

关玉梅,王紫燕,杨锦玲,等. 华南地区定点形变预测指标建设[J]. 华南地震, 2022, 42(4): 34–40. [GUAN Yumei, WANG Ziyang, YANG Jinling, et al. Construction of Fixed-point Deformation Prediction Index in South China[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(4): 34–40]

华南地区定点形变预测指标建设

关玉梅, 王紫燕, 杨锦玲, 秦双龙

(福建省地震局, 福州 350003)

摘要: 基于《中国震例》及其它相关资料, 构建华南地区定点形变预测指标体系, 分类整理形变干扰库和形变异常库, 列举出部分预测效能较好的形变指标, 结果表明: 华南地区区分干扰和前兆异常的工作量较大, 排除干扰后实际发生的前兆异常次数不多。各省均有少量测项对于台站周边 200 ~ 300 km 范围内 $M_L4.5$ 地震有较好的映震效果。华南地震预测指标体系开展的一系列建设工作, 将对未来更有效更科学地利用前兆观测数据打下基础。

关键词: 华南地区; 定点形变; 地震预测指标; 效能评估

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)04-0034-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.04.05

Construction of Fixed-point Deformation Prediction Index in South China

GUAN Yumei, WANG Ziyang, YANG Jinling, QIN Shuanglong

(Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Based on earthquake cases in China and other related data, the fixed-point deformation prediction index system of South China is constructed, the deformation interference database and deformation abnormality database are classified and sorted, and some deformation indexes with better prediction efficiency are listed. The results show that it is a heavy work to distinguish interference and abnormal anomalies in South China, and the number of precursory anomalies that actually occur after eliminating interference is small. There are a small number of measurement items in each province, which have a good seismic reflection effect for $M_L4.5$ earthquakes within the range of 200–300 km around the station. The series of construction work carried out by the South China Earthquake Prediction Index System will lay the foundation for more effective and scientific use of precursory observation data in the future.

Keywords: South China; Fixed-point deformation; Earthquake prediction index; Effectiveness evaluation

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 福建省地震局科技攻关专项基金(G201905); 福建省地震局科技基金项目(SF202208)联合资助。

作者简介: 关玉梅(1976–), 女, 高级工程师, 主要从事形变和 GNSS 数据处理、形变数据分析研究。

E-mail: guanym5102@163.com

0 引言

从2000年以来,华南各省(自治区)陆续形成以洞体应变仪、垂直摆倾斜仪、水管倾斜仪、重力仪、体积式钻孔应变仪为主的定点形变监测台网^[1-2]。这些仪器在运行期间,记录了大量观测数据,并积累了丰富的震例总结资料^[3-4]。为了提高华南地区形变资料在地震预测上的应用效能,在历史经验和多年日常工作经验积累的基础上,对华南定点形变资料进行梳理。华南地区是典型的少震弱震地区,形变小组收集整理多年的干扰信息、气象信息和仪器维修记录,依据产生的异常形态分类,归纳总结出各测项的干扰库和异常库,初步建设华南地区定点形变预测指标。使用全国形变学科组推广的自动算法及 R 值预测效能检验再次梳理预测指标,将两次指标结论进行对比印证,利用自动算法可有效提高工作效率和准确性,以漳州洞体应变东西分量为例,其自动算法扫描结果与经验扫描结果基本一致^[5]。

1 华南形变观测资料和地震概况

1.1 观测资料概况

华南形变指标建设采用华南地区包括福建、广东、广西、江西、海南和湖南六省/自治区定点形变观测数据,参与定点形变指标梳理的台站和显著地震分布见图1。因形变异常判定至少需要累积3年以上平稳运行数据,所以华南形变指标建设基于稳定运行3年以上的定点形变观测资料分钟采样原始数据,共梳理了34套观测仪器(65个测项分量)的数据,同一套观测仪器中东西向和北南向在梳理过程总结出不同的预测指标,所以以测量分量为形变指标数量单位。其中垂直摆倾斜仪(30个测项)、水管倾斜仪(20个测项分量)、洞体应变仪(20个测项分量)为主要观测手段,钻孔应变仪、定点跨断层、水平摆等仪器观测数量较少。此外少量观测时长不足或受干扰严重的定点形变资料没有参与。重点梳理华南地区 $M_L4.5$ 以上地震相关的前兆异常指标,参与指标梳理的测项和地震分布如图1所示。各测项根据经验和映震效能分别给出映震范围,基于映震效能最佳的基础上,统计得到大部分台项的映震敏感区域是测点周边200~300 km范围内。

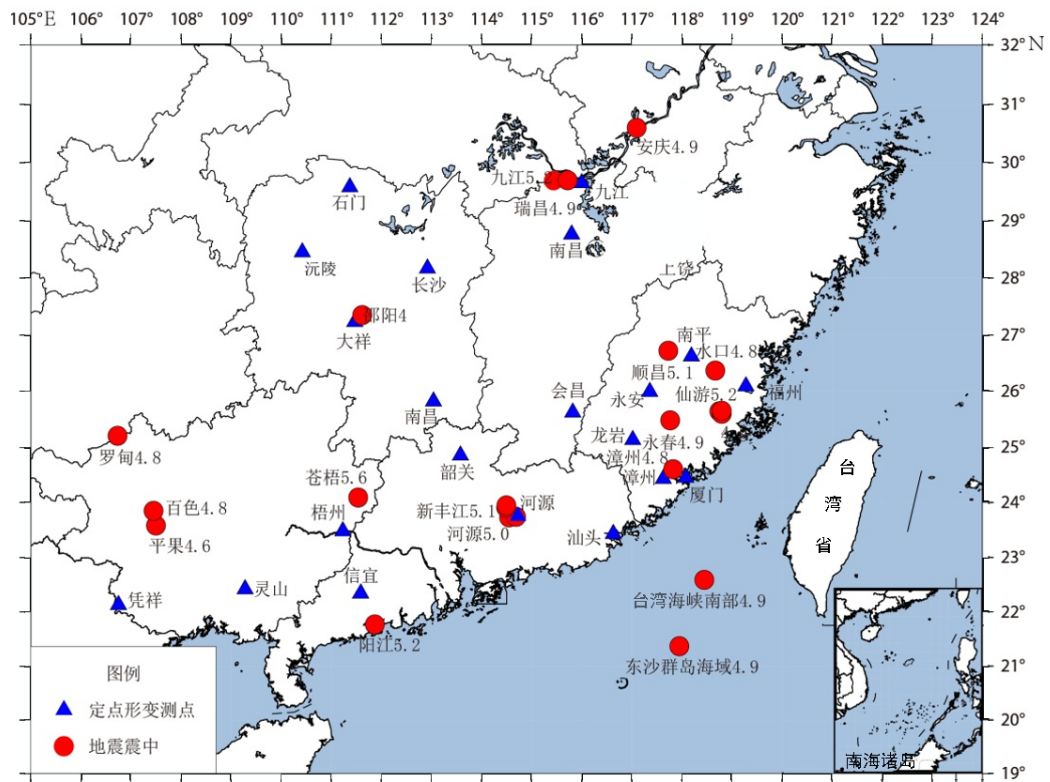


图1 华南地区显著地震(2001—2007年)和定点形变测项分布图

Fig.1 Diagram of significant earthquakes from 2001 to 2007 and fixed-point deformation measurement items in South China

1.2 地震概况

参与研究的地震是2001—2017年, 华南形变观测台网内 M_L 4.5以上地震(湖南为 M_L 4.0以上)。华南是少震、弱震地区, 研究时段区域17年内仅发生7次 M_L 5以上中强地震, 分别是2004年9月17日广东阳江5.2级地震、2005年11月26日九江6.0级地震、2007年3月13日福建顺昌5.1和5.0级双震、2012年2月16日广东新丰江5.1级地震、2013年2月22日河源5.0级地震、2013年9月4日福建仙游5.2级地震和2016年7月31日苍梧5.4级地震。利用自动算法再次梳理福建地区2018—2021年数据, 期间发生了2018年11月的台湾海峡6.2级地震, 其震中距离海岸线仅109 km, 距震中150~210 km内的形变观测点如福建漳州、福建泉州、广东潮州等均有明显同震反应。

2 华南形变预测指标建设思路

2017年开展的华南地区预测指标梳理, 将华南定点形变异常按曲线形态分为破年变、趋势转折、速率改变、潮汐畸变、大幅波动等5类异常。2020年中国地震局地震预测研究所印发的《震情会商技术方法业务应用推荐清单》中, 定点形变的异常类型被再次分类, 将潮汐畸变异常、大幅波动异常和速率改变异常这3项合并称为速率改变异常, 保留破年变异常和趋势转折异常。本文开展的基于经验扫描的工作早于《震情会商技术方法业务应用推荐清单》印发时间, 所以仍以5种异常分类进行介绍。

华南地区所有定点形变观测均设在专业的综合地震台内, 有台站专职工作人员值守, 可以随

时关注仪器运行状态和环境干扰情况, 大部分仪器均可以保证正常观测。但因城市化进程加大, 原本地处较偏僻的观测台站, 现频繁受到高速公路、住房基建、打井抽水或供电故障等多种人为干扰影响, 沿海台站受台风、强降雨干扰明显, 且华南地区气候潮湿, 山洞内潮湿渗水明显, 仪器受潮后感应器反应不灵敏或者过度反应时有发生, 在复杂多样的干扰源影响下, 观测过程产生大量异常数据, 所以华南地区形变指标体系梳理工作第一步需将干扰数据与前兆异常进行区分。

基于华南地区地壳形变定点观测数据的特殊性, 形变清理小组在进行异常指标体系清理工作中, 收集资料包括: 原始数据、周边显著地震、有记录以来的气象数据、台站工作日志、仪器维修记录等, 同时建立干扰库与异常库, 达到定点形变异常指标清理的目的, 具体包括以下步骤:

步骤一: 扫描各测项分量分钟采样曲线, 发现潮汐畸变、大幅波动、速率改变等中短期异常时, 则查找同一时期的气象数据、台站工作日志和仪器维修记录等观测资料, 以判别该中短期异常是否是由于气象、环境变化或仪器故障等因素造成;

步骤二: 数据异常因干扰而产生, 将干扰源起止时间、受影响起止时间和受干扰后产生的异常形态种类记入干扰库;

步骤三: 不因任何干扰而起的数据异常, 将异常形态种类和异常起止时间记入异常库;

步骤四: 逐条扫描日均值采样曲线, 发现趋势转折、破年变等中长期异常时, 多次重复步骤2和步骤3, 直至将所有干扰异常与前兆异常分别录入干扰库与异常库; 统计各台项不同类型异常在地震前出现的频次, 得到不同指标的预报效能。

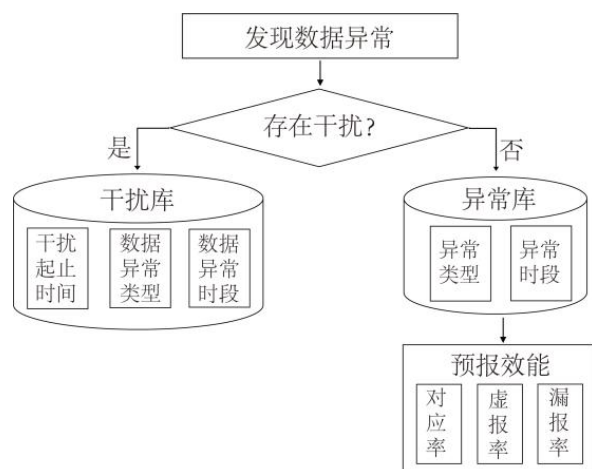


图2 定点形变指标体系建设流程图

Fig.2 The flowchart for fixed-point deformation prediction index system construction

梳理异常高度依赖经验性工作,是摆在指标清理工作之前的重要预备阶段,目前需要解决的关键性问题有两个:

(1)判定数据形态是否异常,需要长期的预报工作经验,且熟悉异常形态的分类原则。预报工作人员可通过经验判断方式扫描后,再次利用形变学科组推广使用的自动算法进行对照检验。

(2)判断曲线形态异常是否由干扰引起,解决方案是尽可能多地收集当地气象资料、仪器维护资料、异常核实报告,日常跟踪数据,发现异常及时进行排查,详细记录人为干扰和周边环境干扰。进一步规范台站日志和省局监控日志,将前兆数据跟踪分析与干扰库的异常判定规则相结合,将有助于今后异常识别向标准化发展。

3 定点形变预测指标梳理成果^[6]

3.1 形变干扰信息库建设

各测项的干扰库记录内容包括:台站代码、测项及测项分量、干扰开始时间、干扰结束时间、干扰描述、干扰产生的异常类别等信息。此步骤排除了大量有明显干扰源的数据异常,是前兆指标梳理的重要预备步骤。

由大量统计可见,如台风等气象因素干扰,通常影响时长在7 d以内,会产生潮汐畸变等短期异常形态;如施工爆破等干扰,通常产生速率改变或大幅波动等较显著的短期异常形态;如测点周边抽水干扰或大型基建干扰,通常造成趋势转折或破年变等长周期异常形态。定点形变测项的干扰库,不仅是人工识别异常的基础,而且也是异常自动算法软件运行的前提,排除有明确干扰源的曲线异常时段,在大量曲线变化中甄别出由地壳运动产生的形变异常信息,是建设高效能的预测指标体系的必要条件。

3.2 中期预测指标部分实例

广东河源室内短水准(瓷标和钢标)为人工观测,是华南地区连续观测时长最长的定点形变测项^[7],利用了自1990年以来持续产出观测数据,自观测以来河源台周边50 km范围内共发生7次 $M_L4.5$ 以上地震,排除2003—2009年周边高速公路修建对观测的影响后,其中4次地震前12月内,水准仪均存在明显破年变异常现象,河源室内短水准

破年变异常对应周边50 km范围内 $M_L4.5$ 以上地震,地震对应率达80%。

梳理江西南昌垂直摆倾斜仪东西分量破年变异常^[8],得到其对应周边300 km范围内 $M_L4.5$ 以上地震对应率达30%。

梧州水管倾斜仪北南分量在梧州 $M_L5.6$ 地震和北流 $M_L5.2$ 地震前半年内,均发生趋势转折异常,除仪器维修该测项分量观测以来仅发生3次趋势转折,梧州水管倾斜仪北南分量趋势转折类异常对应周边200 km范围内 $M_L4.5$ 以上地震对应率达66%。

3.3 短期预测指标实例

福建漳州洞体应变仪2007年正式入网观测,自观测以来在漳州台周边200 km范围内发生了漳州 $M_L4.8$ 地震、仙游 $M_L4.5$ 地震和仙游 $M_L5.2$ 地震等3次中强以上地震,排除人为干扰、仪器故障及气象干扰等因素后,漳州洞体应变东西分量非干扰产生的潮汐畸变类异常6次,其中2次发生在地震前一个月内,漳州洞体应变东西分量潮汐畸变类异常对应周边200 km范围内 $M_L4.5$ 以上地震对应率达33%。

厦门台洞体应变仪2005年正式入网观测,自观测以来,厦门台周边200 km范围内发生了台湾海峡南部 $M_L4.6$ 地震、永春 $M_L4.9$ 地震、漳州 $M_L4.8$ 地震、仙游 $M_L4.5$ 地震和仙游 $M_L5.2$ 地震等5次中强以上地震,排除人为干扰、气象和仪器故障等干扰因素后,厦门台洞体应变仪东西分量和北南分量同时发生速率改变类异常共发生20次,其中8次速率改变类异常发生在上述地震前5个月内,厦门台洞体应变仪速率改变类异常对应周边200 km范围内 $M_L4.5$ 及以上地震对应率达40%。

3.4 指标建设小结

通过对华南地区洞体应变、体应变、垂直摆倾斜仪、水管倾斜仪、连续重力和定点跨断层等定点形变观测数据梳理后,梳理得到定点形变的干扰库和异常库,表1列出预测效能较好的华南定点形变预测指标参数,从定点形变异常指标体系清理结果看,初步可得到以下几点认识:

(1)参与定点形变指标建设共65个测项,得到3个月以内的短期异常指标7项,3个月至1年的中长期预测指标6项。获得的指标较少,主要原因是数字化观测近20年来,华南形变测网内发生中强

地震频次较低，次要原因是仪器敏感度高且受干扰明显，导致部分仪器恰好在周边地震前受到干扰或仪器发生故障，无法判断曲线畸变是否前兆异常。

(2)总结出的 13 项指标其中 8 项指标由洞体应变分量总结得出，可以看出洞体应变仪运行相对稳定，映震效果较好，在潮汐畸变、速率变化、趋势转折、破年变等异常梳理中均可以发现相应预测指标；各观测台的洞体应变映震指标并不一致，且同一台站洞体应变仪不同分量预测指标也不完全相同；

(3)趋势转折和破年变异常对应中长期预测指标较多，破年变类异常的预测时间从异常开始至发震 6 个月~1 年不等，预测空间为 200~300 km 范围内，预测震级以 5 级地震为主，同时也需关注附近 200 km 范围内 $M_L4.0$ 以上地震的危险性。而潮汐畸变、大幅波动等短期影响曲线形态的异常类型

较多地对应中短期预测指标。

(4)河源的室内水准仪属于华南仅有的多年持续观测定点跨断层仪器(数据)，受干扰暂停观测一段时间，恢复观测后其观测数据质量并没降低，破年变异常对应周边 50 km 范围内的 $M_L4.0$ 以上地震，映震效能较好。

(5)与非沿海地区相比，沿海地区观测仪器受环境干扰普遍更严重，仪器折旧老化也明显快于非沿海地区，因维修和干扰导致多数仪器长期趋势规律性被打乱，所以更适合提取短期异常预测指标，而非沿海地区观测数据相对稳定，可提取到一些中期预测指标。

(6)因华南地震频次和异常频次较低，部分测项指标信度不高，运用于日常会商时，应该将多台多测项的观测资料进行综合跟踪识别，排除仪器干扰、环境干扰、人为干扰，将形变、电磁、流体等不同学科长中短临异常进行综合研判^[9]。

表 1 华南地区定点形变观测预报指标效能统计表
Table 1 Statistical table of the effectiveness of fixed-point deformation prediction indexes

异常类型	测项	预报三要素			预报效能			备注
		发震时间/d	震中距离/km	震级/ M_L	对应率/ (%)	虚报率/ (%)	漏报率/ (%)	
潮汐畸变	漳州洞体应变	30	200	4.5	40	60	0	
	汕头洞体应变北南向	60	300	4.5	25	75	0	
速率改变	厦门洞体应变	150	200	4.5	67	33	0	
趋势转折	汕头洞体应变	30	300	4.5	50	50	0	较少发生趋势转折
	上饶垂直摆东西向	60	300	4.5	100	0	50	很少发生趋势转折
	南昌洞体应变	365	274	4.5	100	0	50	
	梧州水管北南向	180	300	4.5	50	50	0	
	长沙洞体应变北南向	30	西南方 500	5.0	100	0	50	
大幅波动	汕头水管倾斜仪	30	300	4.5	100	0	0	很少发生大幅波动
破年变	河源室内短水准	365	50	4.5	80	20	43	
	南昌垂直摆东西向	90	300	4.5	33	67	50	
	长沙洞体应变两分量	200	西南方 200	4.0	100	0	0	
	长沙洞体应变仪北南向	200	西南方 500	5.0	100	0	0	

4 定量化预测指标梳理

形变异常曲线形态的辨识，目前大多基于分析人员主观经验，不同的分析人员对于同一个异常的判定持不同的意见，异常的判定准则缺乏定

量化的表达，判定结果的稳定性和可重复性较低。随着前兆台网的密集布设，采样率的提高，各测项多年时间序列数据的积累量达万亿字节，为实现海量观测数据的快速高效提取，迫切需要针对不同异常类型、推广切实可行的自动识别算法。

李宏伟、闫伟等研究了定点形变趋势转折异常的自动算法,大大提高了人工判别的工作效率,可快速扫描大量时序数据,从统计角度定位令指标的预测效能最佳的异常阈值^[10]。苑争一等研究了基于奇异谱分析算法,在去除典型干扰及长周期趋势变化的基础上,拟合观测资料背景年变序列,自动提取破年变异常特征时段^[11]。此外地震预测要求尽可能准确和精确,即与实际地震相符且预测窗口期尽可能短,以利于采取应急措施的同时尽可能地缩小影响范围,目前自动扫描算法大都结合震例进行动态 R 值检验,递归求解出了最高 R 值评分对应的异常判定阈值^[12-13]。华南预测指标采用 R 值评分作为预测有效性检验的具体方法,即扣除随机概率的地震预测效能的 R 值评分方法:

$R = \text{报对的地震次数} / \text{应预报的地震总次数} - \text{预报占用时间} / \text{预报研究的总时间}$

以福建漳州洞体应变东西分量为例,采用速率变化异常判定自动算法,因漳州台2019年前后周边施工干扰明显,所以采用2008年至2019年漳州洞体应变东西分量原始数据和漳州台干扰信息表,通过遍历扫描 $0^\circ \sim 90^\circ$ 速率变化范围,递归求解出令 R 值最高的速率矢量转角,得到漳州台洞体应变东西分量速率变化异常的预测规则:当速率矢量转角超过阈值 2.06° 时,漳州台周边200 km范围内,30 d内发生 $M_L 4.5$ 以上的地震,预测效能 R : 0.65, R_0 : 0.47,表明漳州洞体应变东西分量速率变化的预测值大于自然概率值,可做为日常跟踪的预测指标。

2019年用自动算法扫描的福建定点形变测项共有41个,每个测项分量分别利用破年变、趋势转折、速率变化3个异常分类自动算法扫描,部分常年没有正常年变的测项不扫描破年变异常,受干扰明显的测项也不参与异常扫描,最终各测项利分别利用不同算法共扫描110次,得到效能评估 R 值明显高于自然概率 R_0 值的指标共计21条,即通过自动算法效能检验的指标。

从福建的自动异常扫描结果可以看出,使用自动算法进行预测具有以下特点:

(1)结论具有可重复性,在相同的干扰库基础上运行同一算法,不同的操作者可产生相同的预报效果;

(2)预测三要素数据精确度高,为保证预测效果最优化,算法会根据不同观测时长的数据精确调整预测要素;

(3)虚报率较高,目前的算法无法兼顾较低的虚报率和较高的报准率,导致虚报率过高。日常使用过程中,自动算法得到的异常往往只能参考使用,自动算法还有待优化和改进。

(4)对干扰库依赖性高,自动算法预测干扰库基础上才能发挥优势,完成干扰库标准化建设,是自动算法得以完善的前提。而目前的干扰库建设高度依赖经验性总结,无法实现标准化和自动化,所以现阶段自动算法扫描可做为经验判别方法的有益补充,并不能完全替代经验判断。

5 结论

2017年以来由华南地区各省/自治区形变分析预报人员共同努力,完成华南定点形变预测指标体系建设,通过遍历扫描所有连续观测资料较好的定点形变数据,统计各测项自观测以来的仪器故障、人为干扰和气象干扰等各种因素,详细归纳不同时段受影响的异常判定类型,总结所到各测项分量的干扰信息库。在干扰库的基础上,统计不同类型异常在测点周边200~300 km范围内对应 $M_L 4.5$ 以上地震的概率,得到预测效能较好的定点形变预测指标。

通过华南定点形变预测指标的建设,总结在少震弱震的华南地区的形变预测指标特征,笔者分析认为洞体应变是华南预测指标效能较的观测仪器,此外模拟观测的定点跨断层也可得到较好的中期预测指标。以福建漳州洞体应变东西分量为例,再次用《地震分析会商技术方法列装清单》方法,采用全国学科组推荐使用的自动识别算法进行检查,扫描福建各测项的预测方法效能,能够通过 R 值效能检验的方法与人工判别均认为漳州洞体应变东西向速率变化异常指标较可靠,自动软件扫描的结果可形成定量化的预测指标。在地震观测海量数据的背景下,使用自动算法完成地震预测工作是提高分析预报人员工作效率的必然选择。

此次华南地区定点形变预测指标清理中,各测项的预测空间多以测点为中心,统计测点周边近圆形空间区域发生的地震,但是大量震例表明地震的孕育和发生与断层运动存在密切关系,今后应考虑测点周边断层的分布及走向,作为测点映震区域的划定依据^[14]。

致谢: 华南各省/自治区预报工作人员赵爱平、黄元敏、谭争光、文翔、原永东、李盛等提供了所在省/自治区的定点形变观测数据, 共同参与了华南定点形变预测指标体系建设工作。

参考文献

- [1] 张国安, 陈德福, 陈耿琦, 等. 中国地壳形变连续观测的发展与展望[J]. 地震研究, 2002, 25(4): 383-390.
- [2] 何成平, 欧阳祖熙. 倾斜形变观测技术发展综述[J]. 地壳构造与地壳应力文集, 2006(00): 149-157.
- [3] 陈棋福主编. 中国震例(2000-2002)[M]. 北京: 地震出版社, 2008.
- [4] 蒋海昆主编. 中国震例(2003-2006)[M]. 北京: 地震出版社, 2014.
- [5] 刘琦, 闫伟, 李智蓉, 等. 南北地震带定点形变前兆异常指标初建[J]. 地震, 2016, 36(4): 76-88.
- [6] 周峥嵘, 吕坚, 周斌, 等. 华南地区地震预测指标体系[M]. 北京: 地震出版社, 2021.
- [7] 杨马陵, 丰晓, 万永芳, 等. 1999年河源2次4~5级地震的中短期前兆异常及其思考[J]. 华南地震, 2003, 23(03): 16-24.
- [8] 曾新福, 汤兰荣, 牛在坡, 等. 探讨水文、气象因素对九江台形变资料的影响[J]. 防灾科技学院学报, 2013, 15(03): 55-60.
- [9] 崔庆谷, 徐漪霖, 杨跃文. 形变观测数据中短临前兆异常的追踪识别方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2014, 34(05): 55-58.
- [10] 李宏伟, 闫伟. 时间序列的趋势转折点提取算法及应用研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(12): 1242-1247.
- [11] 苑争一, 闫伟, 牛安福. 定点形变破年变异常自动识别应用研究[J]. 地震研究, 2020, 43(2): 394-401.
- [12] 马宏生, 刘杰, 吴昊, 等. 基于 R 值评分的年度地震预报能力评价[J]. 地震, 2004(02): 31-37.
- [13] 闫伟, 刘桂萍, 黎明晓, 等. 短期地震预测准确性的定量评价方法[J]. 地震学报, 2019, 41(3): 399-409.
- [14] 季灵运, 朱良玉, 李宁, 等. 基于大地测量观测的断层运动研究综述[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(8): 771-776.