS	99.71	99.70	0.038	0.065
	NE	99.79	99.78	0.021	0.103
	NW	99.85	99.82	0.022	0.017
	UD	99.75	99.74	0.040	0.097
	平均值	99.78	99.76	0.030	0.071
地表地电阻率	NS	99.96	99.95	0.015	0.097
	EW	99.96	99.85	0.025	0.173
	平均值	99.96	99.90	0.020	0.135

由表2可见,忻州站井下与地表地电阻率的平均连续率分别为99.78%和99.96%,平均完整率分别为99.76%和99.90%,均满足学科标准要求。井下地电阻率在2022年3月存在部分测向偶然漏采现象,造成数据连续率和完整率降低,在更新仪器系统后该现象明显改善。井下与地表地电阻率的平均观测精度分别为0.03%和0.02%,均优于学科标准(0.3%)。井下与地表地电阻率各测向的均方根误差都较小,平均值分别为0.071和0.135,表明井下观测的稳定性明显优于地表,且井下NS、NW相较于NE、UD测向表现更加平稳,这可能与不同测向的装置稳定性有关。

3.2 相对变化分析

地电阻率观测数据的相对变化量是反映观测系统稳定性和异常判定的重要指标,将井下与地表地电阻率同时段数据的变化情况进行对比分析,能够直观地表现二者的异同。

选取忻州站2021年9月至2022年6月的地电阻率整点值观测数据,以地电阻率的相对变化量为依据,分别对井下与地表观测结果进行分析,剔除个别压制正常背景曲线的坏点。

$$\text{相对变化量} = \frac{\rho_s - \rho_{s0}}{\rho_{s0}} \times 100\%,$$

式中: ρ_{s0} 为初始值; ρ_s 为观测值。

表3给出井下与地表地电阻率在2021年9月1日至2022年6月30日的各测向数据最大变化幅度和相对变化量,可见井下观测的均显著小于地表观测的,说明井下观测稳定性更高。

表3 忻州站地电阻率观测数据最大变幅及相对变化量统计
Table 3 Statistics of the maximum amplitude and relative change of Xinzhou Station's electrical resistivity observation data

观测类型	测向	最大变化幅度($\Omega \cdot m$)	最大相对变化量(%)
井下地电阻率	NS	0.68	0.31
	NE	1.15	0.44
	NW	0.15	0.25
	UD	2.61	1.07
地表地电阻率	NS	8.80	3.88
	EW	9.93	4.63

井下与地表观测数据的相对变化量如第33页图3所示,地表NS测向在2021年11月出现大幅上升,地表EW测向在同时段出现大幅下降。经现场核实发现,2021年10月30日至11月5日有猪场向测区排放污水,导致NS及EW测向观测数据出现阶跃,NS测向最大变化了8.80 ($\Omega \cdot m$),相对变化了3.84%;EW测向最大变化了7.22 ($\Omega \cdot m$),相对变化了3.37%。经与猪场工作人员核实排污时间与数据变化时间基本一致,因此认为该时段的数据变化为猪场排污所致。

此外,地表NS和EW测向在2022年4月和6月均出现相对变化量大幅上升—回落变化,经查阅观测日志,2022年4月10日至15日地电阻率测区附近有大面积农田灌溉,灌溉时段内NS及EW测向观测数据大幅上升变化,灌溉完成后开始回落。其中,NS测向最大变化了 $4.87(\Omega \cdot m)$,相对变化了 2.15% ;EW测向最大变化了 $3.14(\Omega \cdot m)$,相对变化了 1.51% 。查阅之前的观测资料,发现每年4月和6月前后测区均存在相似的农田灌溉干扰。

井下各水平测向变化形态相似,整体呈下降趋势,且数据变化较平稳,无大幅度阶跃和突跳现象,由于观测时间较短,暂时无法分析其年变形态。另外,井下垂直测向在2022年4月至6月相对变化量出现两次大

幅上升—回落变化,其与水位观测同步反向变化(见第34页图4)。地下水位变化时,探测体内上部的电性参数必然发生改变,直接影响地电阻率变化^[7],井下垂直观测电极呈垂向分布,且埋深最大达150m,相对于水平观测更易受到地下水位变化的影响。由于4月至6月测区居民大量抽取地下水进行农田灌溉,导致地下水位急剧下降,引起垂直测向地电阻率值产生快速上升,可见地下水位对井下垂直观测具有显著影响,且二者呈负相关。

总体而言,井下各测向的相对变化量均小于地表观测,表明井下观测具有更高的稳定性,受测区环境因素影响较小。

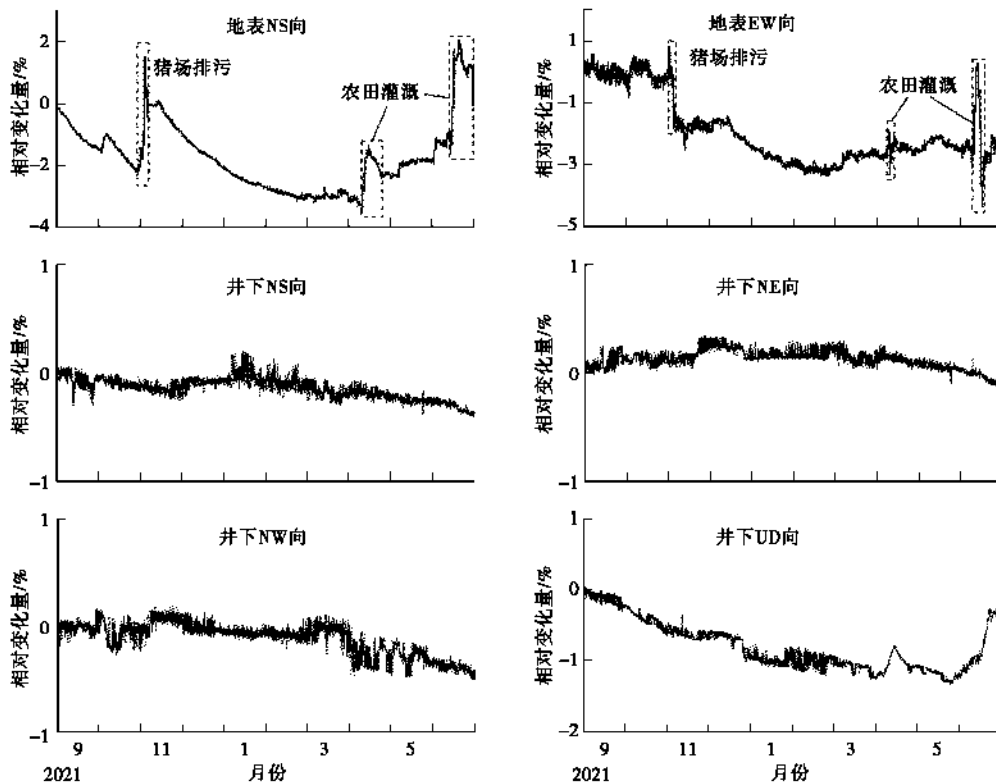


图3 井下与地表地电阻率观测数据相对变化量

Fig. 3 Relative changes in underground and surface electrical resistivity observation data

3.3 干扰抑制效能对比

忻州站地表地电阻率观测长期受到季节性降雨及周期性农田灌溉影响,导致观测数据产生大幅变化。为直观体现井下与地表观测的干扰抑制能力,分别选取降雨和灌溉时段对两者的数据变化情况进行分析,(见第34页图5、第35页图6)。

由图5可见,地表地电阻率两个测向在2021年10月3日至6日均出现大幅上升变化。其中,NS测向最大变化 $1.43(\Omega \cdot m)$,相对变化了 1.47% ;EW

测向最大变化 $2.91(\Omega \cdot m)$,相对变化了 1.17% 。经统计,该时段内测区有连续降雨,累计降雨量约170mm,往年同期降雨均会引起相似变化,降雨结束后逐渐恢复正常。季节性降雨主要通过影响表层介质的含水饱和度,引起表层介质电阻率和视电阻率发生变化^[8],忻州站地表地电阻率变化与降雨量呈明显的正相关。同时段井下地电阻率数据变化平稳,受降雨影响小。

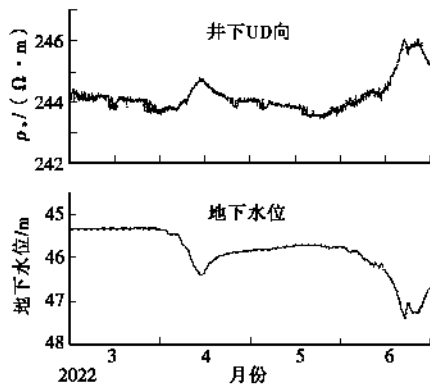


图4 井下地电阻率垂直测向与水位观测对比

Fig. 4 Comparison of vertical underground electrical resistivity observation and water level observation

农田灌溉影响与降雨相似,其对地电观测的影响通常具有周期性,地电测区在每年4月至6月进行农田灌溉,每次灌溉通常持续数天。根据灌溉位置的分布和迁移,对两个测向观测数据造成不同程度的影响,且随着灌溉量的增加导致数据变化幅度逐渐增大。灌溉水的大量下渗影响表层介质的含水饱和度,导致地电阻率数据产生异常变化。

地表地电阻率观测在2022年4月11日-13日受农田灌溉影响,NS和EW测向产生大幅上升或下降,最大变化量分别为1.93%和1.17%(见图6a、6b)。井下观测场地在同月12日至14日进行农田灌溉,由于井下观测水平测向电极埋深超过100m,垂直测向电极埋深也在60~150m,对农田灌溉等地表环境变化具有较强抗干扰能力,因此未出现数据大幅变化的情况。

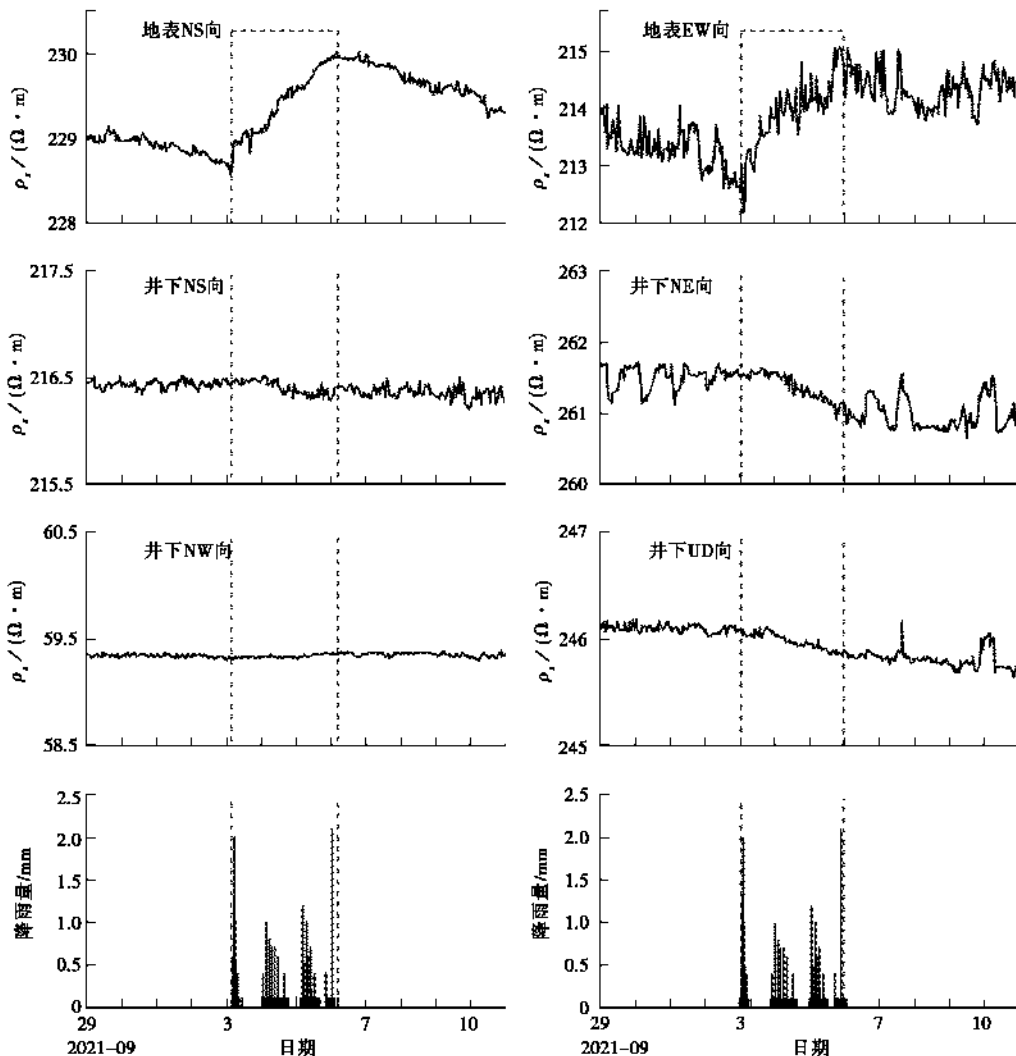


图5 井下与地表地电阻率抑制降雨干扰效能对比

Fig. 5 Comparison of the ability to suppress rainfall interference between underground and surface electrical resistivity observation

另外,井下NE测向出现明显日变化(见图6d),查阅资料发现其他测向也出现过相似现象。前人研究认为,地电阻率的日变化可能与昼夜温差、日周期性环境干扰^[9]或固体潮影响^[10]有关,忻州站井下观测场地周边未发现每日规律性出现的环境干扰因素,昼夜温

差不太可能对深部介质产生影响。结合井下地电阻率日变化形态特征,初步判断地下水位的固体潮汐变化是导致忻州站井下地电阻率产生日变化的主要因素,其影响机制还需进一步研究。

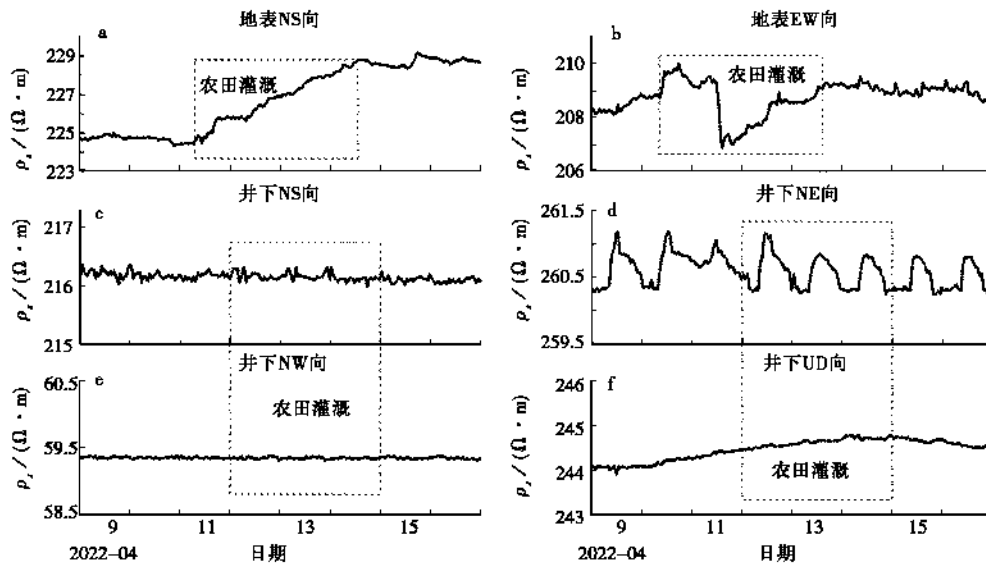


图6 井下与地表地电阻率抑制农田灌溉干扰效能对比

Fig. 6 Comparison of the ability to suppress farmland irrigation interference between underground and surface electrical resistivity observation

4 结论

观测环境干扰使地表地电阻率观测受到不同程度的影响,忻州站井下地电阻率观测结果表明,井下观测能够有效减轻地表环境干扰,反映深部介质电性结构。结合忻州站井下地电阻率观测系统建设情况、数据质量及相对变化、干扰抑制效能等分析结果,得出以下几点认识:

(1) 忻州站井下地电阻率观测较地表观测具有更高的稳定性,其各测向整点值曲线的变化幅度相对较小,无频繁阶跃、突跳现象,观测数据完整率和可靠性较高。

(2) 井下观测的干扰抑制能力明显优于地表观测。地表观测长期受到季节性降雨及周期性农田灌溉影响;井下观测采取小极距布设和深埋电极方式,能够有效避免地表环境变化的影响,抑制年变化,提高观测质量。

(3) 地下水位对井下垂直观测具有明显影响,二者呈负相关。

(4) 忻州站井下地电阻率NE测向有明显日变化,初步判断与地下水位的固体潮汐变化有关,其影响

机制还需进一步研究。

(5) 完备的电极制作工艺能够保证井下地电阻率观测系统的稳定运行,电极、线缆和观测仪器良好耦合是真实反映深部介质电性结构的保障。

参考文献:

- [1] 樊晓春,吴帆,袁慎杰. 江宁地电台深井地电阻率观测系统分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2018, 39(3): 102-106.
- [2] 杨志鹏,缪素秋,陈秀清,等. 冕宁地震台深井地电阻率观测系统简述及典型干扰数据特征分析[J]. 四川地震, 2021(1): 18-24.
- [3] 叶青,王 晓,杜学彬,等. 中国地震井下地电阻率研究进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(3): 669-683.
- [4] 樊晓春,吴帆,袁慎杰,等. 江宁地电台地表与井下地电阻率观测数据分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(5): 63-69.
- [5] 解滔,于 晨,卢 军. 开展小极距井下地电阻率观测的可行性分析[J]. 中国地震, 2019, 35(1): 14-24.
- [6] 肖武军,解滔,胡玉良. 冬奥会保障项目井下地电阻率观测专用电缆设计与测试[J]. 中国地震, 2020, 36(1): 146-152.

- [7] 刘允秀,陈华静,程瑞年,等.地电阻率与地下水位、大气降水关系研究[J].中国地震,1999(2):91-96.
- [8] 郭文峰,曹志勇,王海龙.代县地电阻率降雨影响及数值模拟[J].地震地磁观测与研究,2019,40(2):62-70.
- [9] 解滔,卢军,闫伟.地电阻率日变化成因分析[J].地震地质,2019,41(6):1464-1480.
- [10] 张国苓,乔子云,贾立峰,等.河北昌黎地电阻率频谱特征分析[J].地震地磁观测与研究,2016,37(1):57-62.

Comparing the data from underground and surface Electrical Resistivity Observation at the Monitoring Center of Xinzhou Seismic Station

SHANG Yong-ming^{1,3}, NING Ya-ling^{2,3}, YING Zhi-gang^{1,3}, LI Gui-ming^{1,3}

(1. Xinzhou Earthquake Monitoring Center Station, Shanxi Earthquake Agency, Daixian, Shanxi 034200, China;

2. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 030021, China;

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

Abstract: The underground electrical resistivity observation system was completed in July 2021 at the Xinzhou Seismic Monitoring Center Station, using small electrode spacing and deep installation. This paper introduces the site layout, construction technology and equipment installation and debugging of the Xinzhou underground electrical resistivity observation system. Comparing the data from underground and surface observation, the results show that underground observation can effectively suppress environmental interference, and its observation stability and data quality are better than surface observation. The groundwater level has a significant impact on vertical underground observation and is negatively correlated with electrical resistivity.

Key words: Ground resistivity; Underground observation; Surface observation; Observation system

(上接第 29 页)

- [14] 钟幼生,韩自强,罗姣,等.关于可控源音频大地电磁法探测深度的探讨[J].物探与化探,2015,39(4):768-774.
- [15] 陈乐寿.油气田地区地球化学作用形成的地电异常的勘探技术在匈牙利的应用[J].石油物探译丛,1991(4):40-49.
- [16] 陈明生.关于频率电磁测深几个问题的探讨(二)——频率电磁测深探测深度的几个问题分析[J].煤田地质与勘探,2012,40(6):67-70.

AC Resistivity Observation Experiment in Underground Environment-A Case Study of Jiangning Station

FAN Xiao-chun^{1,2}, GAO Ke-wei^{1,2}, SHAN You-lei³

(1. Nanjing Earthquake Monitoring and Warning Center, Nanjing, Jiangsu 210008;

2. Nanjing Emergency Management Bureau, Nanjing, Jiangsu 210008;

3. Suqian Seismological Bureau, Suqian, Jiangsu 223800)

Abstract: This article introduces the principles and methods of AC resistivity observation and conducts an experiment on AC resistivity observation in underground environment at Jiangning Station. The preliminary results show that the anti-interference effect of AC resistivity observation in underground environment is better than that of DC observation, and 5Hz observation is better than 1Hz observation. The relative consistency between the AC resistivity observation and DC observation of underground resistivity at 1Hz and 5Hz is good, and the numerical difference does not affect seismic observation. Continuous rainfall causes a decrease in AC resistivity, and the decrease at 5Hz is more significant than that at 1Hz, with a maximum decrease of about 0.92%. Continuous rainfall may also amplify subway interference. The depth of exploration using AC resistivity observation is discussed using the skin depth, which is only related to the frequency and needs further study.

Key words: Ground resistivity; AC; DC; Underground observation; Subway interference

· 技术交流 ·
文章编号:1000-6265(2023)01-0037-04

DTW 算法在地震时间序列信息挖掘中的应用

李宏伟^{1,2}, 张淑亮^{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: 采用 DTW 算法用于实现地震时间序列“异常形态”的回溯性检验与统计, 以此提高地震异常信息的深度挖掘效率。随机选取太原地震监测中心站(以下简称太原站)水平摆观测的一段数据作为测试数据, 验证该方法的可行性, 并利用昔阳地震监测站(以下简称昔阳站)水平摆实际观测数据, 自动识别出自观测以来受降雨影响的异常形态。在此基础上, 将最近一次数据变化作为模板, 进行回溯性检验, 共提取出 7 次类似变化, 与之前总结的异常特征一致。经分析, 其中 4 次异常之后对应了太原盆地及其周围 M3.6 以上地震, 运用 R 值评分对其进行预报效能评估, 结果显示该异常形态可通过预报效能检验($R=0.52, R_0=0.45$), 其最佳预测时间为 50~90 d 内, 可作为短期预测指标。

关键词: 预报效能评估; 动态时间规整(DTW)方法; 异常自动识别; R 值
中图分类号: P315.63 **文献标志码:** A

0 引言

地震监测数据多数以时间序列的形式存在, 如何从中挖掘潜在的异常信息或者有规律的信息, 已成为地震预报专家研究的热点。基于时间序列的信息挖掘主要从以下几方面展开研究: 数据降维、信息分类、异常点识别、相似性检测等。在相似性检测中, 主要依据被检测时段与给定模板的相关系数大小来确定。根据震例总结的震前异常形态, 即使异常形态大体相似, 异常持续时间也不一致, 给地震前兆异常的回溯性检验及效能评估带来一定的难度与挑战。

继 R. Agrawal, C. Faloutsos 等开展针对时间序列数据库的相似性查找研究之后, 又出现很多搜索效率更高的相关算法研究^[1-3]。时间序列相似性的研究大体上可概括为两个方向: (1) 时间序列的特征提取。通过多项式拟合^[4]、分段线性拟合^[5]、序列分解及数据空间变换^[6]、奇异值分解^[7]等方法近似表示原有时间序列, 达到数据的降维以及凸显数据特征。(2) 时间序列的相似性度量。研究人员基于此展开大量的研究工作, 取得一些实质性的进展及实际应用^[8-12], 目前应用最多的就是欧式距离法、相关系数法、模板匹配法等。

研究过程中, 每个震例的异常持续时间不同, 不能满足相关系数的计算条件, 导致异常的识别结果与人工判读不一致, 无法用于实际的业务应用。Itakura^[13] 1975 年提出的动态时间规整算法(DTW), 可用于两个不同时间尺度的相似性检测。本文将利用 DTW 算法实现不同时间尺度“异常”的回溯性检验与统计, 解决“形态类”异常无法采用目前的会商技术方法自动识别工作的问题, 同时也将其填补到震情会商技术方法的实用化、流程化工作中, 进一步提高地震信息深度挖掘的效率。

1 计算方法

DTW 算法实现不同时间尺度相似性检测的核心步骤是将其中一个时间序列在时间轴上进行延伸和缩短。其实质是将其中一个序列进行扭曲, 使得两个序列在时间尺度上一致, 再计算两个序列的规整路径, 实现两个不同时间尺度的相似性判别。具体的操作过程如下:

设两个时间序列 x_1 和 x_2 的长度分别为 $|x_1|$ 和 $|x_2|$, 归整路径定义为 $d=(d_1, d_2, \dots, d_n)$, 且 $\max(|x_1|, |x_2|) \leq n \leq |x_1| + |x_2|$ 。用 $d(i, j)$ 表示两个序列的

收稿日期: 2022-07-01

基金项目: 山西省青年科技研究基金(201901D211550), 中国地震局监测预报司震情跟踪定向工作任务(2022010503, 2021010205, 2019010218), 山西省重点研发计划项目(201903D321013)。

第一作者简介: 李宏伟(1986—), 男, 山西浑源人。硕士研究生, 高级工程师, 主要从事地震数据分析及工程振动等研究, E-mail: lhw_one@163.com。

该文获“庆祝《山西地震》创刊 50 周年有奖征文活动”二等奖。

规整路径,其中 i 表示 $|x_1|$ 序列的 i 坐标, j 表示 $|x_2|$ 序列的 j 坐标。按照算法原理, x_1 和 x_2 的每个坐标均需在 d 中出现,因此 d 从 $d_1=(1,1)$ 开始,到 $d_n=(|x_1|, |x_2|)$ 结束,同时需要满足 $d(i,j)$ 中的 i 和 j 单调递增,即:

$$d_n = (i, j), d_{n+1} = (i', j'),$$

$$i \leq i' \leq i + 1, j \leq j' \leq j + 1,$$

$$D(i, j) = \text{Dist}(i, j) + \min[D(i-1, j), D(i, j-1), D(i-1, j-1)],$$

式中: $D(i, j)$ 是 i 和 j 之间的归整路径距离; $\text{Dist}(i, j)$ 代表其之间的欧氏距离。最终两个序列的相似度大小是通过计算 $D(i, j)$ 的累积总距离来表示。

按照以上公式,随机生成两个时间序列 signal1 和 signal2 进行过程展示。图 1a 为两个时间序列 signal1 和 signal2 同一坐标系下的原始相似度对比图,图 1b 为在时间轴上对 signal1 和 signal2 进行扭曲,以达到两序列对齐后的相似度对比图。图 2 中,虚线为 signal1 和 signal2 规则路径距离走势图,通过计算归整路径距离来判定 signal1 和 signal2 的相似度。

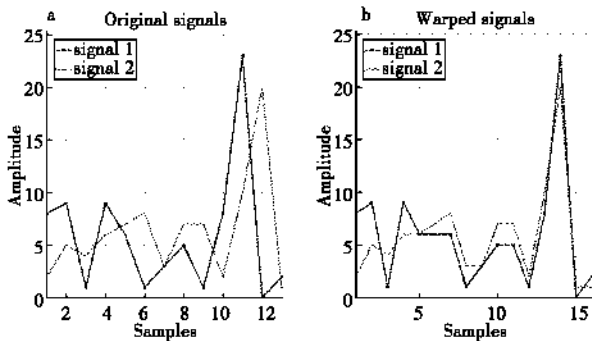


图 1 时间序列 signal1 和 signal2 及其规整曲线
Fig. 1 Time series signal1 and signal2 and their aligned curves

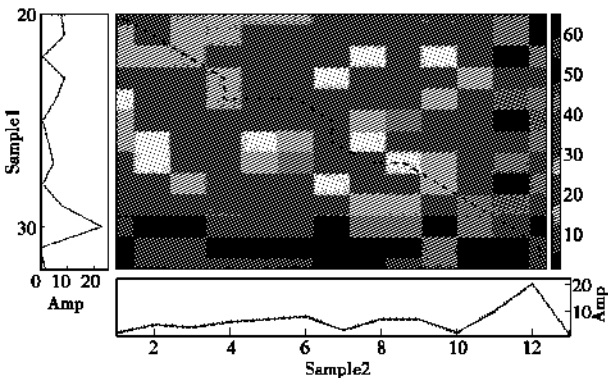


图 2 时间序列 signal1 和 signal2 之间的最短路径
Fig. 2 The shortest path between time series signal1 and signal2

2 测试数据

为验证该算法在实际应用中的可行性,选取太原站水平摆观测曲线进行测试。如图 3 所示,随机选取一段数据作为待匹配模板,在原始曲线上进行滑动扫描相似度计算,由滑动扫描计算的 DTW 距离值看出,距离值越小,其相似度越高。因此,可将 DTW 距离序列中极小值点作为形状相似的起始位置,继续顺延一定长度作为识别出的相似形状。被识别的序列长度设置从模板尺度的 0.5 倍到模板尺度的 1.5 倍,循环迭代扫描,取相似度最高时的尺度作为最终识别出的相似形态长度,如图 3 中识别出的相似形态。识别出的形态在时间长度上不一致,整体效果和人工判读的结果一致,因此可将该算法用于地震时间序列的相似度检测中。

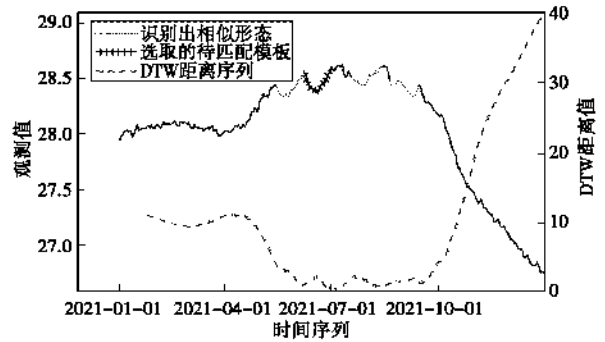


图 3 太原站观测曲线形态识别结果
Fig. 3 Result of identification of the shape of the observation curve at Taiyuan Station

3 案例分析

3.1 昔阳站水平摆倾斜仪观测概况

昔阳站位于山西省中部,构造上属于太行山隆起区,该区域内主要断裂为晋获断裂带,中生代称其为“太行大断裂”,已有研究认为其是 NNE 向展布的基底软弱带(元古代太行古裂隙)。在其西侧是井陘-左权断裂带,几何展布上与晋获断裂带平行,控制着昔阳、和顺等小型断陷盆地的边界,经调查目前仍具有一定的活动性。昔阳站处在 38° 横向隆起构造带与昔阳盆地附近北北东断裂带的交错部位,地下介质较破碎且构造复杂,是区域应力场变化敏感部位,因此该监测站的地震观测仪器也多次记录到震前异常变化。

昔阳站水平摆倾斜仪属于中国地震局“十五”数字化仪器,自 2012 年 7 月 10 日正式运行以来,一直比较稳定,观测山洞周围无明显的干扰源,被纳入中国地震局前兆台网运行管理中。该测项在太原盆地及其周围

多次 M3.6 以上地震前有较明显的异常形态。由于洞体覆盖层较薄,每年雨季时受降雨影响明显,给数据分析、异常信息提取带来干扰。

3.2 观测数据异常自动识别

昔阳站水平摆观测数据从 2022 年 3 月 1 日 15 时 52 分,NS 分量加速南倾变化,EW 分量同步加速西倾变化。截至 3 月 2 日,NS 分量累计变幅约 55×10^{-3} 角秒,EW 分量累计变幅约 43×10^{-3} 角秒,之后数据恢复正常变化(见图 4)。为分析此数据异常变化及开展预报效能评估工作,除排查观测系统、观测环境是否存在干扰外,需对观测数据受降雨影响的异常形变进行识别。基于该测项的干扰信息库,选取受降雨影响的特征模板,图 5 中,有受降雨影响的模板形态、利用 DTW 算法自动识别的相似性较高的形态和 DTW 累积距离。从图上识别的结果以及实际中的统计结果看,本次识别的结果基本可靠,同时该识别结果未将几次震例前的异常形态误识别,经核实均为受降雨影响的时段。因此,运用 DTW 算法,给定干扰信息库中任意一个模板,可快速、准确地将观测曲线自观测以来的类似形态提取出来,提高异常信息的深度挖掘效率。

在以上干扰识别的基础上,选取本次异常形态作为待匹配的模板,利用 DTW 算法滑动扫描提取该测项自观测以来所有类似形态,排除受干扰的 3 次,最终共提取出 7 次相似性较高的形态(见图 6),异常信息如第 40 页表 1 所示。经分析,提取的 7 次异常与人工判读结果基本一致,仅在异常起始点位置识别上与人工判读有一定的超前或滞后,最大偏差不超过模板长度的一半,主要受待匹配模板长度和相关性下限设置的影响,对实际业务应用影响不大。

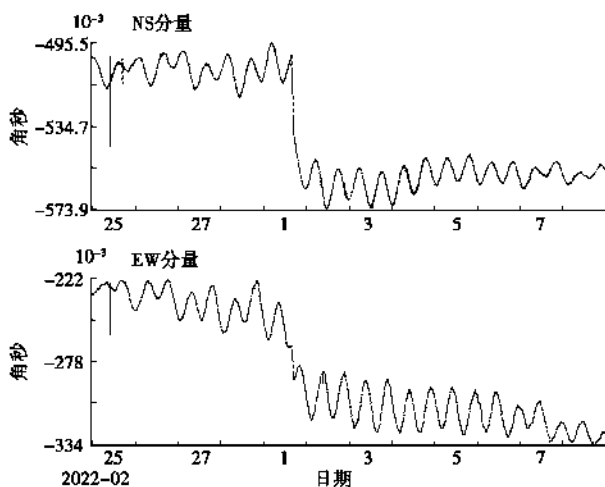


图 4 昔阳站水平摆观测异常曲线

Fig. 4 Abnormal curve of the Xiyang Seismic Station horizontal pendulum observation

3.3 预报效能分析

本次扫描识别出类似形态 7 次,其中的 4 次数据短期变化后,在太原盆地及其周围分别发生平遥 3.6 级、霍州 3.6 级、祁县 3.7 级和古交 3.6 级地震。运用 R 值评分法,对该类异常进行预报效能动态评估得出,最佳预测时间为 50~90 d 内, $R=0.52$, $R_0=0.45$ (见第 40 页图 7),通过了预报效能检验。因此,该类异常形态对太原盆地及其周围 M3.6 以上地震有一定的预测指示意义(见第 40 页图 8)。

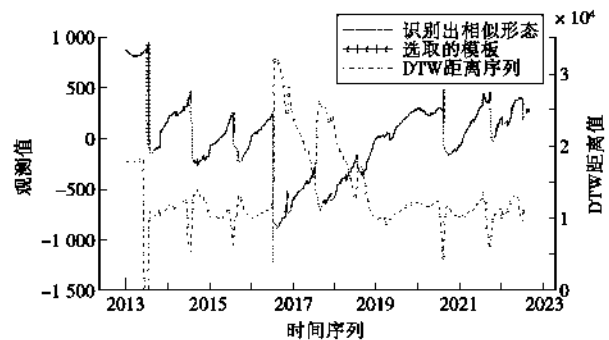


图 5 昔阳站水平摆观测受降雨影响的异常识别结果图

Fig. 5 Image of abnormal identification results of the Xiyang Seismic Station horizontal pendulum observation affected by rainfall

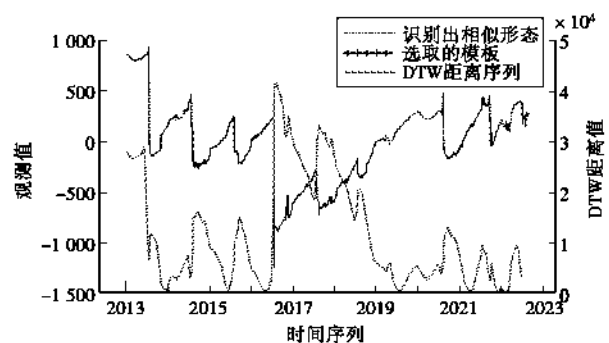


图 6 昔阳站水平摆观测异常识别结果图

Fig. 6 Image of abnormal identification results of the Xiyang Seismic Station horizontal pendulum observation

4 结论与讨论

在 DTW 算法的基础上,将动态扭曲距离的极小值作为相似度度量的判定规则,选用太原站水平摆观测一段数据测试算法的可行性,编制自动化处理流程,实现基于给定形态模板的自动扫描、识别出所有类似形态,定量化给出相似度。运用昔阳站水平摆自观测

以来的数据,选取受降雨影响的异常形态作为模板,基于DTW算法较准确地识别出所有受降雨影响的异常形态。在此基础上,选取当前数据异常形态作为模板,共识别出7次相似异常形态,与之前总结的异常特征一致。因此初步认为,本次数据变化属于地震前兆异常,对太原盆地及其周围M3.6以上地震的发生具有一定的预测指示意义。利用R值评分方法对其识别出的异常进行预报效能评估($R=0.52, R_0=0.45$),结果通过了预报效能检验。因此,将DTW算法应用到地震异常识别中是可行的,能提高异常识别效率,同时也将异常的判别从定性上升到定量,为基于异常特征库与数据干扰库开展地震前兆异常自动识别工作提供支撑,也为地震数据运用提供可参考的研究方向。

表1 昔阳站水平摆观测数据异常统计表
Table 1 Statistical table of abnormal data of the Xiyang Seismic Station horizontal pendulum observation

序号	异常时间 年-月-日	异常幅度 (角秒)	地震	时间间隔 (天)
1	2014-03-16	NS;S 62.79×10^{-3} EW;W 133.75×10^{-3}	2014-04-04 平遥 3.6 级	19
2	2017-12-02	NS;S 93×10^{-3} EW;W 56×10^{-3}	2018-03-18 霍州 3.6 级	106
3	2019-03-11	NS;S 21×10^{-3} EW;W 106×10^{-3}	虚报	—
4	2019-11-24	NS;N 8.9×10^{-3} EW;W 57.1×10^{-3}	2020-01-06 祁县 3.7 级	43
5	2020-12-04	NS;S 44×10^{-3} EW;E 64×10^{-3}	虚报	—
6	2022-01-13	NS;S 86×10^{-3} EW;未加速倾斜	2022-02-20 古交 3.6 级	38
7	2022-03-01	NS;S 55×10^{-3} EW;W 43×10^{-3}	?	—

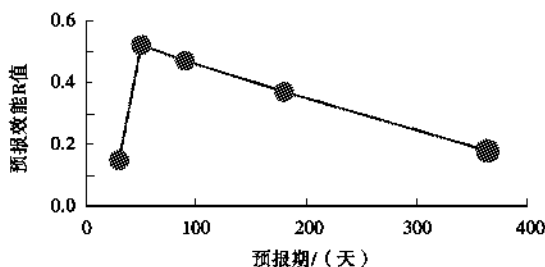


图7 昔阳站水平摆观测预测效能评估结果
Fig.7 Results of the predictive performance evaluation of the Xiyang Seismic Station horizontal pendulum observation

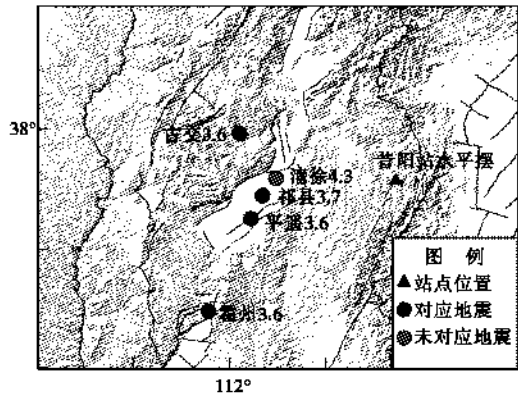


图8 昔阳站水平摆观测数据异常与震例对应情况

Fig.8 Correspondence between abnormal data of the Xiyang Seismic Station horizontal pendulum observation and earthquake examples

参考文献:

[1] Fauloutsos C, Ranganathan M, Manolopoulos Y. Fast subsequence matching in time series databases[C]// Proc of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. Mineapolis: ACM Press, 1994: 419-429.

[2] 曾海泉. 时间序列挖掘与相似性查找技术研究[D]. 上海, 复旦大学, 2003.

[3] 梁叶. 基于动态时间弯曲的金融时间序列聚类研究[D]. 福建: 华侨大学, 2017.

[4] 贾澎涛, 何华灿, 刘丽, 等. 时间序列数据挖掘综述[J]. 计算机应用研究, 2007(11): 15-18, 29.

[5] Chakrabarti K, Keogh E, Mehrotra S, et al. Locally adaptive dimensionality reduction for indexing large time series databases [J]. ACM Transactions on Database Systems, 2002, 27(2): 188-228.

[6] Huhtala Y, Karkkainen J, Toivonen H T. Mining for similarities in aligned time series using wavelets [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Eng-ineering, 1999, 3695: 150-160.

[7] Keogh E. Datamining and machine learning in time series databasc[C]// Proc of the 5th Industrial Conference on Data Ming(ICDM), Lcipzig: [sn], 2005.

[8] Lhermitte S, Verbesselt J, Verstraeten W W. A comparison of time series similarity measures for classification and change detection of ecosystem dynamics[J]. Remote Sesting of Environment, 2011, 115: 3129-3152.

[9] Tak-chung Fu. A review on time series data mining [J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2012, 24(1): 164-181.

[10] 张海涛, 李志华, 孙雅, 等. 新的时间序列相似性度量方法[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(4): 1279-1284.

(下转第 52 页)

基于 POI 的地震应急基础数据库更新方法研究

赵 杰^{1,2}, 郑树平^{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: 地震应急基础数据库是综合地区自然地理、社会人文经济、行业统计、开展救援等相关数据的综合性数据库, 在地震应急、震害防御过程中发挥重要作用, 是地震应急指挥技术系统的重要组成部分, 其建设和更新具有复杂性、艰巨性和长期性的特点。随着互联网地图的兴起, 产生海量的 POI 数据, 具有覆盖面广、种类覆盖度高等特点, 因此, 考虑将其作为更新地震应急基础数据库的一个重要数据来源。通过分析二者的数据结构特征, 提出 3 种有针对性的更新模式。并以学校数据的更新为例, 讨论数据更新的具体方法。经验证, 该方法能对地震应急基础数据库进行查漏补缺, 较好地完善地震应急基础数据库。

关键词: 地震应急; 数据库; POI 数据

中图分类号: P315.95

文献标志码: A

0 引言

地震应急基础数据库指的是地震后或地震预报发布后, 为了科学高效应对地震的影响和破坏进行系统的备灾、救灾活动而需要掌握的自然地理、社会人文经济、各种重要目标、救援力量情况、通信联络信息等数据形成的一种综合性数据库^[1]。地震应急基础数据库是科学有效开展地震应对工作的基础, 是各级政府履行地震应急指挥职能的基本保障。目前, 山西省已经建立较完备的地震应急基础数据库, 是地震应急救援中快速评估和辅助决策的倚靠, 是整个地震应急指挥技术系统的“血液”^[2]。地震应急基础数据库的建设和更新具有复杂性、艰巨性和长期性的特点^[3], 但是目前尚未建立数据收集、更新和补充的长效机制, 也未考虑数据的分布和分级问题。实现地震应急基础数据库的快速更新并保证数据的准确性和现势性, 是现阶段地震应急工作亟待解决的重大问题^[4]。何琳等通过 Google Map API 技术, 解决了从相关协议单位获取的数据无空间信息的问题^[5]。申源等开展地震国情普查数据成果与县市地震应急基础数据库转换及更新方法的研究^[6]。邓宏宇等提出一种基于遥感影像处理技术和 ArcGIS 地理信息系统技术建立建筑物基础信息数据的方法, 有效补充地震应急基础数据库中建筑物类数据^[7]。本文研究运用高德地图 POI(Point of Interest)数据更新、补充地震应急基础数据库的方法。

1 应急基础数据库和高德地图 POI 数据

1.1 应急基础数据库

山西省地震应急基础数据库共有 42 个大类, 65 个小类的空间数据及其属性数据、表数据。该数据库的形成经历过不同时段各类数据的收集和整合。

(1) 在“十五”中国地震应急指挥技术系统建设过程和 2011 年完成的“山西地震安全服务工程”项目中, 由山西省原测绘局先后提供山西省 1:50 000 和 1:10 000 的 DLG 数据, 包含水系及附属设施、居民地及设施、交通要素、境界与政区、地貌等数据, 包含 1:50 000 的 DOM 数据、1:50 000 的 DEM 数据, 坐标系采用 1980 国家坐标系, 高程系统采用 1985 国家高程基准。该数据是山西省地震应急基础数据库建设过程中来源最明确、数据最准确和最可靠的一部分, 是形成山西省地震应急基础数据库的基础, 也是后续进行一系列数据库更新的本底数据库。同时, 经过与行业主管部门如原国土厅、交通厅、教育厅、经信委、民政厅、气象局、原安监局、国资委等协调, 获得以上行业的部分数据。该数据多以表格的形式进行传递, 其表征的地物空间位置精度可能存在的问题。

(2) 2016 年, 由山西省政府应急办组织全省各行业主管部门的数据共享和交换, 该过程中, 获得发改委、林业厅、民政厅、气象局、交通局、原安监局、通信管理局、住建厅的行业数据, 包括重要目标、行政区划变

收稿日期:2022-07-15

基金项目:山西省地震局科研项目(SBK-2217)。

第一作者简介:赵 杰(1989—), 男, 山西原平人。工程师, 主要从事自然灾害监测及应急工作, E-mail: jiejzhao2009@qq.com。

该文获“庆祝《山西地震》创刊 50 周年有奖征文活动”三等奖。

更信息、道路交通信息、危化企业、通信线路、油气管线、房屋等数据,更新、补充山西省地震应急基础数据库。

(3) 2017年建设的“山西地震应急基础数据库更新开发”项目,委托具有相关资质的公司收集、整理、制作一系列数据,包括全省30米DEM、全省2m卫星影像、全省重点区域0.5~0.8m卫星影像、居民地、村级建筑物、村级人口统计数据、国民经济、交通、水库、大型油气管线、危化品生产单位、地震地质灾害、场地类别等数据。通过该项目扩充了地震应急基础数据库,数据精细化程度得到有效的提高。

此外,根据行业管理部门每年发布的网站公报、通知、年鉴等资料,更新应急基础数据库中行政区划变更、经济和人口的变化等数据。2014年开始至今的部分区域地震灾害预评估工作,更新、补充应急基础数据库中的建筑物、物资储备、应急预案等数据,补充部分地区厘米级的无人机航拍影像。

1.2 高德地图 POI 数据

POI指的是兴趣点,表示在世界真实存在的地理实体,具有空间和属性信息,一般包括名称、地址、坐标、类别等属性。随着互联网地图的兴起,产生出海量的POI数据,具有覆盖面广、种类覆盖度高等特点^[8],是地理大数据的重要来源之一,部分数据由地图生产商进行收集更新,部分数据由志愿者主动更新,其更新频率十分高。在地震应急基础数据库更新工作中,把互联网地图POI数据与基础地理信息数据有机结合,可较好地补充地震应急基础数据库,提高更新效率。

高德地图POI数据有23大类数据,包括餐饮服务、道路附属设施、地名地址信息、风景名胜、公共设施、公司企业、交通设施服务、科教文化服务、医疗保健服务、政府机关及社会团体等数据。每个大类下细分若干中类,如,交通设施服务大类下包括地铁站、港口码头、火车站、机场、轮渡站、停车场、长途停车场等中类数据。每个中类下细分若干小类,如,火车站中类包括出站口、候车室、站台、退票、货运火车站等小类数据。丰富的数据分类具有覆盖完备的优势,也带来数据冗余的问题。

本文研究使用的高德地图POI数据由中国地震台网中心统一采购分发,为便于传播,全省数据按照 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的网格进行分割,共计约300万条数据,数据格式为gpkg,采用GCJ-02坐标系统。

2 关键技术

2.1 POI 数据整合和转换

获得的高德POI数据是分块存储,山西省地震应急基础数据库是按照全省的行政区划范围统一组织,二者在空间范围上不一致。为便于数据的对照、分析,将分块的POI数据合并成一个完整的数据。采用在

ArcMap环境中Python编程的方式,将所有分块的POI点合并至一个数据文件。

一般来讲,高德POI数据采用GCJ-02坐标系,与地震应急基础数据库中的数据位置相比有一定的偏移,要将其转换至一致的坐标系才能进行后续工作。本文采用的高德POI数据已由台网中心统一进行坐标转换,通过对比同名点验证,在1:10 000制图比例尺下,高德POI数据跟地震应急基础数据库中数据的平面位置几乎重合,无需进一步处理。若是通过爬虫等方式获得的新增POI数据,可按照一定的算法^[9]将其坐标系校正为WGS84坐标,实现数据坐标匹配。

2.2 更新模式

(1) 全量补充模式。

针对地震应急基础数据中部分类别的数据项缺乏有效数据的问题(如,学校数据未采集“大学”的数据,重点聚集与疏散场所未采集“大型商场”等),可采用全量补充模式,即提取POI数据中相关分类的小类数据,全部补充至地震应急基础数据库。在地震应急基础数据库建设过程中,由于数据收集、当时政策等原因,部分数据未得到有效的整理,数据库中缺乏这一类数据,但在实际工作中发现该类数据有用。这类数据若在POI数据中可以分析得到,采取全量补充模式进行更新。

(2) 变化检测更新模式。

针对地震应急基础数据中现有数据位置发生变化的,采用变化检测更新模式。该模式下,以地震应急基础数据库为基准,数据库中的部分地物由于迁址、关闭、变更等因素,其空间位置发生变化,但名称一般保持不变。考虑空间位置约束的情况下,采用地震应急基础数据库中地物名称和POI中地物名称近似匹配的方式标定相同要素,给予相同的编码。拥有相同编码要素的地物计算其空间位置的距离,考虑制图比例尺和坐标转换的影响,给位置变化量设置一定的阈值,超过该阈值的要素标识为“已变化”。已变化要素经过抽样审核,验证无误后,将其在POI中的位置确定为其最新的准确位置。

(3) 缺项补充更新模式。

针对地震应急基础数据中现有的数据,考虑其在收集、整理过程中可能缺失、不足的数据类型,以及在实际工作中发现确有缺失的数据类型,通过分析筛选该类数据在POI中的相应类型,补足至地震应急基础数据库。

3 数据更新示例

在山西省地震应急基础数据库中,学校数据是十分重要的一类,在震后需要为抗震救灾指挥部提供学校的分布图。近几年来,学校的变化比较大,尤其是农村地区的小学和中学,存在较多的“撤点并校”现象。

根据教育部官方网站发布的数据统计,截至2020年“撤点并校”实施以来,全国的小学数量从491 273所减少到162 601所,共消失了328 672所。在地震灾害预评估实地调研工作中,工作人员发现农村地区的部分学校已经停止招生,部分学校已经合并或改名,另外有一定数量新建的学校。但在地震应急基础数据库中,学校数据尚无有效手段进行系统性的更新。地震应急基础数据库中现存的学校数据是之前与教育主管部门协调得到的,目前,该数据的现势性较差。此外,收集该数据时是通过表格形式进行传递,由于数据提供单位缺乏地理信息方面的专业技能,部分学校的空间位置存在一定的误差和错误。在地震应急准备工作过程中,工作人员曾进行查漏补缺,但未有系统性的更新。基于高德地图POI数据更新地震应急基础数据库的模式,以学校和广场等数据类型为例开展数据更新。

(1) 采用全量补充模式更新大学数据。

在山西省地震应急基础数据库中,未收集大学数据,该数据的缺失为开展高效的地震应急工作带来一定的困难。通过分析高德地图POI数据可知,大学的“type”值为“2090101”,提取POI中具有相同“type”值的所有数据,共得到601条记录。根据山西省2021年教育事业统计公报可知,山西省目前共有高等学校91所,包括普通本科学校(含独立学院)、本科层次职业学校、高职(专科)学校以及成人高等学校。高德地图POI中提取的601所大学显然远超实际的大学数量。出现该情况的原因是在POI数据中,同一个地理实体可能存在多个特征,每个特征可能是独立的一个POI点。在本示例中,一个大学的不同校区、校园分割开的不同部分、校内的某些建筑物以及学校的不同出入口,均可能是独立的POI点。如表1“吕梁学院”的情况所示。由于情况比较复杂,需要人工鉴别删减,仅保留校区本身的POI点,导入地震应急基础数据库中。

表1 吕梁学院在POI点数据集中的所有记录

Table 1 All Records of Lvliang College in POI Point Dataset

POIID	Code	Type	Name_CHN
1240045599	141102	2090101	吕梁学院
1240006925	141102	2090101	吕梁学院(滨河北东路)
1240027216	141102	2090101	吕梁学院(西区)
1240042432	141102	2090101	吕梁学院东校区
1240035528	141182	2090101	吕梁学院汾阳师范分校
1240007287	141102	2090101	吕梁学院离石师范分校
1240042889	141102	2090101	吕梁学院综合教学楼B座

(2) 采用变化检测更新中学数据。

分析高德地图POI数据得到中学的“type”值为“2090102”,根据该值提取所有中学数据。中学数据可

能出现新增、消失、变化等模式,情况比较复杂。采用FME Workbench中的ChangeDetector函数检测地震应急基础数据库和POI中的中学数据差异,得到未变化要素、新增要素和已消失要素。该函数通过比较几何形状和属性信息来确定要素的变化,一般来讲,以学校名称为基准,设置“Check Attributes”参数,同步设置“Match Geometry”参数。通过该方法更新地震应急基础数据库中的中学数据,抽样检查部分数据。以山西省原平市为例,通过查阅《原平市2022年义务教育阶段学校招生方案》,相比原数据,学校的名称、位置等信息有较大的改进。

(3) 采用缺项补充更新模式补充广场数据。

城市人口密集,在应急疏散中需要较开阔的场地,城市广场一般具有较大的开敞空间、可达性高、群众知晓度高,在应对灾害时是重要的紧急疏散场地,对城市防灾具有重要意义^[10]。在地震应急基础数据库中,缺少该数据,考虑采用缺项补充更新模式补充广场数据。分析高德地图POI数据且不考虑购物广场等,城市中广场的“type”值为“2060303”,根据该值提取所有广场数据。以晋中市榆次区为例,共提取到6项数据,根据其位置对照高德地图遥感影像可知,由高德地图POI数据提取的广场数据比较准确,在影像上可看出政府规划建设、场地开阔、绿化度高等特点(见图1)。

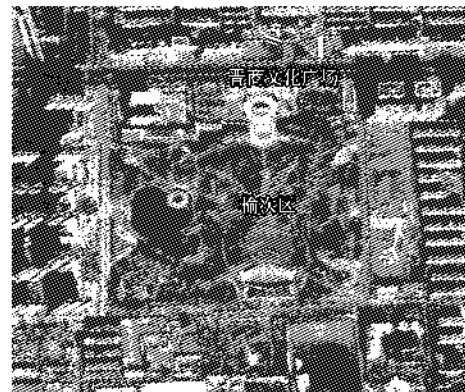


图1 POI提取的“晋商文化广场”影像对照
Fig. 1 Image Comparison of "Jinshang Cultural Square" Extracted by POI

4 结语

整理山西省地震应急基础数据库历次建设的时间节点,分析建库过程中的数据来源、处理手段和更新方法,列举高德地图POI数据的特点、优势、数据组成和结构,重点分析其在更新地震应急基础数据库中可以发挥的作用。通过以上分析可知,采用POI数据对地震应急基础数据库进行更新、补充,具有数据种类完备、现势性好等优势。根据POI数据和地震应急基础数据库的特点,提出全量补充模式、变化检测更新模

式、缺项补充更新模式。以学校和广场等数据为例,讨论数据的更新方法,处理地震应急基础数据库中学校数据的错漏部分,删减部分停办、合并的学校,更新部分学校的名称和位置,取得较好的效果。互联网地图的POI数据可作为更新地震应急基础数据库的一个重要来源,通过爬虫技术可快速地获得最新的POI数据,缓解地震应急数据库更新难、慢的顽症。同时需要注意,地震应急基础数据中要素的属性信息十分重要,但此类数据在POI中同样缺失严重,需要采用多元化的数据更新方案,结合遥感、社会感知和地理大数据挖掘、政务大数据共享等方式,共同促进地震应急基础数据库的完善。

参考文献:

- [1] 聂高众,陈建英,李志强,等.地震应急基础数据库建设[J].地震,2002,22(3):105-112.
- [2] 刘琳婷,孙艺.空间数据库及其在地震应急救援中的应用分析[J].防灾减灾学报,2014,30(3):97-100.
- [3] 刘博雅.地震应急基础数据库建设重要性及改进措施[J].技术与市场,2017,24(4):323-324.
- [4] 张钦玮.智能化时代下的地理信息动态监测技术研究[J].科学技术创新,2021(17):102-103.
- [5] 何琳,张洁,马彝,等.API技术在地震应急基础数据库中的应用研究[J].电脑编程技巧与维护,2016(1):64-65.
- [6] 申源,蔡晓燕,张莹,等.基于国普数据的芦山县地震应急基础数据更新及其应用研究[J].震灾防御技术,2017,12(4):893-901.
- [7] 邓宏宇,孙柏涛,Weimin Dong.遥感技术在地震应急基础数据库建设中的应用[J].地震工程与工程振动,2013,33(3):81-87.
- [8] 时会茹,潘姝宇,周琼,等.地铁TOD站点的商业饱和度指标研究——基于高德地图成都市2020年POI数据[J].中国市场,2020(33):19-21.
- [9] 李士强,张云鹏,田崇新.基于Python的网络地图坐标转换方法研究[J].测绘与空间地理信息,2019,42(7):46-48.
- [10] 孙明,郝冰洁.基于防灾减灾理论的城市广场公共安全规划研究[J].山西建筑,2017,43(12):8-9.

Research on the Update Method of Earthquake Emergency Basic Database Based on POI

ZHAO Jie^{1,2}, ZHENG Shu-ping^{1,2}

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

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

Abstract: The earthquake emergency basic database is a comprehensive database that integrates natural geographic, socio-economic, industry statistical, and rescue-related data. It plays an important role in earthquake emergency response and seismic damage prevention and is the lifeblood of the earthquake emergency command and control system. Its construction and updating are complex, arduous, and long-term. With the rise of internet maps, massive POI data has been generated, which has the characteristics of broad coverage and high category coverage. Therefore, it is considered an important data source for updating the earthquake emergency basic database. By analyzing the data structure characteristics of the two, three targeted update modes are proposed. Taking school data updating as an example, specific methods for data updating are discussed. The results show that this method can identify and fill gaps in the earthquake emergency basic database, and can effectively improve the completeness of the earthquake emergency basic database.

Key words: Earthquake emergency; Database; POI data

· 地震社会学 ·

文章编号:1000-6265(2023)01-0045-08

东汉时期地震与社会科学文化的关系 ——张衡地动仪发明的背景研究

卢双苓¹,于庆民²,钟普浴³,王合乾¹,石晓辉¹,邹春红¹

(1. 山东省地震局烟台地震监测中心站,山东 烟台 264001;2. 山东省地震局泰安地震监测中心站,山东 泰安 271000;
3. 山东省地震局,山东 济南 250014)

摘要:以张衡发明地动仪为切入点,通过对《后汉书》所载东汉历史地震资料的汇总分析,探讨东汉时期地震的频度、影响程度和破坏程度。针对地震发生后,朝廷制定的救灾策略和震后救灾实效,研究东汉时期地震对社会的影响,分析张衡发明地动仪的社会文化科学背景,探讨张衡发明地动仪的基础条件。

关键词:历史地震;东汉;地动仪发明;地震救灾措施

中图分类号:P315.5

文献标志码:A

0 引言

我国有数千年的地震历史资料,这些史料通过对地震事件的记述,反映各类地震现象及有关社会学方面的史学内容,是研究地震前兆、震后效应、地震科学史等的宝贵资料^[1-2]。《汉书·刘向传》有:“春秋二百四十二年地震者五”,可以说是历史上最早的概括。把地震资料编成年表的形式,是从宋代初年的《太平御览》,汇集自周至隋代的地震四十五条^[3]。自新中国成立后,我国的历史地震研究产出了许多成果,如编辑出版《中国地震资料年表》《中国地震目录》《中国地震历史资料汇编》等^[4]。

世界上第一架测验地震的仪器,是我国东汉时期张衡发明的候风地动仪,发明于汉顺帝阳嘉元年(132),并在此后不久的一次强烈地震中得到验证^[5-8]。那么,张衡发明候风地动仪的社会背景是什么?东汉时期地震频繁程度如何?为什么会有地动仪的需要和发明?怀着这些疑问,笔者对《后汉书》的卷一至卷九《帝纪》部分和《五行志·地震》以及《张衡传》部分进行研究^[9],试图对东汉时期的地震情况和社会背景进行分析。本文着重总结东汉时期发生的地震情况,以及地震发生后朝廷是否有救灾策略和救灾行动,皇帝是否有诸如颁布“罪己诏”、减赋税、甚至改年号等,总结当时应对地震灾害的措施,进一步探究汉代张衡地动仪发明时期的社会和科学背景及发明地震仪的基础

条件。

1 东汉时期社会背景—地震为天诫

地震是除了水灾、旱灾之外,破坏最惨重的灾害^[10]。王朝统治者迷信地震是天诫,于是,凡国土之内发生地震,史官便当作灾祥大事记录下来。各朝历史一般均在五行志里系统记述地震事件及其影响。如《汉书·五行志》中对西汉地震的记录有5次:惠帝二年正月,地震陇西,厌(作者注:通压,下同)四百余家。武帝征和二年八月癸亥,地震,厌杀人^[11]。又如史载,汉高后二年(前186)正月,绵竹武都山崩,压杀760人。汉成帝元延三年(前10)正月,茂州岷山崩,壅江三日,江水竭。汉桓帝建和三年(149)七月,梓潼山崩^[12]。

地震在汉代是用“天人感应”即“天诫论”来诠释的。在班固《汉书·五行志》中,对地震的理解,便与女主祸国联系起来:“是岁三川竭,岐山崩。时幽王暴虐,妾谗伐,不听谏,迷于褒姒,废其正后,废后之父申侯与犬戎共攻幽王。”

根据学者冯锐的研究,汉代因地震而查处的高官,开创了历史先河,史上仅此一例的因地震改元事件也发生在汉代。公元前70年洛阳地震(作者注:西汉宣帝本始四年夏四月,郡国四十九地震,或山崩水出)的发生,导致当时的“本始”年号被改为“地节”——“地震节制”。如此敬畏地震的做法遂演变成一种社会礼制

收稿日期:2022-09-19

基金项目:中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202202031)。

第一作者简介:卢双苓(1973—),女,河北文安人。高级工程师,主要从事地震监测和地震台站管理、形变观测研究和历史地震研究,E-mail:10664836@qq.com。

通讯作者:于庆民(1973—),男,山东栖霞人。高级工程师,主要从事地震监测及测震矿震研究,E-mail:liuru-si@163.com。

该文获“庆祝《山西地震》创刊50周年有奖征文活动”二等奖。

而延续百年,及至东汉的始皇帝汉光武帝也遵从之^[7]。

虽然用“天诫论”来诠释地震不科学,但就当时社会来说,地震的发生,对统治者却正好起到警示作用,使统治者反省自己的过失、求举贤才、甚至减轻赋税,儒家也多借地震来劝谏皇帝勤政爱民,对社会起到一定的积极作用。汉代地震多发,尤其到东汉安帝—顺帝时期(张衡发明地震仪前一段时间),每年发生1至2次地震(能载人正史的地震),更引起统治者的敬畏。

2 东汉时期科技发展的背景

在东汉前期,经济、文化、科学技术等方面都超过西汉的水平。

2.1 东汉时期经济文化的繁荣

光武帝时期,经济达到空前的繁荣。张衡出生于东汉的全盛时代,农业和手工业的各种生产技术都相当发展,史称其时“天下承平日久,平徭简赋,人赖其庆”^[8]。掌握了铁器铸造技术。南阳官员、发明家杜诗发明水排(鼓风机),是东汉冶铁技术的重大创新。

东汉时期,洛阳经济繁荣,商业发达,文化昌盛,人才荟萃。光武帝刘秀在洛阳兴建我国历史上第一所规模宏大的学府“东汉太学”,杰出的文学家许慎在这里撰写出我国第一部字典《说文解字》,卓越的历史学家班固在这里完成我国第一部纪传体断代史巨著《汉书》。

社会经济的繁荣与手工业的发展,冶铁技术发展和铸造技术的提高,是科学发展的基础,也成为地震仪发明的基础。

2.2 东汉时期科学的发展及专门机构“灵台”的设置

东汉时期科技文化空前发展,首都洛阳成为当时科学文化最发达的城市。科学家张衡创制“浑天仪”和“地动仪”,蔡伦发明“造纸术”。当时,设有专门观测天象的机构——灵台,相当于当时的国家天文台。张衡亲自主持和参与灵台的天象观测和天文研究。

我国自公元前十三世纪的殷代开始,就设有史官,称太史,其任务除记述王朝国家大事外,兼记录各处天象、地异以及各种自然灾害等事。张衡历任后汉王朝太史令,其制造的“候风地动仪”“浑天仪”等其他观测仪器,均安置在灵台,并设有职事官专门管理。有专门

研究天象的机构,张衡又身为史官,且自身擅长机巧,精于术学,妙尽璇机之正,这些为张衡制造出“地动仪”“浑天仪”等科学仪器提供了条件。

地震被视为天谴皇帝、惩戒苍生的大事,这恰恰促进了先人虔诚地观天察地而不敢有所疏失^[6]。《后汉书·张衡传》:“验之以事,合契若神。自书典所记,未之有也。尝一龙机发而地不觉动,京师学者咸怪其无征,后数日驿至,果地震陇西,于是皆服其妙。自此以后,乃令史官记地动所从方起。”即曾经有一条龙发动了机关而人们没有感觉到地震,京城中的学者都责怪张衡的仪器没有证验。几天以后驿使来报告说陇西发生了地震,于是大家都佩服这仪器的奇妙。此后朝廷就令官吏根据仪器记载地震发生的方位。

虽然当时发明浑天仪和地动仪的目的是为了观测自然、辨明凶吉,但张衡的科学实践仍然超越了时代。

3 东汉时期地震及震后应对

3.1 东汉时期地震统计

《后汉书》中记录的东汉时期地震统计结果如表1所示,包括地震影响范围、破坏程度、地震发生后朝廷及官方采取的措施,另如果有前兆现象,一并加以记录。表中,东汉皇帝在位年份采用公历纪年(查询网址为 <http://baike.hcschool.cn/xzfx/1909.html>),地震事件的时间均采用《后汉书》中的农历纪年。

本文所列东汉地震的统计来源为:《后汉书》卷一至卷九《光武帝纪》至《孝献帝纪》中记载地震与《五行志·四》(地震 山崩 地陷 大风拔树 螟 牛疫)部分的内容及互相参照。对于地震的破坏范围和破坏程度,两者记录大致相同,只是个别表述方式不同,《帝纪》中的地震记录更侧重于皇帝是否有诏书罪己求贤救灾的安抚措施。因通行本《后汉书》中未明确记载公元134年地震,后经对照前辈学者的文献资料,将此次地震补录于表1中存记,内容根据是文献^[7]。另,表1的地震破坏程度还据 R. A 甘斯《公元前2000—公元1979年全球重大地震目录》及刁守中《中国历史有感地震目录》等文献补充^[13-14]。

表1 东汉地震列表

Table 1 List of earthquakes in the Eastern Han Dynasty

序号	皇帝在位/ 地震次数	地震年份	地震破坏程度/ 地震大小	地震影响范围	实际救灾措施	朝廷免除高官/皇帝 举贤/罪己
1	光武帝刘秀在位 32 (公元 25—57 年)/地震 1 次	建武二十二年(公 元 46 年)九月戊辰 日地震	造成地裂 (破坏性地震) 6½* CB**	郡国四十二地震,南 阳郡尤甚	令免南阳今年田租,赐压死者 棺钱。不收取欠债;官府雇 人,为失去亲人的家庭寻找死 去的人	罪己诏:而今震 裂,咎在君上
2	章帝刘炆在位 13 年 (公元 75—88 年)/ 地震 1 次	建初元年三月甲寅 (公元 76 年)	≤5*	山阳、东平地震	—	下罪己诏/令三公 及郡国等举贤

序号	皇帝在位/ 地震次数	地震年份	地震破坏程度/ 地震大小	地震影响范围	实际救灾措施	朝廷免除高官/皇帝 举贤/罪己
3	和帝刘肇在位 17 年 (公元 88—106 年)/ 地震 4 次	永元四年(公元 92 年)六月戊戌初一日	$\leq 5\frac{1}{2}^*$	郡国十三地震	—	—
4		永元五年(公元 93 年)二月戊午	—	陇西地震	分遣使者巡查贫民,核实外流 闲散人户,开仓发粮赈济三十 多郡	下诏选用良才
5		永元七年(公元 95 年)九月癸卯	$\leq 4\frac{3}{4}^*$	京师地震(注:京师 指洛阳,下同)	—	—
6		永元九年(公元 97 年)三月庚辰	—	陇西地震	—	—
7	安帝刘祜在位 19 年 (公元 106—125 年)/地震 22 次	永初元年(公元 107 年)	$5\frac{1}{2}\sim 6^*$	十八个郡国	—	—
8		永初二年(公元 108 年)	$5\sim 5\frac{1}{2}^*$	十二个郡国	—	—
9		永初三年(公元 109 年)十二月	$5\sim 5\frac{1}{2}^*$	郡国九地震	—	—
10		永初四年(公元 110 年)三月癸巳日	$\leq 5^*$	郡国九地震(文献 [15]“郡国 4”地震)	—	—
11		永初四年(公元 110 年)九月甲申	—	益州郡地震	—	—
12		永初五年(公元 111 年)春正月丙戌	$5\sim 5\frac{1}{2}^*$	郡国十地震	—	—
13		永初七年(公元 113 年)二月丙午	$5\frac{1}{2}\sim 6^*$	郡国十八地震	—	—
14		元初元年(公元 114 年)十一月	$5\frac{1}{2}^*$	郡国十五地震	—	—
15		元初二年(公元 115 年)十一月庚辰	$5\sim 5\frac{1}{2}^*$	郡国十地震	—	—
16		元初三年(公元 116 年)二月	$5\sim 5\frac{1}{2}^*$	郡国十地震	—	—
17		元初三年(公元 116 年)十一月癸卯日	$5\sim 5\frac{1}{2}^*$	郡国九地震	—	—
18		元初四年(公元 117 年)	$5\frac{1}{2}^*$	郡国十三地震	—	—
19		元初五年(公元 118 年)	$5\frac{1}{2}^*$	郡国十四地震	—	—
20		元初六年(公元 119 年)春二月乙巳	地坼裂,涌水, 坏败城郭、民室 层,压人(破坏性 地震)。 $6\frac{1}{2}^*$, CB**	京师、郡国四十二地 震	给贫困孤弱单独谷,人三斛	下诏举贤;下诏令 三府选掾属高第, 能惠利牧养百姓 者各五人等
21		元初六年(公元 119 年)十二月戊午	$5\sim 5\frac{1}{2}^*$	郡国八地震	—	—
22		永宁元年(公元 120 年)	$5\frac{1}{2}\sim 6^*$	郡国二十三地震	—	—
23		建光元年(公元 121 年)九月己丑	或地坼裂,坏城 郭室屋,压杀人 (破坏性地震) $6\frac{1}{2}^*$	郡国三十五地震	派遣光禄大夫案行,赐死者 钱,人二千,除今年田租,其初 灾甚者,勿收口赋	诏三公以下,各上 封事陈得失

序号	皇帝在位/ 地震次数	地震年份	地震破坏程度/ 地震大小	地震影响范围	实际救灾措施	朝廷免除高官/皇帝 举贤/罪己
24		延光元年(公元122年)秋七月癸卯	5½*	京师及郡国十三地震	—	—
25		延光元年(公元122年)九月甲戌	5½~6*	郡国二十七地震	—	—
26		延光二年(公元123年)	五行志记为“京师及郡国三十二地震”(破坏性地震)6½~7*	安帝纪中为“京师及郡国三地震”	—	—
27		延光三年(公元124年)	5½~6*	京师及郡国二十三地震	—	是时以谗免太尉杨震,废太子
28		延光四年(公元125年)十一月丁巳	5½*	京都、郡国十六地震	—	—
29		永建三年(公元128年)正月丙子	汉阳地陷裂,屋坏杀人,地涌涌水出(破坏性地震)6½*, C**	京都、汉阳地震	赈济灾民,诏实核伤害者,赐年七岁以上钱,人二千;一家被害,郡县为收敛。诏勿收汉阳今年田租、口赋	—
30		阳嘉二年(公元133年)四月己亥	旋义地坏,长八十五丈 ≤5*	京都地震	—	罪己诏曰,地动之异,发自京师,矜矜祗畏,不知所裁/令公卿纠己不足/司空王龚被免职
31		阳嘉三年(公元134.12.13)(据文献[7]补充)	6½~7*	陇西	—	司徒刘崎、司空孔扶免,孔氏仲渊为司空,以地震免
32		阳嘉四年(公元135年)十二月甲寅	≤5*	京都地震	—	罪己诏:朕秉政不明/群公百寮其各上封事,指陈得失
33	顺帝刘保在位19年(公元125—144年)/地震12次(阳嘉元年即公元132年秋七月,史官张衡开始制作候风地震铜仪)	永和二年(公元137年)四月丙申	—	京都地震	—	是时宋娥构奸诬罔,五月事觉,收印绶,归田里
34		永和二年(公元137年)十一月丁卯	—	京都地震	—	是时太尉王龚以中常侍张昉等专弄国权,欲奏诛之
35		永和三年(公元138年)二月乙亥(公元138.3.1)	二郡山岸崩,地陷。城郭、室屋多坏、压杀人(破坏性地震)。 ≤6¾*, B**, IX***	京都、金城、陇西	派遣光禄大夫巡视金城、陇西郡,赐钱给因地震压死的人,年龄在七岁以上每人二千,全家被害死绵,为他们收葬,免收今年田租,特别严重的免收人口税	求贤
36		永和三年(公元138年)闰二月己酉	—	京都地震	—	—
[37]		永和四年(公元139年)三月乙亥	—	京都地震	—	文学家、科学家张衡(公元78—139年)逝世
38		永和五年(公元140年)二月戊申	—	京都地震	—	—
39		自汉安二年(公元143年)九月至建康元年(公元144年)正月	山谷坏裂,坏败城寺,杀害民庶(破坏性地震) B**, IX***	凉州地百八十震(震群)	无实际救灾措施	诏遣责官员/建康元年正月下诏改年号为建康

序号	皇帝在位/ 地震次数	地震年份	地震破坏程度/ 地震大小	地震影响范围	实际救灾措施	朝廷免除高官/皇帝 举贤/罪己
40		建康元年(公元144年)九月丙午	三郡水涌土裂	京都及太原、雁门地震	—	丙午帝崩,是日地震/是时顺帝崩,梁太后摄政/下诏举贤
41	桓帝刘志在位22年 (公元146—168年)/地震11次	建和元年(公元147年)四月庚寅	—	京都地震	—	是时梁太后摄政,兄冀持权/下诏举贤
42		建和元年(公元147年)九月丁卯	—	京都地震	—	—
43		建和三年(公元149年)九月两次地震	己卯地震 庚寅又震	可能是破坏性地震	死者家属发三千钱,安葬,发流氓百姓救济粮,安抚百姓	改元/诏死罪以下及亡命者,可以交纳财务赎罪/太尉赵戒免
44		元嘉元年(公元151年)十一月辛巳	—	京都地震	—	—
45		元嘉二年(公元152年)正月丙辰	—	京都地震	—	—
46		元嘉二年(公元152年)十月乙亥	—	京都地震	—	司空黄琼被免职
47		永兴二年(公元154年)二月癸卯	—	京都地震	庶望有补其舆服制度有逾侈长饰者,皆宜损减。郡县务存俭约	下罪己诏/举贤
48		永寿二年(公元156年)十二月	—	京都地震	—	—
49		延熹四年(公元161年)六月	—	京都、右扶风、凉州地震	—	大赦天下/司空被免职
50		延熹五年(公元162年)五月乙亥	—	京都地震	—	诏公、卿各自呈上密折奏事
51		延熹八年(公元165年)九月丁未	—	京都地震	—	司空周景免
52	灵帝刘宏在位22年 (公元168—189年)/地震7次	建宁四年(公元171年)二月癸卯	海水溢, 黄河水清	地震	—	二月地震三月日食,诏令公卿至六百石各上封事,太尉闻人袭免职
53		熹平二年(公元173年)六月	东莱、 北海海水溢	北海地震	—	七月,司空杨赐被免职
54		熹平六年(公元177年)十月辛丑	—	京师地震	—	司空陈球,司徒杨赐被免职/诏令天下拘禁的囚犯尚未判决的,可以交纳细绢赎罪
55		光和元年(公元178年)二月辛未	—	地震	—	三月大赦天下/改年号为光和
56		光和元年(公元178年)四月丙辰	—	地震	—	司空陈耽被免
57		光和二年三月(公元179年)	/	京兆地震(陕西西安西北)	—	司空袁逢免职
58		光和三年(公元180年)自秋至明年春酒泉表氏地八十余动,涌水出	酒泉表氏地八十余动,涌水出 B ⁺ , 7.5级***	酒泉表氏县城官寺民舍皆顿,县易处,更筑城郭	—	无救灾措施(破坏性地震)

序号	皇帝在位/ 地震次数	地震年份	地震破坏程度/ 地震大小	地震影响范围	实际救灾措施	朝廷免除高官/皇帝 举贤/罪己
59	献帝刘协在位 31 年 (公元 189 - 220 年)/地震 5 次	献帝初平二年(公元 191 年)六月丙戌	—	地震(西安西北)	—	七月司空种拂免职,太尉赵谦免职
60		初平四年(公元 193 年)冬十月辛丑	—	京师地震(西安西北)	—	司空扬彪被免职
61		初平四年(公元 193 年)冬十二月辛丑	—	地震(西安西北)	—	司空赵温被免职
62		兴平元年(公元 194 年)六月丁丑、戊寅两次	—	丁丑地震,戊寅又震(西安西北)	帝避正殿,寝兵,不听政五日/七月,献帝派遣调出京城太仓米、豆给挨饿的百姓做粥,救济饥民	关中大旱,谷子一斛卖五十万,豆麦一斛卖二十万,出现人吃人的现象。太尉朱俊免职、赦免轻罪囚徒
63		建安十四年冬十月(公元 209 年)	—	荆州地震	—	—

注: * 震级引自文献[15]
 ** 引自文献[5],其将历史上统计烈度分为 A、B、C 三类。A 为严重破坏,B 为中等破坏,C 为轻破坏。相应烈度为:A;≥IX,B;Ⅷ~Ⅵ,C;≥Ⅴ
 *** 引自文献[13]中所载三次东汉时期中国地震,所给出的烈度或震级

3.2 东汉时期地震活动情况

根据表 1 统计,东汉自光武帝刘秀于公元 25 年称帝起到公元 220 年曹丕汉代止,共 14 位帝王历 196 年。《后汉书》上有记录的地震就有 63 次之多。统计时,如“自去年九月以来,地百八十震”或“自秋至明年春酒泉表氏地八十余动”这种表述,应是震群型或主震余震型,均按 1 次统计。

张衡发明地动仪时间为顺帝阳嘉元年,即公元 132 年。在此之前的地震,根据表 1 统计可看出,东汉建立至张衡发明地动仪这一年,107 年间共记录到地震 29 次,平均不到四年一次。地震尤其频繁,并且破坏性严重,造成灾害突出。

李善邦先生在《中国地震》中的统计,是自西汉开始至张衡时代“三百六十年间(张衡死于公元 139 年),地震记载显著增加,其保留到现在的,主要收在《汉书》里面,《史记》里也有一些,共 44 条,平均不到十年就可

以有一条地震记载^[5]”。

这说明,东汉开国之后,地震发生越来越频繁,尤其到安帝时期,地震次数之多,达到令人吃惊的地步。安帝(公元 106—125)在位 19 年,大大小小的地震多达 22 次,其中破坏程度严重有人员死亡的地震有 2 次,发生在公元 119 和 121 年,“地坼裂,涌水,坏败城郭、民室屋、压人”。之后的顺帝在位 19 年(公元 125—144 年),有 12 次地震发生,破坏性地震有 3 次,为永建三年正月丙子(公元 128)京都、汉阳地震——“汉阳地陷裂,屋坏杀人,地坼涌水出”,永和三年二月乙亥(公元 138)京都、金城、陇西地震——“二郡山岸崩,地陷,城郭、室屋多坏、压杀人”,汉安二年至次年的震群——“百八十次,山谷坼裂,坏败城寺,杀害民庶”。

两汉时期不同时段的地震频次统计如表 2 所示(其中西汉至张衡期间的 44 次地震统计引自文献[5]),可看出东汉地震频次的增强。

表 2 地震频次统计

Table 2 Seismic frequency statistics

统计时段	西汉至张衡	东汉开国至张衡发明地动仪(公元 132 年)	东汉开国至东汉末
统计时长、地震总次数	360 年,共 44 次	107 年,共 29 次	公元 25—220 年共 196 年,63 次
地震平均次数	平均 8.18 年 1 次	平均 3.69 年 1 次	平均 3.1 年 1 次

东汉 196 年的 63 次地震中,破坏性地震(地裂、城郭室屋破坏、涌泉)8 次(有明确压死人的记录 7 次)、引发海啸者 2 次(海水溢)、疑似有地震前兆者 1 次(安帝永初元年,公元 107 年的郡国十八地震,地震当年“山泉水大出”,因地震的具体时间未记录,不确定山泉

水大出是否为地震前兆,记此存留待考)。

由表 1 和表 2 看出,东汉时期,地震频繁发生,造成的破坏比较严重,社会影响大。当时张衡身为史官掌管灵台,见证了地震频繁发生,破坏程度严重。特别是公元 128 年(安帝永建三年)的地震,造成“汉阳地陷

裂,屋坏杀人,地坼涌水出”,正是张衡担任太史令期间发生。地震之频影响之大,职责所在,是发明地震仪的需求。此后,朝廷才令官吏根据仪器记载地震在哪个方位发生。

3.3 东汉时期震后应对措施

地震的频繁发生,造成严重的财产损失和人员伤亡,也给统治者带来恐慌。儒家认为,地震是上天对皇帝的警示,因此尤其重视。太史令张衡也认为“土地崩裂,是因为皇上的威权被分散,地震是由于有人扰乱朝纲”。

详细统计63次地震(震群算1次)发生后的应对措施,官方有明确响应的33次(发放救灾物资、减免赋税、罪己、举贤、罢免高官等),占52.38%,其中破坏性较大有明确救灾措施的8次。

3.3.1 破坏性地震救灾情况

一般发生破坏性地震(有地陷裂、屋坏杀人、地坼涌水出等),朝廷会采取救济灾民、减免赋税等稳定社会的措施。这些一般发生在比较贤明的皇帝在位时期,如光武帝、和帝、安帝、顺帝。

如,光武帝建武二十二年(公元46年)地震中,令免南阳今年田租,赐压死者棺钱;派遣谒者巡行考察;死刑犯减死罪一等,解除脚镣,允许穿上丝絮衣服;应交人头税和拖欠田租而遭到破坏的人家,不收取欠债;官府拿现钱粮食雇人,为失去亲人的家庭寻找死去的人。汉献帝兴平元年(公元194年),有地震发生且关中干旱,献帝令侍御史侯汶出太仓贮米作粥施舍饥民,亲自于御座前量米做粥,饥民多得保全。

未有实际救灾措施的有两例。之一是顺帝,汉安二年地震,仅下诏谴责官员,并未有减轻赋税免除徭役以及罪己诏等措施;之二是灵帝,灵帝在位23年(公元168—189年)有地震7次,每次地震均会免高官推卸责任,无任何安民的措施。尤其灵帝光和三年(公元180年)的破坏性地震,整个酒泉县城都完全破坏易地重建,仍未有任何救灾措施。

3.3.2 罪己求贤和借地震惩处高官

每当地震发生,即便不是破坏性地震,一般皇帝也会有较积极的施政措施,颁布“罪己诏”,戒除奢靡,让百官陈皇帝得失,要求官员举贤良、减免赋税等安抚百姓,甚至改年号等,一定程度上起到积极作用。

秦汉时期有个传统:会借水、旱、蝗、疫、蝕(日月食)之事惩处高官,从未有过因地震而追究高官的事件发生。灵帝时期因地震而查处高官,开创了历史先河^[7]。根据本次简单统计,东汉皇帝因地震下罪己诏者5次,占7.9%,借地震惩处高官、借机政变、罢免三公等高官达17次,占27%。可见,地震这种自然现象被统治者作为上天示警“天诫”,很大程度上成为统治者借机施策的手段,重视天象(地震)也是地动仪发明的间接原因。

4 结语

由以上分析看出,东汉时期,地震频繁发生,地震造成的破坏比较严重,社会影响大。这是张衡发明地动仪的根本原因。

(1) 地震是除了水灾、旱灾之外,破坏最惨重的灾害。王朝统治者迷信地震是天诫,于是,凡国土之内发生地震,史官便当作灾祥大事记录下来。

(2) 张衡出生于东汉的全盛时代,社会经济的繁荣与手工业的发展,冶铁技术发展和铸造技术的提高,是科学发展的基础,也成为地震仪发明的基础。加之专门的研究机构灵台的建立,太史令张衡自身擅长机巧,有可能制造出“地动仪”“浑天仪”等科学仪器。

(3) 东汉地震频繁。东汉共历196年,地震有63次之多。其中破坏性地震有明确记录压死人者8次。东汉建立至张衡发明地动仪时(嘉元年,即公元132年),地震尤其频繁,并且破坏性严重,社会影响及对皇帝和朝廷的影响均很大。

(4) 张衡身为史官,职责所在。地震频繁发生,破坏严重,地裂、城郭坏败、民室屋损、人员伤亡等情况,造成严重的社会影响。公元128年(安帝永建三年)的地震,造成“汉阳地陷裂,屋坏杀人,地坼涌水出”,在张衡担任太史令期间发生。

地震频发,社会需要,又加之当时社会经济文化繁荣和科学技术发展,且有专门的研究机构,张衡身为史官,责任使然,自身又擅长机巧,就有制造出“地动仪”“浑天仪”等科学仪器的可能。

尽管当时发明浑天仪和地动仪的目的是为了“观浸象、察妖祥”——即观测自然、辨明凶吉,为国事占卜凶吉,但张衡的科学实践仍然超越了时代,为19世纪末现代地震仪的诞生起到重要的思想启迪作用。

参考文献:

- [1] 杨天锡. 历史地震研究的意义及今后研究设想[M]// 闵子群. 中国历史地震研究文集1. 北京:地震出版社, 1989:171-172.
- [2] 郭增建. 中国历史地震研究文集2[M]. 北京:地震出版社, 1991:1-252.
- [3] 孟繁兴. 地震与地震考古[M]. 北京:文物出版社, 1977:1-184.
- [4] 闵子群. 中国历史地震研究文集1[M]. 北京:地震出版社, 1989:1-172.
- [5] 李善邦. 中国地震[M]. 北京:地震出版社, 1981:170-223.
- [6] 冯锐. 中国地震科学史研究[J]. 地震学报, 2009, 31(5):564-582.
- [7] 冯锐, 俞言祥. 张衡地动仪与公元134年陇西地震[J]. 地震学报, 2006, 28(6):654-668.
- [8] 高建国. 汉代地震考[J]. 城市与减灾, 2001(5):20-23.
- [9] 章惠康. 后汉书[M]. 北京:华夏出版社, 2012:1-185.

- 1039-1056,1829-1834.
- [10] 赵双叶. 明代地震与灾后救助——以嘉靖三十四年关中大地震为例[D]. 南昌:江西师范大学,2009.
- [11] 班固. 汉书[M]. 北京:线装书局,2010:466-468.
- [12] 陈业新. 汉代地震研究[D]. 武汉:华中师范大学,2001.
- [13] [美]R. A 甘斯, I. B 纳尔逊, 卢振恒, 冯浩, 译. 公元前2000—公元1979年全球重大地震目录[M]. 北京:地震出版社,1988:1-10.
- [14] 刁守中, 晁洪太. 中国历史有感地震目录[M]. 北京:地震出版社,2008:1-5.
- [15] 冯锐, 武玉霞. 张衡地动仪的诞生[J]. 中国地震, 2013,29(2):179-197.

The Relationship Between Earthquakes and Social Science and Culture During the Eastern Han Period in China ——Background research on the invention of Zhang Heng's seismoscope

LU Shuang-ling¹, YU Qing-min², ZHONG Pu-yu³, WANG He-qian¹, SHI Xiao-hui¹, ZOU Chun-hong¹

(1. Yantai Earthquake Monitoring Center Station, Shandong Earthquake Agency, Yantai, Shandong 264001, China;

2. Tai'an Earthquake Monitoring Center Station, Shandong Earthquake Agency, Tai'an, Shandong 271000, China;

3. Shandong Earthquake Agency, Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: Taking the seismograph invented by Zhang Heng as the starting point, through the summary and analysis of the historical seismic data of the Eastern Han Dynasty contained in the "Book of the Later Han Dynasty", the frequency, influence and damage of the earthquakes in the Eastern Han Dynasty are discussed. In view of the disaster relief strategy formulated by the Imperial Court after the earthquake and the effectiveness of disaster relief after the earthquake, this paper studies the impact of the earthquake on the society in the Eastern Han Dynasty, analyzes the social, cultural and scientific background of Zhang Heng's invention of seismograph, and discusses the basic conditions for Zhang Heng's invention of seismograph.

Key words: Historical earthquake; Eastern Han Period; Invention of seismograph; Earthquake relief measures

(上接第40页)

- [11] 闫伟, 王海涛. 利用动态时间规整方法实现不同时间长度地震观测资料的形态匹配[J]. 地震学报, 2019, 41(6):769-777.
- [12] 郭文峰, 曹志勇, 王海龙. 代县地电阻率降雨影响及数值模拟[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(2):62-70.
- [13] Itakura F. Minimum prediction residual principle applied to speech recognition [J]. IEEE Trans on Acoust, Speech, Signal Process, 1975, 23(1):67-72.

Application of DTW Algorithm in Earthquake Time Series Information Mining

LI Hong-wei^{1,2}, ZHANG Shu-liang^{1,2}

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

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

Abstract: This article uses the DTW algorithm to implement retrospective testing and statistics of "abnormal forms" in earthquake time series, in order to improve the efficiency of deep mining of earthquake anomaly information. A segment of data from the horizontal pendulum observation of Taiyuan Seismic Station was randomly selected as the test data to verify the feasibility of this method. The actual observation data from Xiyang Seismic Station were also used to automatically identify abnormal forms affected by rainfall since self-observation. Based on this, the latest data change was taken as a template for retrospective testing, and a total of 7 similar changes were extracted, consistent with the previously summarized abnormal features. After analysis, 4 of the anomalies corresponded to M3.6 or above earthquakes in Taiyuan Basin and its surrounding areas. The R-value score was used to evaluate the predictive performance, and the results showed that the abnormal form could pass the predictive performance test ($R=0.52$, $R_0=0.45$), with the best prediction time being within 50 to 90 days, making it a short-term predictive indicator.

Key words: Forecast performance evaluation; Dynamic Time Warping (DTW) algorithm; Automatic anomaly identification; R-value

· 工作论坛 ·

文章编号:1000-6265(2023)01-0053-03

筚路蓝缕 以启山林

——我与《山西地震》

袁正明

(山西省地震局,山西 太原 030021)

摘要: 作者通过亲身经历,回顾《山西地震》几十年的发展历程,叙述《山西地震》编辑部在自身建设、执行科技期刊编排标准和规范,为科研人员提供专业的学术交流平台等方面所做的工作。《山西地震》的发展历程表明,只有不断克服困难,办出特色,才能更好地服务于防震减灾事业。

关键词: 地震科技期刊;发展历程;《山西地震》

中图分类号: Z429

文献标志码: A

0 引言

1979年5月我从山西省浑源县地震办公室调到山西省地震局,报到后让我到《山西地震》编辑室工作,这一干就是27年(1991—1994年虽在局办公室任职,但未离开《山西地震》的编辑工作),直到退休。

20世纪80年代是我国科技期刊繁荣发展的时期,地震系统先后创办了30余种刊物,大多集中在中国地震局所属院所,各省地震局创办的不到10种。在省局主办的期刊中,刊名中带省名的4种,带地域名的5种。带省名的期刊有浓郁的地方局限,存在着先天不足,很难在林林总总的地震期刊中吸引高质量的稿件,也很难吸引读者的密切关注。

为在全国地震系统的期刊中立足,我们便想方设法提高《山西地震》的知名度。

1 结合实际 客观定位

《山西地震》的刊名具有先天的局限性,客观定位成为《山西地震》需解决的首要问题,几经分析研究,面向防震减灾事业的实际需要,给《山西地震》以客观的恰当的定位——我国防震减灾事业是实行预防为主,防御与救助相结合的广大人民群众的事业,因此,《山西地震》必须坚持适应广大人民群众需要的办刊方针,不分娘子关内外,只要为防震减灾事业进言献策,一律欢迎;不分专业、地方,只要为防震减灾事业提供经验,均予刊用;不分从事管理、科技、监测、预报,也不分学历、职称,只要在防震减灾工作或活动中,能对第一手

材料予以归纳、总结、概括、升华,哪怕是很简短的文章,均予接纳。几十年来,《山西地震》办刊的“广谱”特征,吸纳了省内外广大同行好友,成为他们交流信息和经验的一块乐土。

2 领导标新 以引关注

20世纪七八十年代,我国科技期刊的封面几乎是清一色的“白大褂”,即封面为单色,只有刊名和主办单位,内文均为铅字印刷,文章中图件的文字均为手写,参考文献的著录无统一的标准,杂乱无章。为改变这一现状,我研究了《山西地震》可以改进的地方:1980年始,采用地震台站的照片和山西经历过大地震的古建筑作为封面,正文中附以封面说明,用彩色印刷;文章中图件的文字开始使用植字;制订《山西地震》参考文献的著录规则;1987年在山西率先取得国内统一刊号和国际连续出版物号;1990年正文改用照排胶印……独树一帜的彩色封面及编排的整齐划一,很快引起地震系统同行的关注,除省内同行纷纷投稿外,省外同行的稿件亦纷至沓来。

3 依靠标准 共享信息

我深深懂得不成规矩无以致方圆的道理,除注意自身业务素质的提高外,还在编辑部管理、期刊编排规范上下足了工夫。制定了编辑部职责、编委会职责、审稿制度、稿酬支付标准等规章制度。规范审稿程序,形成稿件登记、编辑部初审、专业审查、副主编二审、主编终审、编辑加工、发排校对、发行、归档的流程。使稿件

收稿日期:2022-07-23

作者简介:袁正明(1946—),男,天津市静海人。编审,曾任山西省地震局《山西地震》编辑部主任,现已退休。
该文获“庆祝《山西地震》创刊50周年有奖征文活动”特别荣誉奖。

严格按流程运行,减少差错,提高效率。

1980年,在山西省率先执行有关科技期刊编排的国际标准和国家标准,使《山西地震》编排整齐划一,成为山西省科技期刊执行国家、国际标准的先行者,被誉为山西科技期刊执行国家标准的标杆,受到省内外期刊管理部门的好评。在推动山西省科技期刊编排规范化、标准化工作进程的同时,为进入数据库、共享信息、期刊上网创造了条件,得到检索刊物、数据库的肯定。

1980年,被《全国报刊索引(科技版)》《地震文摘》列为编选刊物,被《中国报刊大全》、全国报刊索引(自然版)、中国科学引文数据库、《中文科技期刊简介》、美国尤里奇数据中心收录,并输入计算机检索数据库。1990年,被中国天文学文摘数据库、中国学术期刊(光盘版)(中国知网)、万方数字化期刊群、全国科技期刊综合评价指标数据库和中国期刊检索与评价数据库、中国科学文献数据库、中国地震科技文献数据库(英文版)收录。1999年始,《山西地震》全文上了中国期刊网、维普咨询网和中国资讯网山西资讯网,成为茫茫网海中的一员。迄今,出版文献2 635篇,总下载76 385次,总被引2 879次。

4 广开栏目 夹缝求生

囿于《山西地震》刊名地域的限制,作者群、读者群都受制于地域,这要在全中国地震系统30余种期刊中立足,仅以单一的学术论文与中国地震局所属院所抗衡无异于以卵击石。我们研究了地震系统30余种期刊的栏目设置,开辟他们没有的栏目,在夹缝中游刃、在夹缝中求生,办出自己的特色。《山西地震》结合自己的特点,辟有学术论文、技术交流、综合评述、工作论坛、专题汇编、问题讨论、外文译摘、外语阅读之窗、科研简讯、学术动态、新技术讲座、科普园地、地震书刊一览、资料等栏目,扩大了稿源的范畴。如,《工作论坛》这个栏目,深受地震局系统非主系列科技人员的青睐。在评职称、要论文的年代,那些非主系列的,诸如,编辑、会计、管理人员苦于论文无门可投,《工作论坛》正好为他们提供发表论文的园地。这一栏目吸引了不少稿件。《外语阅读之窗》所刊文章成为职称外语考试的学习资料。《地震书刊一览》《新技术讲座》《综合评述》《专题汇编》《资料》栏目成了广大地震工作者了解新信息的窗口。

此外,《山西地震》努力贯彻执行我国的地震工作方针,配合各个时期的工作,不失时机地编辑出版了颇有影响的专辑和增刊。如,1981年刊登的《近震分析》,被许多地震台作为培训讲义;1984年刊登的我编译的《苏联地震工作概况》,为大地震工作者了解苏联的地震观测系统、地震实验场、地震预报、室内模拟试验和理论研究、国际合作等提供了翔实的资料;1985年刊登的《地学数据处理常用BASIC程序及其使用》

增刊、1989年刊登我撰写的《地震科技写作》被若干省地震局作为培训班教材,为提高专业地震工作者的业务素质起到良好的作用。1984年编辑的《地声专辑》《鄂尔多斯块体周缘震情讨论会暨山西地震带学术讨论会专辑》,1985年刊登的《国际地震预报研究新进展汇编》,以及1987年编辑的《山西运城震群活动及现场工作专辑》等集中反映了防震减灾工作某一领域的研究成果,受到地震界的好评;1987年编辑的《中国地震预报工作20年专辑》,集中刊登全国各报刊发表的纪念中国地震预报工作20年的文章及总结20年地震预报工作的文章等,为大地震工作者了解、学习中国地震预报工作的经验提供方便;1988年编辑的《地震新闻报道专辑》,汇集全国各报刊对地震工作和地震知识的宣传报道,为读者系统了解地震新闻报道的内容尽微薄之力。1989年编辑的增刊《地震科普画册》以典型事例为依据,绘成白描画,配以文字说明,图文并茂、深入浅出地为地震工作者提供地震科普教育的参考资料,不少单位将其作为普及地震知识的讲课教材,尤其是在1989年大同一阳高6.1级地震后,为普及防震减灾知识、提高读者的防灾意识发挥很好的作用,深受广大人民群众欢迎。1992年出版的《山西地震灾害损失预测及减灾对策的研究报告》增刊,对山西国土环境、地震活动、历史地震灾害、近年来破坏性地震的震害评估工作情况做详细论述,并以第三代地震区划图为依据,对经济损失和人员伤亡进行易损性分析及震害预测,提出减灾对策,为各级政府和有关部门制定政策提供参考。

为扩大稿源,我们在立足山西的同时,将目光瞄向刚走出大学校门来到地震系统的大学生,给他们以温暖和力量,为他们提供发表论文的平台,一代新人随《山西地震》同步成长起来。从他们不敢写稿、不会写稿,到敢于实践,敢于发表文章。《山西地震》在为他们提供园地的同时也得到他们的大力支持。在《山西地震》这块园地里都能找到他们怎样成为技术员、助理工程师、工程师、高级工程师、研究员,甚至研究所所长的踪迹。《山西地震》是他们成长历程的见证,也为他们提供动态的、公开的档案资料。《山西地震》在夹缝中领导标新二十余年的发展历程,是山西省防震减灾事业健康发展的写照,也在一定程度上反映出我国防震减灾事业的发展历程。

5 苦练内功 为人作嫁

打铁先需本身硬,绣花要得手绵巧。在培植《山西地震》的同时,我十分注重自己业务素质的提高。地震群测群防使我这个对地震一窍不通的门外汉成长为一名专业地震工作者。从调到山西省地震局的那一天起,我对地震知识、防震减灾知识、编辑知识、印刷知识、外语知识、计算机知识,博学之、审问之、慎思之、明

辨之、笃行之。二十余年,发表地震、编辑专业的论文60余篇,翻译俄文科技文献一百余篇,出版图书十余本。被山西省人事厅聘为山西省出版专业中级、高级评审委员近20年。为山西省期刊编辑、书籍编辑授课十余年。获“山西省首届优秀科技工作者”“山西省首届十佳出版工作者”称号。

自身素质的提高,使《山西地震》越办越有起色,赢得社会的承认。《山西地震》的编辑与出版多次获山西省地震局科技进步奖,1次获全国优秀地震期刊奖、山西省优秀期刊奖。多次获山西省科技期刊编辑学会优秀期刊奖,连续14年获“山西省一级期刊奖”。由于在编排、内容、管理等方面做出了成绩,在省内科期刊界形成一定的影响,推动山西科技期刊编排标准化、规范化的进程。我承担了山西省科委软科学课题《山西

省科技期刊管理系统》的研究,课题中的《山西省科技期刊编排规范》被期刊管理部门作为地方标准执行,《山西省科技期刊评奖标准及办法》被期刊管理部门采纳使用,为实现科技期刊的宏观管理、优化指导提供了依据,受到国家科委和省有关单位的好评。

6 结语

《山西地震》改变了我的人生轨迹,丰富我的工作阅历,锤炼我不断探索的意志,锻造我编辑出版的硬功夫,造就我期刊编辑的生涯,留给我不能忘却的记忆,书写我近30年的人生!

谨以此文为《山西地震》创刊50周年志庆!愿《山西地震》越办越好!

Endure Great Hardships in Pioneer Work, Light the Way Through the Mountains ——My Experience with the “Shanxi Earthquake”

YUAN Zheng-ming

(Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 030021, China)

Abstract: The author, through personal experience, reviewed the development process of the “Shanxi Earthquake” for decades, narrating the work done by the editorial department in terms of its own construction, implementation of scientific and technological journal editing standards, and the provision of a professional academic communication platform for researchers. It is pointed out that in the future, difficulties should be overcome, distinctive features should be established, and better services should be provided for earthquake prevention and disaster reduction.

Key words: Journal of earthquake science and technology; Development process; “Shanxi Earthquake”

(上接第23页)

Distribution, Types and Building Avoidance Distance Determination of Ground Fissures in Qingxu, Shanxi

MA Xiu-fang^{1,2}, ZHAO Jin-quan^{1,2}, ZENG Jiu-yan^{1,2}, XUE Xiao-dong^{1,2}, BO Jian-jie^{1,2}

(1. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan, Shanxi 030002, China;

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

Abstract: Detailed geological investigation, geological mapping, and geophysical exploration were carried out along the distribution area of ground fissures in Qingxu, Shanxi to determine the distribution range and activity characteristics of ground fissures, analyze their genesis types, and determine the building avoidance distance. The distribution of ground fissures in the survey area is mostly limited to within 200m east of the Jiaocheng fault zone. However, ground fissures are still present in Fangshan Village, Xiliangquan Village, and Dongliangquan Village beyond 200m, and the width of the affected ground fissure zone is 244m. Two types of ground fissures were identified in Qingxu, namely, tectonic fissures and non-tectonic fissures. Tectonic fissures are the main type of ground fissures in the western mountains of Qingxu and are controlled by the Jiaocheng fault zone, distributed around the fault zone and its vicinity, and characterized by large scale and strong destructive nature. Non-tectonic fissures are located in Liuhe Village and Dayu Village, with fissures in Liuhe Village mainly caused by the subsidence of the ground due to excessive exploitation of groundwater, and fissures in Dayu Village caused by mining-induced subsidence in the goaf. Non-tectonic fissures are characterized by small scale and limited distribution range. The analysis suggests that the building avoidance distance from the Jiaocheng fault zone in Qingxu should be determined as follows: avoidance width on the upper plate (east side) of the Jiaocheng fault. The avoidance width for Class C buildings in Fangshan Village, Xiliangquan Village, and Dongliangquan Village is determined as 280m, while the avoidance distance for other Class C buildings remains at 200m. The avoidance distance for Class B buildings is determined as 300m according to the regulations. Avoidance width on the lower plate (west side) of the Jiaocheng fault. The avoidance distance for Class B and C buildings on the west side is 100m. The avoidance distance for Class D buildings can be determined as 30m on both sides of the ground fissure.

Key words: Ground fissure; Avoidance distance; Buildings

“地震灾害风险普查工程和地震易发区房屋设施加固工程”专刊约稿函

地震灾害风险普查工程和地震易发区房屋设施加固工程(以下简称两项工程)是自然灾害防治九项重点工程的基础性工作之一。通过实施两项工程,进一步摸清地震灾害风险隐患底数,客观认识地震灾害风险水平,不断提升地震易发区房屋设施抗震能力,降低地震灾害风险隐患。两项工程成果将为国土空间规划、城市安全发展、重大建设工程规避地震灾害风险提供科学依据,为社会经济可持续发展提供地震安全保障。为更好地交流探讨两项工程取得的成果,本刊编辑部拟于2023年出版两项工程专刊,向开展该项工作的单位和专家征集高水平论文,介绍和反映最新成果和进展。

本专刊拟征集两项工程实施过程中有关活动断层探测、场地地震工程地质条件调查、承灾体地震易损性分析、风险普查数据采集及数据库建设、地震构造图和地震灾害风险区划图编制、重点隐患排查数据库建设及隐患评估、房屋设施加固工程信息采集等方面的科研成果。

我们怀着对您严谨、求真、务实的研究工作的敬意,谨向您发出最诚挚的邀请,请您为我们撰写相关内容的稿件。赐稿请直接登录在线投稿系统,编辑部将第一时间组织专家评审,正刊发表。

投稿截止日期:2023年5月30日

投稿网址:<https://sxdz.cbpt.cnki.net/>

联系人:张瑞芳,张正霞

邮箱:sxdzjb@163.com

电话:0351-5610534

《山西地震》编辑部