

《四川地震》 第6届编辑委员会

主 编：雷建成

副主编：杜 方 易桂喜 周荣军

编 委：（按姓氏笔画排序）

马胜利 车 时 王 彬 王兰民 王庆良 王志鹏 王绪本
 王翠芳 龙 锋 刘 杰 孙 玮 孙柏涛 朱 航 乔 森
 何 强 何玉林 李 勇 李永强 杨永林 杨兴国 苏金蓉
 吴微微 吴建春 张茂军 张建国 张致伟 陈维锋 周 玮
 金 星 官致君 赵 永 胡 斌 徐 锐 郭 勇 郭红梅
 姚运生 顾林生 龚 宇 黄丁发 黄剑涛 韩 进 彭长虹
 廖 华 熊 峰 戴仕贵

四川地震 二〇二二年 第三期 总第一八四期

四川地震

Sichuan Dizhen EARTHQUAKE RESEARCH IN SICHUAN



四川地震 Sichuan Dizhen
(季刊, 1977年创刊)
2022年第3期 (总第184期) 2022年9月

EARTHQUAKE RESEARCH IN SICHUAN
(Quarterly, Started in 1977)
No.3, (Series No.184) September 2022

主管单位：四川省地震局
主办单位：四川省地震局
编辑出版：《四川地震》编辑部
主 编：雷建成
发行订购：《四川地震》编辑部
地 址：四川省成都市人民南路三段29号
邮政编码：610041 电话号码：028-65270607
国外发行：中国国际图书贸易集团有限公司
北京海淀区车公庄西路35号 100048
国外发行代号：QR733
排版印刷：成都金龙印务有限责任公司

Supervisor: Sichuan Earthquake Agency
Sponsor: Sichuan Earthquake Agency
Editor: 《Earthquake Research in Sichuan》 Edit Office
Editor-in-chief: LEI Jiancheng
Distributor: Edit Office of ERS
Address: No.29, 3rd Section of South Renmin Road,
Sichuan Chengdu 610041, China
Distributor Abroad: China International Publishing
Group Ltd.Co.
Printer: Chengdu Golden Dragon Printing Ltd. Co.

公开发行 中国标准连续出版物号：ISSN 1001-8115
CN 51-1163/P

国内定价：10.00元/册

2022年9月
第3期

四川省地震局 主管主办



《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
《中国学术期刊综合评价数据库》源期刊
《中国学术期刊(光盘版)》入编期刊

《中国期刊全文数据库》收录期刊
《中文科技期刊数据库》入编期刊
《万方数据数字化期刊群》入编期刊

2022 年第 3 期

四川地震

(季刊)

总第 184 期

目 次

- 2022 年四川马尔康 $M_{6.0}$ 震群前区域 b 值时空特征研究 郭璞霞,张丽峰,黄浩,胡维云(1)
- 基于贝叶斯概率的强震综合概率预测指标建立及其在四川地区的应用
..... 何畅,路茜,龙锋,宫悦,李丽(6)
- 郾庐断裂带五河段几何展布和结构特征 李鹏飞,疏鹏,路硕,杨源源,方良好(14)
- 基于 CAP 方法的 2019 年湖北应城 $M_{5.9}$ 地震震源机制与发震构造研究
..... 赵凌云,丁文秀,周舟,周本伟,何凯,中学林,魏贵春(20)
- 邵武-河源断裂带地震活动特征分析 赖智华(24)
- 地震应急值班信息即时编发系统设计与实现 曾维祖,杨力,晋云霞,黄新茹,潘勇杰,张力文(28)
- 盐城台地磁观测干扰特征分析 郭灏明(33)
- 罗汉桥水电站对超宽频带地震计记录资料的影响分析 何思源,赵乃千,李贵元,刘华姣,龚康(37)
- 地震台站运维信息化管理系统设计与应用 孔令爱,胡子超,王银龙(42)

主 编 雷建成
责任编辑 周文英
编 辑 魏娅玲 梁明剑 左洪廖程

期刊基本参数:CN 51-1163/P*1977*q*A4*48*zh*P*¥10.00*1000*9*2022-9
电子信箱:scdz@scdzj.gov.cn(备用邮箱:scdzbjb@163.com)

EARTHQUAKE RESEARCH IN SICHUAN

(Quarterly, Started in 1977)

No. 3 2022 Series 184

CONTENTS

Research on the Spatiotemporal Characteristics of the b -value in the Area Before the $M6.0$ Malkang Earthquake Swarm in Sichuan in 2022	GUO Yingxia, ZHANG Lifeng, HUANG Hao, HU Weiyun(1)
The Establishment of a Comprehensive Probability Prediction Index for Strong Earthquakes Based on the Bayesian Probability and Its Application in Sichuan	HE Chang, LU Qian, LONG Feng, GONG Yue, LI Li(6)
Geometric Distribution and Structural Characteristics of the Wuhe Segment along the Tanlu Fault	LI Pengfei, SHU Peng, LU Shuo, YANG Yuanyuan, FANG Lianghao(14)
Focal Mechanism Solution and Seismogenic Structure of the $M_s4.9$ Yingcheng Earthquake in 2019 from the CAP Method	ZHAO Lingyun, DING Wenxiu, ZHOU Zhou, ZHOU Benwei, HE Kai, SHEN Xuelin, WEI Guichun(20)
Analysis on the Characteristics of Seismicity in the Shaowu-Heyuan Fault Zone	LAI Zhihua(24)
Design and Implementation of Earthquake Emergent Information Instant Generating System	ZENG Weizu, YANG Li, JIN Yunxia, HUANG Xinru, PAN Yongjie, ZHANG Liwen(28)
Analysis of the Disturbance Factors of Geomagnetic Observation at Yancheng Seismic Station	GUO Haoming(33)
Research on the Influence of Hydropower Station on Seismic Data of Ultra-wideband Seismometer	HE Siyuan, ZHAO Naiqian, LI Guiyuan, LIU Huajiao, GONG Kang(37)
Design and Implementation of Operation and Maintenance Information Management System for Seismic Stations	KONG Ling'ai, HU Zichao, WANG Yinlong(42)

Managing Editor for this issue :WEI Yaling,LIANG Mingjian,ZUO Hong and LIAO Cheng

Translator for English Abstract: WU Jiang

E-mail: scdz@scdzj.gov.cn,scdzbjb@163.com

2022年四川马尔康 $M6.0$ 震群前区域 b 值时空特征

郭瑛霞,张丽峰,黄浩,胡维云
(青海省地震局,青海 西宁 810001)

摘要:根据中国地震台网提供的地震目录,选取2009年1月至2022年6月的小地震资料,对马尔康震群及邻区进行 b 值时空扫描计算。采用“最大曲率”方法,评估得到2009~2016年马尔康地区的监测能力为 $M_L1.5$,2017~2022年马尔康地区的监测能力为 $M_L1.2$;从2009~2022年的 b 值时间扫描结果可知,5级以上地震大多发生在 b 值下降时段内;2017~2022年的 b 值空间扫描结果显示,2022年马尔康震群发生在松岗断裂和龙日坝断裂附近高低 b 值变化的过渡区域,靠近低 b 值区域的边缘,且震中北部区域 Δb 值异常显著,表明马尔康 6.0 级震群前邻区应力水平明显增强,压应力积累指示此区域及邻区易于发生地震。

关键词:2022年马尔康 6.0 级震群;最小完整性震级; b 值;时空分布

中图分类号:P315.72 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-8115(2022)03-0001-05

DOI:10.13716/j.cnki.1001-8115.2022.03.001

20世纪40年代,古登堡-里克特在研究世界地震活动性时,根据对地球上各大震区 $6.0 \leq M \leq 8.0$ 地震数量的统计,首次提出地震震级(M)-频度(N)之间的经验关系($G-R$ 关系): $\lg N = a - bM$,式中 a 和 b 都为常数, N 为发生地震的频度, M 须满足条件不小于最小完整性震级(M_c), b 值反映各个档次地震频次间的比例关系,具有明确的物理意义(Gutenberg和Richter,1944)。Aki等(1984)提出强震往往发生在活动断裂带上高应力积累的凹凸体段或闭锁段, b 值与介质的非均匀程度、有效剪应力等参数有关,并与应力大小成反比(Scholz,1968),然而早前在岩石破裂实验(Wyss et al,2000)、流体抽取导致的地震活动(Wyss,1973)、地下矿山岩石破裂(Urbancic et al,1992)中就发现到这一现象。既然特定岩体内构造应力的大小与地震破裂的 b 值成反比,那么低 b 值可以作为高有效剪应力的一个指标(Wyss et al,2000)。李全林(1982)针对 b 值不同的计算方法,探讨了最大似然法和最小二乘法之间的优劣。在方法应用的基础上,很多研究学者应用震例映证震前邻区 b 值出现低值异常特征,如在1976年唐山地震(陈学忠等,2021)、2004年苏门答腊地震(李卫平等,2007)和2008年汶川地震(史海霞等,2018)震前相当长的一段时间内,区域 b 值出现持续下降的趋势,这一特征表征了地下介质应力的不断积累(王辉等,2011;Nanjok et al,2012)。冯建刚等(2016)研究了2013年岷县-漳县 6.6 级地震前的区域 b 值分布,认为地震发生在显著区域低 b 值的边缘,该地震并未缓解震源区的高应力状态,未来该区仍具有强震危险性。顾瑾萍等(2019)通过研究地震活动时间变异系数与 b 值的相关性,试图运用 b 值的变化提取大震前的异常活动信息。刘子璇等(2020)研究了2016年呼图壁 6.2 级地震前的 b 值情况,地震发生在显著低 b 值区域内,反映出震源区震前的高应力状态。地震 b 值的应用研究表明, b 值的时空扫描结果可以为判断未来强震的地点提供依据,在地震预测预报中具有重要的价值。

地震目录的截止震级 M_c 值,又称最小完整性震级,它对于 b 值的计算尤为重要,故文中在研究 b 值之前对马尔康地区的监测能力进行了计算分析,得出最小完整性震级。2022年6月10日四川马尔康 $M6.0$ 震群发生在青藏高原东南缘的巴颜喀拉块体中东部,由于印度板块向北推挤欧亚板块造成青藏高原隆升并整体向北东和东南挤出,致使巴颜喀拉块体成为高原内部一个地震活动极为强烈的次级块体。马尔康 $M6.0$ 震群的发震构造为松岗断裂,震中 200 km 范围内发生 $M6.0$ 以上的历史地震有 20 次,其中, $6.0 \leq M \leq 6.9$ 地震 16 次, $7.0 \leq M \leq 7.9$ 地震 4 次,空间距离最近的 $M6.0$ 及以上地震为1941年10月8日四川阿坝藏族羌族自治州马尔康县 $M6.0$ 地震,本研究着重研究2022年马尔康 $M6.0$ 震群前 b 值空间分布特征及其应力变

收稿日期:2022-07-22;修回日期:2022-08-04

基金项目:2022年度震情跟踪定向工作任务(2022010504)与2022年青海省地震局地震科学基金课题(2022B01)共同资助。

作者简介:郭瑛霞(1990-),女,汉族,助理工程师,主要从事地震活动性和数字地震学方面的研究工作。E-mail:932319938@qq.com.

化,为今后该区强震危险性的判定积累经验。

1 资料与方法

1.1 资料选取

2022年6月10日0时3分24秒,四川省阿坝州马尔康市(32.27°N,101.82°E)发生M5.8地震,震源深度10 km;1时28分34秒,马尔康市(32.28°N,101.83°E)又发生M6.0地震,震源深度13 km,马尔康5.8级、6.0级地震相距2 km,构成震群型地震(简称马尔康M6.0震群)。据中国地震台网测定,截至2022年7月1日24时,马尔康M6.0震群序列共记录到 $M_L \geq 0.0$ 地震4947次,其中, $M_L 0.0 \sim 0.9$ 地震1634次, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震2662次, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震554次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震73次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震7次, $M_L 5.0 \sim 5.9$ 地震2次, $M_L 6.0 \sim 6.9$ 地震1次。马尔康M6.0地震后,发生的最大余震为6月10日3时27分马尔康M5.2地震(32.25°N,101.87°E)。马尔康M6.0震群序列震中分布(图1)显示:余震密集区呈NW向展布,与松岗断裂的走向近似平行,M5.8地震距离松岗断裂最近(5.5 km),M6.0地震发生在M5.8地震NNE向约1.5 km处,M5.2地震位于M6.0地震东南侧约5 km处。

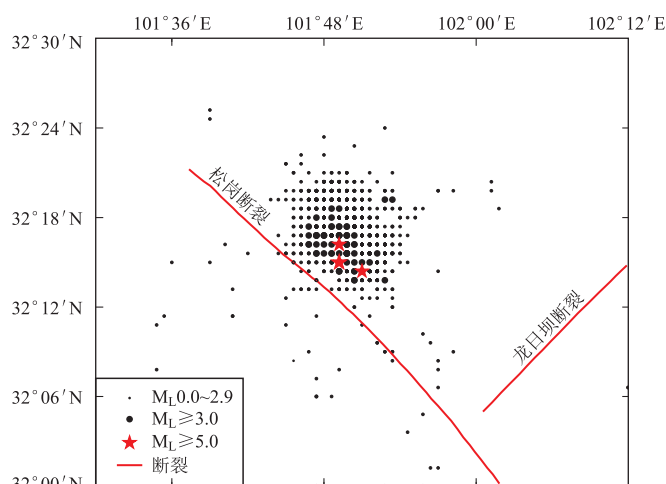


图1 马尔康M6.0震群序列震中分布

本文研究区域为马尔康M6.0震群序列及邻区(31°N~34°N,100°E~105°E),最小完整性震级和b值时空扫描计算的数据均利用中国地震台网目录提供的2009年1月1日至2022年6月9日地震目录资料,采用地方震级(M_L)。

1.2 b值计算方法

目前b值的计算方法应用较多的是线性最小二乘法和最大似然法。最小二乘法是以最小化误差的平方和寻找数据最佳函数为原则的一种参数数学估计方法,而最大似然估计法则是使用高概率产生观察数据来计算模型参数的一种求估计量的方法,这两种方法在计算原理上存在一定的差异。本文中采取最大似然法,其基本思想认为:已发生的地震事件一定来自于它们出现概率最大的总体,由地震的概率密度函数(\hat{b})表示,公式为:

$$\hat{b} = \frac{\lg e}{\bar{M}_i - M_c} \tag{1}$$

式中, \bar{M}_i 为一组震级分别为 $M_i (i = 1, 2, 3 \dots, n)$ 地震的震级平均值, M_c 为最小完整性震级(Minimum Magnitude of Completeness,简称 M_c ;刘雁冰等,2017)。

1.3 最小完整性震级的计算与分析

最小完整性震级(M_c)是指地震发生目录中包含了该震级及其以上的完整性地震震级,对b值计算影响较大。若将截止 M_c 取得过高,则计算中不能利用记录较完整的小震资料从而导致计算的b值失真,在震级-频度图上会出现“甩尾”现象;若将截止 M_c 取得过低,在这些小于完整性震级的地震影响下,震级-频度图上会出现“掉头”现象(龙锋等,2009),所以震例样本充足是保证b值计算精度的前提。马尔康地区及邻区地处构造运动强烈的青藏高原东南缘,强震多发。本文选用最大曲率法(Wiemer和Wyss,2000),根据2009~2022年的地震目录,对马尔康震群震源区及邻区的地震完整性震级进行计算并分析,这种方法对累计震级频率曲线函数求一阶导数的极大值,其值为对应的 M_c ,这个震级为非累积震级频率分布,计算出2009~2016年的 M_c 为 $M_L 1.5$ (图2a),2017~2022年的 M_c 为 $M_L 1.2$ (图2b),且图中无明显“甩尾”和“掉

头”现象。

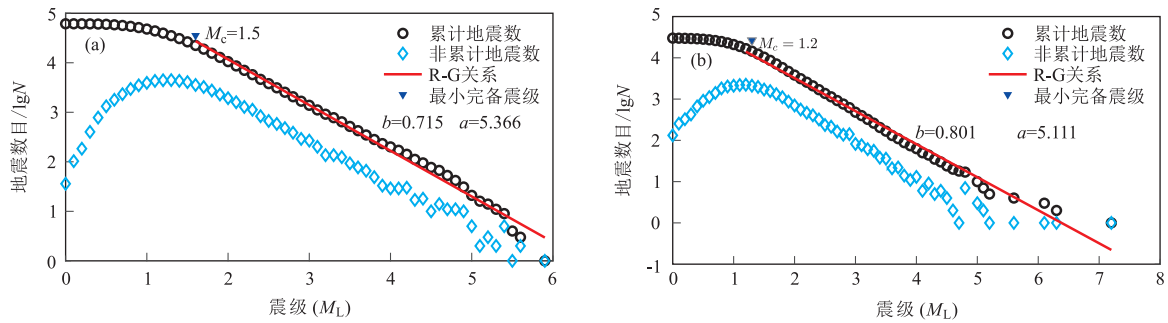


图 2 2009 ~ 2016 年 (a) 和 2017 ~ 2022 年 (b) 地震完整性分析

2 b 值时空扫描特征

2.1 b 值时间扫描特征

大地震常会引发许多中小余震, 改变地震在该区域发生的速率, 打破地震活动正常的时空分布, 影响地震活动的平稳性, 所以在做地震活动性研究时会考虑删除小余震活动对结果的影响 (陈凌等, 1998)。文中选取中国地震台网 2009 年 1 月至 2022 年 6 月马尔康地区及周边 ($31^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E} \sim 105^{\circ}\text{E}$) $M_L 5.0$ 及以上的地震目录资料, 以年为滑动窗长和步长, 用最大似然法进行时间扫描计算的结果如图 3。从图 3 中明显看出, 2011 年四川炉霍 $M_S 5.3$ 地震和四川彭州 $M_L 5.2$ 地震、2013 年四川芦山 $M_7.0$ 地震、2016 年四川北川 $M_L 5.0$ 地震、2017 年四川九寨沟 $M_7.0$ 地震、2020 年四川理县 $M_L 5.0$ 地震、四川北川 $M_L 5.0$ 地震和四川北川 $M_L 5.1$ 地震以及 2022 年四川马尔康 $M_6.0$ 震群地震发生前, 区域内 b 值都有一定程度的明显下降过程, 2013 年芦山 $M_7.0$ 地震前下降幅度较大, 2017 年九寨沟 $M_7.0$ 地震前 b 值持续下降, 这可能与芦山 $M_7.0$ 地震后区域应力得到释放有关, 但 b 值的下降幅度和趋势各有不同, 所以 b 值作为破坏性地震的预测指标具有一定指示意义。

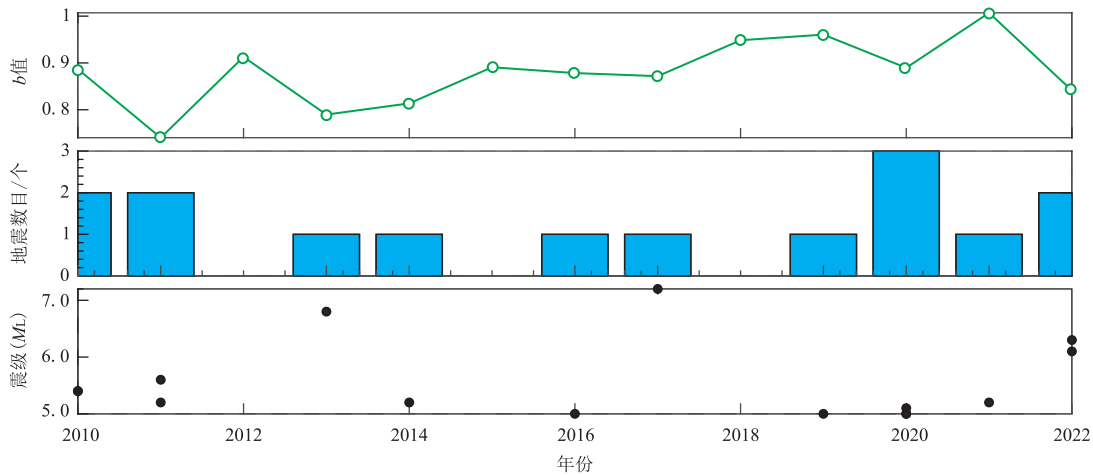


图 3 2009 年 1 月至 2022 年 6 月 $M_L 5.0$ 及以上地震 b 值时序曲线和地震数目

2.2 b 值空间扫描特征

采用最大似然法, 选取 2009-01-01 至 2022-06-09 马尔康及周边地区 ($31^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}, 100^{\circ}\text{E} \sim 105^{\circ}\text{E}$) 删除小余震活动后共 63 116 个地震, 根据最小完整性震级的计算时段选取 2017 年至 2022 年进行 b 值空间扫描。扫描网格为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 步长为 0.05° , 同时要求网格内地震数不少于 20 个, 且最大震级和最小震级的差大于 1.5 级, 震级下限为 $M_L 1.2$ (刘雁冰等, 2017)。异常判别指标为 $b < 0.7$ 的异常值, 由此得到图 4 所示的空间分布结果。马尔康地区的 b 值介于 $0.57 \sim 0.95$, 震前有低 b 值异常区域, 2022 年马尔康震群发生在松岗断裂和龙日坝断裂附近的高低 b 值变化的过渡区域, 靠近低 b 值区域的边缘 (图 4), 1990 年以来该区

100 km 范围内共记录到 2 次 $M5.0$ 以上地震,分别为 1991 年 2 月 18 日四川马尔康 $M5.2$ 地震和 2011 年 4 月 10 日四川炉霍 $M5.3$ 地震,这些地震都发生在巴颜喀拉块体中东部。巴颜喀拉块体在青藏高原内部地震活动极为强烈,历史上曾发生多次 $M6.0$ 以上地震,块体内部的频繁地震可能会引起其局部应力调整,使地震危险性趋势增强,另外从低 b 值区域大小与震级强度之间的关系来看,可能存在着异常区范围越大,其强震潜在危险性就越大的特征(冯建刚等,2016)。选取地震目录起止时间分别为 2017 年 1 月 1 日至 2022 年 6 月 9 日和 2017 年 1 月 1 日至 2019 年 6 月 9 日,将相应格点的 b 值相减计算其 Δb 值,根据 Δb 值升高为正(应力水平降低)和 Δb 值降低为负(应力水平升高)得知,马尔康震群发生前震中及邻区 Δb 值异常显著(图 5),同时也表明区域应力场是随时间的变化不断调整的。

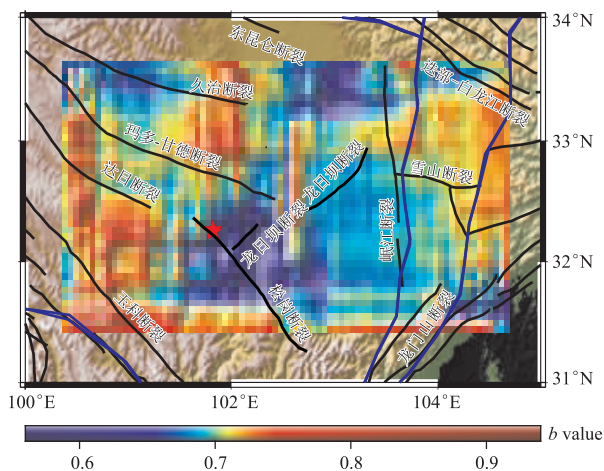


图 4 震前地震 b 值空间扫描结果

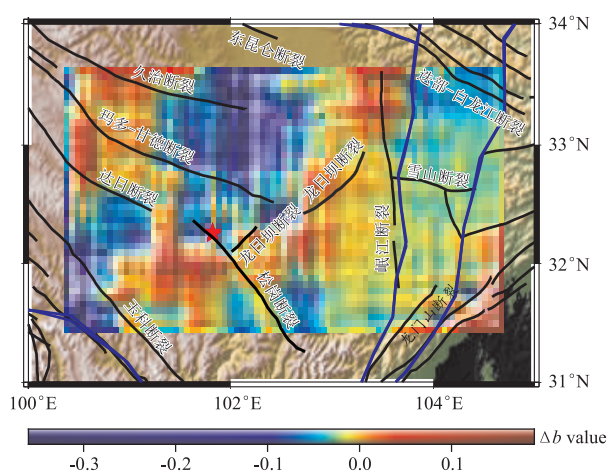


图 5 震前地震 Δb 值空间扫描结果

3 结论

通过对 2022 年四川马尔康 $M6.0$ 震群前的 b 值及震前三年 Δb 值异常特征的分析研究,得出如下结论:

(1) 选取 2009 ~ 2022 年的地震目录,采用最大曲率法计算出的最小完整性震级结果 2009 ~ 2016 年为 $M_1 1.5$,2017 ~ 2022 年为 $M_1 1.2$,表明近些年台网测震能力逐步增强,选取完整性震级以上的震例数据来分析 $G-R$ 关系和计算 b 值是合理的,可为后续研究提供基础依据。

(2) 根据本文 b 值的时间扫描特征,选取时间尺度从 2009 年 1 月至 2022 年 6 月震前,认为中强震的中短期阶段 b 值会有一定程度的下降,长期的 b 值变化与 5 级以上的中强地震发生没有明显关联。

(3) 根据 b 值的空间分布,马尔康 $M6.0$ 震群发生在松岗断裂和龙日坝断裂附近高低 b 值变化的过渡区域,靠近低 b 值区域的边缘,且异常区域面积较大;从空间尺度 b 值与震级大小的关系来看,两者存在正相关性, b 值异常空间范围越大,震级越大;通过对震前地震 Δb 值异常特征的分析,可明显看出地震发生前震中北部区域 Δb 值异常显著,表明震前邻区应力积累,存在发生强震的背景。

参考文献

陈学忠,李艳娥,陈丽娟. 2021. 唐山 $M_s 7.8$ 地震前 b 值异常特征[J]. 地球物理学报,64(10):3612-3618.
 陈凌,刘杰,陈颀,等. 1998. 地震活动性分析中余震的删除[J]. 地球物理学报,41(增刊):244-252.
 冯建刚,张辉,杨萍. 2016. 2013 年岷县漳县 6.6 级地震前地震 b 值异常特征研究[J]. 地震,36(1):32-37.
 顾瑾萍,邢红涛. 2019. 强震前地震时空相关特征研究[J]. 地震工程学报,41(2):454-459.
 李全林. 1982. b 值的物理意义和求法[J]. 地震,5(2):46-47.
 李卫平,王瑀. 2007. 2004 年 12 月 26 日苏门答腊—安达曼 $M9.0$ 级地震前后的 b 值变化[J]. 防灾科技学院学报,9(1):36-41.
 刘子璇,冯建刚,王维桐. 2020. 2016 年新疆呼图壁 6.2 级地震前 b 值异常特征研究[J]. 地震工程学报,42(1):150-156.
 刘雁冰,裴顺平. 2017. 汶川地震前后 b 值的时空变化及构造意义[J]. 地球物理学报,60(6):2104-2112.

- 龙锋,闻学泽,倪四道. 2009. 区域最小完整性震级时空分布的确定:以龙门山断裂带为例[J]. 地震,29(3):27-36.
- 史海霞,孟令媛,张雪梅,等. 2018. 汶川地震前的 b 值变化[J]. 地球物理学报,61(5):1874-1882.
- 王辉,曹建玲,申旭辉,等. 2011. 华北地区的背景地震活动及区域未来强震危险性[J]. 地震,31(2):11-23.
- Aki K. 1984. Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(b7):5867-5872.
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4):185-188.
- Nanjok Z, Hirata N, Obara K, et al. 2012. Decade-scale decrease in b value prior to the $M9$ -class 2011 Tohoku and 2004 Sumatra quakes[J]. Geophysical Research Letters, 39(20):L20304.
- Scholz C H. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 58(1):399-415.
- Urbancic T I, Trifu C I, Long J M, et al. 1992. Space-time correlation of b values with stress release [J]. Pure and Applied Geophysics, 139(3):449-462.
- Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 90(4):859-869.
- Wyss M. 1973. Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 31(4):341-359.
- Wyss M, Schorlemmer D, Wiemer S. 2000. Mapping asperities by minima of local recurrence time: San Jacinto-Elsinore fault zone [J]. Journal of Geophysical Research, 5(b4):7829-7844.

Research on the spatiotemporal characteristics of the b -value in the area before the $M6.0$ Malkang earthquake swarm in Sichuan in 2022

GUO Yingxia, ZHANG Lifeng, HUANG Hao, HU Weiyun

(Qinghai Earthquake Agency, Qinghai Xining 810001, China)

Abstract: According to the earthquake catalogues provided by the China Earthquake Networks, we selected the data of small earthquakes from January 2009 to June 2022, and calculated the b -values of the Malkang earthquake swarm and adjacent areas by spatiotemporal scanning. Using the "maximum curvature" method, we suggest that the monitoring capability of the Malkang area from 2009 to 2016 is $M_L 1.5$, whereas the corresponding value from 2017 to 2022 is $M_L 1.2$. From the b -value time scan results from 2009 to 2022, we suggest that most earthquakes of the $M_S \geq 5.0$ occurred during the decline period of b -value. The results of the spatial scan distribution of b -values show that the Malkang earthquake swarm in 2022 occurred in the transition area between high and low b -value changes near the Songgang fault and the Longriba fault. The swarm is close to the edge of the low b -value region. Moreover, the Δb -value in the northeastern part of the fault is abnormally significant, which indicates that the stress level in the adjacent area before the $M6.0$ Malkang earthquake swarm is significantly enhanced. Furthermore, the accumulation of compressive stress indicates that earthquakes are prone to be occurred in the area and adjacent areas.

Keywords: the $M6.0$ Malkang earthquake swarm in 2022; minimum magnitude of completeness; b -value; spatiotemporal distribution

基于贝叶斯概率的强震综合概率预测指标建立及其在四川地区的应用

何畅¹,路茜¹,龙锋¹,宫悦¹,李丽²

(1. 四川省地震局,四川成都 610041; 2. 山西省地震局,山西太原 030021)

摘要:为了建立多学科综合概率预报指标,以四川区域震例回溯结果为依托,基于贝叶斯概率推导出单测项异常出现后的发震后验概率,并结合联合概率公式给出了多测项异常出现后的综合概率。在此基础上,对四川地区当前通过R值检验的、对6级左右地震有预测意义的87项预测指标进行了贝叶斯后验概率计算,结果显示:四川地区当前预测指标出现异常后的后验概率大多数在0.1~0.2,对未来强震预测不具备强约束;仅有少量地下流体类测项具有较高的后验概率,是今后需要重点关注的测项。针对综合概率计算时异常测项增多导致幂函数形式的综合概率区分度不够的问题,建议仅采用6个月以内的中短期异常测项进行计算,或者转换成“概率角度”。最后对2013年芦山7.0级、2014年康定6.3级和2019年长宁6.0级地震前的异常测项进行了综合概率回溯,尝试性提出了四川地区6级以上地震的综合概率预报指标:中短期异常在4项以上,联合概率值大于0.45,概率角度值大于25°;而7级以上地震的综合概率预报指标为中短期异常在10项以上,联合概率值大于0.90,概率角度值大于65°。

关键词:贝叶斯概率;综合概率预测;异常指标;四川地区

中图分类号:P315.7

文献标识码:A

文章编号:1001-8115(2022)03-0006-08

DOI:10.13716/j.cnki.1001-8115.2022.03.002

长期的地球物理场观测与地震预报实践表明,由于地球的不可入性以及地震孕育过程的复杂性(陈运泰,2008),单一手段的地震预测方法往往很少有较高的信度以支撑起对某次强震的准确预测,采用算法联合多种监测预报手段进行综合概率预测是一条可行探索的途径,已有众多基于不同算法的实验性工作得以开展并取得成效,如支持向量机回归方法(蒋淳等,2006;卫定军等,2014)、概率增益建模(邱玉荣,2011)、遗传神经网络(陈秀琼等,2005)、模糊聚类法(狄莉莎等,2000)等。利用多手段综合预报,可以“抹平”各手段的随机预测噪声,同时可在一定程度上增强前兆信号的强度,以提高预测水平。

在设计综合概率预测方法的过程中,如何保证各单一指标以不同的权重(信度、预测效能等)参与进来,并产出符合先验的、相对的强震发震期望(概率或某些可度量的数值)是这一方法的核心部分。本文在对四川地区开展地震预测实践中,从贝叶斯概率出发,推导出了单个指标的发生强震的后验概率,采用联合概率计算所有异常的综合概率,并对2013~2019年四川区域的3次6级以上强震进行了回溯性研究,并尝试提取不同震级的综合概率值。

1 方法

不同于古典频率学派,贝叶斯概率公式侧重于基于已有的先验知识预测某件事情发生的概率(四川大学数学系高等数学教研室,1990),已经在参数回归(Hoff,2009)、风险决策(王学军等,2003)、机器学习(茅伟强,2008)等方面得到广泛应用。针对单个地震预测指标的贝叶斯概率的公式为:

$$P(D|Y) = \frac{P(Y|D)P(D)}{P(Y)} \quad (1)$$

收稿日期:2022-04-04;修回日期:2022-06-10

基金项目:四川省科技计划项目(2020YJ0475)、中国地震局监测预报司震情跟踪项目(2022010406)、山西省应用基础研究计划面上青年基金项目(201901D211549)联合资助。

作者简介:何畅(1988-),女,辽宁阜新人,高级工程师,主要从事电磁学与综合地震预报研究。E-mail:359313759@qq.com。

通讯作者:龙锋(1981-),男,湖南岳阳人,高级工程师,主要从事数字地震学与综合地震预报。E-mail:278987568@qq.com。

式中: Y 表示异常, D 表示地震。 $P(Y)$ 和 $P(D)$ 分别是该指标异常出现以及地震发生的先验概率, $P(Y|D)$ 是地震发生前必然存在异常的条件概率,是似然值。而所求的 $P(D|Y)$ 是异常出现后必然出现地震的条件概率。由于地震预测是二元分类问题——即有异常、无异常、有地震、无地震,因此依据全概率公式,异常出现的总概率 $P(Y)$ 共有两项,可以写为:

$$P(Y) = P(Y|D)P(D) + P(Y|N)P(N) \quad (2)$$

式中: N 表示无地震。为了方便计算,同时考虑到异常和地震发生的低概率性,将它们离散到时间上(以天为单位),用时间的占有率来代替各自的概率。设总的研究时段为 T_{all} ,地震发生次数(或天数)为 N_{eq} ,异常出现次数(或天数)为 N_a ,异常出现后发生预测中的地震次数(即“报准”的次数或天数)为 N_b ,则:

$$P(D) = N_{\text{eq}}/T_{\text{all}} \quad (3)$$

$$P(Y|D) = N_b/N_{\text{eq}} \quad (4)$$

由(3)、(4)两式可得:

$$P(Y|D)P(D) = N_b/T_{\text{all}} \quad (5)$$

另有:

$$P(N) = (T_{\text{all}} - N_{\text{eq}})/T_{\text{all}} \quad (6)$$

$P(Y|N)$ 为未发生地震时出现异常的概率,可表示为未发生地震时未出现异常的概率的补集,即:

$$P(Y|N) = 1 - P(X|N) = 1 - \frac{T_{\text{all}} - N_a t}{T_{\text{all}} - N_{\text{eq}}} = \frac{N_a t - N_{\text{eq}}}{T_{\text{all}} - N_{\text{eq}}} \quad (7)$$

式中: X 为未出现异常的时段, t 为预报指标中单次预报时长。联合(5)~(7)式,最终可得:

$$P(D|Y) = \frac{N_b}{N_b + N_a t - N_{\text{eq}}} \quad (8)$$

上式表明,某个指标异常出现后对应地震的后验概率可从其具体的预报指标和历史验证效能中获得。进一步将式(8)上下同时除以 N_a ,则可得到:

$$P(D|Y) = \frac{R_c}{R_c + t - N_{\text{eq}}/N_a} \quad (9)$$

式中: R_c 为报准率,从上式可以看出高的报准率和短的预报时长会明显提升预报概率,这与实际相符。另外也可看出式(9)存在分母为0的函数奇点。由于 $R_c \in [0, 1]$,而 t 往往大于1,因此分母是否为0取决于 t 与 N_{eq}/N_a 的大小关系,也就是说,当预报时长与研究区总地震数和异常出现次数的比例接近时,概率值可能为无穷;且当这一比例明显大于预报时长 t 时,概率值为负数。

2 数据

2.1 单测项月尺度概率

针对四川地区目前仍在正常运作的各观测项进行了6级以上历史震例的回溯性研究,提取了能通过R值检验(许绍燮,1973^①;许绍燮等,1989)的预测指标,最终获得87个测项指标的贝叶斯后验概率计算结果(表1)。在常规的地震预测实践中,我们更期望获得月这一时间尺度上的强震发生概率,因此在通过式(8)计算概率时,往往将指标的预测时间 t 归算到月。在表1中,地震活动性的部分异常如空区、条带、震群、 b 值、震源机制解一致性空间扫描,以及宏观异常或其它临时出现但具备一定预报意义等共计9项指标由于无法溯及过往总数,无法计算 $P(D|Y)$ 值,依相应学科专家依经验给定数值;另有9项指标由于 $P(D|Y)$ 值计算为负数或无穷大,人为给定该值为0.010(表1中带②的指标项)。

通过对 $P(D|Y)$ 进行统计,所有指标(图1a)与不考虑人为给定概率的指标(图1b)在统计分布上并无明显差异,后验概率在0.1~0.2是优势概率区间,表明四川地区大部分预测指标在月尺度上对6级以上地震的预测并不具备强约束。具有较高预测概率的3个指标分别是巴塘川-58泉(305K)水温预测概率为0.33、普格川-65泉水温预测概率为0.6和康定二道桥川-55泉水温预测概率为0.75,均属于地下流体测项。从表1中震例回溯的统计数据来看,这3个测项的报准率并不高(占50%或更低),显著低于部分跨断

① 许绍燮. 1973. 地震技术资料汇编:震兆分析一例. 北京:《地震战线》.

层形变测量测项,如尔乌水准3-A测边(85%以上)、龙灯坝基线A-D测边(100%)等,且有着偏高的虚报率,但由于其较短的预报期限(3个月),使其在月尺度上有着较高预测概率值。

表1 四川地区强震指标及相关震例

序号	异常/测项名称	异常判定指标	统计时段	N_a /次	N_b /次	N_{eq} /次	t /月	$P(D1Y)$	芦山7.0级地震是否存在此项异常	康定6.3级地震是否存在此项异常 ^③	长宁6.0级地震是否存在此项异常 ^③
1	平静	5级地震平静超过320天	1970-01-01~2022-03-14	24	16	18	6	0.111	否	是	是
2	频次	四川及周边地区 $M_L 3.5 \sim 5.9$ 地震	1970-01-01~2022-03-14	38	23	18	12	0.050	是	否	否
3	长宁窗	长宁窗发生 $M_L \geq 3.5$ 地震	1970-01-01~2022-03-14	98	18	18	12	0.015	是	否	否
4	盆地窗	四川盆地发生 $M \geq 4.5$ 地震	2008-01-01~2022-03-14	10	8	10	6	0.133	是	是	是
5	空区	出现3级以上地震空区	1970-01-01~2022-03-14	-	6	12	6	0.050 ^①	是	否	否
6	空区打破	出现3级以上地震空区打破	1970-01-01~2022-03-14	-	4	12	6	0.100 ^①	否	是	否
7	条带	3级以上地震条带出现	1970-01-01~2022-03-14	-	9	18	-	0.100 ^①	否	否	否
8	震群	出现2个以上高频、准同步震群	1970-01-01~2022-03-14	-	-	-	-	0.050 ^①	否	否	否
9	b值	低b值异常区域	1970-01-01~2022-03-14	-	-	-	-	0.100 ^①	否	否	否
10	震源机制	震源机制解一致性区域	2000-01-01~2022-03-14	-	-	-	-	0.100 ^①	否	否	否
11	视应力	视应力高值异常区域	2000-01-01~2022-03-14	-	-	-	-	0.100 ^①	否	否	否
12	余震窗	余震区出现 $M \geq 4.5$ 地震	2008-01-01~2022-03-14	14	9	10	3	0.220	否	是	否
13	盐源干海子井水氡	单点突跳 $> \pm 15\%$; 短趋势 $> 10\%$	1980-09-01~2022-03-11	6	1	24	3	-0.200 ^② (0.010)	否	否	否
14	姑咱海子泉水氡	单点突跳 $> \pm 15\%$; 短趋势 $> 10\%$	1971-01-01~2022-03-14	17	6	33	3	0.250	否	否	否
15	姑咱海子泉水氡	差分值超出3倍 标准差控制线	1971-01-01~2022-03-14	14	3	33	3	0.250	否	否	否
16	西昌川-32井水氡	单点突跳 $> \pm 15\%$; 短趋势 $> 10\%$	2010-02-01~2022-03-11	1	1	9	3	-0.200 ^② (0.010)	否	否	否
17	西昌川-32井水氡	年变形态或幅度异 于多年平均动态	2010-02-01~2022-03-11	1	1	9	18	0.100	否	否	否
18	西昌川-32井钙离子	差分值超出3倍 标准差控制线	2013-01-01~2022-03-11	6	1	8	3	0.091	否	否	否
19	宁南葫芦口断层气CO ₂	测值超出给定阈 值	2006-01-01~2022-03-11	2	1	12	3	-0.200 ^② (0.010)	否	否	否
20	宁南葫芦口断层气CO ₂	差分值超出3倍 标准差控制线	2006-01-01~2022-03-11	17	2	12	3	0.049	否	否	否
21	宁南葫芦口断层气CO ₂	去年变值大于3 倍方差	2006-01-01~2022-03-11	2	1	12	18	0.040	是	否	否
22	宁南松新断层气CO ₂	测值超出给定阈 值	2006-01-01~2022-03-11	1	1	12	3	-0.125 ^② (0.010)	否	否	否
23	宁南松新断层气CO ₂	差分值超出3倍 标准差控制线	2006-01-01~2022-03-11	7	1	12	3	0.100	否	否	否
24	宁南松新断层气CO ₂	去年变值大于3 倍方差	2006-01-01~2022-03-11	1	1	12	18	0.143	是	否	否
25	布拖断层气CO ₂	趋势上升、下降	2003-01-01~2022-03-11	2	1	13	36	0.017	否	否	否
26	布拖断层气CO ₂	去年变值大于3 倍方差	2003-01-01~2022-03-11	6	2	13	18	0.021	否	否	否

续表 1

序号	异常/测项名称	异常判定指标	统计时段	N_a /次	N_b /次	N_{eq} /次	t /月	$P(DIY)$	芦山7.0级地震是否存在此项异常	康定6.3级地震是否存在此项异常 ^③	长宁6.0级地震是否存在此项异常 ^③
27	理塘毛垭川-51 泉水温	水温三天内上升累计大于等于6.0℃;	2009-01-01~2022-03-11	4	4	11	8	0.160	是	否	否
28	理塘毛垭川-51 泉水温	差分值超出3倍标准差控制线	1975-01-01~2022-03-11	66	16	30	5	0.051	否	否	否
29	理塘毛垭川-51 泉水温	年变形态或幅度异于多年平均动态	1975-01-01~2022-03-11	10	3	30	12	0.032	否	否	否
30	巴塘305K川-58 泉水温	短时间内大幅度上升或下降	1996-03-16~2022-03-11	8	3	18	3	0.333	否	否	否
31	康定二道桥川-55 泉水温	短时间内大幅度上升或下降	1980-01-01~2022-03-11	11	6	31	3	0.750	是	否	否
32	泸定川-63 泉水温	短时间内大幅度上升或下降	1999-01-01~2022-03-11	9	8	20	15	0.065	是	否	否
33	道孚川-53 泉水温	短时间内大幅度上升或下降	1976-01-01~2022-03-11	4	3	32	7	-3.000 ^② (0.010)	否	否	否
34	道孚川-54 泉水温	年变形态或幅度异于多年平均动态	1978-01-01~2022-03-11	1	1	32	18	-0.077 ^② (0.010)	否	否	否
35	康定川-57 泉水温	短时间内大幅度上升或下降	1997-01-01~2022-03-11	4	4	18	11	0.133	是	否	否
36	普格川-65 泉水温	测值超出给定阈值	2002-01-01~2022-03-11	6	3	16	3	0.600	否	否	否
37	乡城52大泉水温	短时间内大幅度上升或下降	1997-01-01~2022-03-11	4	2	18	3	-0.500 ^② (0.010)	否	否	否
38	乡城52大泉水温	超出1倍标准差	1997-01-01~2022-03-11	14	8	18	12	0.051	否	否	否
39	地磁Z分量	加卸载响应比逐日比综合异常	2008-01-01~2022-03-11	8	4	1	7	0.068	是	否	是
40	地磁Z分量	日变化空间相关	2009-01-01~2022-03-11	13	5	3	18	0.021	是	否	否
41	地磁Z分量	地磁低点位移	2012-01-01~2022-03-11	9	1	0	2	0.053	否	否	否
42	成都地电阻率NW向	破年变	2008-01-01~2021-12-31	3	2	2	12	0.056	是	否	否
43	南山洞体应变NS测向	趋势转折	2008-01-01~2022-03-11	1	1	4	36	0.030	否	否	否
44	侏倭基线A-B测边	去周期,速率差分,超1.4倍标准差	1981-06-23~2022-03-08	7	5	19	11	0.079	否	否	否
45	侏倭基线A-B测边	破年变,超2.8倍标准差	1981-04-30~2022-03-08	2	1	19	8	-0.500 ^② (0.010)	是	否	否
46	侏倭水准A-C测边	去周期,速率差分,超1.0倍标准差	1981-06-24~2022-03-11	10	7	19	6	0.146	否	否	否
47	侏倭水准A-C测边	破年变,超1.0倍标准差	1981-05-01~2022-03-11	11	7	19	6	0.130	否	否	否
48	虚墟基线B-A测边	去周期,速率差分,超2.3倍标准差	1982-05-19~2022-03-09	8	3	19	6	0.094	是	否	否
49	虚墟基线C-A测边	去周期,速率差分,超1.2倍标准差	1982-05-19~2022-03-09	8	5	19	6	0.147	是	否	否
50	虚墟基线C-A测边	破年变,超1.2倍标准差	1981-05-13~2022-03-09	10	7	19	7	0.121	是	否	否
51	虚墟水准B-A测边	去周期,速率差分,超1.7倍标准差	1981-05-14~2022-03-13	12	7	19	6	0.117	是	否	否
52	虚墟水准B-A测边	破年变,超1.0倍标准差	1981-02-08~2022-03-13	11	8	19	8	0.104	是	否	否
53	虾拉沱基线B-A测边	去周期,速率差分,超1.3倍标准差	1979-06-11~2022-03-10	10	9	19	13	0.075	是	否	否
54	虾拉沱基线B-A测边	破年变,超2.8倍标准差	1979-06-11~2022-03-10	6	3	19	9	0.079	是	否	否

续表 1

序号	异常/测项名称	异常判定指标	统计时段	N_a /次	N_b /次	N_{eq} /次	t /月	$P(D1Y)$	芦山7.0级地震是否存在此项异常	康定6.3级地震是否存在此项异常 ^③	长宁6.0级地震是否存在此项异常 ^③
55	虾拉沱基线 C - A 测边	破年变,超 1.0 倍标准差	1979-06-11~2022-03-10	12	9	19	13	0.062	是	否	否
56	虾拉沱水准 B - A 测边	破年变,超 1.2 倍标准差	1980-05-11~2022-03-10	9	4	19	6	0.103	是	否	否
57	虾拉沱水准 C - A 测边	破年变,超 1.0 倍标准差	1980-05-11~2022-03-10	12	9	19	13	0.062	是	否	否
58	沟普基线 C - A 测边	去周期,速率差分,超 1.0 倍标准差	1984-05-28~2022-03-10	10	7	19	10	0.080	否	否	否
59	沟普蠕变 1-2 测边	破年变,超 1.9 倍标准差	1988-01-01~2022-03-10	9	6	19	13	0.058	是	否	否
60	沟普水准 B - A 测边	破年变,超 1.6 倍标准差	1988-01-01~2022-03-10	3	1	12	12	0.040	是	否	否
61	沟普水准 C - A 测边	斜率差,超 3.0 倍标准差	1988-01-01~2022-03-10	3	1	12	6	0.143	是	否	否
62	龙灯坝基线 A - B 测边	破年变,超 1.2 倍标准差	1986-01-18~2022-03-10	10	7	19	10	0.080	是	否	否
63	龙灯坝基线 A - B 测边	去周期,速率差分,超 2.3 倍标准差	1986-01-18~2022-03-10	3	2	12	13	0.069	是	否	否
64	龙灯坝基线 A - C 测边	去周期,速率差分,超 1.0 倍标准差	1986-10-21~2022-03-10	13	8	19	13	0.051	否	否	否
65	龙灯坝基线 A - D 测边	去周期,速率差分,截断 1.6 倍标准差	1986-10-21~2022-03-10	5	5	12	12	0.094	是	否	否
66	龙灯坝蠕变 1-2 测边	去周期,速率差分超 1.0 倍标准差	1989-01-01~2022-03-10	10	7	19	13	0.059	是	否	否
67	龙灯坝蠕变 1-2 测边	破年变,超 1.6 倍标准差	1988-01-01~2022-03-10	7	5	19	9	0.102	是	否	否
68	龙灯坝蠕变 1-3 测边	破年变,超 2.3 倍标准差	1988-01-01~2022-03-10	5	4	19	11	0.100	否	否	否
69	老乾宁水准 1-3 测边	斜率差 1.3 倍标准差	1980-09-10~2022-03-10	9	5	12	6	0.106	是	是	
70	老乾宁水准 5-3 测边	去周期,速率差分超 1.1 倍标准差	1980-09-10~2022-03-10	13	9	19	13	0.057	是	否	否
71	老乾宁蠕变 1-2 测边	去周期,速率差分超 1.0 倍标准差	1990-01-01~2022-03-10	12	6	19	12	0.046	否	否	否
72	老乾宁蠕变 1-3 测边	去周期,速率差分超 2.7 倍标准差	1990-01-01~2022-03-10	3	1	19	6 $\ln^{\text{f}^{\text{2}}}(0.010)$		否	否	否
73	安顺场水准 B - A 测边	去周期,速率差分超 1.0 倍标准差	1978-11-02~2022-03-10	12	9	19	13	0.062	是	否	否
74	安顺场水准 B - A 测边	斜率差 1.1 倍标准差	1978-11-02~2022-03-10	7	4	12	6	0.118	是	否	否
75	安顺场水准 C - A 测边	去周期,速率差分超 1.4 倍标准差	1978-11-02~2022-03-10	10	5	19	6	0.109	是	否	否
76	紫马垮蠕变 1-3 测边	去周期,速率差分超 1.6 倍标准差	1991-01-01~2022-03-10	7	6	19	13	0.077	否	否	否
77	紫马垮蠕变 1-3 测边	破年变超 2.0 倍标准差	1991-01-01~2022-03-10	9	6	19	11	0.070	否	否	否
78	尔乌水准 3 - A 测边	去周期,速率差分超 1.4 倍标准差	1984-10-10~2022-03-10	13	11	19	13	0.068	是	否	否
79	尔乌水准 3 - A 测边	破年变超 1.0 倍标准差	1982-05-17~2022-03-10	14	13	19	7	0.141	否	否	否
80	汤家坪水准 A - B 测边	破年变超 1.0 倍标准差	1982-08-08~2022-03-10	17	12	19	12	0.061	否	否	否
81	汤家坪水准 A - B 测边	斜率差 2.5 倍标准差	1982-08-08~2022-03-10	4	2	12	9	0.077	是	否	否

续表 1

序号	异常/测项名称	异常判定指标	统计时段	N_a /次	N_b /次	N_{eq} /次	t /月	$P(D Y)$	芦山7.0级地震是否存在此项异常	康定6.3级地震是否存在此项异常 ^③	长宁6.0级地震是否存在此项异常 ^③
82	汤家坪水准 A-C 测边	斜率差 2.5 倍标准差	1982-08-08 ~ 2022-03-10	4	2	12	8	0.091	是	否	否
83	蒲江水准 D-A 测边	去周期,速率差分超 1.2 倍标准差	1978-07-06 ~ 2022-03-10	10	7	19	6	0.146	否	否	否
84	灌县水准 3-4 测边	去周期,速率差分超 1.0 倍标准差	1980-02-08 ~ 2022-03-10	11	7	19	8	0.092	否	否	否
85	恰叫蠕变 1-2 测边	斜率差,超 2.1 倍标准差	1992-01-01 ~ 2022-03-10	6	2	12	6	0.077	是	否	否
86	宏观异常		1970-01-01 ~ 2022-03-10	-	-	-	-	0.010 ^①	否	否	否
87	其他可供参考异常		1970-01-01 ~ 2022-03-10	-	-	-	-	0.010 ^①	否	否	否

注:①缺乏相关资料而依据经验人为给定。②数据为无穷或负数,括号内为依据经验给定的数值。③统计 6 个月以内的中短期异常。

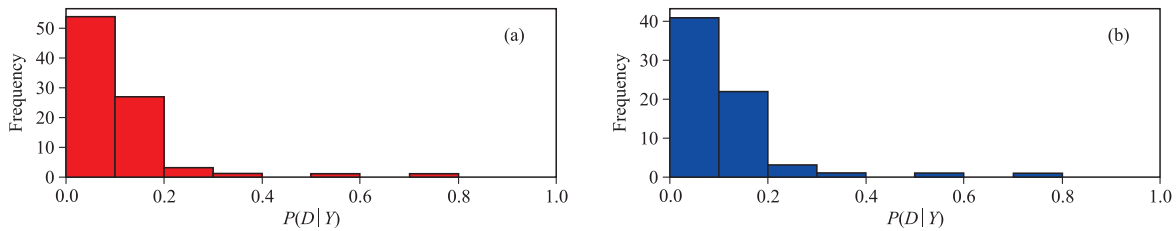


图 1 P(D|Y) 值所有指标 (a) 和不考虑认为给定概率的指标 (b) 统计柱状图

2.2 典型震例回溯研究

考虑到历史强震震例存在部分地球物理场观测项失效的问题,这里选择针对 2013 年以来四川地区的 3 次 6 级以上震例进行了概率分析(表 1)。统计结果显示,2013 年芦山 7.0 级地震前存在异常 40 项,其中预报期限在 6 个月以内的中短期异常 12 项。为了综合考量所有异常指标对未来强震的预测概率,采用了联合概率的方法,设由式(8)计算得到的第 i 个指标的预测概率为 P_{c_i} ,则 n 个异常指标在月尺度上 6 级以上强震的发震概率可表示为:

$$P = 1 - (1 - P_{c_1})(1 - P_{c_2}) \dots (1 - P_{c_n}) \quad (10)$$

根据式(10),若假定 $P_{c_i} = 0.01$,需 229 项异常可使 P 值达到 0.9,而当 $P_{c_i} = 0.1$ 时,则需 22 项异常。

以 2013 年芦山 7.0 级地震而言,震前 40 项异常计算出来的发震概率为 0.992。绘制发震概率随异常项数变化的曲线绘制出来(图 2 中蓝色实线),可以看出第 7 项异常(例如康定二道桥川-55 泉水温, $P_c = 0.75$;普格川-65 泉水温, $P_c = 0.60$ 等)对提升总体概率贡献极大,从 0.45 提升至 0.86。当异常项数达到 15 项而概率超过 0.90 后,概率曲线平缓,这是因为式(10)为极限为 1 的幂函数,这意味着尽管异常项数增加,但最终发震概率值变化幅度较小,通常在小数点后两位变化,这无益于异常信号的识别和预报指标的提取。为此,本文试图从两个方面解决这个问题:(a) 仅使用中短期异常。芦山 7.0 级地震前 12 项中短期异常的发震概率同样达到了 0.92(图 2 中红色实线),这样既保证了概率值可达到较高的水平,同时相对较少的异常数量使得相邻概率值之间的区分度较高。这种方法并不能保证未来随着监测能力的提升,更多的中短期异常项数依旧会使得概率曲线变得平坦。(b) 考虑到概率值在 0 ~ 1 之间变化,通过反正弦函数将概率值转换为角度,即:

$$D = \sin^{-1}(P) \quad (11)$$

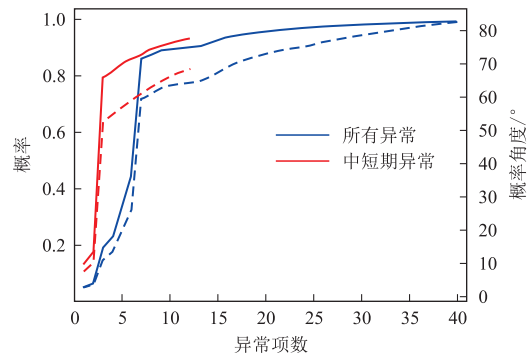


图 2 芦山地震前概率值和角度值随异常项数变化曲线 (实线为概率,虚线为角度)

可在一定程度上消弭概率曲线的平坦效应,增加概率的区分度。从图2可以看出,对于芦山7.0级地震前的40项异常,相较于概率值在第15~40项异常之间仅有0.07的变化幅度,相应区间的角度变化值有 15° (蓝色虚线),方便于指标提取时阈值的确立。芦山7.0级地震前40项异常的角度值为 82.79° (蓝色虚线),如果只考虑12项中短期异常,则角度值为 68.43° (红色虚线)。从实际应用的效果来看,四川地区背景性异常长期维持在30项左右,这一数量使得发震概率P值始终在0.9左右,不利于区分当前强震的紧迫性。因此,仅采用6个月以内的中短期异常来计算概率符合当前按月来追踪震情形势的需求,且概率变幅较大有助于强震紧迫性的区分。

本文收集整理了2014年康定6.3级和2019年长宁6.0级地震前的中短期异常,并计算了它们的发震概率值和概率角度值,其中康定6.3级地震前中短期异常5项,概率和概率角度值分别为0.52和 31.10° ,而长宁6.0级地震前中短期异常4项,概率和概率角度值分别为0.48和 26.08° 。

3 结论

为了建立四川地区强震综合概率预测指标,从贝叶斯概率出发,推导出了单个指标出现异常后强震发生的后验概率;基于联合概率,引入多项指标出现异常后的综合概率,并对芦山7.0级、康定6.3级和长宁6.0级等强震开展了回溯性研究。获得的结论如下:(1)单个指标的贝叶斯后验概率的大小与报准率正相关、与预报时长负相关,这是符合经验直觉的。但该概率同时也被预报时长和总地震数及总预报数的比例的相互大小所约束,在计算过程中要规避极小可能出现的无穷或负值。(2)四川地区强震指标的后验概率大多在0.2以内,说明大多数指标短期预测效能一般,对未来强震约束不强。(3)联合概率是一个极限为1的幂函数,当异常数较多时,少数异常的增减在概率上的区分度不高,不便于阈值的选取和指标的提取。为此,建议只采用6个月以内的中短期异常进行联合概率计算,又或者,通过反正弦函数将概率值转换为角度值以获得更好的区分度。(4)采用以上规则,震例回溯研究统计出:芦山7.0级地震前有12项中短期异常,计算得到的联合概率为0.92,概率角度值为 68.43° ;康定6.3级地震前中短期异常5项,概率和概率角度值分别为0.52和 31.10° ;而长宁6.0级地震前中短期异常4项,概率和概率角度值分别为0.48和 26.08° 。(5)通过这三次较少的震例,本文尝试性提出了四川地区6级以上地震的综合概率预报指标为:中短期异常在4项以上,联合概率值大于0.45,概率角度值大于 25° ;而7级以上地震的综合概率预报指标为:中短期异常在10项以上,联合概率值大于0.90,概率角度值大于 65° 。(6)四川地区选取6级以上强震震例较少,且地震发生和地球物理场的监测能力均存在时空不均匀性,因此需要开展更多的震例回溯总结和积累工作,以形成更稳健的综合概率预报指标体系。

致谢:本文在数据收集整理过程中,得到了四川地震台张致伟、官致君、苏琴、祁玉萍、马伶俐、芮雪莲、林圣杰、王迪等提供的大力帮助;中国地震局地球物理研究所蒋长胜研究员提供了部分思路,在此一并致谢。

参考文献

- 陈秀琼,郭朝珍. 2005. 基于遗传神经网络的地震综合预测系统研究[J]. 集美大学学报(自然科学版),10(3):221-226.
- 陈运泰. 2009. 地震预测:回顾与展望[J]. 中国科学(D辑:地球科学),39(12):1633-1658.
- 狄莉莎. 2000. 模糊聚类方法在湖北西部地震综合预测中的应用[J]. 地壳形变与地震,(3):89-93.
- 蒋淳,魏雪丽,陆远忠,等. 2006. 支持向量机在地震综合预测中的初步应用[J]. 中国地震,22(3):303-310.
- 茅伟强. 2008. 贝叶斯量子随机学习算法及应用研究[D]. 江苏:苏州大学.
- 邱玉荣. 2011. 基于概率增益模型的地震综合预测方法研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所.
- 四川大学数学系高等数学教研室. 1990. 高等数学(第三册)[M]. 北京:高等教育出版社.
- 王学军,张亲. 2003. 产品质量概率 Bayes 推断与风险决策[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版,25(3):3.
- 卫定军,罗国富,司学芸,等. 2014. 基于支持向量机回归的宁夏地震前兆综合预测模型研究[J]. 地震研究,37(2):186-191.
- 许绍燮,陆远忠,朱传镇,等. 1989. 地震预报方法实用化文集[C]:地震学专辑. 北京:学术书刊出版社.

Hoff, Peter D. 2009. A First Course in Bayesian Statistical Methods. Springer Science & Business Media. Jeffreys, Sir Harold. 1961 [M]. Theory of Probability: 3rd Edition. Clarendon Press.

The Establishment of a Comprehensive Probability Prediction Index for Strong Earthquakes based on the Bayesian Probability and Its Application in Sichuan

HE Chang¹, LU Qian¹, LONG Feng¹, GONG Yue¹, LI Li²

(1. Sichuan Earthquake Agency, Sichuan Chengdu 610041, China;

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

Abstract: In order to establish a multi-disciplinary comprehensive probability prediction index, we used the back-tracking results of earthquake cases in Sichuan region and based on the Bayesian probability method, to deduce the posterior probability of earthquake occurrence after the occurrence of anomalies on a single measurement item. Moreover, combined with the joint probability formula and multiple measurements, we further present the composite probabilities after the occurrence of term anomalies. On this basis, the Bayesian posterior probability calculation is carried out for 87 prediction indicators that are through the R -value test, which shows predictive significance for $M6$ earthquakes in Sichuan. The posterior probability is mostly between 0.1 and 0.2, which does not present strong constraints on the prediction of future strong earthquakes. Only a small number of underground fluid items show high posterior probability, which needs to be paid more attention in the future. During the calculation of the comprehensive probability, the increasement of abnormal measurement items leading to the problems show that the comprehensive probability in the form of power function is not sufficiently discriminative. We suggest that it is better to only use short-term abnormal measurement items within 6 months for calculation or to convert the items into a "probability angle". Therefore, a comprehensive probability retrospective is carried out for the abnormal measurement items before the $M7.0$ Lushan earthquake in 2013, the $M6.3$ Kangding earthquake in 2014 and the $M6.0$ Changning earthquake in 2019. The comprehensive probability prediction index for the $M \geq 6$ earthquakes in Sichuan area is tentatively proposed as: more than 4 short-term anomalies, the joint probability value greater than 0.45, and the probability angle value greater than 25° . The comprehensive probability prediction index for the $M \geq 7$ earthquakes in Sichuan area is tentatively proposed as: more than 10 short- and medium-term anomalies, the joint probability value greater than 0.90, and the probability angle value greater than 65° .

Keywords: Bayesian probability; comprehensive probability prediction; precursory indicator; Sichuan

郟庐断裂带五河段几何展布和结构特征

李鹏飞, 疏鹏, 路硕, 杨源源, 方良好
(安徽省地震局, 安徽合肥 230031)

摘要:五河地区位于华北板块和扬子板块的结合处, 整体地质构造复杂。本文在已有研究成果的基础上, 结合高分辨率卫星影像解译、野外地质地貌调查、浅震探测等手段对研究区内主要断裂的几何展布和活动特征进行研究。研究表明: 研究区内郟庐断裂由4条近于平行的断裂构成, 自西向东分别为乌云山—合肥断裂、桑涧子—广寒桥断裂、池河—西山驿断裂和藕塘—清水涧断裂, 其中池河—西山驿断裂构造地貌线性特征明显, 淮河以北段最新活动时代为晚更新世, 活动性较强。乌云山—合肥断裂、桑涧子—广寒桥断裂和藕塘—清水涧断裂发育在基岩山体内, 未见断错第四系剖面。

关键词:五河地区; 郟庐断裂带; 几何展布; 活动特征

中图分类号: P315.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-8115(2022)03-0014-06

DOI: 10.13716/j.cnki.1001-8115.2022.03.003

郟庐断裂带是中国东部一条规模巨大的NNE走向的活动断裂带, 自1957年航磁大调查中被发现以来, 已有50余年的研究历史。郟庐断裂带在长期的发展演化过程中, 在空间上表现为分段差异活动, 在时间上则具多期活动的特点(徐嘉炜等, 1992; 朱光等, 2005)。随着研究的深入, 不同学者对郟庐断裂带分布在山东及苏北境内的中段, 即昌邑—大店断裂、白芬子—浮来山断裂、沂水—汤头断裂、郟部—葛沟断裂和安丘—莒县断裂等5条近平行的断裂系开展了丰富的研究工作, 并且认为安丘—莒县断裂可能止于淮河附近(晁洪太等, 1994; 李家灵等, 1994; 王志才等, 2005; 曹筠等, 2017; 杨源源等, 2017), 淮河为郟庐断裂带活动性的分界点。本文针对郟庐断裂带在淮河附近五河地区的断裂几何结构及活动特征进行研究, 通过高精度卫星影像解译、野外地质地貌调查等方法获得隐伏断裂的几何展布、活动性质、活动特征等重要的活动构造学定量参数, 以期更系统全面地讨论郟庐断裂带的破裂分段提供参考, 同时为区域地震危险性评价和城市规划提供重要的科学依据。

1 研究区地震地质背景

五河地区位于蚌埠隆起北缘, 处于郟庐断裂带中段与南段交汇部位, 断裂构造发育; 研究区地处丘陵地貌与平原地貌交界地带, 总体地势略呈南北高中间低的趋势, 大体以淮河为界, 以南为波状起伏的丘岗, 以北为地势平坦的平原; 地层划分上属阜阳地层分区和两淮地层分区交界处, 地表大部分为第四系所覆盖, 主要为全新统和上更新统出露, 中更新统零星出露。研究区内发育多条断裂, 除北东向郟庐断裂带外, 还发育有近东西向与北东向断裂等, 且中小地震活动较为频繁。1970年以前, 研究区内记载多次4级以上历史地震, 最大一次为1829年11月五河 $M5\frac{1}{2}$ 地震, 发生在郟庐断裂带与近东西向的太和—五河断裂交汇部位; 1970年以来, 中小地震主要分布在郟庐断裂带沿线附近, 最大地震是1979年3月4日五河西 $M4.0$ 地震(见图1)。

2 五河段构造特征分析

郟庐断裂带是中国东部一条巨型断裂带, 总体上呈北北东走向, 绵延2400多千米, 中生代以来经历过长期复杂的演化, 该断裂带在五河地区主要由4条主干断层组成(见图2)。

收稿日期: 2021-04-20; 修回日期: 2021-11-17

作者简介: 李鹏飞(1993-), 男, 安徽合肥人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为活动构造及其应用. E-mail: pfl19391@163.com.

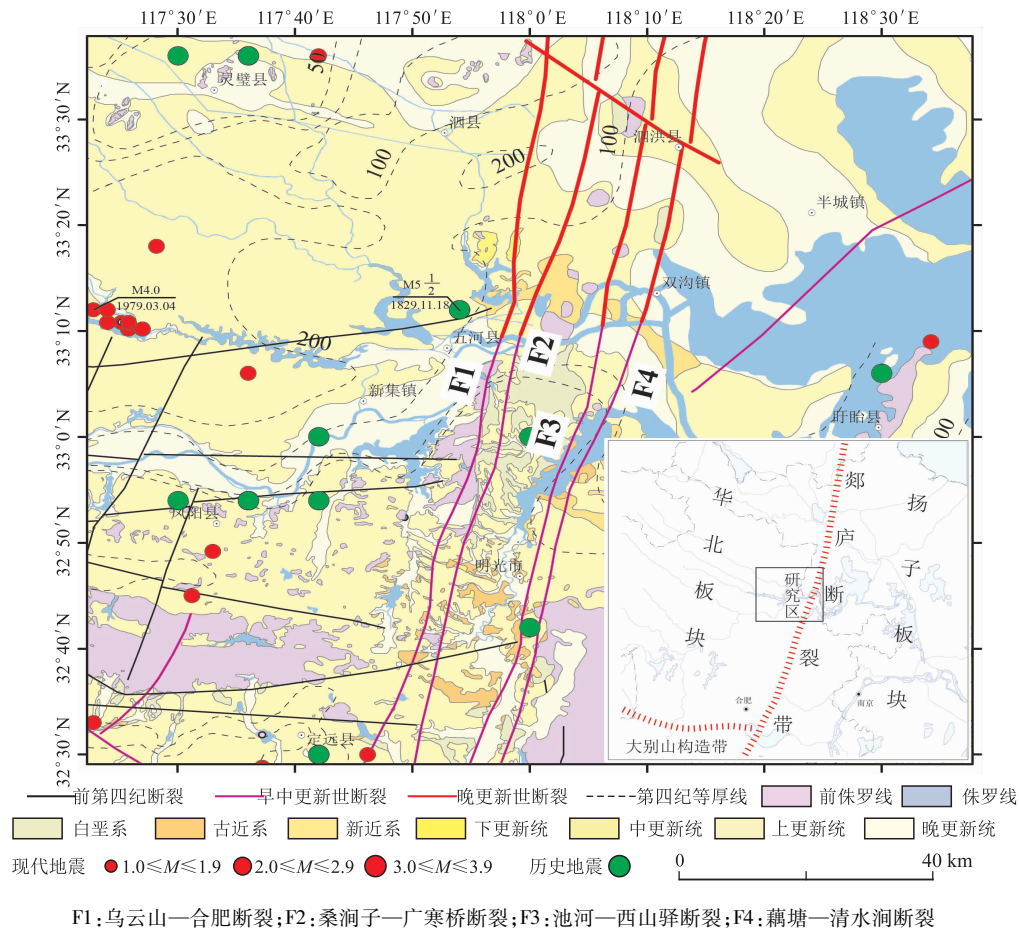


图1 区域地震构造图

2.1 乌云山—合肥断裂(F1)

该断裂为郟庐西界断裂,其定远以北段在宏观地貌上有显示,构成山体与西侧平原的分界;定远以南断裂基本隐伏于合肥盆地之下,经地层分析和年代测试工作可知,合肥盆地隐伏区乌云山—合肥断裂的最新活动时代在中更新世晚期(郑颖平等,2020);推测在五河县附近从城区东侧通过,断裂通过处河流改道拐弯明显,淮河以北为平原,淮河以南为缓丘地貌。通过地质地貌调查发现,在花园湖东多处见连续的残存低丘(见图3),多由古近系或白垩系基岩构成,在残丘边缘见有基岩破碎带,宽度数米至数十米不等,基岩断面见有近水平擦痕,推测可能为F1断裂通过处。由于该断裂在研究区内处于隐伏状态,为探明该断裂的几何结



F1: 乌云山—合肥断裂; F2: 桑涧子—广寒桥断裂; F3: 池河—西山驿断裂; F4: 藕塘—清水涧断裂

图2 五河段Google影像

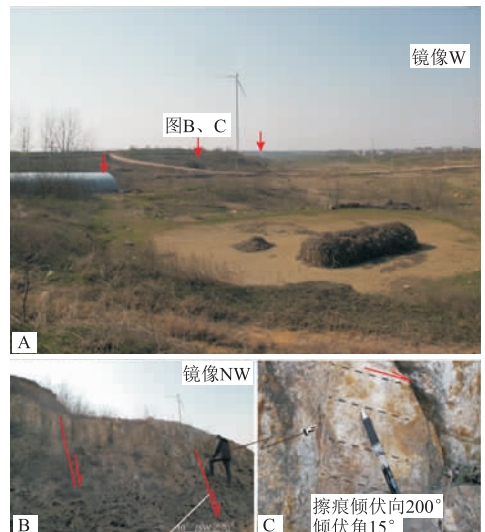


图3 乌云山—合肥断裂断错地貌特征

构与最新活动时代,利用 GEODE 分布式地震仪针对该断裂布设 2 条浅层地震勘探测线 N1、N2(见图 2)。N1 测线剖面长度为 1 520 m,偏移距为 80 m,道间距为 2 m;N2 测线剖面长度为 1 320 m,偏移距 72 m,道间距为 2 m。

图 4 为 N1 测线深度剖面及地质解译图,上部在 100 m、140 m 和 160 m 左右深度出现三组连续性较好的同相轴,下部在 220 m、320 m 和 340 m 左右深度出现三组连续性较差的同相轴,反射波组在 599 ~ 974 m 段同相轴发生错断、汇合,且同相轴深度变深,形成为断块区域。根据以上界面变化特征,推断该条剖面 600 m 处存在一条南东倾向的正断层,上断点深度约 100 m,断距约 10 m,倾角约 50°,可能已经影响到 T1 底界面。根据区域资料,T1 界面可能为第四纪底界面。T3 界面可能为基岩顶界面。根据 T1 界面仅仅受到微弱的变形扰动,我们推测可能反映了断裂第四纪早期活动,晚期不活动,或活动微弱。

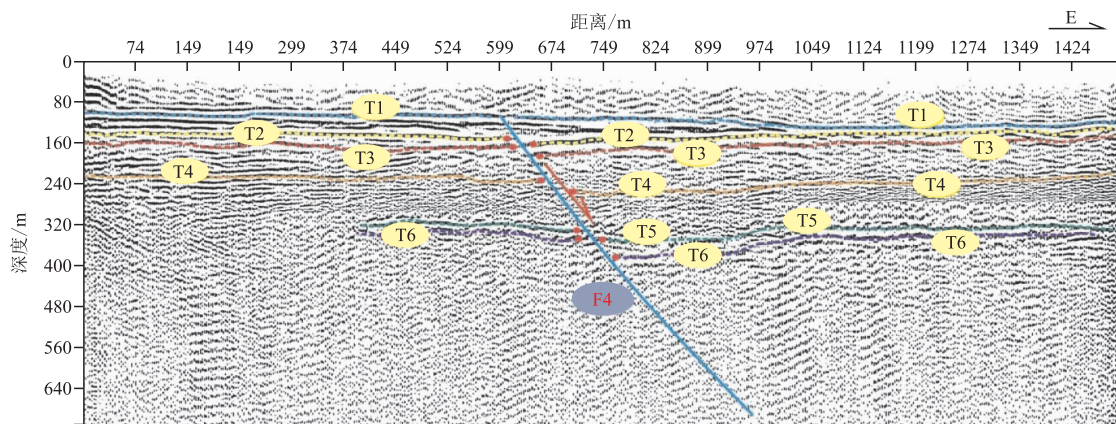


图 4 N1 测线浅层地震深度剖面及地质解译

图 5 为 N2 测线深度剖面及地质解译图,在 120 m、140 m 和 160 m 左右深度出现三组连续性较好的同相轴,反射波组同相轴在 335 m 段同相轴发生错断。根据以上界面变化特征,推断该条剖面由 NE 至 SW 方向,335 m 处存在断层 F4:上断点深度约 110 m,断距约 12 m,倾角约 40°;断层性质为正断型,断层明显断错 T1 界面。T1 界面为第四系底界面,T3 界面为白垩系基岩顶界面。T3 界面以下的杂乱反射为白垩系基岩内部反射。

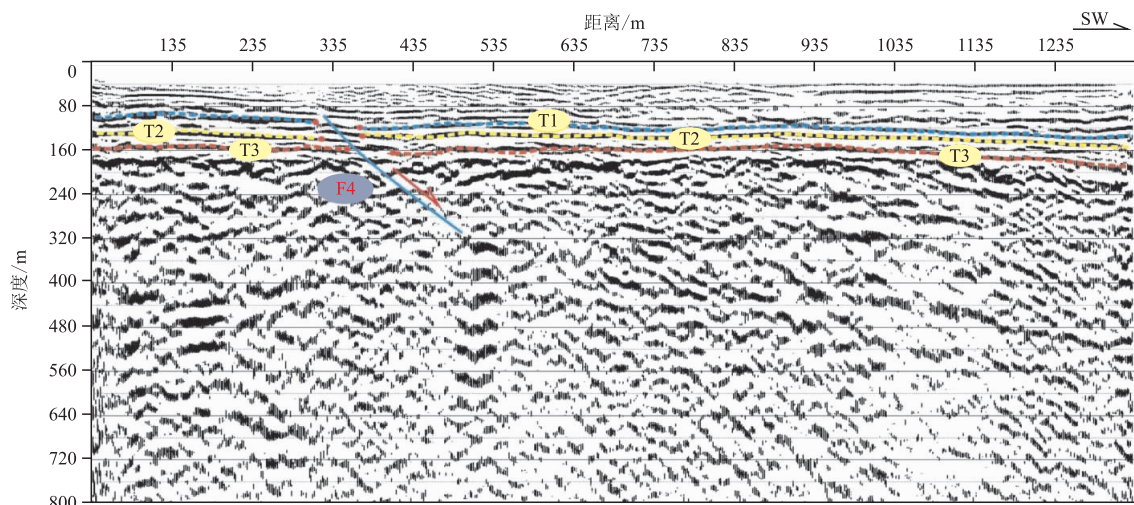


图 5 N2 测线浅层地震深度剖面及地质解译

钻孔资料显示,研究区第四系厚度多在 70 m 以上,第四系顶部为素填土,中部为上更新统中砂-粉细砂,底部为中更新统粉细砂-粘土层,下伏地层为中统砂砾岩;结合钻孔等资料,推测 N1 和 N2 物探剖面上第一个强反射层 T1 对应松散砂粘土(Q_{p2})与砂砾岩(N₂)之间的反射界面,在两条物探剖面上,T1 界面均不同程度受到断层活动的影响,尤其是 N2 测线,断层断错 T1 界面明显,并影响到其上的 Q_{p2}底部,因此推测

该断裂为早中更新世断裂。

2.2 桑涧子—广寒桥断裂(F2)

桑涧子—广寒桥断裂又称朱顶—石门山断裂,定远以北段宏观地貌特征显著,断裂位于大巩山地垒与东侧明光盆地之间,盆山间线性色调分异十分明显,特别在明光石门山一带,山体东缘呈笔直延伸,在定远以南断裂基本隐伏于合肥盆地之下。通过地质地貌调查发现,在五河县乔子健水库附近,均能见到连续的缓丘地貌或断层槽谷(图6A,B,C),推测断裂从乔子健水库穿过,在乔子健水库南的人工采石坑,见基岩断层出露,发育有清晰的断层擦痕(图6D,E,F)。沿断裂往南40 km,在白山凌水库周郭村附近开挖的探槽,显示上白垩统砂岩与元古代片麻岩呈断层接触,断层上覆中晚更新统粘土未受断层影响,判断断裂为早中更新世断裂。

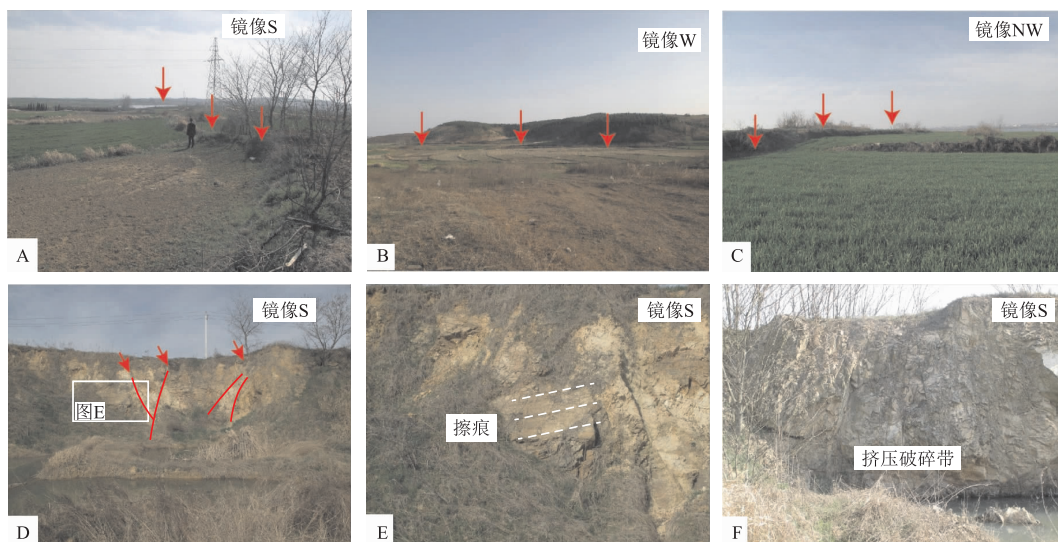


图6 桑涧子—广寒桥断裂断错地貌特征

2.3 池河—西山驿断裂(F3)

池河—西山驿断裂又称池河—太湖断裂,该断裂是郟庐断裂带最重要的分支断裂,在安徽境内延伸较好,遥感影像特征最为明显。研究区内断裂以淮河为界,分为淮河以南段和淮河以北段。施炜等(2003)研究认为,由于一些NW向构造的分割、控制和调整,郟庐断裂南北分段差异性极为明显,使其在地震活动强度和地震破裂特征上显示出明显的分段性。淮河以北段由苏皖交界的宿迁、重岗山、孙牌坊、大红山和小红山,直至淮河,地貌形态反映比较明显。在各地的剖面上都存在王氏组紫红色砂页岩逆冲到晚更新世黄土之上这一特征,挤压破碎带宽度从几米到50多米,带内发育挤压扁豆体、断层泥。

李起彤(1994)针对该断裂北段做了大量研究工作,通过在桥北镇西侧和重岗山西侧开挖的探槽,发现断裂错断了全新世地层,认为该断裂苏皖交界附近全新世至少有过一次活动;通过在重岗山和嶂山一带的探槽开挖,认为最新活动时代为全新世初期(沈小七等,2015;杨源源等,2016);通过在浮山一带的探槽开挖表明该断裂最新活动时代为全新世早期(赵朋等,2017)。断裂南段在淮河—女山湖之间的紫阳山—独龙山—陡山一线存在南北向展布的线状岗地或隆起,岗地边缘断裂与池河—太湖断裂在女山湖以北的延伸迹线较为吻合。明光紫阳乡紫阳山采石场出露多条基岩断层,断层发育于流纹岩与白垩纪砂岩之间,以及红砂岩内。其中流纹岩与砂岩之间发育的断层规模较大,断层宽约0.6 m,断层带内为挤压破碎物质,发育丰富的挤压片理、扁豆体、角砾等断层物质,但未见新鲜的滑动面,为郟庐带早期活动的产物。砂岩内发育的断层平直,断面较窄,发育少量泥状断层物质,较硬,断层顶部为砾石坡积层(Q₃)覆盖。该处未见断层晚第四纪活动的痕迹(见图7)。因此,综合判断池河—西山驿断裂在淮河以北为晚更新世活动,在淮河以南为早中更新世活动。

2.4 藕塘—清水涧断裂(F4)

藕塘—清水涧断裂又称嘉山(明光)—庐江断裂,为郟庐东界断裂,是华北板块与苏鲁造山带交界断裂,

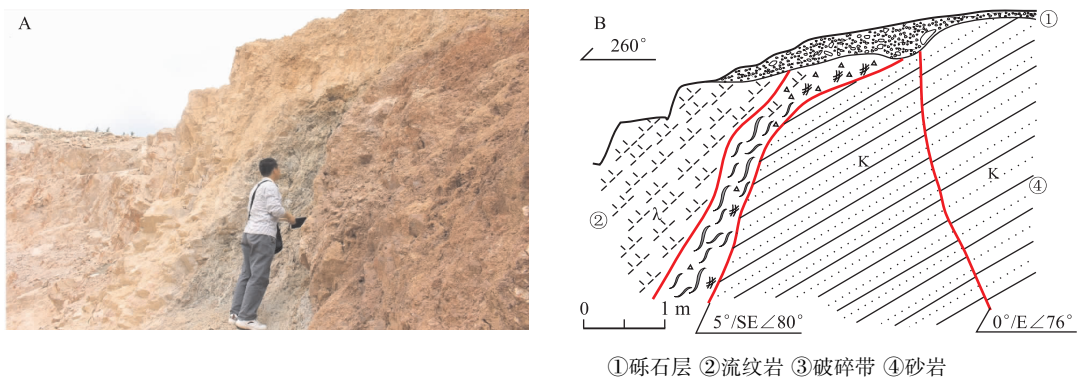


图7 紫阳二郎村西断层照片及剖面素描图

走向北北东,在卫星图片上有清晰的显示。在女山湖南北均呈隐伏状态,无地貌显示,以南则由明南大横山经仁和集、藕塘镇至界牌集东,总体线性特征较差,断裂多从变质岩区内部或边缘通过,新活动性不明显。在研究区以南的古城集东北的人工剥离剖面(见图8)上,见该段断裂的5条断层(f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5)切割白垩纪棕色砂岩, f_1 、 f_2 走向北东,倾向北西,断层性质为正断型,两条断面之间为尚有原岩结构的粗碎裂岩,宽约4 m, f_1 断面上近水平擦痕发育,北东向侧伏,倾伏角 8° 。 f_3 、 f_4 和 f_5 走向为北西或北北西,倾向为南西, f_3 和 f_5 为正断层, f_4 为逆断层, f_4 和 f_5 之间也为尚有原岩结构的粗碎裂岩,宽约5 m。剖面中 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_5 上部都有一层坡洪积砾石层堆积,估计其堆积时代为晚更新世,其中 f_2 和 f_5 上部砾石层的厚度变大。实地观察,断层没有影响该套砾石层。断裂带内中生代碎屑岩沉积厚度达到数千米,而断裂东侧则缺失大部分古、中生代地层,据以往研究资料,针对该断裂实施的跨该断裂钻孔联合剖面探测结果表明,该断裂没有明显断错晚第四纪地层。综合分析认为,藕塘—清水涧断裂属于第四纪早中更新世断裂。

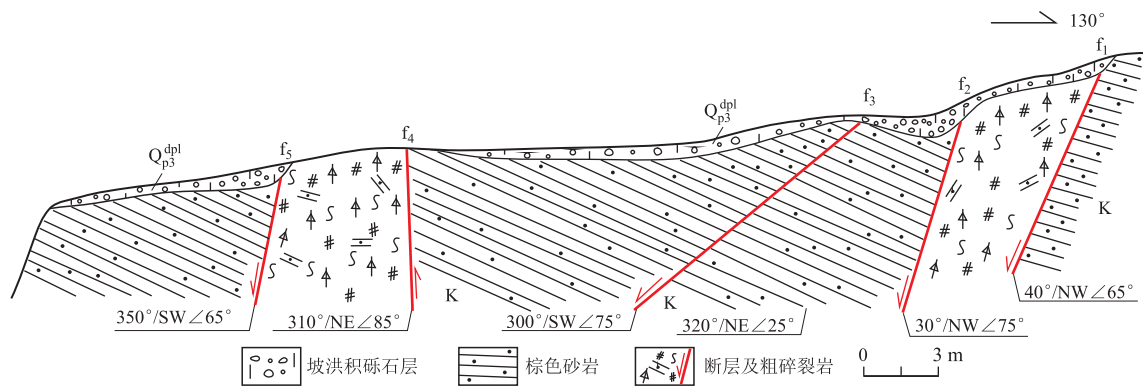


图8 古城集东北断层剥离剖面素描图

3 结论

本文对郟庐断裂带在淮河附近五河地区的断裂几何结构及活动特征进行了初步研究,通过高分辨率卫星影像解译、野外地质地貌调查、浅震探测等手段,对郟庐断裂带五河段取得如下认识:(1)郟庐断裂带五河段由4条近于平行的北东向断裂构成。(2)池河—西山驿断裂构造地貌线性特征明显,以淮河为界,分为活动差异明显的南北两段,淮河以北段最新活动时代为晚更新世,活动性较强。(3)结合地貌和地质调查等资料,乌云山—合肥断裂、桑涧子—广寒桥断裂和藕塘—清水涧断裂均发育在基岩山体内,未见断错第四系剖面,推测这3条断裂最新活动时代为早中更新世。

致谢:审稿人对本文提出了诸多修改意见,令作者受益匪浅,在此表示感谢。

参考文献

- 曹筠,许汉刚,冉勇康,等. 2017. 郟庐断裂带沂水—汤头断裂南段晚第四纪活动新证及构造意义[J]. 地震地质, 39(2): 287 – 303.
- 晁洪太,李家灵,崔昭文,等. 1994. 郟庐断裂带中段全新世活断层的特征滑动行为与特征地震[J]. 内陆地震, (4): 297 – 304.
- 李家灵,晁洪太,崔昭文,等. 1994. 郟庐活断层的分段及其大震危险性分析[J]. 地震地质, (2): 121 – 126.
- 李起彤. 1994. 断层活动性定量评定之现状与展望[J]. 国际地震动态, (5): 1 – 5.
- 沈小七,姚大全,郑海刚,等. 2015. 郟庐断裂带重岗山—王迁段晚更新世以来的活动习性[J]. 地震地质, 37(1): 139 – 148.
- 施炜,张岳桥,董树文. 2003. 郟庐断裂带中段第四纪活动及其分段特征[J]. 地球学报, 24(1): 11 – 18.
- 王志才,贾荣光,孙昭民,等. 2005. 沂沭断裂带安丘—莒县断裂安丘—朱里段几何结构与活动特征[J]. 地震地质, 27(2): 212 – 220.
- 徐嘉炜,马国锋. 1992. 郟庐断裂带研究的十年回顾[J]. 地质论评, (4): 316 – 324.
- 杨源源,赵朋,郑海刚,等. 2017. 郟庐断裂带安徽紫阳山段发现全新世活动证据[J]. 地震地质, 39(4): 644 – 655.
- 杨源源,郑海刚,姚大全,等. 2016. 郟庐断裂带中段嶂山东侧断裂的活动特征[J]. 地震地质, 38(3): 582 – 595.
- 赵朋,姚大全,杨源源,等. 2017. 郟庐断裂带安徽浮山段晚第四纪以来活动新发现[J]. 地震地质, 39(5): 889 – 903.
- 郑颖平,杨晓平,疏鹏,等. 2020. 合肥盆地中郟庐断裂带西支乌云山—合肥断裂最新活动特征[J]. 地震地质, 42(1): 50 – 64.
- 朱光,牛漫兰,刘国生,等. 2005. 郟庐断裂带肥东段走滑运动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年[J]. 地质学报, (3): 303 – 316.

Geometric Distribution and Structural Characteristics in Wuhe Segment of the Tanlu Fault

LI Pengfei, SHU Peng, LU Shuo, YANG Yuanyuan, FANG Lianghao

(Anhui Earthquake Agency, Anhui Hefei 230031, China)

Abstract: Wuhe area is located at the junction of the North China plate and the Yangtze plate, and the overall geological structure is complex. Based on the existing research results, this paper studies the geometric distribution and activity characteristics of the main faults in the study area by means of high-resolution satellite image interpretation, field geological and geomorphic survey and shallow earthquake detection. The results show that the Tanlu fault in the area is composed of four nearly parallel faults. From west to East, they are Wuyunshan Hefei fault, Sangjianzi Guanghanqiao fault, Chihe Xishanyi fault and Outang Qingshuijian fault. Among them, the structural and geomorphic linear characteristics of Chihe Xishanyi fault are obvious. The latest active age in the North section of Huaihe River is late pleistocene, with strong activity. Wuyunshan Hefei fault, Sangjianzi Guanghanqiao fault and Outang Qingshuijian fault are developed in bedrock mountain, and no faulted quaternary section is found.

Keywords: Wuhe area; Tanlu fault zone; geometric distribution; activity characteristics

基于CAP方法的2019年湖北应城 M_s 4.9地震震源机制与发震构造研究

赵凌云^{1,2,3}, 丁文秀^{1,2,3}, 周舟^{1,2,3}, 周本伟^{1,2,3}
何凯^{1,2,3}, 申学林^{1,2,3}, 魏贵春^{1,2,3}

(1. 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 湖北 武汉 430071;
2. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430071;
3. 三峡工程生态与环境监测系统地震监测重点站, 湖北 武汉 430071)

摘要:利用湖北区域台网8个台站的宽频带数字地震记录,采用CAP法反演了湖北应城2019年12月26日 M_s 4.9(M_L 5.3)地震震源机制解。其最佳双力偶解:节面I走向 49° ,倾角 78° ,滑动角 162° ;节面II走向 143° ,倾角 72° ,滑动角 13° ;主压应力P轴近EW向;主张应力轴近NS向;最佳震源深度约8.0 km。其最大余震为2020年1月8日 M_s 2.6(M_L 3.3)地震,余震序列呈NW分布。分析结果认为:此次地震由带有逆冲成分的走滑型断层错动造成,节面II为发震断层且与皂市断裂有关。

关键词:应城 M_s 4.9地震;震源机制解;CAP法(Cut and Paste Method);地震构造

中图分类号:P315 文献标识码:B 文章编号:1001-8115(2022)03-0020-04

DOI:10.13716/j.cnki.1001-8115.2022.03.004

2019年12月26日18时36分在湖北应城发生了 M_s 4.9(M_L 5.3)地震。地震发生之后,震中附近地区余震相对较少,截止到2020年3月30日,共记录到11次 $M_L > 0.0$ 地震(图1),其中, M_L 1.0~1.9地震1次, M_L 2.0~2.9地震9次, M_L 3.0~3.9地震1次,最大余震为2020年1月8日1时23分应城 M_L 3.3地震,此次余震位于主震 M_s 4.9(M_L 5.3)的SE方向3.8 km处,另外9次 $M_L \geq 2.0$ 余震均发生在主震东南部。在此次地震震中30 km内曾经发生过1960年2月5日 M_s 4.1(M_L 4.6)地震。震区及其周边区域地质构造复杂,震中附近最近断裂为皂市断裂,该断裂北起京山天王寨,以NNW向南延,经汤池,在皂市东截接潜北断裂之后,继续以SSW方向延伸,最后隐伏于白垩系-第四系之下(曹家敏等,1994)。该断裂北东段发育于古近系砖红、褐红色砂砾岩、粘土岩、砂岩和寒武系灰色厚层、巨厚层结晶灰岩、白云岩之间,断面走向NNW,倾向NEE,倾角 60° ,且上缓下陡,断裂带上的白垩系以粗碎裂岩为主;寒武系以巨大的断层角砾岩为特征,各处宽度不等。主断面上多处可见到厚度20~30 cm的片理化构造岩和厚度不一的断层泥(刘锁旺等,1994)。中生代中期随州-应城推覆体向南推挤,该断裂两盘产生左形走滑运动;晚白垩开始拉张,成为云梦-应城盆地的西界;第四纪以来断裂上盘具有走滑特点,富水左岸支流经过断裂时多数显示右行走滑特征;玉泉寨有低温泉水溢出;中段和潜北断裂交汇部位东侧于1630年夏发生过 M_s 5.0地震和7~8次 $3 > M \geq 2.0$ 微震(徐杰等,1991)。

“CAP”(Cut and Paste)方法是将宽频带地震记录分成波形Pnl波和面波两个部分进行反演,在适当的

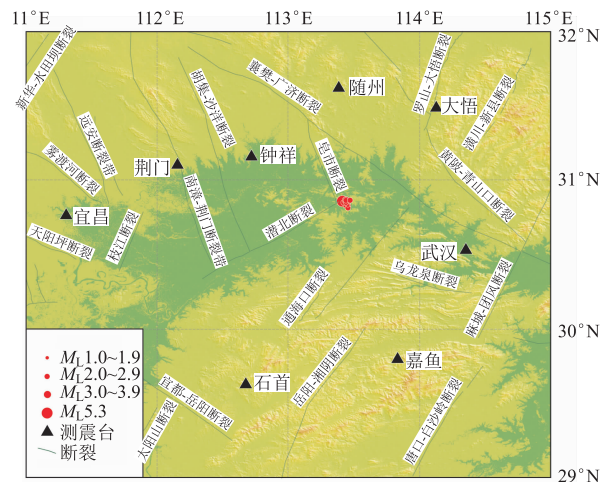


图1 震中区附近的断裂与参与CAP计算的台站分布

收稿日期:2022-02-28;修回日期:2022-04-14

基金项目:中国长江三峡集团有限公司专项(0799216)和中国地震局测震三结合项目(3JH-202201038)联合资助。

作者简介:赵凌云(1981-),女,汉族,山西五寨县人,工程师,主要从事地震活动性方面研究。E-mail:zhaolingyun002@126.com.

时间变化范围内搜索出理论地震波形和观测地震波形全局拟合误差最小的反演震源机制解的方法 (Zhao et al,1994;Tan et al,2006;Zhu et al,1996,2006)。该方法的优点是反演结果对速度模型和地壳横向变化的依赖性相对较小,且对震源深度有较好的约束。因此本文拟采用CAP方法反演应城 $M_s4.9$ 地震的震源机制解,并结合区域地质背景和地震序列的分布等来判断此次地震的可能发震机理。

1 资料选取

1.1 观测台站

为了提高震源机制结果可靠性,综合考虑台站的震中距和方位角等因素,我们选取湖北台网8个观测质量较好、连续率较高的台站(图1)参与计算。

1.2 地壳速度模型

选取的研究区地壳模型见表1,从地表到40 km深度处共分为8层,建立初始模型计算理论格林函数。该区地壳的明显特征是在14~21 km处存在一低速层,这一结果在不同人工地震测深剖面或研究成果中均有体现(张爱民等,2006)。

表1 湖北应城地区地壳速度模型

序号	深度 /km	V_P /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_S /($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_P/V_S
1	0.0 ~ <4.0	5.04	2.99	1.71
2	4.0 ~ <6.0	5.40	3.00	1.85
3	6.0 ~ <10.0	5.76	3.32	1.74
4	10.0 ~ <14.0	5.88	3.35	1.76
5	14.0 ~ <21.0	5.76	3.32	1.74
6	21.0 ~ <25.0	6.54	3.70	1.73
7	25.0 ~ <35.0	6.83	3.90	1.64
8	35.0 ~ 40.0	7.47	4.27	1.76

2 震源机制结果与分析

2.1 CAP方法计算结果

在反演过程中,将理论波形和观测波形的Pnl部分(0.05~0.2 Hz)和Sn1部分(0.02~0.05 Hz)进行拟合。在全空间中进行格点搜索震源参数,搜索得到不同深度上的震源机制和误差(黄建平等,2009)。调整计算参数,使得波形能够较好地吻合观测数据,得到最佳的震源机制解(吕坚等,2009),其最佳双力偶解:节面I走向 49° ,倾角 78° ,滑动角 162° ;节面II走向 143° ,倾角 72° ,滑动角 13° 。

震源深度始终是一个较难确定的参数。地震目录中给定的深度可能与实际重新定位或震源机制反演的深度存在较大的差异。图2a是由表1中的速度模型得出来的震源机制解波形拟合结果,从图2a中得知超过四分之三的台站拟合相关系数高于80%,表明理论波形与实际波形具有较好的拟合关系,结果稳定、可靠。图2b是误差随着深度的分布,从图2b可以看出震源深度的变化对震源机制的影响不明显。根据误差最小判定原则,本次地震事件的最佳震源深度为8 km左右。

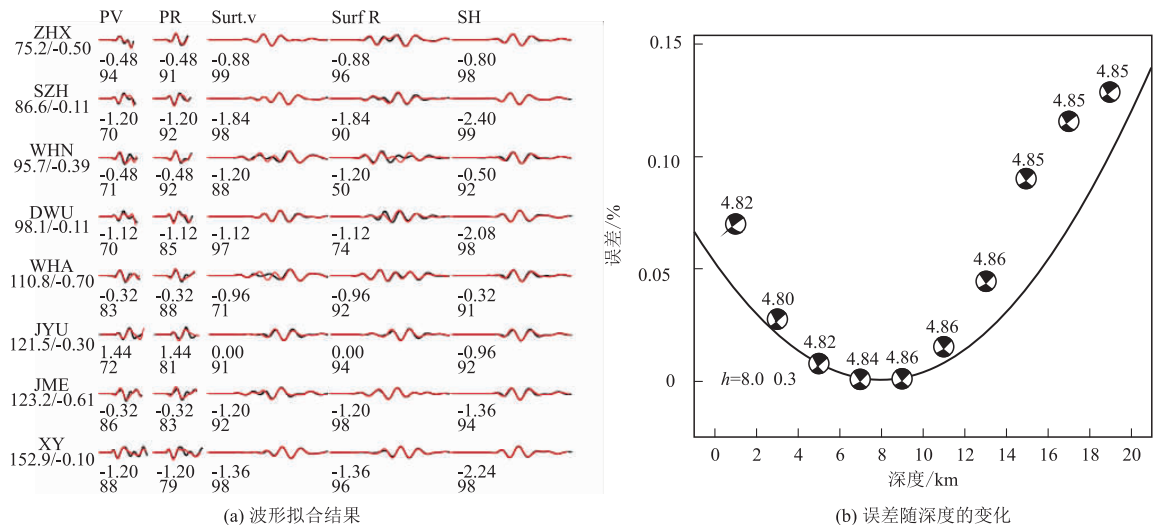


图2 0~20 km各深度处CAP方法计算的震源机制解及误差分布

2.2 与 FOCMEC 以及 KIWI 计算结果的对比

表 2 为不同方法计算出的 2019 年 12 月 26 日湖北应城 $M_s4.9$ ($M_L5.3$) 地震的震源机制解,根据表 2 分析认为,此次地震由带有逆冲成分的走滑性质断层活动造成,主压应力 P 轴为近东西向,主张应力轴为近南北向(杨云存等,2021)。另外用 104 个台站初动符号及利用 FOCMEC 方法计算的震源机制结果见图 3a。可见两种方法的结果很相近,进一步支持本文的 CAP 计算结果。其中节面 II 与皂市断裂走向接近,也符合皂市断裂逆冲推覆体系的构造作用,因此推断发震断层与北西向的皂市断裂活动有关。另外据吴海波等(2021)利用 KIWI 反演的此地震的震源机制解(图 3b)可知两种方法反演结果较接近;破裂性质一致。三种反演方法得出的结果比较接近,从另一个角度也说明了 CAP 反演结果是可靠的。

表 2 湖北应城 $M_s4.9$ 地震的震源机制解

序号	震中位置		震级 / M_s	深度 /km	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		数据来源
	经度 /(°E)	纬度 /(°N)			倾向 /°	走向 /°	滑动角 /°	倾向 /°	走向 /°	滑动角 /°	方位 /°	仰角 /°	方位 /°	仰角 /°	方位 /°	仰角 /°	
1	113.40	30.85	4.9	8.0	78	49	162	72	143	13	96	4	5	21	197	69	CAP 结果
2	113.40	30.85	4.9	7.0	74	52	158	69	148	17	101	4	9	27	198	63	FOCMEC 结果
3	113.40	30.85	4.9	6.0	84	50	150	60	144	6	100	16	3	25	219	60	吴海波等(2021)结果

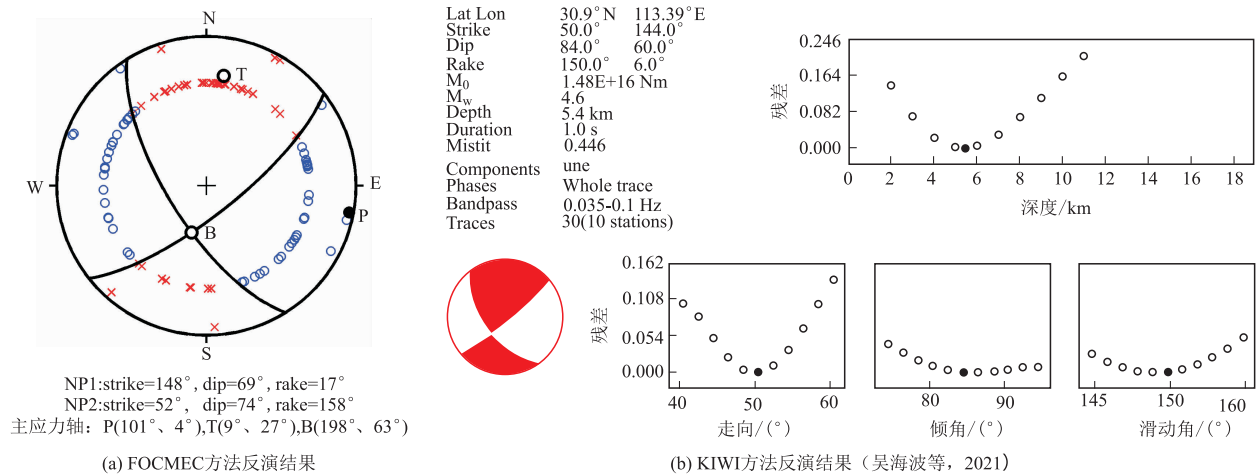


图 3 应城 $M_s4.9$ 地震震源机制解

3 发震构造分析

本文使用表 1 的地壳速度模型,选用最近的 8 个包围较好的台站,采用 HYPO2000 方法对地震序列进行重新定位,得到的结果如表 3,其分布如图 4 所示。

表 3 湖北应城 $M_s4.9$ 地震的余震重定位结果

序号	发震日期	发震时刻	纬度/(°N)	经度/(°E)	震级(M_L)	深度/km	震中
1	2019-12-26	18:36:34	30.85	113.40	5.3	8.0	湖北应城
2	2019-12-26	18:42:56	30.84	113.45	2.9	6.0	湖北应城
3	2019-12-27	06:53:11	30.85	113.44	1.9	8.0	湖北应城
4	2019-12-30	20:10:31	30.85	113.43	2.6	9.0	湖北应城
5	2019-12-31	13:35:02	30.84	113.42	2.3	6.0	湖北应城
6	2020-01-02	06:50:10	30.82	113.45	2.1	5.0	湖北应城
7	2020-01-02	08:44:27	30.85	113.42	2.2	7.0	湖北应城
8	2020-01-08	01:23:34	30.85	113.44	3.3	9.0	湖北应城
9	2020-01-17	03:38:24	30.84	113.45	1.8	6.0	湖北应城
10	2020-01-20	14:14:06	30.85	113.43	2.7	9.0	湖北应城
11	2020-01-21	08:11:42	30.86	113.43	2.4	7.0	湖北应城
12	2020-03-19	14:44:27	30.86	113.46	2.1	8.0	湖北应城

应城 $M_s4.9$ ($M_L5.3$)地震序列集中分布在皂市断裂南段,余震只有11个,位于主震东侧,重新定位后余震呈现NW向分布,余震分布与皂市断裂走向比较接近。地震强震动数据计算结果(图5)显示,应城地震极震区仪器烈度为V度,绝大多数区域为IV度,仪器烈度等震线长轴呈北西走向分布,和计算的震源机制解长轴方位基本一致(李恒等,2020)。

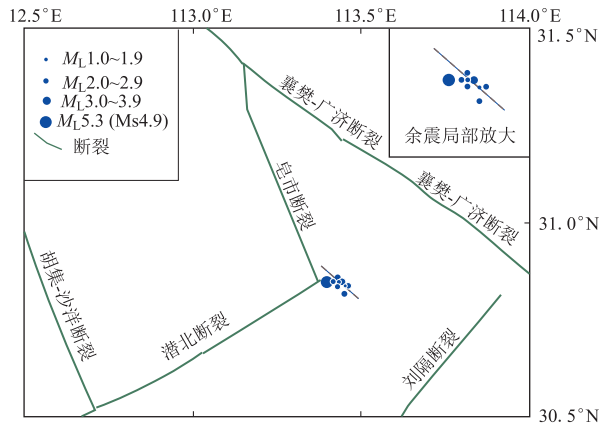


图4 应城 $M_s4.9$ 地震重定位后余震分布

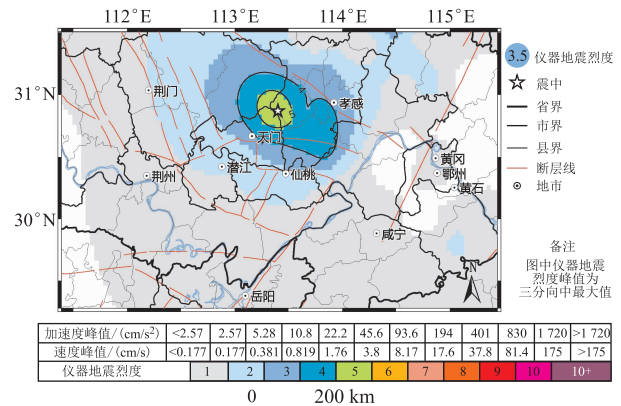


图5 应城 $M_s4.9$ 地震仪器烈度分布

4 结论与讨论

本文利用CAP方法反演了应城 $M_s4.9$ ($M_L5.3$)地震的震源机制解,得出其最佳双力偶解:节面I走向 49° ,倾角 78° ,滑动角 162° ;节面II走向 143° ,倾角 72° ,滑动角 13° ,最佳震源深度在8.0 km附近。该结果与FOCMEC和KIWI方法计算的结果都比较接近。结果分析认为,此次地震为走滑性质断层带有逆冲成分造成,其主压应力近EW向,主张应力轴近NS向。本文利用HOPO2000对余震进行了重新定位,定位后余震呈NW分布,与皂市断裂走向接近,同时应城地震仪器烈度图显示的等震线长轴也呈NW走向,和计算的震源机制解长轴方位基本一致。应城 $M_s4.9$ ($M_L5.3$)地震发生在皂市断裂东南端,节面II走向与皂市断裂相近,破裂方式为走滑带逆冲成分,综合分析认为NW向的皂市断裂作为发震断裂的可能性较大。

参考文献

- 曹家敏,朱介寿,吴德超. 1994. 东秦岭地区的地壳速度结构[J]. 成都理工学院学报,21(1):11-17.
- 黄建平,倪四道,傅容珊,等. 2009. 综合近震及远震波形反演2006文安地震($M_w5.1$)的震源机制解[J]. 地球物理学报,52(1):120-130.
- 刘锁旺,甘家思,李蓉川,等. 1994. 江汉-洞庭盆地的非对称扩张与潜在地震危险性[J]. 地壳形变与地震,14(2):56-66.
- 吕坚,郑勇,倪四道,等. 2008. 2005年11月26日九江-瑞昌 $M_s5.7$ 、 $M_s4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报,51(1):158-164.
- 李恒,雷东宁,范珂显,等. 2020. 湖北应城4.9级地震建筑物震害调查与分析[J]. 大地测量与地球动力学,40(6):332-342.
- 吴海波,陈俊华,王杰,等. 2021. 2019-12-26湖北应城 $M_s4.9$ 地震序列及发震构造讨论[J]. 大地测量与地球动力学,41(4):420-422.
- 徐杰,邓起东,张玉岫,等. 1991. 江汉-洞庭盆地构造特征和地震活动的初步分析[J]. 地震地质,13(4):332-342.
- 杨云存,王华柳,段毅,等. 2021. 云南漾濞 $M6.4$ 地震震源机制解分析[J]. 四川地震,(4):15-17.
- 张爱民,李强. 2006. 双差定位法在三峡库区地震定位中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,26(3):73-77.
- Tan Y, Zhu L, Helmberger DV, et al. 2006. Locating and modeling regional earthquakes with two stations [J]. Locating and modeling regional earthquakes with two stations,111:B01306.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(1):91-104.
- Zhu L, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 86(5):1634-1641.

(下转第27页)

邵武—河源断裂带地震活动特征分析

赖智华

(江西省赣州地震台,江西 赣州 341000)

摘要:根据中国地震台网正式目录结果,通过对1970年以来邵武—河源断裂带地震活动特征分析后认为:NNE向的邵武—河源断裂带与其南段的次一级NW向河源—海丰断裂带相互交汇,与其中段的次一级EW向全南—寻乌断裂带相互交汇,多组断裂的交汇处容易积累应力,造成中强以上地震反复发生;在邵武—河源断裂带上所发生的地震活动具有主—余震型(或震群型)特点;在邵武—河源断裂带上的 $M \geq 4.0$ 及以上地震主要发生在该断裂带南段与次一级NW向河源—海丰断裂交汇处的附近地区,且该断裂带地震活动空间分布明显呈现南段地震活动性强、中段地震活动性较弱和北段地震活动性最弱的特征。

关键词:地震活动特征;闽、赣、粤3省边界;邵武—河源断裂带

中图分类号:P315.7 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-8115(2022)03-0024-04

DOI:10.13716/j.cnki.1001-8115.2022.03.005

江西省南部(简称“赣南”)是江西省主要的地震多发区(钟骏泰,2002),地处华南板块、东南沿海地震带,区内构造断裂纵横交错,主要控制断裂带为邵武—河源断裂带(汤兰荣等,2017)。邵武—河源断裂带是闽、赣、粤3省边界活动性断裂带,北起闽、赣边界的分水关以北,经江西省石城县、瑞金市、会昌县、寻乌县,广东省龙川县至河源市,全长750余千米,宽10余千米,在江西省境内长近400 km,总体走向NNE。邵武—河源断裂带包括3条较大断裂,北段邵武—石城断裂,中段瑞金—寻乌断裂和南段龙川—河源断裂,它们并非首尾衔接,而呈左列式断续排列,3条主断裂明显反映出水平左行扭动的主导性(刘大任,2000)。历史上发生 $M \geq 4.7$ 地震18次,其中 $M 6.0$ 及以上地震2次,即1806年1月1日会昌县 $M 6.0$ 和1962年3月19日河源 $M 6.1$ 地震。1987年8月2日至3日寻乌县相继发生了 $M 5.5$ 和 $M 5.1$ 地震,造成2人死亡,87人受伤,1099间倒塌房屋,危房4461间,中等和轻度破坏房间42921间,倒塌牛栏和厕所775间,毁坏部分公路桥梁等,直接经济损失共计3625万元(赵平顺,2002)。故对邵武—河源断裂带地震活动性进行分析,对指导“赣南”防震减灾工作具有重要意义。

1 邵武—河源断裂带地震活动概况

根据中国地震台网正式目录结果,邵武—河源断裂带在1970年1月1日至2021年10月30日共发生了 $M_L \geq 2.0$ 地震3246次,其中: $M_L 2.0 \sim 2.9$ 地震2882次, $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震331次, $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震26次, $M_L 5.0 \sim 5.9$ 地震7次,最大一次为1987年8月2日江西寻乌县5.5级地震。这期间在邵武—河源断裂带上发生的地震多为 $M_L 2.0 \sim 4.0$ 中小地震。自1987年8月2日在江西寻乌发生5.5级、4.9级、4.8级和4.5级地震群后,该断裂带中强以上地震明显活跃起来,如1989年11月26日广东河源4.5级、1991年9月21日广东河源4.6级、1999年8月20日广东河源4.7级、2012年2月16日广东河源4.7级、2013年2月22日广东河源4.6级等地震。而2014年8月至2021年底,该断裂带未发生中强以上破坏性地震。由表1可见,从1972年至2013年,邵武—河源断裂带共发生17次 $M \geq 4.0$ 地震,其中 $M \geq 5.0$ 地震1次。地震主要分布在瑞金—寻乌和全南—寻乌两断裂带交汇处的江西寻乌以及龙川—河源和佛岗—丰良两断裂带交汇处的广东河源两个地区。

收稿日期:2021-12-28;修回日期:2022-02-11

作者简介:赖智华(1978-),男(汉族),江西安远人,工程师,主要从事地震监测工作。E-mail:504728048@qq.com.

2 邵武—河源断裂带地震序列特征

2.1 时间分布特征

由图1可以看出,邵武—河源断裂带地震活动具有较明显的丛集特征,在1970~1978年、1986~1991年、1997~2005年和2012~2017年时间段 $M \geq 3.0$ 地震活跃,活跃期分别约为8、5、8和5年,且每个活跃期都有 $M \geq 4.5$ 破坏性地震发生。2006~2011年和2018~2020年却没有发生 $M \geq 3.0$ 地震。2021年4月2日广东河源发生了 $M3.8$ 地震,是近4年来邵武—河源断裂带发生的最大一次地震。

2.2 空间分布特征

由图2可以看出,邵武—河源断裂带的地震活动

表1 1972~2014年邵武—河源断裂带地震活动($M \geq 4.0$)

序号	年-月-日	纬度($^{\circ}N$)	经度($^{\circ}E$)	震级(M)
1	1972-12-18	23.77	114.62	4.5
2	1975-07-25	23.73	114.63	4.4
3	1977-05-12	23.73	114.63	4.2
4	1981-05-04	23.72	114.70	4.4
5	1987-08-02	25.03	115.60	5.5
6	1987-08-03	25.03	115.60	4.9
7	1987-08-15	25.07	115.58	4.8
8	1987-09-15	23.77	114.55	4.5
9	1989-11-26	23.75	114.65	4.5
10	1989-11-26	23.73	114.67	4.4
11	1991-09-21	23.73	114.55	4.6
12	1999-03-25	23.73	114.68	4.2
13	1999-08-20	23.75	114.63	4.7
14	2012-02-16	23.95	114.50	4.7
15	2012-08-31	23.82	114.67	4.1
16	2013-02-22	23.90	114.48	4.6
17	2014-07-11	23.92	114.48	4.2

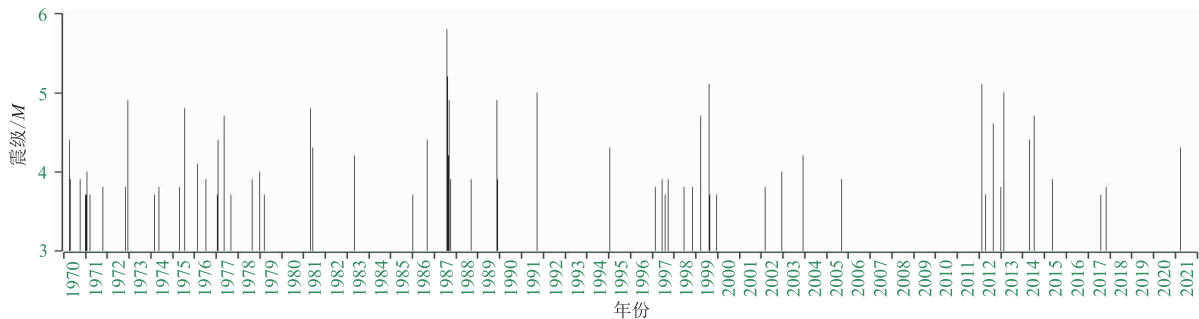


图1 邵武—河源断裂带地震序列 $M-T$ 图($M \geq 3.0$)

空间分布特征明显:南段地震活动性较强,中段地震活动性相对较弱,北段地震活动性最弱。大多数的 $M \geq 4.0$ 地震都集中在南段NNE向龙川—河源断裂附近地区,表明邵武—河源断裂带上地震活动的主体地区为龙川—河源断裂带,即广东河源地区。

3 邵武—河源断裂带地震活动类型

3.1 地震活动类型

通过统计邵武—河源断裂带1972年12月1日至2018年1月22次 $M \geq 3.0$ 地震的活动类型,由表2可知,邵武—河源断裂带的地震活动类型主要分为主-余震型和震群型两类,地震活动主要分布在该断裂南段、中段和两侧次一级断裂上。邵武—河源断裂带周边有NW和EW向次级断裂穿过,

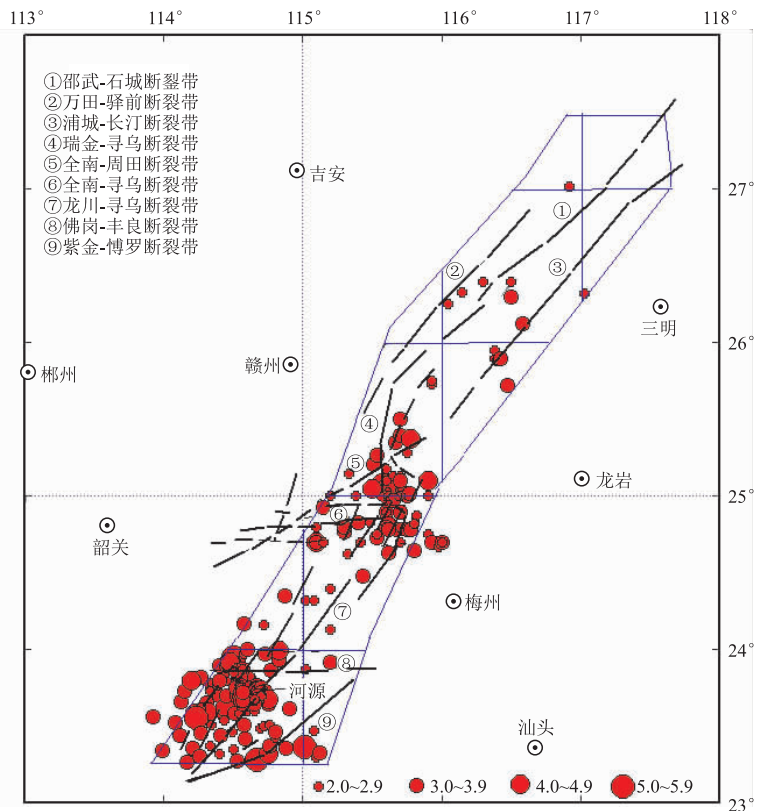


图2 1970~2021年邵武—河源断裂带 $M \geq 2.0$ 地震分布

多组断裂的交汇处容易积累应力,造成中强以上地震反复发生。1987年8月2日江西寻乌5.5级地震具有震群型和非前震序列性质,震区位于该带中段与次一级NW向鸡笼嶂—八尺圩断裂交汇区,主要受周围的NW和NE向断裂的影响而引发地震。

表2 邵武—河源断裂带地震类型统计表($M \geq 3.0$)

年-月-日	纬度(°N)	经度(°E)	震级(M)	参考地点	地震类型	震中位置
1972-12-18	23.77	114.62	4.5	河源新港镇	主-余震型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
1975-07-25	23.73	114.63	4.4	河源新港镇	前-主-余震型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
1977-05-12	23.73	114.63	4.2	河源新港镇	主-余震型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
1979-03-22	24.90	115.84	3.1	寻乌吉潭镇	震群型	该带中段东侧
1981-05-04	23.72	114.70	4.4	河源市区	主-余震型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
1983-05-12	25.00	115.84	3.9	寻乌吉潭镇	孤立型	该带中段东侧,次一级北东向寻乌—武平西支断裂南
1986-01-08	24.90	115.70	3.1	寻乌文峰乡	孤立型	该带中段与东西向全南—寻乌中北支断裂交汇区
1987-08-02	25.03	115.60	5.5	寻乌三标乡	震群型	该带中段与次一级北西向鸡笼嶂—八尺圩断裂交汇区
1987-09-15	23.77	114.55	4.5	河源回龙镇	主-余震型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
1989-11-26	23.75	114.65	4.5	河源东埔镇	震群型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
1991-09-21	23.73	114.55	4.6	河源回龙镇	前-主-余震型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
1995-01-24	25.05	115.50	3.8	寻乌三标乡	前-主-余震型	该带中段,次一级北西向鸡笼嶂—八尺圩断裂西端附近
1999-03-25	23.73	114.68	4.2	河源市区	主-余震型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
1999-08-20	23.75	114.63	4.7	河源新港镇	主-余震型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
2005-09-21	24.78	115.75	3.3	寻乌南桥镇	主-余震型	该带中段与东西向全南—寻乌中南支断裂交汇区
2012-02-16	23.95	114.50	4.7	河源锡场镇	主-余震型	该带南段,次一级北西向河源—海丰断裂西端附近
2012-04-28	25.03	115.67	3.1	寻乌澄江镇	主-余震型	该带中段,次一级北西向鸡笼嶂—八尺圩断裂东侧附近
2012-08-31	23.82	114.67	4.1	河源新港镇	震群型	该带南段与次一级北西向河源—海丰断裂交汇区
2013-02-22	23.90	114.48	4.6	河源锡场镇	主-余震型	该带南段,次一级北西向河源—海丰断裂西端附近
2014-07-11	23.92	114.48	4.2	河源锡场镇	主-余震型	该带南段,次一级北西向河源—海丰断裂西端附近
2017-11-06	24.82	115.62	3.2	寻乌南桥镇	主-余震型	该带中段与东西向全南—寻乌中南支断裂交汇区
2018-01-01	24.78	115.62	3.1	寻乌留车镇	震群型	该带中段与东西向全南—寻乌中南支断裂交汇区

3.2 历史地震

邵武—河源断裂带是东南沿海地震带内孕震构造之一。从公元304年至今,发生过多处 $M \geq 5.0$ 地震,如1804年寻乌长宁5.2级、1806年会昌周田6.0级、1941年寻乌澄江5.7级(谢军等,2003)和1987年寻乌三标5.5级地震。邵武—河源断裂带为5级左右中强地震活动带,大多数历史中强地震发生在该带中段与东西向断裂交汇区。

4 结论

通过对邵武—河源断裂带地震构造背景、历史地震和地震序列活动类型进行分析,得出结论:(1)在邵武—河源断裂带主干上的地震活动基本上具有主-余震型(或震群型)特征,在空间分布上呈现出断裂带南段地震活动性强,中段地震活动性相对较弱,北段地震活动性最弱的特征;(2)在邵武—河源断裂带主干上的 $M \geq 4.0$ 以上的地震主要发生在南段与次一级NW向河源—海丰断裂带交汇区。

参考文献

- 刘大任. 2000. 初论邵武—河源断裂带的活动性[J]. 江西地质, 14(2): 81-87.
- 汤兰荣, 吕坚, 曾新福, 等. 2017. 赣南及邻区的地震活动特征[J]. 华北地震科学, 35(2): 82-83.
- 谢军, 范银飞, 刘斌, 等. 2003. 江西省志[M]. 北京: 方志出版社, 30-45.
- 赵平顺. 2002. 1987年寻乌5.5级地震事件的回顾与启示[J]. 华南地震, 22(4): 89-93.
- 钟骏泰. 2002. 赣南区域地质构造特征与地震分布关系研究[J]. 华南地震, 22(4): 45-46.

Analysis on the Characteristics of Seismicity in the Shaowu-Heyuan Fault Zone

LAI Zhihua

(Ganzhou Seismic Station, Jiangxi Ganzhou 341000, China)

Abstract: Based on analysis of the seismicity of the Shaowu-Heyuan fault zone since 1970, we suggest that this NNE-trending fault zone intersects with the secondary NW-trending Heyuan-Haifeng fault zone in the south. Moreover, the fault zone intersects with the secondary EW-trending Quannan-Xunwu fault zone in the middle. The aforementioned fault intersections indicate a potential seismic risk area for repeated moderate and strong earthquakes. The seismicity in the Shaowu-Heyuan fault zone shows the characteristics of a main-aftershock type (or an earthquake swarm type). Earthquakes with magnitude $M \geq 4.0$ in the Shaowu-Heyuan fault zone mainly occurred near the intersections of the two sections. The spatial distribution of the seismicity in the fault zone is obvious, which shows the characteristics of strong seismicity along the southern section, whereas seismicity along the middle and northern sections decreases gradually.

Keywords: characteristics of seismicity; Fujian, Jiangxi, and Guangdong borders; the Shaowu-Heyuan fault

(上接第 23 页)

Zhu L, Tan Y, Helmberger D V, Saikia C K. 2006. Calibration of the Tibetan Plateau using regional seismic waveforms [J]. Pure and Applied Geophysics, 163(7):1193 – 1213.

Focal Mechanism Solution and Seismogenic Structure of the M_S 4.9 Yingcheng Earthquake in 2019 from the CAP Method

ZHAO Lingyun^{1,2,3}, DING Wenxiu^{1,2,3}, ZHOU Zhou^{1,2,3}, ZHOU Benwei^{1,2,3},
HE Kai^{1,2,3}, SHEN Xuelin^{1,2,3}, WEI Guichun^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Hubei Wuhan 430071, China;

2. Hubei Earthquake Agency, Hubei Wuhan 430071, China;

3. Key Seismic Monitoring Station of the Three Gorges Project Ecological and Environmental Monitoring System, Hubei Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the broadband digital seismic records from 9 stations in Hubei and Henan province, we used the CAP method to invert the focal mechanism of the M_S 4.9 earthquake on December 26, 2019 in Yingcheng, Hubei province. The optimal double coupling solution presents that the first nodal plane shows the strike at 49° , dip at 78° , and rake at 162° , whereas the second nodal plane shows the strike at 143° , dip at 72° and rake at 12.6° . The optimal hypocenter depth is concentrated at approximately 8.0 km. The results show that the earthquake occurred on a strike – slip fault with thrust component. The axis of major compressive stress is nearly EW direction, whereas the axis of major tensile stress is nearly NS direction. The largest aftershock was the M_S 2.6 earthquake near the epicenter on January 8, 2020. The main aftershock sequence is distributed in NW direction. We suggest that the seismogenic fault is related to the Zaoshi fault.

Keywords: the Yingcheng M_S 4.9 earthquake; focal mechanism; CAP method (Cut and Paste Method); seismogenic structure

地震应急值班信息即时编发系统设计与实现

曾维祖, 杨力, 晋云霞, 黄新茹, 潘勇杰, 张力文
(四川省地震局, 四川成都 610041)

摘要:基于 Python3.8.10 开发环境, 利用 GUI 设计工具(PyQt5.15.4), 研发了一套地震应急值班信息即时编发系统。该系统结合网络爬虫、自然语言处理、科学计算相关算法, 通过自动提取关键地震信息, 利用 Haversine 公式计算出震中与主要市县距离, 绘制辅助图件, 按照现有上行报送信息规范自动生成地震应急值班信息。自 2021 年 4 月在四川省地震局实际应用以来, 已有效应对地震事件 70 次, 有效地减少了地震发生后编报上行地震应急值班信息时的人为失误, 简化信息编发过程, 提高震后信息编发工作效率。

关键词:地震应急; 信息编发; 系统设计; 自动化产出

中图分类号: P315-39 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-8115(2022)03-0028-05

DOI: 10.13716/j.cnki.1001-8115.2022.03.006

四川是一个多强震省份, 2017 年 1 月 1 日至 2022 年 6 月 14 日共发生 4.0 级以上地震 88 次。根据四川省地震局应急响应预案, 将地震灾害事件等级应急处置工作分为 I—IV 级响应, 而地震应急值班工作作为应急处置流程中的重要环节, 如何为政府提供更精准、更具时效性的应急信息产品, 从而辅助政府决策、减轻地震事件影响、提升地震部门公共服务能力是当前地震应急工作中的重要研究课题(邵永谦等, 2020)。目前, 四川省地震局总值班室应急信息产品产出主要依靠值班员在地震事件发生后手动采编地震事件信息, 并向政府相关部门上报地震信息。在震情信息文稿撰写过程中, 由于地震事件具有突发性, 发生时间、地点无明显规律, 无法提前准备相关工作, 并且上行信息中关键内容较多, 规定严谨, 单纯依靠人为编写应急值班信息, 费时费力、且容易因人为疏忽而导致严重错误, 进而造成恶劣影响。若地震信息采编工作由网络和计算机通过相关程序自动完成, 无疑是科学而有效的, 这样既可满足政府对信息获取的时效性要求, 又可减轻值班人员的工作量, 提高应急值班工作整体效率(奚冲霄等, 2019)。其他行业部门已经有关于上行信息编发系统的设计研究(张洪卫等, 2002; 刘继敏等, 2007)。地震系统在 1998 年有学者针对地震信息服务的工作程序提出设想(吴忠良, 1998), 而后福建省地震局于 2004 年采用 C 语言与 UNIX 系统实现数字地震台网地震速报信息发布程序(廖诗荣等, 2004), 此后相关研究机构通过不同方式实现地震速报信息的快速编发, 如中国地震台网中心的国家地震台网地震速报综合信息发布系统采用了实时地震数据与 WebGIS 服务实现通过网络为用户提供快速服务(侯建民等, 2009); 江西省地震局通过 MATLAB7 与基于 web 的 Google 地图服务开发了地震速报信息发送软件(曾文敬等, 2013); 新疆维吾尔自治区地震局基于新疆地震信息互联网门户网站, 使用网站脚本、EQIM 地震信息共享平台数据库和软件编程技术实现了地震速报信息自动发布(刘平仁等, 2016); 北京市地震局基于 JOPENS 数据处理系统, 利用 C# 和 MySQL 数据库技术设计软件实现了地震速报和地震目录数据服务功能(奚冲霄等, 2019), 另外针对非天然地震事件信息发布也设计实现了自动处理软件(奚冲霄等, 2021); 上海市地震局采用 JAVAEE 架构设计和开发了上海测震台网业务自动化产出系统(邵永谦等, 2020)。本研究结合四川省地震局应急值班工作实际流程, 研发实现地震应急值班信息即时编发系统, 为准确快速编发地震应急值班信息、更好地开展地震应急值班工作提供一种可靠工具, 可进一步增强地震应急值班信息产出的准确性及时效性, 提高震情信息发布服务质量, 为上级管理部门快速决策及时部署提供有力依据。

收稿日期: 2022-04-21; **修回日期:** 2022-06-15

基金项目: 四川省地震局地震科技专项(编号: LY2219)。

作者简介: 曾维祖(1995-), 男, 四川成都人, 硕士, 助理工程师, 主要从事地震应急工作. E-mail: george704@foxmail.com.

1 系统设计

1.1 系统总体结构

本文采用 Python3.8.10 作为开发语言,利用 PyQt5.15.4 绘制图形用户界面,设计的地震应急值班信息即时编发系统如图 1 所示。考虑到四川省地震应急值班工作流程,系统采用中国地震台网中心开发的一款基于微信企业号的地震信息自动推送平台,即“地震信息播报机器人”作为输入信息源,同时系统添加针对适配 12322、四川地震台等正式测定短信信息适配提取规则。为进一步提高地震事件自动监测效率,本系统基于中国地震台网中心“地震信息播报机器人”微信企业号和网页微信实现了对地震事件的实时监测。

本系统可以实现以下两个主要功能:快速生成时效性要求最严格的两期地震应急值班信息;根据震中位置自动计算相关市县及省界距离,同时绘制距离图件辅助解释。系统整体而言,分为菜单栏、模式选择栏、输入参数栏、信息源输入栏、绘图结果显示栏、计算结果显示栏、规范化测距结果显示栏、底部状态栏共八部分(图 1)组成。菜单栏提供打开重要文件位置、工具、日志、帮助及文件夹路径设置功能。输入参数栏根据编发地震应急值班信息审签流程共分为当期信息期号、值班员、值班处长、带班领导四部分,并在不同模式下提供锁定输入功能,保证自动监测模式下内容正常输出。界面下部为结果显示栏,均与距离计算模块有关,分别展示震中与主要城市距离以及震中与四川距离最近县城,并实现格式化输出具体距离。底部状态栏主要显示各重要运算过程节点。系统总体架构图如图 2 所示。

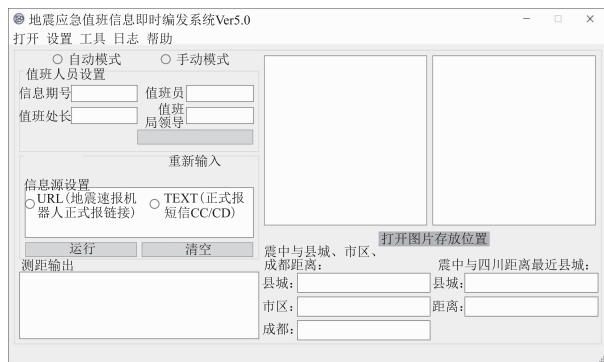


图 1 地震应急值班信息即时编发系统主界面

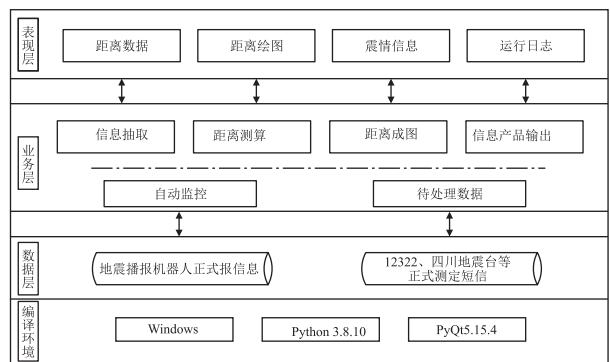


图 2 系统架构设计

1.2 系统流程图

首先值班员通过输入地震事件正式报网页链接、正式测定短信,或通过网页微信实时监控获取地震事件正式报网页链接,再进入系统运行流程(图 3)。自动监测模式下,首先利用 WeChat API 接口实现对中国地震台网中心地震信息播报机器人推送的地震事件进行监控,再根据信息报送规则,识别邻省及本省不同震级的地震事件,对四川 $M > 4.0$ 地震进行后续处理,而不满足条件的地震事件则不处理,回到监控状态,当达到报送规定震级后继续执行下一步程序,最后系统自动提取推送的地震事件正式报网页链接,采用网络爬虫技术定位提取所需关键要素形成结构化信息,根据提取的震中经纬度与各县市经纬度代入式(4)计算得到震中距及震中距主要县市距离,进而实现震情信息、距离数据、图件产品规范输出。而手动模式则采用人工输入地震信息播报机器人正式报或地震事件正式测定短信作为数据源,省去规则匹配步骤,直接对信息源内容

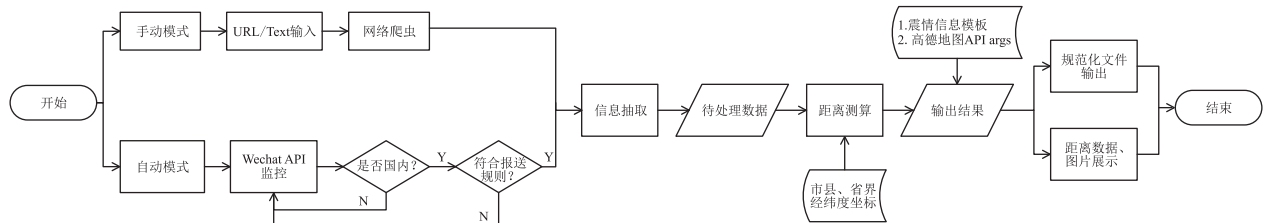


图 3 系统运行流程图

作后续计算处理,最后实现信息、图件产品的规范化输出。

2 系统功能实现

根据系统设计思路,各系统功能按执行顺序分别承担事件监控、信息提取、规则识别、文件输出等功能。考虑到系统的普适性,选择采用不同开发平台的数据、程序接口并严格按照各接口使用规范获取市县经纬度坐标等地图数据以及实现微信数据监控。而地震事件基础数据源采用中国地震台网中心地震信息播报机器人推送地震事件的正式报信息,其中除地震三要素信息外,还有历史地震信息、震中周边市县及与震中距离、震中地质背景等,内容详实,根据不同信息编发模板可选用不同的内容数据,极大地提高了系统维护与更新的普适性与灵活性。

2.1 WeChat API 信息实时监控

采用开源项目 wxpy 库及 itchat 库调用网页微信数据接口,实现对地震信息播报机器人推送信息的实时监控。根据微信推送类型,可分为公众号信息与个人号信息,本系统仅保留公众号信息中地震信息播报机器人所推送地震事件速报及正式报信息,其余信息均被过滤不做保存或使用,信息接收接口均为内置,微信服务器收发数据均为微信内部加密数据,外部不可抓取或调用,减少信息泄露风险。根据规则识别需报送地震事件后,监控模块可直接利用该条正式报信息链接做进一步信息提取或数据计算。WeChat API 信息实时监控模块输入:期号等预输入参数、登录 Web WeChat;输出:符合报送规定的地震事件正式报链接 URL。

2.2 距离计算

由于数据源所提供距离信息不满足实际应急值班工作需求,存在部分地震事件缺失距离信息的情况,且以往多采用手动测定的方式求取距离,时效性有所欠缺,故本系统编写距离计算模块用于自动计算所需关键距离信息。本系统通过两地经纬度计算距离,使用 Haversine(半正矢)公式来做距离计算。半正矢在三角函数中,称 $(1 - \cos\alpha)/2$ 为角 α 的半正矢,记作 $\text{hav}\alpha$ 。对于球面上任意两点,圆心角的半正矢值可以通过式(1)计算:

$$\text{hav}\left(\frac{d}{r}\right) = \text{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\text{hav}(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (1)$$

$$\text{hav}(\theta) = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{1 - \cos(\theta)}{2} \quad (2)$$

式中: d 为两点间的距离; r 为球半径; φ_1 、 φ_2 为两点对应的纬度; λ_1 、 λ_2 为两点对应的经度; d/r 为圆心角,以弧度制度量。通过反正切函数解出 d :

$$d = r * \text{archav}(h) = 2r * \arcsin(\sqrt{h}), h = \text{hav}\left(\frac{d}{r}\right) \quad (3)$$

代入可得:

$$\begin{aligned} d &= 2r * \arcsin\left(\sqrt{\text{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\text{hav}(\lambda_2 - \lambda_1)}\right) \\ &= 2r * \arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) + \cos(\varphi_1)\cos(\varphi_2)\sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

计算时取地球半径为 6 371. 004 km。各县市经纬度通过高德地图开发者平台 API 接口获取,默认为政府驻地经纬度坐标。经过多次使用测算,系统测算的距离结果与中国地震台网中心地震事件正式报的距离结果是一致的,误差约为 0. 26%。

2.3 文档生成

四川省地震局总值班室承担着把震情信息报送至不同行政管理部门的任务,各期地震信息均以基本固定内容的 Word 文档进行上报。在梳理了不同期数地震信息后,针对时效性要求最为严格的前两期地震信息,预设对应的震情信息模板,通过计算机程序提取、计算关键信息,完成模板文件的填充渲染。类似于采用 Word 文档书签生成模板文档(阎楷,2010),本系统使用 python 开源项目 docxtpl 库编写,该库包含两个主要库:python - docx 与 Jinja2。前者用于利用 python 语言操作 docx 文件(读、写、新建),后者为 Python 的功能齐

全的通用模板语言(模板引擎、模板系统),其具备完整的 unicode 支持。使用占位变量的模板文件在经过动态赋值后输出对应预期文件,可近似看作一个文档渲染的过程。系统对四川省地震局应急值班信息进行了 Jinja2 语法改写,对发震时间、震级、经纬度、距离等 22 个位置做了占位处理,形成两期震情信息模板。作为模板系统 Jinja2 还提供了独特的语法系统用以实现控制结构、表达式、过滤器等功能。模板中的特殊占位符允许编写类似于 Python 语法的代码,相较于 Word 文档的书签功能,Jinja2 得益于控制结构、表达式等功能,在模板编辑渲染、图像处理等方面更加灵活,整体运行性能和模板可读性良好,因此非专业人员亦可对模板按需做简要修改。

系统运行过程中获取到对应变量后,即可对模板文件进行统一填充渲染,并自动生成以“月-日-时-分-震中位置-震级”为名的文件夹,内含两期值班信息与两张距离图件。经测试,在系统运行得到所有占位变量后,实际动态赋值渲染操作用时约 0.285 s,其效率已满足实际工作所需。

3 系统应用

四川省地震局应急响应预案对省内及省外地震事件有着不同的处理规则,为此本系统在设计时针对省内外地震事件处理时略有区别,其区别主要体现在省内外地震事件处理时所绘制的距离图件有所不同,对于省外地震事件而言,系统绘制震中与四川省界最近距离、与四川省最近县市距离,以及震中与成都市距离;对于省内地震事件而言,系统绘制震中与周边县市距离,以及与成都市距离。所绘制图件主要用于辅助解释说明,以备值班员更好地应对上级行政管理部门的问询。

以 2022 年 6 月 1 日 17 时四川省雅安市芦山县 6.1 级地震为例,在值班时,预输入信息编发期数及人员,待地震事件发生后通过输入短信、正式报链接或使用网页微信监控“地震信息播报机器人”消息推送,系统开始运行,提取关键要素、计算距离,最后显示运行结果(图 4)、绘制距离图件、输出前两期地震应急值班信息(图 5)。系统能够输出两种不同来源的格式化距离输出结果:1)地震信息播报机器人中周边市县距离信息(若存在,在文档生成过程中由红色字体突出显示);2)系统测算出的主要市县距离信息。系统计算出的距离结果与中国地震台网中心发布的距离结果基本一致,当地震信息播报机器人无距离推送时,系统计算的结果可做有效替代,同时系统提供地震事件震中与四川省界、四川最近县市、成都市距离,实际应用上更加符合四川省地震局地震应急响应预案所划分的应急响应处置流程。除上述系统描述与说明外,系统设计与



图 4 系统运行结果界面

实现时使用多线程方式提高整体计算效率。当数据源中含有距离信息时输出结果中将会保留系统计算结果与数据源中提供的距离信息,可供使用人员按需删改。



图5 系统输出文档结果

经过多次地震事件实际使用测试,人工编发信息所用时间为7~10 min,系统自动监测模式生成信息用时在2~5 s,手动模式用时10~15 s,且信息提取、距离计算准确,说明使用本系统能够极大地提高地震应急值班信息编发效率,减少人为疏忽造成的遗漏与错误。

4 结束语

开发的四川省地震局地震应急值班信息即时编发系统,集成了数据快速提取、距离快速计算、模板自动填充、规则识别、自动监测等功能,实现了15~20 s内地震应急值班信息快速规范地编发。相较于传统手工填报方法,极大地提升了工作效率,有效地避免了人为导致的震中位置经纬度、地名输入错误等问题。地震应急值班信息即时编发系统在经过多个版本完善迭代后,已经应用于实际地震应急值班工作中,且取得了良好的应用效果。自2021年4月以来,系统测试与实际部署运行期间,截至2022年6月共有效应对地震事件70次,其中2021年56次、2022年14次,值班员均能在接收到地震事件正式测定信息后2 min内无差错自动产出相应的结果,满足了上级行政管理部门对值班工作的各项要求。随着应急值班工作规则的修订,系统的修改与优化可以快速适配新要求、新规则,具备较强通用性。下一步将着力于系统外部数据更新与维护、行业内部EQIM数据接入等多个方面的更新升级,争取进一步填补突发地震事件后信息填报自动化的空白。

参考文献

- 侯建民,黄志斌,代光辉,等. 2009. 国家台网地震速报综合信息发布系统研究[J]. 中国地震,25(4):445-454.
- 廖诗荣,陈懿德,洪星. 2004. 福建数字地震台网地震速报信息发布程序[J]. 地震地磁观测与研究,25(增刊):28-32.
- 刘继敏,王玮,孔凡忠. 2007. 灾害性天气预警信息即时编发系统[J]. 山东气象,27(3):36-38.
- 刘平仁,秦新春,孙铭萱. 2016. 地震速报信息在新疆地震信息网的自动发布[J]. 高原地震,28(3):53-58.
- 邵永谦,毕波,于海英. 2020. 上海测震台网自动化产出系统设计与应用[J]. 软件导刊,19(8):165-168.
- 吴忠良. 1998. 渐近式地震速报和地震信息服务的工作程序设想[J]. 地震地磁观测与研究,19(5):2-7.
- 奚冲霄,白永福,辛雪侠,等. 2019. 北京市测震台网地震速报信息服务系统[J]. 地震地磁观测与研究,40(3):138-147.
- 奚冲霄,李春连,辛雪侠. 2021. 北京市地震局非天然地震事件信息发布服务[J]. 地震地磁观测与研究,42(增刊):215-217.
- 阎楷. 2010. 地震信息上报的计算机快速处理方法[J]. 防灾科技学院学报,12(1):58-68.
- 曾文敬,肖健,赵爱平,等. 2013. 江西省地震局地震速报信息发送软件介绍[J]. 高原地震,25(1):46-48.
- 张洪卫,刘晋生,张立清,等. 2002. WINDOWS环境下的上行气象信息编发系统[J]. 山东气象,22(4):24.

(下转第47页)

盐城台地磁观测干扰特征分析

郭灏明

(江苏省盐城地震台,江苏 盐城 224005)

摘要:以盐城台地磁观测为例,具体分析了地磁观测中的各类干扰因素及其记录的形态特征。结果表明,盐城台地磁观测受到的干扰因素主要有磁暴、高压直流电、噪声、车辆和基建等,干扰形态主要表现为单点突跳、多点突跳和突跳台阶等。通过分析盐城台地磁观测中常见干扰因素及其形态变化特征,可以有效排除观测数据中的可控干扰源,为识别地震前兆异常提供保障。

关键词:盐城地震台;地磁观测;FHD地磁仪;干扰识别

中图分类号:P315.7 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-8115(2022)03-0033-07

DOI:10.13716/j.cnki.1001-8115.2022.03.007

地磁观测是一种重要的地球物理观测手段,其不仅为地震预报服务,同时也是地磁学科和其他相关学科研究的基础。然而,随着经济的发展,城市化进程的加快,基础设施的不断完善,地磁的观测环境却在日趋恶化。国内相关人员研究发现,地磁观测数据的干扰种类主要有磁暴、高压直流输电、车辆、建设施工、噪声等(张英杰等,2017)。因此,在日常观测过程中正确识别各种干扰因素的特征,做好数据预处理工作,不仅可以提高观测数据质量,还可以为识别地震前兆异常提供保障。本文以盐城地震台为例,结合日常工作,分析总结地磁观测中的各类干扰因素及其记录形态特征,为日后数据预处理提供参考。

1 观测台站概况

盐城地震台为江苏省省属地震台站,位于江苏省东部盐城市龙冈镇果林场内,台基坐落在第四纪沉积层上,处在南黄海地震活动带边缘。台站及邻近地区地震地质构造比较复杂,苏北—南黄海拗陷区受到不同地质时期的构造运动作用,形成了一系列级别不等的活动断裂。主要断裂构造有NE向的淮阴—响水断裂、洪泽—沟墩断裂和盐城—南洋岸断裂等,NW向的苏北滨海大断裂、沟墩断裂等,全部隐伏在沉积层之下。盐城台地磁观测场地位于台站内部,观测场地磁场平均梯度小于2 nT/m,采用数字化FHD-2B型质子磁力仪进行日常观测。

2 干扰因素分析

2.1 磁暴干扰

太阳表面活动旺盛时,尤其是太阳黑子极大期,太阳表面耀斑爆发次数增加,耀斑爆发时辐射出X射线、紫外线、可见光、高能质子束和电子束,带电粒子形成的电流冲击地球地磁场,导致地球磁场的强度和方向发生急剧变化,这种现象称之为磁暴。磁暴发生时,各个地磁观测分量同时受到干扰,水平分量、磁偏角变化明显,且开始时间和结束时间同步。盐城台FHD-2B记录到2021年5月12日磁暴干扰期间分钟值曲线形态(见图1),干扰期间地磁各分量变化剧烈,尤以D和H分量波动明显,出现明显突跳。因磁暴具有偶然性、全球性等特点,可通过多台对比判定,因此对于受磁暴干扰时段的数据不需做预处理。

2.2 高压直流电干扰

经研究表明高压直流输电线路能对其两侧数百千米内地磁观测产生影响,全国许多地磁台站都不同程度

收稿日期:2022-02-22;修回日期:2022-03-04

作者简介:郭灏明(1989-),男,江苏南京人,助理工程师,主要从事台站观测和地震分析预报工作. E-mail: guohaoming1989@163.com.

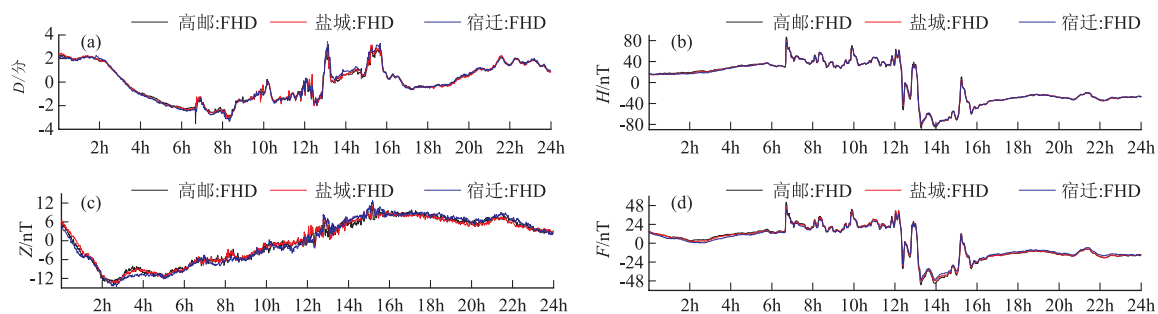


图1 2021年5月12日盐城台地磁受磁暴干扰记录曲线

度受到干扰,具体表现为当换流站发生不平衡电流或者高压线路上产生感应电流时导致地磁产生突跳性变化(蒋延林等,2014)。供电部门对高压直流线路的调试具有随机性,且造成的干扰不可避免,因此台站需准确判别其干扰形态并采用正确手段进行预处理,目前地磁台网高压直流输电判别处理系统为一线台站人员提供了参考标准。

经长期调查总结发现,影响盐城台地磁观测的高压直流电线路有7条,分别为葛上线、三上线、三常线、锦苏线、锡泰线、昌宣线及溪浙线,其中锡泰线距离盐城台最近,干扰幅度最大,影响范围为0.1~14 nT(见图2)。高压直流电对地磁观测数据造成的影响具有时域特征,即同一条干扰线路的同一个干扰事件对线路两边的地磁台站观测造成的干扰会同步发生、方向及幅度特征表现为在导线的两边产生的磁场方向相反,与输电线路距离台站的距离成反比(杨学慧等,2020)。盐城台与淮安台、高邮台分别位于锡泰线两侧,通过对比2020年5月31日地磁观测时域记录数据(见图3)发现,三个台站干扰时段同步,同侧台站干扰形态方向一致、异侧台站干扰形态方向相反,且距离线路越近,影响幅度越大。高压直流电对地磁观测的影响主要

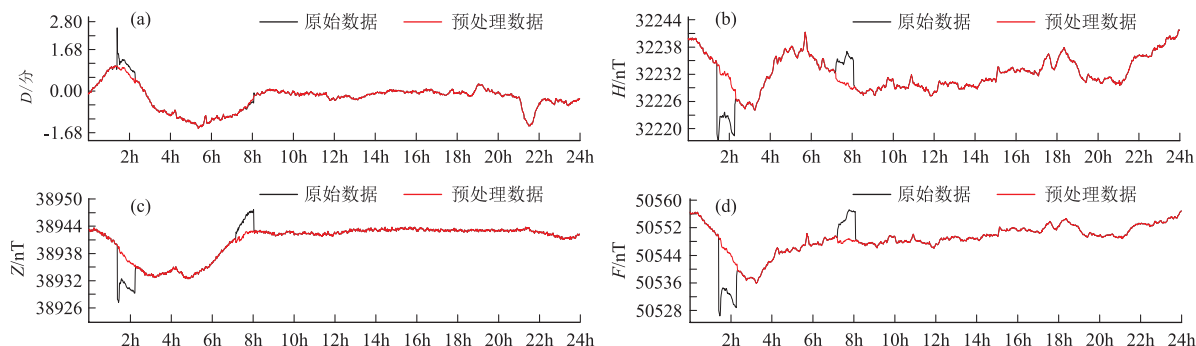


图2 2021年1月7日盐城台地磁受锡泰线高压直流输电干扰曲线

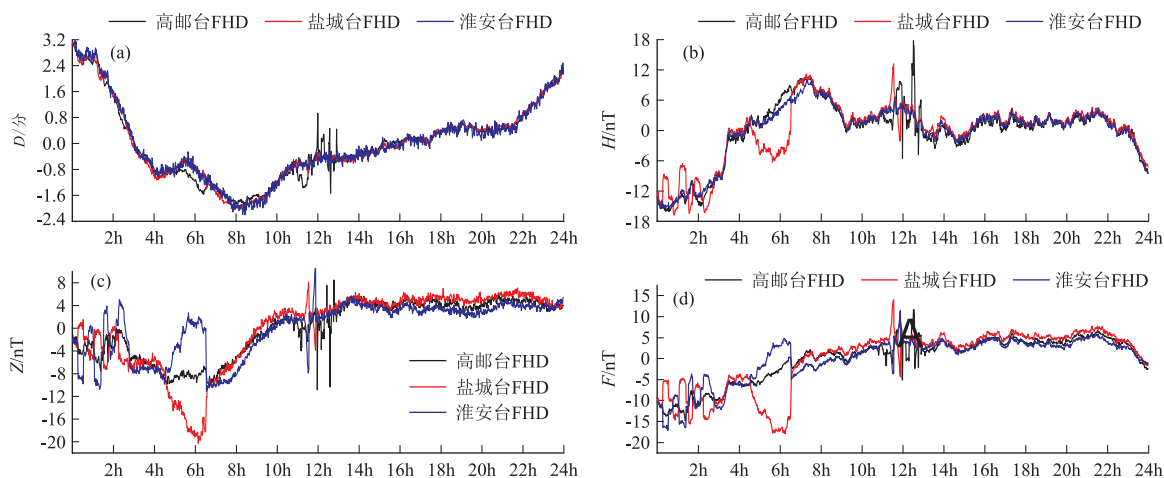


图3 2020年5月31日锡泰线东侧盐城台与锡泰线西侧淮安台和高邮台地磁受高压直流输电干扰曲线

体现在 Z 分量上, D 分量次之, H 分量最为轻微, 干扰形态主要表现为台阶。以 2021 年 2 月 2 日和 2021 年 5 月 26 日的地磁观测数据为例, 台阶的形态主要有两种: 直起直落或起落缓变时间短台“方波”状台阶和缓变连续的弧形或 U 型台阶(见图 4)。同一事件、同一时间段内常见多种形态台阶或台阶嵌套, 无论哪种形态, 确定缓变起始时间都有一定难度, 日常处理须在参考地磁台网高压直流输电判别处理系统的基础上, 辅助人工判定才能对观测数据进行正确预处理。

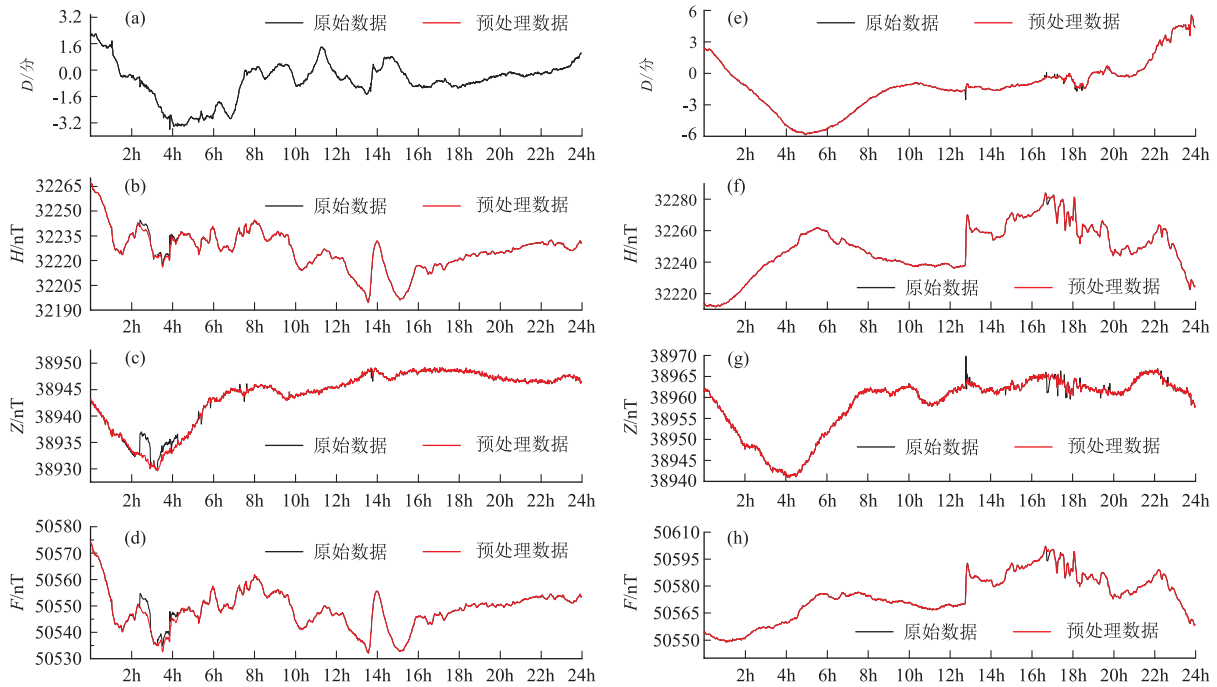


图 4 2021 年 2 月 2 日(a、b、c、d)和 2021 年 5 月 26 日(e、f、g、h)盐城台受高压直流输电干扰曲线

2.3 观测噪声干扰

地磁观测噪声干扰主要是由于观测环境背景噪声、仪器工作参数偏离、信号线较长产生的涡流电流影响、交流干扰和集成干扰等造成的(陈贤等,2020)。根据国家地磁台网中心网站发布的计算噪声方法,通过计算发现盐城台 2019 年 10 月至 2020 年 6 月地磁数据背景噪声偏大(见表 1 中 2020 年 7 月之前的数据),对观测数据的精度产生一定影响。为解决分量噪声偏大的问题,盐城台与生产厂方进行联系排查,在测试中发现,仪器的接地线不好,导致信号衰减,从而背景噪声增大,经处理修正后,各分量背景噪声于 2020 年 7 月恢复正常(见表 1 中 2020 年 7 月之后的数据),确保了观测数据的精度。

2.4 车辆的影响

盐城台紧邻省道 232, 磁房距离公路直线距离约 200 m, 且公路上经过的重型车辆较多, 对地磁观测数据造成了一定的影响。当车辆快速通过时, 对磁房附近磁场的影响突然且时间短, 对观测数据的形态干扰表现为突跳和尖峰。通过分析 2021 年 5 月 23 日地磁观测数据(见图 5)发现, 车辆的干扰对 H 分量的影响最大, Z 分量次之。在确定干扰因素后, 需要对观测数据进行台阶预处理, 使数据曲线达到平滑状态。

表 1 2019 年 10 月至 2021 年 3 月盐城台地磁 F 、 D 、 H 、 Z 分量噪声月平均值

月份	F 分量噪声 月平均值/nT	D 分量噪声 月平均值/分	H 分量噪声 月平均值/nT	Z 分量噪声 月平均值/nT
2019 年 10 月	0.40	0.59	0.44	0.51
2019 年 11 月	0.45	0.51	0.42	0.61
2019 年 12 月	0.30	0.43	0.39	0.36
2020 年 1 月	0.36	0.46	0.43	0.51
2020 年 2 月	0.36	0.46	0.39	0.49
2020 年 3 月	0.35	0.48	0.42	0.39
2020 年 4 月	0.36	0.51	0.42	0.47
2020 年 5 月	0.33	0.50	0.45	0.45
2020 年 6 月	0.27	0.39	0.27	0.36
2020 年 7 月	0.25	0.39	0.26	0.51
2020 年 8 月	0.26	0.38	0.30	0.45
2020 年 9 月	0.25	0.36	0.30	0.31
2020 年 10 月	0.27	0.42	0.27	0.35
2020 年 11 月	0.27	0.39	0.27	0.36
2020 年 12 月	0.18	0.35	0.21	0.26
2021 年 1 月	0.20	0.35	0.28	0.27
2021 年 2 月	0.24	0.40	0.31	0.25
2021 年 3 月	0.26	0.41	0.26	0.30

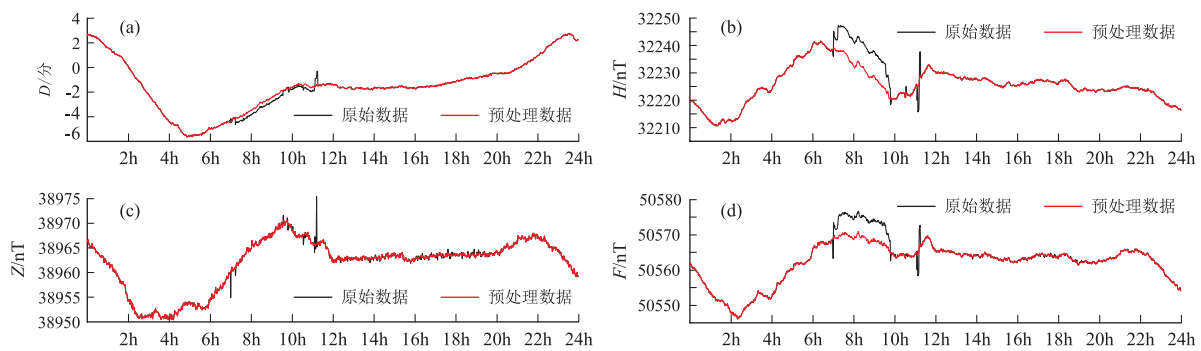


图5 2021年5月23日盐城台地磁FHD观测受车辆干扰曲线

2.5 基建的影响

盐城台位于盐城市盐都区龙冈果林场(公园)内,该区域被地方政府规划为旅游景区,规模多次扩大,建设过程中工程车辆设备进出停靠、作业,工地堆积的含铁磁性材料都对磁房外的观测环境造成了严重影响。值班人员在结合巡检排查基础上确定干扰时段,并进行相应预处理。

3 结论

通过对2019~2021年盐城台地磁观测数据分析,发现影响观测精度的因素主要有自然因素、环境因素、人为因素以及仪器故障等。受干扰数据的曲线形态主要表现为单点突跳、多点突跳和突跳台阶等。造成数据曲线异常的主要原因有磁暴、高压直流电、噪声、车辆和基建等。

地震观测数据的质量直接影响分析预报的可信度。只有充分识别地磁观测中的各类干扰因素,正确预处理数据,方能使产出数据完整、连续、可靠。以盐城台为例,剖析了地磁观测中的部分影响因素及相应干扰的形态,有效排除可控干扰源,解决了日常观测中背景噪声大的问题,提高了观测数据质量。

参考文献

陈贤,黄恩贤,成万里,等. 2020. 信阳台 FHD 地磁仪观测数据典型干扰识别及数据处理[J]. 地下水,42(2):101-103.
 蒋延林,张秀霞,杨冬梅,等. 2014. 高压直流输电对地磁观测影响的特征分析[J]. 地震,34(3):132-139.
 杨学慧,杨正纲,姚修义,等. 2020. 地磁观测数据中典型干扰识别预处理[J]. 高原地震,32(3):30-36.
 张英杰,张小涛,王莉森,等. 2017. 涉县地磁台电磁环境测试与分析[J]. 地震地磁观测与研究,38(4):93-97.

Analysis of the Disturbance Factors of Geomagnetic Observation at Yancheng Seismic Station

GUO Haoming

(Yancheng Seismic Station of Jiangsu Province, Jiangsu Yancheng 224005, China)

Abstract: Taking the geomagnetic observations at Yancheng Seismic Station as an example, we analyzed various disturbance factors and the recorded morphological characteristics in geomagnetic observations. The results show that the FHD magnetometer at Yancheng Seismic Station is mainly influenced by the following factors, such as magnetic storms, high voltage direct current (HVDC), noise, and passing vehicles and infrastructure. The related disturbance styles are mainly consist of single-point jump, multi-point jump, and sudden steps. Based on the aforementioned analysis on the geomagnetic observations and characteristics of morphology variations, we could effectively exclude the controlled disturbance sources, which can provide guarantee for identifying seismic precursors.

Keywords: Yancheng seismic station; geomagnetic observations; FHD magnetometer; interference identification

罗汉桥水电站对超宽频带地震计记录资料的影响分析

何思源,赵乃千,李贵元,刘华姣,龚康
(四川省地震局成都地震监测中心站,四川成都 611730)

摘要:采用成都地震监测中心站的超宽频带地震计 JCZ-1T 记录的测震资料进行研究时发现,资料中存在 2~4 Hz 干扰以及固定时段的低频长周期波动。本研究围绕台站附近的罗汉桥水电站进行多方位移动观测,并在低频长周期波动时段内利用实地调查情况与波形实时形态进行对比分析。结果显示:2~4 Hz 干扰以及低频长周期波动均与罗汉桥水电站存在直接关联。

关键词:超宽频带地震计;测震资料;波形干扰;低频波

中图分类号:P315.7 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-8115(2022)03-0038-05

DOI:10.13716/j.cnki.1001-8115.2022.03.008

随着数字化地震台站的快速建设,宽频带数字地震仪被广泛应用在各个台站上,极大地提升了台站的地震观测能力和水平,同时也带来了更高的采样率和分辨率、更宽的记录频带以及更大的动态范围(陈运泰等,2000)。成都地震监测中心站是四川地震台唯一拥有超宽频带地震计的台站,超宽频带地震计 JCZ-1T 于 2012 年架设于成都地震监测中心站,设计思路是替换站内已使用了十余年的 JCZ-1 地震计,JCZ-1T 地震计在高频端和低频端有比 JCZ-1 地震计更高的分辨率和信噪比(田文德等,2013)。超宽频带 JCZ-1T 地震计记录了丰富的数字波形资料,为地震研究提供了扎实的基础。根据研究发现,成都地震监测中心站的测震资料存在 2~4 Hz 的干扰以及凌晨 5 时至 6 时时间段内水平分向所记录的低频长周期波动。由于 2~4 Hz 干扰是全日范围的影响且持续年限较长(何思源等,2019),结合低频长周期波动至今已经存在长达十几年的事实以及台站周边走访调查的结果,发现最近的设施就是位于测震山洞东偏南位置的罗汉桥水电站,与测震山洞直线距离约 121 m。本研究围绕罗汉桥水电站进行多方位移动观测,在低频长周期波动时段内利用实地调查情况与波形实时形态进行对比分析,以此验证 2~4 Hz 干扰以及固定时段低频长周期波动与罗汉桥水电站的关联。

1 成都站测震资料中的 2~4 Hz 干扰

文中选择 JCZ-1T 超宽频带地震计记录的 2017 年 12 月 10 日 8 时 14 分四川九寨沟地震($M 2.7$)及一段背景噪声,通过带阻滤波器压制 2~4 Hz 频率范围内的信号,得到滤波前后的对比图(图 1)。图 2 是 2019 年 6 月 9 日 2 时被成都地震监测中心站的四台地震计同一时间记录的一段背景噪声频谱图。图 1、图 2 的结果表明:2~4 Hz 频率区间包含了干扰信息,宏观特征为波形“毛刺”。

2 成都站测震资料中的低频长周期波动

图 3a 是 2019 年 6 月 30 日 5 时 JCZ-1T 记录的波形,低频长周期波动开始于 5 时 32 分,持续的时间为 14 分钟。对这 1 小时波形的南-北分向采用希尔伯特-黄变换进行时频分析,从希尔伯特谱(见图 3b)中可知在 5 时 32 分附近出现了低频信号,信号强度从逐渐增大到衰退持续时间约 14 分钟,对应了低频波动开始以及持续时间。

收稿日期:2021-08-05;修回日期:2022-03-20

基金项目:四川省地震局科技专项(LY2119、LY2226)和中国地震局“三结合”课题(3JH-2021042)项目联合资助。

作者简介:何思源(1991-),男,四川安岳人,理学硕士,工程师,主要从事测震工作。Email:1184003037@qq.com.

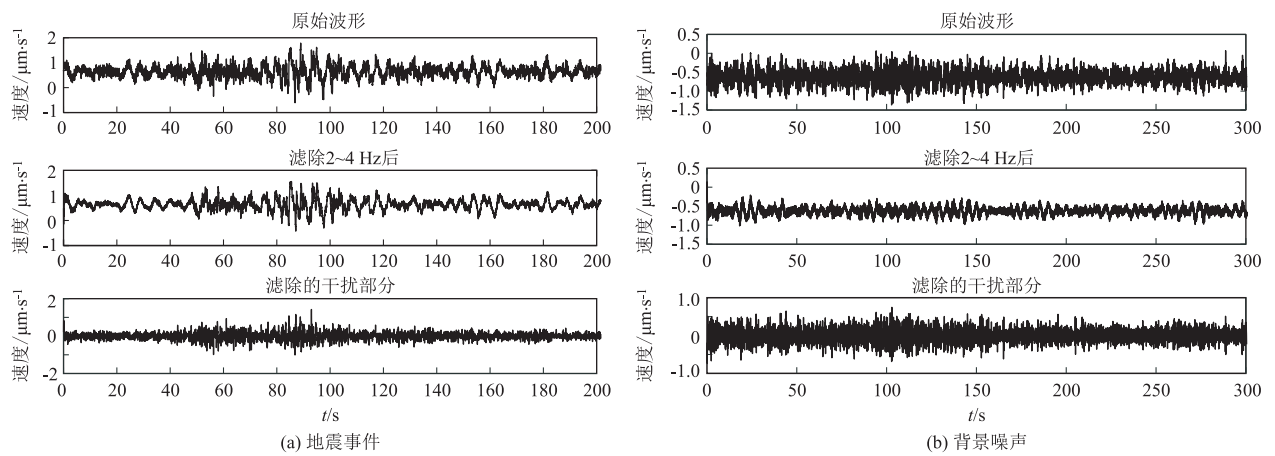


图1 滤除 2 ~ 4 Hz 频率范围前后对比图

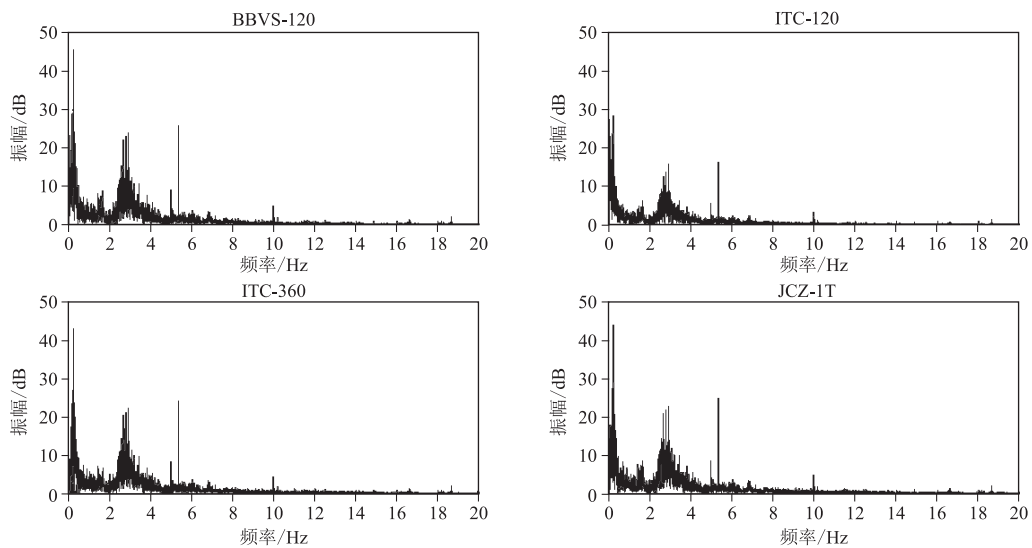


图2 四台地震计同一时间记录的地震波形频谱图

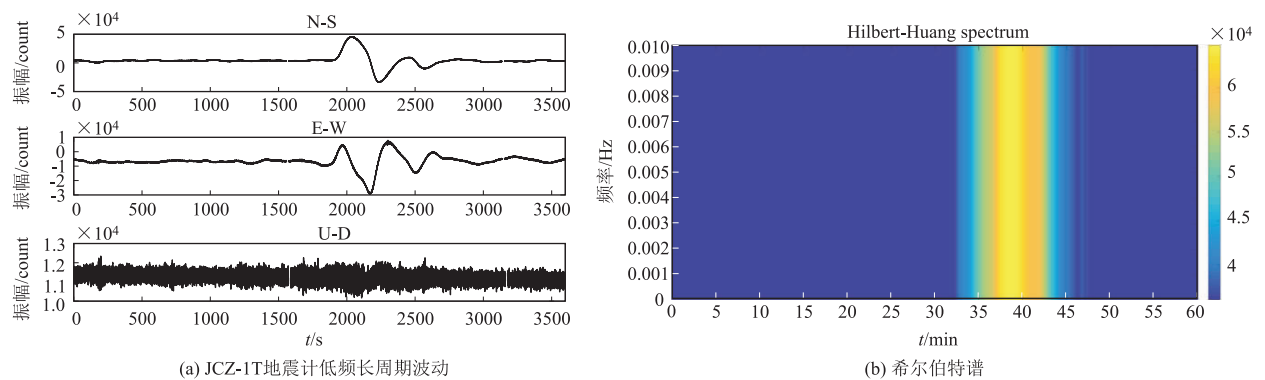


图3 JCZ-1T 地震计低频长周期波动及其希尔伯特谱

为了排查该波动是否因为仪器设备所引发,将台站另外三台地震计(分别是一台超宽频带地震计 ITC-F360、两台甚宽频带地震计 BBVS-120 以及 ITC-120)记录的波形进行对比。结果表明,ITC-F360、BBVS-120 和 ITC-120 地震计均在同一时间记录到该低频长周期波动(图 4),排除了由仪器设备引起该低频长周期波动的可能性。其中,甚宽频带地震计 BBVS-120 以及 ITC-120 仅在南 - 北分向记录到低频长周期波动且形态不够完整光滑;超宽频带地震计 JCZ-1T 以及 ITC-F360 能记录到的低频长周期波动更加清晰、波形形态更加完整光滑。

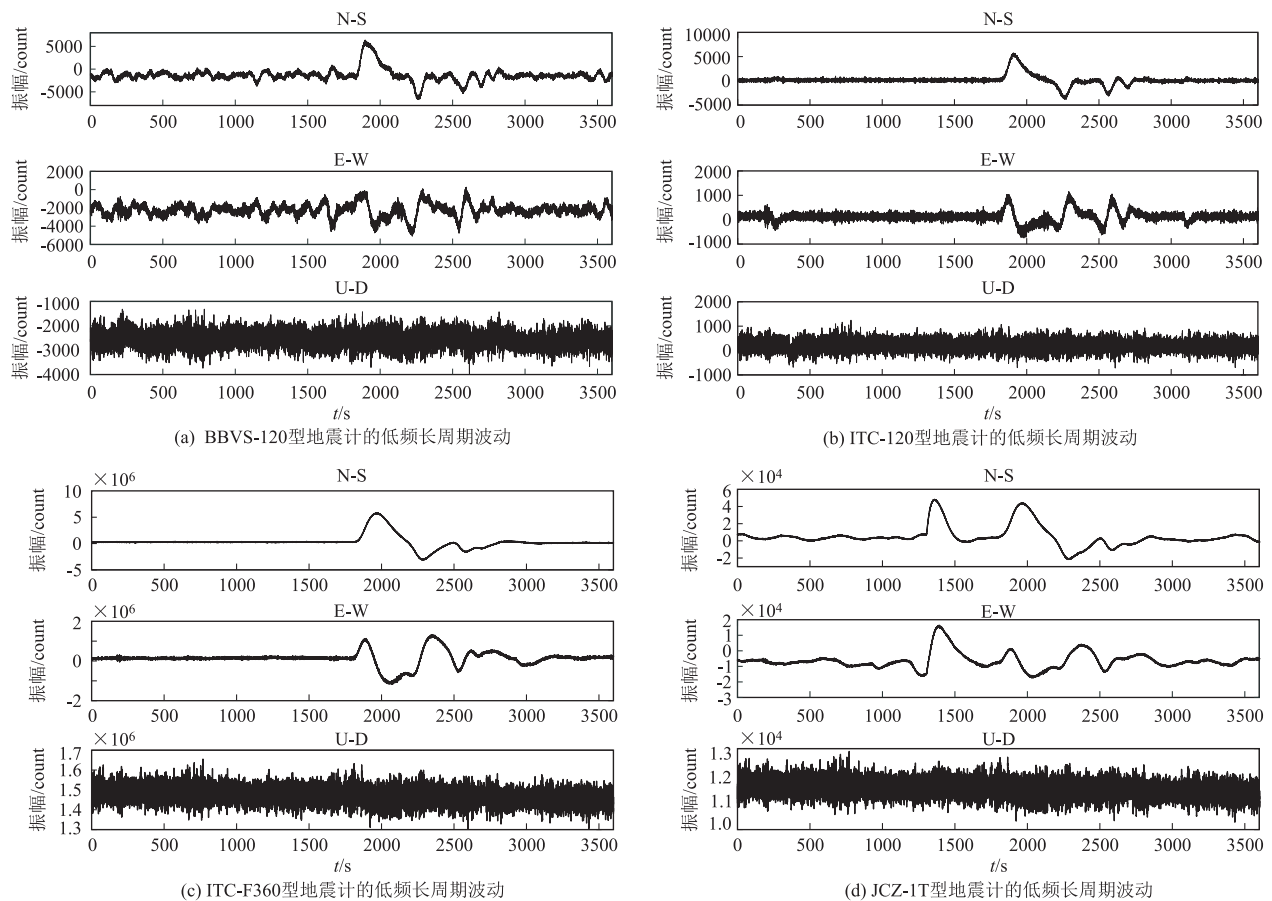


图 4 不同地震计记录的低频长周期波动(2019 年 6 月 15 日 05 时)

由于低频长周期波动只存在于固定时段内,因此首先考虑人为因素的可能性。台站附近固定时间作业单位便是重点关注对象。通过对成都地震监测中心站历史数据资料的整理,发现记录到的低频长周期波动时期可追溯到 2004 年。如图 5 所示,低频长周期波动每日的形态并不完全一致,南 - 北分向的波动幅度略大于东 - 西分向,但南 - 北分向的形态变化在相位上总是略晚于东 - 西分向。

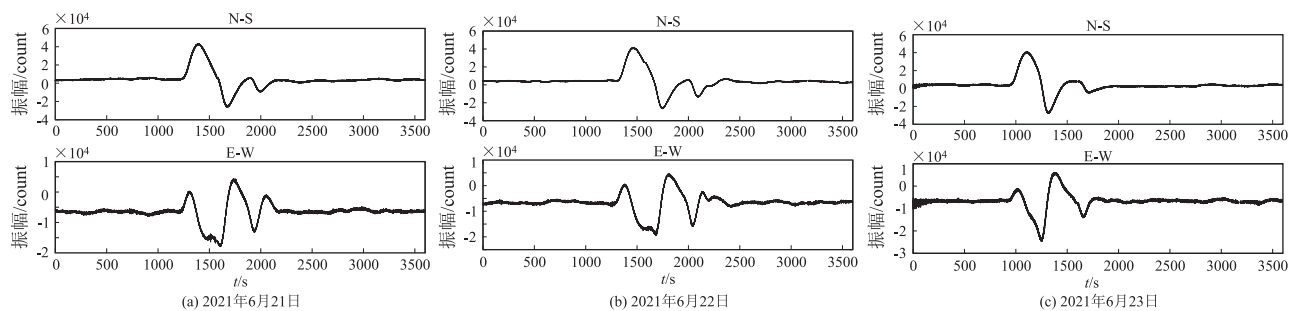


图 5 低频长周期波动连续 3 日形态变化(JCZ-1T)

3 罗汉桥水电站对测震资料的影响

3.1 对罗汉桥水电站的多点位监测

以罗汉桥水电站为中心布设了 9 个测点进行移动观测,如图 6 所示。以测震山洞到水电站的直线距离作为基本距离单位,通过扩大测点与水电站的距离来研究 2 ~ 4 Hz 干扰是否随距离的改变而变化。为了避免河流水流的影响,测点的分布基本垂直于河道。西南方向由于离成灌公路较近,数据受车辆干扰过大,未过多布设测点。研究中采用 40T 短周期地震计搭配 EDAS-24IP 数据采集器进行测点数据的记录。

首先选择相对平静的波形记录,然后尽可能地剔除其中行人、机动车产生的干扰,所得的结果如图7所示。1、2、3号测点到水闸的直线距离与测震山洞到罗汉桥水电站的直线距离一致(约121 m),2~4 Hz 频率范围的幅值非常明显;4号测点距离罗汉桥水电站最近且2~4 Hz 频率范围的幅值在9个测点中为最高;5、6号测点到罗汉桥水电站的距离是2倍测震山洞到罗汉桥水电站的直线距离(约259 m),2~4 Hz 频率范围的幅值较1、2、3号测点有所下降;7、8号测点到罗汉桥水电站的距离是3倍测震山洞到罗汉桥水电站的直线距离(约404 m),2~4 Hz 频率范围的幅值下降幅度较5、6号测点更明显;9号测点距离罗汉桥水电站最远,是10倍于测震山洞到罗汉桥水电站的直线距离(约1018 m),2~4 Hz 频率范围的幅值最低。9个测点的数据分析结果表明:距离水闸越远,2~4 Hz 干扰对波形数据的影响越小,证明2~4 Hz 干扰与罗汉桥水电站之间存在直接关联。图中同一圆圈上的点表示距离罗汉桥水库的距离相等。

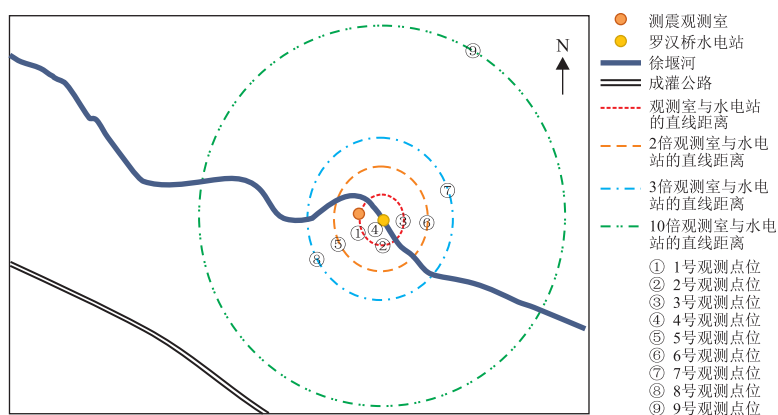


图6 测点位置

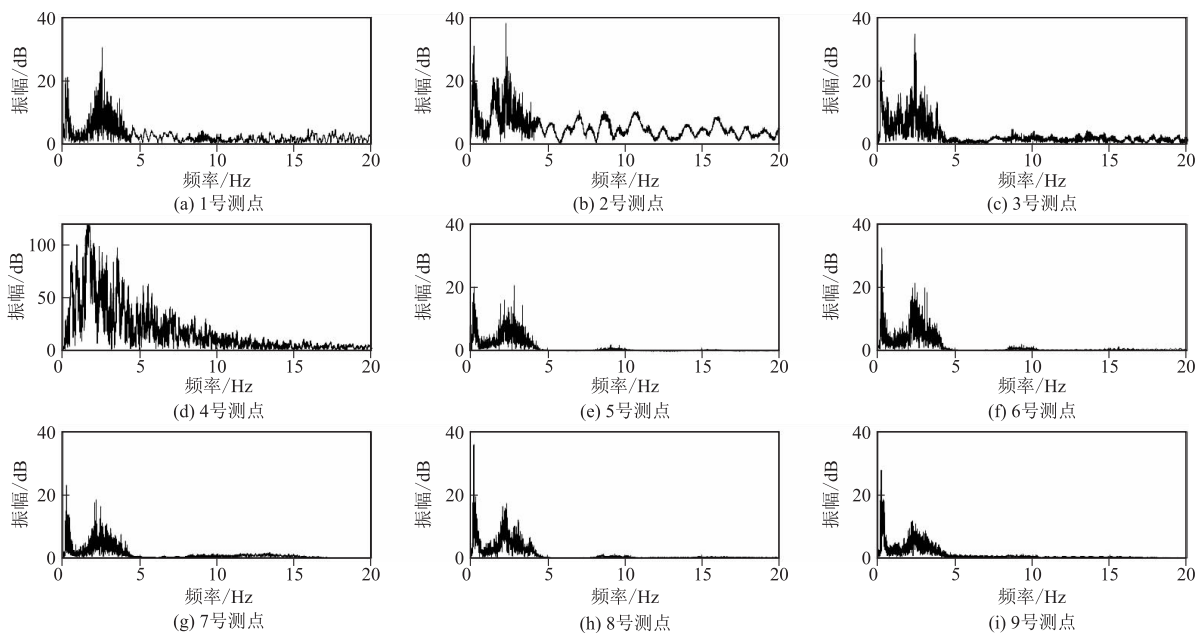


图7 9个测点的频谱图

3.2 对低频长周期时间段的分析研究

罗汉桥水电站始建于1997年,内部水闸有3道闸门,总宽8 m。近年来每日凌晨5时至6时值守人员会抬起水闸闸门进行“冲闸”,“冲闸”过程中三道闸门依次开启及关闭。“冲闸”目的即是通过快速流动的河水带走河道内沉积的杂物。

经过多次在低频长周期波动时段内的实地考察验证,证明了低频长周期波动是由罗汉桥水电站冲闸引起的。本研究以2021年7月9日低频长周期波形的变化为例说明在冲闸的过程中不同时间节点的状态和波形形态变化的对应关系。由于东-西向波形形态变化启动更快,因此以东-西向进行阐述。如图8所示,第一道闸门在05:31:54启动时,水流量开始变大,波形上也逐渐出现了向上抬升的现象;三道闸门在05:33:42均完全开启,水流量达到最大;第一道闸门在05:35:30开始关闭,水流量开始逐渐减小,波形开始出现一些小幅度的高频反应,这是由于闸门关闭时闸门和闸身摩擦及撞击产生的震动;三道闸门在05:36:

30 依次关闭,水流量逐渐恢复到起始水平,波形中出现的较大幅度的高频震动是由于第三道水闸关闭是和底部产生的较大碰撞所致。由于执行“冲闸”操作的值守人员会轮换,控制水闸抬起时间难以统一,则河水流量以及水位变化量也不一致,因此便会造成不同时间的低频长周期波动形态有所差异。然而,低频长周期波动的形态变化的原理还未能形成解释,后续将继续与罗汉桥水电站接洽,以获取足够的水位、水流量数据支撑下一步的研究工作。

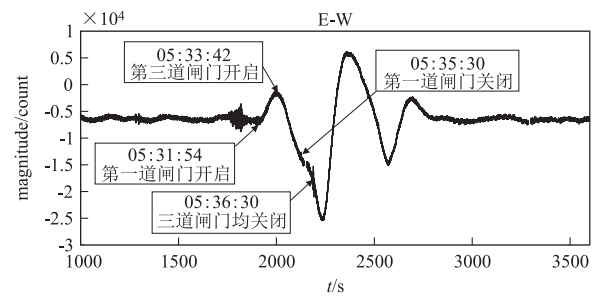


图8 2021年7月9日低频长周期波动形态变化与冲闸时间节点的对应关系(JCZ-1T)

4 结论

通过对研究结果进行汇总,可归纳为四点:(1)2~4 Hz 干扰会随着与水电站距离的改变而变化,距离水电站越远的区域2~4 Hz 干扰对波形数据的影响越小,证明罗汉桥水电站是成都地震监测中心站测震资料中2~4 Hz 干扰产生的重要原因。(2)成都地震监测中心站凌晨5时至6时的低频长周期波动是由于台站附近的罗汉桥水电站每日凌晨“冲闸”操作所致。南-北分向波动幅度略大于东-西分向,但南-北分向形态变化在相位上总是略晚于东-西分向。由于执行“冲闸”操作的值守人员会轮换,控制水闸抬起时间难以统一,则河水流量以及水位变化量也不一致,因此便会造成不同时间的低频长周期波动形态有所差异。(3)罗汉桥水电站“冲闸”造成的低频长周期波动对于超宽频带地震计记录的测震资料的影响较大,对甚宽频带地震计记录的测震资料的影响有限。水电站产生的2~4 Hz 对超宽频带、甚宽频带地震计均有较大影响。(4)罗汉桥水电站“冲闸”引发低频长周期波动的形态变化的原理、东-西分向形态变化快于南-北分向的原因以及形态变化与“冲闸”过程的水流水位变化量的相关性仍需更多冲闸过程中水位、水流量数据支撑后续的研究。

参考文献

- 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 等. 2000. 数字地震学[M]. 北京:地震出版社, 172-184.
- 何思源, 李贵元. 2019. 关于成都地震监测中心站测震资料中2~4 Hz 干扰频率范围的研究[J]. 内陆地震, 33(1): 80-90.
- 田文德, 叶建庆, 胡俊明. 2013. 成都地震台 JCZ-1 与 JCZ-1T 甚宽频带地震仪对比观测分析[J]. 地震研究, 36(3): 372-378.

Research on the Influence of Hydropower Station on Seismic Data of Ultra-wideband Seismometer

HE Siyuan, ZHAO Naiqian, LI Guiyuan, LIU Huajiao, GONG Kang

(Chengdu Earthquake Monitoring Center Station, Sichuan Earthquake Agency, Sichuan Chengdu 611730, China)

Abstract: When using the seismic data recorded by the ultra-wideband seismometer JCZ-1T from the Chengdu Earthquake Monitoring Center Station, we found that a 2~4 Hz interference is existed in the data, which is accompanied by a low frequency long-period fluctuation during a fixed time period. This paper focused on multi-directional mobile observations at the Luohanqiao Hydropower Station near the seismic station, and analyzed the real-time waveforms with field surveys during low-frequency and long-period fluctuations. The research results show that the 2~4 Hz interference and low frequency long-period fluctuation are directly related to the Luohanqiao Hydropower Station.

Keywords: Ultra-wideband seismometer; seismic data; waveform interference; low frequency wave

地震台站运维信息化管理系统设计与应用

孔令爱,胡子超,王银龙

(山东省地震局临沂市地震监测中心站,山东 临沂 276000)

摘要:地震台站运维是台站的一项重要内容,随着台站数量的不断增加,台站运维工作难度进一步加大,如何对台站运维进行有效的、统一的信息化管理,是值得思考的问题。针对传统的台站运维工作中存在的效率低、不规范、易出错等问题,设计了满足台站运维的集台站、仪器、运维、巡检等主要内容的数据库结构,采用 PHP 语言实现了一套基于 B/S 结构的地震台站运维信息化管理系统。该系统能够进行台站信息的收集、保存、共享和维护,实现了传统台站运维工作的信息化管理,提高了技术保障部门工作人员的工作效率。

关键词:地震台站运维;信息化管理;B/S 结构;PHP 语言;MySQL 数据库

中图分类号:P315.39 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-8115(2022)03-0042-06

DOI:10.13716/j.cnki.1001-8115.2022.03.009

地震台站是获取地震数据资料的首要平台,是监听地震的重要阵地,在地震监测预报中起着重要作用。全国地震台站经过“十五”“十一五”“十二五”和“十三五”等重大项目的规划建设,数量逐年增多,从最初的模拟时代进入了现在的数字化时代,从单一的测震功能变为现在综合性的监测预测功能。因此,台站管理模式也随之发生了改变,逐渐由有人值守模式向无人值守模式发展,随着无人值守台站数量的逐年递增,台站运维工作难度进一步加大。为了解决目前台站运维及地震系统中存在的类似问题,国家出台了关于信息化建设的相关文件,鼓励各地区积极探索新的工作方式,解决地震系统中存在的信息化理念滞后、数据资源共享不足、信息服务不成体系等突出问题,积极推进地震系统向信息化、数字化方向发展。各地区也积极做出响应,根据各自需求研发出多种类型的地震数据信息化管理系统。例如,许贺等(2020)、孙路强等(2013)、倪泰山等(2009)、学峰等(2020)开发了综合管理系统,王建国等(2009)、刘鹏飞等(2020)开发了网络管理软件。这些系统大多是针对台站和网络综合管理而开发的,其特点是综合性强、适用面广,但是对于日常地震台站运维中的具体工作缺乏辅助性和针对性的帮助,不能满足目前技术保障部门工作人员的工作需求。

针对山东省临沂市地震台站的实际需要,以及地震台站运维工作中存在的问题,并结合多年的工作经验,地震台站运维急需一套有效的、便捷的电子化网络集中管理系统。因此本文设计并实现一套集台站信息、仪器设备信息、台站巡检、台站运维、运维人员等主要内容的信息化管理系统,便于对地震台站运维的信息化管理,提高台站技术保障部门的工作效率。

1 系统需求分析

1.1 地震台站运维需求分析

随着临沂市境内地震台站及无人值守台站数量的递增,台站运维工作的难度进一步加大,在台站运维的多年工作中,发现了地震台站运维中存在着一些问题。如地震台站运维信息管理效率低下,地震台站运维缺乏共享性,地震台站的仪器设备维修、更换等程序复杂。如何对台站运维进行有效地、统一的信息化管理,是值得研究和思考的一项工作。

台站运维工作是台站的一项重要内容,做好台站运维工作是台站正常运行的重要保障。因此,针对以上问题,开发一套有效、便捷的台站运维信息化管理系统非常有必要。地震台站运维信息化管理系统能够进行信息数据的收集、保存、共享和维护,具有简单易用、性价比高、扩展性好的特点,能够减少台站技术保障部门

收稿日期:2021-09-06;修回日期:2021-11-30

作者简介:孔令爱(1990-),女,山东临沂人,工程师,主要从事地震监测台网建设、维护等工作. E-mail:1291498251@qq.com.

工作人员的工作量,实现了传统地震台站运维工作的信息化管理,可以应用于各地震台站。

1.2 系统功能需求分析

通过对系统的功能需求进行分析,可将地震台站运维信息化管理系统分为系统管理、台站管理、仪器管理、台站运维管理、台站巡检管理和运维人员管理等6个功能模块(如图1)。

(1)系统管理模块功能需求:根据地震台站运维信息化管理系统的特性,系统管理模块应该包括用户名和密码的管理、用户权限的管理等功能。为了保障系统的保密性,该模块需要提供登陆验证机制,为不同的用户提供不同的使用权限。因此,该模块的主要功能需求为:用户的添加、修改、删除和查询;用户密码的管理;用户权限的管理。

(2)台站管理模块功能需求:台站管理是对临沂市管辖范围内的所有台站进行统一管理,收集整理该范围内台站的基本情况,便于运维人员准确了解台站的信息(程树岐等,2019)。该模块能够查看地震台站的具体位置、监测环境等内容。因此,该模块的主要功能需求为:台站、台站监测环境、台站详细地址的添加、修改、删除和查询;台站周边照片的上传。

(3)仪器管理模块功能需求:仪器管理是地震台站运维的基础,收集整理所有地震台站仪器设备的基本情况。该模块可以查看每个地震台站中的仪器设备属性,为运维人员提供可靠有效的信息,为设备维护、维修提供准确的数据资料。因此,该模块的主要功能需求为:仪器所属台站、仪器名称、仪器型号、网络传输情况、仪器运行情况、仪器IP地址的添加、修改、删除和查询。

(4)台站运维管理模块功能需求:台站运维是对台站仪器设备故障做出及时的响应,主要收集台站设备的故障原因、运维日志、运维人员和运维日期等信息,对历史运维信息进行电子存储,方便后期的查阅。因此,该模块的主要功能需求为:故障原因、运维人员、故障运维日期的添加、修改、删除、查询;运维日志的上传。其中,运维日志是指每次运维的具体事项,运维人员填写纸质版运维日志后,以图片的形式上传到系统中。

(5)台站巡检管理模块需求:台站巡检是定期对台站进行巡视检查,主要收集巡检照片、巡检日志、巡检人员、巡检日期和问题,对历史巡检信息进行电子存档,为台站的正常运行提供保障。因此,该模块的主要功能需求为:巡检照片的上传;巡检日志的上传;巡检人员、巡检日期的添加、修改、删除、查询。其中,巡检照片是指每次巡检的观测室内照片;巡检日志是指每次巡检的具体事项等,巡检人员完成纸质版巡检日志后,以图片的形式上传到系统中。

(6)运维人员管理模块需求:运维人员管理是对临沂市管辖范围内所有的台站运维人员和看护人员进行统一的管理,收集整理该范围内所有的运维人员和看护人员的具体信息,为有效合理地分配人力资源提供帮助。因此,该模块的主要功能需求为:运维人员具体信息(电话、所在县区、负责台站等)的添加、修改、删除和查询;看护人员具体信息(电话、所在县区、负责台站等)的添加、修改、删除和查询;技术支持类型的添加。

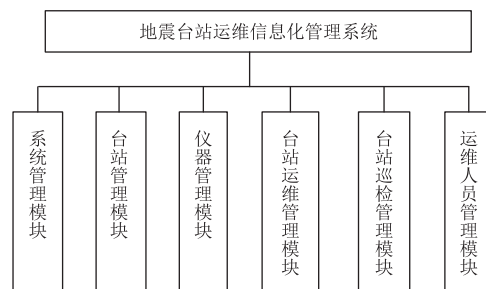


图1 地震台站运维信息化系统功能结构图

2 系统总体设计

2.1 系统架构

地震台站运维信息化管理系统采用基于B/S(Browser/Server)的三层架构体系,包括用户层、业务逻辑层和数据访问层(倪泰山等,2009)。B/S架构是在网络允许的条件下,用户只需通过浏览器就可以访问服务器,客户端不需要安装任何的软件,简化了客户端的负载,减轻了系统维护的工作量(孙路强等,2015)。在该系统的三层体系结构中(见图2),用户层即用户登录界面,业务逻辑

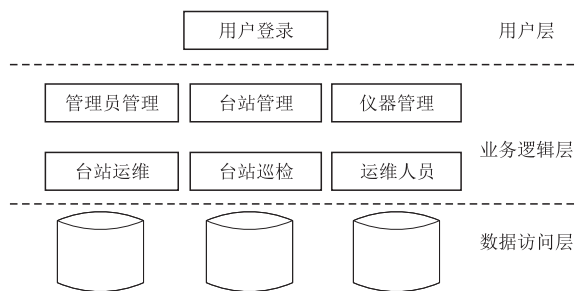


图2 地震台站运维信息化系统三层体系框架

层包括管理员管理、台站管理、仪器管理、台站运维、台站巡检和运维人员 6 大功能模块,数据访问层包括系统需要的数据库和数据表,每个模块各自实现具体的系统功能。用户层负责用户的交互,并向业务逻辑层发送请求;业务逻辑层按照业务规则向数据访问层获取数据,对数据进行处理,并将处理后的数据反馈到用户层;数据访问层用来存储数据,供业务逻辑层访问使用。

2.2 系统开发环境

地震台站运维信息化管理系统的开发选择 WampServer 集成开发环境,该集成环境将 Apache、PHP、MySQL 等服务器软件和工具组合打包,能快速、高效的解决计算机环境的安装配置问题(李正刚等,2019)。开发者只需要将配置好的套件解压到本地硬盘中即可使用,无需另行配置。表 1 是系统开发所需要的开发技术、开发工具、操作系统、数据库和浏览器等信息。

表 1 系统开发环境

项目	名称
操作系统	Windows 7
服务器	Apache - 2.4.9
PHP 软件	PHP - 5.5.12
数据库	MySQL - 5.6.17
MySQL 图形化管理工具	phpMyAdmin
浏览器	Google Chrome
开发工具	PhpStorm - 2019

3 系统功能实现

3.1 系统算法实现

用户通过用户名与密码登录地震台站运维信息化管理系统,根据不同的需求访问和使用该系统不同的模块。该系统的操作流程如图 3 所示,整体实现的算法为:(1)管理员输入用户名与密码,系统对管理员身份进行验证;(2)系统对输入的信息进行验证后,如果通过了验证,则进入下一步,如果未通过验证,返回上一步重新验证;(3)在验证成功的前提下,点击不同的模块名称,进入相应的子模块;(4)系统对模块信息进行操作,与数据库 MySQL 进行数据交换,完成各个模块的功能。

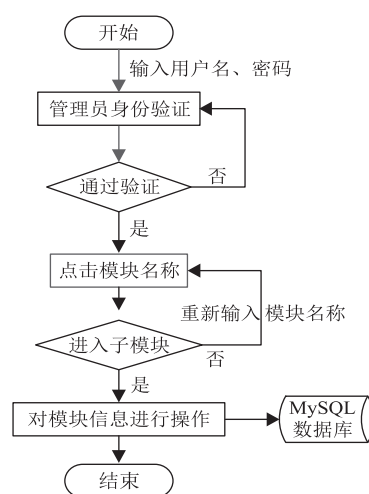


图 3 系统操作流程

3.2 三层架构功能实现

在地震台站运维信息化管理系统三层架构的功能实现中,用户层采用 html 语言实现页面布局;业务逻辑层采用 PHP 语言操作 MySQL 数据库,执行 SQL 语句,实现各个模块的业务功能;数据访问层用来存储业务逻辑层需要的数据,采用 phpMyAdmin 图形化管理工具实现数据库和数据表的创建。

(1)用户层:在开发系统时,考虑到系统每个模块在页面设计中存在相同的页面样式设计,因此用户层的设计采用了模块化的设计思想,页面主要使用 DIV + CSS 的布局方式,创建页面公用的外部样式,在设计每个模块时,直接在页面中导入外部页面样式,保持页面头部、尾部和左侧菜单的样式相同,再单独设计页面内部样式,简化了程序,提高了系统开发的效率。图 4 是系统的用户交互界面。

(2)业务逻辑层:业务逻辑层是实现系统功能的主要部分,通过操作数据访问层中的数据实现每个模块的功能(许贺等,2020)。首先使用 `mysqli_connect()` 函数与数据访问层建立连接;然后使用 `mysqli_select_db()` 函数选择数据访问层中的数据库,与其建立连接;最后使用 `mysqli_query()` 函数执行 SQL 语句,操作数据库中的数据。表 2 是对数据的几种操作方式。

管理页面功能的实现:首先使用 html 中的

表 2 操作数据的方式

操作方式	SQL 语句	实现功能
查询数据	select 语句	实现数据的查询功能
显示数据	select 语句	显示数据的查询结果
插入数据	insert into 语句	向数据库中插入数据
更新数据	update 语句	更新数据库中记录
删除数据	delete 语句	将数据从数据库中删除

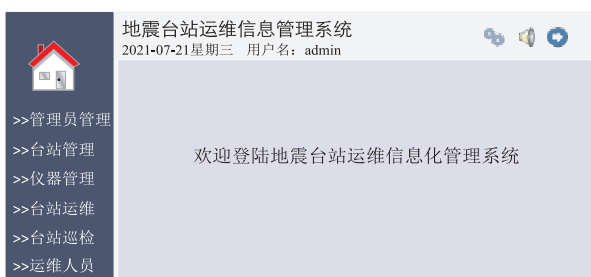


图 4 用户交互界面

<table> 标签布局各模块的管理页面,显示各模块的字段和底部分页内容,使用 <a> 标签实现跳转链接;然后通过 while 循环使用 mysqli_fetch_array() 函数获取数据表中的信息;最后根据 id 参数使用 select 语句以升序的方式将数据显示出来。由于台站、仪器、运维、巡检和运维人员的数量较大,所以各模块的管理页面需要分页显示。首先设置每页显示的数据个数,如台站管理页面设置 MYMperpage = 3;然后获取最大页数和总记录数;最后计算每页从第几条数据开始,获取当前页,如果当前页为空或者小于第一页,则显示第一页,如果当前页大于总记录数,则显示最后一页(孙路强等,2013)。添加信息功能的实现:首先创建 form 表单;然后,在表单中添加 onSubmit 单击事件,通过 JavaScript 判断添加的信息是否为空,如果添加的信息符合规范,则通过 POST 提交信息成功;最后通过 MYM_POST 获取提交的信息,使用 insert into 语句添加信息到数据库。图 5 是台站运维管理模块添加信息功能的实现结果。搜索信息功能的实现:首先布局搜索信息页面;然后使用 SQL 中的 like 语句,在 Where 子句中设定搜索的指定模式,通过选择类型,输入查询的字段查询相关信息;最后把数据库查询的数据通过 select 语句显示出来。图 6 是台站管理模块搜索信息功能的实现结果。修改信息功能通过 MYM_POST 获取提交的信息,使用 update 语句修改该 id 对应的信息。删除信息功能通过 MYM_GET 获取要删除信息对应的 id 参数,使用 delete 语句删除数据库中该 id 对应的信息。

图 5 添加台站运维信息页面

ID	台站名称	台站介绍	台站图片	操作
3	沂水地震台	沂水地震台(台站代码)是无人值守台站,主要监测沂沭带北段及周围地区地震活动和断裂带活动情况,位于山东省沂水县。	显示	修改删除

图 6 台站搜索展示页面

(3) 数据访问层:在业务逻辑层实现信息的动态添加、查询、修改、删除前,首先需要在数据访问层创建数据库与数据表(王建国等,2009)。地震台站运维信息化管理系统采用 MySQL 数据库存储数据,使用 phpMyAdmin 对数据库进行操作。MySQL 数据库是一个开源的、跨平台的数据库,具有可靠、简单易用、运行速度快等优点,适合 Web 网站的开发(学峰等,2020)。phpMyAdmin 是 MySQL 图形化管理工具中使用最为广泛的一种,它以通过 Web 方式对 MySQL 数据库进行完全的控制与操作,简单易用。本系统使用 phpMyAdmin 创建数据库 article,并设计了管理员、台站、仪器、台站运维、台站巡检、运维人员等多个数据表。每个数据表的具体信息如表 3。

4 地震台站运维信息化管理系统的应用

地震台站运维信息化管理系统经过多次修改后,测试成功,基本满足台站技术保障部门工作人员的需求。该系统能够收集、保存临沂市地震监测中心管辖范围内的台站、仪器、台站运维、台站巡检和运维人员等信息。工作人员可通过该系统搜索台站、仪器、运维、巡检等信息,并填报巡检、运维产生的工作日志,及时更新仪器设备的最新工作状态。地震监测中心的工作人员能够通过该系统及时掌握地震台站的最新状况。

地震台站运维信息化管理系统从 2021 年 3 月 1 日在临沂市地震监测中心投入试运行,该系统已经收录了临沂市地震监测中心管辖范围内的地震台站的相关信息,在使用过程中收到良好的效果,大大提高了技术人员的工作效率。图 7 是地震台站运维信息化管理系统试运行的图片。由于各功能模块实现添加、修改、删除和搜索

表 3 系统数据表

数据表	名称	存放数据内容
admin	管理员数据表	用户名、密码
pstation	台站数据表	台站名称、台站介绍、台站图片
instrument	仪器数据表	台站名称、地震计型号、数采型号、网络传输、IP 地址、状态
maintenance	台站运维数据表	台站名称、故障原因、运维日志、运维人员、运维日期
patrol	台站巡检数据表	台站名称、巡检照片、巡检日志、巡检人员、巡检日期、问题
man	运维人员数据表	县区名称、台站名称、技术支持、运维人员、运维电话、看护人员、看护电话



图7 地震台站运维信息化管理系统 - 仪器管理页面

的业务逻辑基本相同,各个模块的添加信息页面、修改信息页面、删除信息页面、搜索展示页面的布局基本相同,这里不再对每个模块的上述信息一一列举,也不重复展示。

5 结束语

地震台站运维是地震监测工作中的重要任务,随着科学技术的发展,地震台站运维工作提出了更高的要求,在继承传统的地震台站运维工作方式的同时,也需要不断创新工作方法,积极引入高科技,使其不断向信息化方向发展。本文设计实现的地震台站运维信息化管理系统目前正在试运行阶段,会根据未来工作的需求,不断完善系统的功能,推进地震台站运维工作的信息化建设。

参考文献

程树岐,刘海刚,王帅合,等. 2019. 新形势下地震台站观测环境和设施保护浅析[J]. 防灾减灾学报,35(1):88-92.

李正刚,陈梦,刘静如,等. 2019. PHP从入门到项目实践[M]. 北京:清华大学出版社.

刘鹏飞,杨周胜,栗毅,等. 2020. 基于百度地图的台站数据服务系统的设计与实现[J]. 四川地震,(2):30-34.

倪泰山,阙云彩,李祥,等. 2009. 基于B/S结构的地震台站综合信息管理系统的设计与实现[J]. 地震研究,32(1):89-90.

孙路强,栗连弟,刘磊,等. 2013. 天津测震台网综合管理系统的设计与实现[J]. 地震研究,36(2):258-262.

孙路强,刘磊,栗连弟,等. 2015. 基于PHP的天津市地震局地震事件共享系统的设计与实现[J]. 山西地震,(2):32-37.

王建国,栗连弟,崔晓,等. 2009. 数字化地震前兆台网日常工作管理软件[J]. 地震研究,32(1):79-83.

许贺,马永,刘传军,等. 2020. 基于PHP的地震台站综合管理系统[J]. 地震地磁观测与研究,41(5):216-221.

学峰,吴军. 2020. 内蒙古地震台站综合管理系统的设计与实现[J]. 华南地震,40(2):80-84.

Design and Implementation of Operation and Maintenance Information Management System for Seismic Stations

KONG Ling'ai, HU Zichao, WANG Yinlong

(Linyi Seismological Monitoring Center Station, Shandong Earthquake Agency, Shandong Linyi 276000, China)

Abstract: Seismic station operation and maintenance is an important content of station management. With the continuous increase of the quantities of stations and unattended stations, the difficulty for station operation and maintenance management is further challenged. Questions on carrying out effective and unified information management for station operation and maintenance is worthy of consideration. Aiming at the problems of low efficiency, non-standard and errors in the traditional station operation and maintenance management, a standardized informatization method of station operation and maintenance management is proposed. Moreover, a database structure integrating station, instrument, operation and maintenance, patrol inspection and other main contents are designed to meet the station operation and maintenance information management. A set of seismic station operation and maintenance information management system based on B/S structure is realized by using PHP language. The system can collect, save, share and maintain station information, realize the information construction of traditional station operation and maintenance management, and improve the work efficiency of department staff on technical support.

Keywords: seismic station operation and maintenance; information management; B/S structure; PHP language; MySQL database



(上接第 32 页)

Design and Implementation of Earthquake Emergent Information Instant Generating System

ZENG Weizu, YANG Li, JIN Yunxia, HUANG Xinru, PAN Yongjie, ZHANG Liwen

(Sichuan Earthquake Agency, Sichuan Chengdu 610041, China)

Abstract: We used web crawlers, natural language processing, and scientific computing related to subroutines that are based on Python 3.8.10 and PyQt 5.15.4 as GUI design tools, to automatically generate earthquake emergency information by extracting key information. Furthermore, we calculated the distance between the epicenter and major cities and counties using the Haversine formula, and then drew auxiliary graphics. Meanwhile, we followed existing specifications for upstream reporting information. The system was designed and developed to compile and send earthquake emergency information instantly. According to the practical application and testing, the system has been able to reduce the human errors in reporting upward earthquake emergency duty information after an earthquake, which can simplify the process of information compilation and distribution and improve the efficiency of post-earthquake information compilation and distribution.

Keywords: earthquake emergency response; information compilation; system design; output automation

四川省地震月报目录($M_L \geq 3.0$)

(2022.04 ~ 2022.06)

序号	发震时刻		震中位置			位号	震级			深度 (km)	精度	台数	资料来源	备注
	年月日	时分秒	纬度	经度	地点		M_L	M_D	M_S					
1	20220404	215831.9	2922	10405	四川犍为	51	3.5		14	1	46	51		
2	20220406	075005.1	2811	10502	四川兴文	51	5.0		7	1	77	51		
3	20220407	055449.5	2807	10508	四川兴文	51	4.3		6	2	39	51		
4	20220412	221508.2	3143	10325	四川理县	51	3.6		19	1	48	51		
5	20220415	211102.2	2809	10443	四川筠连	51	4.4		9	1	29	51		
6	20220418	013512.0	3300	10358	四川九寨沟	51	3.7		19	1	39	51		
7	20220420	214420.1	2809	10443	四川珙县	51	3.6		12	1	21	51		
8	20220422	123652.2	2957	10200	四川康定	51	3.9		12	1	40	51		
9	20220508	195947.8	3154	10427	四川北川	51	4.6		8	1	53	51		
10	20220517	210507.3	2910	10536	四川泸县	51	3.5		10	2	35	51		
11	20220519	045246.6	2821	10433	四川高县	51	3.5		2	1	33	51		
12	20220520	083636.3	2940	10229	四川汉源	51	5.2		25	1	74	51		
13	20220522	030736.4	2827	10445	四川长宁	51	3.7		8	1	30	51		
14	20220525	061408.9	2928	10346	四川五通桥	51	3.7		12	1	38	51		
15	20220529	011820.7	2903	10202	四川九龙	51	3.3		14	1	41	51		
16	20220531	211340.6	2928	10345	四川五通桥	51	3.4		17	1	49	51		
17	20220601	115809.9	3403	10305	四川若尔盖	51	3.1		15	2	22	51		
18	20220601	170007.6	3023	10256	四川芦山	51	5.8		22	1	82	51		
19	20220601	170309.2	3022	10256	四川芦山	51	5.2		20	1	35	51		
20	20220601	200836.5	3221	10504	四川青川	51	3.4		20	1	25	51		
21	20220602	074808.7	3023	10254	四川宝兴	51	3.9		17	1	38	51		
22	20220605	192938.0	3142	10346	四川茂县	51	3.7		17	1	44	51		
23	20220610	000324.8	3216	10148	四川马尔康	51	5.7		17	1	86	51		
24	20220610	000402.5	3216	10148	四川马尔康	51	4.8		14	3	08	51		
25	20220610	000644.9	3216	10148	四川马尔康	51	4.6		15	1	24	51		
26	20220610	001944.2	3216	10147	四川马尔康	51	4.0		16	1	24	51		
27	20220610	002117.4	3216	10147	四川马尔康	51	4.8		21	1	37	51		
28	20220610	012834.6	3217	10150	四川马尔康	51	5.8		13	1	74	51		
29	20220610	032700.5	3215	10152	四川马尔康	51	5.1		15	1	77	51		
30	20220610	043726.9	3215	10151	四川马尔康	51	4.5		15	1	36	51		
31	20220610	045433.0	3218	10149	四川马尔康	51	4.1		15	1	38	51		
32	20220610	054534.4	3219	10153	四川红原	51	3.8		19	1	23	51		
33	20220614	181110.6	3216	10148	四川马尔康	51	4.5		5	1	67	51		
34	20220615	035030.1	2804	10523	四川叙永	51	3.4		8	2	17	51		
35	20220615	141139.3	2921	10404	四川犍为	51	3.7		2	1	30	51		
36	20220615	150407.8	2845	10339	四川马边	51	3.0		5	1	17	51		
37	20220618	134932.0	3156	10109	四川壤塘	51	3.3		10	1	21	51		
38	20220619	012643.8	2637	10206	四川会理	51	3.3		19	1	26	51		
39	20220621	061637.1	2858	10234	四川甘洛	51	3.0		16	1	28	51		
40	20220629	162409.1	3131	10509	四川梓潼	51	3.1		22	1	20	51		